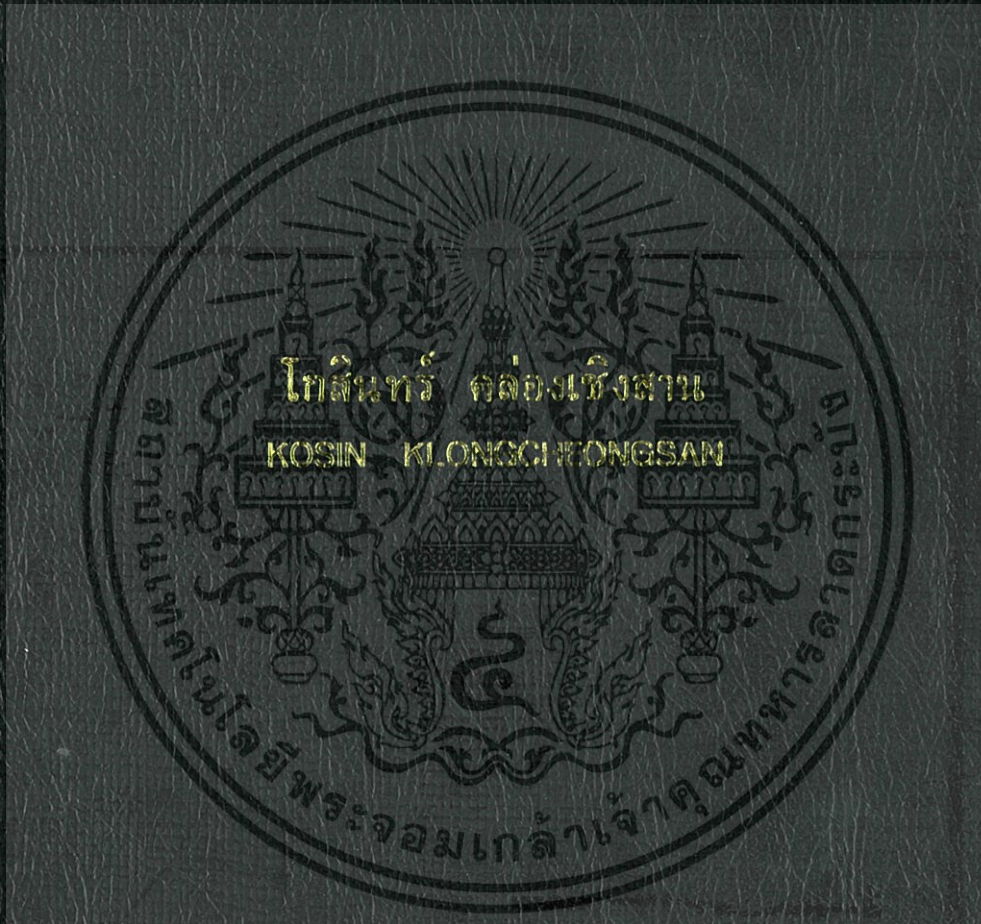


คุณลักษณะการเบรกดาวนจ์ของไมโครแกปเนื่องจากรูปคลื่นเอมพัลส์ทับซ้อน
บนแรงดันกระแสสลับ

BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF MICROGAPS DUE TO
SUPERIMPOSED IMPULSES ON AC VOLTAGE WAVEFORMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-020-007

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณลักษณะการเบรกดาวน์ของไมโครแกปเนื่องจากกรุปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อน
บนแรงดันกระแสสลับ

BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF MICROGAPS DUE TO
SUPERIMPOSED IMPULSES ON AC VOLTAGE WAVEFORMS



ณ.พ.
กย ๖๖๓
๒๕๕๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 110455
วัน,เดือน,ปี...-2 ๗๗. 2553

b. 12256456
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาสาระของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2010-EN-M-020-007 พ.ศ. 2553

**BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF MICROGAPS DUE TO
SUPERIMPOSED IMPULSES ON AC VOLTAGE WAVEFORMS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดและเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2010
KMITL-2010-EN-M-020-007



COPYRIGHT 2010

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Faculty of Engineering ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang รั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ คุณลักษณะการเบรกคาวนซ์ของไมโครแกปเนื่องจากรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

Thesis Title Breakdown Characteristics of Microgaps Due to Superimposed Impulses on AC Voltage Waveforms

นักศึกษา นายโกสินทร์ คล่องเชิงसान

รหัสประจำตัว 49060215

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-020-007

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินโหว	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ดร.ศุภกิตติ์	โชติโก	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 2 ห้องประชุม 6

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 25 เดือน มิ.ย. พ.ศ. 53
ลงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีหน้าที่เก็บเงินค่า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะการเบรกคาวน์ของไมโครเกาปเนื่องจากรูปคลื่น อิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ
นักศึกษา	นายโกสินทร์ คล่องเชิงสาน
รหัสนักศึกษา	49060215
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณพิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณาการ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอคุณลักษณะการเบรกคาวน์ทางไฟฟ้าของไมโครเกาปเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนแหล่งจ่ายแรงดันเอซี 50 เฮิร์ตซ์ เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกจะแสดงการออกแบบและโครงสร้างของวงจรสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนแหล่งจ่ายแรงดันเอซี วงจรประกอบด้วยส่วนแหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำป้องกันการทะลุผ่านของแรงดันอิมพัลส์ถึงแหล่งจ่ายความถี่กำลังและวงจรกรองผ่านความถี่สูงป้องกันการทะลุผ่านของแหล่งจ่ายแรงดันเอซี ไปสู่ส่วนของแหล่งกำเนิดแรงดันอิมพัลส์วงจรควบคุมได้ถูกพัฒนาโดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่ตำแหน่งของรูปคลื่นอิมพัลส์บนแรงดันเอซี จะสามารถถูกระบุได้ ส่วนที่สองของวิทยานิพนธ์แสดงโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันที่ใช้ในการจำลองลักษณะไมโครเกาป แรงดันเอซีที่มีรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนจะถูกป้อนเข้าที่อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีระยะเกาปที่แตกต่างกัน เพื่อบันทึกคุณลักษณะการเบรกคาวน์ของไมโครเกาป

Thesis Title	Breakdown Characteristics of Microgaps due to Superimposed Impulses on AC Voltage Waveforms
Student	Mr. Kosin Klongcheongsan
Student ID.	49060215
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn

ABSTRACT

The thesis presents electrical breakdown characteristics of microgaps due to a 50 Hz AC supply voltage with superimposition of impulse voltage. The contents of the thesis are organised into two parts. The first illustrates a design and construction of a circuit to produce superimposed impulses on AC supply voltage waveforms. The circuit consists of an impulse voltage generation part, a low pass filter to prevent the penetration of the impulse voltage to the power frequency source, and a high pass filter to prevent the penetration of AC supply voltage to the impulse generation part. The control circuit is developed with the use of microcontrollers so that the position of the impulse on the AC voltage waveform can be designated. The second part of the thesis illustrates the construction of sphere electrodes in order to simulate microgaps. The superimposed impulses on AC voltages are applied to the electrodes with different gap distances. The breakdown characteristics of the microgaps, then, are observed.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยความกรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช และอาจารย์ พิรุณ ฤทธิโกวิท รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์แนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จนผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาความมีน้ำใจ

ขอขอบพระคุณ ผศ. วรวิทย์ สมหา แห่งภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์แนะนำแนวทางในการเขียนโปรแกรมภาษา C ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นาย อนุรักษ์ ขำดี รุ่นพี่ปริญญาโท รุ่นน้องปริญญาโท และรุ่นน้องปริญญาตรี ในห้องวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายต้องขอกราบเท้า คุณพ่อ สมพงษ์ คล่องเชิงสาน และคุณแม่ อรุณีย์ คล่องเชิงสาน ผู้ให้กำเนิดลูก มอบ อติศ ปัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย ตลอดชีวิตที่ผ่านมาท่านทั้งสอง อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจในการต่อสู้กับชีวิต รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

โกสินทร์ คล่องเชิงสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	2
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 หลักการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz.....	4
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	5
2.1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	5
2.1.2 แรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่ง.....	6
2.1.3 แรงดันอิมพัลส์สติปพรอนต์.....	7
2.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	7
2.1.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์.....	11
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบรกดาวน์ในก๊าซ.....	13
2.2.1 เบรกดาวน์ในก๊าซ.....	13
2.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวน์.....	14
2.2.3 ประจุค้างมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่างขั้ว.....	18
2.2.4 ผลของรูปลักษณะอิเล็กโทรด.....	18
2.2.5 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 วงจรกรองผ่านความถี่.....	22
2.3.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง.....	23
2.3.2 ชนิดของวงจรกรองผ่านความถี่.....	23
2.4 สวิตช์อิเล็คทรอนิกส์ IGBT และวงจรขับ IGBT.....	28
2.4.1 สวิตช์อิเล็คทรอนิกส์ IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor).....	29
2.5 วงจรควบคุมมุมเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
2.5.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
2.5.2 การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์.....	32
บทที่ 3 ผลการจำลองการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจากวงจร.....	33
3.1 การจำลองการออกแบบและการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	33
3.1.1 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	33
3.1.2 การจำลองการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม PSpice.....	37
3.1.3 การสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	38
3.2 การจำลองการออกแบบและการสร้างวงจรกรองผ่านความถี่.....	39
3.2.1 การจำลองการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่.....	39
3.2.2 การสร้างวงจรกรองผ่านความถี่.....	40
3.3 การสร้างวงจรควบคุมมุมเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	41
3.3.1 การออกแบบวงจรควบคุมมุมเฟส.....	41
3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรตรงกลม.....	43
3.4.1 แกปตรงกลม.....	43
3.4.2 ลักษณะสมบัติของแกปอากาศตรงกลม.....	44
3.4.3 ข้อพึงปฏิบัติในการใช้แกปตรงกลม.....	44
3.5 การจำลองการออกแบบและการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดัน กระแสสลับ 50 Hz.....	49
3.5.1 การจำลองการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดัน กระแสสลับ 50 Hz ด้วยโปรแกรม PSpice.....	49
3.5.2 การสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลลัพธ์จากการสร้าง.....	50
3.6.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	50
3.6.2 วงจรแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz.....	51
บทที่ 4 การศึกษาคุณลักษณะการเบรกความถี่ของไมโครแกป.....	56
4.1 คุณลักษณะการเบรกความถี่ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์.....	56
4.1.1 การวัดแรงดันเบรกความถี่ของแกปอากาศทรงกลม.....	56
4.1.2 แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก.....	59
4.1.3 แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ.....	67
4.2 คุณลักษณะการเบรกความถี่ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz.....	77
4.2.1 แรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 0 องศา.....	77
4.2.2 แรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 90 และ 270 องศา.....	91
4.3 แนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคุณลักษณะการเบรกความถี่ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz.....	104
4.3.1 แรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 0 องศา.....	104
4.3.2 แรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 90 และ 270 องศา.....	112
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1 สรุป.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	122
เอกสารอ้างอิง.....	123
ภาคผนวก.....	126
ภาคผนวก ก.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ของรูปคลื่น k_1, k_2	11
2.2 ชนิดรังสีอัลตราไวโอเลต(UV).....	19
2.3 ค่า Work function ของธาตุต่างๆ.....	21
2.4 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	31
3.1 ค่าตัวแปรองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการจำลองแบบ ด้วยโปรแกรม PSpice และใช้ในการทดลองจริง.....	38
3.2 ขนาดทรงกลมมาตรฐานและระยะแกปวัดแรงดัน	44
3.3 ค่าตัวแปรองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแส สลับ 50 Hz ที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice และใช้ในการทดลองจริง.....	50
4.1 ตารางความขึ้นสัมบูรณ์.....	58
4.2 การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ผ่านการคำนวณเพื่อหาค่าเบรคควาน์มาตรฐานของ แกปทรงกลมของรูปคลื่น Impulses.....	75
4.3 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา ระยะแกป 10 μm	78
4.4 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา ระยะแกป 20 μm	80
4.5 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา ระยะแกป 30 μm	82
4.6 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา ระยะแกป 10 μm	84
4.7 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา ระยะแกป 20 μm	86
4.8 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา ระยะแกป 30 μm	88
4.9 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา ระยะแกป 10 μm ...	91
4.10 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา ระยะแกป 20 μm ...	93
4.11 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา ระยะแกป 30 μm ...	95
4.12 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศา ระยะแกป 10 μm	97
4.13 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศา ระยะแกป 20 μm	99
4.14 แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศา ระยะแกป 30 μm ...	101
4.15 การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ผ่านการคำนวณเพื่อหาค่าเบรคควาน์มาตรฐานของ แกปทรงกลมของรูปคลื่น Superimposed.....	118
5.1 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณของแรงดัน Impulses กับ Superimposed Impulses.	120
5.2 คุณสมบัติของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz.....	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็น Superimposed และเกิดการเบรกดาวน์ด้านขาเข้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	1
2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (อิมพัลส์ซึ่วบวก).....	4
2.2 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 รูปคลื่นเต็ม.....	5
2.3 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 รูปคลื่นตัดหลังคลื่น.....	5
2.4 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น.....	6
2.5 รูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60-1.....	7
2.6 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจร A.....	7
2.7 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจร B.....	7
2.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	8
2.9 เส้นกราฟใช้หาแรงดันดิสชาร์จเบรกดาวน์ 50%.....	12
2.10 เส้นโค้งพาสเซนและการเบรกดาวน์จากไมโครแกปด้วยอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ.....	17
2.11 ย่านความยาวคลื่นระดับต่างๆ.....	19
2.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร.....	23
2.13 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(RC).....	24
2.14 ผลตอบสนองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	25
2.15 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่สูงผ่าน(RC).....	25
2.16 ผลตอบสนองวงจรกรองความถี่สูงผ่าน.....	26
2.17 ตัวอย่างวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(RLC).....	26
2.18 ผลตอบสนองวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน.....	27
2.19 ตัวอย่างวงจรกรองแถบความถี่หยุด (RLC).....	27
2.20 ผลตอบสนองวงจรกรองแถบความถี่หยุด.....	28
2.21 สัญลักษณ์พื้นฐานจากมอสเฟตและพื้นฐานจากบีเจที.....	29
2.22 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	29
2.23 คุณลักษณะในอุดมคติ.....	30
2.24 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	31
3.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 การต่อความต้านทานระหว่างเกตและอิมิตเตอร์ของ IGBT.....	36
3.3 วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250.....	36
3.4 วงจรขับ IGBT.....	37
3.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ Simulation ด้วยโปรแกรม PSpice.....	38
3.6 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจริง.....	38
3.7 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ได้จากการออกแบบ.....	39
3.8 วงจรกรองผ่านความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบ.....	40
3.9 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่สร้างขึ้นจริง.....	40
3.10 วงจรกรองผ่านความถี่สูงที่สร้างขึ้นจริง.....	40
3.11 การทำงานภายในวงจรควบคุมมุมเฟส.....	41
3.12 พังเวลาการทำงานของ IGBT.....	41
3.13 Flowchart การทำงานของวงจรควบคุมมุมเฟส.....	42
3.14 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	43
3.15 วงจร Zero crossing ที่สร้างขึ้นจริง.....	43
3.16 การติดตั้งแกปทรงกลม $\Phi > 25$ cm แนวตั้ง.....	46
3.17 การติดตั้งแกปทรงกลม $\Phi \leq 25$ cm แนวนอน.....	46
3.18 ภาพฉายการออกแบบกล่องอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลม.....	47
3.19 กล่องอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลมที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidwork.....	48
3.20 กล่องอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกลมที่สร้างขึ้นจริง.....	48
3.21 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ Simulation ด้วยโปรแกรม PSpice.....	49
3.22 วงจรที่สร้างขึ้นจริง.....	49
3.23 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก.....	50
3.24 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก.....	51
3.25 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 90°	51
3.26 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 180°	52
3.27 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 270°	52
3.28 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 360°	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 90°	53
3.30 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 180°	54
3.31 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 270°	54
3.32 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 360°	55
4.1 R-shunt $4.32\text{ m}\Omega$ ที่ใช้ต่อรวมในวงจรเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์.....	58
4.2 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เบรกคาวน์ชั่วบวกของไมโครแกป.....	59
4.3 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $10\ \mu\text{m}$ (ชั่วบวก).....	60
4.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $20\ \mu\text{m}$ (ชั่วบวก).....	62
4.5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $30\ \mu\text{m}$ (ชั่วบวก).....	64
4.6 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $40\ \mu\text{m}$ (ชั่วบวก).....	66
4.7 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เบรกคาวน์ชั่วลบของไมโครแกป.....	67
4.8 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $10\ \mu\text{m}$ (ชั่วลบ).....	68
4.9 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $20\ \mu\text{m}$ (ชั่วลบ).....	70
4.10 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $30\ \mu\text{m}$ (ชั่วลบ).....	72
4.11 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์ ของไมโครแกประยะ $40\ \mu\text{m}$ (ชั่วลบ).....	74
4.12 กราฟแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์ของไมโครแกป.....	75
4.13 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเบรกคาวน์ชั่วบวก ของไมโครแกป.....	77
4.14 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเบรกคาวน์ชั่วลบ ของไมโครแกป.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 10 μm	78
4.16 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 10 μm	79
4.17 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 20 μm	80
4.18 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 20 μm	81
4.19 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 30 μm	82
4.20 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 30 μm	83
4.21 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 10 μm	84
4.22 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 10 μm	85
4.23 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 20 μm	86
4.24 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 20 μm	87
4.25 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 30 μm	88
4.26 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 30 μm	89
4.27 กราฟแรงดันอิมพัลส์เบรกคาว์นซ์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 0 องศาของไมโครแกปที่ระยะ 10-30 μm	90
4.28 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาว์นซ์ของไมโครแกประยะ 10 μm	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 10 μm	92
4.30 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 20 μm	93
4.31 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 20 μm	94
4.32 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 30 μm	95
4.33 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 30 μm	96
4.34 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 10 μm	97
4.35 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 10 μm	98
4.36 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 20 μm	99
4.37 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 20 μm	100
4.38 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 30 μm	101
4.39 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาว์นของไมโครแกประยะ 30 μm	102
4.40 กราฟแรงดันอิมพัลส์เบรกดาว์นทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 90 องศาชั่ววอกและ 270 องศาชั่ววอกของไมโครแกปที่ระยะ 10-30 μm	103
4.41 กราฟแนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคุณลักษณะแรงดันอิมพัลส์เบรกดาว์นทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 0 องศาของไมโครแกป	111
4.42 กราฟแนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคุณลักษณะแรงดันอิมพัลส์เบรกดาว์นทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 90 องศาชั่ววอกและ 270 องศาชั่ววอกของไมโครแกป	118

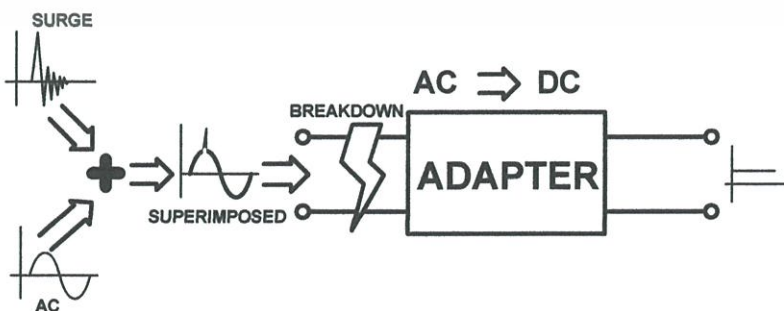
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงดันนั้นมีโอกาสได้รับแรงดันเกิน แรงดันเกินอาจมีลักษณะเป็นอิมพัลส์[1] หรือแรงดันเกินชั่วขณะ (transient overvoltage) จึงอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ เมื่อแรงดันเกินชั่วขณะหลุดรอดเข้ามาในระบบแรงดันต่ำนั้นอาจทำให้การฉนวนต่างๆของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ฉนวนระหว่างสายวงจรทองแดงหรือฉนวนอื่นๆของอุปกรณ์ย่อยแต่ละตัวเกิดความผิดปกติขึ้นได้ ซึ่งในขณะนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจกำลังทำงานอยู่ โดยมากมักจะใช้แรงดันกระแสสลับเป็นแหล่งกำลังงาน หากมีแรงดันเกินหลุดรอดระบบป้องกันเข้ามาอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยต่างๆต่อเป็นวงจรย่อยอยู่จะได้รับแรงดันพร้อมกัน 2 ส่วนคือแรงดันกระแสสลับซึ่งใช้งานตามปกติและแรงดันเกินซึ่งจะทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับซึ่งอาจจะเกิดทับซ้อนที่มุมโคมมหนึ่งของแรงดันกระแสสลับก็ได้ ลักษณะการลัดวงจรที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับได้กับการเบรคคาว์ของไมโครแก๊ป จึงทำให้เกิดงานวิจัยเพื่อหาคุณลักษณะแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50Hz[2,3](Breakdown Characteristics due to Superimposed Impulses on AC Voltage Waveforms) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ถูกลดทอนแรงดันลงมาเรื่อยๆจากระบบป้องกันแรงดันเกินมาจนถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันต่ำ เมื่อแรงดันเกินที่หลุดรอดเข้าไปในอุปกรณ์ไฟฟ้าแล้วการฉนวนภายในอาจจะเป็นการฉนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือการฉนวนระหว่างสายวงจรด้านเข้า Adapter ที่เป็นทองแดงอาจจะทนต่อแรงดันเกินนั้นไม่ได้ทำให้เกิดการเบรคคาว์ จึงมีการศึกษาคุณลักษณะการเบรคคาว์ของแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับตามมุมเฟสต่างๆว่าจะมีผลแตกต่างกันอย่างไร โดยเปรียบเทียบการเบรคคาว์ด้วยไมโครแก๊ปที่ออกแบบสร้างขึ้นตามลักษณะการออกแบบแก๊ปทรงกลม[4]



รูปที่ 1.1 รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็น Superimposed และเกิดการเบรคคาว์ด้านขาเข้าของอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาคาบการเบรกควานซ์ของไมโครแกป เมื่อเกิดการเบรกควานซ์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ และอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ซึ่งเป็นแรงดันที่เสมือนแรงดันที่เกิดขึ้นจริงเมื่อเกิดแรงดันอิมพัลส์หรือแรงดันเกินชั่วขณะ เข้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการจ่ายแรงดันกระแสสลับเพื่อใช้งานอยู่ จึงทำให้เกิดงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณลักษณะแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมเฟสต่างๆ โดยใช้ไมโครแกปเป็นฉนวน ซึ่งเชื่อว่าในอนาคตอาจจะมีการนำลักษณะแรงดันดังกล่าวนี้มาสร้างเป็นมาตรฐานขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อไป

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมุติฐานของการศึกษา โดยอ้างอิงผลจากปรากฏการณ์แรงดันเกินที่เกิดขึ้นอยู่จริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการจ่ายแรงดันกระแสสลับเพื่อใช้งานอยู่ ทำการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์ขนาดพิคคแรงดัน 1200 Vp โดยสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μ s ตามมาตรฐาน IEC 60-1 และทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนอากาศไมโครแกป โดยใช้แรงดันที่สร้างขึ้นและแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมต่างๆ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการศึกษาหาคุณลักษณะการเบรกควานซ์ของไมโครแกปเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำหนดมุมเฟสต่างๆ ซึ่งสามารถกำหนดมุมเฟสทับซ้อนได้ที่ละ 1 องศาตามต้องการ และใช้ IGBT เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวส่งผ่านแรงดันซึ่งสามารถทนแรงดันกระแสตรงได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบเพื่อนำมาสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยในวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์และแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz จะถูกป้องกันการรบกวนจากแรงดันแต่ละแหล่งจ่ายซึ่งกันและกันโดยใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูงและวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ[5] และมีการนำวงจรกรองผ่านความถี่สูงมาแทนแกปทรงกลมที่ทำหน้าที่แยกวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ออกจากวัตถุทดสอบและแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุฉนวนไฟฟ้าส่วนมากที่ผ่านมาใช้แรงดันทดสอบแยกเป็นประเภทๆ ได้แก่ แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น โดยลักษณะแรงดันที่เกิดขึ้นจริงเมื่อเกิดแรงดันเกินนั้นมีลักษณะทับซ้อนกันของแรงดันอิมพัลส์บนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz หรือแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนกระแสตรงซึ่งยังไม่มีมีการใช้ในการทดสอบ ใน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz เพื่อใช้ศึกษาหาคุณลักษณะการเบรคความถี่ของไมโครแกป โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมเฟสต่างๆ ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำหนดมุมเฟสต่างๆ และได้ใช้โปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรรองผ่านความถี่จาก Website[6] และโปรแกรม PSpice ก่อนที่จะทำการประกอบสร้างเพื่อศึกษาทดลองต่อไป ผลการทดลองจะสามารถอธิบายผลกระทบจากการเบรคความถี่ของแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับได้ดีมากขึ้นมากกว่าการทดสอบด้วยแรงดันชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว ทำให้การทดสอบแบบนี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz โดยใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลองการออกแบบและออกแบบวงจรรองผ่านความถี่โดยใช้โปรแกรมของมหาวิทยาลัย St. Andrews[6] และทำการสร้างวงจรการทดลองจริง และทำการทดลองวิเคราะห์เก็บผลการทดลองของแรงดันและกระแสเบรคความถี่ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อเกิดการเบรคความถี่ด้วยแรงดันอิมพัลส์ และแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ผ่านไมโครแกปแบบทรงกลม

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาและสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม PSpice
3. ศึกษาการทำงานเบื้องต้นของ IGBT
4. ศึกษาและสร้างวงจรรองผ่านความถี่ต่ำและวงจรรองผ่านความถี่สูง
5. ศึกษาการทำงานและสร้างวงจรควบคุมมุมเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
6. ออกแบบการสร้างชุดทดสอบไมโครแกปทรงกลม
7. ศึกษาทฤษฎีและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ไฟโตอิเล็กทริก
8. วิเคราะห์การเบรคความถี่ของไมโครแกปด้วยแรงดันอิมพัลส์
9. วิเคราะห์การเบรคความถี่ของไมโครแกปด้วยแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz
10. สรุปผลการจำลอง

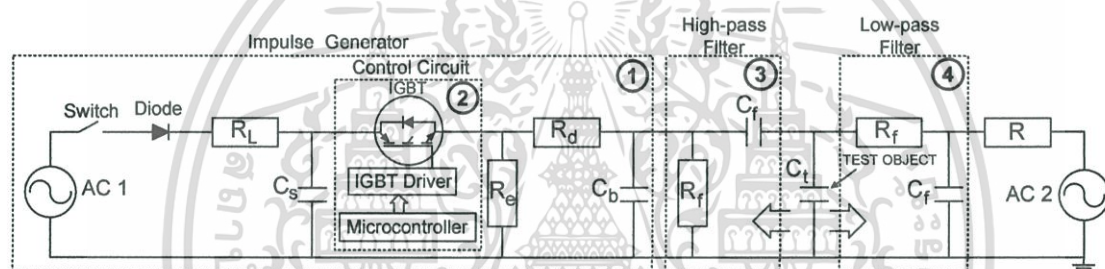
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดัน

กระแสสลับ 50 Hz

วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่สร้างขึ้นประกอบด้วย แหล่งจ่าย 2 ส่วนคือส่วนที่สร้างแรงดันอิมพัลส์กับส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ซึ่งแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน IEC 60-1 ทั้งแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ โดยเงื่อนไขที่สำคัญคือวงจรทั้งสองเมื่อนำมาต่อรวมกันจะต้องไม่ถูกแรงดันของอีกวงจรมารบกวนและแรงดันทั้งสองจะต้องมาตกระอ่อมเฉพาะวัตถุประสงค์สอบเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีวงจรรองต่ออันดับขึ้นระหว่างแหล่งจ่ายทั้งสอง



รูปที่ 2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (อิมพัลส์ชั่ววอก)

ส่วนประกอบหลักๆของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ประกอบด้วย

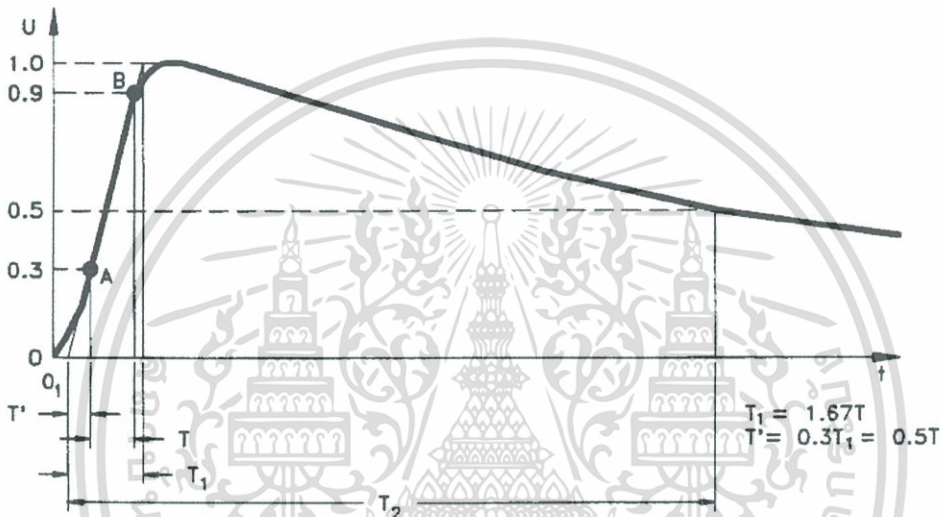
1. วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator)
2. วงจรควบคุมมมเฟส (Control Circuit)
3. วงจรกรองผ่านความถี่สูง (High - pass Filter)
4. วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low - pass Filter) ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรการสร้างแรงดันอิมพัลส์

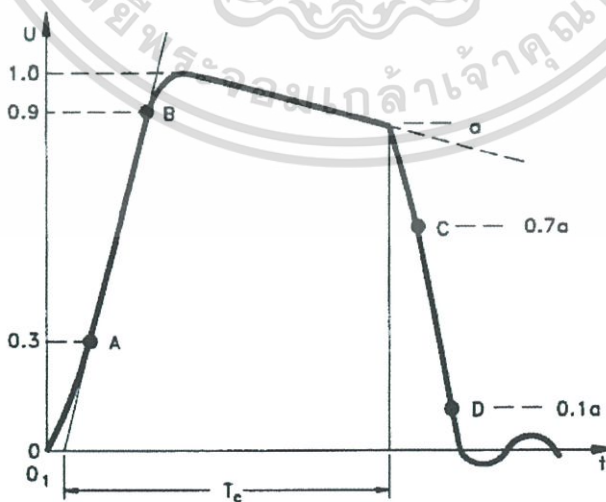
แรงดันอิมพัลส์ต่างๆ ไป แบ่งตามลักษณะรูปคลื่น ได้ 3 แบบ คือ

2.1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นแรงดันทรานเซียนส์ที่มีแรงดันเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็ว โดยอาจมีลักษณะเป็นรูปคลื่นเต็มหรือรูปคลื่นตัด คุณลักษณะต่างๆของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60-1 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 , 2.3 และ 2.4 ซึ่งมีการกำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

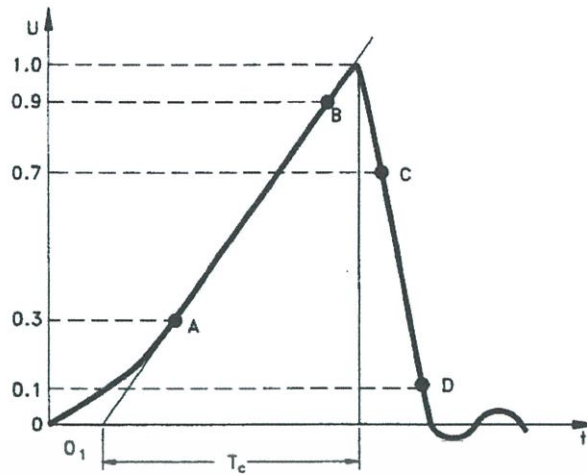


รูปที่ 2.2 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 รูปคลื่นเต็ม



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 รูปคลื่นตัดหลังคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

- ขั้วของแรงดัน หมายถึง ชนิดของแรงดันเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ
- ขนาดแรงดัน U_m หมายถึง ค่าแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- เวลาคู่หน้าคลื่น T_1 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีค่าเป็น 1.67 เท่าของช่วงเวลาที่แรงดันมีค่า 30% ไปถึง 90%
- เวลาหางคลื่น T_2 หมายถึง ช่วงเวลาดังแต่จุดเริ่มต้นเสมือนของรูปคลื่นผ่านค่ายอดของแรงดันจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2
- ช่วงเวลาคู่หน้าคลื่นตัด T_c หมายถึง ช่วงเวลาดังแต่จุดเริ่มต้นเสมือนจนกระทั่งถึงจุดที่รูปคลื่นตัดลง ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4

สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-1 กำหนดไว้ดังนี้

เวลาคู่หน้าคลื่น (T_1)	$1.2 \mu s \pm 0.36 \mu s$
เวลาหางคลื่น (T_2)	$50 \mu s \pm 10 \mu s$
ค่ายอดแรงดัน U_m	$\pm 3\%$

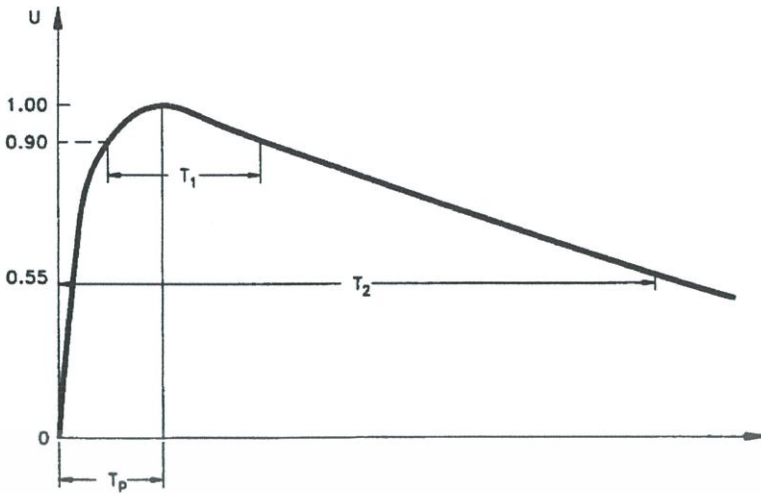
2.1.2 แรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซิ่ง

ในรูปที่ 2.5 แสดงถึงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งแตกต่างไปจากแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าก็คือ ช่วงหน้าคลื่นจะยาวกว่า ความหมายของเวลาช่วงหางคลื่น T_2 จะมีนิยามเหมือนอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ส่วนเวลาช่วงหน้าคลื่นจะกำหนดเป็น T_p ซึ่งหมายถึงเวลาที่นับจากจุดที่แรงดันเริ่มจากศูนย์จริงไปจนถึงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด และ T_1 เป็นช่วงเวลาที่แรงดันมีค่ามากกว่า 90% ของค่าสูงสุด รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ซิ่ง โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่น 250/2500 μs และกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อน ได้อยู่ในเกณฑ์ดังนี้

$$T_p = 250 \mu s \pm 20\%$$

$$T_2 = 2500 \mu s \pm 60\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



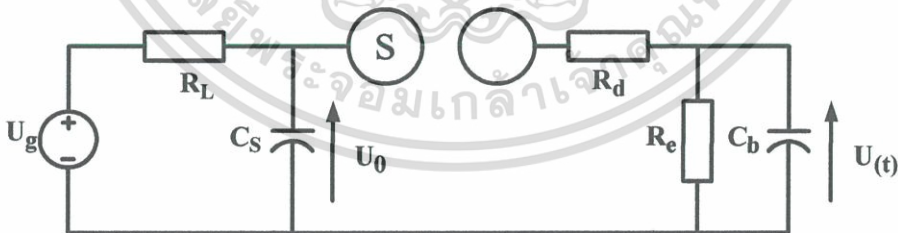
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นอิมพัลส์สวิทซ์ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60-1

2.1.3 แรงดันอิมพัลส์สติปฟรอนต์

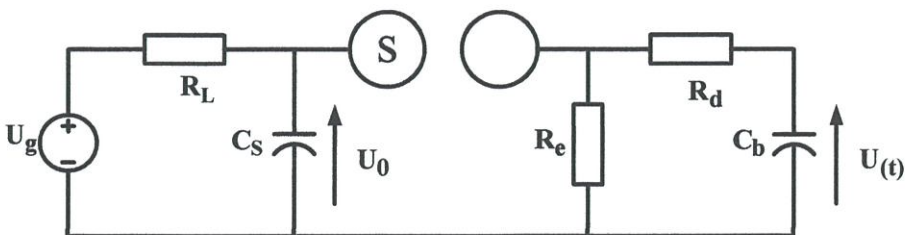
แรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปร่างคล้ายกับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่างกันที่แรงดันอิมพัลส์แบบสติปฟรอนต์มีช่วงเวลากการเปลี่ยนแปลงช่วงหน้าคลื่นเร็วกว่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันอิมพัลส์ สวิทซ์ซึ่ง

2.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์[4]

การสร้างแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ RC โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วปล่อยให้การคายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นตามต้องการได้ วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปมี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจร A



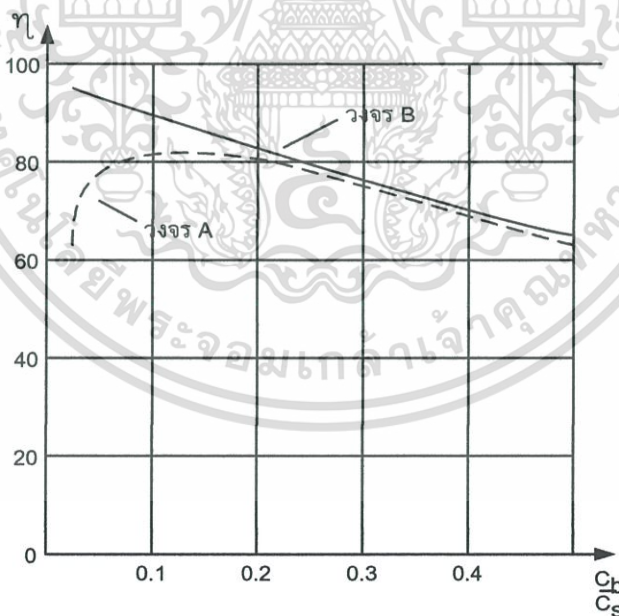
รูปที่ 2.7 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจร B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายในรูปวงจร A และ B

- U_g = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์
- U_0 = แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b = ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- R_L = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_d = ความต้านทานหน่วง เป็นตัวปรับหน้าคลื่น T_1
- R_e = ความต้านทานปล่อยประจุ เป็นตัวปรับหางคลื่น T_2
- $U(t)$ = แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- S = สปาร์กแก๊ป เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุ และทำหน้าที่เป็น ไกสวิดซ์ใกล้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s คิซซาร์จประจุให้กับโหลด

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50 μ s) ประสิทธิภาพของวงจรอิมพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C_b และ C_s มีค่าดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกวงจร B ดังในรูปที่ 2.7 หลักการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มต้นเราจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับตัวเก็บประจุ C_s เมื่อได้ระดับแรงดันตามที่ต้องการแล้ว สปาร์กแก๊ป S ที่ทำหน้าที่เหมือนสะพานไฟจะทำงานโดยปิดวงจร ทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ C_s ถ่ายเทผ่านความต้านทาน R_d ไปสู่ตัวเก็บประจุ C_b ซึ่งเป็นลักษณะของการชาร์จประจุในวงจร RC ทั่วไป ทำให้เกิดสถานะทรานเซียนส์ในส่วนหน้าคลื่น เมื่อแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_s ลดลงจนมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_b ตัวเก็บประจุทั้งสองจะคายประจุผ่านความต้านทาน R_e โดยประจุที่สะสมอยู่ใน C_s จะถ่ายเทผ่าน R_e โดยตรง ส่วนประจุที่สะสมอยู่ใน C_b จะถ่ายเทผ่าน R_d และ R_e อันเป็นลักษณะของวงจร RC ช่วงการคายประจุ ทำให้เกิดเป็นสถานะ ทรานเซียนส์ในช่วงหางคลื่น ฉะนั้นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้คือผลรวมของสถานะทรานเซียนส์ ของวงจร RC ช่วงชาร์จประจุและช่วงคายประจุ

จากหลักการของวงจรจะเห็นได้ว่า ค่า C_b และ R_d จะเป็นตัวกำหนดเวลาหน้าคลื่น ส่วนค่า C_s และ R_e จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาลงหลังคลื่น โดยจากวงจรที่เป็นลักษณะ RC เราสามารถวิเคราะห์และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [7]

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left\{ e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t} \right\} \quad (2.1)$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{B_1}{2} m \left\{ \left(\frac{B_1}{2} \right)^2 - B_0 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

โดยที่

$$B_1 = \frac{R_d C_b + R_e C_b + R_e C_s}{R_d R_e C_b C_s} \quad (2.3)$$

$$B_0 = \frac{1}{R_d R_e C_b C_s} \quad (2.4)$$

$$k = R_d C_b \quad (2.5)$$

สมการที่ 2.1 ถึง 2.5 เป็นสมการแสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามเวลาโดยขึ้นกับค่าองค์ประกอบต่างๆของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ในทางกลับกันเราสามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบ R_e และ R_d ได้จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 และได้สมการที่ 2.6 กับ 2.7 ดังนี้

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \quad (2.6)$$

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\} \quad (2.7)$$

สำหรับวงจรในรูปที่ 2.7 เมื่อเราทราบค่าองค์ประกอบต่างๆแล้วเราสามารถหาเวลาหน้าคลื่น (T_1) และ เวลาหางคลื่น (T_2) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (2.8)$$

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (2.9)$$

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง $U(t)$ จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_0 เพราะมีการถ่ายเทประจุระหว่าง C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ $U(t)$ ต่อ U_0 จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของวงจรโดยประมาณหาได้จาก

$$\eta = \frac{U(t)}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (2.10)$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูง และให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนด ควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ โดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10 C_b$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_0
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- อัตราการคิสราร์จำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่า

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_0 ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-3} \quad (2.11)$$

- เมื่อ W คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ
 C_s คือ ความจุไฟฟ้าของของตัวเก็บประจุเป็น μF
 U_0 คือ แรงดันอัดประจุเป็น kV

โดย k_1, k_2 เป็นค่าคงที่ของรูปคลื่น แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของรูปคลื่น k_1, k_2

T_1/T_2 (μs)	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	1.44	1.49	3.48	0.80
1.2/50	0.73	2.96	68.2	0.405
1.2/200	0.70	3.15	284	0.381
250/2500	0.87	2.41	2877	104

จากสมการที่ 2.8 เราสามารถปรับค่า T_1 โดยการเปลี่ยนค่า C_s, C_b และ R_d เช่นเดียวกับ T_2 ที่เราสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนค่า C_s, C_b และ R_e สำหรับวงจรในรูปที่ 2.7 เราจะไม่ได้คิดถึงผลจากความเหนี่ยวนำที่อาจเกิดขึ้นในทางปฏิบัติ ซึ่งอาจส่งผลให้รูปคลื่นที่ออกมาเกิดผิดเพี้ยน หรือเกิดการแกว่งในวงจร RLC

2.1.5 การวัดแรงดันอิมพัลส์[4]

การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ

1. วัดด้วยแกปทรงกลม
2. วัดด้วยระบบโวลเตจดีไวเดอร์

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม

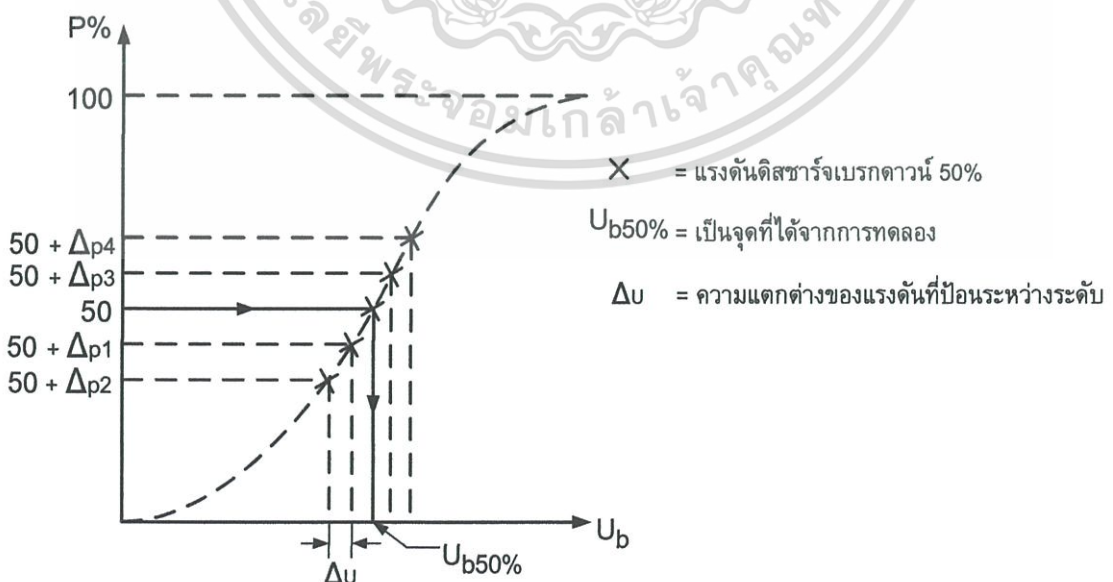
การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม ก็ปฏิบัติเช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรง กล่าวคือค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมนั้น ขึ้นอยู่กับระยะแกปของทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และสถานะอากาศรอบๆ ทรงกลมการเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ในช่องแกปที่เป็นอากาศ ใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาที ฉะนั้นในกรณีของแรงดันกระแสสลับ ช่วงเวลาของแรงดันที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลนัยสำคัญต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ U_b เบรกดาวน์จะเกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง คือ E_b แต่ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ช่วงเวลาของแรงดันจะมีความสำคัญต่อการเกิดเบรกดาวน์ หรือค่าแรงดันเบรกดาวน์ ผลของเวลาดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยเรื่องเวลาล่าช้า (time lag) ของการเกิดเบรกดาวน์ของแกปด้วยแรงดันอิมพัลส์

วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม มีความแตกต่างที่สำคัญจากการวัดแรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับ ก็คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันสูงขึ้นจนกระทั่งการเกิดเบรกดาวน์ หากแต่ต้องใช้การอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อน แล้วจึงปล่อยคิซซาร์จออกไปที่แกปทรงกลม ซึ่งอาจเกิดเบรกดาวน์หรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งๆ ที่แรงดันสูงมากพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับความน่าจะเป็น (probability) และขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไป ก็จะไม่เกิดเบรกคาวน์ที่แกปทรงกลมวัดแรงดัน แต่ถ้าแรงดันอัดประจุเพิ่มสูงขึ้นมากพอ ก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรกคาวน์มากขึ้น และถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไป ก็จะเกิดเบรกคาวน์ทุกครั้งที่คายประจุออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรกคาวน์ 50% คือ $U_{b50\%}$ อันหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าปานกลาง บางทีก็เรียกว่า ค่าอิมพัลส์วิกฤต (Critical impulse) ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกคาวน์ที่แกปของทรงกลม เป็นจำนวนครั้งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่คิสซาร์จออกไป ฉะนั้นการหาค่า $U_{b50\%}$ จึงหาได้โดยวิธีการคายประจุออกไปเป็นจำนวนหลายๆครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรกคาวน์เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่คิสซาร์จออกไป เช่น คิสซาร์จ 10 ครั้ง แล้วเกิดเบรกคาวน์ที่แกปทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ $U_{b50\%}$ แต่การที่จะอัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำให้ได้ค่าแรงดันเบรกคาวน์ 50% พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา

การวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ โดยทั่วไปวัดได้ 2 วิธี คือวิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple level voltage method) และวิธีปรับขึ้นลง (Up and down method)

1. วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ เป็นวิธีหาค่า $U_{b50\%}$ ด้วยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกคาวน์กับค่าแรงดัน ป้อนแรงดันอย่างน้อย 10 ครั้ง ที่แรงดันแต่ละค่า หรือแต่ละระดับต่างกัน ΔU น้อยกว่า 3% ของค่าแรงดันเบรกคาวน์ 50% ที่คาดหมาย ทดลองแรงดันหลายระดับที่สูงกว่า และที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดเบรกคาวน์ 50% จากเส้นกราฟนี้จะหาค่าแรงดันคิสซาร์จ 50% ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟใช้หาแรงดันคิสซาร์จเบรกคาวน์ 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **วิธีปรับขึ้นลง** เป็นวิธีหาค่าแรงดันคิซซาร์จเบรกดาวน์ 50% โดยการเริ่มต้นเลือกแรงดันค่าหนึ่ง U_k ที่คาดว่าจะจะเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ 50% ป้อนเข้าไปที่แกปทรงกลม ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลมให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔU ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3% ของแรงดันคิซซาร์จ 50% จึงป้อนแรงดันใหม่ด้วยค่า $U_k + \Delta U$ แต่ถ้าเกิดเบรกดาวน์ที่แกปทรงกลมที่แรงดัน U_k ก็ให้ลดแรงดันเหลือเพียง $U_k - \Delta U$ ฉะนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไป จะขึ้นอยู่กับผลที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันครั้งที่ผ่านมา ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ จะหาค่าแรงคิซซาร์จเบรกดาวน์ 50% ได้จากสมการ

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n} \quad (2.12)$$

โดยที่ n_v คือ จำนวนครั้งที่ที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน U_v

และ $\sum n$ คือ ผลรวมจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน ควรจะ > 20

ค่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 50% วัดที่สภาพอากาศของห้องที่มีใช้สภาวะมาตรฐาน เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ต้องแก้ด้วยตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ k_d เช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับ หรือกระแสตรง

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบรกดาวน์ในก๊าซ

2.2.1 เบรกดาวน์ในก๊าซ

ลักษณะสมบัติของวัสดุฉนวนนับว่ามีความสำคัญยิ่งต่อเทคนิคการฉนวนด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ก๊าซนั้นเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเทคนิคการฉนวน สภาพการเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีคิซซาร์จ (Discharge) ในก๊าซเกิดขึ้น คิซซาร์จในก๊าซเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ ได้แก่ อิเล็กตรอน และไอออนที่เกิดจากระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) ซึ่งกระบวนการไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคประจุเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรด โดยที่สนามไฟฟ้าที่จะมากกระตุ้นให้อนุภาคประจุมีพลังงานมากพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นประจุอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนกับโมเลกุลจนเกิดกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซรวมกับการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโทรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนมากพอที่จะทำให้ก๊าซ มีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาวน์ [4,7,8] การคิซซาร์จเบรกดาวน์ในแกปอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ เบรกดาวน์แบบสมบูรณ์ และเบรกดาวน์เพียงบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เบรกคาวนแบบสมบูรณ์ (Complete Breakdown)

หมายถึงการเกิดเบรกคาวนตลอดแถบเชื่อมโยระหว่างอิเล็กโทรดทำให้วัสดุฉนวนเสียสภาพการฉนวนโดยสิ้นเชิง เกิดได้เป็น 2 แบบ

- เบรกคาวนโดยตรง เกิดขึ้นในแถบที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
- เบรกคาวนแบบโคโรน่า เกิดขึ้นในแถบที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

แรงดันที่ตกคร่อมอิเล็กโทรดจะมีค่าน้อยและมีกระแสสูงมากไหลตามแนวที่เกิดเบรกคาวน ซึ่งค่ากระแสเบรกคาวนนี้นั้นขึ้นอยู่กับวงจรไฟฟ้า เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกคาวนสมบูรณ์ว่าแรงดันเบรกคาวน U_b (Breakdown Voltage)

2. เบรกคาวนเพียงบางส่วน (Partial Breakdown)

หรือเบรกคาวนไม่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นกับระบบฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง เบรกคาวนที่ไม่เชื่อมโยระหว่างอิเล็กโทรด เรียกว่าคิซาร์จบางส่วน (partial discharge = PD) เบรกคาวนเพียงบางส่วนจะเกิดก่อนเบรกคาวนสมบูรณ์ โดยเป็นการเกิดไอออนในเซชันในแถบเพียงบางส่วน เช่น คิซาร์จแบบโคโรน่า เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกคาวนบางส่วนว่าแรงดันเริ่มเกิด U_i (Inception Voltage)

2.2.2 กลไกการเกิดเบรกคาวน

การเกิดเบรกคาวน หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าคือเป็นช่วงต่อระหว่างสถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained) ไปสู่สถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (Self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อในอิเล็กโทรดมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนมากพอจนทำให้อิเล็กโทรดมีสภาพนำไฟฟ้าสูงและโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือกระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรภายนอกเท่านั้น การเกิดเบรกคาวนนี้นั้นสามารถอธิบายได้ด้วย 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีกลไกเบรกคาวนของทาวน์เซนด์ (Townsend Theory) และทฤษฎีกลไกเบรกคาวนแบบสตรีมเมอร์ (Streamer Theory) ซึ่งในขั้นแรกถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้อธิบายการเกิดเบรกคาวนและหาแรงดันเบรกคาวนในสนามไฟฟ้ากระจายแบบสม่ำเสมอ

ต่อมาถูกปรับปรุงเพื่อหาระดับแรงดันวิกฤตหรือแรงดันเบรกคาวนใน สนามไฟฟ้ากระจายแบบไม่สม่ำเสมออีกด้วยทั้งสองทฤษฎีนี้ใช้พื้นฐานของการเกิดอะวาลานซ์วิกฤติ (Critical Avalanche) เป็นจุดเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่การเกิดเบรกคาวนตามกลไกเบรกคาวนของทาวน์เซนด์และจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ตามกลไกเบรกคาวนสตรีมเมอร์

1. กลไกเบรกดาวนซ์ของทาวนเซนด์

กลไกเบรกดาวนซ์ของทาวเซนด์สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวนซ์ได้ดังนี้ โดยเบรกดาวนซ์นั้นเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอิเล็กโทรด์และการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนสืบเนื่องมาจากการไอออไนเซชันเป็นกระบวนการขั้นต้น (Primary or α - process) คืออิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นที่ได้รับพลังงานจากการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าวิ่งไปชนโมเลกุลทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่เพิ่มทวีคูณจนเกิดเป็นอะวาลานซ์ แต่ถ้าฟังก์ชันการขั้นต้นนี้ไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนซ์ได้จะต้องมีกระบวนการขั้นสองมาเสริม โดยไอออไนเซชันกระบวนการขั้นสอง (Secondary process) นี้ประกอบด้วย การเกิดไอออไนเซชันโดยไอออนบวกวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซ (β - process) และกระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่ปล่อยหลุดจากแคโทด (γ - process) ซึ่งเกิดจาก ไอออนบวกที่มีพลังงานมากพอวิ่งชนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากแคโทด

ระหว่างที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโทรด์อาจชนกัน และเกิดไอออไนเซชันขึ้นได้หลายครั้งก่อนที่จะถึงอิเล็กโทรด์ ทฤษฎีทาวนเซนด์นั้นได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไป กำหนดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทาวนเซนด์ (Townsend Ionization Coefficient) โดยอนุภาคประจุวิ่งชนโมเลกุลในอิเล็กโทรด์ แบ่งเป็นสัมประสิทธิ์ α และ β โดย α เป็นค่าเฉลี่ยจากการชนของกระบวนการไอออไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊สระยะ 1 ซม. ส่วน β เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนหนึ่งตัวชนอะตอมของก๊าซต่อหน่วยระยะทางตามแนวสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมากเคลื่อนที่ช้าจึงเป็นการยากที่จะเกิดกระบวนการ β ได้ ดังนั้นกระบวนการขั้นที่สองที่สำคัญคือ กระบวนการ γ อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการ γ ซึ่งเป็นกระบวนการขั้นที่สองนี้มีที่มาจาก

ไอออนบวกชนแคโทด (γ_i) อิเล็กตรอนจะหลุดจากแคโทดได้ต้องได้รับพลังงานจากไอออนบวกอย่างน้อยเท่ากับเวอร์คฟังก์ชันของโลหะที่ใช้ทำแคโทดนั้น

โฟตอนชนแคโทด (γ_e) ระหว่างที่เกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่ทำให้โมเลกุลก๊าซเกิดไอออไนเซชันเท่านั้นแต่ยังทำให้เกิดโฟตอนอีกด้วย โฟตอนที่เกิดขึ้นบางส่วนนี้จะวิ่งเข้าหาแคโทดและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากการชนนี้ว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photo Electron)

โฟตอนไอออไนเซชัน (γ_p) โฟตอนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันในโมเลกุลก๊าซ ดังนั้น $\gamma = \gamma_i + \gamma_e + \gamma_p + \dots$ กระบวนการขั้นที่สองเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันก็ได้ และมักเรียก γ นี้ว่าสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันที่สองของทาวนเซนด์ (Townsend Ionization Coefficient) อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นที่สองนี้จะทำให้เกิดอะวาลานซ์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ จนกระทั่งเกิดเบรกดาวนซ์ขึ้นทั้งหมดนี้เรียกว่ากลไกเบรกดาวนซ์ของทาวน์เซนด์

สามารถเขียนเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนซ์ได้ดังสมการ(2.13) โดย d คือระยะแคป และ Γ มีค่าเป็น $\beta/\alpha + \gamma$

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (2.13)$$

2. กลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์

เนื่องจากกลไกเบรกดาวนซ์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนซ์ได้ทุกกรณี เช่น

1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัวอะวาลานซ์ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาวน์เซนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน โดยการชนแตกตัวและปล่อยอิเล็กตรอนออกจากแคโทดจะพบว่ามากกว่าเวลาที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากแคโทดผ่านแคปไปยังแอโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุลเลยก็ใช้เวลามากกว่าที่ทดลองได้

2. กลไกเบรกดาวนซ์ของทาวน์เซนด์ไม่คำนึงถึงผลของประจุค้างที่ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดบิดเบือน

3. ลออาร์คที่เกิดขึ้นมีทั้งลักษณะที่เป็นกิ่งก้านและแบบซิกแซก

4. แรงดันเบรกดาวนซ์ไม่ขึ้นกับชนิดของโลหะที่ใช้ทำแคโทด

จึงมีผู้นำเสนอกลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์ขึ้น กลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์อธิบายถึงการเกิดเบรกดาวนซ์โดยใช้ผลของประจุค้างเป็นหลัก และใช้อธิบายการเกิดเบรกดาวนซ์ในสนามไฟฟ้าที่กระจายแบบไม่สม่ำเสมอสูงและกรณีช่องอิเล็กโทรดห่างกันมากๆ อันเป็นปรากฏการณ์ที่สลับซับซ้อนเนื่องจากผลของประจุค้าง ผลของประจุค้างทำให้ชนิดขั้วแรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโทรดมีผลอย่างมากต่อระดับแรงดันเบรกดาวนซ์ โดยเฉพาะกับอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สมมาตร

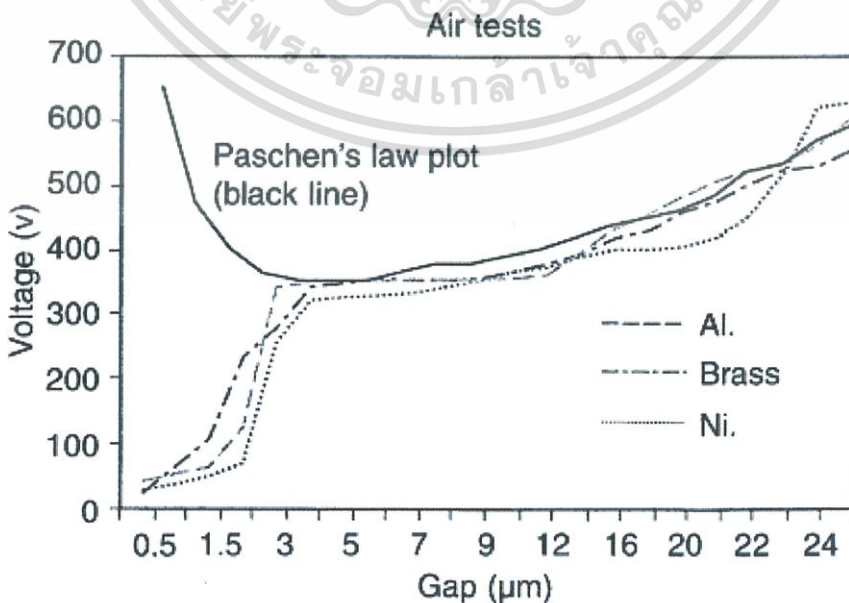
กลไกเบรกดาวนซ์แบบสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์คดีสชาร์จจากอะวาลานซ์เดี่ยวซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานซ์และจะเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปเป็นพลาสมาสตรีมเมอร์ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรกดาวนซ์ขึ้น หลักการของการเกิดเบรกดาวนซ์ตามทฤษฎีกลไกสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการวิงชนไอออไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์เมื่อความหนาแน่นของประจุค้างซึ่งเกิดจากไอออไนเซชันมีค่าเกินกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่งประจุค้างที่เกิดจากอะวาลานซ์ จะเปลี่ยนอะวาลานซ์ไปเป็นลำไอออไนซ์ที่มีความเข้มสูง (Channels of Intense Ionization) และจะเกิดโฟโตไอออไนเซชันที่บริเวณปลายหัวสตรีมเมอร์

ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เกิดสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกว่าสตรีมเมอร์ เบรกดาวน์ โดยเราเรียกสตรีมเมอร์ที่เกิดจากลำไอออไนซ์ที่มีความเข้มสูงนี้ว่า ลีดเดอร์ (Leader) หรือ สตรีมเมอร์ลำดับที่สอง (Secondary Streamer) การใช้เวลาที่ใช้ในการเบรกดาวน์ในกรณี สนามไฟฟ้ากระจายแบบไม่สม่ำเสมอมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากกลไกเบรกดาวน์ของ ทาวเซนด์ ก็เนื่องมาจากการเกิดโฟโต ไอออไนเซชันที่บริเวณปลายลีดเดอร์นั่นเอง

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างโดยสตรีม-เมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวลานซ์มีประจุเท่ากับอะวลานซ์วิกฤตประมาณ 10^8 ตัว โดยไม่ขึ้นกับชนิด และความดันก๊าซ

3. กลไกเบรกดาวน์ของไมโครแกป

ไมโครแกป คือ แกปที่มีช่องว่างอยู่ระหว่าง $0.2 - 500 \mu\text{m}$ [9 - 20] ซึ่งกลไกการเบรกดาวน์ของไมโครแกปนั้นแสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามกฎของพาสเชน (Paschen's law) ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ที่อธิบายโดยทฤษฎีทาวเซนด์ ซึ่งลักษณะการเบรกดาวน์ของไมโครแกปเป็นดังรูป 2.10 สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากผลงานวิจัยระดับนานาชาติ [15-20] โดยกฎของพาสเชนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกับผลคูณของความดันก๊าซ p กับระยะแกป d ระหว่างอิเล็กโทรด กล่าวว่ามีค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าคงที่ถ้าผลคูณของ p กับ d มีค่าคงตัว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าเสมอนั้นอยู่ในฟังก์ชันของผลคูณ $p \cdot d$ เท่านั้น บางตำราเรียกกฎนี้เป็นความสัมพันธ์ของพาสเชน ทั้งนี้เพราะว่ากฎดังกล่าวไม่เป็นจริงทุกกรณี โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่ใช้กับความดันสูงๆอย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ยังมีผู้นิยมใช้เป็นกฎอยู่อีกมาก



เอกสารรูปที่ 2.10 เส้นโค้งพาสเชนและการเบรกดาวน์จากไมโครแกปด้วยอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ [19]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ประจุค้ำงมีผลต่อแรงดันเบรกควาน้ต่างขั้ว

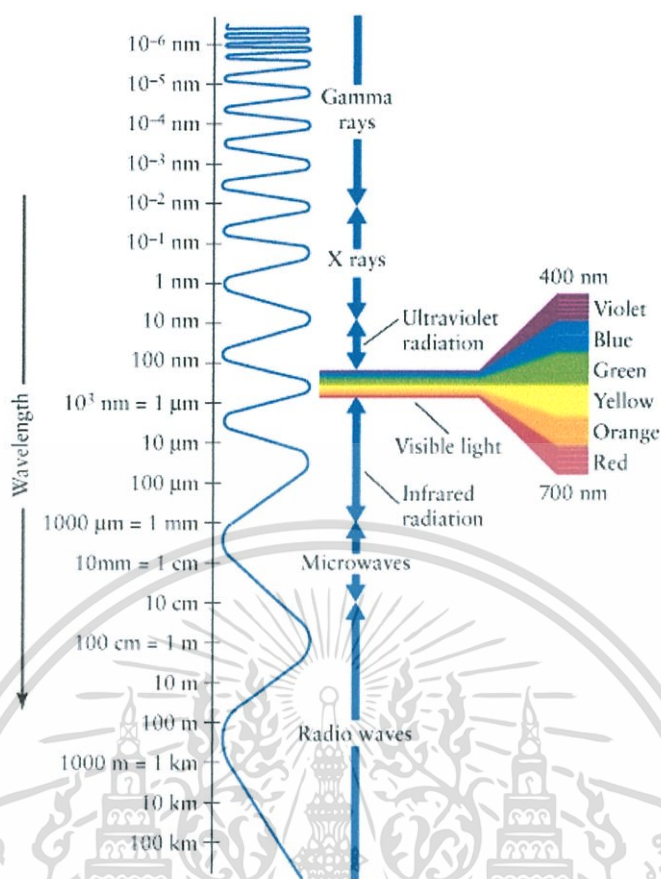
ผลของประจุค้ำงทำให้แรงดันเบรกควาน้ของขั้วบวกและขั้วลบต่างกันทางตรงกันข้ำมกับแรงดันเบรกควาน้โดยตรง กล่าวคือ แรงดันเบรกควาน้โดยตรงหรือแรงดันเริ่มต้นของขั้วลบจะค้ำกว่าขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้ำงทำให้แรงดันเบรกควาน้ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC , AC และ อิมพัลส์)

2.2.4 ผลของรูปลักษณะอิเล็กโทรด

รูปลักษณะอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกควาน้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสมำเสมอ ไม่สมำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สมำเสมอมาก ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้นก็คือค่าแรงดันเบรกควาน้นั่นเอง คือ เมื่ออะวลาตวนชั่ววิกฤตได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดการเบรกควาน้ได้ทันทีโดยไม่มีโคโรนำเกิดขึ้นก่อนเบรกควาน้เป็นเบรกควาน้โดยตรง เช่น การเบรกควาน้ที่เกิดขึ้นในแถบของทรงกลม ที่มีระยะห่างไม่มากนักเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ($d < D/2$) ขั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรกควาน้เล็กน้อย

2.2.5 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก[21]

อิเล็กตรอนอาจปล่อยออกมาจากผิวโลหะได้ เมื่อได้รับพลังแสงมากพอ ค้นพบในปี 1887 โดย ไฮริค เฮริตซ์ (Heinrich Hertz) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ในระหว่างที่ทำการทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และพบว่าเมื่อฉายแสงความถี่เดี่ยว เช่น รังสีอัลตราไวโอเลตไปตกกระทบบนผิวโลหะ พบว่ามีอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกจากที่โลหะนั้น ถ้าใช้แสงความถี่เดี่ยวที่มีความถี่ต่ำลงมาเรื่อยๆจะพบว่ามีความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency) ค่าหนึ่งซึ่งถ้าความถี่ต่ำกว่านี้แล้วอิเล็กตรอนจะไม่หลุดจากผิวของโลหะ อิเล็กตรอนที่หลุดจากแผ่นโลหะเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectrons) และปรากฏการณ์ที่แสงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)



รูปที่ 2.11 ย่านความยาวคลื่นระดับต่างๆ[22]

เราสามารถแยกชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ได้เป็นชนิดย่อยๆ ได้ 8 ชนิด ตามความยาวคลื่น แต่มีที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ UVA, UVB, UVC ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ชนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต(UV)[23]

ชนิด UV	ความยาวคลื่น(nm)
UVA	400 - 315
NUV	400 - 300
UVB	315 - 280
MUV	300 - 200
UVC	280 - 100
FUV	200 - 122
VUV	200 - 10
EUV	121 - 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านได้ดำเนินการค้นคว้าต่อมา เช่น แพลงค์ (Max Planck) ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) มิลลิแกน (R.A. Milikan) โดย ไอน์สไตน์ได้เสนอทฤษฎีโฟตอนของแสงอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้เป็นผลสำเร็จ โดยใช้แนวความคิดเกี่ยวกับการแผ่รังสีเป็นควอนตัมที่แพลงค์ใช้อธิบายการแผ่รังสีจากวัตถุตัวร้อน ไอน์สไตน์เสนอว่า แสงประกอบด้วยกลุ่มก้อนของพลังงาน เรียกว่า โฟตอน (Photon) แสงจึงมีลักษณะเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยก้อนพลังงานเล็กๆ เมื่อตกกระทบโลหะ พลังงานของโฟตอนจะถ่ายให้กับอิเล็กตรอนในโลหะตัวต่อตัว โดยพลังงานของโฟตอนของแสงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความถี่ของแสง ดังสมการ

$$E = hf \quad (2.14)$$

เมื่อ $h =$ ค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่าประมาณ 6.626×10^{-34} J.s

$f =$ ค่าความถี่ของแสง หน่วย Hz

โดย $f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.15)$

เมื่อ $c =$ ค่าความเร็วของแสงในสุญญากาศ มีค่าประมาณ 3×10^8 m/s

$\lambda =$ ค่าความยาวคลื่น หน่วย nm

และในการที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากอะตอมของผิวโลหะ จะต้องจ่ายพลังงานให้กับอะตอมเท่ากับค่า ฟังก์ชันงาน (work function) ซึ่งเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้กับอะตอมนั้น ส่วนพลังงานที่เหลือจะปรากฏเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$(E_k)_{\max} = hf - W \quad (2.16)$$

โดย $(E_k)_{\max} =$ พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน หน่วย J

$hf =$ พลังงานโฟตอนของแสง (E) หน่วย J

$W =$ ฟังก์ชันงาน (work function) หน่วย eV

ซึ่งโลหะต่างๆมีค่า work function ไม่เท่ากัน

ตารางที่ 2.3 ค่า Work function ของธาตุต่างๆ[24]

Element	eV	Element	eV	Element	eV	Element	eV
Ag	4.52-4.74	Al	4.06-4.26	As	3.75	Au	5.1-5.47
B	~4.45	Ba	2.52-2.7	Be	4.98	Bi	4.34
C	~5	Ca	2.87	Cd	4.08	Ce	2.9
Co	5	Cr	4.5	Cs	2.14	Cu	4.53-5.10
Eu:	2.5	Fe	4.67-4.81	Ga	4.32	Gd	2.90
Hf	3.9	Hg	4.475	In	4.09	Ir	5.00-5.67
K	2.29	La	3.5	Li	2.93	Lu	~3.3
Mg	3.66	Mn	4.1	Mo	4.36-4.95	Na	2.36
Nb	3.95-4.87	Nd	3.2	Ni	5.04-5.35	Os	5.93
Pb	4.25	Pd	5.22-5.6	Pt	5.12-5.93	Rb	2.261
Re	4.72	Rh	4.98	Ru	4.71	Sb	4.55-4.7
Sc	3.5	Se	5.9	Si	4.60-4.85	Sm	2.7
Sn	4.42	Sr	~2.59	Ta	4.00-4.80	Tb	3.00
Te	4.95	Th	3.4	Ti	4.33	Tl	~3.84
U	3.63-3.90	V	4.3	W	4.32-5.22	Y	3.1
Zn	3.63-4.9	Zr	4.05				

เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดูมที่สร้างใช้โลหะทองเหลือง(Brass) เพื่อความแข็งแรงและป้องกันอิเล็กทรอนิกส์เสียหายจากการเบรคควาน์ ซึ่งไม่มีค่า work function ในตารางข้างต้นจึงทำการประมาณค่าตามเอกสารอ้างอิง[25] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.56 eV ซึ่งการคำนวณหาว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้มาซื้อโรดได้มีค่าความยาวคลื่นประมาณ 250 nm วิธีการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 E &= hf \\
 &= h \frac{c}{\lambda} \\
 &= \frac{(6.626 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{(250 \times 10^{-9})}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 7.951 \times 10^{-19} \text{ J} \\
 \text{แปลงเป็นหน่วย eV} &= \frac{7.951 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} \\
 &= 4.969 \text{ eV} \\
 (E_k)_{\max} &= hf - W \\
 &= 4.969 - 4.56 \\
 &= 0.409 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

∴ แสดงว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวทองเหลืองได้

2.3 วงจรกรองผ่านความถี่[26]

วงจรกรอง (Filter) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกผ่านสัญญาณ โดยวงจรกรองจะยอมให้สัญญาณเฉพาะบางย่านความถี่ผ่านไปได้นั้น เรียกว่าย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่าย่านความถี่ผ่าน (Passband) และเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองจะกั้นไว้ไม่ให้ผ่านว่าย่านความถี่หยุด (Stopband)

วงจรกรอง (Filter) สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1. วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive filters) คือ วงจรกรองสัญญาณที่ประกอบด้วย R, L, C เท่านั้น วงจรกรองประเภทนี้สามารถใช้ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่สัญญาณไฟตรง (DC) ไปจนถึงประมาณ 300 MHz วงจรนี้ไม่มีส่วนที่เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณอยู่เลย ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร เมื่อนำไปใช้จะเกิดความสูญเสีย (loss) เพียงอย่างเดียว จะไม่มี noise ที่ส่วนใหญ่มาจากอุปกรณ์แบบ active ก็จะไม่ค่อยมีด้วย

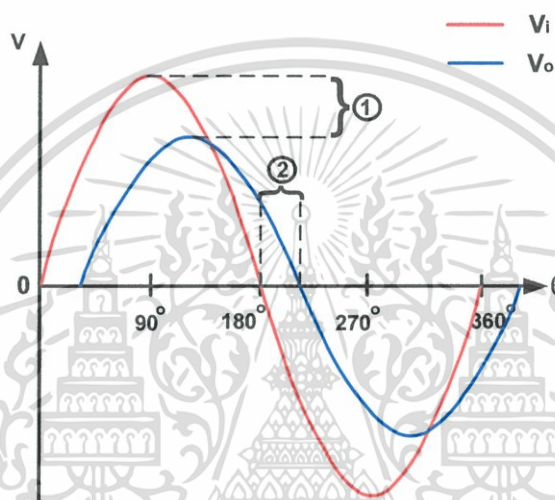
2. วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active filters) คือ วงจรกรองสัญญาณที่ประกอบด้วย R, C, Transistor, Op-Amp วงจรกรองแบบแอคทีฟที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แก่ วงจรกรอง active RC ซึ่งสามารถใช้งานในย่านความถี่ไฟตรง (DC) ไปจนถึงประมาณ 500 kHz ไม่มีการสูญเสียของสัญญาณจากออปแอมป์ที่นำมาใช้งาน และยังสามารถขยายสัญญาณเพื่อชดเชยการลดทอนของสัญญาณได้ มีผลตอบสนองความถี่ที่ต่ำเมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบ passive จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง

โดยทั่วไปเราสามารถแยกประเภทของวงจรกรองได้ตามลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (frequency response) ของวงจร ทั้งนี้ผลตอบสนองทางความถี่จะแสดงถึงผลตอบสนองของวงจรที่มีต่อสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ โดยเราสามารถแบ่งผลตอบสนองทางความถี่ออกได้เป็น

1. ผลตอบสนองทางขนาด (magnitude response) ซึ่งจะแสดงอัตราขยาย (gain) ของวงจรที่มีความถี่ต่าง
2. ผลตอบสนองทางเฟส (phase response) ซึ่งจะแสดงถึงการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ



1. ผลตอบสนองทางขนาด 2. ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร

2.3.2 ชนิดของวงจรกรองผ่านความถี่[27]

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านแต่จะกั้นสัญญาณความถี่สูงไว้ รูปที่ 2.14 (a) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ โดยนิยามเราจะเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่าย่านความถี่ผ่าน (passband) หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth : BW) ของวงจร ส่วนย่านความถี่ที่วงจรไม่ยอมให้ผ่านไปจะเรียกว่าย่านความถี่หยุด (stopband) จากรูปที่ 2.14 (a) จะเห็นได้ว่าย่านความถี่ผ่านจะอยู่ระหว่าง 0 และ f_c โดยจะเรียกความถี่ f_c ว่าความถี่คัทออฟ (Cut off Frequency) สัญญาณที่มีความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ f_c จะผ่านไปได้

ความถี่คัทออฟ คือความถี่ซึ่ง V_{out} มีค่าเท่ากับ 70.7 % ของค่า V_{in} ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ

$X_C = R$ ดังนั้นเราสามารถหาค่าของ f_c (Cut off Frequency) ได้จากสมการ(2.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = X_C = \frac{1}{2\pi f_c \times C}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times RC} \quad (2.17)$$

การลดทอน (Attenuation) ในหน่วยของเดซิเบล (dB) สามารถหาได้ดังสมการ(2.18)

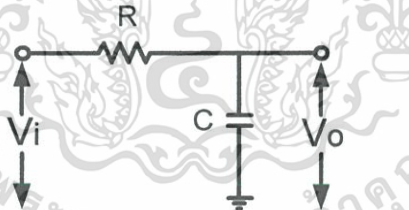
$$\text{Attenuation} = 20 \log \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (2.18)$$

ที่ความถี่คัทออฟ ค่าของ $V_{\text{out}} = 0.707V_{\text{in}}$ ซึ่งสามารถแปลงเป็น dB ได้โดย

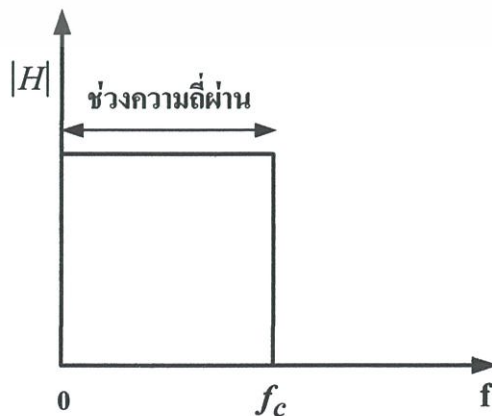
$$20 \log \frac{0.707V_{\text{in}}}{V_{\text{in}}} = 20 \log(0.707) = -3 \text{ dB} \quad (2.19)$$

ดังนั้นที่ความถี่คัทออฟค่าของ V_{out} มีค่าลดลง 3 dB (-3 dB) หรือ 70.7% ของ V_{in}

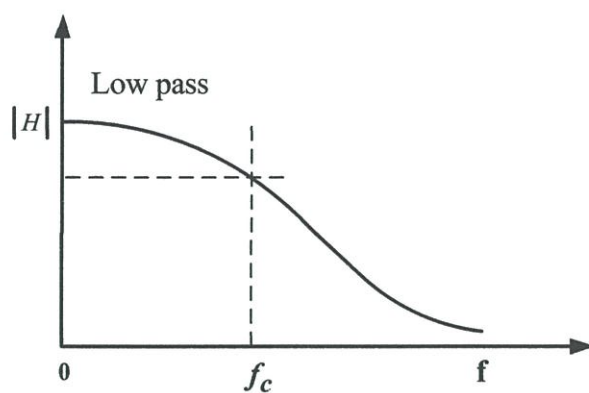
ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างวงจรกรองที่มีผลตอบสนองเป็นดังรูป 2.14 (a)(Ideal) ได้ รูปที่ 2.14 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองที่ได้มาจากการประมาณผลตอบสนองในอุดมคติ(Actual) ที่มีลักษณะเป็น โมโน โทนิคอย่างสมบูรณ์ซึ่งคือ ฟังก์ชันที่มีอนุพันธ์ (derivative) ที่มีเครื่องหมาย (บวกหรือลบ) คงเดิมเสมอ



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(RC)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

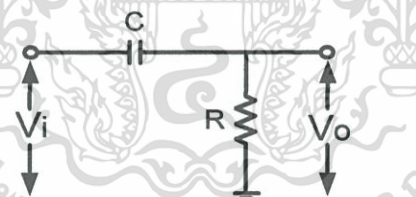


b. การประมาณผลตอบสนองทางอุดมคติ (Actual)

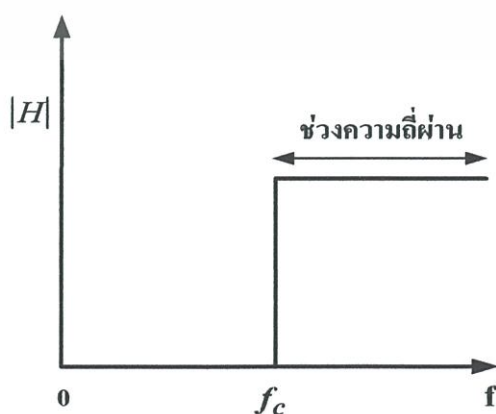
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

วงจรกรองความถี่สูงผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงผ่านแต่จะกั้นสัญญาณความถี่ต่ำไว้ รูปที่ 2.16 (a) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ รูปที่ 2.16 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองที่ได้มาจากการประมาณผลตอบสนองในอุดมคติที่มีลักษณะเป็นโมโนโทนิคอย่างสมบูรณ์ เป็นวงจรกรองสัญญาณที่จะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่ f_c (Cut off Frequency) ผ่านไปได้ ซึ่งความถี่คัทออฟ f_c หาได้จากสมการเช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

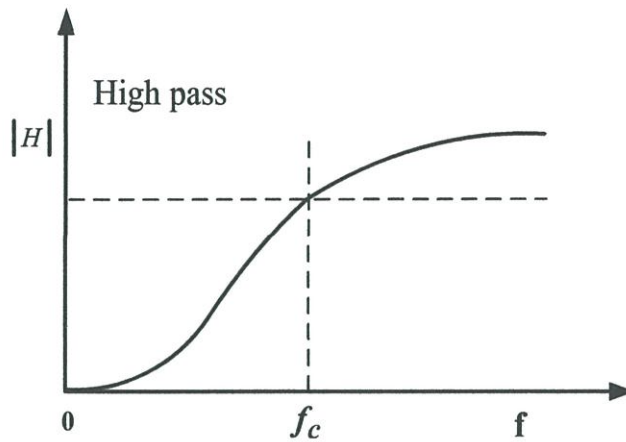


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (RC)



a. ผลตอบสนองทางอุดมคติ (Ideal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



b. การประมาณผลตอบสนองทางอุดมคติ(Actual)

รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

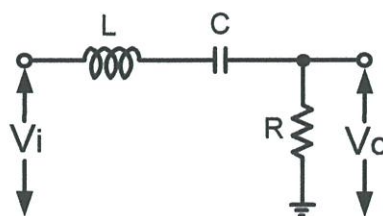
วงจรกรองแถบความถี่ผ่านเป็นวงจรกรองที่ยอมให้สัญญาณในช่วงความถี่ใดๆ ผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำหรือสูงกว่าช่วงความถี่นั้นผ่านไปได้ รูปที่ 2.18 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน โดยทั้งนี้ถ้าให้ f_{c1} และ f_{c2} เป็นจุดปลายของย่านความถี่ผ่านของวงจร โดย $f_{c1} < f_{c2}$ เราจะพบว่าแบนด์วิดธ์ของวงจรคือ

$$BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (2.20)$$

และจะนิยามความถี่กึ่งกลางว่า (Center Frequency) f_o ว่าเป็น

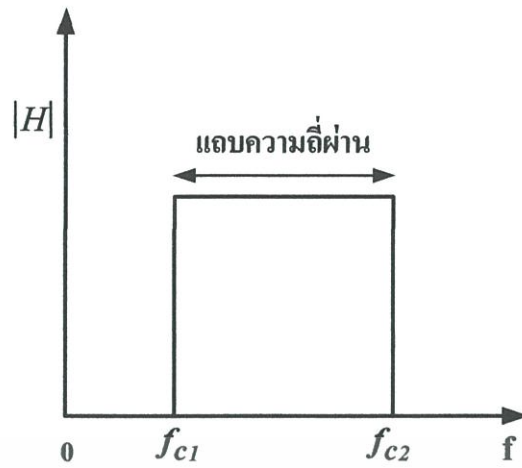
$$f_o = \sqrt{f_{c1}f_{c2}} \quad (2.21)$$

ซึ่งโดยทั่วไปเราจะกำหนดให้ BW ของวงจรกรองความถี่ผ่านคือแถบความถี่ที่สัญญาณสามารถผ่านไปได้โดยมีการลดทอนไม่เกิน 3 dB รูปที่ 2.18(a) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านในอุดมคติ รูปที่ 2.18(b) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีอัตราขยายลดลงไปเรื่อยๆ จากจุดสูงสุดที่ความถี่ f_o

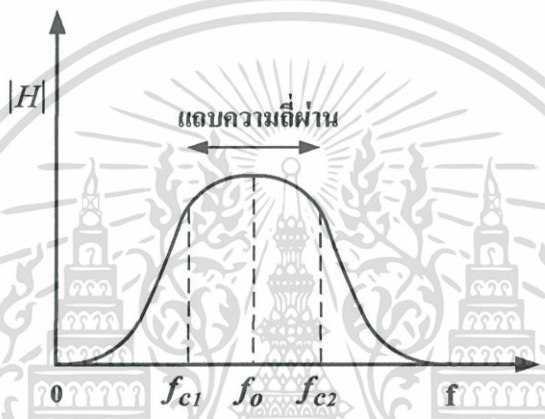


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(RLC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a. ผลตอบสนองทางอุดมคติ (Ideal)

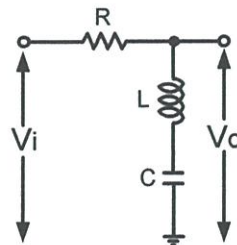


b. การประมาณผลตอบสนองทางอุดมคติ (Actual)

รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

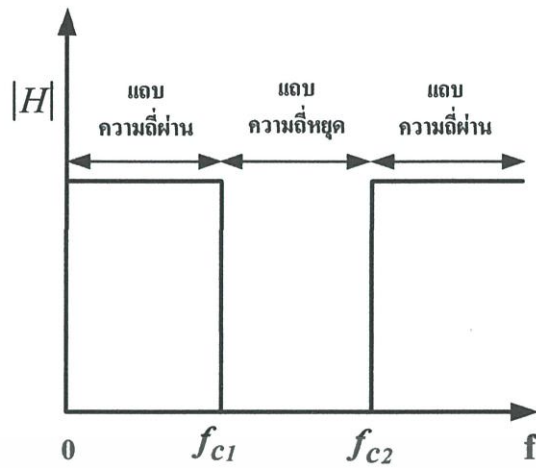
4. วงจรกรองแถบความถี่หยุด (Band Reject Filter)

วงจรกรองแถบความถี่หยุดจะทำหน้าที่ตรงกันข้ามกับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน กล่าวคือวงจรกรองแถบความถี่หยุดจะกั้นไม่ให้สัญญาณ ณ ช่วงความถี่ใดๆ ผ่านไปได้ แต่จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงความถี่นั้นผ่านไปได้ รูปที่ 2.20(a) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่หยุดในอุดมคติ รูปที่ 2.20(b) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้มาจากการประมาณของวงจรกรองแถบความถี่หยุดในอุดมคติ

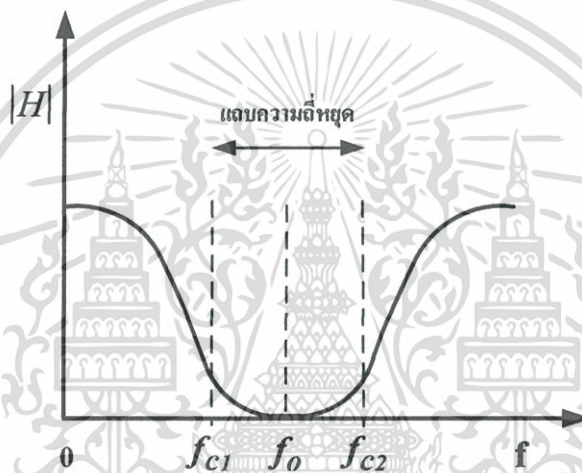


รูปที่ 2.19 ตัวอย่างวงจรกรองแถบความถี่หยุด (RLC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a. ผลตอบสนองทางอุดมคติ (Ideal)



b. การประมาณผลตอบสนองทางอุดมคติ (Actual)

รูปที่ 2.20 ผลตอบสนองวงจรกรองแถบความถี่หยุด

2.4 สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ IGBT และวงจรขับ IGBT

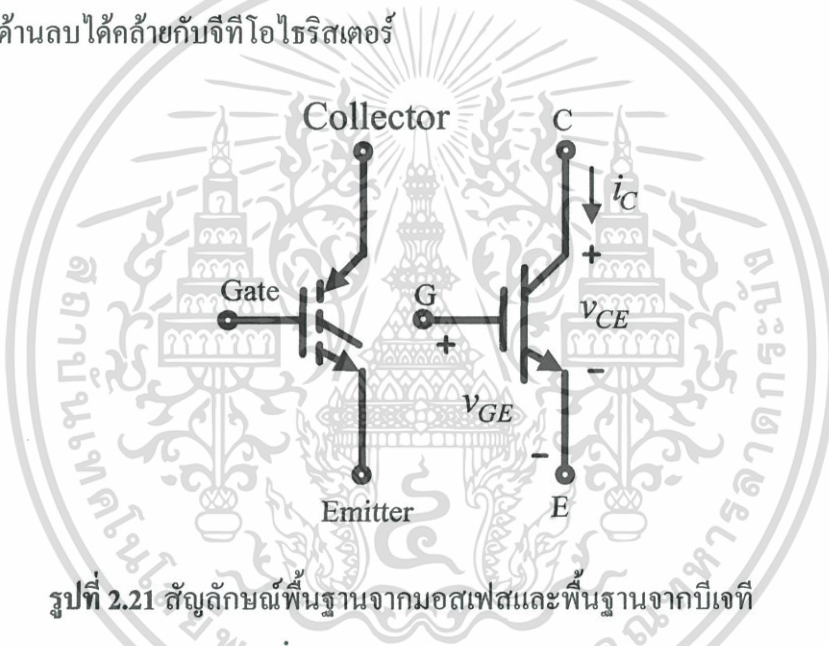
วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ IGBT ซึ่งทนแรงดันได้ 1200 V แทนสปาร์กแก๊ปซึ่งมีไกสวิตช์ในการสั่งการให้เกิดการปล่อยประจุจากตัวเก็บประจุ C_s ผ่านไปยัง C_b เพื่อความสะดวกและง่ายในการสร้างวงจรการทดลอง โดยมีวงจรขับ IGBT ซึ่งมี TLP 250 ซึ่งเป็นวงจรแยกทางแสง (Opto Isolate) ระหว่างตัวไมโครคอนโทรลเลอร์กับขาเกต (G) เพื่อป้องกันกรณีแรงดันเกินจากขาเกตอาจทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เสียหายได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งการผ่านวงจรขับไปยังขาเกตของ IGBT ให้วงจรเปิดปิดแรงดันกระแสตรงจาก C_s ผ่านขาคอลเลกเตอร์ (C) ไปยังขามีมิเตอร์ (E) เพื่อปล่อยประจุให้ C_b ซึ่งมีทฤษฎีพื้นฐานดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

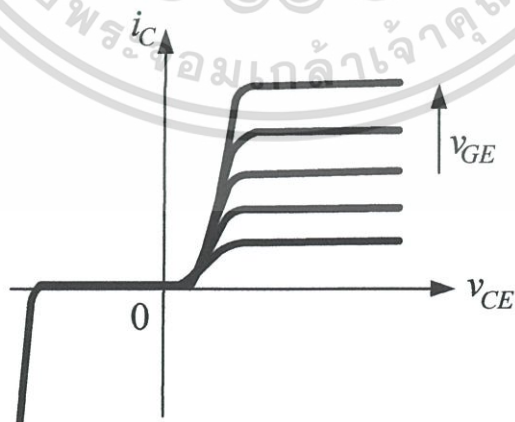
2.4.1 สวิตช์อิล็กทรอนิกส์ IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor)[28]

ไอจีบีทีจัดเป็นอุปกรณ์อิล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีทีมีสัญลักษณ์และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 – 2.23

ไอจีบีทีได้รวมข้อดีของมอสเฟตกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง (บีเจที) และจีทีโอ ไซริสเตอร์ มารวมอยู่ด้วยกันกล่าวคือ ไอจีบีทีจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของขาเกตที่มีค่าสูงคล้ายมอสเฟตกำลังซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูง ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำคล้ายทรานซิสเตอร์กำลัง นอกจากนี้ ไอจีบีทีจะออกแบบให้ทนทานแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้คล้ายกับจีทีโอ ไซริสเตอร์

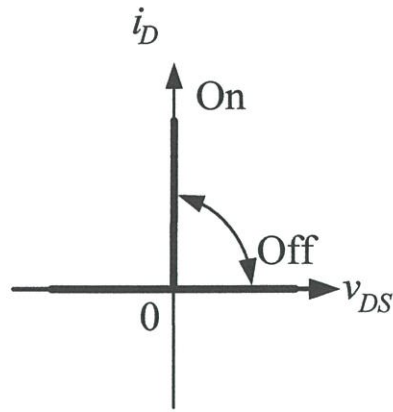


รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์พื้นฐานจากมอสเฟตและพื้นฐานจากบีเจที



รูปที่ 2.22 คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 คุณลักษณะในอุดมคติ

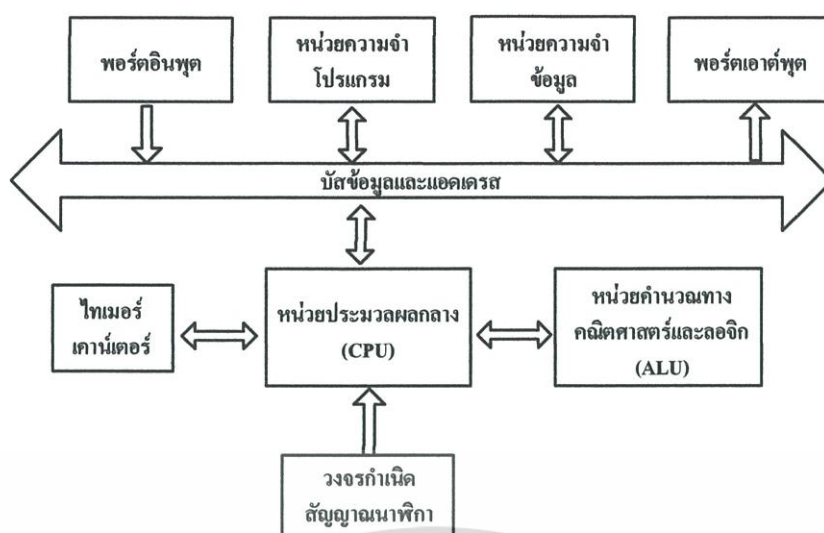
2.5 วงจรควบคุมมุมเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ประกอบด้วยวงจรหลายส่วนและมีส่วนที่สำคัญในการควบคุมให้แรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ตามมุมที่ต้องการ คือ วงจรควบคุมมุมเฟส (Control Circuit) ซึ่งมีอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในการควบคุมคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นหัวใจในการควบคุม ซึ่งมีทฤษฎีพื้นฐานดังนี้

2.5.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์[29]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งที่รวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ ในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้นภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม

ไมโครคอนโทรลเลอร์มาจากคำ 2 คำรวมกันคือ ไมโคร (micro) ซึ่งหมายถึง ไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประมวลผลข้อมูลขนาดเล็ก ภายในประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลางหรือ ซีพียู (CPU : Central Processing Unit) หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU: Arithmetic Logic Unit) วงจรเชื่อมต่อหน่วยความจำ และวงจรสัญญาณนาฬิกา อีกคำหนึ่งก็คือคำว่า คอนโทรลเลอร์ (Controller) หมายถึง อุปกรณ์ควบคุม ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม โดยที่สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระ



รูปที่ 2.24 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีอุปกรณ์พื้นฐานเหมือนกับไมโครโปรเซสเซอร์ หากแต่จะบรรจุหน่วยความจำโปรแกรม หน่วยความจำข้อมูล และพอร์ตอินพุตเอาต์พุตไว้ภายในพร้อมสรรพ ผู้ใช้งานเพียงเขียนแต่โปรแกรมควบคุมลงบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรถ่ายทอดสัญญาณนาฬิกา อาทิ คริสตอล ตัวเก็บประจุ เป็นต้น สุดท้ายเชื่อมต่ออุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตเข้ากับขาพอร์ต เพียงเท่านี้ก็สามารถใช้งานได้แล้ว

อย่างไรก็ตาม ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็สามารถเชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอกได้เช่นกัน โดยพิจารณาให้หน่วยความจำภายนอกนั้นเป็นอุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตตัวหนึ่ง แล้วใช้ขาพอร์ตที่มีอยู่ทำการติดต่อ ดังตารางที่ 2.4 เป็นตารางสรุปคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์

คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์	
1. ขนาดของหน่วยประมวลผลกลาง	ส่วนใหญ่จะมีขนาด 8 บิต
2. หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก	มีอยู่ภายใน
3. วงจรถ่ายทอดสัญญาณนาฬิกา	มีอยู่ภายใน
4. การเชื่อมต่อกับหน่วยความจำโปรแกรม	ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอก
5. การเชื่อมต่อกับหน่วยความจำข้อมูล	ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอก
6. การเชื่อมต่อกับพอร์ตอินพุตเอาต์พุต	มีอยู่ภายในและสามารถขยายได้
7. ไทเมอร์ / เคาน์เตอร์	มีอย่างน้อย 1 ตัว ขนาด 8-16 บิต
8. วอตช์ดีด็อกไทเมอร์	มีอย่างน้อย 1 ตัว
9. จำนวนขาต่อใช้งาน	มีตั้งแต่ 8 ขา ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

ถ้าเป็นการสร้างระบบควบคุมขนาด 8 บิต มีความต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกไม่มากนัก ควรเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และถ้าหากต้องการมีการประมวลผลข้อมูลจำนวนมากต้องใช้หน่วยความจำโปรแกรมสูงถึง 8 กิโลไบต์ ทั้งยังมีความต้องการเก็บรักษาข้อมูลจำนวนมากเป็นกิโลไบต์ควรออกแบบให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบควบคุมนี้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก จึงสรุปได้ว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์เหมาะสำหรับการสร้างระบบควบคุมเป็นหลัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลการจำลองการออกแบบแบบด้วยคอมพิวเตอร์

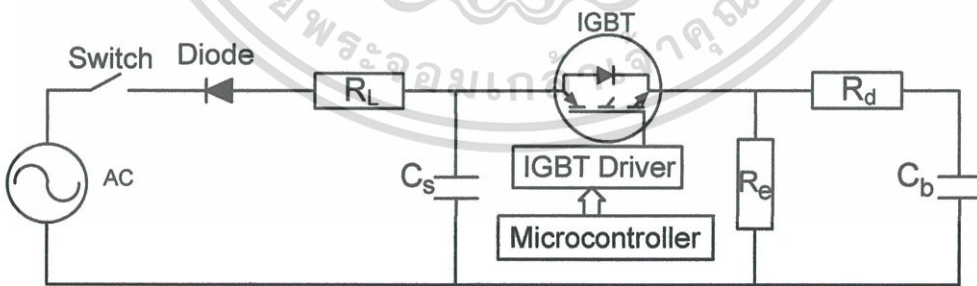
และผลการทดลองจากวงจร

3.1 การจำลองการออกแบบและการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.1.1 การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เมื่อทราบว่าสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μ s จากการกำหนด T_1 และ T_2 เราจะเริ่มคำนวณหาค่าองค์ประกอบต่างๆ โดยเริ่มจากค่าตัวเก็บประจุ C_b แล้วตามด้วย C_s ให้มีค่าสอดคล้องกัน จากนั้นจึงคำนวณองค์ประกอบที่เหลือ คือความต้านทาน R_d ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 และความต้านทาน R_e ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ค่าความต้านทาน R_d, R_e ที่ได้เราจะนำไปจำลองด้วย โปรแกรม PSpice เพื่อตรวจสอบว่าสามารถสร้างรูปคลื่นตามที่ต้องการได้หรือไม่สำหรับการเลือกค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เบื้องต้นเพื่อเป็นส่วนประกอบสำคัญของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วขั้วบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz เราจะใช้ตัวคาปาซิเตอร์และตัวความต้านทานที่มีขายตามท้องตลาด

ในเบื้องต้นเราต้องกำหนดพิกัดแรงดันอิมพัลส์เสียก่อน ซึ่งเราออกแบบไว้ไม่เกิน 1200 V ตามพิกัดทนแรงดันของ IGBT ดังนั้นอุปกรณ์ที่อยู่ภายในส่วนกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทั้งหมดจะต้องทนแรงดันของอิมพัลส์ขนาดไม่เกิน 1200 V ได้ จากวงจรในรูปที่ 3.1 โดย ให้แรงดันอิมพัลส์ C_s มีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดไม่เกิน 1200 V



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1. การออกแบบตัวเก็บประจุ C_b

ตัวเก็บประจุ C_b เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับเวลาหน้าคลื่น โดยเราสามารถนำตัวเก็บประจุ C_b มาต่อขนานกับโหลดตัวเก็บประจุของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ เพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นเป็นไปตามต้องการ คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ C_b จะต้องทนแรงดันไฟตรงได้ไม่ต่ำกว่า 1200 V อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเราเลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบ โพลีโพรพีลีน(WIMA) ที่มีพิกัดแรงดันที่สูงกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่น สำหรับการเลือกค่า C_b จะเลือกค่า 10 nF จากที่มีในท้องตลาดและครอบคลุมค่าเก็บประจุของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบกับแรงดันอิมพัลส์ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าเก็บประจุดังนี้[4]

– ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 – 100 pF
– ปลอกฉนวนนำไฟฟ้า	150 – 400 pF
– หม้อแปลงกระแส	200 – 600 pF
– เคเบิลแรงสูง	150 – 300 pF/m.
– หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 1 MVA ประมาณ	1000 pF
	100 MVA ประมาณ 10000 pF
– อุปกรณ์วัดแรงดัน (voltage divider)	50 – 500 pF
– สายต่อวงจรแรงสูง	5 – 15 pF/m.

2. การออกแบบตัวเก็บประจุ C_s

จากสมการที่ 2.10 แสดงถึงประสิทธิภาพของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ประสิทธิภาพของวงจรจะแปรผันตรงกับค่าตัวเก็บประจุ C_s ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรสูง ควรเลือกค่า C_s ให้สูงกว่า C_b ประมาณ 10 เท่า แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบไว้ถึง 100 เท่า เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทประจุจาก C_s มาที่ C_b จึงเลือกค่า C_s ขนาด 1 μF

3. การออกแบบความต้านทาน R_d, R_e

เมื่อทราบค่า C_s และ C_b ที่ได้จากการออกแบบแล้ว ค่าความต้านทาน R_d ส่งผลต่อเวลาหน้าคลื่น (T_1) ของรูปคลื่นอิมพัลส์ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-1 นั่นคือ 1.2 μs สามารถนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.8 ได้เลยโดยใช้ค่า k_2 จากตารางที่ 2.1 และได้ดังสมการที่ 3.1

$$R_d = \frac{T_1}{k_2} \times \frac{C_b + C_s}{C_b C_s} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} &= \frac{1.2 \times 10^{-6}}{2.96} \times \left[\frac{(10 \times 10^{-9}) + (1 \times 10^{-6})}{(10 \times 10^{-9}) \times (1 \times 10^{-6})} \right] \\ &= 40.58 \Omega \end{aligned}$$

เราจะได้ค่าความต้านทาน R_d ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดมีค่า $39 \Omega \pm 5\%$

ค่าความต้านทาน R_e จะส่งผลต่อเวลาทางคลื่น (T_2) ของรูปคลื่นอิมพัลส์ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาทางคลื่นของรูปคลื่นไฟฟ้าค่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 นั่นคือ $50 \mu s$ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.9 ได้เลยโดยใช้ค่า k_1 จากตารางที่ 2.1 และได้ดังสมการที่ 3.2

$$R_e = \frac{T_2}{k_1} \times \frac{1}{C_b + C_s} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} &= \frac{50 \times 10^{-6}}{0.73} \times \left[\frac{1}{(10 \times 10^{-9}) + (1 \times 10^{-6})} \right] \\ &= 67.82 \Omega \end{aligned}$$

เราจะได้ค่าความต้านทาน R_e ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดมีค่า $68 \Omega \pm 10\%$

ดังนั้นกรณีความต้านทาน R_d จะเลือกใช้ความต้านทานประเภทเมทัลฟิล์ม (Metal Film Resistance) ขนาด 2 W เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำกว่าชนิดอื่น สำหรับความต้านทาน R_e จะใช้ความต้านทานแบบเซรามิก (Ceramic Resistance) ขนาด 10 W เพื่อให้ทนต่อกำลังงานที่จะได้รับจากอิมพัลส์สูงสุดขนาด 1200 V

เมื่อเรานำค่า R_d และ R_e ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดนำไปปัดยอนกลับในสมการที่ 2.8 และ 2.9 จะได้ค่า T_1 และ T_2 ค่าจริงตามทฤษฎีดังนี้

$$\begin{aligned} T_1 &= k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \\ &= (2.96 \times 39) \times \left[\frac{(10 \times 10^{-9}) \times (1 \times 10^{-6})}{(10 \times 10^{-9}) + (1 \times 10^{-6})} \right] \\ &= 1.14 \mu s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= k_1 R_e (C_b + C_s) \\ &= (0.73 \times 68) \times [(10 \times 10^{-9}) + (1 \times 10^{-6})] \\ &= 50.14 \mu s \end{aligned}$$

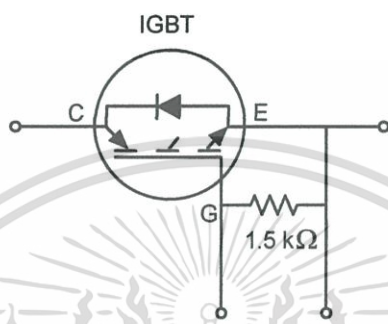
จะได้รูปคลื่นอิมพัลส์ตามทฤษฎีเท่ากับ $1.14/50.14 \mu s$ ตรงตามมาตรฐาน IEC 60-1

4. การออกแบบ IGBT[30]

IGBT ในวงจรอัดประจุทำหน้าที่เปิดปิดวงจรเพื่ออัดประจุให้กับ C_s จากพิกัดแรงดันอัดประจุไม่เกิน 1200 V ทำให้เราต้องเลือก IGBT ที่สามารถทนแรงดันระหว่างขาคอลเลกเตอร์ (Collector) กับ ขาอีมิเตอร์ (Emitter) ได้ 1200 V เราเลือกใช้ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD ซึ่งมีพิกัด

แรงดันที่ 1200 V และนำกระแสสูงสุด 21 A เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

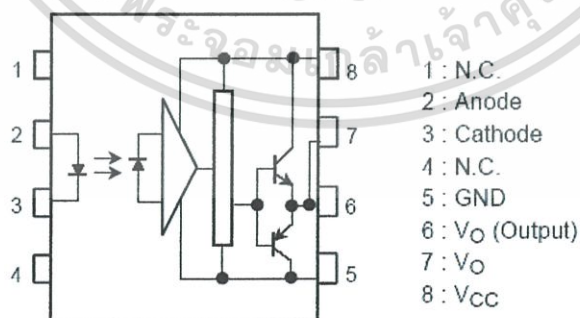
การควบคุมการเปิดปิดวงจรของ IGBT จะใช้การควบคุมแรงดันระหว่างขาเกต(Gate) กับขาอีมิเตอร์ การเปิดปิดวงจรของ IGBT จะรวดเร็วมากสังเกตได้จากพารามิเตอร์ $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$, t_r และ t_f อยู่ในช่วงเวลา 35 – 360 ns อย่างไรก็ตาม การเปิดปิดวงจรของ IGBT อาจเป็นไปได้ช้าเนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกตกับขาอีมิเตอร์ ทำให้ IGBT ยังคงทำงานอยู่ เราสามารถแก้ปัญหานี้ โดยการต่อความต้านทานขนาด 1.5 k Ω เพื่อใช้คายประจุที่ค้างอยู่ระหว่างขาเกตและขาอีมิเตอร์ทำให้การเปิดปิดวงจรทำได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 3.2 การต่อความต้านทานระหว่างเกตและอีมิเตอร์ของ IGBT

5. การออกแบบวงจรขับ IGBT

การควบคุมการทำงานของ IGBT เราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรควบคุมการทำงาน การต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับขาเกตของ IGBT โดยตรง อาจทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เสียหายจากแรงดันเกินจากขาเกตได้ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาเราจะใช้วงจรควบคุมสั่งงานผ่านวงจรขับ IGBT โดยจะใช้วงจรแยกทางแสง (Opto Isolate) โดยการใช้อะไอซีเบอร์ TLP250 ซึ่งมีวงจรภายในดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250

IC เบอร์ TLP250 ทำงานดังนี้ เมื่อไม่มีกระแสไบแอสหลอด LED ในขาที่ 2 และ ขาที่ 3 แรงดันระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 จะมีค่าเป็น 0 V แต่เมื่อมีกระแสไบแอสหลอด LED จนทำให้

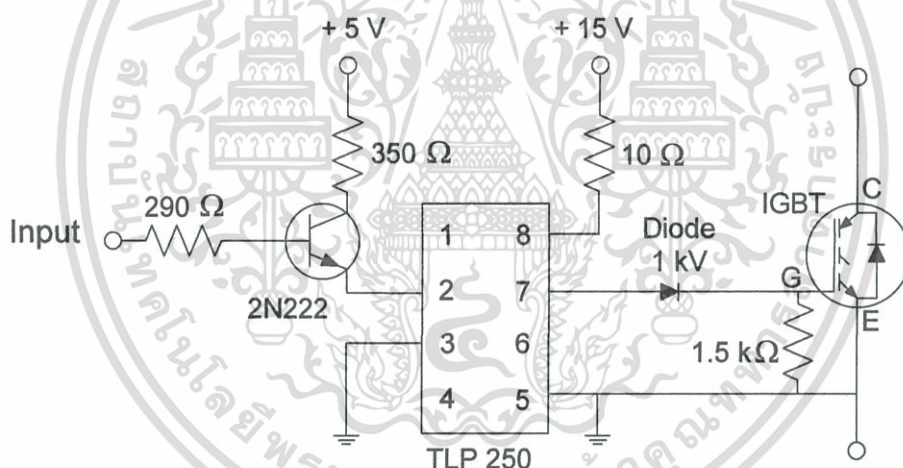
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอด LED เปล่งแสง ขาที่ 8 กับ ขาที่ 7 จะเสมือนลัดวงจรถึงกันทำให้มีแรงดันตกคร่อมระหว่างขาที่ 7 กับขาที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมขาที่ 8 กับขาที่ 5 การทำงานของ IC เบอร์ TLP250 จึงเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมได้ โดยสามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 1.5 A และทนแรงดันเข้าระหว่างขาที่ 8 กับ 5 ได้ 24 V

เราจะใช้ IC เบอร์ TLP250 เป็นตัวสร้างพัลส์ไปที่ขาเกต จากข้อมูลการขับขาเกต IGBT เบอร์ IRG4PH40UD ค่าที่เลือกไว้คือ 15 V 10 Ω ดังนั้นจะออกแบบวงจรขับ IGBT ได้ตามรูปที่ 3.4

ทรานซิสเตอร์ 2N222 ใช้ขยายสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสให้ LED ได้เพียงพอ ความต้านทาน 350 Ω จะจำกัดกระแสไบแอสของ LED ไม่ให้สูงเกินไป นอกจากนี้เราใส่ไดโอดพิคัดแรงดัน 1 kV เพื่อป้องกันกระแสไหลผ่านย้อนกลับเข้า วงจรขับ IGBT

เนื่องจาก IGBT ใช้แรงดันควบคุมการทำงาน จึงเหมาะที่จะใช้กับ IC เบอร์ TLP250 นี้ ใช้ค่าความต้านทานด้านขาออกเป็น 10 Ω เพื่อให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกตกับขาอีมีเตอร์ มีค่าสูงพอที่จะสั่งให้ IGBT ทำงานได้



รูปที่ 3.4 วงจรขับ IGBT

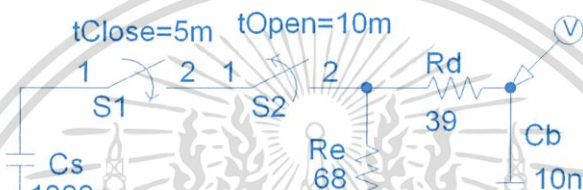
3.1.2 การจำลองการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม PSpice

ในการ Simulation จะตัดแหล่งจ่าย AC , Diode , ตัวความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L) ออกไปเพื่อความง่ายในการ Simulation และทำการป้อนค่าแรงดันคายประจุจากตัวเก็บประจุ C_s เท่ากับ 1.1 kV โดยสมมติให้สวิตช์ปกติเปิดและปกติปิดทำงานแทน IGBT ในวงจรที่จะสร้างขึ้นจริง และทำการวัดค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_b ก็จะได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ Simulation จากโปรแกรม PSpice ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวประกอบประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice และใช้ในการทดลองจริง

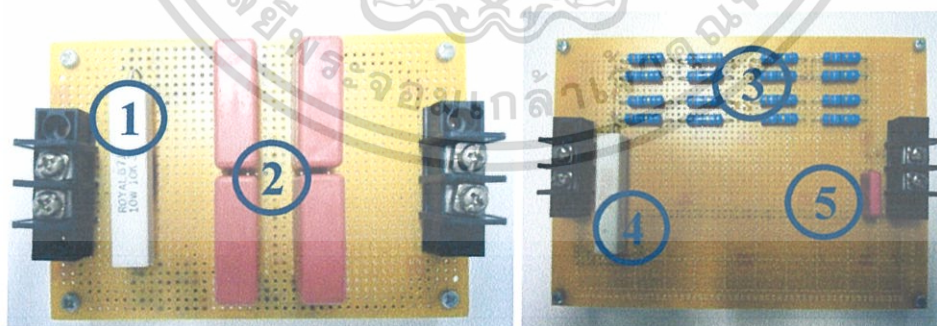
รายละเอียด	ค่าของตัวแปร
1. ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ(R_L)	10 k Ω
2. ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_S)	1000 nF
3. ความต้านทานปรับหน้าคลื่น(R_d)	39 Ω
4. ความต้านทานปรับหลังคลื่น(R_e)	68 Ω
5. ตัวเก็บประจุโหลด(C_b)	10 nF



รูปที่ 3.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ Simulation ด้วยโปรแกรม PSpice

3.1.3 การสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายของอุปกรณ์ในวงจรดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

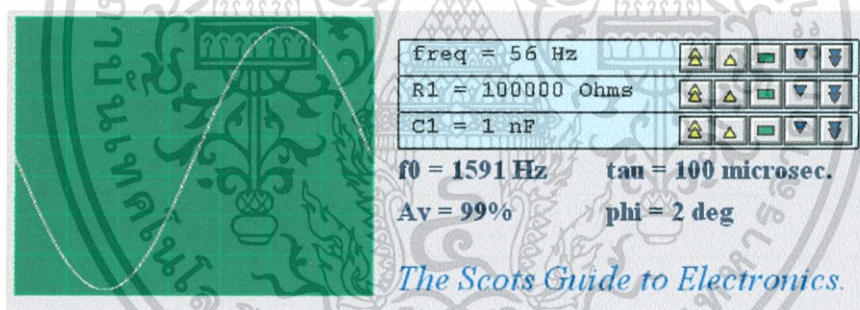
3.2 การจำลองการออกแบบและการสร้างวงจรกรองผ่านความถี่

3.2.1 การจำลองการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่

แรงดันอินพุตมาตรฐานจะมีช่องผ่านความถี่อยู่ในช่วง 0-250 kHz ดังนั้นจึงออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ทั้งวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและวงจรกรองผ่านความถี่สูงไว้เท่ากันที่ความถี่ตัด (Cut-off frequency) เท่ากับ 1591 Hz โดยคำนึงถึงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรทั้งผลตอบสนองทางเฟสและผลตอบสนองทางขนาด โดยใช้โปรแกรมจำลองผลตอบสนองทางเฟสและทางขนาดของ University of St Andrews ซึ่งค่า R_f และ C_f ต้องหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป ซึ่งใช้ R_f มีค่าเท่ากับ 100 k Ω และ C_f มีค่าเท่ากับ 1 nF ตามสมการที่ 2.17

1. การออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ[6]

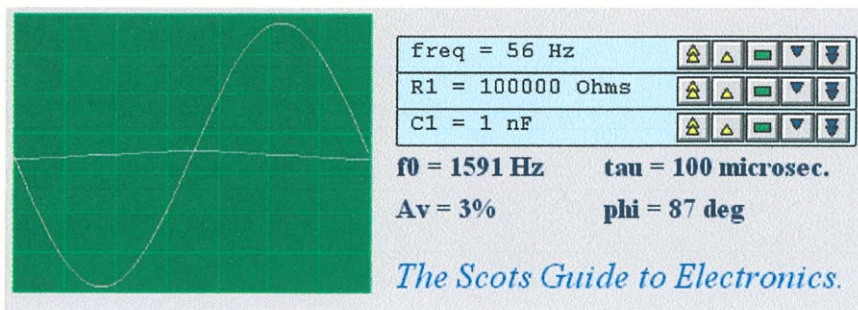
ออกแบบโดยโปรแกรมซึ่งใช้รูปคลื่น Sine ความถี่ 56 Hz ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความถี่ Cut-off ซึ่งสามารถผ่านไปได้ป้อนเข้าไปในวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ จะสังเกตว่าผลตอบสนองทางขนาดมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดทางอินพุต คือมีค่า Voltage Gain เท่ากับ 99 % ของรูปคลื่น Sine อินพุตและผลตอบสนองทางเฟส มีค่าเฟสเลื่อน (Phase Delay) ไป 2 องศา



รูปที่ 3.7 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ได้จากการออกแบบ

2. การออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่สูง

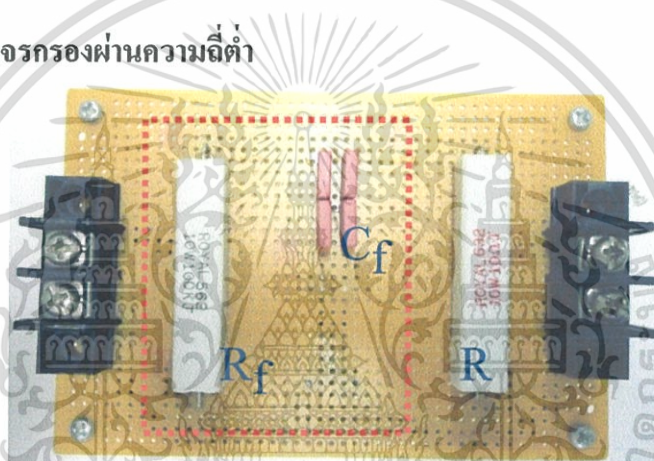
ออกแบบโดยโปรแกรมซึ่งใช้รูปคลื่น Sine ความถี่ 56 Hz เช่นกันซึ่งมีค่าต่ำกว่าความถี่ Cut-off ซึ่งสามารถผ่านไปได้ยากเพราะยังไม่ถึงจุด Cut-off ที่ความถี่ 1591 Hz เมื่อป้อนเข้าไปในวงจรกรองผ่านความถี่สูง จะสังเกตว่าผลตอบสนองทางขนาดมีขนาดแตกต่างมากกับขนาดทางอินพุต คือมีค่า Voltage Gain เท่ากับ 3 % ของรูปคลื่น Sine อินพุตเท่ากับว่าได้ผลดีคือจ่ายความถี่ต่ำเข้าไปทำให้แรงดันมีขนาดเล็กลงและผลตอบสนองทางเฟส มีค่าเฟสเลื่อน (Phase Delay) ไป 87 องศาจนเกือบราบเรียบซึ่งตามทฤษฎีแรงดันควรจะเรียบสนิท



รูปที่ 3.8 วงจรกรองผ่านความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบ

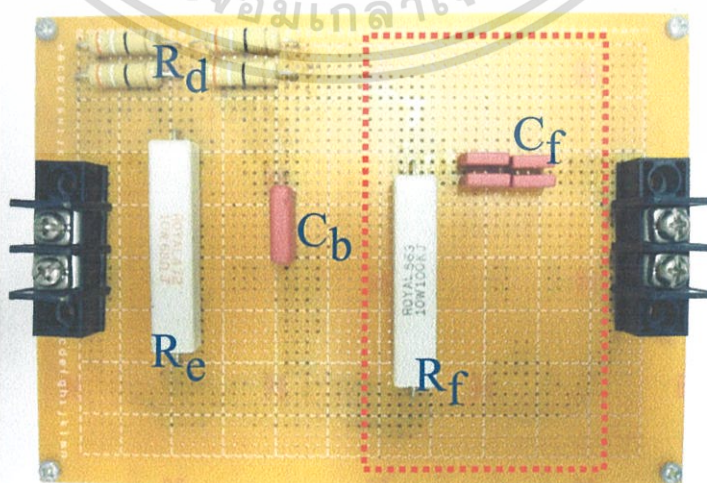
3.2.2 การสร้างวงจรกรองผ่านความถี่

1. การสร้างวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.9 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่สร้างขึ้นจริง

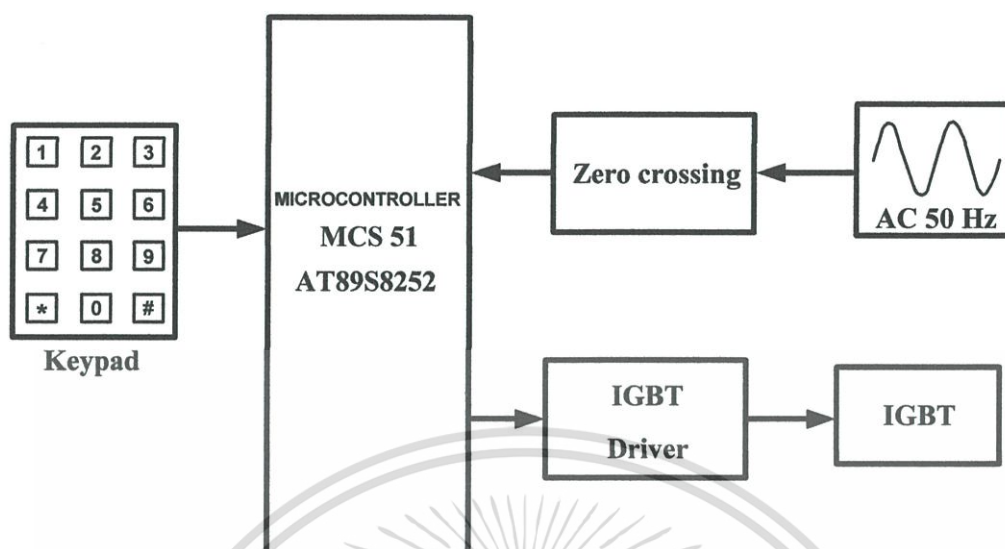
2. การสร้างวงจรกรองผ่านความถี่สูง



รูปที่ 3.10 วงจรกรองผ่านความถี่สูงที่สร้างขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสร้างวงจรควบคุมมุมเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์



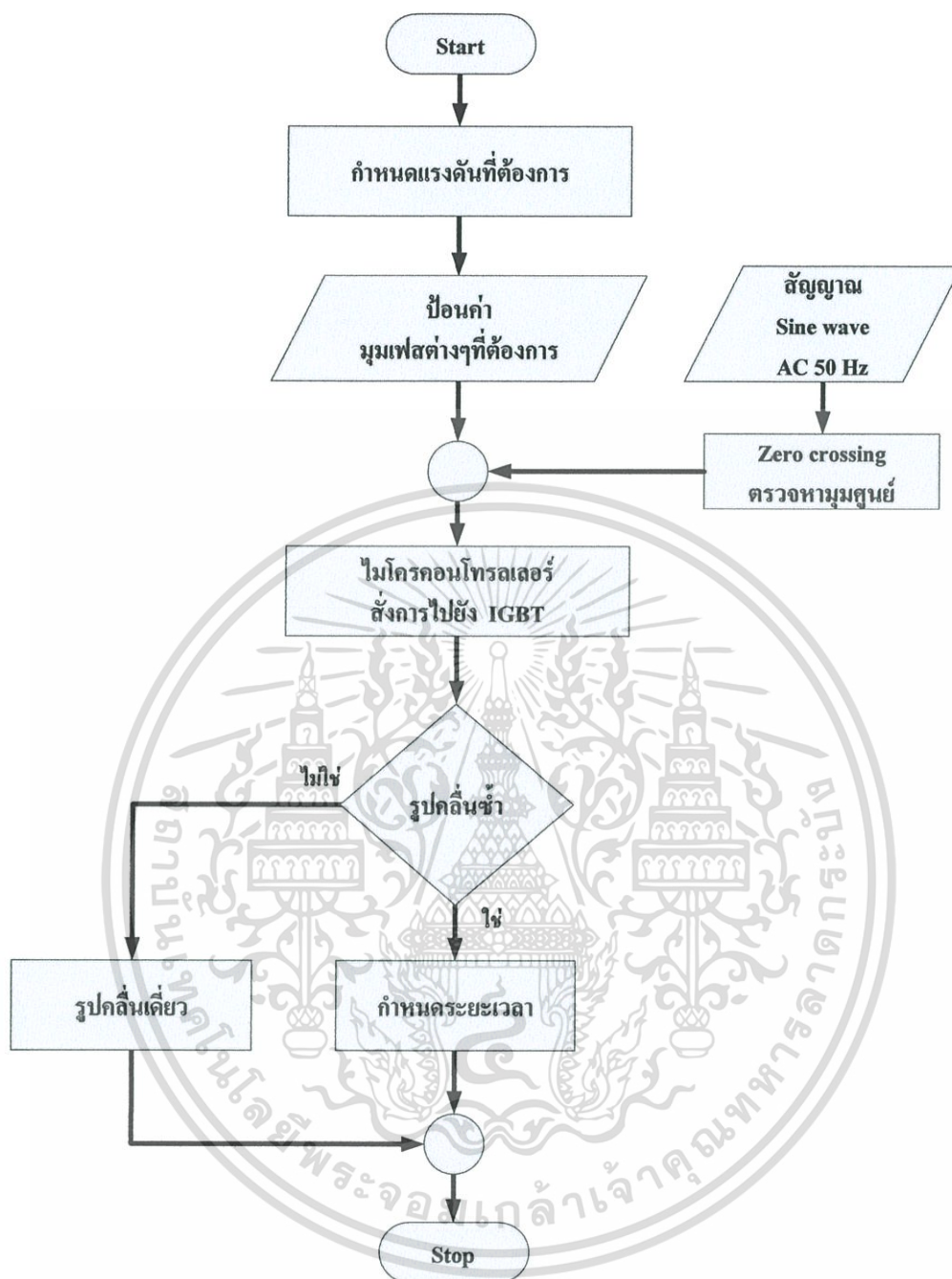
รูปที่ 3.11 การทำงานภายในวงจรควบคุมมุมเฟส

3.3.1 การออกแบบวงจรควบคุมมุมเฟส

ในส่วนของวงจรควบคุมมุมเฟส เราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน โดยสั่งการผ่าน Keypad เพื่อป้อนค่ามุมเฟสต่างๆ โดยเขียนโปรแกรมภาษา C ลง CPU ให้มีการหน่วงเวลาระหว่างรูปคลื่นซ้ำทุก 3 วินาที แล้วสั่งการผ่านวงจรขับ IGBT เพื่อให้ IGBT ทำงานตามเวลาและขั้นตอนที่ตั้งไว้ ลำดับเวลาการทำงานของ IGBT เป็นไปตามรูปที่ 3.12 วิธีควบคุมมุมเฟสให้ได้ตามมุมเฟสที่ต้องการนั้น โดยใช้วงจร Zero crossing ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป เมื่อเราต่อส่วนวงจรควบคุมมุมเฟสเข้ากับส่วนกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะทำงานตามโปรแกรมที่เขียนไว้



รูปที่ 3.12 ผังเวลาการทำงานของ IGBT

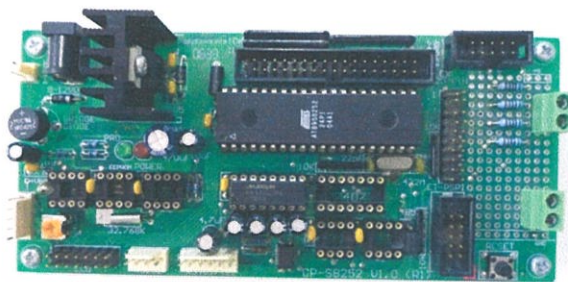


รูปที่ 3.13 Flowchart การทำงานของวงจรควบคุมมุมเฟส

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS 51 บอร์ดรุ่น CP-S8252 V 1.0 และใช้ CPU AT89S8252 มีหน่วยความจำถึง 8 kb สามารถ Download โปรแกรมลงโดยไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์อื่นอีก เพื่อใช้ในการควบคุมการทับซ้อนของแรงดันอิมพัลส์บนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

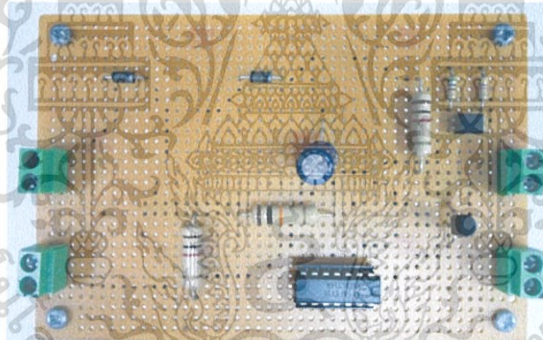
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ไมโครคอนโทรลเลอร์

1. การสร้างวงจร Zero crossing

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (Zero crossing) จะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแรงดันที่ตำแหน่งศูนย์โวลต์จากสัญญาณ Sine wave ที่เข้ามาแล้ว โดยเริ่มนับที่มุมศูนย์ที่เข้ามาเป็นมุมเริ่มต้นแล้วส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลตามโปรแกรมที่ตั้งไว้แล้วส่งสัญญาณต่อไปยัง IGBT เพื่อเปิด - ปิดวงจรในการทำให้แรงดันอิมพัลส์ที่บัสช้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุมต่างๆ ได้ตามต้องการ



รูปที่ 3.15 วงจร Zero crossing ที่สร้างขึ้นจริง

3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม

3.4.1 แกปทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยแกปทรงกลมเป็นวิธีที่ง่ายและมีความแม่นยำเชื่อถือได้ โดยอาศัยการเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวนระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศ หรือก๊าซซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดีสชาร์จของก๊าซคือ สปาร์กหรือเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวนขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าๆหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนสถิติ (Statistic Breakdown Voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอน ทำซ้ำเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ลักษณะสมบัติของแกปอากาศทรงกลม

- สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมที่เท่ากันจะมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ถ้าระยะช่องแกป d ไม่เกินครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง D ($d \leq D/2$)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานตั้งแต่ 2 ซม. ถึง 200 ซม. ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดทรงกลมมาตรฐานและระยะแกปวัดแรงดัน

ที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ตามมาตรฐาน (cm)	ระยะแกป d ห่างไม่เกิน (cm)	วัดแรงดันได้ สูงสุด (kV)
1	2	1	30.7
2	2.5	1.4	65.5
3	6.25	3	79.5
4	10	5	123
5	12.5	6	146
6	15	7.5	177
7	25	12	275
8	50	25	515
9	75	36	750
10	100	50	1010
11	150	75	1440
12	200	100	1840

- เป็นอุปกรณ์วัดที่ไม่มีตัวชี้จะสังเกตได้จากการเกิดสปาร์กหรือเบรกดาวน
- วัดได้ทั้ง กระแสตรง, กระแสสลับ และ แรงดันอิมพัลส์
- มีความถูกต้องเที่ยงตรง $\pm 3\%$

ค่าแรงดันเบรกดาวนของแกปทรงกลมจะมีความถูกต้องตามเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อ $d \leq D/2$ ฉะนั้นการเลือกขนาดทรงกลมจึงขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ต้องการวัดทรงกลมแต่ละขนาดวัดแรงดันได้สูงสุดดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.4.3 ข้อพึงปฏิบัติในการใช้แกปทรงกลม[4]

มาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าทรงกลมที่จะใช้ทำแกปทรงกลมนั้นจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2 % และควรจะเรียบมาก โดยเฉพาะในพื้นที่ $0.3 D$ ซึ่ง วัดโดยใช้จุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปาร์ก P เป็นจุดศูนย์กลาง ผิวทรงกลมจะต้องสะอาดปราศจากฝุ่นละออง คราบมัน หรือสารที่ใช้เคลือบ นอกจากนี้ยังต้องแห้งสนิทและจะไม่ใช้แถบทรงกลมมาตรฐานวัดแรงดันเมื่อ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเกิน 90% เนื่องจากไอน้ำในอากาศอาจกลั่นตัวมาเกาะที่ผิวทรงกลม ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแถบทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลง

ระยะ A และ B (ดูรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ประกอบ) เป็นค่าที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากระยะดังกล่าวเป็นตัวกำหนดพื้นที่ว่างที่ต้องการในการทดสอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือระยะที่ จะต้องมีวัดวัตถุใดซึ่งสามารถจะทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแถบทรงกลมมีการเปลี่ยนแปลง ระยะ A และ B ได้กำหนดตามมาตรฐาน IEC 60052 (เมื่อ S คือ ระยะห่างของแถบทรงกลม) โดยมีข้อพึงปฏิบัติในการใช้แถบทรงกลมดังนี้

- ต้องติดตั้งและยึดตามมาตรฐาน IEC 60052 แนะนำไว้ คือถ้าทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 25 เซนติเมตร มักจะติดตั้งในแนวนอน ถ้าใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร มักจะติดตั้งในแนวตั้ง ดังรูป 3.16 และรูปที่ 3.17 แต่เนื่องจากแถบทรงกลมที่ใช้ในการทำวิจัยมีขนาดเพียง 2 เซนติเมตร จึงไม่มีผลทางด้านน้ำหนักสามารถออกแบบได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ผู้วิจัยจึงออกแบบสร้างในแนวตั้ง

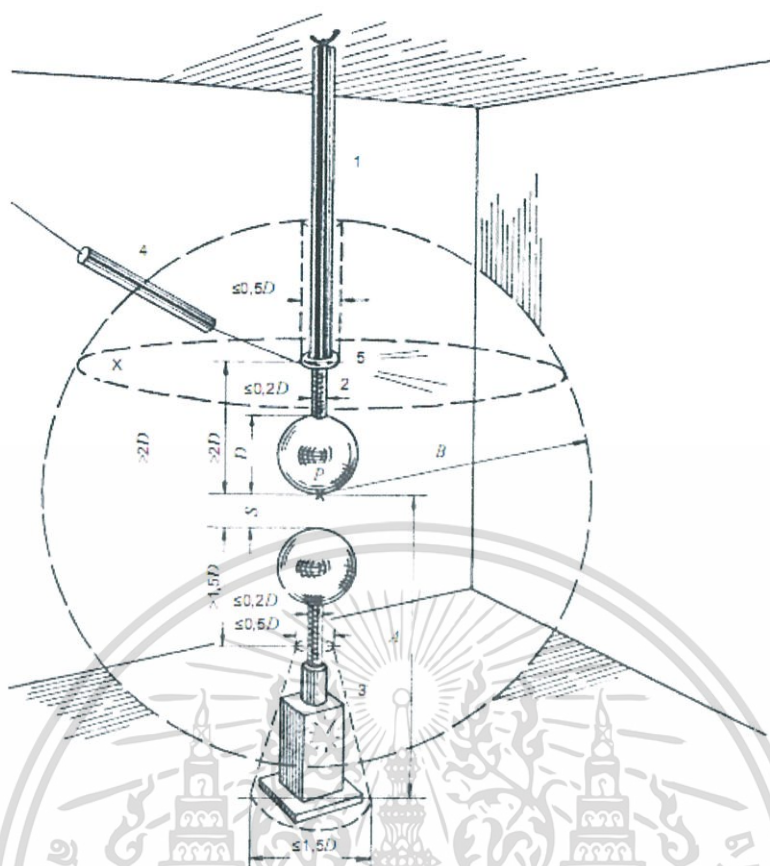
- ในระยะรัศมี 3.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (D) วัดจากจุดบนพื้นผิวทรงกลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะต้องไม่มีโลหะหรือตัวนำใดๆ

- ระยะห่างระหว่างทรงกลมจะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม ($d \leq D/2$)

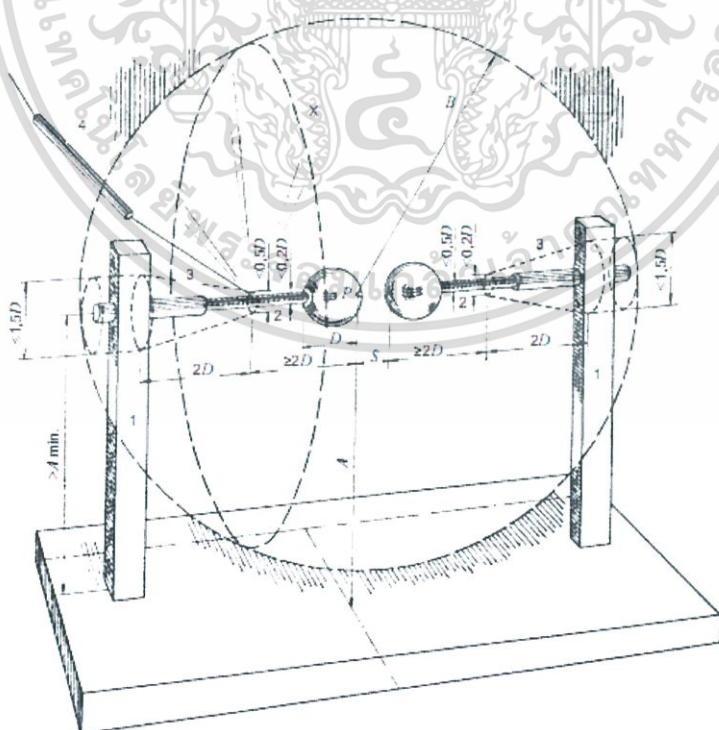
- กระแสที่เกิดจากการสปาร์กไม่ควรเกิน 1 แอมแปร์ โดยต่อความต้านทานอันดับไว้กับทรงกลมเพื่อจำกัดกระแส และความต้านทานตัวนี้จะทำหน้าที่หน่วง (damp) ความถี่สูง อันเกิด จากมี L และ C

- ควรจะตัดวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับวงจรทันทีหลังจากเกิดสปาร์กแล้ว เพื่อป้องกันผิวทรงกลมเสีย

- ค่าที่ถือว่าถูกต้องนั้นได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆ ครั้ง (ประมาณ 5 ครั้ง) ค่าที่วัดได้ครั้งแรกมักจะมีค่าต่ำ อันเนื่องมาจากมีฝุ่นละอองที่ผิวของทรงกลม ดังนั้นก่อนใช้ควรขัด มัน และทำความสะอาดพื้นผิว ทรงกลมก่อนเสมอ



รูปที่ 3.16 การติดตั้งแกปทรงกลม $\Phi > 25$ cm แนวตั้ง



รูปที่ 3.17 การติดตั้งแกปทรงกลม $\Phi \leq 25$ cm แนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของสัญลักษณ์ในรูปทั้งสอง

1. ฉนวนรองรับ
2. ก้านยึดทรงกลม
3. เกียร์ขับเคลื่อนทรงกลมเพื่อปรับระยะ
4. สายแรงสูงต่อกับความต้านทานหน่วง

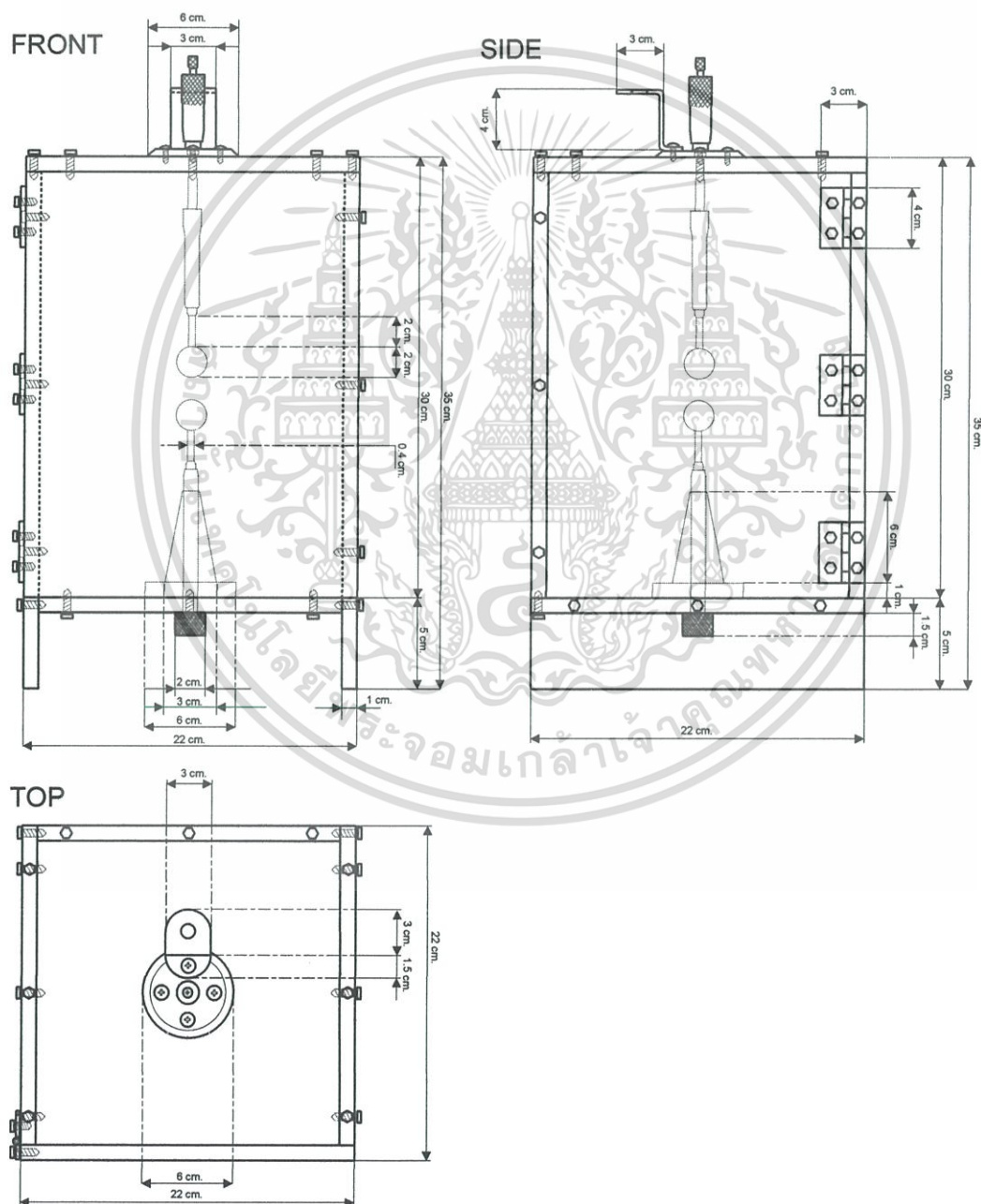
5. ที่ต่อสายแรงสูง

P จุดที่เกิดสปาร์กของแก๊ปทรงกลม

A ความสูงของ P เหนือพื้นดิน

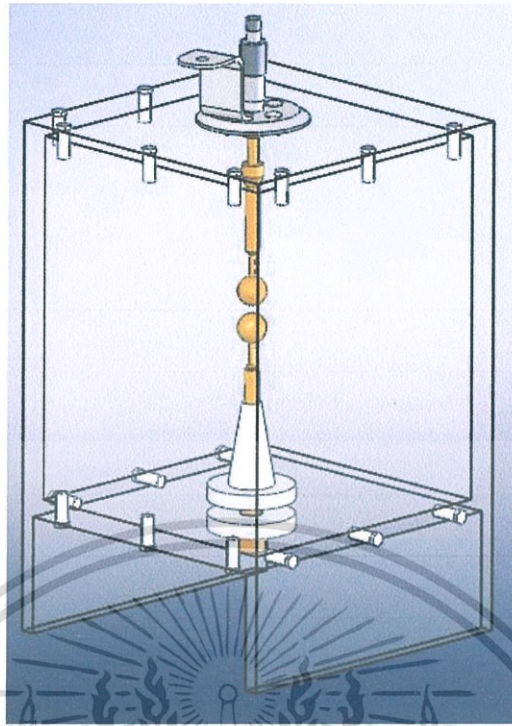
B รัศมีของย่านปลอดภัยจากวัตถุอื่นใด ฉะนั้น ความต้านทานหน่วงจะต้องอยู่เหนือระนาบ X

1. ออกแบบสร้างกล่องอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม



รูปที่ 3.18 ภาพฉายการออกแบบกล่องอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กล้องอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidwork

2. การสร้างกล้องอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม

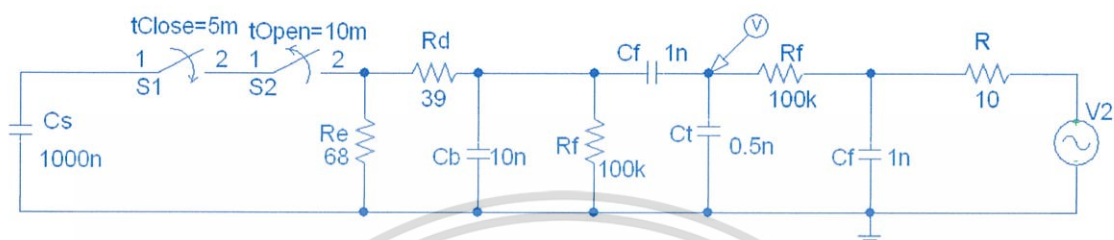


รูปที่ 3.20 กล้องอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมที่สร้างขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

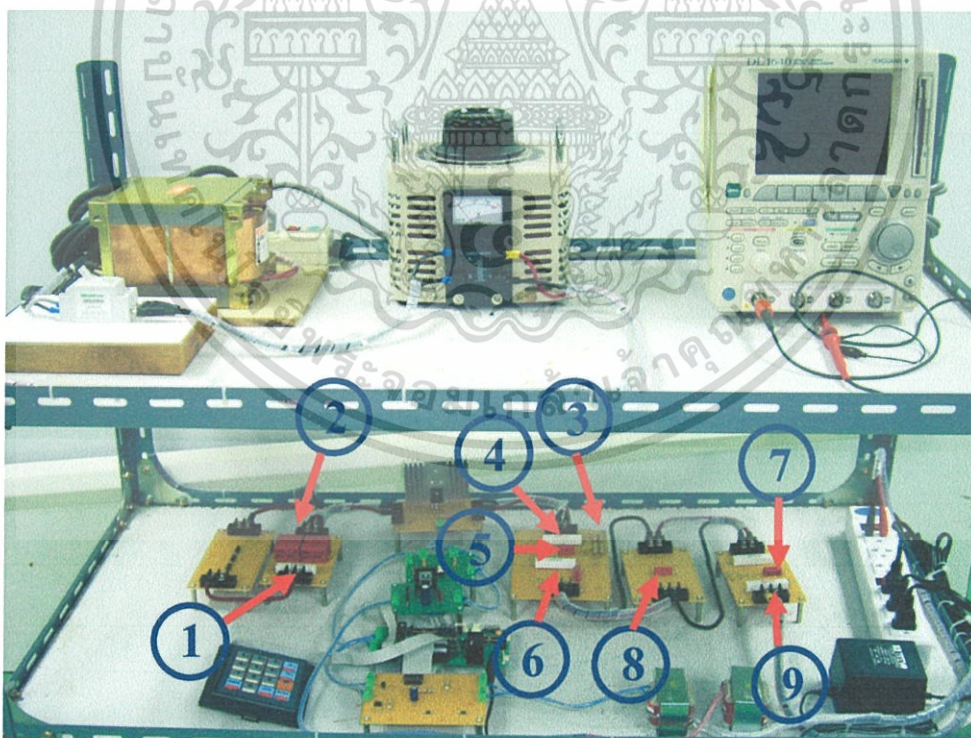
3.5 การจำลองการออกแบบและการสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

3.5.1 การจำลองการออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ด้วยโปรแกรม PSpice



รูปที่ 3.21 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ Simulation ด้วยโปรแกรม PSpice

3.5.2 การสร้างวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz



รูปที่ 3.22 วงจรที่สร้างขึ้นจริง

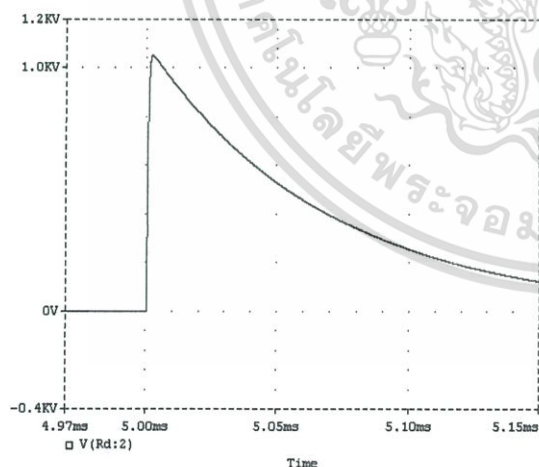
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรองค์ประกอบทางไฟฟ้าของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่บับช้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice และใช้ในการทดลองจริง

รายละเอียด	ค่าของตัวแปร
1. ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ(R_L)	10 k Ω
2. ตัวเก็บประจุอิมพัลส์(C_s)	1000 nF
3. ความต้านทานปรับหน้าคลื่น(R_d)	39 Ω
4. ความต้านทานปรับหลังคลื่น(R_e)	68 Ω
5. ตัวเก็บประจุโหลด(C_b)	10 nF
6. ความต้านทานของวงจรกรอง(R_f)	100 k Ω
7. ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง(C_f)	1 nF
8. วัสดุทดสอบ(C_t)	0.5 nF
9. ความต้านทานจำกัดกระแส(R)	10 Ω

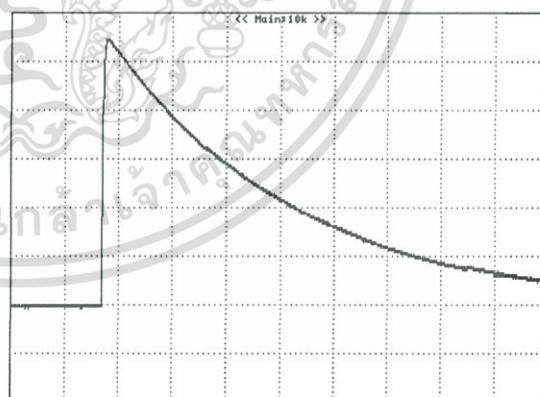
3.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลลัพธ์จากการสร้าง

3.6.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



(แกน X : 50 μ s/div และแกน Y : 1 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

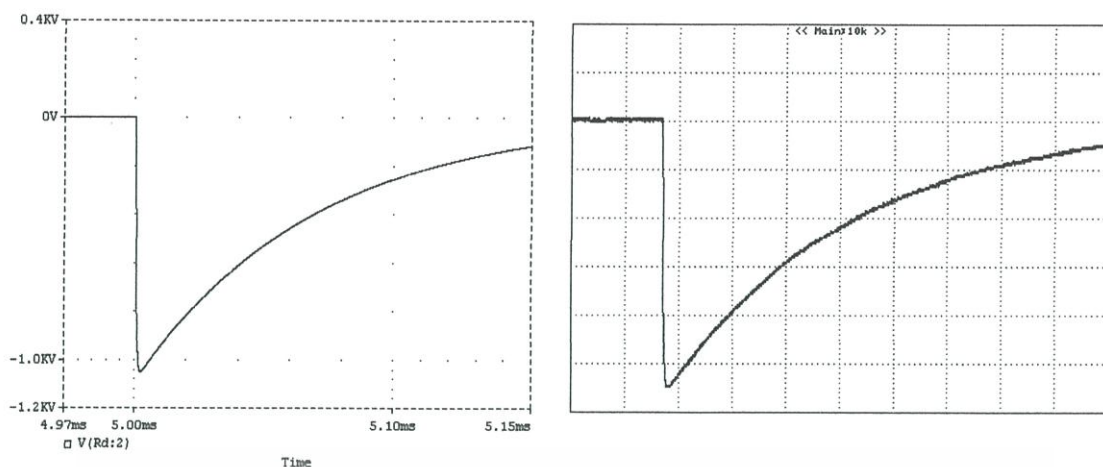


(แกน X : 20 μ s/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

การทดลองจริง

รูปที่ 3.23 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



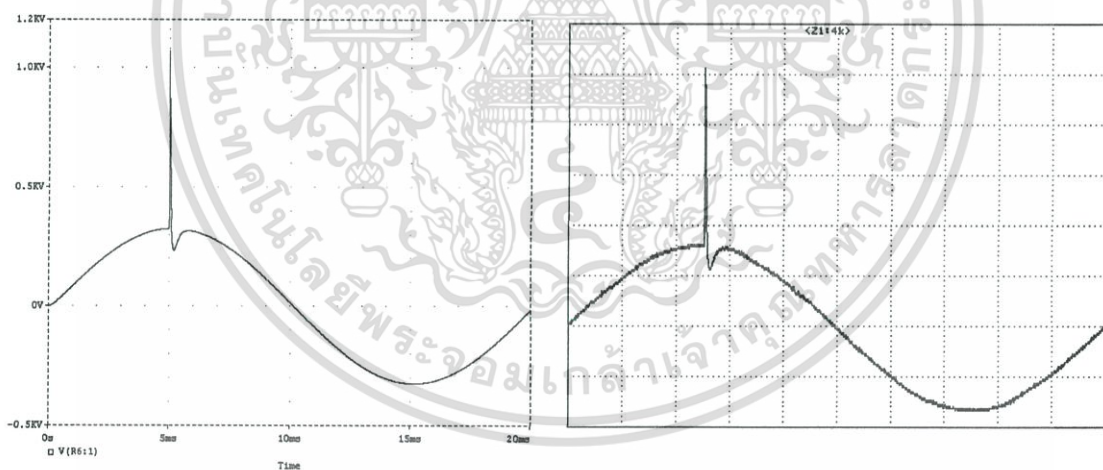
(แกน X : 100µs/div และแกน Y : 1 kV/div) (แกน X : 20µs/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองจริง

รูปที่ 3.24 กราฟแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

3.6.2 วงจรแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz



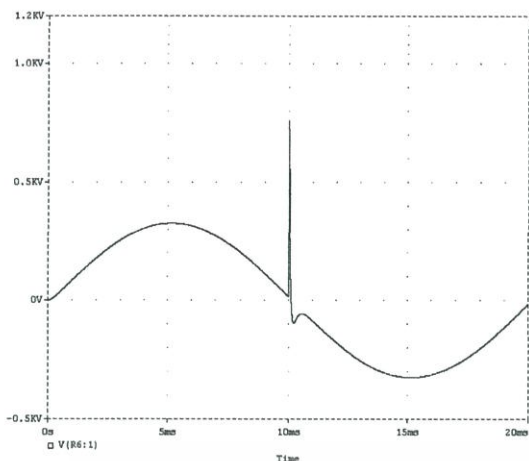
(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div) (แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

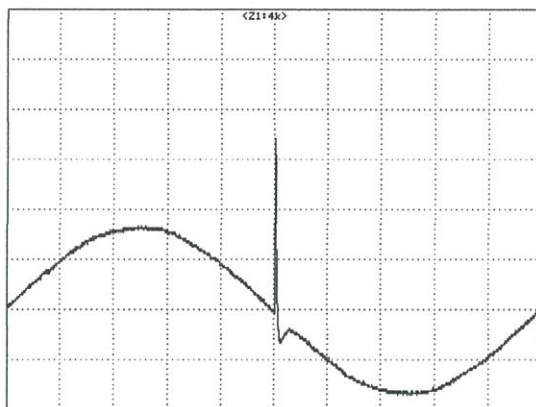
การทดลองจริง

รูปที่ 3.25 กราฟแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)

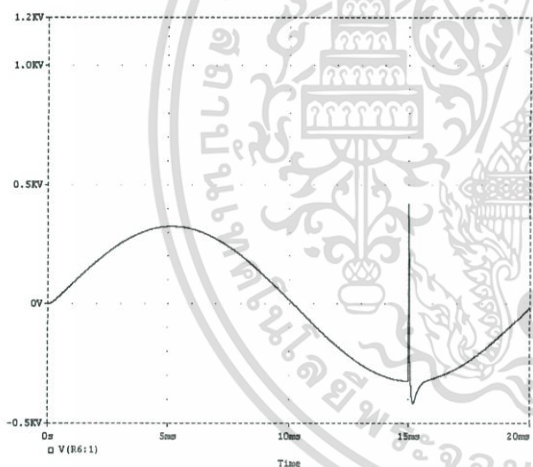


(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

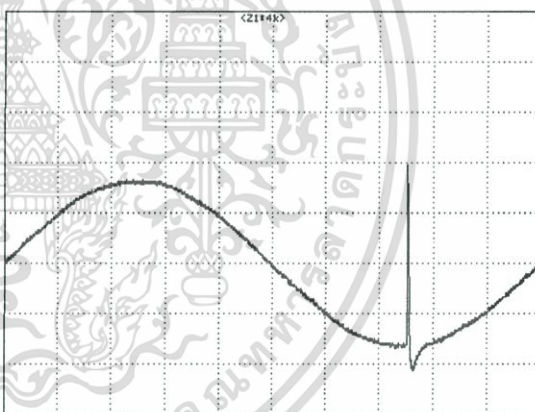
จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองจริง

รูปที่ 3.26 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 180°



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)



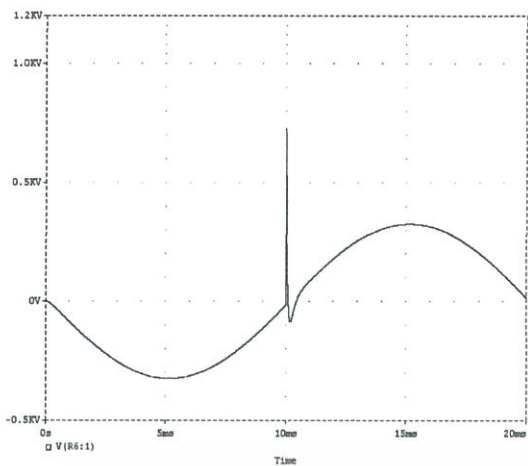
(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

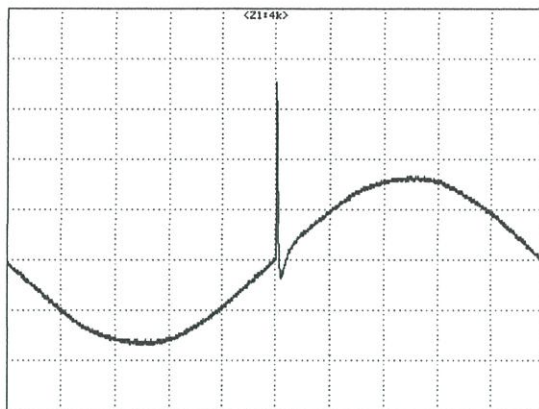
การทดลองจริง

รูปที่ 3.27 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 270°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)

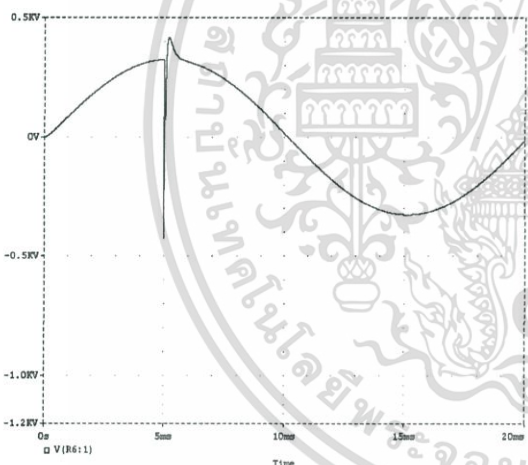


(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

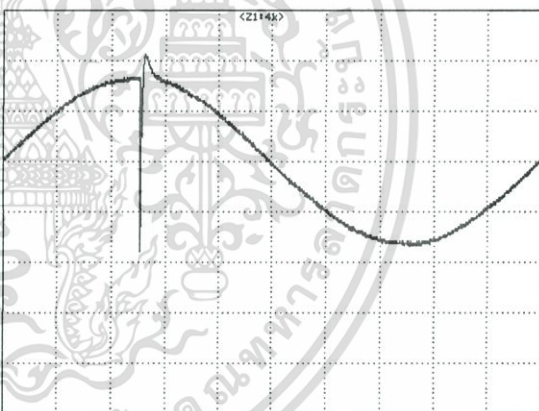
จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองจริง

รูปที่ 3.28 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 360°



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)



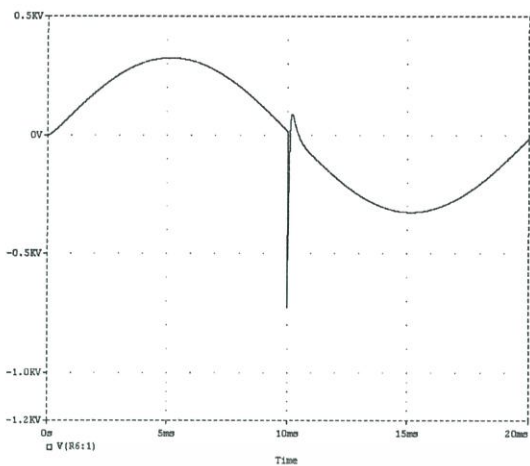
(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

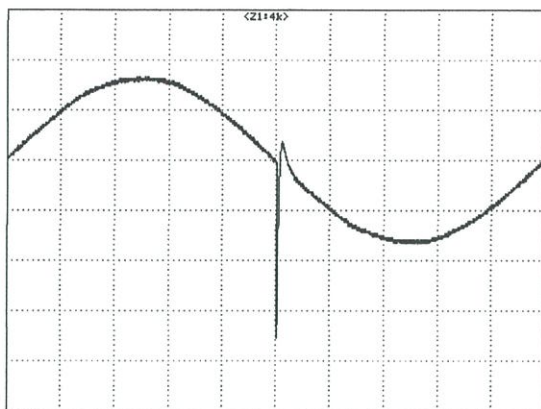
การทดลองจริง

รูปที่ 3.29 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)

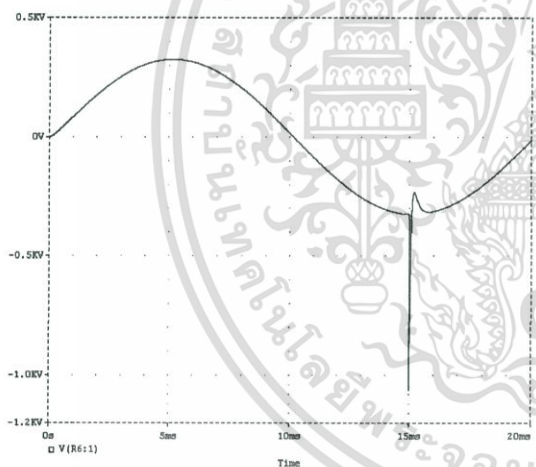


(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

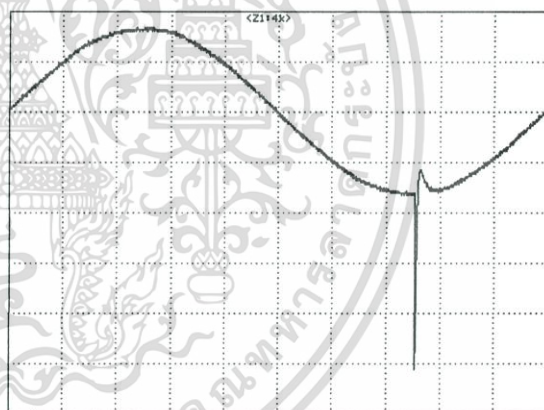
จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองจริง

รูปที่ 3.30 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 180°



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)



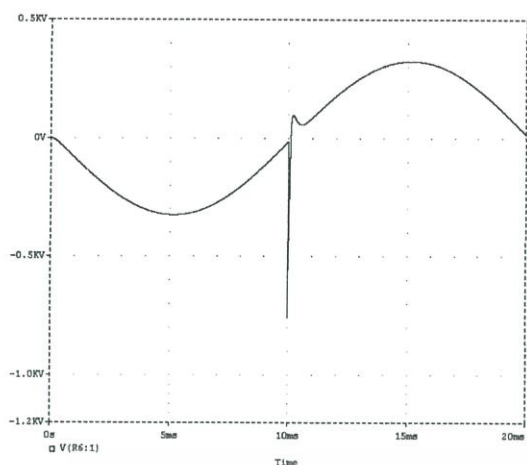
(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

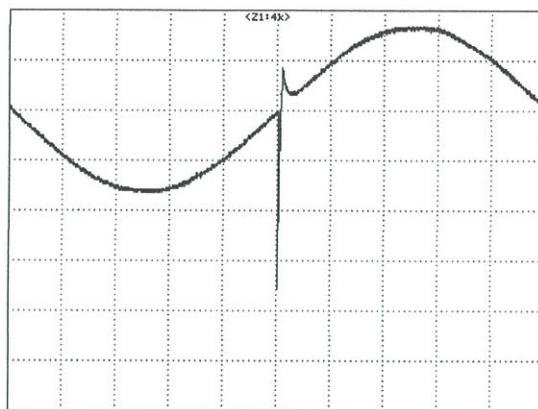
การทดลองจริง

รูปที่ 3.31 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 270°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(แกน X : 5 ms/div และแกน Y : 0.5 kV/div)



(แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองจริง

รูปที่ 3.32 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่วขณะที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มุม 360°

การจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองจากวงจรที่สร้างขึ้นจริง โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นวัตถุทดสอบเพื่อจำลองไมโครແປທຽມທຽມທີ່จะสร้างขึ้น สรุปลงได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากและตรงตามมาตรฐานสามารถนำไปทดสอบกับไมโครແປທຽມທີ່จะสร้างขึ้นได้โดยปริยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การศึกษาคุณลักษณะการเบรกดาวนซ์ของไมโครแกป

บทที่ 4 เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากวงจรที่สร้างขึ้น โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะการเบรกดาวนซ์ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ทำการศึกษาโดยเก็บผลรูปคลื่นอิมพัลส์จำนวน 20 ครั้ง (Up&Down) เพื่อหา $U_{b50\%}$ แล้วนำมาแปลงเป็นค่าสถานะมาตรฐานเพื่อทำการวิเคราะห์ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะการเบรกดาวนซ์ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันกระแสสลับที่มีค่าคงประมาณ (228 – 230 V_{rms}) ซึ่งจ่ายแรงดันตกคร่อมไมโครแกปไว้ก่อนแล้วจึงจ่ายแรงดันอิมพัลส์เข้าไปเพื่อทดสอบ แต่เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานใดๆมากำหนด จึงทำการศึกษาโดยการเก็บผลรูปคลื่นอิมพัลส์จำนวน 10 ครั้ง ซึ่งเบรกดาวนซ์บนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz นำมาหาค่าเฉลี่ย และนำค่าเฉลี่ยเฉพาะรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ได้มาแปลงเป็นค่าสถานะมาตรฐานเพื่อทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ต่อไป

4.1 คุณลักษณะการเบรกดาวนซ์ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์

4.1.1 การวัดแรงดันเบรกดาวนซ์ของแกปอากาศทรงกลม[4]

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก หรือเบรกดาวนซ์ของแกปทรงกลมนั้นขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศหรือก๊าซ ระยะแกปของทรงกลม d ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม D และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ คือ

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

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กที่แกปทรงกลม

ตามมาตรฐาน IEC 60052 -2002 ได้กำหนดค่าเบรกดาวนซ์ของแกปทรงกลมในอากาศที่สถานะมาตรฐาน คือ

- อุณหภูมิ $t_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ความดันบรรยากาศ $b_n = 101.3\text{ kPa}$ (1.013 bar = 760 มม.ปรอท)
- ความชื้นสัมบูรณ์ $h = 8.5\text{ g/m}^3$

โดยได้มีการคำนึงถึงผลของความหนาแน่นของอากาศ คือ ตัวประกอบแปลงผันความ

หนาแน่นของอากาศ (k_d) และความชื้นในบรรยากาศด้วย คือ ตัวประกอบแปลงผันความชื้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(k_h) ด้วย กล่าวคือ ค่าแรงดันเบรกควาน์ของแก๊สตรงลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมบูรณ์ด้วยอัตรา 0.2 % ต่อ g/m^3 โดยที่ค่าแรงดันเบรกควาน์ หากจากค่าความชื้นสัมบูรณ์เฉลี่ย $8.5 g/m^3$ ฉะนั้น ค่าแรงดันเบรกควาน์ที่สถานะห้อง U_b จึงต้องแก้ด้วยตัวประกอบ k_d และ k_h

โดย
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h} \quad (4.1)$$

เมื่อ U_{bn} = ค่าแรงดันเบรกควาน์แก๊สตรงลมที่สถานะมาตรฐาน หน่วย V_p (ค่าสูงสุด)

U_b = ค่าแรงดันเบรกควาน์แก๊สตรงลมที่สถานะห้อง หน่วย V_p (ค่าสูงสุด)

k_d = ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 – 1.05

k_h = ตัวประกอบแปลงผันความชื้น

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273 + t_n}{273 + t} \quad (4.2)$$

เมื่อ δ = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ

b = ความดันบรรยากาศของห้องในขณะที่วัด หน่วย mm Hg (มม. ปรอท)

b_n = ความดันบรรยากาศสถานะมาตรฐาน 760 mm Hg (มม. ปรอท)

t = อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัด หน่วย C° (องศาเซลเซียส)

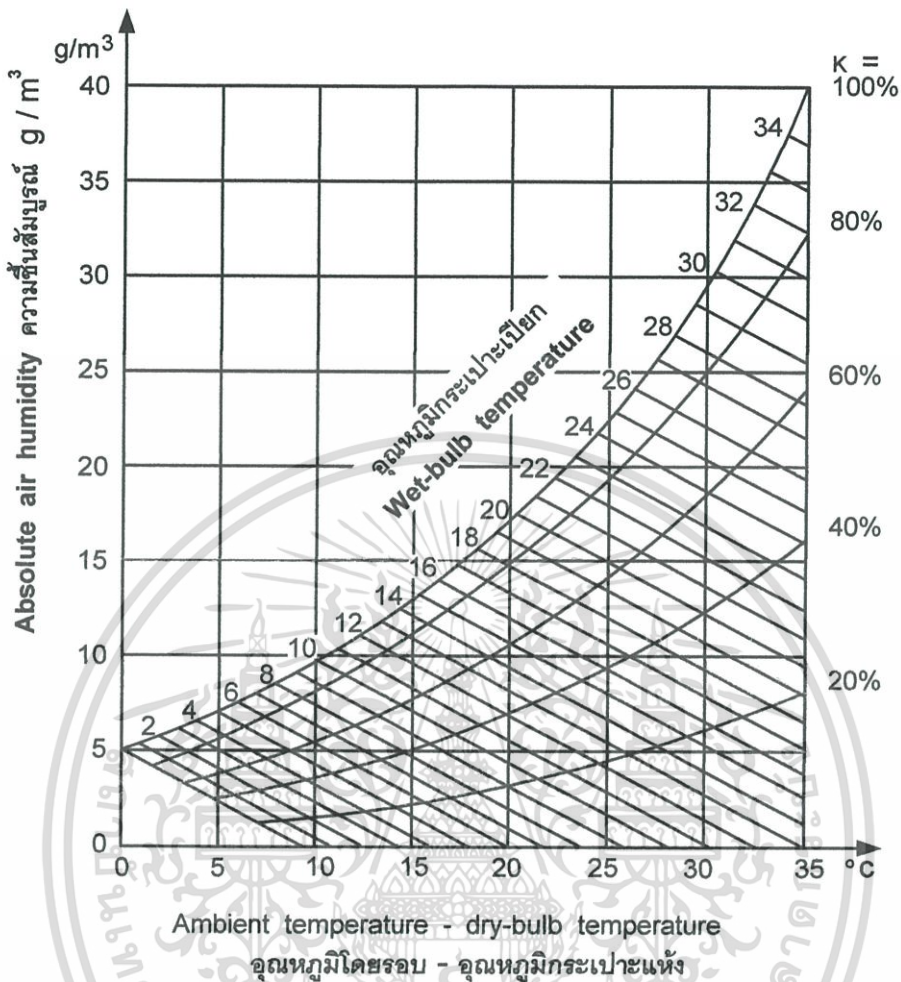
t_n = อุณหภูมิสถานะมาตรฐาน $20 C^\circ$ (องศาเซลเซียส)

โดย
$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)] \quad (4.3)$$

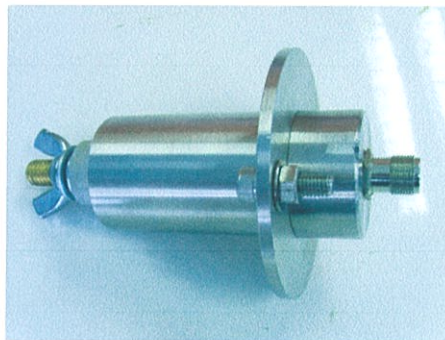
เมื่อ h = ความชื้นสัมบูรณ์ หน่วย g/m^3 (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)

หาได้จากกราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในทอมอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียกของ Psychrometer แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางความชื้นสัมบูรณ์



การวัดแรงดันอิมพัลส์เบรกควานี้ด้วยไมโครแกปทรงกลมเพื่อหา $U_{b50\%}$ โดยวิธีการปรับขึ้นลง(Up&Down) จำนวน 20 ครั้ง ก็จะได้ค่า U_b ($U_{b50\%}$) เฉลี่ยออกมา แล้วทำการแทนค่าตามสมการข้างต้นที่กล่าวมาเพื่อหาค่าแรงดันเบรกควานี้แกปทรงกลมที่สภาวะมาตรฐาน (U_{bn}) และจะใช้ R_{sh} ($4.32 m\Omega$) ต่ออนุกรมกับไมโครแกปทรงกลมและทำการวัดแรงดันตกคร่อมเพื่อใช้ในการหาค่ากระแสอิมพัลส์เบรกควานี้

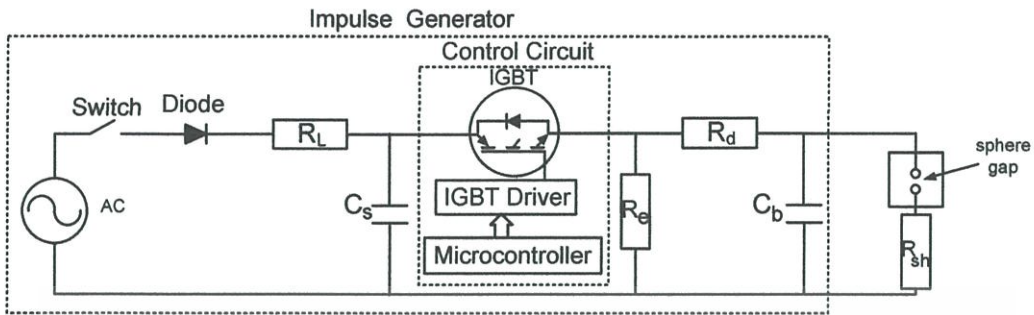


รูปที่ 4.1 R-shunt $4.32 m\Omega$ ที่ใช้ต่อรวมในวงจรเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก

วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เบรคความชั่ววอกของไมโครแกป แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เบรคความชั่ววอกของไมโครแกป

ผลการทดสอบของไมโครแกประยะ $10 \mu\text{m}$ โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแกป = $10 \mu\text{m}$

อุณหภูมิ = 24 C°

ความดันบรรยากาศ = 765 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 52%

$h = 11 \text{ g/m}^3$

$U_b = 471.25 \text{ V}_p$

แทนค่าสมการที่ (4.2)

$$\delta = \frac{765}{760} \frac{273 + 20}{273 + 24} = 0.993$$

$$\therefore k_d = \delta$$

แทนค่าสมการที่ (4.3)

$$k_h = 1 + [0.002(11/0.993 - 8.5)]$$

$$= 1.005$$

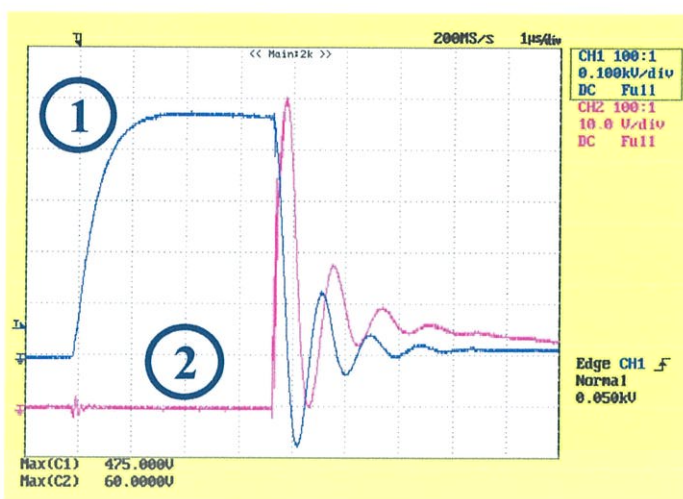
แทนค่าสมการที่ (4.1)

$$U_{bn} = \frac{471.25}{0.993 \times 1.005}$$

$$= 472.210 \text{ V}_p$$

$$\approx 472 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

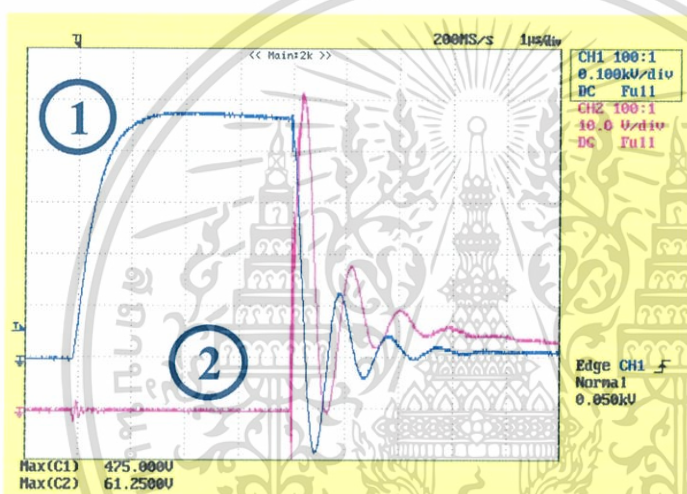
1. แรงดันอิมพัลส์

0.1 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

10 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

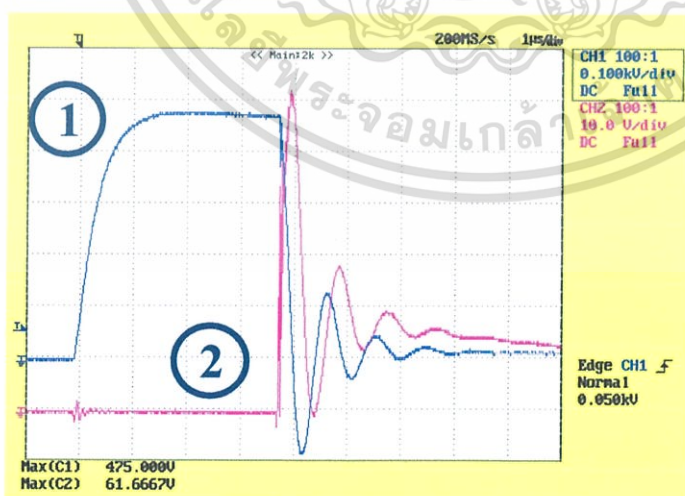
1. แรงดันอิมพัลส์

0.1 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

10 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.1 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

10 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน
ของไมโครแถบระยะ 10 μ m (จั่วบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบของไมโครแก๊ประยะ 20 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแก๊ป = 20 μm

อุณหภูมิ = 24 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 764 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 52 %

$h = 11 \text{ g/m}^3$

$U_b = 641.9 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{764}{760} \frac{273+20}{273+24}$$

$$= 0.992$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(11/0.992 - 8.5)]$$

$$= 1.005$$

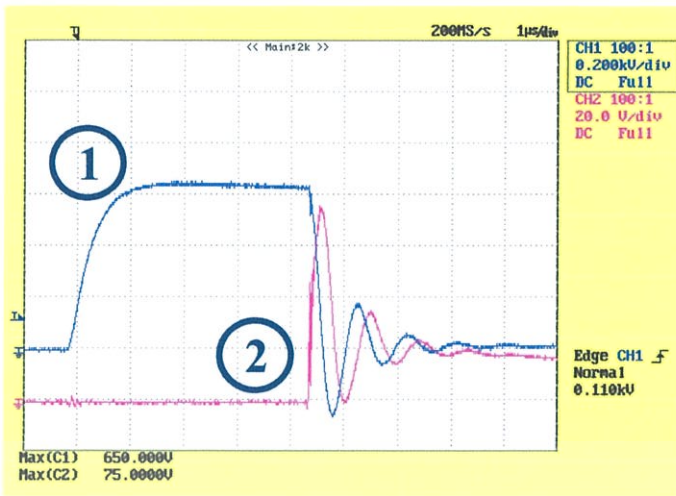
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{641.9}{0.992 \times 1.005}$$

$$= 643.875 \text{ V}_p$$

$$\approx 644 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

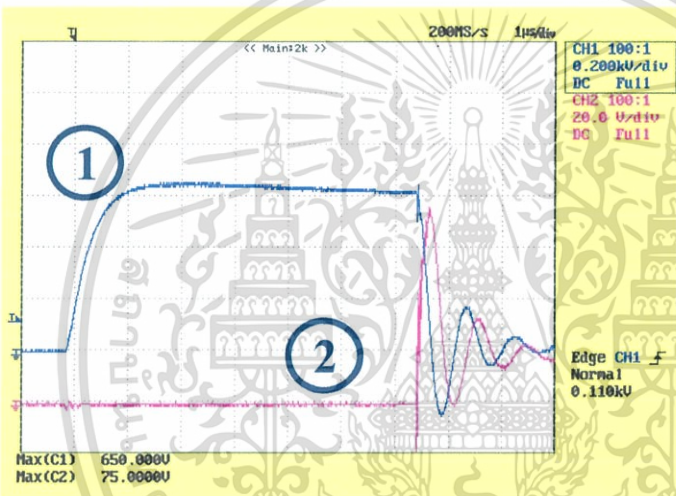
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

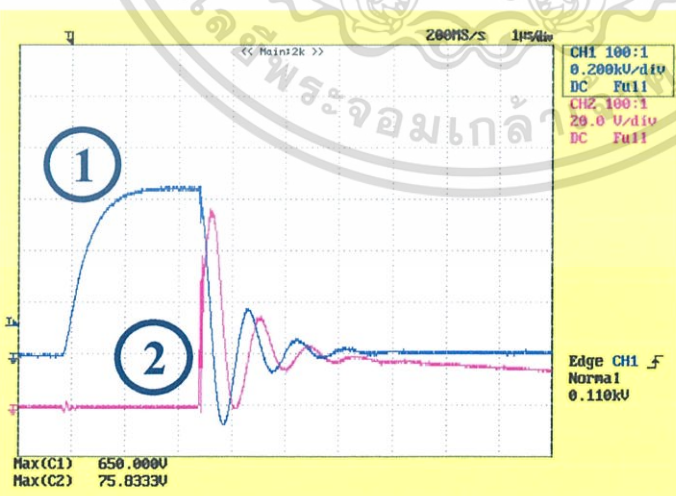
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวนรี

ของไมโครแถบประยะ 20 μ m (ข้าวบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบของไมโครแก๊ประยะ 30 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแก๊ป = 30 μm

อุณหภูมิ = 26 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 760 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 50 %

$h = 12 \text{ g/m}^3$

$U_b = 790.65 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273 + t_n}{273 + t}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{760}{760} \frac{273 + 20}{273 + 26} \\ &= 0.9799 \end{aligned}$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$\begin{aligned} k_h &= 1 + [0.002(12/0.9799 - 8.5)] \\ &= 1.007 \end{aligned}$$

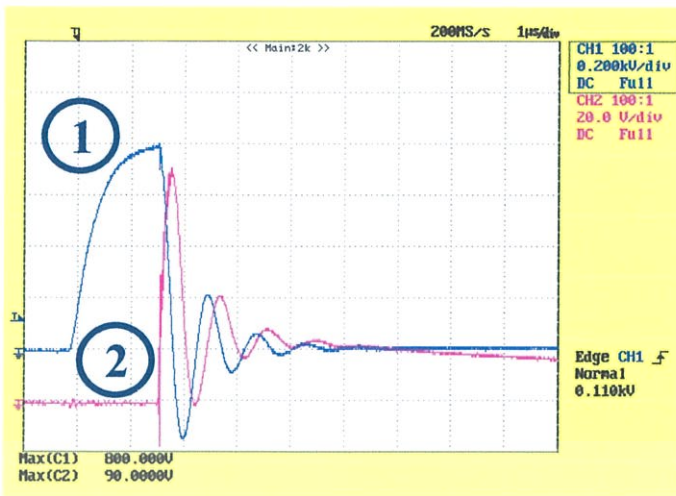
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{790.65}{0.9799 \times 1.007}$$

$$= 801.259 \text{ V}_p$$

$$\approx 801 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

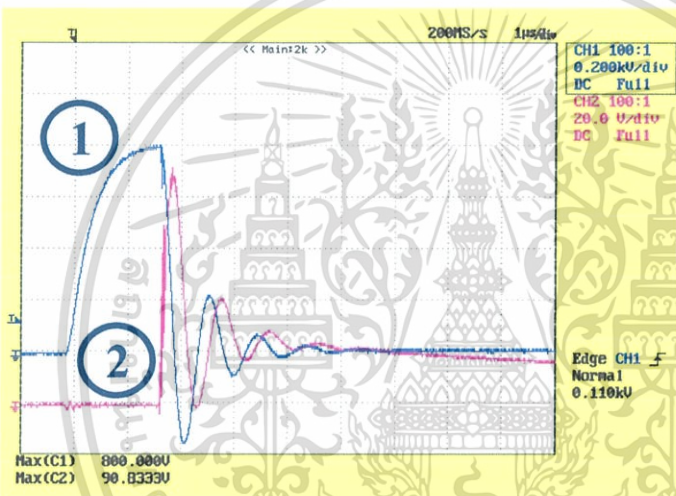
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

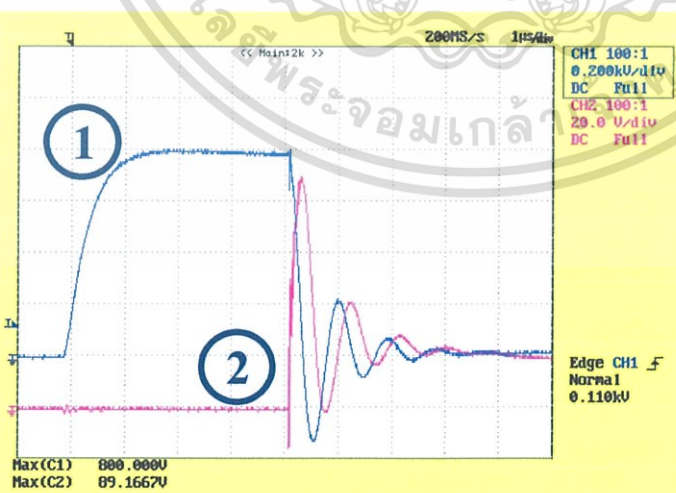
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน์

ของไมโครแถบประยะ 30 μ m (จั่วบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบของไมโครแก๊ประยะ 40 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแก๊ป = 40 μm

อุณหภูมิ = 23 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 763 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 53 %

$h = 10.5 \text{ g/m}^3$

$U_b = 937.25 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{763}{760} \frac{273+20}{273+23} \\ &= 0.994 \end{aligned}$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$\begin{aligned} k_h &= 1 + [0.002(10.5/0.994 - 8.5)] \\ &= 1.004 \end{aligned}$$

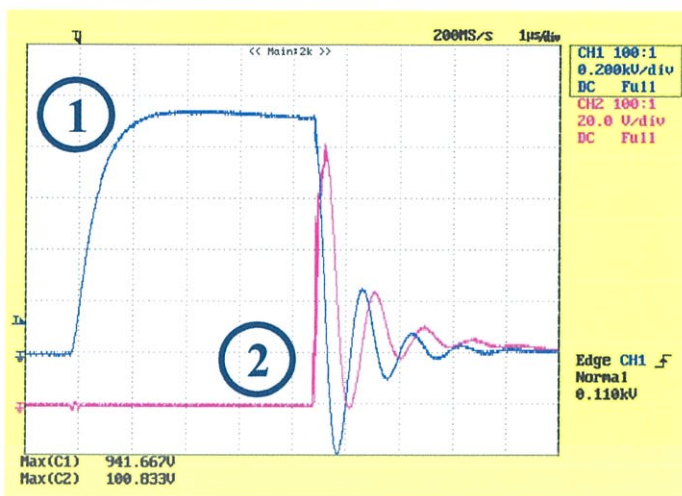
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{937.25}{0.994 \times 1.004}$$

$$= 939.150 \text{ V}_p$$

$$\approx 939 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

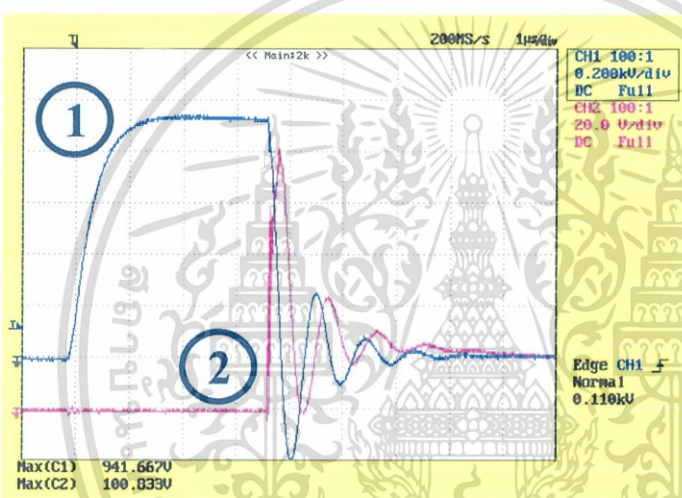
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

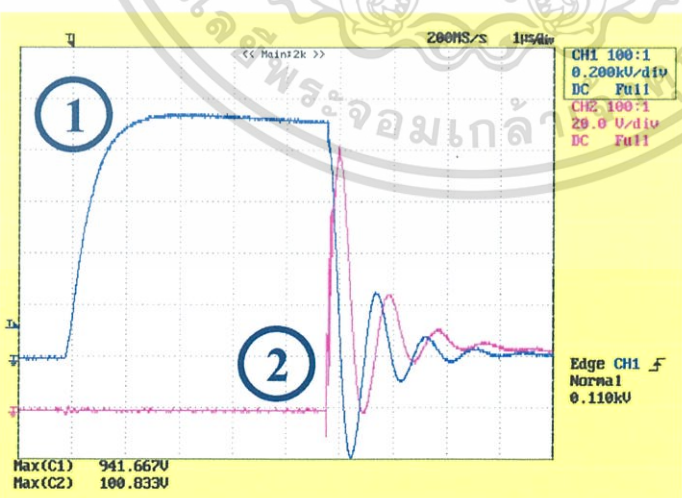
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

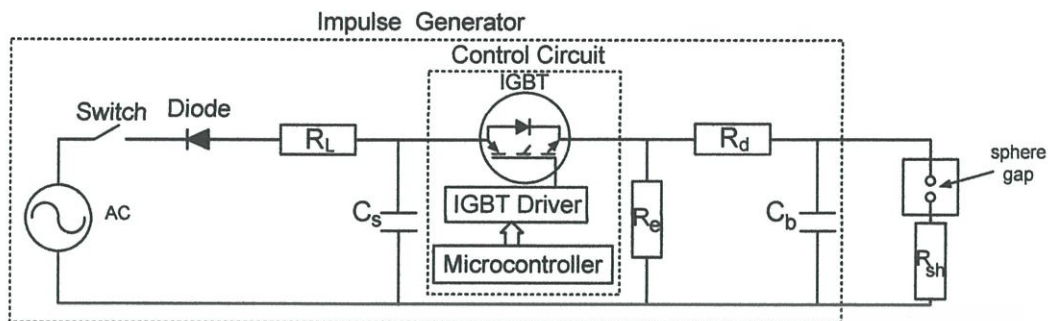
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน

ของไมโครแถบประยะ 40 μ m (ข้าวบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 แรงดันอิมพัลส์ชั่วพล

วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วพลของไมโครแกป แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์เบรกดาวน์ชั่วพลของไมโครแกป

ผลการทดสอบของไมโครแกประยะ 10 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแกป = 10 μm

อุณหภูมิ = 23 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 763 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 58 %

$h = 12 \text{ g/m}^3$

$U_b = 459.4 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273 + t_n}{273 + t}$$

$$\delta = \frac{763}{760} \frac{273 + 20}{273 + 23}$$

$$= 0.994$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(12/0.994 - 8.5)]$$

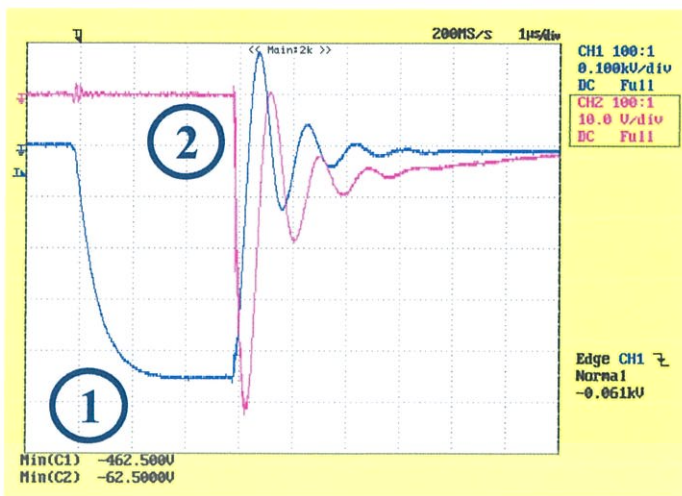
$$= 1.007$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{459.4}{0.994 \times 1.007}$$

$$= 458.960 \text{ V}_p$$

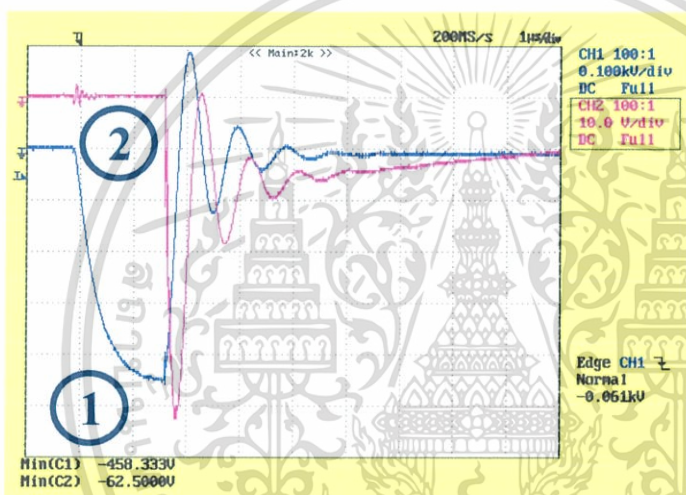
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $\approx 459 \text{ V}_p$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)
1 µs /div

Volt/div (แกน Y)
1. แร่งคั่นอิมพัลส์
0.1 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
10 V/div

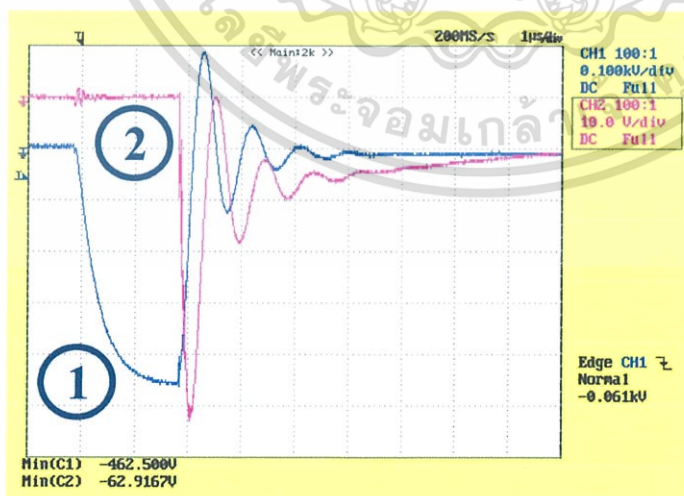
ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)
1 µs /div

Volt/div (แกน Y)
1. แร่งคั่นอิมพัลส์
0.1 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
10 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)
1 µs /div

Volt/div (แกน Y)
1. แร่งคั่นอิมพัลส์
0.1 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
10 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงคั่นอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรคคาวน

ของไมโครแถบประยะ 10 µm (ข้าวลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบของไมโครแก๊ประยะ 20 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแก๊ป = 20 μm

อุณหภูมิ = 25 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 762 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 60 %

$h = 14 \text{ g/m}^3$

$U_b = 635.15 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{762}{760} \frac{273+20}{273+25} \\ &= 0.986 \end{aligned}$$

$$k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$\begin{aligned} k_h &= 1 + [0.002(14/0.986 - 8.5)] \\ &= 1.011 \end{aligned}$$

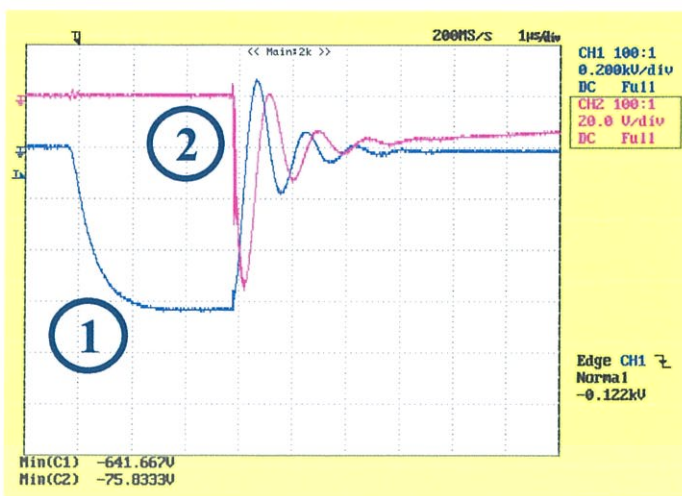
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{635.15}{0.994 \times 1.011}$$

$$= 637.159 \text{ V}_p$$

$$\approx 637 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

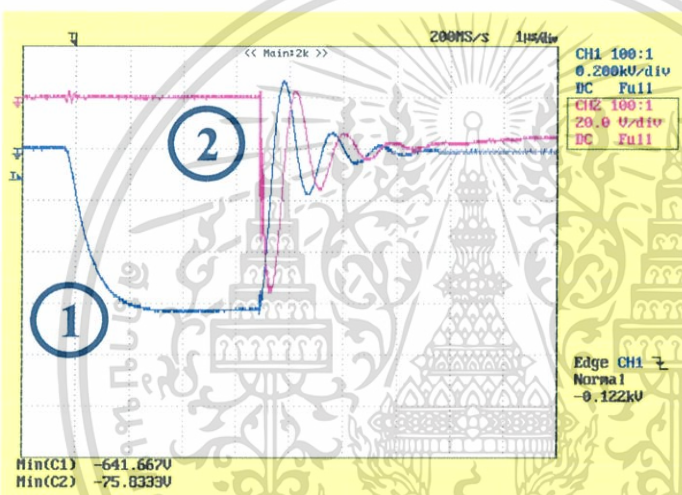
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

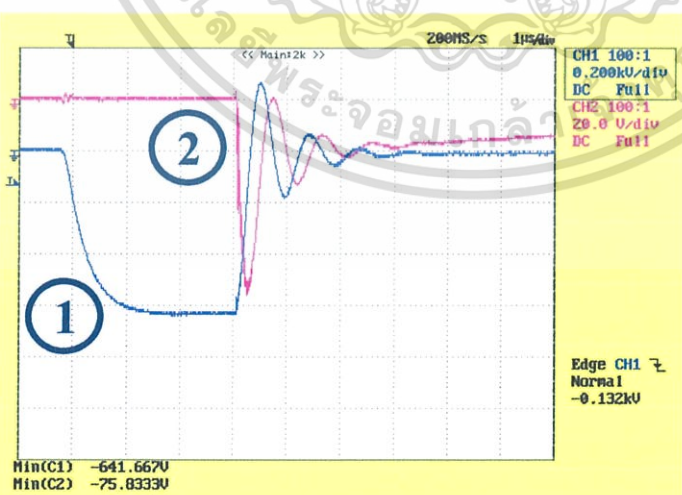
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวน

ของไมโครแถบประยะ 20 μ m (ข้าวลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบของไมโครแก๊ประยะ 30 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแก๊ป = 30 μm

อุณหภูมิ = 22 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 766 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 63 %

$h = 12.5 \text{ g/m}^3$

$U_b = 807.25 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{766}{760} \frac{273+20}{273+22} \\ &= 1.001 \end{aligned}$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$\begin{aligned} k_h &= 1 + [0.002(12.5/1.001 - 8.5)] \\ &= 1.008 \end{aligned}$$

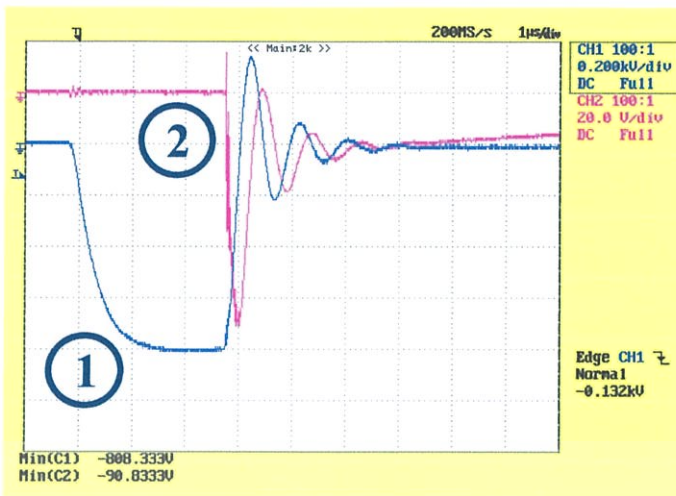
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{937.25}{1.001 \times 1.008}$$

$$= 800.044 \text{ V}_p$$

$$\approx 800 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

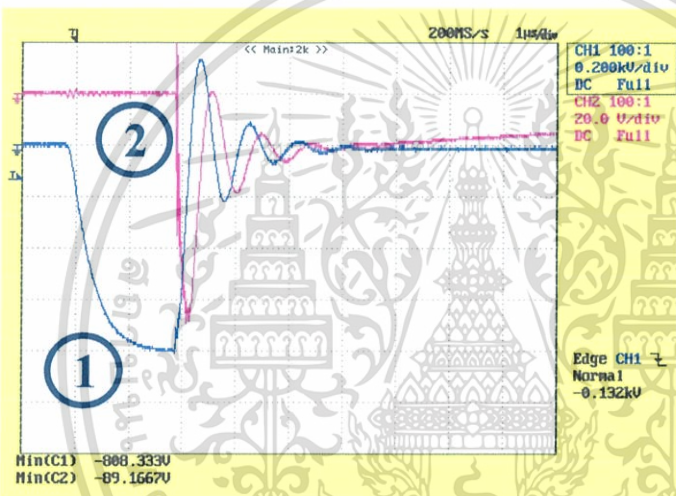
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

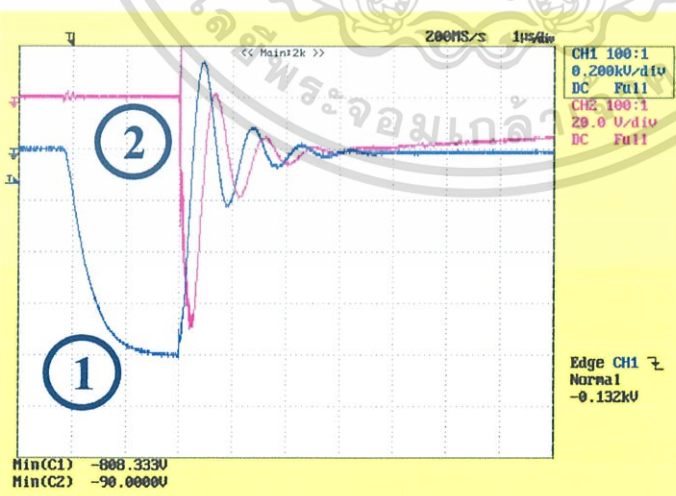
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

รูปที่ 4.10 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกคาวาน์

ของไมโครแคประยะ 30 μ m (ข้าวลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบของไมโครแก๊ประยะ 40 μm โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ระยะแก๊ป = 40 μm

อุณหภูมิ = 25 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 762 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 56 %

$h = 12.5 \text{ g/m}^3$

$U_b = 924.2 \text{ V}_p$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{762}{760} \frac{273+20}{273+25} \\ &= 0.986 \end{aligned}$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$\begin{aligned} k_h &= 1 + [0.002(12.5/0.986 - 8.5)] \\ &= 1.008 \end{aligned}$$

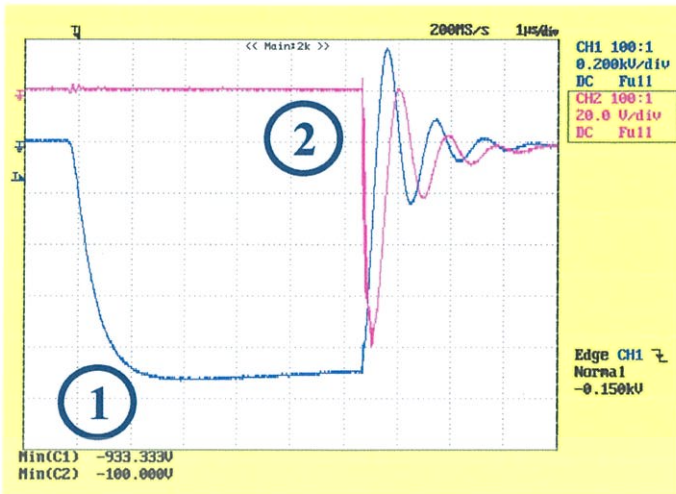
$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{924.2}{0.986 \times 1.008}$$

$$= 929.323 \text{ V}_p$$

$$\approx 930 \text{ V}_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

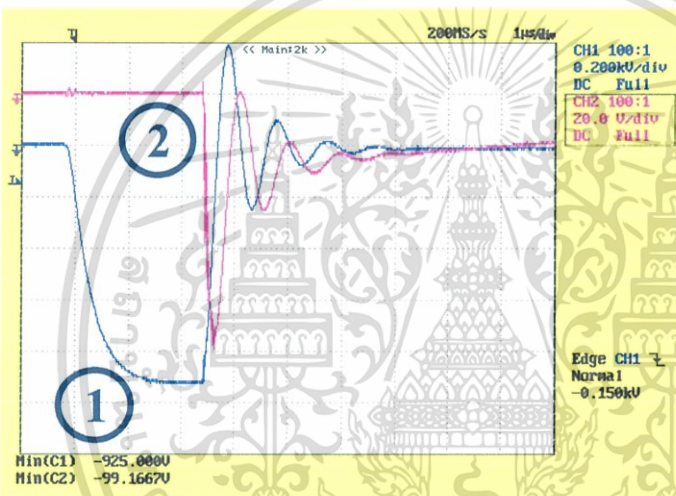
1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

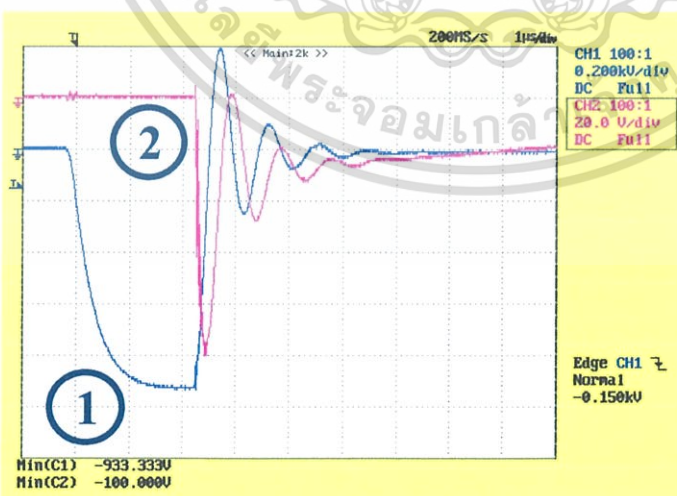
1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

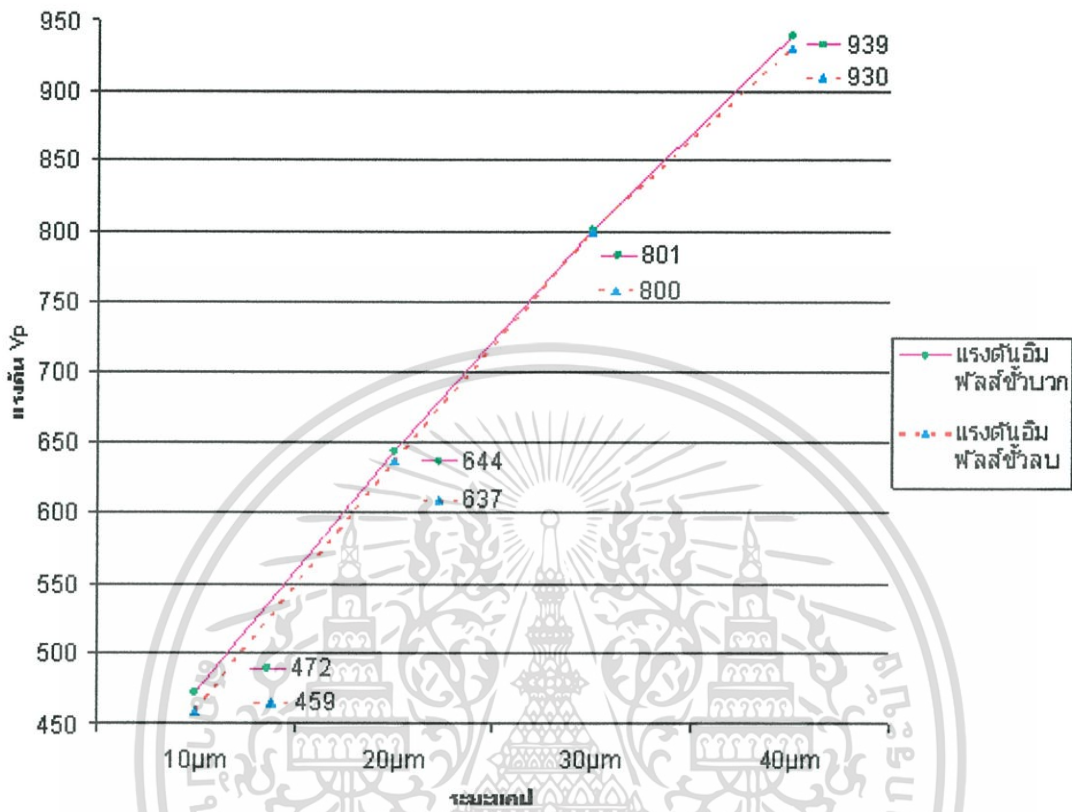
ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.11 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากการเบรกควาน์

ของไมโครแถบประยะ 40 μ m (ข้าวลบ) ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบการเบรกความถี่ของไมโครแกปที่ระยะ 10-40 μm ด้วยแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และขั้วลบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ของไมโครแกป

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าแรงดัน Impulses เบรกความถี่ที่สภาวะห้องกับสภาวะมาตรฐานของแกปทรงกลม

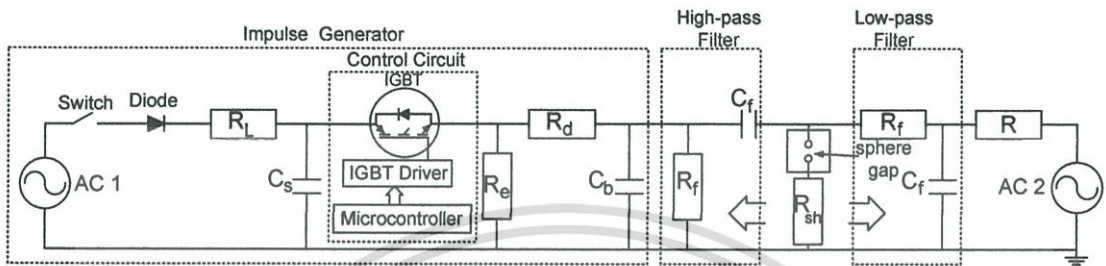
ระยะ gap (μm)	Impulses (+)		Impulses (-)	
	สภาวะห้อง(V)	สภาวะมาตรฐาน(V)	สภาวะห้อง(V)	สภาวะมาตรฐาน(V)
10	471.25	472	459.4	459
20	641.9	644	635.15	637
30	790.65	801	807.25	800
40	937.25	939	924.2	930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

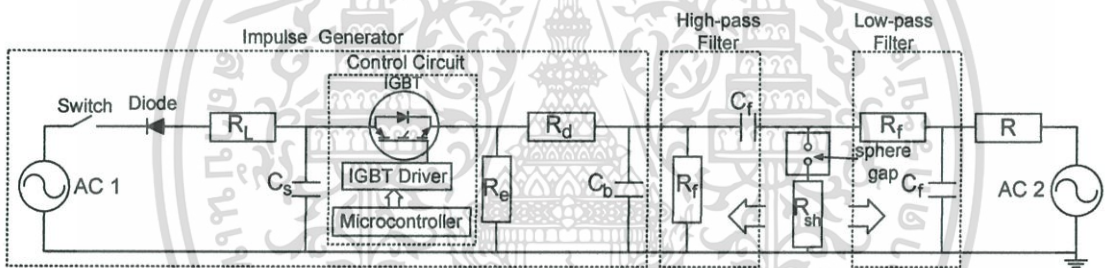
จากตารางที่ 4.2 เมื่อทำการทดสอบหาแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่สถานะห้องและนำมาแปลงค่าสู่สถานะมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ ที่ระยะแกป 10- 40 μm สรุปได้ว่า ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ที่สถานะมาตรฐานขั้วบวกมีค่าสูงกว่าแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ เนื่องจากการเบรกความถี่โดยตรงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยสังเกตได้จากรูปคลื่นจากการทดสอบจะไม่เกิดกระแสโคโรนาขึ้นก่อนการเกิดเบรกความถี่ แต่แรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวกได้ อาจมีสาเหตุมาจากประจุค้างที่เกิดขึ้น และระยะห่างคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดการเบรกความถี่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการสะสมประจุให้มากพอก่อนเกิดการเบรกความถี่ เมื่อเกิดการเบรกความถี่แล้วรูปคลื่นจะมีการแกว่งก่อนเข้าสู่รูปคลื่นปกติ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในวงจร โดยเมื่อเกิดการเบรกความถี่รูปคลื่นแรงดันจะตกลงและแกว่งก่อนเข้าสู่ค่าศูนย์ในขณะเดียวกันเมื่อเกิดการเบรกความถี่รูปคลื่นกระแสจะพุ่งขึ้นและแกว่งก่อนเข้าสู่ค่าศูนย์ ส่วนความแปรผันของแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นได้จากค่าตัวแปร 3 ค่า คือ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้น ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ที่สถานะห้องและสถานะมาตรฐานได้

4.2 คุณลักษณะการเบรคความถี่ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

วงจรทดสอบค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเบรคความถี่ช่วงของไมโครแกป



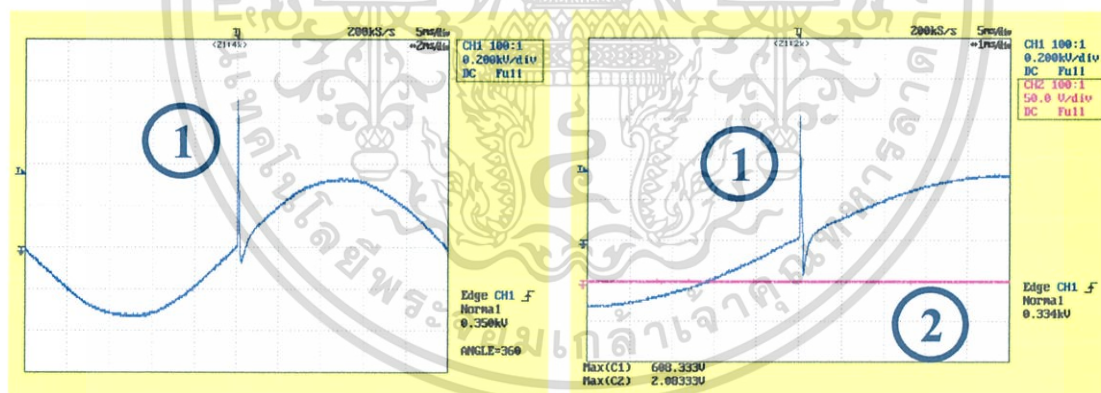
รูปที่ 4.14 วงจรวัดแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับเบรคความถี่ช่วงของไมโครแกป

4.2.1 แรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 0 องศา

เพื่อต้องการทราบค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับว่ามีค่าแรงดันเบรคความถี่เท่าไร เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันอิมพัลส์ทั้งช่วงและช่วงที่มุม 0 องศา ในแต่ละมุมที่ได้ทดสอบได้ทดลองซ้ำ 10 ครั้ง

ตารางที่ 4.3 แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศา
ระยะแกป 10 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	610 V
2	610 V
3	610 V
4	610 V
5	608 V
6	608 V
7	608 V
8	610 V
9	612 V
10	614 V
ค่าเฉลี่ย	610 V



(แกน X : 2 ms/div และแกน Y : 0.2 kV/div)

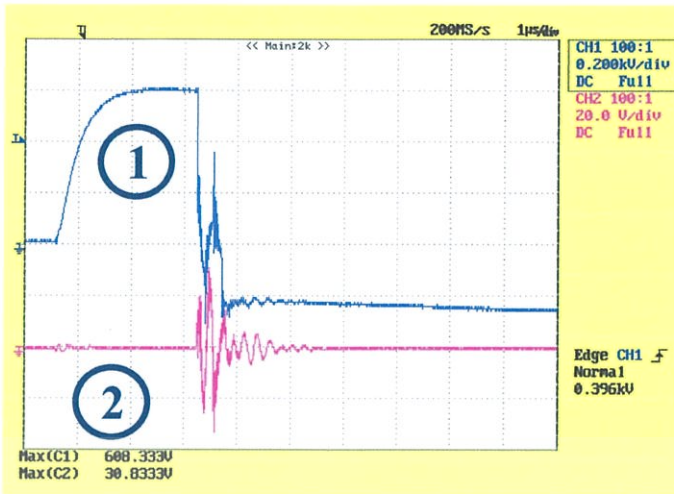
(แกน X : 1 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

(a) ตัวอย่างรูปคลื่นเต็มที่มีมุ่ม 0 องศา

(b) รูปคลื่นขยายเมื่อวัดจริง

รูปที่ 4.15 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแส
อิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกประยะ 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

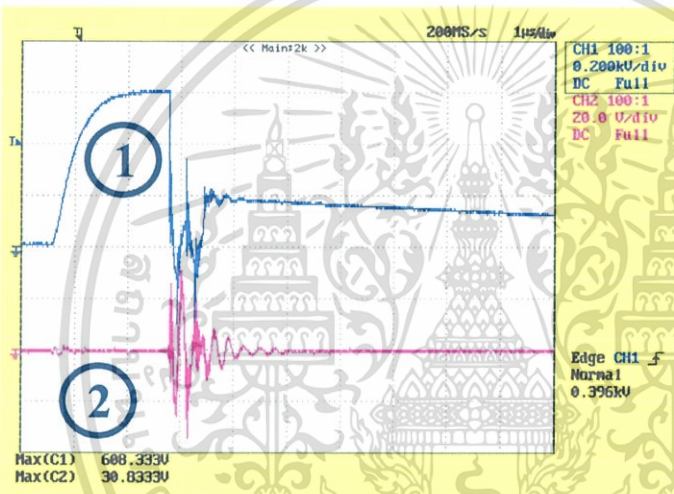
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

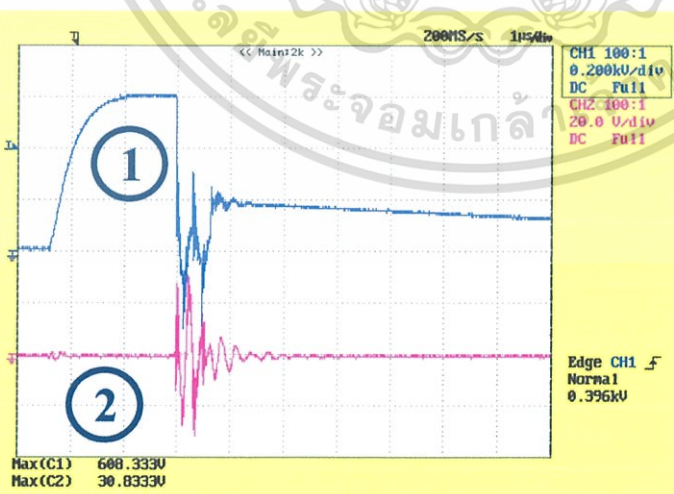
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

1 μ s /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

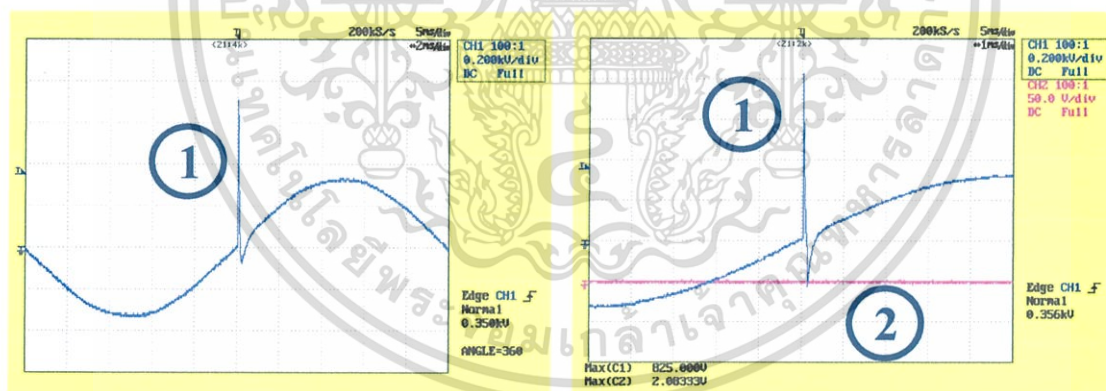
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วคราวที่ขั้วบวกที่ซ่อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรคควาน์ของไมโครแถบระยะ $10 \mu\text{m}$ นั้น ไม่น่าจะเหมาะให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา
ระยะแกป 20 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	828 V
2	826 V
3	828 V
4	828 V
5	828 V
6	828 V
7	826 V
8	828 V
9	828 V
10	828 V
ค่าเฉลี่ย	827.6 V



(แกน X : 2 ms/div และแกน Y : 0.2 kV/div)

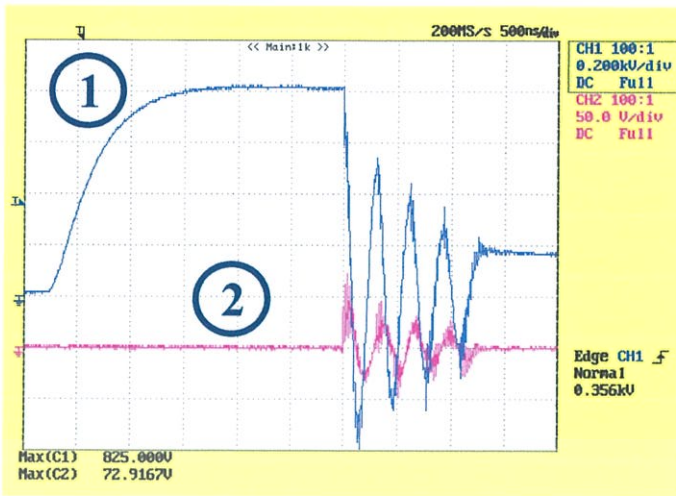
(แกน X : 1 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

(a) ตัวอย่างรูปคลื่นเต็มที่มีมุม 0 องศา

(b) รูปคลื่นขยายเมื่อวัดจริง

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกประยะ 20 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

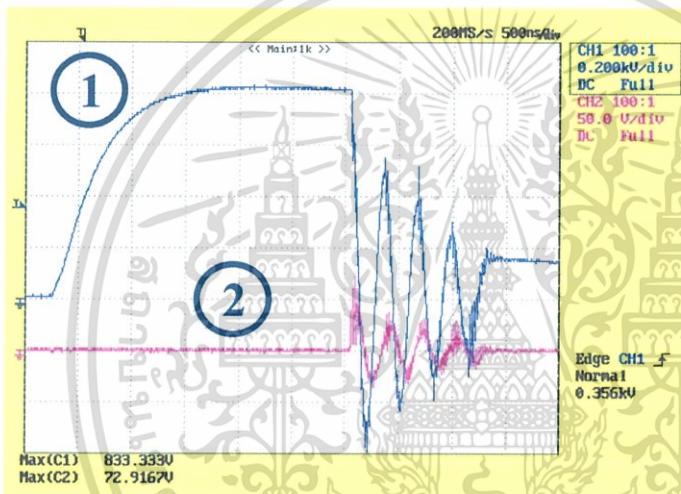
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

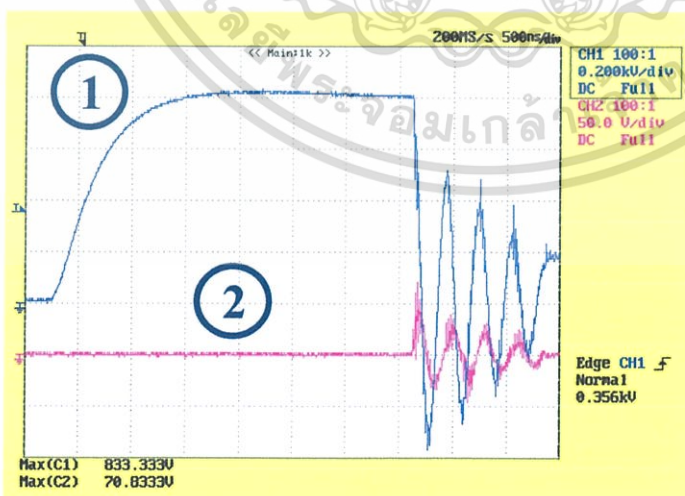
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div

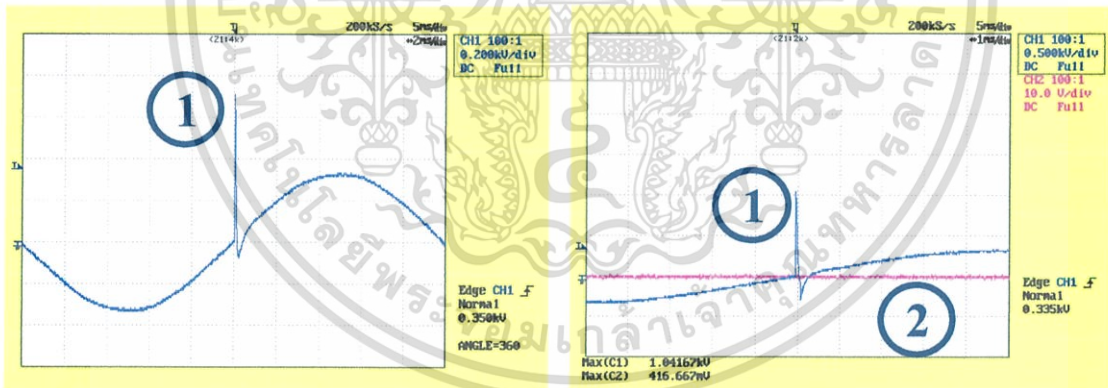
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกที่บ่งชี้ขอบบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกควานซ์ของไมโครแก๊ประยะ 20 μm นั้น ไม่น่าจะอนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา
ระยะแกว่ง 30 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	1050 V
2	1070 V
3	1050 V
4	1050 V
5	1030 V
6	1070 V
7	1070 V
8	1070 V
9	1070 V
10	1070 V
ค่าเฉลี่ย	1060 V



(แกน X : 2 ms/div และแกน Y : 0.2 kV/div)

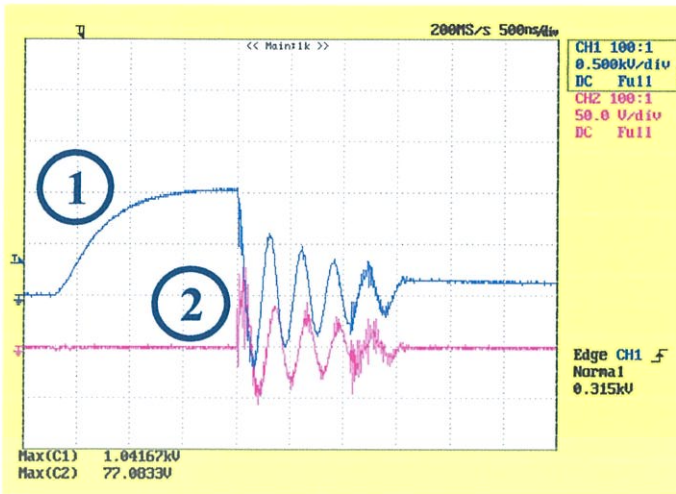
(แกน X : 1 ms/div และ แกน Y : 0.5 kV/div)

(a) ตัวอย่างรูปคลื่นเต็มที่มีมุม 0 องศา

(b) รูปคลื่นขยายเมื่อวัดจริง

รูปที่ 4.19 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วคราวที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกว่งระยะ 30 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

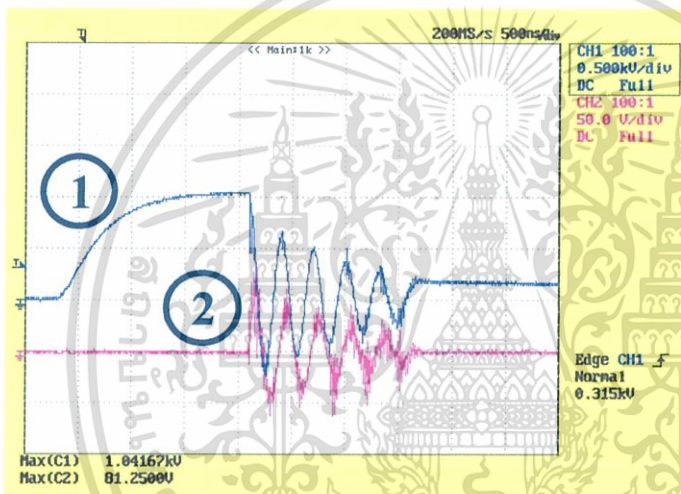
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

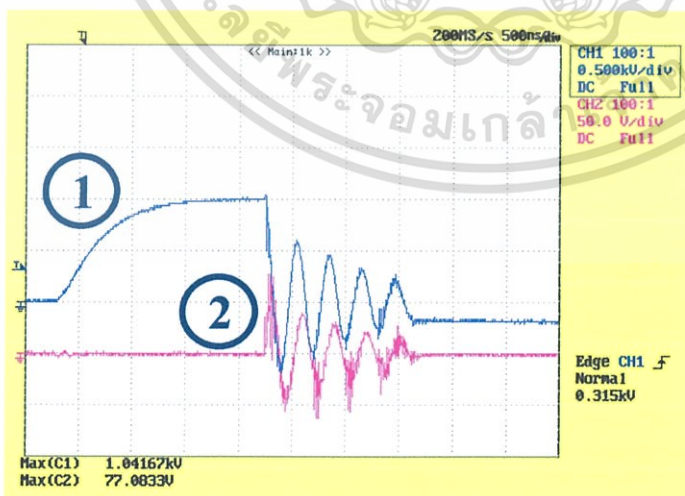
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div

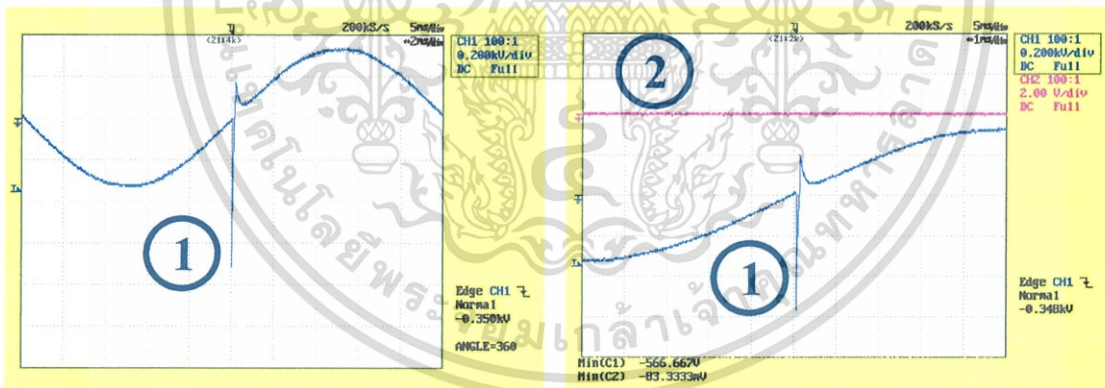
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกที่บัพช้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกควานซ์ของไมโครแก๊สระยะ 30 μm นั้น ไม่น่าจะเหมาะให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่บ้นบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศา
ระยะแกป 10 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควาน์
1	584 V
2	584 V
3	576 V
4	576 V
5	584 V
6	576 V
7	582 V
8	584 V
9	584 V
10	584 V
ค่าเฉลี่ย	581.4 V



(แกน X : 2 ms/div และแกน Y : 0.2 kV/div)

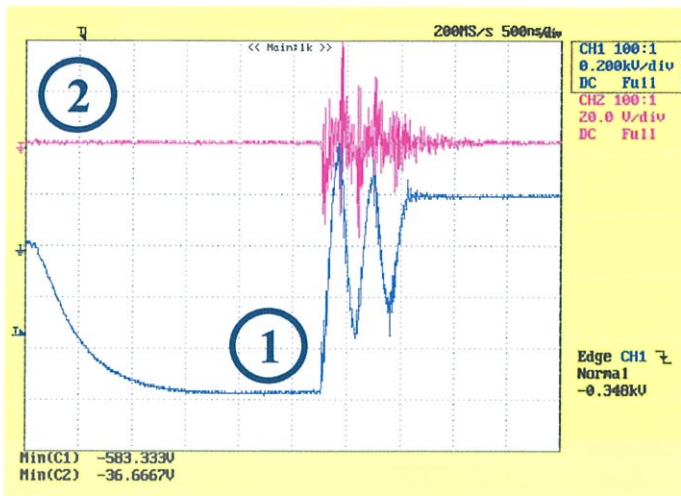
(แกน X : 1 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

(a) ตัวอย่างรูปคลื่นเต็มที่มุ่ม 0 องศา

(b) รูปคลื่นขยายเมื่อวัดจริง

รูปที่ 4.21 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลบที่บ้นบนแรงดันกระแสสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกควาน์ของไมโครแกประยะ 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

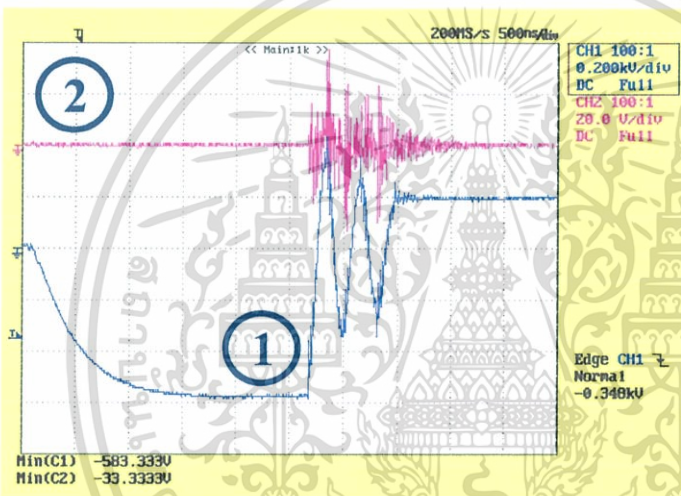
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

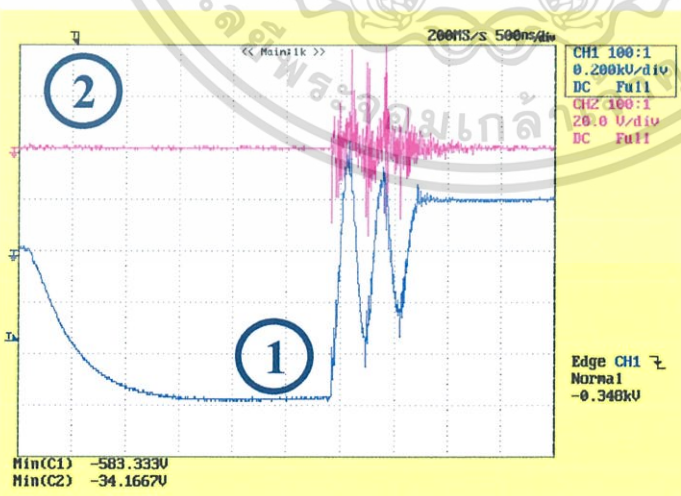
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.2 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

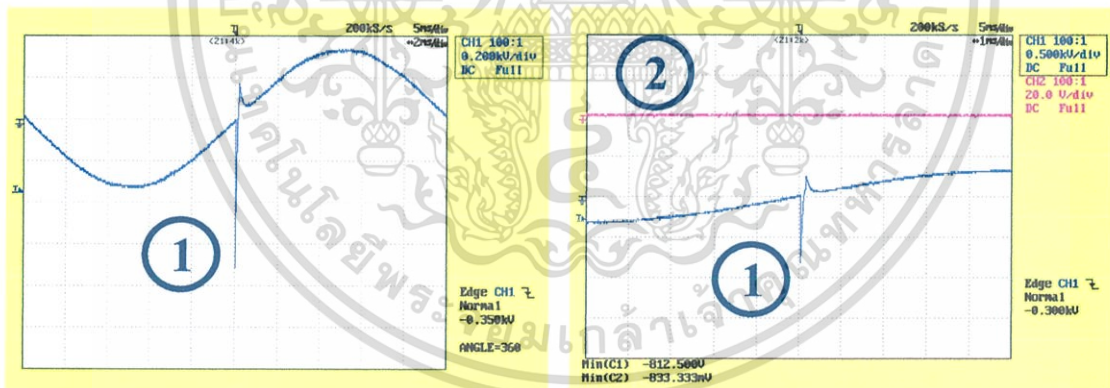
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาวน์ของไมโครแก๊ประยะ 10 μm นั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา
ระยะแกป 20 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	855 V
2	855 V
3	855 V
4	835 V
5	835 V
6	835 V
7	815 V
8	835 V
9	815 V
10	835 V
ค่าเฉลี่ย	837 V



(แกน X : 2 ms/div และแกน Y : 0.2 kV/div)

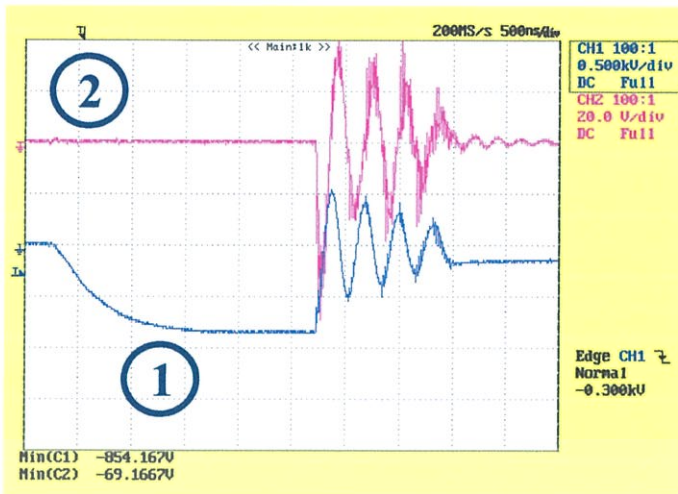
(แกน X : 1 ms/div และ แกน Y : 0.5 kV/div)

(a) ตัวอย่างรูปคลื่นเต็มที่มีมุม 0 องศา

(b) รูปคลื่นขยายเมื่อวัดจริง

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกประยะ 20 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

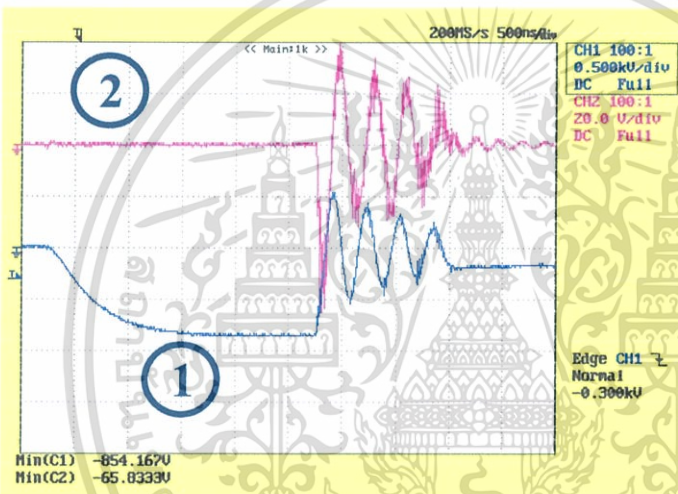
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

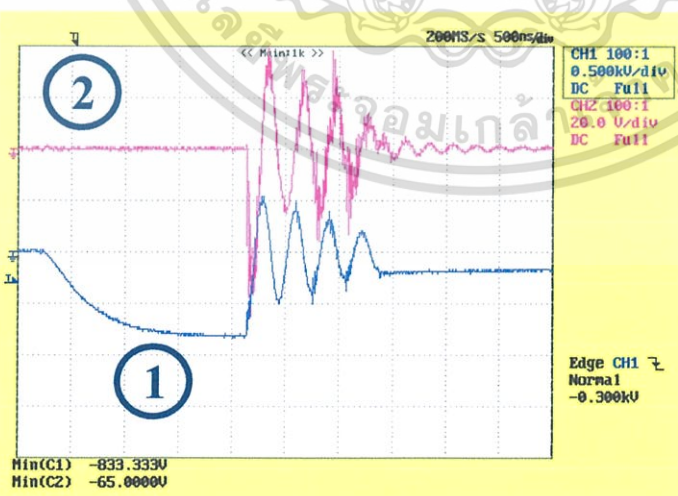
Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

20 V/div

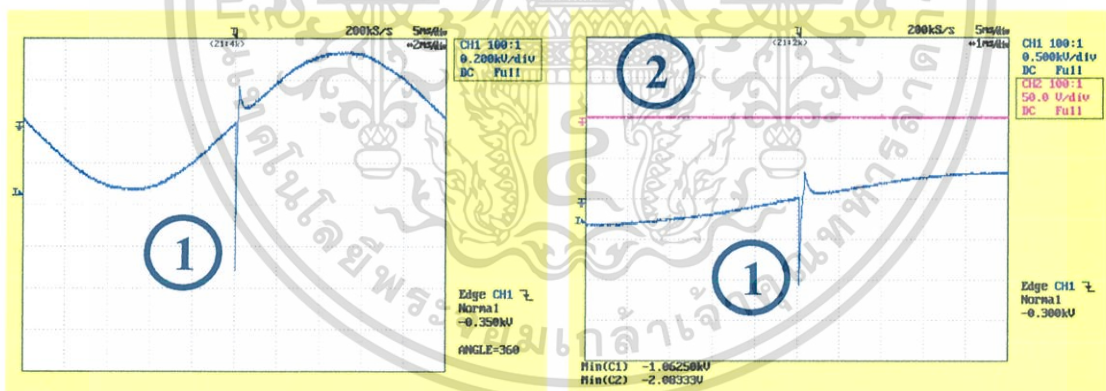
รูปที่ 4.24 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาวน์ของไมโครแประยะ 20 μm ไม่นอญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบที่บัพซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศา
ระยะแกป 30 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	1080 V
2	1100 V
3	1080 V
4	1080 V
5	1060 V
6	1040 V
7	1060 V
8	1060 V
9	1080 V
10	1080 V
ค่าเฉลี่ย	1072 V



(แกน X : 2 ms/div และแกน Y : 0.2 kV/div)

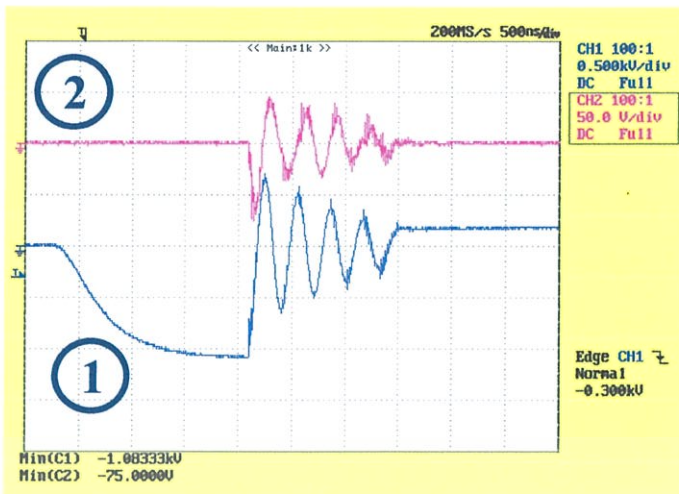
(แกน X : 1 ms/div และ แกน Y : 0.5 kV/div)

(a) ตัวอย่างรูปคลื่นเต็มที่มีมุม 0 องศา

(b) รูปคลื่นขยายเมื่อวัดจริง

รูปที่ 4.25 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วลบที่บัพซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกประยะ 30 μm

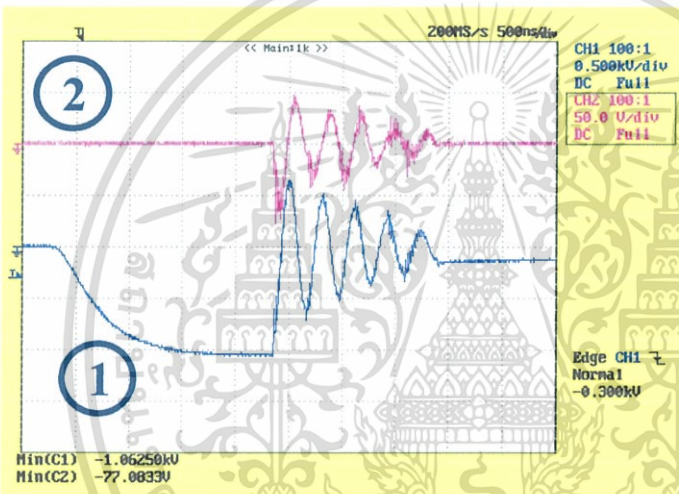
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)
500 ns /div

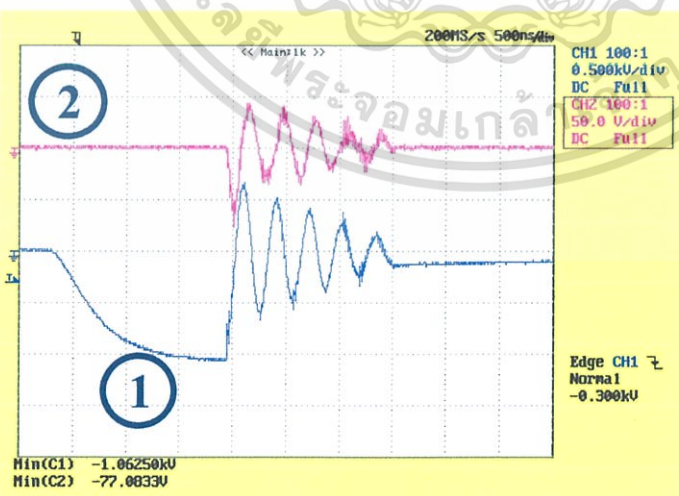
Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.5 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.5 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

Time/div (แกน X)
500 ns /div

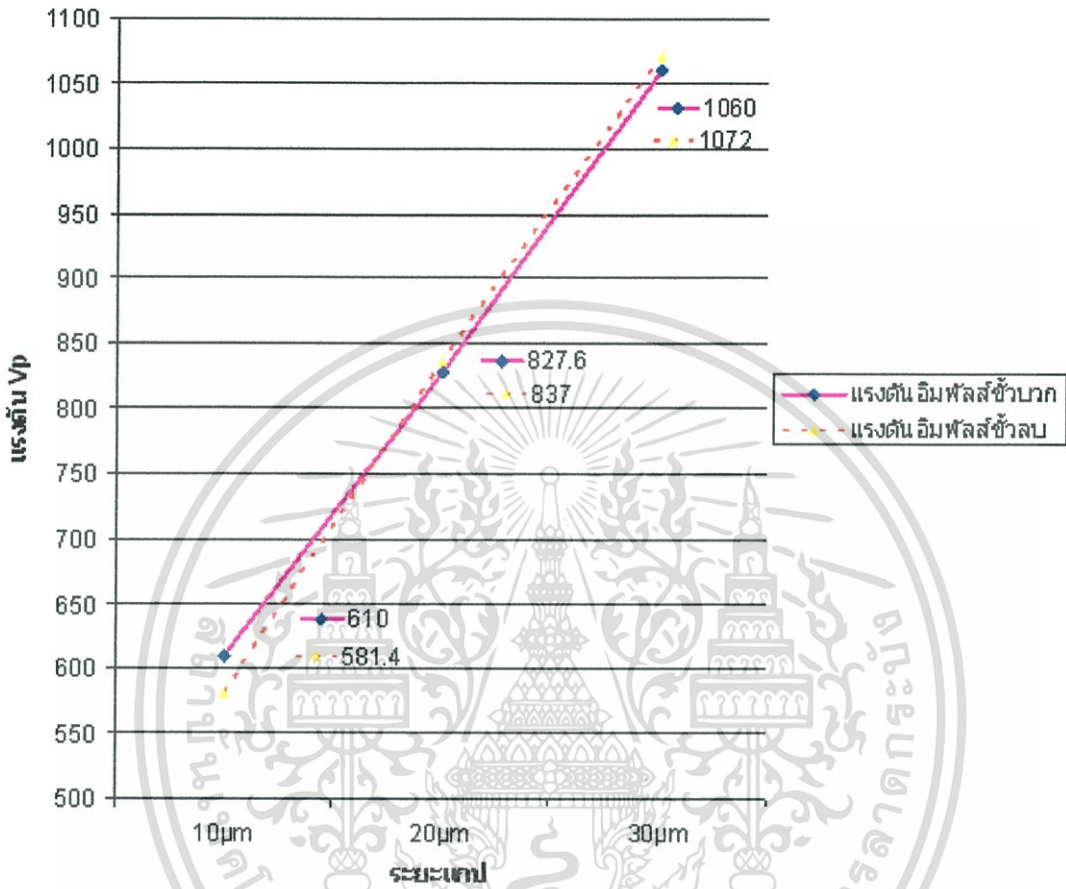
Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.5 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

รูปที่ 4.26 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลบที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสลับที่มุ่ม 0 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกควานซ์ของไมโครแก๊ประยะ 30 μm นั้น ไม่น่าจะเหมาะให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบการเบรกดาวนของไมโครแกปที่ระยะ 10-30 μm ด้วยแรงดันอิมพัลส์ข้าวบวก และข้าวลบที่บัพช้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 0 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4.27



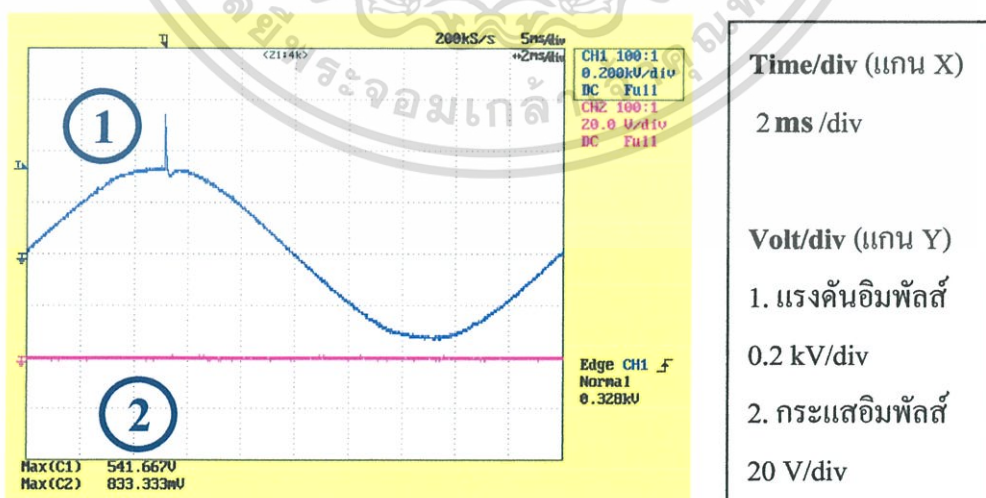
รูปที่ 4.27 กราฟแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนที่บัพช้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 0 องศา ของไมโครแกปที่ระยะ 10-30 μm

4.2.2 แรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 90 และ 270 องศา

เพื่อต้องการทราบค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับว่ามีค่าแรงดันเบรกควาน์เท่าไร เมื่อมุมที่ขั้วบนเปลี่ยนค่า โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่มุม 90 และ 270 องศา โดยได้ทำการทดสอบ 10 ครั้ง ที่ทุกระดับมุมทดสอบ

ตารางที่ 4.9 แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา ระยะแกป 10 μm

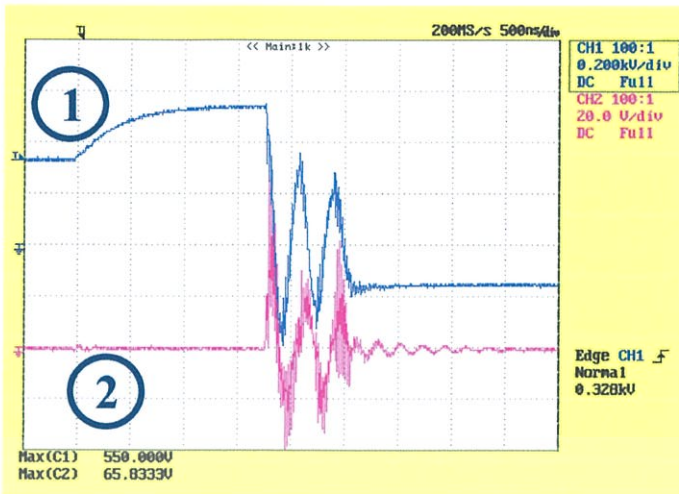
ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควาน์
1	210 V
2	214 V
3	212 V
4	208 V
5	206 V
6	206 V
7	214 V
8	214 V
9	212 V
10	214 V
ค่าเฉลี่ย	211 V



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นอิมพัลส์ขั้วบวกที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศาและกระแส

อิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกควาน์ของไมโครแกประยะ 10 μm

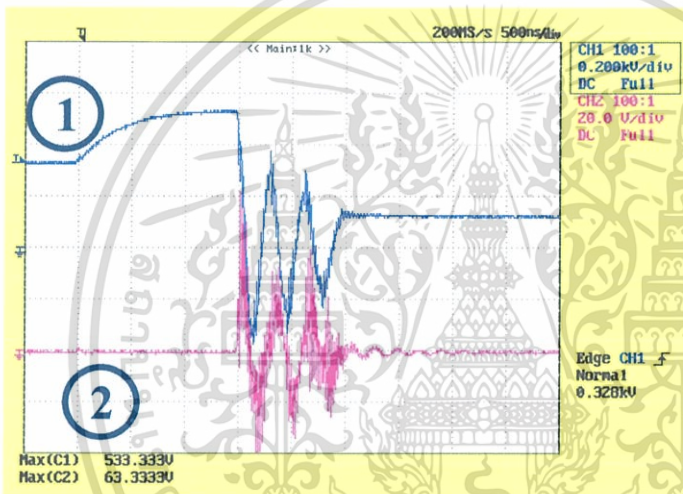
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างรูปคลื่น (a)

Time/div (แกน X)
500 ns /div

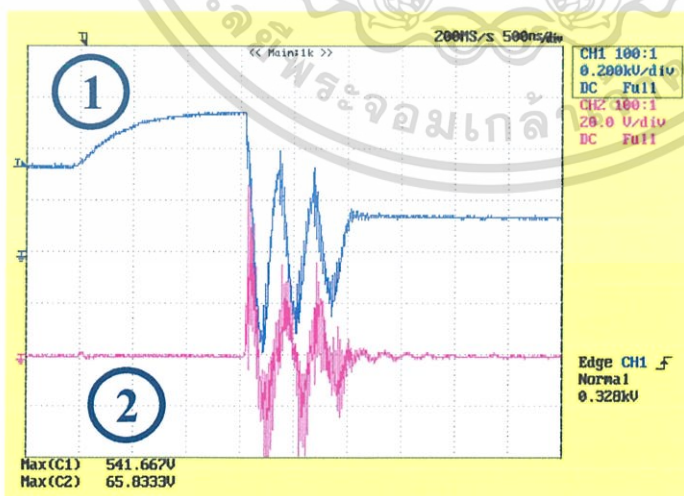
Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (b)

Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div



ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

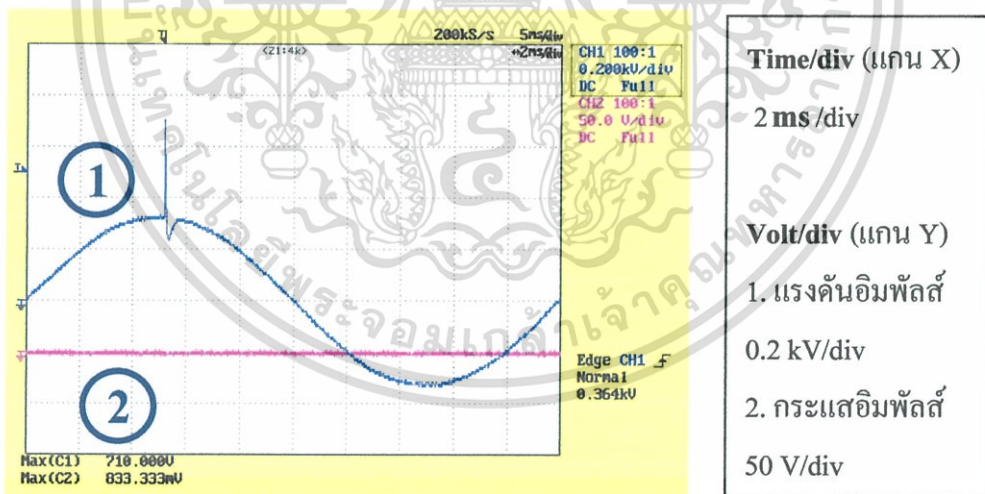
Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

รูปที่ 4.29 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกที่บัพช้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศาและ กระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาวนของไมโครแถบระยะ 10 μm อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

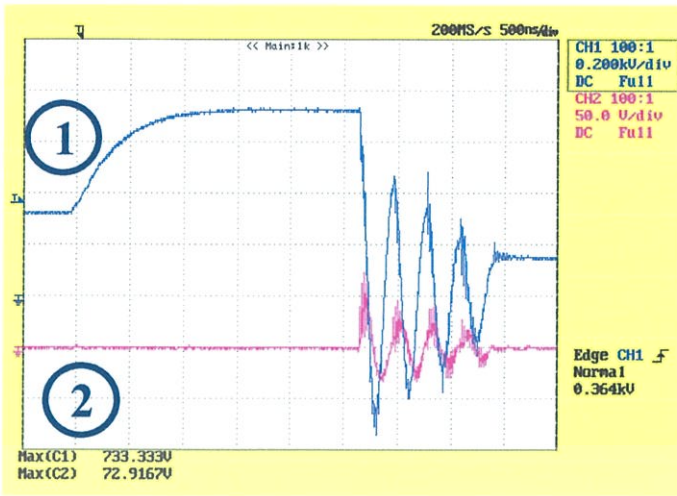
ตารางที่ 4.10 แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา ระยะแกป 20 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	400 V
2	402 V
3	402 V
4	408 V
5	410 V
6	408 V
7	410 V
8	402 V
9	410 V
10	410 V
ค่าเฉลี่ย	406.2 V



รูปที่ 4.30 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกประยะ 20 μm

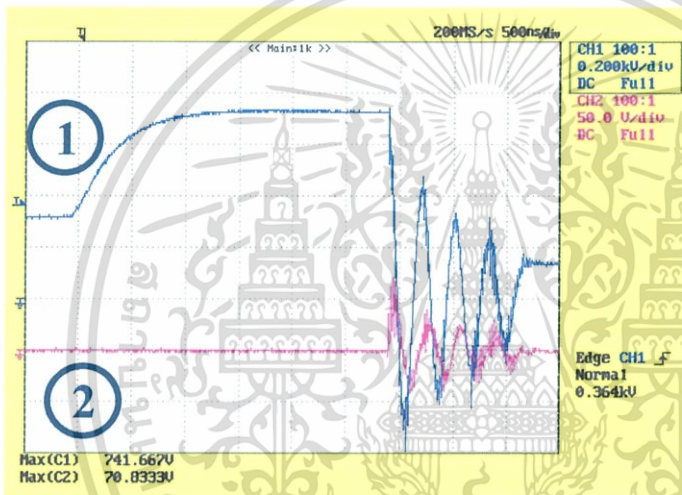
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

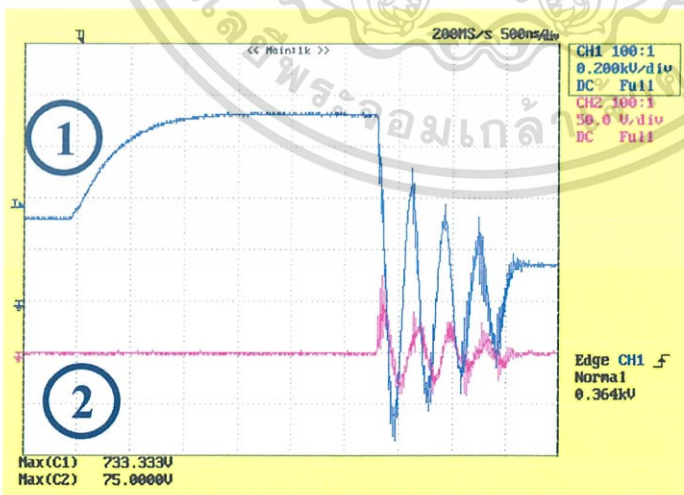
ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

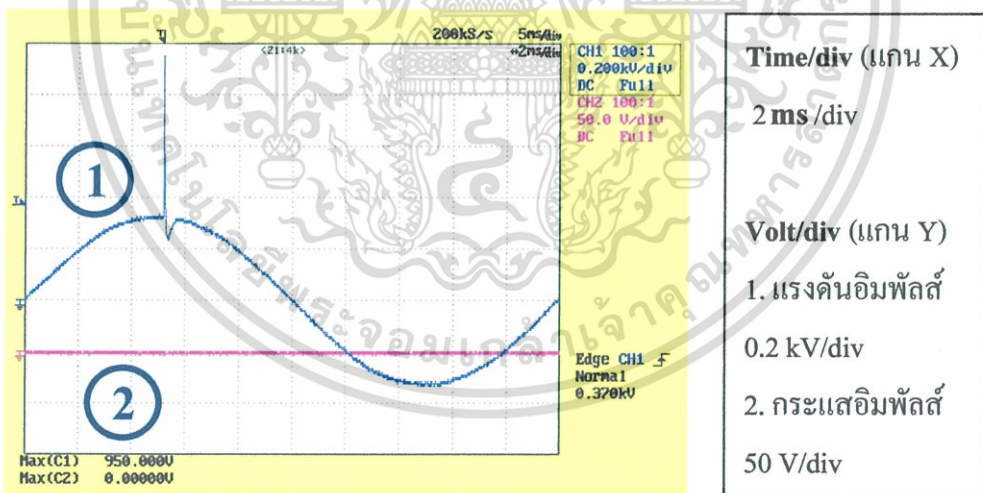
ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.31 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกที่บ่งชี้ขอบบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรคความถี่ของไมโครแถบประยะ 20 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

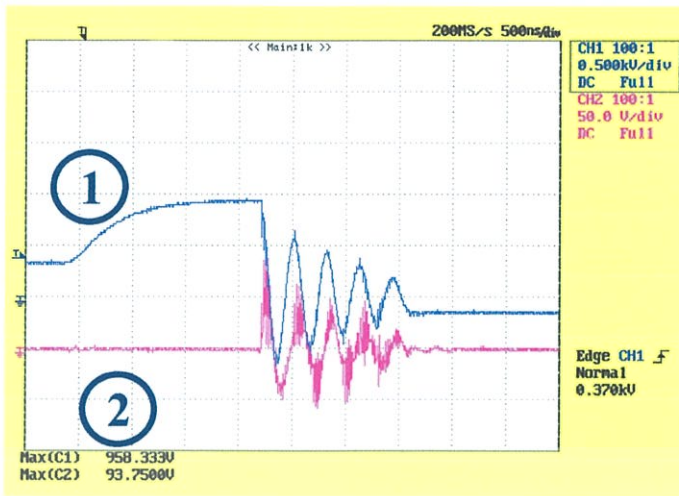
ตารางที่ 4.11 แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศา
ระยะแกป 30 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควาน์
1	640 V
2	640 V
3	640 V
4	640 V
5	640 V
6	620 V
7	620 V
8	620 V
9	640 V
10	640 V
ค่าเฉลี่ย	636 V



รูปที่ 4.32 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วคราวที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกควาน์ของไมโครแกประยะ 30 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

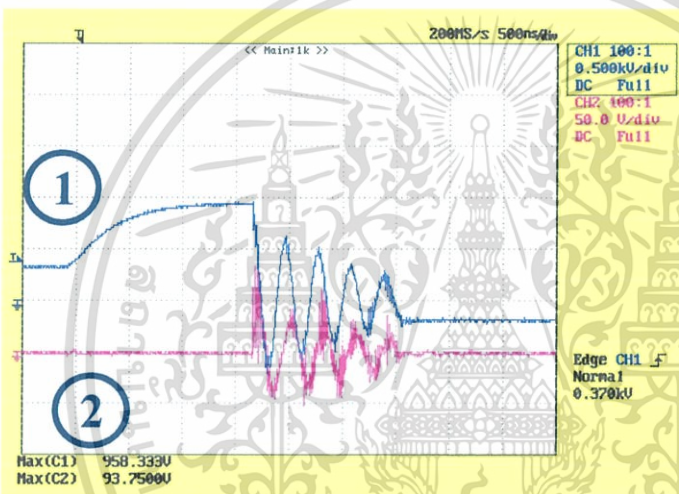
1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

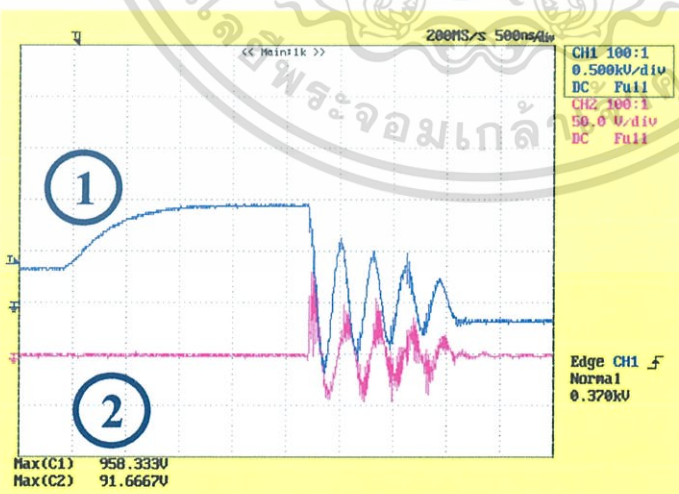
1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)

500 ns /div

Volt/div (แกน Y)

1. แรงดันอิมพัลส์

0.5 kV/div

2. กระแสอิมพัลส์

50 V/div

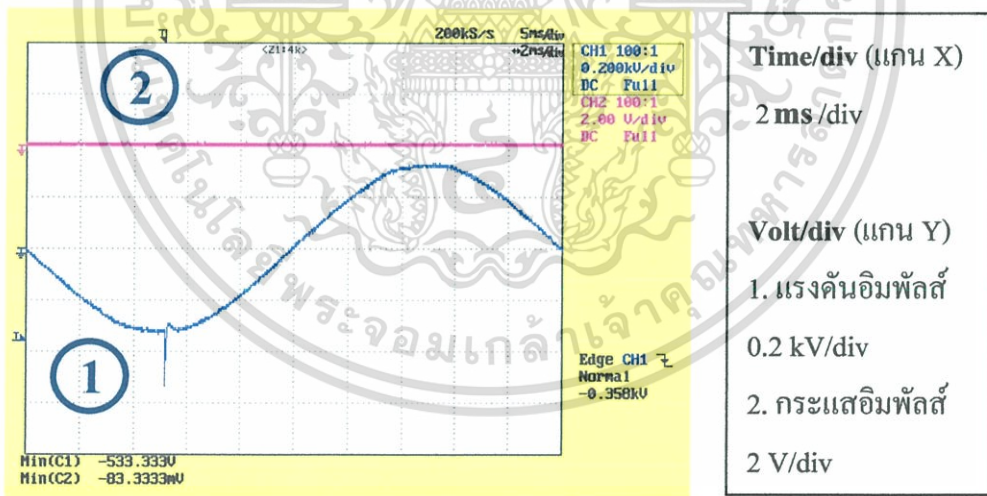
ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.33 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 90 องศาและ กระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรคความถี่ของไมโครแถบระยะ 30 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

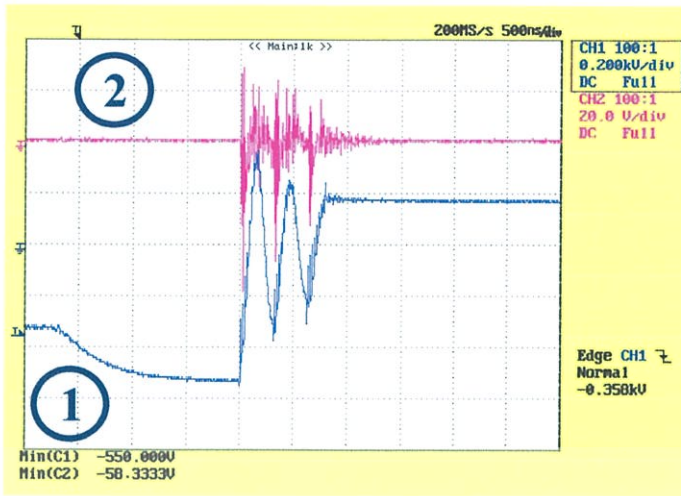
ตารางที่ 4.12 แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศา
ระยะแกป 10 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์
1	200 V
2	200 V
3	200 V
4	208 V
5	200 V
6	208 V
7	200 V
8	208 V
9	208 V
10	208 V
ค่าเฉลี่ย	204 V



รูปที่ 4.34 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศาและกระแส
อิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวน์ของไมโครแกประยะ 10 μm

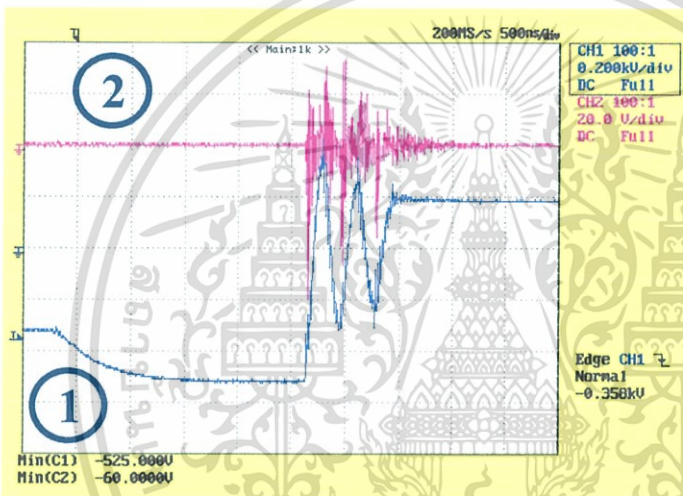
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

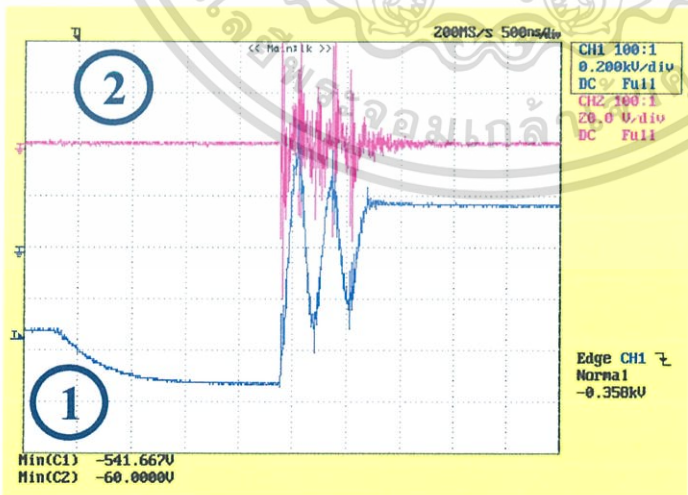
ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.35 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลบที่บัพชอนบนแรงดันกระแสลับที่มุม 270 องศาและ

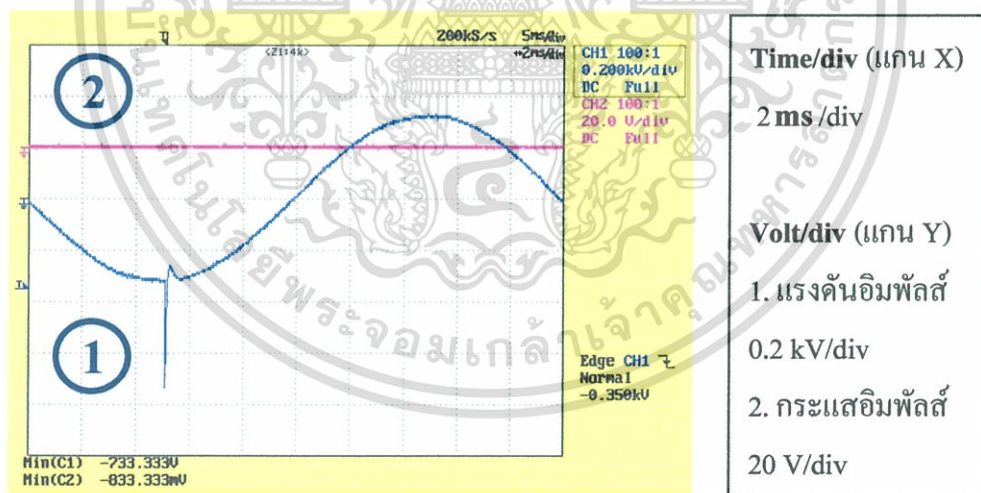
กระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรกดาวน์ของไมโครแคประยะ 10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

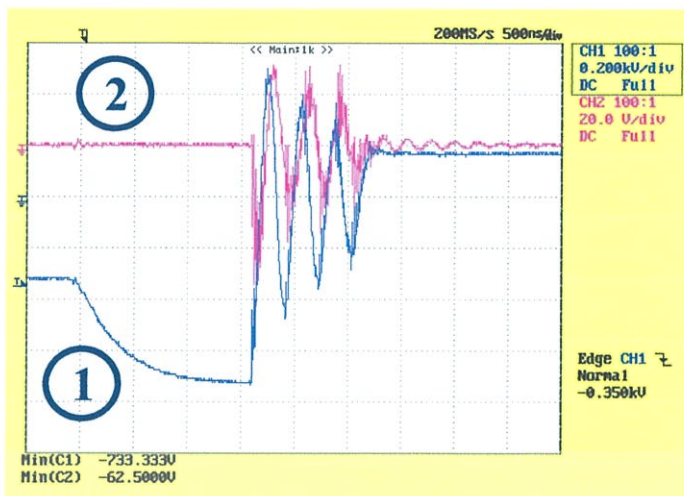
ตารางที่ 4.13 แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศา
ระยะแกป 20 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน
1	400 V
2	400 V
3	408 V
4	416 V
5	400 V
6	416 V
7	408 V
8	408 V
9	408 V
10	416 V
ค่าเฉลี่ย	408 V



รูปที่ 4.36 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกคาวนของไมโครแกประยะ 20 μm

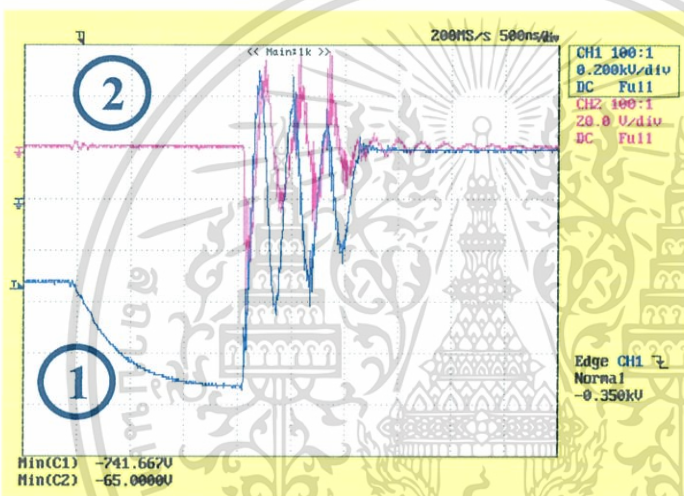
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

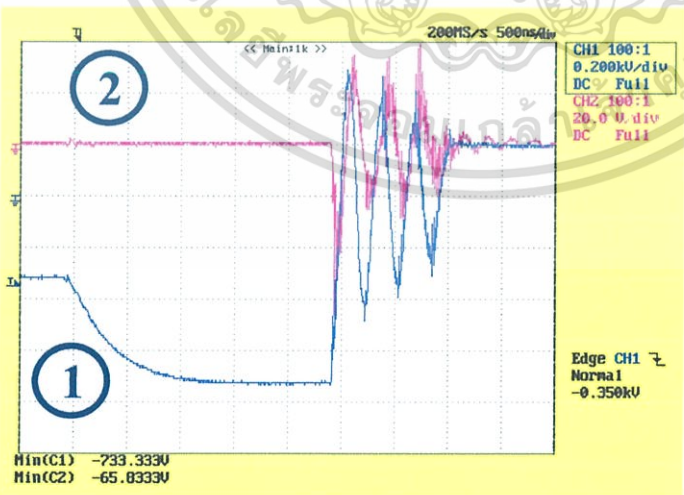
ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.2 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
20 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.37 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลทบซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศาและ

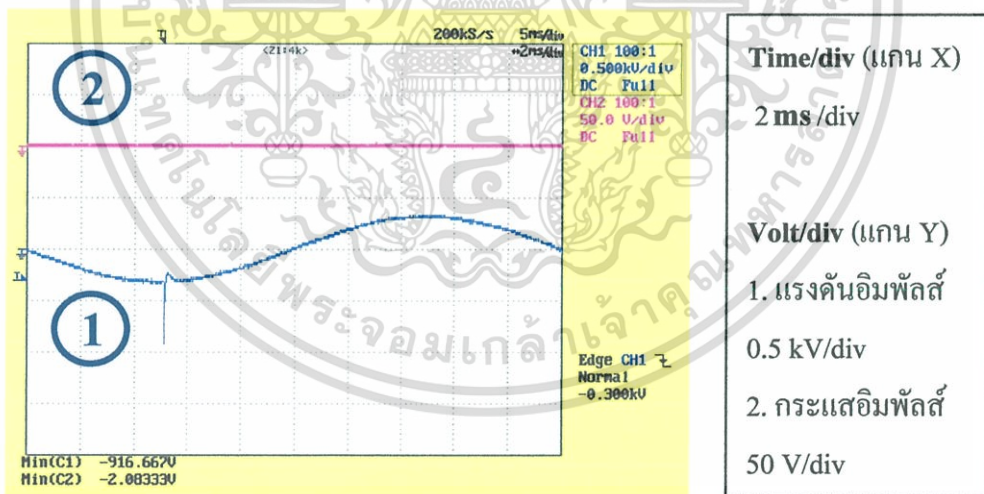
กระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรคความถี่ของไมโครแถบระยะ 20 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

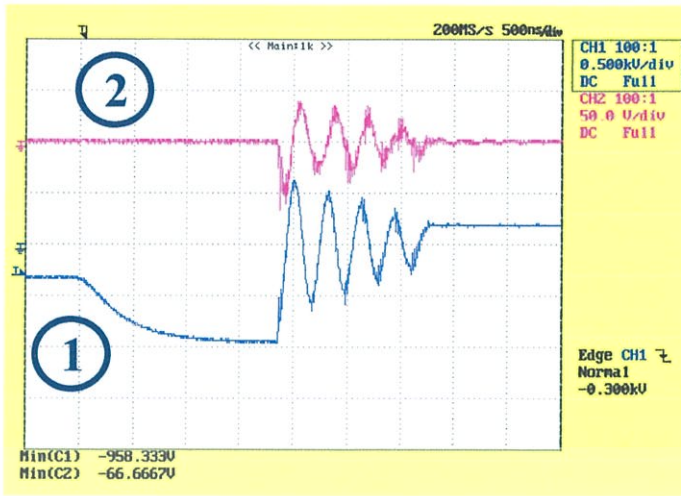
ตารางที่ 4.14 แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศา
ระยะแกป 30 μm

ครั้ง	ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควาน์
1	630 V
2	630 V
3	655 V
4	655 V
5	630 V
6	630 V
7	630 V
8	655 V
9	630 V
10	630 V
ค่าเฉลี่ย	637.5 V



รูปที่ 4.38 รูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วเวลาทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศาและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อนการเบรกควาน์ของไมโครแกประยะ 30 μm

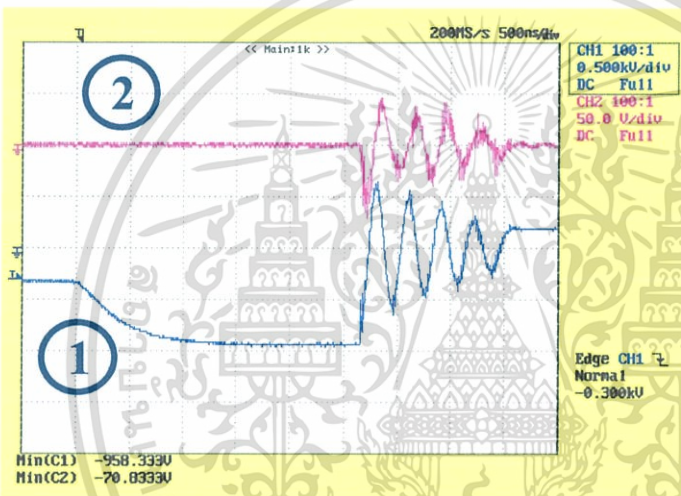
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.5 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

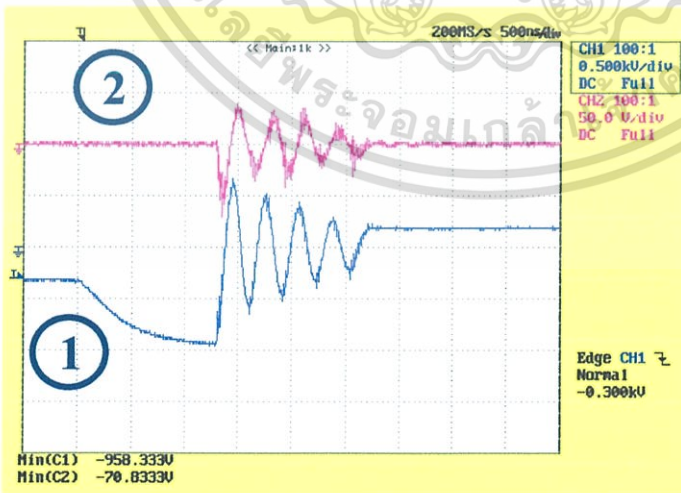
ตัวอย่างรูปคลื่น (a)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.5 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (b)



Time/div (แกน X)
500 ns /div

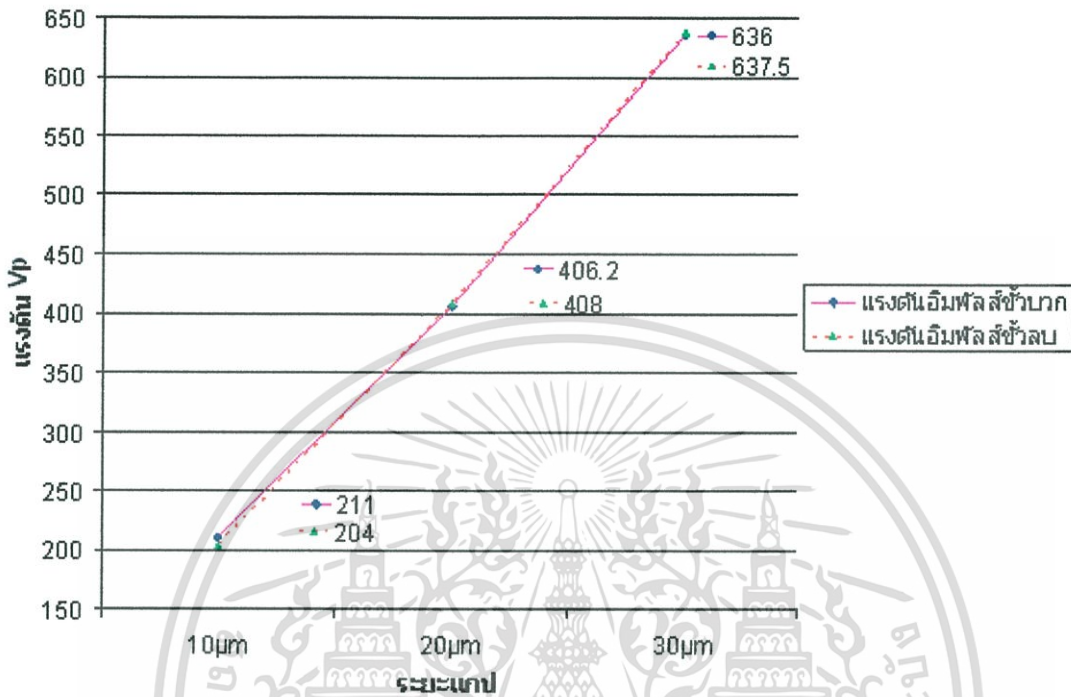
Volt/div (แกน Y)
1. แรงดันอิมพัลส์
0.5 kV/div
2. กระแสอิมพัลส์
50 V/div

ตัวอย่างรูปคลื่น (c)

รูปที่ 4.39 ตัวอย่างรูปคลื่นอิมพัลส์ชั่วพลบที่ซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุม 270 องศาและ กระแสอิมพัลส์ที่เกิดจากการเบรคความถี่ของไมโครแคประยะ 30 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบการเบรกดาวนซ์ของไมโครแกรปที่ระยะ 10-30 μm ด้วยแรงดันอิมพัลส์ข้าววกที่ 90 องศาและข้าวลบที่ 270 องศา ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 กราฟแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนซ์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 90 องศาข้าววกและ 270 องศาข้าวลบของไมโครแกรปที่ระยะ 10-30 μm

4.3 แนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคูณลักษณะการเบรกควานซ์ของไมโครแกปด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานใดมากำหนดวิธีการหาค่าแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ หากนำเอาวิธีการหาค่าแรงดันเบรกควานซ์มาตรฐานของแกปทรงกลม(IEC 60052-2002)ซึ่งสามารถหาค่าได้ทั้ง แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ มาใช้พิจารณาเป็นแนวทางที่จะคำนวณผลการทดสอบที่ได้ที่สภาวะมาตรฐานโดยนำค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกควานซ์คิดเฉพาะค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ได้นำมาพิจารณาเป็นค่าแรงดันเบรกควานซ์ของแกปทรงกลมที่สภาวะมาตรฐาน

4.3.1 แรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 0 องศา

แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ 0 องศา

ระยะแกป = 10 μm

อุณหภูมิ = 26 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 764 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 58 %

$h = 14 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควานซ์เฉลี่ย = 610 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{764}{760} \frac{273+20}{273+26}$$

$$= 0.985$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14/0.985 - 8.5)]$$

$$= 1.011$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{610}{0.985 \times 1.011}$$

$$= 612.551 \text{ V}_P$$

$$\approx 613 \text{ V}_P$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ 0 องศา

ระยะแกป = 20 μm

อุณหภูมิ = 27 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 760 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 55 %

$h = 14 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคความถี่ = 827.6 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{760}{760} \frac{273+20}{273+27}$$

$$= 0.977$$

$$k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14/0.977 - 8.5)]$$

$$= 1.012$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{827.6}{0.977 \times 1.012}$$

$$= 837.039 \text{ } V_p$$

$$\approx 837 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ 0 องศา

ระยะแกป = 30 μm

อุณหภูมิ = 26 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 760 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 55 %

$h = 13 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควาน์เฉลี่ย = 1060 V_P

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{760}{760} \frac{273+20}{273+26} \\ &= 0.9799 \end{aligned}$$

$$k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$\begin{aligned} k_h &= 1 + [0.002(13/0.9799 - 8.5)] \\ &= 1.010 \end{aligned}$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{1060}{0.9799 \times 1.010}$$

$$= 1071.033 \text{ } V_P$$

$$\approx 1071 \text{ } V_P$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ 0 องศา

ระยะแกป = 10 μm

อุณหภูมิ = 25 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 764 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 63 %

$h = 14.5 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกควาน์เฉลี่ย = 581.4 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{764}{760} \frac{273+20}{273+25}$$

$$= 0.988$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14.5/0.988 - 8.5)]$$

$$= 1.012$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{581.4}{0.988 \times 1.012}$$

$$= 581.484 \text{ } V_p$$

$$\approx 582 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ 0 องศา

ระยะแกป = 20 μm

อุณหภูมิ = 23 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 765 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 63 %

$h = 13 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ = 837 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{765}{760} \frac{273+20}{273+23}$$

$$= 0.996$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(13/0.996 - 8.5)]$$

$$= 1.009$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{837}{0.996 \times 1.009}$$

$$= 832.865 \text{ } V_p$$

$$\approx 833 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วเวลาที่ 0 องศา

ระยะแกป = 30 μm

อุณหภูมิ = 23 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 766 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 65 %

$h = 13.5 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์เฉลี่ย = 1072 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273 + t_n}{273 + t}$$

$$\delta = \frac{766}{760} \frac{273 + 20}{273 + 23}$$

$$= 0.998$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(13.5/0.998 - 8.5)]$$

$$= 1.010$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

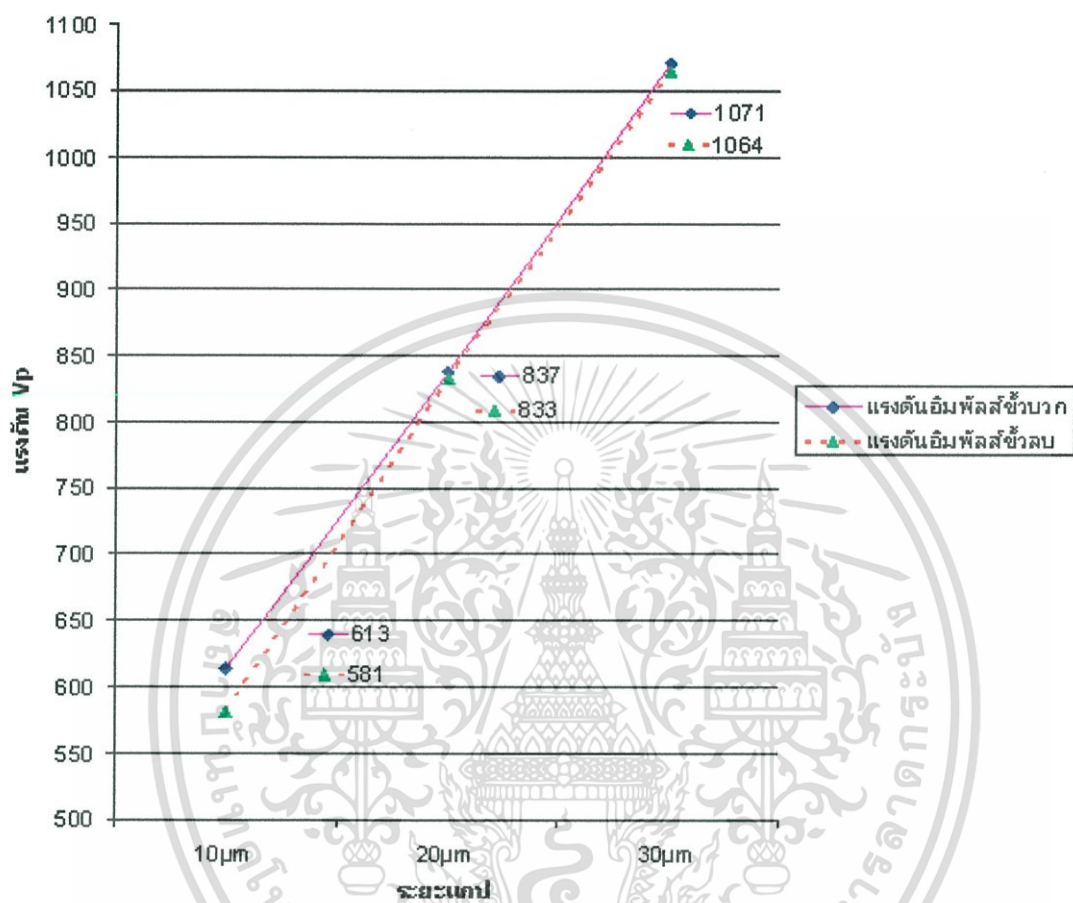
$$U_{bn} = \frac{1072}{0.998 \times 1.010}$$

$$= 1063.513 \text{ } V_p$$

$$\approx 1064 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบแนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคุณลักษณะการเบรคความถี่ของไมโครแกรปที่ระยะ 10-30 μm ด้วยแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบที่บัพช้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 0 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 กราฟแนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคุณลักษณะแรงดันอิมพัลส์เบรคความถี่บัพช้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 0 องศาของไมโครแกรป

4.3.2 แรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วบนบนแรงดันกระแสลับ 50 Hz ที่มุม 90 และ 270 องศา

แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ 90 องศา

ระยะแกป = 10 μm

อุณหภูมิ = 26 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 765 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 58 %

$h = 14 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์เฉลี่ย = 211 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{765}{760} \frac{273+20}{273+26}$$

$$= 0.986$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14/0.986 - 8.5)]$$

$$= 1.011$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{211}{0.986 \times 1.011}$$

$$= 211.668 \text{ } V_p$$

$$\approx 212 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ 90 องศา

ระยะแกป = 20 μm

อุณหภูมิ = 26 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 762 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 57 %

$h = 14 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกความถี่ = 406.2 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{762}{760} \frac{273+20}{273+26}$$

$$= 0.983$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14/0.983 - 8.5)]$$

$$= 1.011$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{406.2}{0.983 \times 1.011}$$

$$= 408.729 \text{ } V_p$$

$$\approx 409 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ข้าวบวที่ 90 องศา

ระยะแกป = 30 μm

อุณหภูมิ = 26 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 762 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 55 %

$h = 13 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน้เฉลี่ย = 636 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{762}{760} \frac{273+20}{273+26}$$

$$= 0.983$$

$$\therefore k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(13/0.983 - 8.5)]$$

$$= 1.010$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{636}{0.983 \times 1.009}$$

$$= 641.228 \text{ } V_p$$

$$\approx 641 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลที่ 270 องศา

ระยะแกป = 10 μm

อุณหภูมิ = 25 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 762 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 62 %

$h = 14 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์เฉลี่ย = 204 V_P

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{762}{760} \frac{273+20}{273+25}$$

$$= 0.986$$

$$k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14/0.986 - 8.5)]$$

$$= 1.011$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{204}{0.986 \times 1.011}$$

$$= 204.646 \text{ } V_P$$

$$\approx 205 \text{ } V_P$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลที่ 270 องศา

ระยะแกป = 20 μm

อุณหภูมิ = 24 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 763 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 64 %

$h = 14.5 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์เฉลี่ย = 408 V_P

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{763}{760} \frac{273+20}{273+24}$$

$$= 0.990$$

$$k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14.5/0.990 - 8.5)]$$

$$= 1.012$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

$$U_{bn} = \frac{408}{0.990 \times 1.012}$$

$$= 407.234 \text{ } V_P$$

$$\approx 407 \text{ } V_P$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลที่ 270 องศา

ระยะแก๊ป = 30 μm

อุณหภูมิ = 24 $^{\circ}\text{C}$

ความดันบรรยากาศ = 766 mm Hg

ความชื้นสัมพัทธ์ = 64 %

$h = 14.5 \text{ g/m}^3$

ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์เฉลี่ย = 637.5 V_p

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t}$$

$$\delta = \frac{766}{760} \frac{273+20}{273+24}$$

$$= 0.994$$

$$k_d = \delta$$

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(14.5/0.994 - 8.5)]$$

$$= 1.012$$

$$U_{bn} = \frac{U_b}{k_d k_h}$$

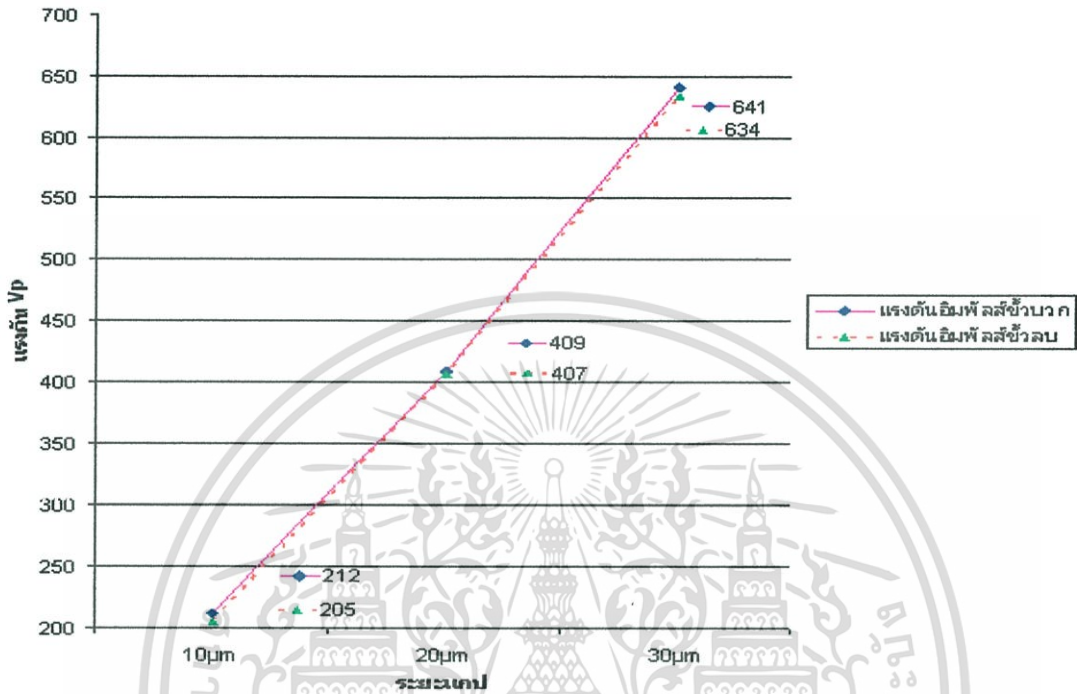
$$U_{bn} = \frac{637.5}{0.994 \times 1.012}$$

$$= 633.743 \text{ } V_p$$

$$\approx 634 \text{ } V_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบแนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคูณลักษณะการเบรกคาวน์ของไมโครแกปที่ระยะ 10-30 μm ด้วยแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ 90 องศาและชั่ววอลบที่ 270 องศา ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 กราฟแนวทางการวิเคราะห์การศึกษาคูณลักษณะแรงดันอิมพัลส์เบรกคาวน์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ ที่ 90 องศาชั่ววอกและ 270 องศาชั่ววอลบของไมโครแกป

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าแรงดัน Superimposed เบรกคาวน์ที่สภาวะห้องกับสภาวะมาตรฐานของแกปทรงกลม(กิดเฉพาะแรงดัน Impulses)

ระยะ gap (μm)	Superimposed Impulses (+)			Superimposed Impulses (-)		
	มุม	0 องศา	90 องศา	มุม	0 องศา	270 องศา
	วิธีการ			วิธีการ		
10	สภาวะห้อง(V)	610	211	สภาวะห้อง(V)	581.4	204
	สภาวะมาตรฐาน(V)	613	212	สภาวะมาตรฐาน(V)	581	205
20	สภาวะห้อง(V)	827.6	406.2	สภาวะห้อง(V)	837	408
	สภาวะมาตรฐาน(V)	837	409	สภาวะมาตรฐาน(V)	833	407
30	สภาวะห้อง(V)	1060	636	สภาวะห้อง(V)	1072	637.5
	สภาวะมาตรฐาน(V)	1071	641	สภาวะมาตรฐาน(V)	1064	634

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.15 เมื่อทำการทดสอบหาเฉพาะแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบโดยไม่ได้รวมค่าแรงดันกระแสสลับที่ทับซ้อนอยู่ และนำมาแปลงค่าสู่สถานะมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ ที่ระยะแกป 10 - 30 μm สรุปได้ว่า แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ขั้วบวกที่มุมเฟส 90 องศา มีค่าแรงดันเบรกดาวน์น้อยกว่ามุมเฟส 0 องศา และค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ขั้วลบที่มุมเฟส 270 องศา มีค่าแรงดันเบรกดาวน์น้อยกว่ามุมเฟส 0 องศาเช่นกัน เนื่องจากมุมเฟส 90 องศา ขั้วบวก และ 270 องศา ขั้วลบ เป็นมุมเฟสสูงสุดบนขดคลื่นแรงดันกระแสสลับ 50 Hz จึงทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ง่ายกว่ามุมเฟสอื่นๆ และค่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วบวกมีค่าสูงกว่าแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ เนื่องจากการเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยสังเกตได้จากรูปคลื่นจากการทดลองจะไม่เกิดกระแสโคโรนาขึ้นก่อนการเกิดเบรกดาวน์ แต่แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวกได้ อาจมีสาเหตุมาจากประจุค้างที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงดันกระแสสลับเข้ามาเกี่ยวข้องกับขั้วลบมีผลของ AC pre-stress เกี่ยวข้องตามมาด้วยขั้วลบทำให้เกิดผลกระทบต่อแรงดันที่เกิดการเบรกดาวน์ ระยะห่างคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดการเบรกดาวน์จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการสะสมประจุให้มากพอก่อนเกิดการเบรกดาวน์ เมื่อเกิดการเบรกดาวน์แล้วรูปคลื่นจะมีการแกว่งก่อนกลับเข้าสู่รูปคลื่นกระแสสลับ ซึ่งทับซ้อนอยู่เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรแหล่งจ่ายทั้งสอง โดยเมื่อเกิดการเบรกดาวน์รูปคลื่นแรงดันจะตกลงและแกว่งก่อนกลับเข้าสู่แรงดันกระแสสลับ 50 Hz ปกติ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเกิดการเบรกดาวน์รูปคลื่นกระแสจะพุ่งขึ้นและแกว่งเช่นกันก่อนกลับเข้าสู่แรงดันกระแสสลับ 50 Hz ปกติ ส่วนความแปรผันของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นได้จากค่าตัวแปร 3 ค่า คือ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้น ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ที่สถานะห้องและสถานะมาตรฐานได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s ได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบโดยช่วงเวลาหน้าคลื่น และช่วงเวลาหางคลื่น เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-1 จุดประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือสามารถสร้างวงจรที่ทำให้รูปคลื่นอิมพัลส์ขึ้นไปทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ตามมุมต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เพื่อนำไปศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะการเบรกดาว์ของไมโครแกปทรงกลมเนื่องจากรูปคลื่นอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz สามารถแสดงพฤติกรรมของแรงดันและกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นก่อน-หลังการเบรกดาว์ เป็นไปตามจุดประสงค์การศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้อย่างครบถ้วน

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์ที่สภาวะมาตรฐานของแรงดัน Impulses กับ Superimposed Impulses

ระยะ gap (μm)	Impulses	ขั้วบวก (+)		ขั้วลบ (-)		
		Superimposed Impulses		Superimposed Impulses		
		0 องศา	90 องศา	0 องศา	270 องศา	
10	472 V	613 V	212 V	459 V	581 V	205 V
	% เทียบกับ Impulses	+29.87%	-55.08%	% เทียบกับ Impulses	+26.58%	-55.34%
20	644 V	837 V	409 V	637 V	833 V	407 V
	% เทียบกับ Impulses	+29.97%	-36.49%	% เทียบกับ Impulses	+30.77%	-36.11%
30	801 V	1071 V	641 V	800 V	1064 V	634 V
	% เทียบกับ Impulses	+33.71%	-19.98%	% เทียบกับ Impulses	+33.00%	-20.75%

เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์ของแรงดัน Impulses กับ Superimposed Impulses ทั้งขั้วบวกมุม 0, 90 และขั้วลบมุม 0, 270 ที่ระยะแกปต่างๆ ทำให้ทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ ขั้วบวกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 90 องศาและแรงดันอิมพัลส์ ขั้วลบทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มุม 270 นั้นมีการเบรกดาว์น้อยกว่าแรงดันอิมพัลส์ปกติ กล่าวคือใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนเวลาให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับแรงดันน้อยกว่าเมื่อขึ้นไปทับซ้อนตามมุมดังกล่าว ก็สามารถทำให้เกิดการเบรคความถี่ได้ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขั้วของแรงดันจะพบว่าแรงดันเบรคความถี่ขั้วลบมีค่าต่ำกว่าขั้วบวกจากการทดสอบพบว่าในกรณีระยะห่างระหว่างแกปมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ($d < D/2$) ขั้วของแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรคความถี่เล็กน้อย ค่าแรงดันเบรคความถี่จึงต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงดันกระแสสลับเข้ามาเกี่ยวข้องกับขั้วของขั้วมมีผลของ AC pre-stress เกี่ยวข้องตามมา ทำให้เกิดผลกระทบต่อแรงดันที่เกิดการเบรคความถี่โดยสังเกตได้จากแรงดันอิมพัลส์เบรคความถี่กับแรงดันอิมพัลส์เบรคความถี่ทับซ้อนแรงดันกระแสสลับที่มุม 0 องศาควรมีค่าใกล้เคียงกันแต่ปรากฏว่ากลับมีค่าต่างกัน ทั้งนี้อาจมีผลมาจาก AC pre-stress ที่กล่าวมาข้างต้นโดยวิทยานิพนธ์นี้ในส่วนของทดสอบแรงดันกระแสสลับเบรคความถี่ไม่ได้นำมาเป็นตัวแปรสำคัญ เนื่องจากในการทดสอบได้กำหนดให้ค่าแรงดันกระแสสลับมีค่าคงที่ประมาณ ($228 - 230 V_{rms}$) เมื่อคิดเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคความถี่ของแรงดันทับซ้อนดังกล่าวกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานแล้ว ทำให้ทราบว่าที่ระยะแกปค่าน้อยๆนั้น (ที่มุมทับซ้อนขั้วบวกมุม 90 องศา, ขั้วลบมุม 270 องศา) เปรียบเทียบกับการฉนวนภายในวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านขาเข้านั้น หากมีความต้องการการป้องกันให้ได้ 100 % ควรจะต้องมีการเพิ่มการฉนวนให้มากขึ้นกว่าเดิมถึงเกือบ 60 % เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากแรงดันลักษณะดังกล่าวเข้ามาในวงจรในขณะที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นใช้แรงดันกระแสสลับ 50 Hz เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอยู่ แต่หากระยะห่างของแกปเพิ่มมากขึ้นระดับการฉนวนจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนดังตารางที่ 5.1

คุณสมบัติของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	- หน้าคลื่น - หลังคลื่น	1.2 $\mu s \pm 30 \%$ 50 $\mu s \pm 20 \%$
ขั้วของแรงดันที่ได้		บวก(+)และลบ(-)
รูปคลื่นอิมพัลส์ซ้ำ		ทุก 1-3 s
มุมเฟส		0-360 องศา
ความละเอียดของมุมทับซ้อน		ทุก 1 องศา
ระยะเฟสเลื่อน		ไม่เกิน 2 องศา
พิกัดแรงดันที่ IGBT ทำงานได้สูงสุด		1200 V
ระยะไมโครแกปต่ำสุด		10 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ IGBT แทนการใช้สปรักเกป ซึ่งมีข้อดีคือ IGBT สามารถเปิดปิดวงจรได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากนี้การใช้ IGBT ทำให้สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีแรงดันค่ายอดต่ำได้ ซึ่งสปรักเกปไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามการใช้ IGBT ก็มีข้อเสียเช่นกัน นั่นคือ IGBT มีพิกัดแรงดันต่ำ สูงสุดเพียง 1200 V ตามท้องตลาด ซึ่งถ้ามี IGBT ที่มีพิกัดแรงดันสูงกว่านี้จะสามารถพัฒนาอุปกรณ์การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีความแม่นยำขึ้นได้ ซึ่งถ้าใช้ IGBT สองตัวมาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มพิกัดทางแรงดัน รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการใช้ IGBT สองตัวต่อ อนุกรมกัน จะทำให้รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปที่บริเวณยอดคลื่น เนื่องจาก IGBT แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติในการเปิดปิดวงจรที่ต่างกัน แม้ว่าจะเป็นขั้วหือและร่นเดียวกันก็ตาม การเปิดปิดวงจรที่ไม่ตรงกันนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไป อีกปัญหาหนึ่งซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการศึกษาคือเรื่องประจุค้างใน ไมโครเกปทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากความจริง แก้ปัญหาโดยทฤษฎีปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต) ซึ่งสามารถทำให้ทำการทดลองดำเนินต่อไปได้

การพัฒนาการศึกษาในเรื่องนี้เป็นเรื่องสำคัญมากในอนาคต เพื่อนำไปทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้รับแรงดันในลักษณะดังกล่าวตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง และสามารถนำไปพัฒนาให้อุปกรณ์มีคุณภาพดียิ่งขึ้นไปอีก

บรรณานุกรม

- [1] IEC 60-1 High-voltage test techniques. General definitions and test requirements 1989.
- [2] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ชัยธร ทิมาภรณ์วัฒน์ และวีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา. “การออกแบบและสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ด้วยชุดคิท.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, หน้า 124-128 , 2545.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช. **Combine Electrical Power Source**. Japan : 2005.
- [4] สำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ : 2549.
- [5] Z.H. Meiksin and Philip C. Thackray. **Electronic Design with off-the-shelf Integrated Circuit**. New York : Parker Publishing Company.1984.
- [6] The University of St Andrews. “**Frequency Response of a Low-Pass & High-Pass Filter.**” [Online]. Available : http://www.st-andrews.ac.uk/~jcgl/Scots_Guide/experiment/highpass/hpf.html. 2008
- [7] Kuffel, E. and Zaengl, W.S., **High voltage engineering fundamentals**. Oxford : Pergamon press. 1984.
- [8] Ravindra, A., and Wolfgang, M. **High Voltage Insulation Engineering**. India : New Age International Publishers. 1995.
- [9] Yukihiro Kinoshita, Kuniharu Imai, “**The characteristics of spread of residual charge in micro gap and PD break down**”, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials 9th , pp. 465 – 468, Harbin China, July 19 – 23, 2009.
- [10] Ken Kawamata, Shigeki Minegishi and Osamu Fujiwara, “**Measurement of Radiated Electromagnetic Intensity due to Micro gap discharge as low voltage ESD**”, Int. Zurich Symposium on EMC 20th , pp. 397 – 400 , Zurich, 2009.
- [11] Takahito Ono, Dong Youn Sim and Masayoshi Esashi, “**Imaging of Micro - discharge in a Micro - gap of Electrostatic Actuator**”, IEEE , pp. 651 – 656, 2000.
- [12] Chung-Fon Hsieh, Shyankay Jou, “**Titanium nitride electrodes for micro-gap discharge**”, Microelectronics Journal, pp. 867 – 870, Vol. 37, 2006.

- [13] Diaa- Eldin A. Mansour, Hiroki Kojima, Naoki Hayakawa, Fumihiro Endo and Hitoshi Okubo, **“Influence of Accumulated Surface Charges on Partial Discharge Activity at Micro Gap Delamination in Epoxy GIS Spacer”**, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials 9th, pp. 675 – 678, Harbin China, July 19 – 23, 2009.
- [14] Zhuoyu Ji, Hongxiang Li, Yaling Liu and Wenping Hu, **“Electroplating silver tetracyanoquinodimethane between gold micro-gap electrodes for the fabrication of coplanar devices, a new way to integrate material synthesis and devices fabrication within one step”**, Applied Physics A, Vol. 91, pp.301 – 303, 2008.
- [15] R.S.Dhariwal, J.-M.Torres and M.P.Y. Desmulliez, **“Electric field breakdown at micrometre separations in air and nitrogen at atmospheric pressure”**, IEE Proc. Eng-Sci. Meas. Technol., pp. 261 – 265, Vol. 147, No. 5, September, 2000.
- [16] Paul G. Slade, Erik D. Taylor, **“Electrical Breakdown in Atmospheric Air Between Closely Spaced (0.2 μm – 40 μm) Electrical Contacts”**, IEEE Elect. Contacts, pp. 245 – 250, 2001.
- [17] J-M Torres, R.S. Dhariwal and P.C. King, **“Electric Field Breakdown at Micrometre Separations in Various Media”**, IEE, High Voltage Engineering Symposium, pp. 201 – 204, No. 467, August 22 – 27, 1999.
- [18] Marija Radmilovic-Radjenovica and Branislav Radjenovic, **“A Particle-in-Cell Simulation of the High-Field Effect in Devices With Micrometer Gaps”**, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 35, No. 5, October 2007.
- [19] J.-M. Torres, R.S. Dhariwal, **“Electric field breakdown at micrometre separations in air and vacuum”**, Microsyst. Technol., pp. 6–10, Vol. 6, No. 1, November 1999.
- [20] Patrick Carazzetti, Herbert R. Shea, **“Electrical breakdown at low pressure for planar microelectromechanical systems with 10 to 500 μm gaps”**, J. Micro/Nanolith., Vol. 8, No. 3, Jul – Sep 2009.
- [21] คณาจารย์ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **ฟิสิกส์ 2**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [22] NASA., Atmospheric Science Data Center. **“ What wavelength goes with a color?”**
[Online].Available:
http://eosweb.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths_for_Colors.html. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Wikimedia Foundation, Inc. “**รังสีอัลตราไวโอเล็ต.**” [Online].Available:
<http://th.wikipedia.org/wiki/UV>. 2009.
- [24] Wikimedia Foundation, Inc. “**Electron work functions of elements.**” [Online].Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Work_function. 2009.
- [25] Osamu Yamashita, “**Effect of metal electrode on Seebeck coefficient of p- and n- type Si thermoelectrics,**” Journal of Applied Physics Vol. 95, pp. 178-183, January 2004.
- [26] Lawrence P., Huelsman. **Active and passive analog filter design an introduction.**
Singapore : McGraw - Hill. 1993.
- [27] ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง. **เรียนรู้การใช้งาน OrCAD : PSpice & PCB Design.** กรุงเทพฯ :
ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ตเลิร์นนิ่ง. 2551.
- [28] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์ **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronic.**
กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ. เจ. พรินต์ติ้ง. 2547.
- [29] วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล และชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอน-
โทรลเลอร์ MCS – 51.** กรุงเทพฯ : บริษัท อินโนเวตีฟ จำกัด. ม.ป.พ.
- [30] ชนนันท์ หมู่สุวรรณ. 2545. “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบ
พกพาได้ขนาด 800 V.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. โกสินทร์ คล่องเชิงสถาน, อานันท์วัฒน์ คุณากร, พีรภูมิ ยุทธโกวิท, และนรเศรษฐ พัฒนเดช, “วงจรรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่บัสช้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, หน้า 189-192, กาญจนบุรี, ประเทศไทย, ตุลาคม 25-26, 2550.








- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)




KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี
 25 - 26 ตุลาคม 2550







FACULTY OF ENGINEERING
KMUTT
EECON - 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

Construction of a Circuit for Superimposed Impulse Voltage on AC Voltage 50 Hz Control with Microcontroller

โกสินทร์ คล่องเชิงสถาน อานันท์วัฒน์ คุณากร พีรภูมิ ยุทธโกวิท นรเศรษฐ พัฒนเดช
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-9902 E-mail : s9060215@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมมุมเฟสทับซ้อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ในวงจรประกอบด้วย วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำเพื่อป้องกันแรงดันเกินอิมพัลส์ที่จะเข้าสู่แหล่งจ่ายกระแสสลับ 50 Hz วงจรกรองผ่านความถี่สูงเพื่อป้องกันแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่จะเข้าสู่วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ และวงจรควบคุม วงจรนี้ได้ทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ กับการทดลองจริงที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ค่าชดเชยขนาด 1.1 kV ทับซ้อนแรงดันกระแสสลับค่าชดเชยขนาด 325 V ที่มุมเฟสต่างๆ

คำสำคัญ : แรงดันอิมพัลส์, ทับซ้อน, แรงดันกระแสสลับ, วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ, วงจรกรองผ่านความถี่สูง

Abstract

This paper presents construction of a circuit to produce superimposed impulse voltages on a 50 Hz AC supply voltage with a phase - controlled location using a microcontroller. The circuit consists of an impulse voltage generation part, a low pass filter to prevent the penetration of the impulse voltage to the power frequency source, a high pass filter to prevent the penetration of the AC power frequency voltage to the impulse generation source, and a control circuit. The comparison between experiments and simulations is performed at the peak impulse voltage of 1.1 kV and the peak AC supply voltage of 325 V at various phase angles.

Keywords: impulse voltage, superimposed, AC voltage, low pass filter, high pass filter

1. บทนำ

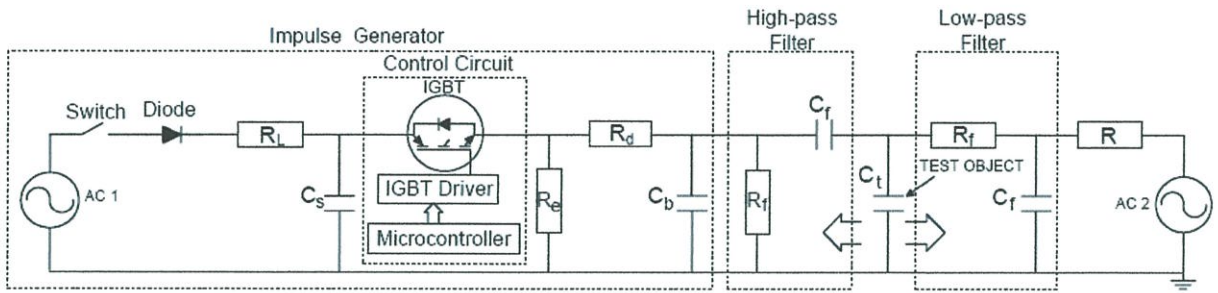
สายส่งและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีโอกาสได้รับแรงดันเกินอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าโดยตรง การเหนี่ยวนำและจากการเปิดและปิดสวิตช์ตัดคอน อย่างไรก็ตามแรงดันเกินจากฟ้าผ่าออกจากระดับแรงดันที่สูงกว่าแล้ว ยังมีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์ จึงก่อให้เกิดความเสียหายกับฉนวนได้ ซึ่งมีการกำหนดมาตรฐานของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60-1 [1] กำหนดให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าคือ 1.2/50 μ s แต่ปรากฏการณ์แรงดันเกินที่จริงในระบบที่กำลังส่งจ่ายกำลังงานอยู่มีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz จึงทำให้เกิดงานวิจัยเพื่อหาคุณสมบัติการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยลักษณะแรงดันอิมพัลส์และทับซ้อน (Superimposed) กันอย่างแพร่หลายเพื่อเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาระบบป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในอนาคต เช่น การออกแบบและสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ด้วยชุดคิท [2]ซึ่งใช้เก็บประจุเพื่อป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคความในฉนวนแข็ง โดยการหาค่าแรงดันเริ่มต้นในการเกิดปรากฏการณ์ treeing ในสายเคเบิล[3] เป็นต้น

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองให้เห็นลักษณะแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่มีมุมเฟสต่างๆ เปรียบเทียบปรากฏการณ์จริง โดยควบคุมมุมเฟสทับซ้อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูงแทนเก็บประจุเพื่อป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ และสามารถนำไปศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการเบรคความของฉนวนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อเผชิญกับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อน

2. วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ

วงจรที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยแหล่งจ่าย 2 ส่วนคือส่วนที่สร้างแรงดันอิมพัลส์กับส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ซึ่งแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมีค่าตรงตามมาตรฐาน IEC 60-1[1] ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูปที่ 1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ซับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์(อิมพัลส์ชั่วคราว)

แรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวและชั่วพล โดยเงื่อนไขที่สำคัญคือวงจรทั้งสองเมื่อนำมาต่อรวมกันจะต้องไม่ถูกแรงดันของอีกวงจรรบกวนและแรงดันทั้งสองจะต้องมาคกพร้อมเฉพาะ วัตถุประสงค์ของเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีวงจรรองต่ออันดับขึ้นระหว่างแหล่งจ่ายทั้งสอง ดังรูปที่ 1 และวงจรที่สร้างขึ้นจริงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย

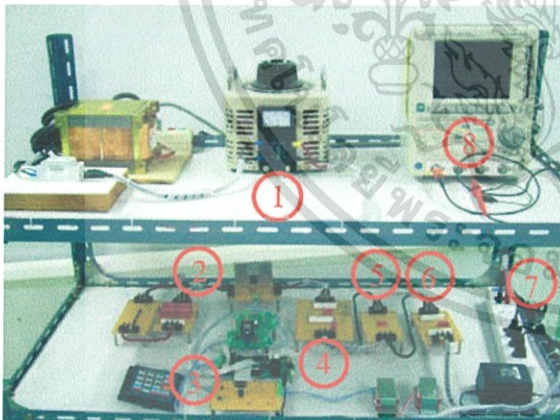
- 1) หม้อแปลงปรับแรงดันสำหรับสร้างแรงดันอิมพัลส์(AC 1)
- 2) วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์
- 3) วงจรควบคุม
- 4) วงจรกรองผ่านความถี่สูง
- 5) วัตถุประสงค์
- 6) วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ
- 7) แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz (AC 2)
- 8) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป(Digital Oscilloscope)

ในวงจรแต่ละส่วนควรมีการออกแบบให้สอดคล้องกันดังรูปที่ 1 เริ่มต้นที่ C_s ควรเลือกที่มีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุโพลีเอสเตอร์(C_p) ประมาณ 10 เท่า แต่ได้ออกแบบไว้ที่ 100 เท่า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีจากวงจรและนำค่า C_s กับ C_p มาคำนวณหาค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น(R_d)กับความต้านทานปรับหลังคลื่น(R_e) (สำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μs , T_1 / T_2 , มีค่า $k_1 = 0.73$ และ $k_2 = 2.96$) ตามสมการที่(1)และ(2)[4]

$$R_d = \frac{T_1}{k_2} \times \left(\frac{C_b + C_s}{C_b C_s} \right) \quad (1)$$

$$R_e = \frac{T_2}{k_1} \times \left(\frac{1}{C_b + C_s} \right) \quad (2)$$

ลำดับต่อมาตัวเก็บประจุของวงจรกรอง(C_f) ต้องมีค่าน้อยกว่า C_p ประมาณ 10เท่า เพื่อจะได้ไม่เป็นโพลีเอสเตอร์แบ่งแรงดัน เมื่อ C_p คายประจุมาคกพร้อมที่วัตถุประสงค์(C_c) เพราะฉะนั้น C_f ควรมีค่าเก็บประจุน้อยกว่า C_c เพื่อที่แรงดันจะได้มาคกพร้อมที่วัตถุประสงค์อย่างเต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 วงจรที่สร้างขึ้นจริง

2.1 การออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์

แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบเป็นวงจร B[4] เริ่มต้นจากความต้านทานจำกัดกระแสแอคทีฟประจุ(R_L) ซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะเวลาการเก็บประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_c) และ ตัวเก็บประจุ

2.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและวงจรกรองผ่านความถี่สูง

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและ กรองผ่านความถี่สูงออกแบบวงจรแบบความต้านทานกับตัวเก็บประจุ ลำดับที่ 1(First order) โดยกำหนดค่าความถี่ตัดข้ามค่าต่างๆมีค่าเป็นไปตามสมการ (3)[5]

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (3)$$

คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำก็คือยอมให้ความถี่ที่มีค่าไม่เกินความถี่ตัด (Cut-off frequency) ผ่านวงจรไปได้แต่เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นไปถึงความถี่ตัด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรไปได้โดยจะถูกลดทอนลงเรื่อยๆตามอัตราความถี่ที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

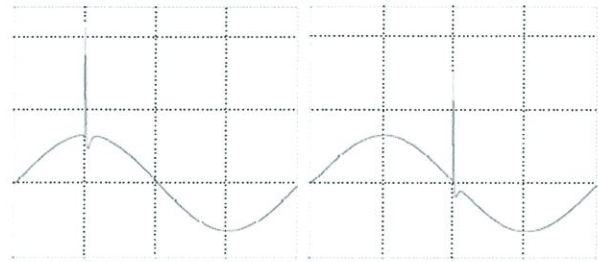
คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านความถี่สูงคือจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าเกินความถี่ตัด (Cut-off frequency) ผ่านวงจรไปได้แต่เมื่อความถี่มีค่าลดลงถึงความถี่ตัด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านวงจรไปได้โดยจะถูกลดทอนลงเรื่อยๆตามอัตราความถี่ที่ลดลง ซึ่งทั้งสองวงจรจะออกแบบโดยใช้ความต้านทานของวงจรกรอง(R_p) เท่ากับ 100 k Ω และใช้ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง(C_p) เท่ากับ 1 nF เมื่อคำนวณออกมาจะได้ความถี่ตัดมีค่า 1591 Hz ซึ่งทำให้เฟสและขนาดของแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่ตกคร่อมที่วัดทดสอบกับเฟสและขนาดที่แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อชุดควบคุมสั่งให้แรงดันทับซ้อนกันจะทำให้มุมเฟสที่ได้มีค่าไม่ผิดพลาด ลักษณะ วงจรตามรูปที่ 1 ซึ่งสามารถป้องกันแรงดันของแหล่งจ่ายทั้งสองด้านที่จะ ตกคร่อมซึ่งกันและกัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยืนยัน ได้ด้วยผลการจำลอง โปรแกรม PSpice student edition และจากการทดลองจริงดังรูปที่ 5

3. การจำลองแบบวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

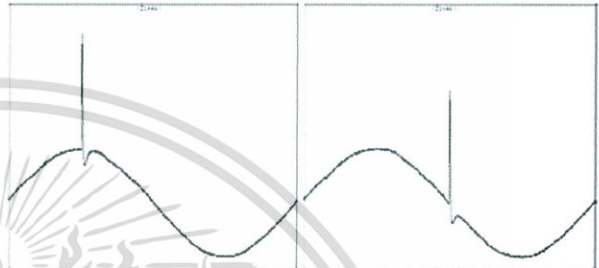
เพื่อเป็นการทดสอบว่าวงจรที่ออกแบบสามารถใช้งานจริงได้หรือไม่จึงใช้การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรม PSpice student edition เพื่อคุณลักษณะจากวงจรตามรูปที่ 1 โดยค่าตัวประกอบประกอบทางไฟฟ้าของวงจรตามตารางที่ 1 และนำผลการจำลองมาใช้เปรียบเทียบกับผลการวัดจากวงจรที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5

ตารางที่ 1 ค่าตัวประกอบประกอบทางไฟฟ้าของวงจรที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ และ ใช้ในการทดลองจริง

รายละเอียด	ค่าของตัวแปร
1. แรงดันอิมพัลส์	1.1 kV _{peak}
2. แรงดันกระแสสลับ 50 Hz	325 V _{peak}
3. ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ(R_L)	10 k Ω
4. ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_p)	1000 nF
5. ความต้านทานปรับหลังคลื่น(R_c)	39 Ω
6. ความต้านทานปรับหน้าคลื่น(R_d)	68 Ω
7. ตัวเก็บประจุไหลค(C_b)	10 nF
8. ความต้านทานของวงจรกรอง(R_p)	100 k Ω
9. ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง(C_p)	1 nF
10. วัตถุทดสอบ(C)	0.5 nF



จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์(แกน X : 5 ms/div และ แกน Y : 0.5 kV/div)

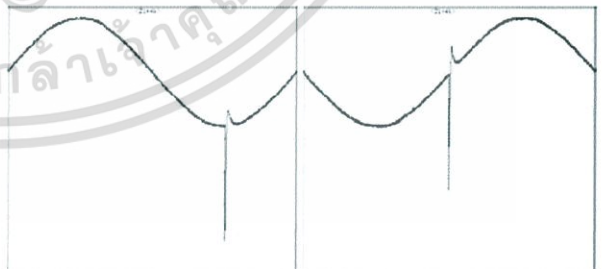


การทดลองจริง (แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่เฟสแรงดันกระแสสลับ 90°
แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่เฟสแรงดันกระแสสลับ 180°
รูปที่ 3 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่เฟสต่างๆกันตกคร่อมวัตถุทดสอบ



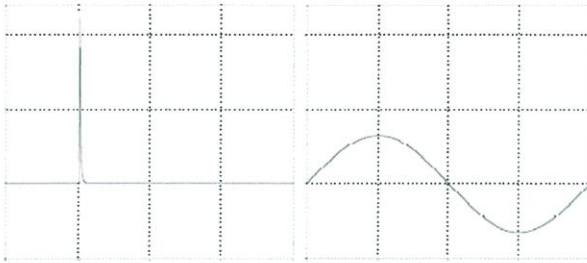
จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์(แกน X : 5 ms/div และ แกน Y : 0.5 kV/div)



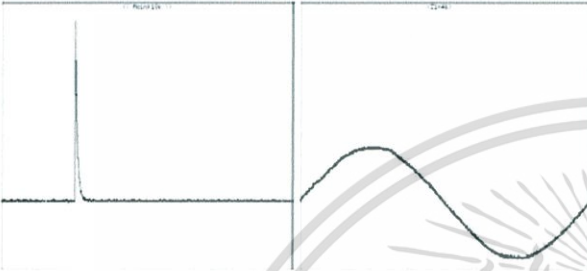
การทดลองจริง (แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่เฟสแรงดันกระแสสลับ 270°
แรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่เฟสแรงดันกระแสสลับ 360°
รูปที่ 4 กราฟแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่เฟสต่างๆกันตกคร่อมวัตถุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



จำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์(แกนX : 5 ms/div และแกนY : 0.5 kV/div)



การทดลองจริง (แกน X : 2 ms/div และ แกน Y : 0.2 kV/div)

แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz รูปที่ 5 กราฟแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์และแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz

ผลการทดสอบปรากฏว่าวงจรที่ประกอบสร้างขึ้นสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับที่มุมเฟสต่างๆ โดยตกคร่อมที่วัตถุทดสอบใกล้เคียงกับการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรม PSpice student edition การสร้างแรงดันอิมพัลส์ให้มียอดคลื่นขนาด 1.1 kV ซึ่งแรงดันอิมพัลส์ส่วนหนึ่งจะไปตกคร่อมที่วงจรรองความถี่ทำให้มีแรงดันอิมพัลส์ไปตกคร่อมวัตถุทดสอบจริงๆ ประมาณ 715 V ทั้งช่วงบวกที่มุม 90° 180° และช่วงลบ ที่มุม 270° 360° ของแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ยอดคลื่นขนาด 325 V โดยพิจารณาผลของแรงดันตกคร่อมแต่ละแหล่งจ่ายว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันด้านตรงข้ามที่ต่ออยู่ แสดงว่าการออกแบบวงจรรองความถี่มีประสิทธิภาพที่ดี เพราะวงจรรองผ่านความถี่ต่ำสามารถตัดความถี่สูงออกไปได้ และไม่มีแรงดันกระแสสลับ 50 Hz มาตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์เพราะวงจรรองผ่านความถี่สูงสามารถตัดความถี่ต่ำออกไปได้ดังทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2 ตามรูปที่ 3,4 และ 5

4. สรุป

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ที่สร้างขึ้นสามารถกำหนดมุมเฟสได้ตามที่กำหนด โดยควบคุมมุมเฟสทับซ้อนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลทดลองพบว่าแรงดันอิมพัลส์ไม่สามารถผ่านวงจรรองผ่านความถี่ต่ำไปตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ได้และในทางกลับกันแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ไม่สามารถผ่านวงจรรองผ่านความถี่สูงไปตกคร่อมแหล่งจ่าย

แรงดันอิมพัลส์ได้ซึ่งเป็นการป้องกันแทนแก่ปรอทกลมได้เป็นอย่างดี ผลโดยรวมชี้ให้เห็นว่าการออกแบบและสร้างวงจรมีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถนำไปศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการเบรคความของฉนวนไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60-1 High-voltage test techniques, General definitions and test requirements 1989.
- [2] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ชัยธร ลิมาภรณ์วณิชย์ และวีระพันธ์ รั้งดี วิจิตรประภา, "การออกแบบและสร้างวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ด้วยชุดคิท", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, หน้า 124-128 , 2545.
- [3] Hongxin Wang, Jingliang He, Xiuge Zhang, Zipin Li, Luo Li, Genzhi Guan, "Electrical Tree Inception Characteristics of XLPE Insulation Under Power Frequency Voltage and Superimposed Impulse Voltage", High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999, Conference Publication No. 487, IEE, 1999.
- [4] สิววย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [5] Z.H. Meiksin and Philip C. Thackray, "Electronic Design with off-the-shelf Integrated Circuit", second Edition, pp247-250, 1984.

ประวัติผู้เขียน



โกสินทร์ ก่องอิงเจตนา ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



อานนท์วัฒน์ ฤณการ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นเรศนฐ พัฒนเดช ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ประวัติผู้เขียน

นาย โกสินทร์ คล่องเชิงसान เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2524 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2548

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2549 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ณ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่าง ศึกษาปริญญาโท 1 บทความคือ วารสารประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 จำนวน 1 เรื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้