



การจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันสูงรูปคลื่นอิมพัลส์  
( SIMULATED HIGH VOLTAGE IMPULSE GENERATOR )

จัดทำโดย

นาย ชณัฐ พงศ์ธราธิก

นาย ชัยพฤกษ์ ทะรักษา

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ศุภี บรรจงจิตร

อาจารย์ จงรักษ์ บุญเลี้ยง



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

028815

ปริญญาโทปีการศึกษา 2533

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันสูงรูปคลื่นอิมพัลส์

( SIMULATED HIGH VOLTAGE IMPULSE GENERATOR )

ผู้จัดทำ

นาย ชัยวุฒิ พงศ์ธราธิก 30,1047

นาย ชัยพลกษ ทะรักษา 30,1053

( อาจารย์ ศุภี บรรจงจิตร )

อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ จงรักษ์ บุญสิง )

อาจารย์ที่ปรึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
บทที่ 1 บทนำทั่วไป	
1.1) บทนำ	1-1
1.2) วัตถุประสงค์	1-3
1.3) นิยามและคำศัพท์เทคนิค	1-3
1.4) วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพื้นฐาน	1-8
บทที่ 2 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์	
2.1) การแปรผันในเทอมของเวลา	2-1
2.2) การคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร	2-5
2.3) ประสิทธิภาพของวงจร	2-6
2.4) ค่าพหุคูณค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่น ( $T_1$ และ $T_2$ )	2-8
2.5) วงจรคำนวณค่าความต้านทานหน่วย	2-9
บทที่ 3 องค์ประกอบของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	
3.1) บทนำ	3-1
3.2) ชุดสร้างแรงดันกระแสตรง (D.C. Charging Set)	3-1
3.3) ความต้านทานที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Resistor)	3-13
3.4) ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าแรงสูง (Capacitors In High Voltage Circuits)	3-29
3.5) โวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Devider)	3-32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4	สปาร์กแกป (Spark Gap) และไกสวิตช์ (Trigger)	หน้า
	4.1) บทนำ	4-1
	4.2) เบรคดาวน์ของอิมพัลส์ (Breakdown Of Impulse Voltage)	4-1
	4.3) แกป (Gaps)	4-7
	4.4) ไกสวิตช์ (Trigger)	4-19
บทที่ 5	วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบขั้นเดียวที่ออกแบบ	
	5.1) ข้อกำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	5-1
	5.2) ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	5-1
	5.3) ตัวอัดประจุ (Charger)	5-1
	5.4) ระบบพัลส์ไกสวิตช์ที่เลือกใช้	5-3
บทที่ 6	การฉนวน	
	6.1) เงื่อนไขในการออกแบบการฉนวน	6-1
บทที่ 7	การใช้ประโยชน์อุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันอิมพัลส์	
	7.1) บทนำ	7-1
	7.2) แนวทางการใช้งานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง	7-1
บทที่ 8	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
	8.1) บทนำ	8-1
	8.2) ผลการทดลอง	8-1
	8.3) สรุปผลการทดลอง	8-6
	8.4) ข้อเสนอแนะ	8-7
ภาคผนวก		3
กิตติกรรมประกาศ		4
บรรณานุกรม		5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองเครื่องกำเนิดแรงดันสูงรูปคลื่นอิมพัลส์  
(SIMULATED HIGH VOLTAGE IMPULSE GENERATOR)

1

นาย ชลภัฏ พงศ์ธราธิก 30.1047

นาย ทัฬหฤกษ์ ทะรักษา 30.1053

อาจารย์ ศุภี บรรจงจิตร

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง

ปีการศึกษา 2533

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รายงานการออกแบบ และส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นเดี่ยวขนาด 20 กิโลโวลต์

แสดงการต่อวงจรเพื่อสร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ โดยใช้อุปกรณ์ชุดประกอบที่สร้างขึ้นด้วย ชาร์จเจอร์, ตัวเก็บประจุ, ตัวความต้านทาน, สปรินกแกป, ทริกเกอร์ และโวลต์เตจดีไวเดอร์ อธิบายคุณลักษณะขององค์ประกอบแต่ละชนิด กำหนดเงื่อนไขในการจนวนภายใน และภายนอกกล่าวถึง การใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์ ชุดประกอบสร้าง เพื่อศึกษาภาคปฏิบัติ การทดลอง การวิจัย และงานทดสอบในงานอุตสาหกรรม

**รูปคลื่น** เป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบมาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที ซึ่ง เป็นที่ยอมรับกันในทุกวันนี้ การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC ของแต่ละเรื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

This thesis presents the design and construction of Single Stage Impulse High-Voltage Generator 20 kV.

The circuit connections for generating Impulse High-Voltage, by using the high-voltage construction set consisting of a charger, capacitors, resistors, spark gaps with trigger and voltage divider, are shown. The characteristics and performances of the components are explained. The criteria of internal and external insulations are specified. The applications of the Single Stage Impulse High-Voltage Generator 20 kV get for experimental studies, researches and the tests in industries are mentioned. The wave shape is 1.2/50 microsecond wave that is the accepted standard lightning impulse voltage today. The design and applications are determined according to the IEC recommendation of each items.

## บทที่ 1

### บทนำทั่วไป

#### 1.1) บทนำ

ในช่วงระยะ 10 ปีที่แล้วมา การพัฒนาอุตสาหกรรมไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยได้เจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว รัฐบาลมีนโยบายที่จะส่งเสริมให้โรงงานอุตสาหกรรม สามารถผลิตอุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นเอง เพื่อจะเป็นส่วนช่วยให้เศรษฐกิจของประเทศดีขึ้น ดังนั้นความต้องการในด้านเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงจึงได้เพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว ในปัจจุบันการพัฒนาการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะอยู่ในย่านแรงดันสูงปานกลาง คือ ระดับแรงดันจำหน่ายตั้งแต่ 1 กิโลโวลต์ จนถึง 36 กิโลโวลต์ เช่น ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า สายเคเบิล หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์ตัดตอน และวัสดุฉนวน เป็นต้น และคาดว่า การพัฒนาจะมีแนวโน้มไปสู่ระบบแรงดันสูงที่ใช้ในระบบส่งจ่าย ในอนาคตอันใกล้

โดยหลักการการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไฟฟ้าแรงสูงเหล่านี้ จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดหรือมาตรฐาน กล่าวคือ จะต้องมีความปลอดภัยใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ในขณะที่ใช้งานมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกิน ซึ่งอาจอยู่ในรูปแรงดันเกินสวิตชิง (switching overvoltage) หรือแรงดันเกินแบบฟ้าผ่า (lightning overvoltage) จะเห็นเพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ และไม่เป็นที่ให้เกิดความผิดพลาดในระบบ อันเนื่องมาจากความล้มเหลวของการฉนวน จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบอุปกรณ์เหล่านั้นก่อนนำไปใช้งาน โดยเหตุที่การฉนวนของอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันเกินแบบฟ้าผ่าได้ จึงต้องทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันฟ้าผ่าตามธรรมชาติ การทดสอบการฉนวนขั้นพื้นฐานด้วยแรงดันอิมพัลส์นี้ เรียกว่า Basic Impulse Insulation Level (BIL) ขนาดแรงดันทดสอบอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่อุปกรณ์เหล่านั้นใช้งาน ดังตัวอย่างแรงดันทดสอบที่มาตรฐานสากล IEC Publ 71-1976 : Insulation Co-ordination part I ตามตาราง 1.1 และ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1

แรงดันทดสอบระดับการฉนวนสำหรับแรงดันระบบสูงสุดมากกว่า 1 kV แต่ต่ำกว่า 52 kV

Highest voltage for equipment $U_m$ (r.m.s.)	Rated lightning impulse withstand voltage (peak)		Rated power-frequency short duration withstand voltage (r.m.s.)
	List 1	List 2	
kV	kV	kV	kV
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12	60	75	28
17.5	75	95	38
24	95	125	50
36	145	170	70

ตารางที่ 1.2

แรงดันทดสอบระดับการฉนวนสำหรับแรงดันระบบสูงสุดตั้งแต่ 52 kV แต่ต่ำกว่า 300 kV

1	2	3	4
Highest voltage for equipment $U_m$ (r.m.s.)	Base for p.u. values $U = \frac{U}{\sqrt{3}}$ (peak)	Rated lightning impulse withstand voltage (peak)	Rated power-frequency short duration withstand voltage (r.m.s.)
kV	kV	kV	kV
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450	185
145	118	550	230
170	139	650	275
245	200	750	325
		850	360
		950	395
		1050	460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2) วัตถุประสงค์

เป็นที่เห็นเด่นชัดแล้วว่าการสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่มีความจำเป็น ในอดีตที่ผ่านมา เราได้สั่งซื้อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาจากต่างประเทศ เพื่อให้สามารถสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นใช้ได้เอง โดยใช้วัสดุที่หาได้หรือผลิตขึ้นภายในประเทศ จึงได้ศึกษาค้นคว้าเพื่อหาทางสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าว และเป็นพื้นฐานในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดแรงดันสูง ๆ ต่อไป จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบจำหน่ายไม่เกิน 3.6 กิโลโวลต์ จะทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ 20 และ 40 กิโลโวลต์ และด้วยเหตุผลในแง่การตลาดเกี่ยวกับอุปกรณ์ประกอบสร้างและปัญหาด้านเทคนิค เราจึงศึกษาและออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 กิโลโวลต์ โดยมีข้อกำหนดและมาตรฐานในการสร้าง โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้าแบบมาตรฐานแบบรูปคลื่นเต็ม (standard full lightning impulse) คือ มีเวลา  $T_1/T_2$  เป็น 1.2/50 ไมโครวินาที ตามมาตรฐาน IEC และหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นพื้นฐานในการทำเรื่องนี้ขนาดแรงดันสูงขึ้นไป และเนื่องจากปัญหาที่ได้กล่าวมาในเรื่องการตลาดของอุปกรณ์ จึงมิได้ทำการสร้างชุดประกอบแรงดันสูงรูปคลื่นอิมพัลส์จึงได้ทำแค่การออกแบบเท่านั้น แต่ผู้จัดทำได้ทำการสร้างและออกแบบ triggering system ขึ้นมาแทนโดยสามารถเป็นตัวกระตุ้นแยกหลัก ทำให้เกิดการสปาร์คระหว่างปลายของหัวกระตุ้นกับอิเล็กโตรดที่แยกหลัก ซึ่งเป็นวิธีที่เรียกว่า "การกระตุ้นด้วยแยกช่วย" รายละเอียดสามารถศึกษาได้ในบทที่ 4 ต่อไป

## 1.3) นิยามและคำศัพท์เทคนิค

เพื่อให้ผู้อ่านเกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงได้ให้คำศัพท์เทคนิคตามคำนิยามของ IEC ดังต่อไปนี้ คือ

แรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) คือ แรงดันทรานเซียนแบบไม่ซ้ำรอยคาบ (Aperiodic transient) ที่เจาะจงป้อนให้อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อการทดสอบการฉนวน มีลักษณะรูปคลื่นที่ค่าแรงดันเพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงค่ายอดแล้วจะลดค่าลงสู่ศูนย์ด้วยอัตราส่วนที่ช้ากว่าตอนเพิ่มรูปร่างแรงดันอิมพัลส์ โดยทั่วไปแทนได้ด้วยผลบวกของเอกซ์โปเนนเชียล 2 เทอม คือ

$$U(t) = A\{\exp.(-\alpha t) - \exp.(-\beta t)\} \quad \dots\dots (1.1)$$

เมื่อ  $U(t)$  = แรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลา  $t$

$A$  = ค่ากำหนดขนาดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $\alpha, \beta$  และ  $\tau$  หรือค่าคงที่เวลาที่ของรูปคลื่น เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า (Lightning impulse) และแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์ (Switching impulse) แรงดันทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างพื้นฐานที่เวลาช่วงหน้าคลื่น กล่าวคือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ามีเวลาช่วงหน้าคลื่นตั้งแต่หลายสิบถึงหลายพัน ไมโครวินาที ลักษณะแรงดันทั้งสองอาจแยกได้อีกลักษณะหนึ่ง โดยการพิจารณาช่วงเวลาทั้งหมด คือแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์จะมีช่วงเวลาทั้งหมดยาวนานกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า

การกำหนดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์กำหนดได้ด้วยชนิดชั่วของแรงดัน (ชั่วบวกหรือชั่วลบ) ค่ายอด (peak value) เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  และเวลาช่วงทางคลื่น  $T_2$  นอกจากนี้การใช้แรงดันอิมพัลส์ยังต้องระบุด้วยว่าเป็นรูปคลื่นเต็มหรือรูปคลื่นตัด ถ้าเป็นรูปคลื่นตัดต้องกำหนดเวลาช่วงคลื่นตัด  $T_c$  ด้วย

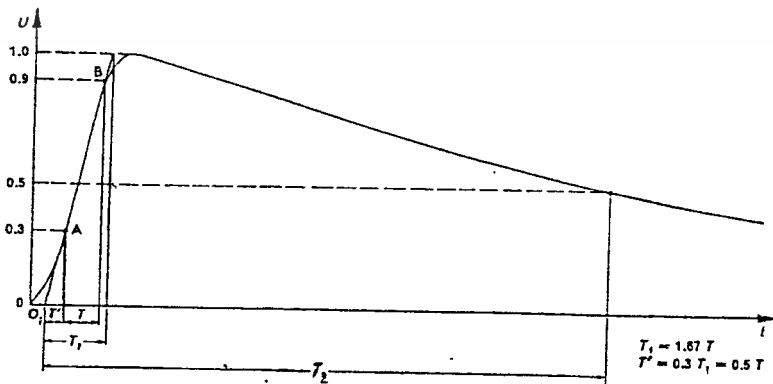
แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

- (1) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full lightning Impulse)
- (2) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped Lightning Impulse)

1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของรูปคลื่นถูกรบกวน เนื่องจากเกิดดีสชาร์จทำลาย (disruptive discharge) ดังรูป 1.1



รูปที่ 1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  (Front time)

เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ 1.67 ของช่วงเวลา  $T$  ระหว่างจุดที่อิมพัลส์มีค่า 30 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอด คือ จุด A และ B ดังในรูป 1.1 และ 1.2 ถ้ารูปคลื่นมีสัญญาณแกว่งซ้อนอยู่ด้วยให้ลากเส้นโค้งเฉลี่ยสัญญาณแกว่งเสียก่อนแล้วจึง ค่อยหาจุด A และจุด B

จุดเริ่มต้นเสมือน  $O_1$  (Virtual origin)

จุดเริ่มต้นเสมือน  $O_1$  ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ จุดซึ่งคิดเป็นเวลาห่างจาก จุด A ในรูป 1.1 และ 1.2 ไปข้างหน้าเท่ากับ  $0.3 T_1$  หรือคือ จุดตัดของแกนเวลากับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด A และ B สำหรับคลื่นแรงดันที่บันทึกโดยแกนเวลากวาดอย่างเชิงเส้น

เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  (Time to half value)

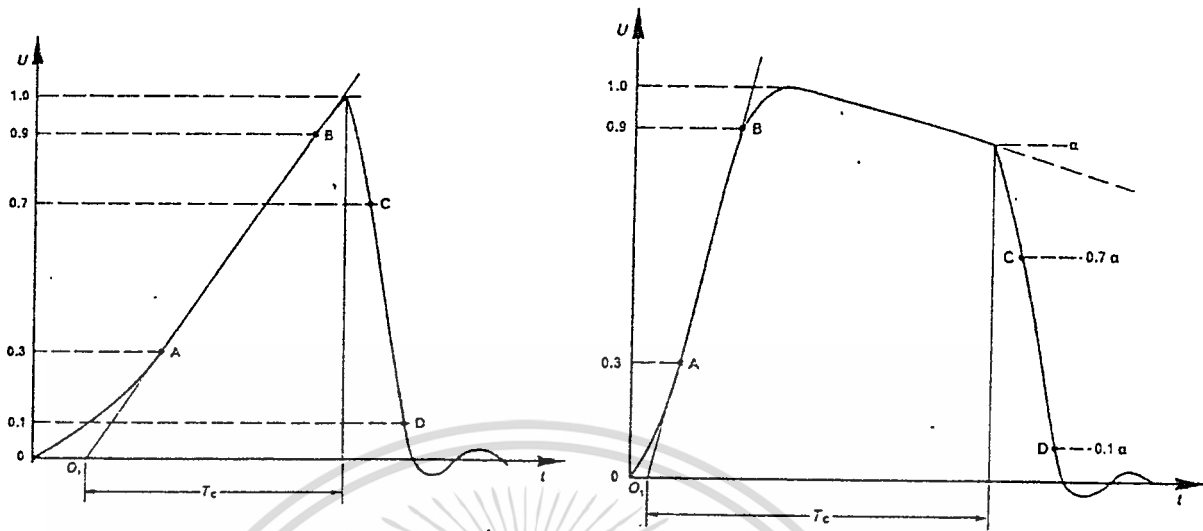
เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ ช่วงเวลาระหว่างจุด เริ่มต้นเสมือน  $O_1$  และจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางตอนหางของหางคลื่น (ดัง รูป 1.1)

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มมาตรฐาน (Standard lightning impulse)

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มมาตรฐาน คือ แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลา  $T_1/T_2$  เป็น 1.2/50 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นรูปคลื่นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ทั่ว ๆ ไป ตามกำหนดมาตรฐานสากล ไออีซี

## 2) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด คือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดดีส์ชาร์จ ทำลาย ทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่น ค่ายอด หรือส่วนหางของคลื่นก็ได้ ดูรูป 1.2



ก

ข

รูปที่ 1.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด

- ก. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น
- ข. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

ขณะที่คลื่นตัด (Instant of chopping)

ขณะที่คลื่นตัด คือ ขณะที่เริ่มเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น

แรงดันขณะที่คลื่นตัด (Voltage at the instant of chopping)

แรงดันขณะที่คลื่นตัด คือ แรงดันในขณะเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น

เวลาช่วงคลื่นตัด  $T_c$  (Time to chopping)

เวลาช่วงคลื่นตัด  $T_c$  คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน กับขณะที่คลื่นตัด

รูป 1.2)

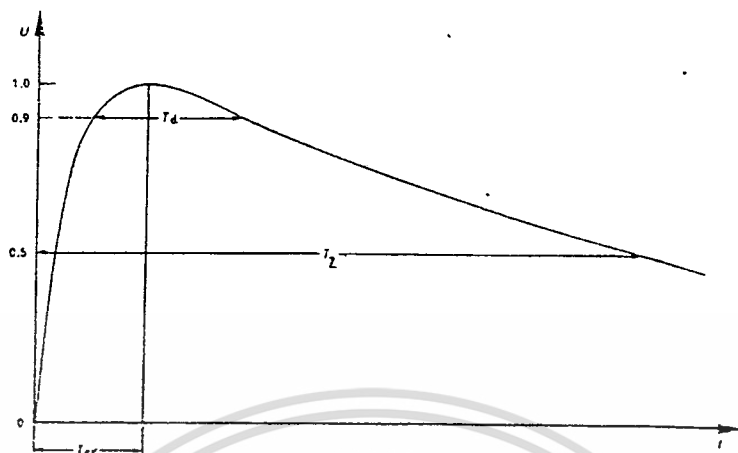
แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์รูปคลื่นเต็ม (Full switching impulse)

แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์รูปคลื่นเต็ม คือ แรงดันอิมพัลส์สวิทช์ซึ่งที่ไม่มีส่วนหนึ่งส่วน

ใดของรูปคลื่นถูกรบกวนเนื่องจาก เกิดดิสชาร์จทำลาย ดังรูป 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์รูปคลื่นเต็ม

เวลาถึงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์  $T_{cr}$  (Time to crest value of a switching impulse)

เวลาถึงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์ คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นจริงและจุดที่แรงดันเพิ่มขึ้น ไปจนถึงค่าสูงสุด (ดูรูป 1.3)

เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  ของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์ (Time to half value of a switching impulse)

เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  ของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์ คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มและจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางตอนหางของหางคลื่น (ดูรูป 1.3)

เวลาเหนือ 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์  $T_{90}$  (time above 90 percent of a switching impulse)

เวลาเหนือ 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์  $T_{90}$  คือช่วงเวลาในระหว่างแรงดันอิมพัลส์เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นและแรงดัน อิมพัลส์เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นและแรงดันอิมพัลส์เกิน 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงดันลดลง (ดูรูป 1.3)

แรงดันอิมพัลส์สวิทช์รูปคลื่นเต็มมาตรฐาน (Standard switching impulse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โฆษณาการค้า  
แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์คลื่นรูปเต็มมาตรฐาน คือ แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลา  $T_{cr}/T_2$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 250/2500 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นรูปคลื่นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทช์ ซึ่งตามกำหนดมาตรฐานสากลของ ไออีซี

หมายเหตุ การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดทำเฉพาะแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเท่านั้น

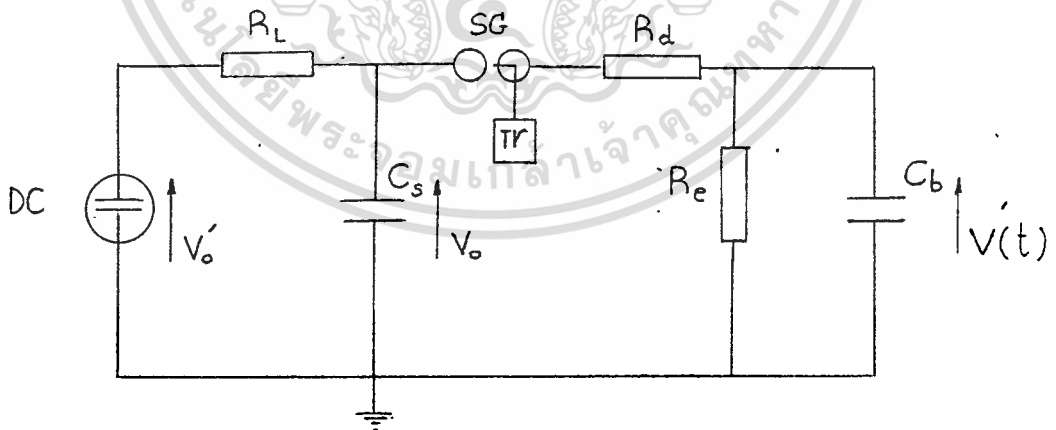
#### 1.4) วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพื้นฐาน (Basic Impulse Voltage Generator circuits)

แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจร Transient RC หรือ วงจร Transient RLC โดยทั่วไปแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นใช้กันมาก มักได้แก่วงจร Transient RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ จนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ ( $U = Q/C$ ) แล้วปล่อยให้คายประจุหรือดีสชาร์จผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการได้

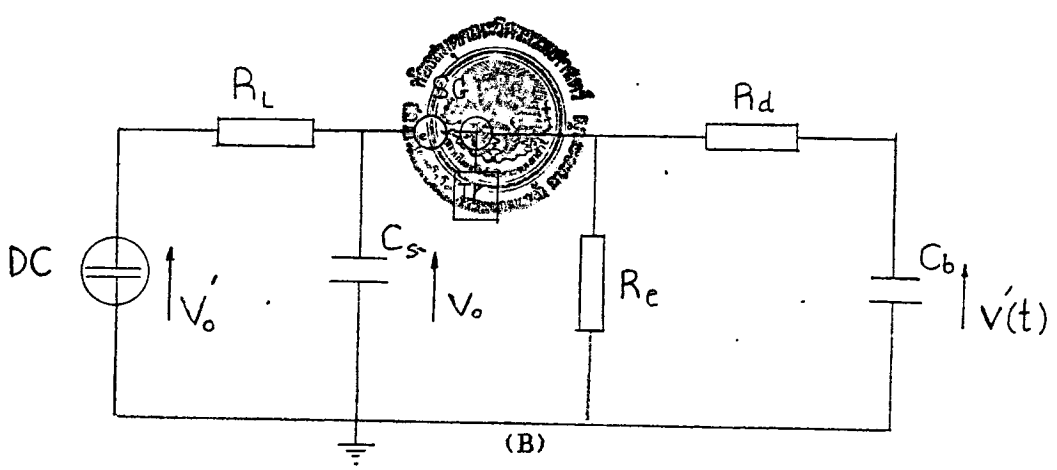
##### a) วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบดังแสดงในรูป 1.4

(A และ B)



(A)



รูปที่ 1.4 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในวงจรรูป A และ B

- $V_o'$  = แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- $V_o$  = แรงดันที่ต้องการ
- $R_L$  = ความต้านทานจำกัดกระแส
- $C_s$  = อิมพัลส์คาปาซิเตอร์
- $R_d$  = ความต้านทานหน่วง
- $R_e$  = ความต้านทานดีส์ชาร์จ
- $C_b$  = โหลดคาปาซิเตอร์
- $V'(t)$  = แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น
- SG = สปาร์กแกป
- Tr = สวิตช์หรือ ไท (trigger)

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร

แรงดันกระแสตรง  $V_o'$  เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับอิมพัลส์คาปาซิเตอร์  $C_s$  จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ  $V_o$  การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทานจำกัดกระแส  $R_L$  มีหน้าที่จำกัดไม่ให้กระแสที่อัดประจุให้กับ  $C_s$  สูงเกินไป ค่าแรงดันอัดประจุ  $V_o'$  นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์กแกป SG ที่ปรับได้ ทำให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ค่าสูงหรือต่ำได้ ในส่วนของสปาร์กแกป จะมีส่วนของสวิตช์หรือ ไท (trigger) ซึ่งมีหน้าที่ให้ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด และการเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินได้ด้วยความเร็ว คือใช้เวลาน้อยกว่า 100 ไมโครวินาที ค่าแรงดันที่ทำให้สปาร์กเมื่อกำหนดระยะห่างช่องสปาร์กแกป ค่าแรงดันอาจจะแตกต่างกันไปบ้างแต่ไม่มากนักประมาณน้อยกว่า 1% ถ้าหากปราศจากแผ่นล่อง ช่วงเวลาระหว่างการเกิดสปาร์กต่อเนื่องจะถี่หรือห่างขึ้นขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรง  $V_o'$  ที่ป้อนให้  $C_s$  ถ้า  $V_o'$  มีค่าสูงมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดสปาร์กง่ายหรือสปาร์กถี่ขึ้น เมื่อเกิดการสปาร์กที่ SG แล้ว แรงดันที่ต้องการ  $V_o$  จะตกคร่อม  $R_d$  และ  $C_b$  ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย  $C_b$  ความต้านทานหน่วง  $R_d$  จะเป็นตัวกำหนดการคายประจุในช่วงแรก จึงใช้เป็นตัวปรับเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงดันอิมพัลส์ ส่วนความต้านทาน  $R_o$  เป็นตัวควบคุมการคายประจุในช่วงหลังจึงใช้เป็นตัวปรับเวลาช่วงหลังคลื่น  $T_2$  ของแรงดันอิมพัลส์ ส่วนโหลดคาปาซิเตอร์  $C_b$  เป็นผลรวมของสเตรคาปาซิแตนซ์ทั้งหลายในวงจรกับค่าคาปาซิแตนซ์ที่ต่อเข้าไป เพื่อเป็นโหลดของการจัดแรงดันอิมพัลส์ และจะมีผลกระทบในการควบคุมเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  ด้วย ค่าคงตัวเวลาคายประจุของวงจร A เท่ากับ  $C_s (R_d + R_o)$  และวงจร B เท่ากับ  $(C_s R_o)$  เมื่อต้องการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที ในทางปฏิบัติอาจหาค่าองค์ประกอบของวงจรได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$T_1 = 2.96 R_d \frac{(C_b \cdot C_s)}{C_b + C_s}$$

$$T_2 = 0.73 R_o (C_b + C_s) \quad \dots (1.2)$$

$$C_s \text{ ควรจะ } \geq 10 C_b$$

ส่วนประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ คือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร } (\eta) = \frac{V_p}{V_o} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad \dots (1.3)$$

$$\text{สำหรับรูป B } \eta = \frac{C_s}{C_s + C_b} = \frac{1}{1 + (C_b/C_s)} \quad \dots (1.4)$$

$$\text{สำหรับรูป A } \eta = \left( \frac{C_s}{C_s + C_b} \right) \times \left( \frac{R_o}{R_d + R_o} \right)$$

$$= \left( \frac{1}{1 + C_b/C_s} \right) \times \left( \frac{1}{1 + R_d/R_o} \right) \quad \dots (1.5)$$

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์  $V(t)$
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด  $V_o$
- ค่าความจุไฟฟ้า  $C_s$
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่ออนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่าหรือแบบสวิตซ์ชิ่ง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL ตามมาตรฐานกำหนด ตามระบบแรงดันที่จะนำเอาไปใช้กับอุปกรณ์

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า  $C_u$  และแรงดันอัดประจุ  $V_o$  ซึ่งคำนวณหาได้จาก

$$W = 1/2 C_u V_o^2 = 1/2 C_u V_o^2 \times 10^{-9} \text{ KJ} \dots\dots(1.6)$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานอัดประจุ หน่วย KJ (กิโลจูล)

$C_u$  คือ ความจุไฟฟ้าอิมพัลส์ หน่วย PF (พิโคฟารัด)

#### b) วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น ประกอบด้วยวงจรอิมพัลส์พื้นฐานหลาย ๆ ชั้น มาต่อซ้อนกันตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's Circuit) คือให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์หลาย ๆ ตัวมาต่อขนานกันเพื่ออัดประจุ ดังรูป 1.5 เมื่อได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการแล้ว ให้ตัวเก็บประจุเหล่านี้ปล่อยประจุผ่านสปราร์กแกป ตัวเก็บประจุที่อัดประจุไว้จะต่อกันแบบอนุกรม จึงได้แรงดันเป็นทวีคูณของแต่ละชั้น วงจรของมาร์กซ์มักจะจัดให้สปราร์กแกปจัดหรือปรับระยะได้ และจะปรับตั้งให้สปราร์กแกปล่างมีระยะน้อยที่สุด เพื่อให้เริ่มเกิดสปราร์กก่อน และสปราร์กแกปถัดไปค่อยเกิดสปราร์กตามลำดับ วงจรของมาร์กซ์ที่จะพิจารณาเป็นแบบ 6 ชั้น โดยมาร์กซ์จัดวางตัวคาปาซิเตอร์อิมพัลส์หลาย ๆ ตัวในที่นี้ 6 ตัวไว้อย่างขนานกัน โดยถูกอัดประจุผ่านค่าความต้านทานจำกัดกระแส และปล่อยประจุอย่างอนุกรมให้บรรจุน้ำผ่านสปราร์กแกป SG

การทำงานของวงจรนี้จะเริ่มดังนี้คือ ในช่วงเวลาสุดท้ายที่คาปาซิเตอร์อัดประจุ จุด A, B, C, D, E และ F จะมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับศักดาไฟฟ้าของ D-C source กล่าวคือให้เป็น +V โวลต์ เมื่อเทียบกับจุดดิน และที่จุด G, H, I, K, L, M และ N จะมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับจุดดิน เริ่มแรกเมื่อ D-C source ป้อนแรงดันให้แก่วงจร จะทำให้  $SG_1$  เกิดการ breakdown และในขณะเดียวกัน  $SG_2, SG_3, SG_4, SG_5$  และ  $SG_6$  เกิดการ breakdown ขึ้นด้วยพร้อม ๆ กัน เมื่อ  $SG_1$  เกิดการ breakdown ก็จะทำให้ความต่างศักย์ที่จุด A เปลี่ยนจาก +V เป็น 0 โวลต์ และที่จุด H เกิดการเปลี่ยนระดับแรงดันจาก 0 โวลต์เป็น -V โวลต์ ถ้าเราไม่คิดค่าสเตรคาปาซิเตอร์ C ก็จะทำให้ศักดาไฟฟ้าบนจุด B ยังคงเป็น +V โวลต์ เมื่อ  $SG_2$  เกิดการสปราร์กแล้วจะได้ว่าความต่างศักย์ระหว่าง  $SG_2$  มีค่าเท่ากับ 2V โวลต์ และความต่างศักย์ส่วนนี้ จะทำให้เกิดการ breakdown ชั้นที่  $SG_2$  จากการ breakdown ของ  $SG_2$  ก็จะทำให้  $SG_3$  มีความต่างศักย์เท่ากับ 3V โวลต์ และการเกิด breakdown ก็จะทำเช่นไปเรื่อย ๆ จนถึง  $SG_6$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้กดแป้นเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใช้

ในที่สุดเราก็จะได้ศักดาไฟฟ้าที่จุด N มีค่าเท่ากับ  $-6V$  โวลต์ ถ้าสมมติเรามี N ขึ้น เราก็จะได้ ศักดาไฟฟ้าออกมามีค่าเป็น  $-NV$  โวลต์ ข้อสังเกตที่สำคัญก็คือ วงจรหลายชั้นของมารกซ์ แรงดัน ไฟฟ้าที่ออกมาจาก generator จะมีชั้วกลับทิศกับแรงดันอัดประจุที่ป้อนเข้าวงจร ในทางปฏิบัติ เราจะปรับตั้ง  $SG_1$  ให้เกิดการ breakdown ก่อน  $SG_2$  เล็กน้อย (ระยะแกป  $GS_1$  น้อยกว่า  $SG_2$  เล็กน้อย) มิเช่นนั้นจะไม่เกิดการทำงาน จาก Edward s, Husband s and Perry แสดงให้เห็นว่าการที่แรงดันตกคร่อม  $SG_2$  และ SG ที่อยู่ถัดไปข้างบนอย่างกระทันหัน หลังจากที  $SG_1$  เกิดการ breakdown แล้ว ที่เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ได้เนื่องจากมี สเตรคาปาซิแตนซ์  $C'$ ,  $C''$  และ  $C'''$  ในวงจร  $C'$  เกิดจากสนามไฟฟ้าระหว่างชั้นที่ใกล้กัน,  $C'''$  เช่นเดียวกับ  $C'$  แต่จะตกคร่อม 2 ชั้น ส่วน  $C''$  เกิดจากคาปาซิแตนซ์ของ SG เราอาจหาได้โดยสมมติให้ ความต้านทานเป็นเหมือนวงจรเปิด ไมคิด  $C'$  ระหว่างจุด H และ C เนื่องจาก  $C' < C_B$  เรา จะมาดูว่าจุด B จะมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าหรือน้อยกว่าเดิม ที่จุด B เราสมมติเป็นจุดกลางของคา ปาซิเตอร์โวลต์เตจดีโวลเตอร์ซึ่งมีค่าเป็น  $-V (C'' / C' + C'' / C''')$  ดังนั้นเมื่อจุด A เปลี่ยนแรงดันจาก  $+V$  เป็น  $0$  โวลต์ ทำให้จุด B มีศักดาเปลี่ยนจาก  $+V$  โวลต์เป็น  $V_B$  โดยที่  $V_B$  มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 & (+V) + \left\{ -V \left( \frac{C''}{C' + C' + C'''} \right) \right\} \\
 & = \frac{V (C' + C'' + C''')}{C' + C'' + C'''}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม  $SG_2$  จะกลายเป็น

$$\begin{aligned}
 V_{SG_2} & = -V - (+V_B) \\
 & = -V - V_B = -V \left\{ 1 + \frac{C' + C''}{C' + C'' + C'''} \right\}
 \end{aligned}$$

ถ้า  $C'' =$  ศูนย์,  $V_{SG_2}$  จะมีค่ามากที่สุดเป็น  $-2V$  แต่ค่า  $C''$  ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่ถ้า  $C'$  และ  $C'''$  เป็นศูนย์จะได้  $V_{SG_2}$  เท่ากับ  $-V$  การสปาร์กของ  $SG_2$  จะไม่เกิดขึ้น จะได้ว่าค่า สเตรคาปาซิแตนซ์ก็มีส่วนสำคัญในการปฏิบัติจริง ๆ ค่าของสเตรคาปาซิแตนซ์จะมีค่าต่ำประมาณ 10 PF เท่านั้น และมีค่าเวลาคงตัว (time const) สำหรับการคายประจุต่ำประมาณ  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-8}$  วินาที คาดว่าแรงดันที่ตกคร่อม  $SG_2$  จะเกิดในเวลาอันสั้น และเข้าสู่การ breakdown ในหลายสิบนานวินาที แรงดันทรานเซียนท์จะปรากฏสู่สปาร์กแกปอันต่อ ๆ ไป โดยถ้ามี N ชั้นก็ จะได้แรงดันที่ ได้รับมีค่าเท่ากับ  $-NV$  โวลต์ ถ้าเราป้อนแรงดันอัดประจุเป็น  $+V$  โวลต์

จากรูป 1.5 ตัวความต้านทานหน่วงสามารถต่อภายนอกได้ระหว่างเจนเนเรเตอร์กับโหลดเท่านั้น ( $R_d'$ ) หรืออาจจะอยู่ด้านนอกก็ได้ เราเรียกว่า ความต้านทานหน่วงภายนอก

จากรูป 1.6 ตัวความต้านทานหน่วงจะกระจายภายในวงจร โดยประโยชน์ที่เราได้เพื่อแบ่งเบาภาระของความต้านทานหน่วงภายนอก ตัวความต้านทานหน่วงภายใน ( $R_d'$ ) จะต่ออนุกรมระหว่าง  $C_u'$  กับ SG ในแต่ละชั้น ถ้าตัวความต้านทานหน่วงต่อในวงจรจะทำให้เกิดการ damposcillations จากค่าอินดักแตนซ์และค่า capacitance ของโหลดภายนอก ดังนั้นการที่เราต่อความต้านทานหน่วงภายนอกจะช่วยลดการ oscillation และการที่เราต่อความต้านทานหน่วงภายในเพื่อป้องกันการเกิด disruptive discharge ซึ่งถือว่าเป็นการลดการเกิด oscillation ภายในด้วย ค่าความต้านทานจำกัดกระแส  $R_L'$  จะมีขนาดใหญ่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ  $R_d'$  และ  $R_u'$  โดยที่  $R_u'$  จะเป็นตัวควบคุมเวลาทางคลื่น วงจรตามรูปที่ 1.6 จะมีประสิทธิภาพดีกว่ารูป 1.5

จากรูป 1.6 เราลดรูปเพื่อเป็น Single stage ดังรูป 1.4 (B) จะได้ total  $C_u$  หาได้จาก

$$1/C_u = \sum_{n=1}^n 1/C_u'$$

และ ความต้านทานหน่วงรวมหาได้จาก

$$R_d = R_d' + \sum_{n=1}^n R_d'$$

$$\approx R_d'$$

ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า  $R_d'' = 0$

และ ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตซ์ซิ่ง  $R_d'' \gg R_d'$

ความต้านทานดีส์ชาร์จรวมหาได้จาก

$$R_u = NR_u' = \sum_{n=1}^n R_u' \text{ เมื่อไม่คิด } R_L' \text{ ด้วย}$$

ซึ่งโดยปกติจากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_o = \frac{(n-1) R_o' + (n-1) R_L'}{(n-1) (R_o' + R_L')} + R_o'$$

โดยที่  $R_L' \gg R_o'$  จะได้  $R_o = nR_o'$

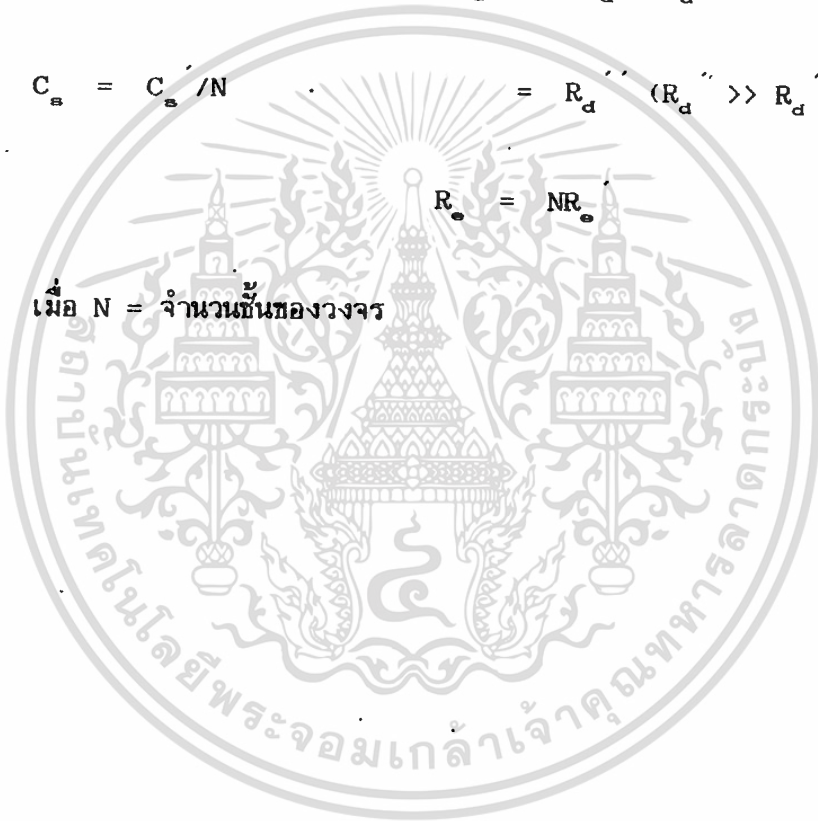
สรุป ถ้าคิดเทียบให้เป็นวงจรหนึ่งเดียวตามรูป 1.4 (B)

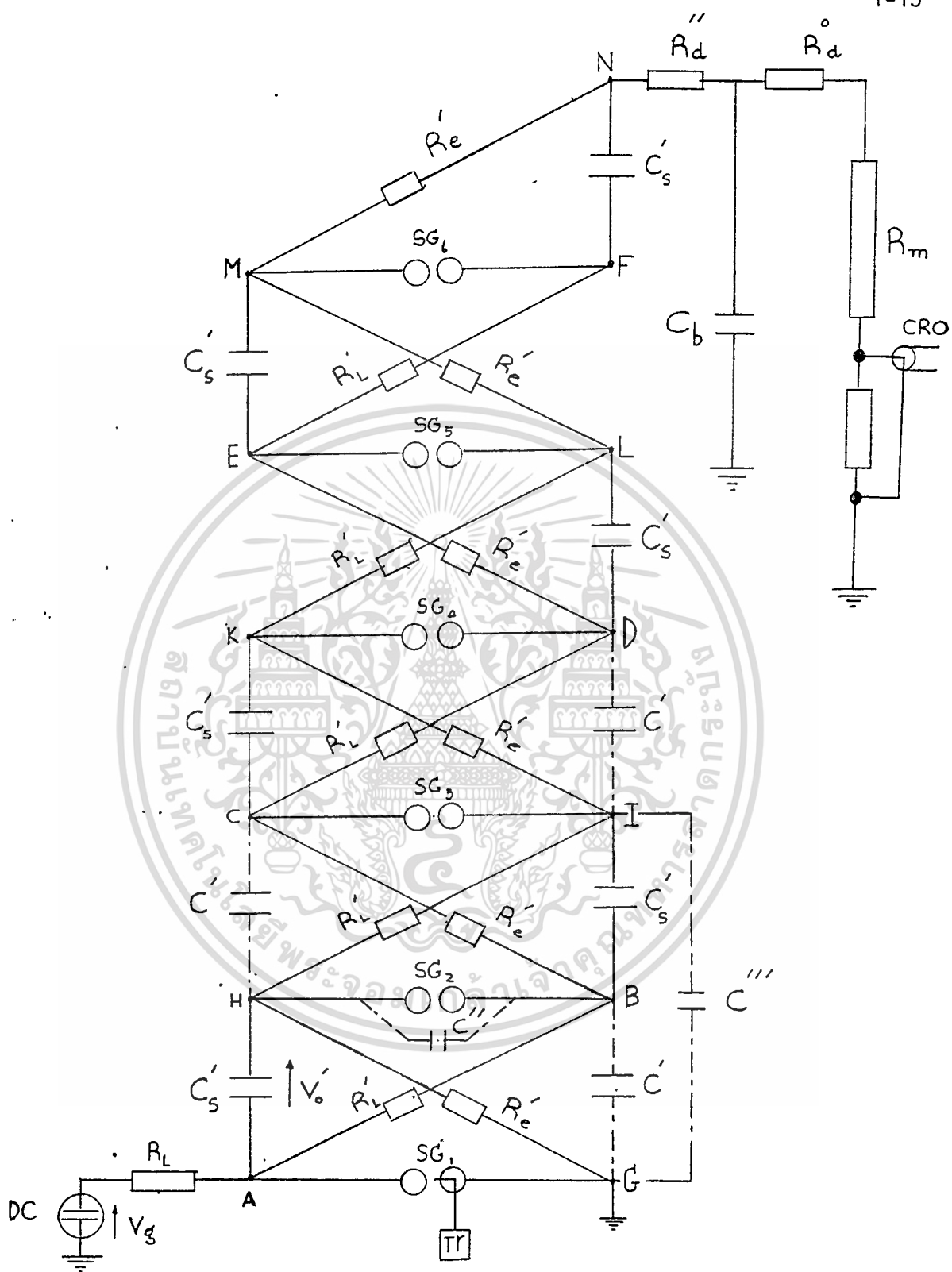
$$V_o = NV_o' \quad R_d = NR_d' \quad (R_d'' = 0)$$

$$C_{in} = C_{in}' / N = R_d' \quad (R_d'' \gg R_d')$$

$$R_o = NR_o'$$

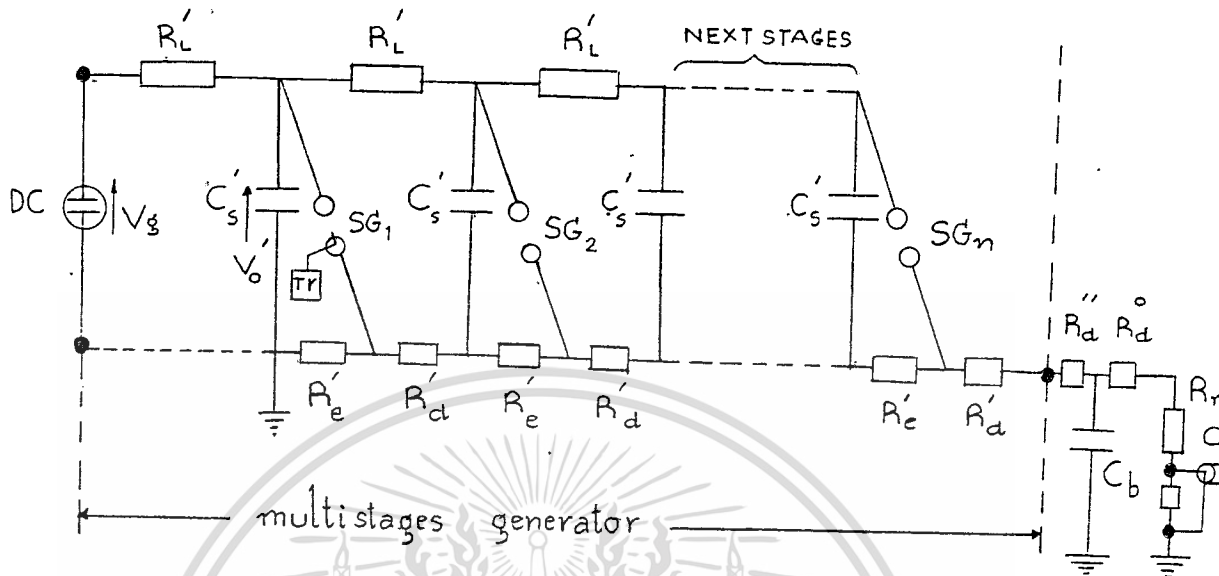
เมื่อ  $N =$  จำนวนชั้นของวงจร





รูปที่ 1.5 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบมาร์กซ์ 6 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้นแบบที่มีความต้านทานหน่วงภายในและภายนอก

ความหมายในวงจรรูป 1.5 และรูป 1.6

- $V_g$  = แรงดันอัดประจุกระแสตรง  
 $V_o$  = แรงดันอัดประจุต่อขั้น  
 $R'_L$  = ความต้านจำกัดกระแส  
 $R'_d$  = ความต้านทานหน่วงภายในต่อขั้น  
 $R'_d$  = ความต้านทานหน่วงภายนอก  
 $R'_d$  = ความต้านทานหน่วงของโวลเตจดีไวเดอร์  
 $R_m$  = โวลเตจดีไวเดอร์  
 $Tr$  = ทริกเกอร์  
 $SG$  = สปรังก์แกป  
 $R'_e$  = ความต้านทานดีสชาร์จต่อขั้น  
 $C'_s$  = อิมพัลส์คาปาซิเตอร์ต่อขั้น  
 $C_b$  = โหลดคาปาซิเตอร์

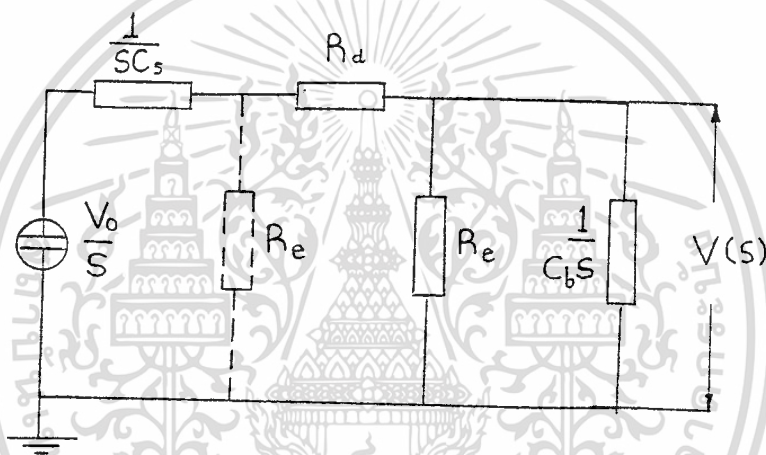
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

#### 2.1) การแปรผันของแรงดันในเทอมของเวลา

อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ ดังในรูปที่ 1.5 จากวงจรพื้นฐานรูป (A) เราจะแปลงรูปวงจรเสียใหม่ เพื่อจะหาความสัมพันธ์ของเอาต์พุตโวลต์เตจในเทอมของเวลา โดยอาศัยลาปลาซ ทรานสฟอร์ม (Laplace Transform) โดยวงจรที่เราแปลงเรียกว่า "วงจรทรานสฟอร์ม" (Transform circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรทรานสฟอร์ม (Transform circuit)

จากรูปที่ 2.1 เราจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ดังนี้

- 1 ที่เวลา  $t < 0$  ;  $C_b$  จะถูกอัดประจุจนกระทั่งถึงระดับแรงดันที่ต้องการ  $V_0$  และ
- 2 ที่เวลา  $t > 0$  ;  $C_b$  จะคายประจุและต่อโดยตรงเข้ากับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

พิจารณาวงจรพื้นฐานรูป 1.5 (A) จะได้ว่าเอาต์พุตโวลต์เตจ จะมีค่าเท่ากับ

$$V(S) = \frac{V_0}{S} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

โดยที่  $Z_1 = \frac{1}{SC_s} + R_d$  และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $SC_s$  ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_2 = \frac{R_o / C_b S}{R_o + \frac{1}{C_b S}}$$

แทนค่า  $Z_1$  และ  $Z_2$  จะได้

$$\begin{aligned} V(S) &= \frac{R_o / (R_o C_b S + 1)}{R_d + 1/C_s S + R_o / (R_o C_b S + 1)} \cdot V_o / S \\ &= \frac{R_o}{(R_d + 1/C_s S) (R_o C_b S + 1) + R_o} \cdot V_o / S \\ &= \frac{R_o}{(R_d R_o C_b S) + 1/C_s S + R_o C_b / C_s + R_d + R_o} \cdot V_o / S \\ &= \frac{1}{(R_d C_b S + \frac{1}{C_s S R_o} + \frac{C_b}{C_s} + \frac{R_d}{R_o} + 1)} \cdot V_o / S \end{aligned}$$

$$V(S) = \frac{V_o}{R_d C_b} \cdot \frac{1}{S^2 + (1/R_d C_s + 1/R_o C_b + 1/R_d C_b) S + \frac{1}{R_d R_o C_s C_b}}$$

หรือ  $V(S) = \frac{V_o}{k} \frac{1}{S^2 + as + b}$  (2.1)

ซึ่งค่า  $a = \left( \frac{1}{R_d C_s} + \frac{1}{R_d C_b} + \frac{1}{R_o C_b} \right)$  (2.2)

$$b = \left( \frac{1}{R_d R_o C_s C_b} \right)$$
 (2.3)

และ  $k = R_d C_b$  (2.4)

แต่ถ้าเราพิจารณาจากรูปที่ 1.5 (B) จะได้ค่า  $V(S)$  ออกมาเหมือนกับสมการที่ 2.1 แต่ค่า  $a, b, k$  จะเป็นดังนี้คือ

$$a = \left( \frac{1}{R_d C_s} + \frac{1}{R_d C_b} + \frac{1}{R_o C_s} \right)$$
 (2.2b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \left( \frac{1}{R_d R_o C_s C_b} \right)$$

) เหมือนสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

และ  $k = R_d C_b$

ต่อมาเราจะมาหา เอาท์พุทโวลต์เตจในเทอมของเวลา,  $V(t)$  โดยพิจารณาสมการ 2.1 เมื่อค่า  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  คือ รากของสมการ  $S^2 + as + b = 0$  จะได้

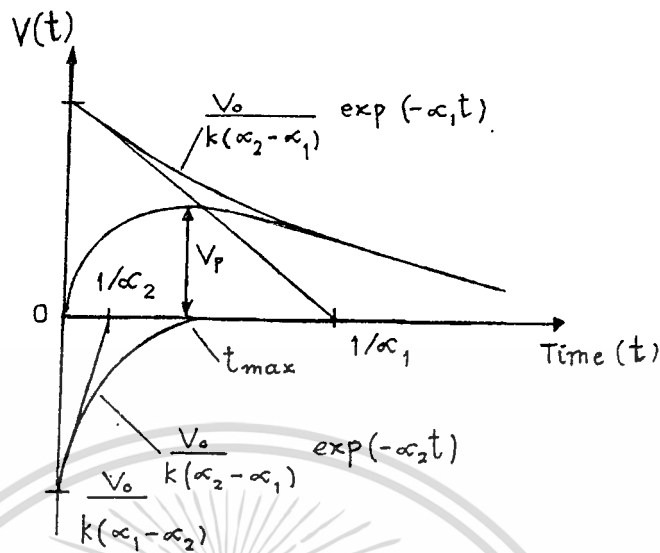
$$\alpha_1, \alpha_2 = a/2 \mp \sqrt{(a/2)^2 - b} \quad (2.5)$$

สำหรับวงจรพื้นฐานกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปที่ 1.5 และจากตารางการแทนฟอร์ม จะได้สมการเอาท์พุทโวลต์เตจในเทอมของเวลาดังนี้คือ

$$V(t) = V_o/k \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (2.6)$$

โดยค่า  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  ดูจากสมการ 2.5

จากสมการ 2.6 เราจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบไปด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (Time constant) เท่ากับ  $1/\alpha_1$  และ  $1/\alpha_2$ , ( $1/\alpha_1 > 1/\alpha_2$ ) ดังภาพสเก็ทในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแสดงรูปคลื่นอิมพัลส์และองค์ประกอบตามวงจรรูปที่ 1.5

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและหลังคลื่น  $T_1$  และ  $T_2$  ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา  $1/\alpha_1$  และ  $1/\alpha_2$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของ  $T_1/T_2$  อันเป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า  $T_1$  และ  $T_2$  อาจหาได้ดังนี้

$$T_1 = k_2/\alpha_2 ; T_2 = k_1/\alpha_1$$

ค่าแฟคเตอร์  $k_1$  และ  $k_2$  สำหรับรูปคลื่นต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานคือ

$T_{cr}/T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	$T_1/T_2$ ( $\mu\text{sec}$ )	$k_1$	$k_2$	$1/\alpha_1$ ( $\mu\text{sec}$ )	$1/\alpha_2$ ( $\mu\text{sec}$ )
-	1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
-	1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
-	1.2/200	0.70	3.15	286	0.381
250/2500	-	0.79	4	3155	62.5
-	250/2500	0.87	2.41	2875	104

## 2.2) การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร

เมื่อเราทราบว่าจะต้องสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นได้ กำหนดด้วยค่า  $T_1$  และ  $T_2$  ปรกติเราจะเริ่มต้นมาจากค่าความจุไฟฟ้าไหลด  $C_b$  ก่อนเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_s$  ให้สอดคล้องกับ  $C_b$  กล่าวคือ  $C_s$  จะเป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะถ่ายทอดให้กับไหลดได้ ดังนั้นเมื่อทราบค่า  $C_b$  และ  $C_s$  แล้ว องค์ประกอบที่เหลือที่ต้องคำนวณได้แก่ ค่าความต้านทาน  $R_d$  และค่าความต้านทาน  $R_s$  ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับวงจรพื้นฐานรูป 1.5 (A) จะได้

$$R_d = \frac{1}{2C_s} \left[ (1/\alpha_1 + 1/\alpha_2) - \sqrt{(1/\alpha_1 + 1/\alpha_2)^2 - 4(C_s + C_b)} \right] \frac{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_b}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_b} \quad (2.7)$$

$$R_s = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left[ (1/\alpha_1 + 1/\alpha_2) + \sqrt{(1/\alpha_1 + 1/\alpha_2)^2 - 4(C_s + C_b)} \right] \frac{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_b}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_b} \quad (2.8)$$

สำหรับวงจรพื้นฐานรูป 1.5 (B) จะได้

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left[ (1/\alpha_1 + 1/\alpha_2) - \sqrt{(1/\alpha_1 + 1/\alpha_2)^2 - 4(C_s + C_b)} \right] \frac{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_s}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_s} \quad (2.9)$$

$$R_s = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left[ (1/\alpha_1 + 1/\alpha_2) + \sqrt{(1/\alpha_1 + 1/\alpha_2)^2 - 4(C_s + C_b)} \right] \frac{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_s}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_s} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3) ประสิทธิภาพของวงจร ; $\eta$

เมื่อเรากล่าวถึง ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ต่อค่าแรงดันอัดประจุ ปรกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ทั้ง 2 วงจร (คือทั้งวงจร A และ B ในรูปที่ 1.5)

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร ; } \eta = V_p / V_o \quad (2.11)$$

เมื่อ  $V_p$  คือ ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์  
 $V_o$  คือ แรงดันอัดประจุให้กับ  $C$

ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์คำนวณได้จากสมการแรงดันอิมพัลส์ สมการที่ 2.6 โดยการหา  $t_{max}$  จาก  $dV(t)/dt = 0$

จะได้

$$-\alpha_1 \exp(-\alpha_1 t_{max}) + \alpha_2 \exp(-\alpha_2 t_{max}) = 0$$

$\therefore$

$$t_{max} = \frac{\ln(\alpha_2 / \alpha_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} = t_m \quad (2.12)$$

แทนค่าในสมการที่ 2.6 จะได้

$$V_p = V_o / k \frac{1}{(\alpha_1 - \alpha_2)} [\exp(-\alpha_1 t_m) - \exp(-\alpha_2 t_m)] \quad (2.12)$$

และทำให้เราได้ว่าค่าประสิทธิภาพของวงจรสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาดังนี้ คือ

$$\eta = \frac{\alpha_2 / \alpha_1 \frac{-((\alpha_1 / \alpha_2 - \alpha_1))}{k(\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_2 / \alpha_1) \frac{-((\alpha_2 / \alpha_2 - \alpha_1))}{k(\alpha_2 - \alpha_1)}}{k(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.13)$$

และจากสมการที่ 2.5 จะได้

$$\alpha_1 \cdot \alpha_1 = b$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = a$$

เราแทนค่า  $a$  และ  $b$  จากสมการ (2.2b) เพื่อหาค่า  $k = R_d C_b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะได้ว่า } k = \frac{1/2(\alpha_2 + \alpha_1)}{\alpha_2 \cdot \alpha_1} \left[ 1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha_2 \cdot \alpha_1 (1 + C_b/C_s)}{(\alpha_2 + \alpha_1)^2}} \right] \quad (2.14)$$

สำหรับ  $C_b < C_s$  จะใช้กันมากในทางปฏิบัติ และ  $\alpha_2 \gg \alpha_1$

$$\begin{aligned} &\text{จะทำให้ได้ค่า } k \text{ มีค่าประมาณ } \frac{1 + (C_b/C_s)}{(\alpha_2 + \alpha_1)} \\ k &\simeq \frac{1 + (C_b/C_s)}{(\alpha_2 + \alpha_1)} \quad (2.15) \end{aligned}$$

แทนค่า  $k$  ในสมการ 2.13 จะได้

$$\eta = \frac{C_s}{(C_s + C_b)} = \frac{1}{1 + (C_b/C_s)} \quad (2.16)$$

สมการที่ 2.16 นี้ คือประสิทธิภาพของวงจรมันฐานรูปที่ 15.B เป็นที่สังเกตว่า วงจรมันฐานต้องมี  $\alpha_2 \gg \alpha_1$  และถ้าค่า  $C_b/C_s$  มีค่าใกล้เคียงประสิทธิภาพของวงจรมันฐานจะมีค่ามาก และทำให้เราสรุปได้ว่าค่า  $C_s$  ควรจะมีค่ามากกว่า  $C_b$

ส่วนวงจรมันฐานรูปที่ 15.A ประสิทธิภาพจะมีค่าประมาณเท่ากับ

$$\eta \simeq \frac{C_s}{C_s + C_b} \cdot \frac{R_o}{R_d + R_o} = \frac{1}{(1 + C_b/C_s)} \cdot \frac{1}{(1 + R_d/R_o)} \quad (2.17)$$

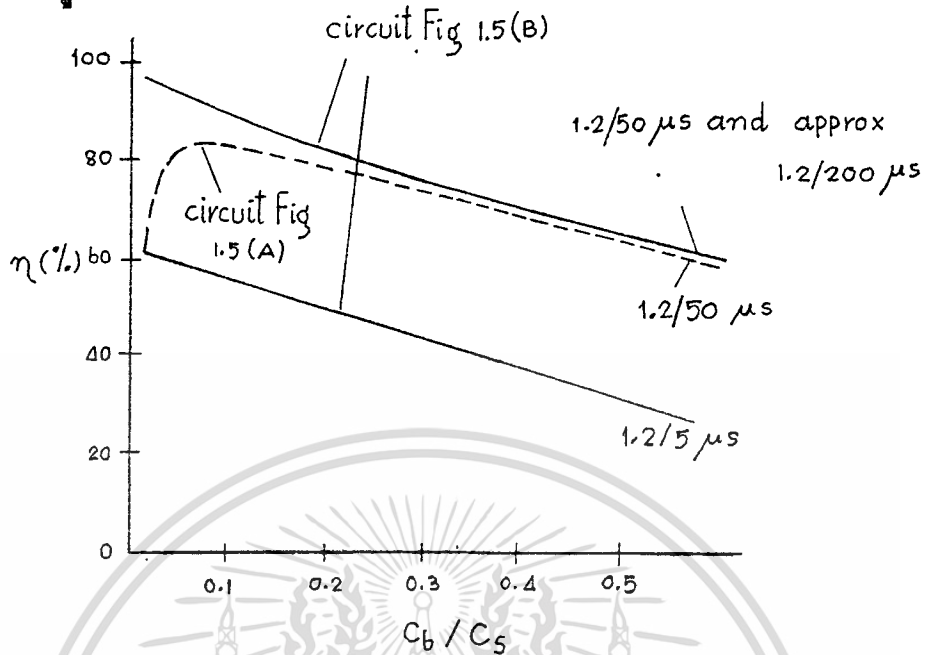
โดยการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรมันฐานจากสมการที่ 2.13 และอาศัยความสัมพันธ์อัตราส่วน  $R_d/R_o = f(C_b/C_s)$  ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $C_b/C_s$  ลดลง และอาศัยข้อสมมุติที่ว่า  $\alpha_2 \gg \alpha_1$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ 2.17 กับสมการ 2.16 จะได้ว่า ประสิทธิภาพของวงจรมันฐานรูปที่ 1.5B จะลดลง ตามอัตราส่วน

$R_d/R_o$  ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของคลื่นด้วย เมื่อเราไม่พิจารณาอัตราส่วน  $C_b/C_s$  ในขณะพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรมันฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่แรงดันอินพุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ประสิทธิภาพของวงจรอินพุต ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $C_b/C_s$  มีค่าดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอินพุต

#### 2.4) คำนวณหาค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงเวลาลังคลื่น $T_1$ และ $T_2$

ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบวงจรต่าง ๆ ของวงจรอินพุต ถ้าจำเป็นต้องการหาหรือทราบเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงเวลาลังคลื่น อาจจะคำนวณค่าโดยประมาณได้จาก  $k_1$  และ  $k_2$  ดังนี้

เวลา	วงจร A	วงจร B
$T_1$	$k_2 \frac{R_d R_o \cdot C_b C_s}{(R_d + R_o)(C_b + C_s)}$	$k_2 R_d \cdot \frac{(C_b C_s)}{(C_b + C_s)}$
$T_2$	$k_1 (R_d + R_o)(C_b + C_s)$	$k_1 R_o \cdot (C_b + C_s)$

สำหรับกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  จะได้

$$T_1 = 2.96 R_d C_b D_u$$

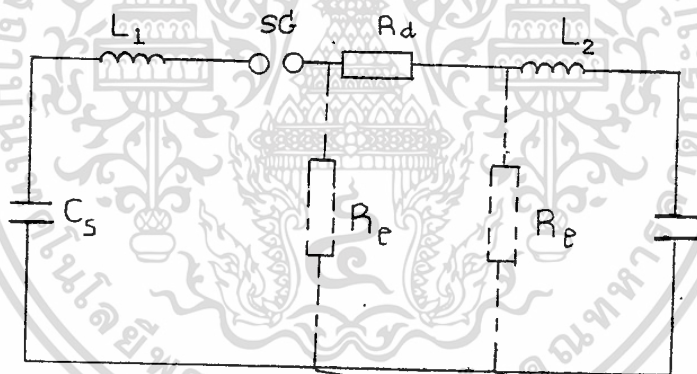
$$(C_b + C_u)$$

$$T_2 = 0.73 R_u (C_b + C_u)$$

โดย  $C_u$  ควรจะ  $\geq 10 C_b$

## 2.5) วงจรคำนวณค่าความต้านทานทางตรง

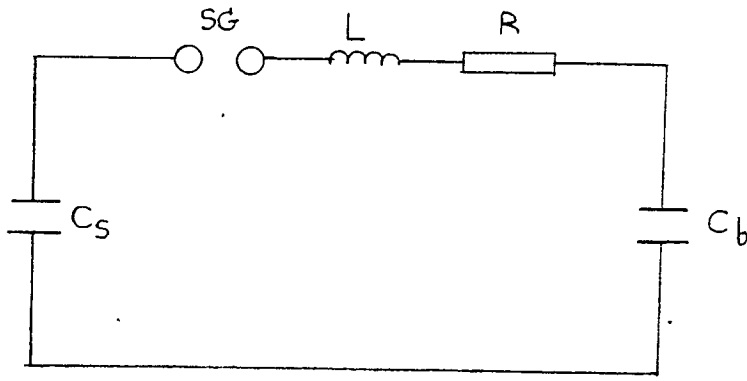
การคำนวณที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นการคำนวณโดยถือ ว่าวงจรที่ใช้คำนวณ ไข่มุมค่าความเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะไม่แตกต่างไปจากทฤษฎี โดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่น และค่ายอดแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำ ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำให้เกิดออสซิลเลชันได้ เมื่อจัดคลื่นระลอกซ้อนจึงจำเป็นต้องใส่ความต้านทานทางตรง  $R_d$  พิจารณารูปที่ 2.4 ให้ความเหนี่ยวนำต่ออันดับกับความต้านทานทางตรง  $R_u$  และสมมติว่าผลของ  $R_u$  น้อยมาก ( $R_u = \alpha$ )



Alternative Positions of  $R_e$

รูปที่ 2.4 วงจรแสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของ  $R_u$  และผลของค่าความเหนี่ยวนำในวงจร

เมื่อเราไม่พิจารณาผลของ  $R_u$  เราสามารถรวมค่าความเหนี่ยวนำในวงจรดังรูปที่ 2.5 เพื่อจะหาค่า  $R_u$  ที่ทำให้วงจรไม่เกิดการออสซิลเลชัน



รูปที่ 2.5 วงจรเพื่อคำนวณหาความต้านทานหน่วง

เราจะได้ว่า ความต้านทาน  $R_d$  ที่ใส่เข้าไปควรจะมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ  $R$  คือ

$$R_d \geq R = 2 \sqrt{L/C} \quad \text{โดยที่} \quad 1/c = 1/C_s + 1/C_b$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### องค์ประกอบของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

##### 3.1) บทนำ

องค์ประกอบของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เราสามารถแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ตามหน้าที่การทำงานของแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้ คือ

- 1) ชุดสร้างแรงดันกระแสตรง (DC charging set)
- 2) ตัวความต้านทานจำกัดกระแส (Charging resistor)
- 3) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (Impulse Capacitance หรือ Discharge capacitance)
- 4) ตัวความต้านทานปรับรูปคลื่น (Wave shaping resistors)
- 5) โหลดความจุไฟฟ้า (Load capacitance)
- 6) สปาร์กแกป (Spark gaps) และ ไทริสทริค (trigger)
- 7) โวลต์เดจดีไวเดอร์ (Voltage divider)

การอธิบายและการนิยามจะกล่าวถึงเฉพาะหัวข้อ (1) ถึง (5) และ (7) ส่วนหัวข้อที่ (6) เกี่ยวกับเรื่อง สปาร์กแกป และ ไทริสทริคจะนำไปเขียนลงในบทที่ 4 ซึ่งจะกล่าวต่อไป

##### 3.2) ชุดสร้างแรงดันกระแสตรง (DC charging set)

องค์ประกอบของชุดสร้างแรงดันกระแสตรง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. หม้อแปลงทดสอบ (test transformer) และ
2. เรกติไฟเออร์ (rectifier)

ต่อไปจะกล่าวถึงแต่ละส่วนพอสังเขปดังนี้

##### 3.2.1) หม้อแปลงทดสอบ

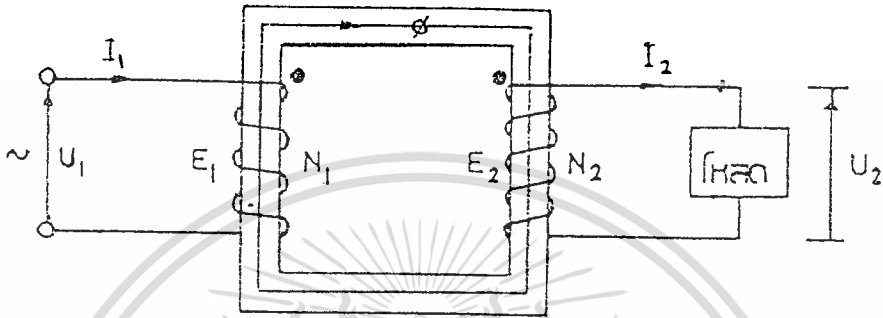
ก) ทฤษฎี, หลักการทำงาน และวงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบ โดยทั่วไปจะเป็นเฟสเดียวและมีความถี่ต่ำ ดังนั้น

หลักการทํางานและโครงสร้างต่าง ๆ จึงคล้ายคลึงกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไป แตกต่างกันไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงที่ความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็กที่ใช้มีค่าต่ำกว่า เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฮาร์โมนิกในแรงดัน ขนาดจะเล็กห่อหุ้มมิดชิด การฉนวนทางด้านแรงดันสูงจะต้องดีมาก

หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็ก ชุดหนึ่งป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า อีกชุดหนึ่งสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าออก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ขดลวด

- $\Phi$  = เส้นสนามแม่เหล็ก
- $U_1$  = แรงดันป้อนเข้า
- $I_1$  = กระแสป้อนเข้า
- $E_1$  = แรงดันเหนี่ยวนำป้อนเข้า
- $N_1$  = จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า
- $N_2$  = จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออก
- $U_2$  = แรงดันจ่ายออก
- $I_2$  = กระแสจ่ายออก
- $E_2$  = แรงดันเหนี่ยวนำจ่ายออก

เมื่อป้อนแรงดันเข้าทางด้านขดลวดป้อนกำลังเข้า ทำให้เกิดเส้นสนามแม่เหล็กมีรูปคลื่นเป็นไซน์

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t$$

จะได้ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น มีค่าดังนี้

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_1 = N_1 \omega \Phi_m \sin \omega t$$

และ ได้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำยังผลเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_1 = 4.44fN_1\phi_m$$

$$= 4.44fN_1B_m A$$

- เมื่อ  $w = 2\pi f$
- $f$  เป็นความถี่ของคลื่นแรงดัน
- $\phi_m$  เป็นค่าสูงสุดของเส้นสนามแม่เหล็ก =  $B_m A$
- $B_m$  เป็นความหนาแน่นสูงสุดของเส้นสนามแม่เหล็ก
- $A$  เป็นพื้นที่ภาคตัดของแกนเหล็ก

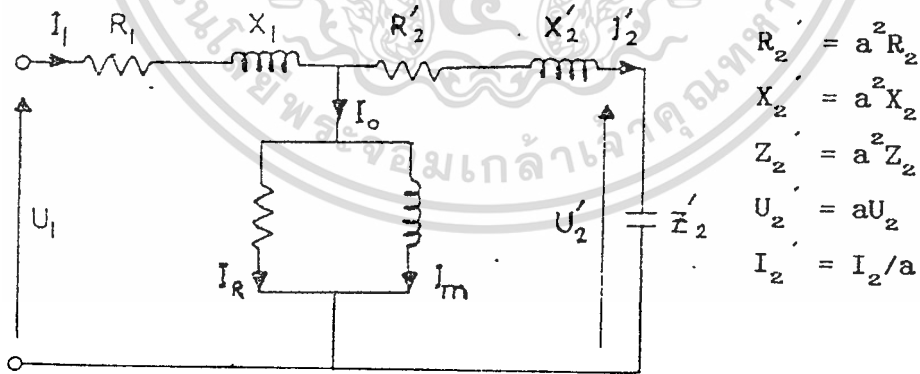
เส้นสนามแม่เหล็กอันเดียวกันนี้ เห็นยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดชุดที่ 2 มีค่าดังต่อไปนี้

$$E_2 = 4.44fN_2\phi_m$$

จะได้อัตราส่วนแรงดันเห็นยวนำตามอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทั้งสองด้าน คือ

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a$$

วงจรสมมูลของหม้อแปลง เมื่อคิดเทียบทางด้านป้อนเข้าจะมีวงจรดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงคิดเทียบทางด้านป้อนเข้า

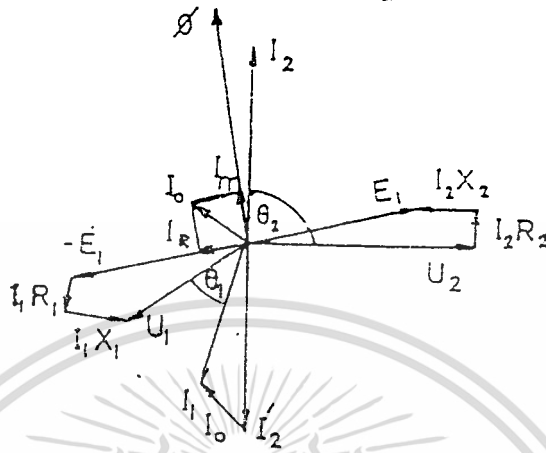
$I_0$  คือ กระแสป้อนเข้าขณะที่ไม่มีโหลด

$I_m$  คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

$I_x$  คือ กระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดของหม้อแปลงทดสอบ จะเป็นชนิดกะแปซิทีฟ ดังนั้นสามารถเขียนเฟสเซอร์ ไดอะแกรมขณะมีโหลดได้ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบมีโหลดเป็นกะแปซิทีฟ

$\text{Cose}_1 =$  เฟาเวอร์แฟกเตอร์ของ โหลดด้านป้อนกำลัง ไฟฟ้าเข้า

$\text{Cose}_2 =$  เฟาเวอร์แฟกเตอร์ของ โหลดด้านจ่ายกำลัง ไฟฟ้าออก

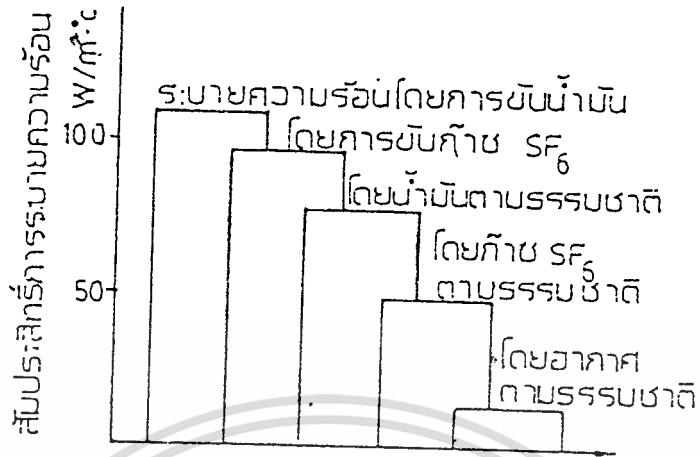
ข) การจนวนและ โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบ

การจนวนในหม้อแปลงทดสอบ ทำได้หลายวิธีด้วยกัน คือ จนวนแห้ง ใช้สารสังเคราะห์ เช่น อีพอกซี หล่อหุ้มขดลวดไว้ ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน มีความแข็งแรงและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ข้อเสียตรงที่ราคาแพง และการระบายความร้อนได้น้อยกว่าจนวนน้ำมันและจนวนเหลว

- จนวนก๊าซ ปัจจุบันที่ใช้กันอยู่คือ ก๊าซ SF<sub>6</sub> ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้อุณหภูมิขึ้น เป็นก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น เป็นก๊าซที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่าก๊าซอื่น ๆ เช่น N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ที่ความดันเท่ากัน แรงดันเบรกดาวมีค่าสูงกว่าอากาศ 2-3 เท่า และค่าแรงดันเบรกดาวจะสูงขึ้นตามความดัน มีข้อเสียตรงที่การระบายความร้อนได้น้อยกว่าจนวนเหลว และรั่วซึมได้ง่ายกว่า

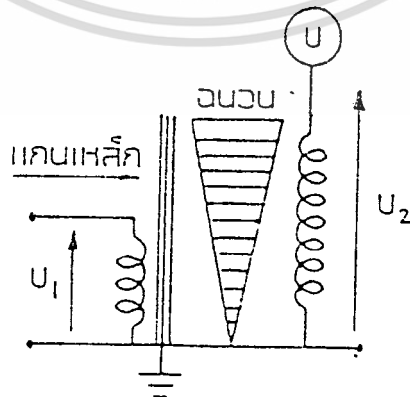
- จนวนเหลว จนวนเหลวนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด คือ น้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติระบายความร้อนได้ดี (ดูการเปรียบเทียบการระบายความร้อนของเหลวและก๊าซในรูปที่ 3.4)

จุดวบไฟสูง มีความหนืดต่ำ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อมีการกรองให้สะอาด



รูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของฉนวนต่าง ๆ

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง การฉนวนถือเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง แรงดันที่ไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบเท็มขัดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ เช่น อีพอกซี ส่วนหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงกว่านี้ การฉนวนของขดลวดจะเป็นแบบกระดาษ และใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเทรกซิมระบายความร้อน ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้อุณหภูมิมีค่าสูงสุดต่อเนื่องกันไม่เกิน 105°C (class A) โดยทั่วไปแกนเหล็กจะต่อกับฝาโลหะด้านล่างของตัวถัง ฉะนั้นขดลวดแรงดันต่ำจะพันติดแกนเหล็ก ส่วนขดลวดแรงดันสูงพันกับขดลวดแรงดันต่ำ ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงจะอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น นั่นคือ การฉนวนในชั้นแรงดันสูงจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การฉนวนในหม้อแปลงทดสอบที่แกนเหล็กต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- แรงดันลัดวงจร  $\epsilon_{sc} \%$
- ความถี่ และรูปคลื่นแรงดัน
- อุณหภูมิเพิ่มหรือ Insulation class
- ลักษณะการฉนวนและโครงสร้าง

กระแสจ่ายออก  $I_2$  และกำลังไฟฟ้า  $S$  สามารถคำนวณหาได้ ถ้าหากทราบความจุไฟฟ้าของโหลดทดสอบ คือ

$$I_2 = 2\pi f C U_1$$

$$S = 2\pi f C U_1^2 \times 10^{-9} \text{ kVA}$$

เมื่อ  $U_1$  คือ แรงดันทดสอบเป็น  $kV_{rms}$

$C$  คือ ความจุไฟฟ้ารวมเป็น  $\mu F$

ตารางที่ 3.1 ค่าคะแบิเตนซ์ของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	ความจุคะแบิเตนซ์ (pF)
ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 - 100
ปลอกฉนวนนำสายไฟ	150 - 400
หม้อแปลงกระแส	200 - 600
เคเบิลแรงดันสูง (ต่อความยาว 1 เมตร)	150 - 300
อุปกรณ์วัดแรงดัน	50 - 500
สายต่อวงจรแรงดันสูง (ต่อเมตร)	5 - 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2) เรกติไฟเออร์ (Rectifier)

ก่อนที่จะต่อหม้อแปลงกระแสตรงต่อความต้านทานจำกัดกระแส เพื่อเป็นการจำกัดกระแส เมื่อเกิดเบรคดาวที่วัสดุทดสอบ อาจจะใช้ความต้านทานน้ำที่มีความต้านทานจำเพาะสูงบรรจุในท่อนพลาสติก ซึ่งจะได้ความต้านทานประมาณ 500 กิโลโอห์ม ซึ่งทำได้ง่ายและราคาถูก

พิจารณาวงจรในรูป 3.8 เป็นการสร้างแรงดันสูงกระแสตรงด้วยจรเรกติไฟเออร์ ซึ่งประกอบไปด้วย

#### ก) ไดโอดแรงสูง

การสร้างไดโอดแรงสูงในปัจจุบันจะใช้สารกึ่งตัวนำย่อยมาต่ออันดับกัน เช่น ซีลีเนียม (Se) ในกรณีที่ต้องการใช้กระแสตรงค่าสูงไม่มากนัก และจะใช้ซิลิคอน (Si) ในกรณีที่ต้องการใช้กระแสสูง การใช้ไดโอดย่อย ๆ มาต่ออันดับเพื่อให้ทนแรงดันได้สูงขึ้น มีปัญหาเรื่องแรงดันกระจายไม่สม่ำเสมอ จึงต้องใช้ความต้านทานสูงหรือตัวเก็บประจุที่เหมาะสมต่อคร่อมไดโอดย่อย เพื่อปรับแรงดันกระจายให้ดีขึ้น การเลือกไดโอดย่อยมาทำไดโอดแรงสูงจะต้องพิจารณาถึง

- แรงดันกลับทาง (peak reverse voltage)
- กระแสที่กำหนด (permissible load current)
- กระแสเซอร์จ (Surge current)

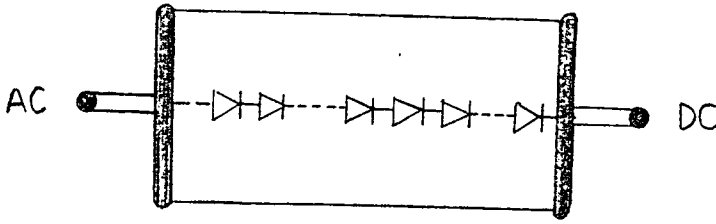
เรกติไฟเออร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันทั่วไปไม่มีค่าพิกัดดังตารางที่ 3.2 ส่วนรูปลักษณะการต่อไดโอดย่อยมาทำเป็นไดโอดแรงสูงดังรูป 3.7 a และ b ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 พิกัดและชนิดสารกึ่งตัวนำ

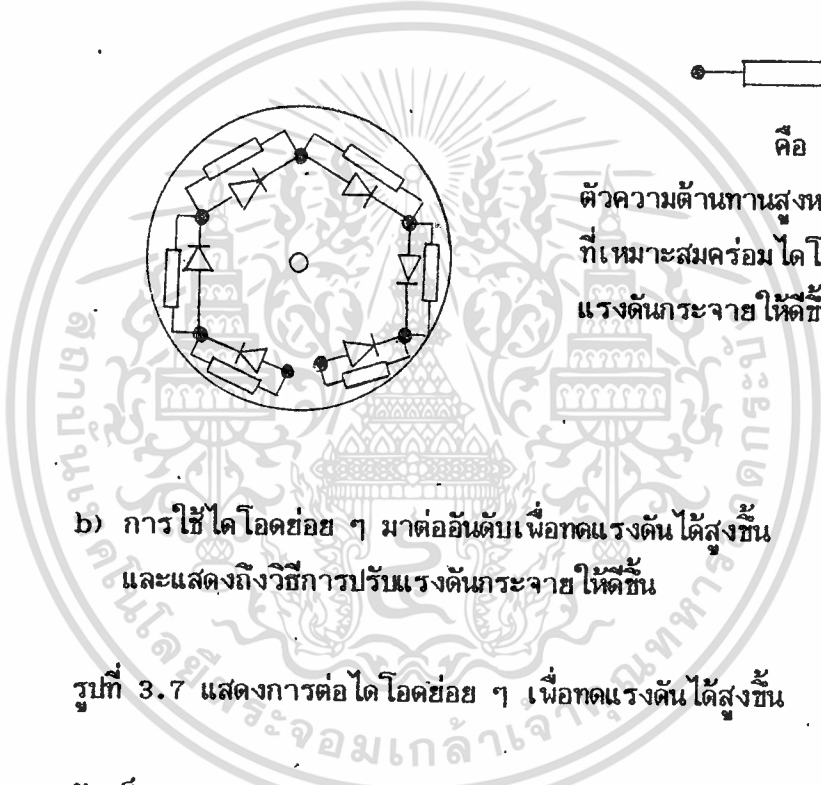
พิกัด	ชนิดสารกึ่งตัวนำ		
	Selenium (Se)	Germanium (Ge)	Silicon (Si)
ค่ายอดแรงดันกลับทาง (โวลต์)	30 - 50	150 - 300	1000 - 2000
ค่ากระแสพิกัด $A/cm^2$	0.1 - 0.5	50 - 150	50 - 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ไดโอดย่อยมาทำเป็นไดโอดแรงสูง



คือ  
ตัวความต้านทานสูงหรือตัวเก็บประจุ  
ที่เหมาะสมพร้อม ไดโอดย่อยเพื่อปรับ  
แรงดันกระจายให้ดีขึ้น

b) การใช้ไดโอดย่อย ๆ มาต่ออันดับเพื่อทดแรงดันได้สูงขึ้น  
และแสดงถึงวิธีการปรับแรงดันกระจายให้ดีขึ้น

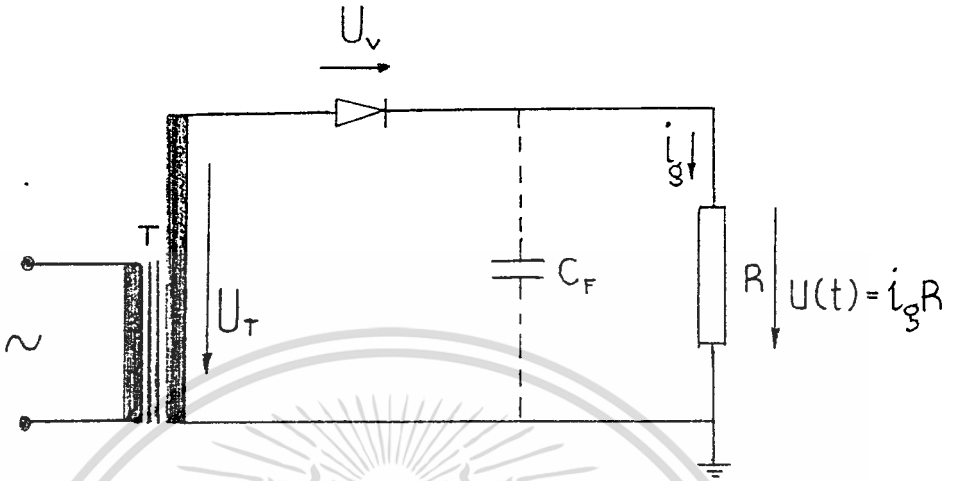
รูปที่ 3.7 แสดงการต่อไดโอดย่อย ๆ เพื่อทดแรงดันได้สูงขึ้น

ii) ตัวเก็บประจุกรองกระแส

ตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_f$  ช่วยทำให้คลื่นแรงดันกระแสตรงเรียบขึ้น โดยที่  
ช่วยคายประจุให้กับ โหลด ในช่วงที่ ไดโอด ไม่นำกระแสเฟกเตอร์ระลอกจะลดลง

ค) วงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น (Half-Period Rectifier Circuit)

เป็นวงจรเรกติฟายเออร์แบบง่ายที่สุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.8 โหลด R ได้รับ  
แหล่งพลังงานมาจากหม้อแปลงทดสอบ T โดยผ่านเรกติฟายเออร์



รูปที่ 3.8 วงจรเรกติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น

สมมติว่าเอาท์พุทโวลต์เตจของหม้อแปลงทดสอบ T มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ และมีค่าแปรตามเวลาเท่ากับ  $U_T(t)$  และเราถือว่าเรกติฟายเออร์เป็นอุดมคติคือ ฟอรัเวดวีชีส์แต้นท์ มีค่าเท่ากับศูนย์ และ รีเวิต เคอร์เรนท มีค่าเท่ากับศูนย์ พิจารณารูป (3.9 a) แสดงถึงรูปคลื่นแรงดันเมื่อวงจรไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_F$  จะได้

$$\hat{U} = \hat{U}_T ; \bar{U} = 1/\pi \hat{U} ; U_{rms} = 1/2 \hat{U}$$

ช่วงเวลานำกระแสของไดโอด,  $t_D$  มีค่าเท่ากับเวลาครึ่งคลื่นของระบบแรงดันกระแสสลับ,  $(T/2)$  ค่ายอดแรงดันกลับทาง (peak reverse voltage) ตกคร่อมเรกติฟายเออร์ในทิศตรงกันข้ามมีค่าเท่ากับ  $\hat{U}_v = \hat{U}_T$  พิจารณารูป (b) เมื่อต่อตัวเก็บประจุกรองกระแส  $C_F$  รูปคลื่นแรงดันจะมีค่ายอดเท่ากับ  $U$

โดยที่ 
$$\hat{U} = U_T ; \bar{U} \approx U - \delta U$$

สังเกตได้ว่ารูปคลื่นแรงดันรูป (b) จะเรียกว่ารูปคลื่นแรงดันรูป (a) และถ้าเวลาการไหลผ่านของกระแสซึ่งสั้นจะทำให้รูปคลื่นเรียบขึ้นอีก (เวลาการไหลผ่านของกระแส = ช่วงเวลาที่ไดโอดนำกระแส =  $t_D$ ) ค่ายอดแรงดันกลับทางจะมีค่าเท่ากับ  $\bar{U}_v \approx 2\hat{U}_T$  การคำนวณค่าระลอกสามารถคำนวณได้ โดยให้พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_v \ll T = 1/f$$

และ

$$\delta U \ll \bar{U}$$

โดยที่เราสามารถนิยามาคริฟเอ็็กโปเนนเชียล ซึ่งเป็นค่าขยประจุของ  $C_F$  เป็นเส้นตรงได้ เราจะได้

$$2\delta U C_F \approx \int_0^T I_{dr} dt = T \bar{I}_{dr}$$

และ

$$\delta U \approx \bar{I}_{dr} \frac{1}{2fC_F} \text{ และแฟกเตอร์ระลอก } r = \delta U / \bar{U}$$

- เมื่อ  $\bar{I}_{dr}$  คือกระแส ;  $f$  คือความถี่ ( $f = 1/T$ )
- $\delta U$  คือแรงดันระลอก ;  $\bar{U}$  คือแรงดันกระแสตรง
- $C_F$  คือค่าควาจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรอกกระแส

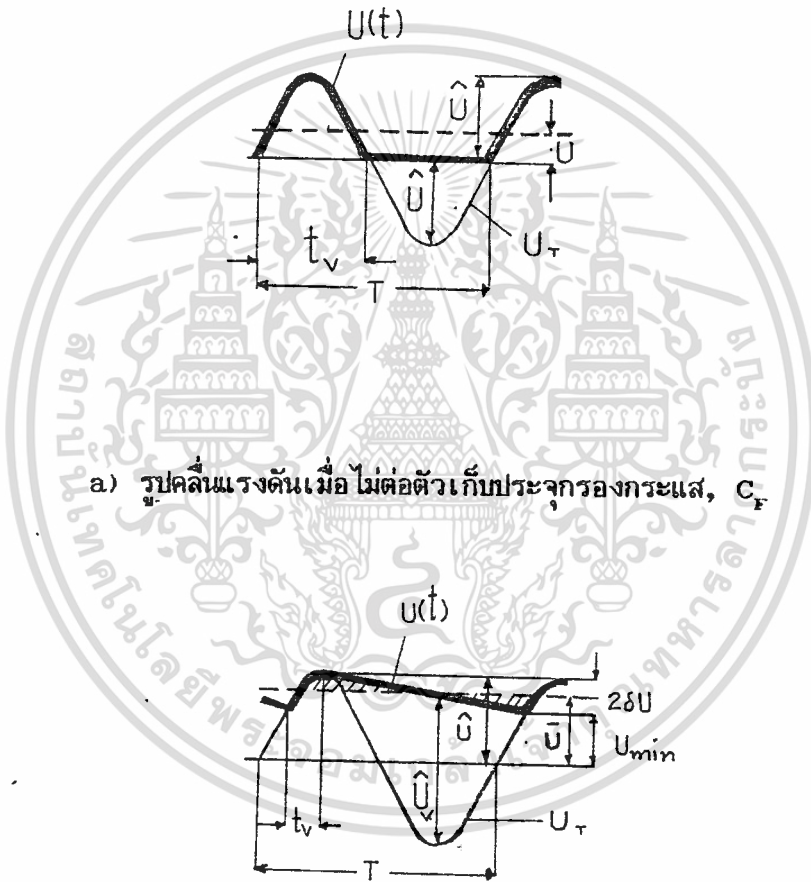
การลดขนาดของแรงดันระลอกทำได้โดยการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุรอกกระแส, ความถี่ และจำนวนเฟส

ในการออกแบบวงจรเรคตีฟายเออร์ สิ่งที่เราต้องคำนึงถึงก็คือแรงดันฟอร์วิดต้องสามารถทำให้ไดโอดนำกระแสได้

รูปที่ 3.10 เป็นคุณสมบัติของโหลดสำหรับเรคตีฟายเออร์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่อ  $\bar{I}_{dr} = 0$  ทางอุดมคติจะได้แรงดันขณะไม่มีโหลด  $U_{10}$  คือค่าขยอดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ ;  $U_{10} = \hat{U}_r$  แต่เมื่อกระแส  $\bar{I}_{dr}$  เพิ่มขึ้นจะทำให้เคริฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง และตัดแกนแรงดันที่  $\bar{U}_0$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $U_{10}$  แรงดัน  $U_1$  ที่ตกคร่อมโหลด ถ้ามีโหลดต่ออนุกรมกัน  $N$  ค่าจะได้ว่า  $\bar{U}_0$  น้อยกว่า  $U_{10}$  เท่ากับ  $N U_1$  ยกเว้นกรณีที่กระแสมีค่าน้อยมาก จะได้

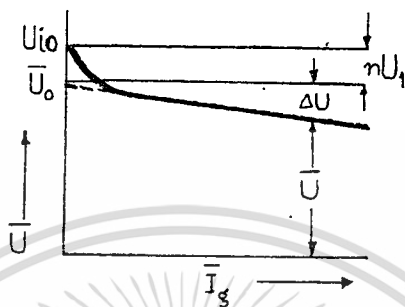
$$\begin{aligned}\bar{U} &= \bar{U}_0 - \Delta U \\ &= (U_{10} - NU_1) - kI_{\text{ธ}}\end{aligned}$$

เมื่อ  $k$  คือค่าคงที่ในการแปรผันขึ้นอยู่กับชนิดของเวคติฟายเออร์  
 $U_1$  คือ 0.6.....1.2 V



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันเวคติฟายเออร์แบบครึ่งคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 คุณสมบัติของ โหลดสำหรับ ทรานซิสเตอร์กำลัง

### 3.3) ความต้านทานที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง (High - Voltage Resistors)

ความต้านทานจำกัดกระแส, ความต้านทานปรับรูปคลื่น เราจะรวมเรียกว่าความต้านทานที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง

#### 3.3.1) ความต้านทานจำกัดกระแส

ความต้านทานจำกัดกระแสจะทำหน้าที่หน่วงการอัดประจุกระแสตรงให้กับตัวเก็บประจุ  $C_u$  และเป็นเกราะป้องกันกระแสทรานเซียนท์ไดโอดด้วย

#### 3.3.2) ความต้านทานปรับรูปคลื่นอิมพัลส์

เมื่อเกิดการสปาร์กขึ้นที่แก๊ส SG แล้ว ประจุที่อัดไว้ใน  $C_u$  ก็จะคายออกมายังโหลด  $C_b$  หรือวัสดุทดสอบ ผ่านความต้านทานอนุกรม  $R_d$  ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ และผ่าน  $R_u$  ต่อในลักษณะขนานกับโหลด ทำหน้าที่ปรับหรือกำหนดเวลาทางคลื่น

การเลือกขนาดความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_u$  ขึ้นอยู่กับขนาดของ  $C_b$  และ  $C_u$  และเวลาหน้าคลื่น  $T_1$  กับทางคลื่น  $T_2$  ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$R_d = T_1 (C_b + C_u) / k_2 C_b \cdot C_u$$

$$R_u = T_2 / k_1 (C_b + C_u)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้า 1.2/50 ไมโครวินาที

$$k_1 = 0.73 \text{ และ } k_2 = 2.96$$

การออกแบบความต้านทาน  $R_d$  และ  $R_u$  จะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ารับพลังงานดีสชาร์จทรานเซียนท์ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น ๆ เป็นไมโครวินาที ได้โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงเกินไป โดยทั่วไปจึงใช้ความต้านทานที่ทำด้วยเส้นลวดความต้านทาน สิ่งที่สำคัญยิ่งประการหนึ่งของการทำ  $R_d$  และ  $R_u$  ก็คือจะต้องเป็นความต้านทานใช้ความเหนียวหรือมีน้อยที่สุดควรทำให้ความต้านทาน  $R_d$  มีอัตราส่วนระหว่าง  $L$  กับ  $R$  น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที หรือ  $R_d$  มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตคือ  $R_d \geq 2\sqrt{L(C_p + C_u)/C_u C_b}$

ถ้าพูดถึงในด้านการเก็บความร้อนความต้านทานแบบของเหลว สามารถเก็บความร้อนได้ดีกว่าแบบขดลวด แต่มีข้อเสียคือมักจะไม่น่าเสถียรภาพ แต่ปัจจุบันสามารถแก้ไขข้อเสียอันนี้ได้โดยใช้ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน และความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์

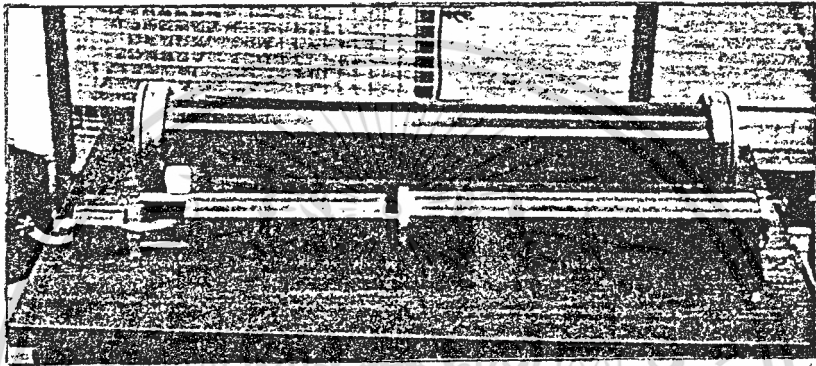
### 3.3.3) ความต้านทานที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง

- A) การออกแบบความต้านทานที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง  
การออกแบบความต้านทานแรงสูงพิจารณาเป็นขั้นตอนได้ดังนี้
1. การฉนวน
  2. พลังงานสูญเสียในตัวความต้านทาน
  3. การเลือกความต้านทาน

#### 1. การฉนวน

ความต้านทานแรงสูงต้องบรรจุอยู่ในท่อฉนวน ซึ่งมีระยะการฉนวนเพียงพอ ไม่ให้เกิดวาวไฟตามผิว เมื่อแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนด ระยะการฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสูงของตัวความต้านทานแรงสูง ซึ่งต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวท่อฉนวน จากเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงทั่ว ๆ ไป กำหนดค่าความเครียดไฟฟ้าตามผิว อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในอาคารที่ภาวะความชื้นน้อยไม่ควรเกิน 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตรในอากาศ จึงจะไม่เสี่ยงต่อวาวไฟตามผิว การกำหนดระยะการฉนวนจะถือค่านี้เป็นเกณฑ์ และถ้าคำนึงถึงความชื้นสูงขึ้นควรใช้ระยะการฉนวนเพิ่มขึ้น แต่ไม่ควรเพิ่มมากเกินไปเพราะจะทำให้สเตรคาปาซิแตนซ์มากขึ้นโดยไม่จำเป็น ท่อฉนวนที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ท่อเบกเกะไลต์ เพราะมีคุณสมบัติเหมาะสมคือมีความแข็งแรงทางกล และเป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี แต่ก็ยังมีวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันคือ ท่อพีวีซีอย่างหนา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำมาใช้แทนกันได้ เพราะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อพีวีซีเป็นฉนวนอย่างดี และท่อพีวีซีอย่างหนาที่สามารถรับแรงทางกลได้อย่างดีด้วย ท่อที่ใช้ต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่พอสมควร เพื่อให้ได้วามเมื่อบรรจุความดันทางานแรงสูงแล้วยังมีช่องว่างรอบตัวความดันทางานนี้มากพอ สำหรับการหมุนเวียนของน้ำมันฉนวน ซึ่งจะใช้เป็นตัวระบายความร้อนออกจากตัวความดันทางาน และมีฝาโลหะปิดปลายทั้งสองด้านอย่างสนิท สามารถบรรจุน้ำมันโดยไม่วิวซึม ฉนวนอกของท่อพีวีซีฉาบด้วยฉนวนเพื่อช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดีขึ้น ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 ท่อฉนวนพีวีซีสำหรับยึดและบรรจุความดันทางานแรงสูง

น้ำมันฉนวนนอกจากมีหน้าที่ระบายความร้อนดังกล่าวแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างชั้นของความดันทางานแรงสูง และช่วยลดการเกิดโคโรน่าในส่วนที่จมอยู่ในน้ำมันฉนวนนั้นด้วย ในที่นี้ใช้น้ำมันหม้อแปลงที่มีคุณภาพดี และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) เท่ากับ 30 กิโลโวลต์เป็นฉนวน

2. พลังงานสูญเสียในตัวความดันทางาน

เมื่อตัวความดันทางาน R ของโวลเตจดีไวเดออร์ได้รับแรงดันอิมพัลส์  $V(t)$  จะเกิดพลังงานทางไฟฟ้าสูญเสียในตัวความดันทางานนั้น คำนวณได้ดังนี้

$$W_{o1} = \int_0^{\infty} \frac{V^2(t)}{R} dt \quad \dots\dots (3.1)$$

$W_{o1}$  มีหน่วยเป็น จูล (Joule) ถ้า  $V(t)$  มีหน่วยเป็นโวลต์ และ R มีหน่วยเป็น โอห์ม

โวลเตจดีไวเดออร์แบบความดันทางานมีค่า R คงที่ ดังนั้นจากสมการ (3.1) เขียน  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ประสงค์  
 เสียใหม่ได้ว่า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{e1} = 1/R \int_0^{\infty} V^2(t) dt$$

$$\text{กำหนดให้ } W_v = \int_0^{\infty} V^2(t) dt$$

$$W_v \text{ จะมีมิติเป็น } V^2S \text{ หรือ } (kV)^2S$$

แทนค่า  $W_v$  ในสมการ (3.1)

$$W_{e1} = W_v/R \quad \dots (3.2)$$

พลังงานทางไฟฟ้าที่สูญเสียในความต้านทาน  $W_{e1}$  นี้ถือว่าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน  $W_{th}$  ในตัวความต้านทานทั้งหมด

ดังนั้น

$$W_{th} = W_{e1} \quad \dots (3.3)$$

พลังงานความร้อน  $W_{th}$  นี้ทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในตัวความต้านทาน คำนวณได้จาก

$$W_{th} = m \cdot s \cdot \Delta\theta \quad \dots (3.4)$$

$W_{th}$  มีหน่วยเป็น จูล

เมื่อ  $m$  คือ มวลของโลหะผสมที่ใช้ทำตัวความต้านทาน หน่วยเป็น gm

$s$  คือ ความร้อนจำเพาะของโลหะผสม หน่วยเป็น  $J/gm^{\circ}C$

$\Delta\theta$  คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของโลหะผสม หน่วยเป็น  $^{\circ}C$

ความร้อนที่เพิ่มขึ้น  $\Delta\theta$  จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ซึ่งมีผลกับอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานในภาวะทรานเซียนคำนวณได้จาก

$$\Delta R/R = \alpha \cdot \Delta\theta \quad \dots (3.5)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของโลหะผสมที่ใช้ทำตัวความต้านทาน มีหน่วยเป็น ppm/ $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การเลือกตัวความต้านทานแรงสูง

จากสมการ (3.1) จะเห็นได้ว่าพลังงานสูญเสียในตัวความต้านทานขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ คือ ถ้าความต้านทานต่ำพลังงานสูญเสียจะมาก ซึ่งจะเป็นผลกระทบ คือเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกความต้านทานที่ใช้กับโวลต์เตจดีไวเซอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ จึงควรเลือกให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งช่วงที่เหมาะสมคือ 5 ถึง 20 กิโลโอห์ม การออกแบบนอกจากจะคำนึงถึงค่าความต้านทานแล้ว ยังต้องคำนึงถึงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวความต้านทานด้วย เพราะถ้าเลือกตัวความต้านทานไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการไหม้ได้ จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) ทำให้ทราบว่าตัวความต้านทานที่ใช้ต้องมีมวลของวัสดุที่เป็นตัวต้านทานมากพอ และต้องมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ด้วย ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้ลวดความต้านทานในการสร้างความต้านทานแรงสูง

#### B) ความต้านทานแบบเส้นลวด

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการเลือกใช้ตัวความต้านทานภาคแรงสูงนั้น ต้องคำนึงถึงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวความต้านทานเป็นประการสำคัญ ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกมิติลวดความต้านทาน จึงได้ทำการพิสูจน์วิเคราะห์ในเชิงคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

ถ้าให้เส้นลวดความต้านทานที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d$  เซนติเมตร ความยาว  $l$  เซนติเมตร ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำลวดความต้านทาน  $\rho$  gm/cm<sup>3</sup> สามารถคำนวณหามวลของวัสดุความต้านทานได้ดังนี้

$$m = 1/4 \pi d^2 l \rho$$

แทนค่ามวลในสมการที่ (3.4)

$$W_{th} = 1/4 \pi d^2 l \rho \beta \Delta\theta$$

แต่เพราะว่า  $W_{th} = W_{o1}$  ตามสมการ (3.3) และ  $W_{o1} = W_v/R$  ตามสมการ (3.2) ดังนั้น

$$W_v/R = 1/4 \pi d^2 l \rho \beta \Delta\theta$$

$$W_v = 1/4 R \pi d^2 l \rho \beta \Delta\theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แต่เพราะว่า  $R = \rho (l/A)$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุความต้านทาน หน่วยเป็น  $\Omega\text{cm}$ .

แทนค่าในทอมของมิติเส้นลวดได้ดังนี้

$$R = \rho \frac{1}{(1/4\pi d^2)}$$

แทนค่า R ในสมการ  $P_v$  ข้างบน จะได้

$$P_v = I^2 \rho \beta \cdot \Delta\theta \dots\dots (3.6)$$

จากสมการ  $P_v = \int_0^\infty V^2(t) dt$  จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบขนาดและลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ จะทำให้เราสามารถหามิติลวดความต้านทานที่ใช้ได้ ถ้าหากกำหนดอุณหภูมิที่ข้อมให้เพิ่มขึ้นได้  $\Delta\theta$  สมมติว่าข้อมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้  $300-500^\circ\text{C}$  ( $\Delta\theta$  ขนาดนี้ทำให้ค่าความต้านทานของลวดความต้านทานเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.5% ดังคำนวณได้จากสมการ (3.5) และถ้าแรงดันไม่เกิน 300 กิโลโวลต์  $P_v$  ที่คำนวณได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 3 ถึง 5  $(\text{kV})^2\text{S}$

ถ้าต้องการใช้กับแรงดันอิมพัลส์รูปฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$V(t) = \hat{V} e^{-t/\tau}$$

เมื่อ  $\hat{V}$  คือ ค่าอิมปัลส์จุดของคลื่นแรงดัน มีหน่วยเป็น kv

$\tau$  คือ ค่าคงที่เวลาของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล มีหน่วยเป็น S

คำนวณหา  $P_v$  มีหน่วยเป็น  $(\text{kV})^2\text{S}$  จากสมการ (3.2) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_v &= \int \hat{V}^2 e^{-2t/\tau} dt \\ &= \hat{V}^2 \int e^{-2t/\tau} dt \\ &= \hat{V}^2 \tau/2 \dots\dots (3.7) \end{aligned}$$

ถ้าใช้ตัวความต้านทานที่มีค่า  $P_v = 3(\text{kV})^2\text{S}$  ดังนี้

เมื่อกำหนด  $\tau$  ของแรงดันให้สามารถคำนวณหาอิมพัลส์สูงสุดของแรงดัน  $V$  ที่สามารถใช้ความต้านทานชนิดนี้วัดได้ ดังตัวอย่างเช่น

$\tau$ ( $\mu\text{S}$ )	1	10	100	1000	10000
$V$ (kV)	2449	775	244.9	77.5	24.5

ในการที่เป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{S}$  อาจประมาณได้ว่าแรงดันแบบเอกซ์โปเนนเชียลที่มีค่าคงที่เวลา 70  $\mu\text{S}$  ดังนั้นถ้าต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานขนาด 300 กิโลโวลต์ จึงต้องใช้ตัวความต้านทานที่มี  $W_v$  เท่ากับค่าที่คำนวณได้จากสมการ (3.7) ดังนี้

$$W_v = k(300)^2 \times \frac{70 \times 10^{-6}}{2}$$

$$= 3.15 \text{ (kV)}^2 \text{S}$$

ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบตัวความต้านทานภาคแรงสูง เพื่อใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์ ในที่นี้ใช้ตัวความต้านทานแบบไม่มีฉนวนหุ้มซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างนิเกิลและโครเมียม ลวดความต้านทานที่ใช้มีข้อมูล ดังนี้

- ความต้านทานจำเพาะ  $\rho = 79.5 \mu\Omega \text{ cm}$
- ความหนาแน่น  $\sigma = 8.1 \text{ gm/cm}^3$
- ความร้อนจำเพาะ  $\beta = 0.46 \text{ J/gm}^\circ\text{C}$
- สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ  $\alpha = 10 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$
- เส้นผ่าศูนย์กลาง  $d = 90 \mu\text{m}$
- ความต้านทานต่อเมตร = 125  $\Omega$

จากสมการ (3.6) ความยาวลวดความต้านทานที่ต้องใช้ หน่วยเป็น เซนติเมตร

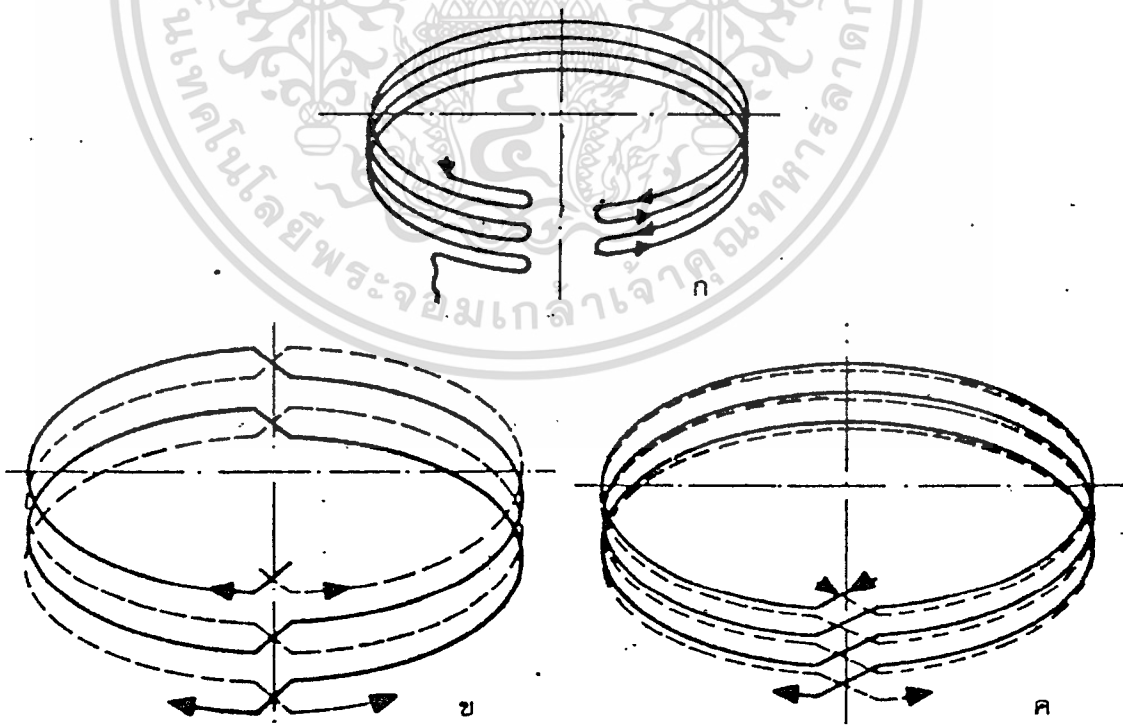
ได้ดังนี้

$$l = \sqrt{\frac{W_v}{\sigma \rho \beta \cdot \Delta\theta}} \dots\dots(3.8)$$

เมื่อ  $W_v$  มีหน่วยเป็น  $V^2S$  และ  $\Delta\theta$  มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$  ถ้ากำหนดให้  $\Delta\theta = 300^{\circ}C$  และตั้งที่ทราบแล้วว่า  $W_v$  ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 300 กิโลโวลต์ เท่ากับ  $3.15 (kV)^2S$  และแทนค่าข้อมูลของลวดความต้านทานในสูตร (3.8) คำนวณหาความยาว  $l$  ของลวดความต้านทานที่ควรใช้ได้  $l = 59.5$  เมตร นำไปใช้คำนวณหาความต้านทานทั้งหมดได้

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานทั้งหมด} &= 59.5 \times 125 \\ &= 7437 \Omega \end{aligned}$$

เพื่อให้สเตรอียดักแทนซ์ในตัวความต้านทานภาคแรงสูงมีค่าต่ำ จึงต้องนำลวดให้กระแสน้ำในลวดความต้านทานที่อยู่ใกล้กัน ไหลสวนทางกัน เพื่อให้หักล้างผลกระทบของสเตรอียดักแทนซ์ให้มากที่สุด การพันลวดความต้านทานให้ได้สเตรอียดักแทนซ์ต่ำ ๆ อาจทำได้หลายวิธี เช่นการพันที่แสดงไว้ในรูป 3.12

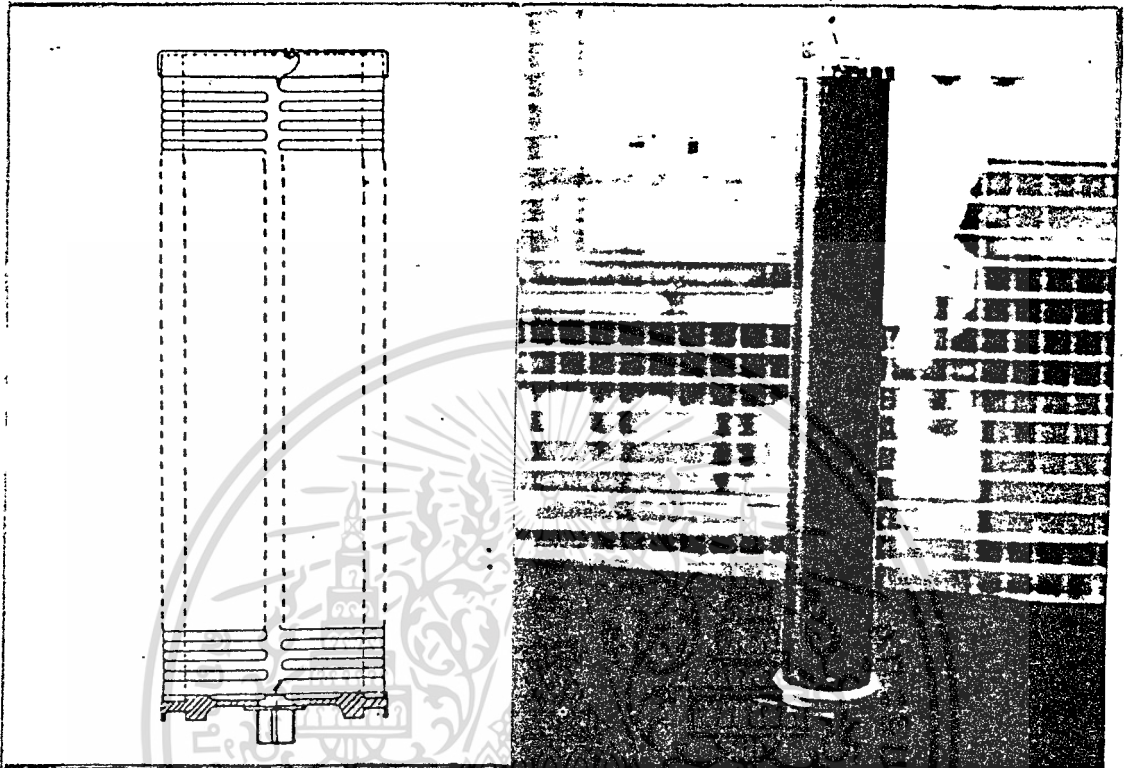


วิธีการในรูป ก. เหมาะสำหรับลดความต้านทานที่ไม่มีฉนวนหุ้ม ส่วนวิธีการในรูป ข. และ ค. เหมาะกับการพันลดความต้านทานที่มีฉนวนหุ้มสองเส้นพันสวนทางกัน ทำให้ได้ thermal capacity เพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นเมื่อแรงดันกำหนดสูงขึ้น ในที่นี้ใช้วิธีการพันลดแบบลด สเตอริอิตีตามวิธีในรูป ก. โดยพันมท่อนวนพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 เซนติเมตร กลิ้งร่องเล็ก ๆ บนผิวท่อกลิบประมาณ 1-2 มิลลิเมตร สำหรับเป็นช่องให้ลดความต้านทานพันอยู่ ได้บนผิวท่อก ในทางทฤษฎีลดความต้านทานควรจะพันให้อยู่ชิดกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ในทางปฏิบัติจะมีปัญหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างร่อง ด้วยเหตุนี้เองจึงออกแบบให้ตัวความต้านทานแช่อยู่ในน้ำมัน อย่างไรก็ตาม หารักดีปัญหาในการพันชิดกันมาก ๆ จะทำให้เกิดความเครียดทางกล ตรงจุดลดวอกกลับมาก ซึ่งเป็นผลเสียต่อตัวความต้านทาน จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่พอเหมาะสะดวกในการพัน ฉะนั้นความยาวของท่อพีวีซีที่ใช้พันลดความต้านทานอาจทำได้ คือ

$$\begin{aligned}
 &\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อพีวีซี} && 8.5 \quad \text{เซนติเมตร} \\
 &\text{กลิ้งร่องลึก} && 0.1 \quad \text{เซนติเมตร} \\
 &\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อวัดถึงกันร่อง} && = 8.5 - 2(0.1) \\
 &&& = 8.3 \quad \text{เซนติเมตร} \\
 &\text{ความยาวของลดความต้านทานต่อหนึ่งรอบ} && = \pi \times (8.3) \\
 &&& = 26 \quad \text{เซนติเมตร} \\
 \\
 &\text{จำนวนรอบเส้นลวดที่พัน} && = \frac{\text{ความยาวลดความต้านทาน}}{\text{ความยาวของลดความต้านทานต่อหนึ่งรอบ}} \\
 &&& = \frac{5950}{26} \\
 &&& = 229 \quad \text{รอบ} \\
 \\
 &\text{ความยาวท่อพีวีซีที่ใช้พันลด} && = \text{จำนวนรอบ} \times \text{ระยะห่างระหว่างรอบ} \\
 &&& = 229 \times 0.25 \\
 &&& = 57.25 \quad \text{เซนติเมตร} \\
 \\
 &\text{ฉะนั้นเลือกใช้ท่อพีวีซีสำหรับพันเส้นลวดยาว} && 60 \quad \text{เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

ลักษณะการพันเส้นลวดความต้านทานภาคแรงสูง แสดงในรูป 3.13 ซึ่งได้ความต้านทานรวมทั้งหมด 7170 โอห์ม ดังนั้นจะสามารถหาความยาวจริงของเส้นลวดความต้านทานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ความต้านทานภาคแรงสูงแบบเส้นลวดความต้านทาน

ก. ลักษณะการพัน

ข. ภาพถ่ายความต้านทานเมื่อพันและประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวลวดความต้านทาน } l &= \frac{\text{ความต้านทานรวม}}{\text{ความต้านทานต่อ 1 เมตร}} \\
 &= \frac{7170}{125} \\
 &= 57.4 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
จากสมการ (3.6) คำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของสสารความต้านทาน ได้ดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= \frac{W_v}{1^2 \tau \rho \beta} \\ &= \frac{3.15 \times 10^6}{(57.4 \times 10^2)^2 \times 8.1 \times 79.5 \times 10^{-6} \times 0.46} \\ &= 323^\circ\text{C}\end{aligned}$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าโอห์มของความต้านทานคำนวณได้จากสมการ (3.5)

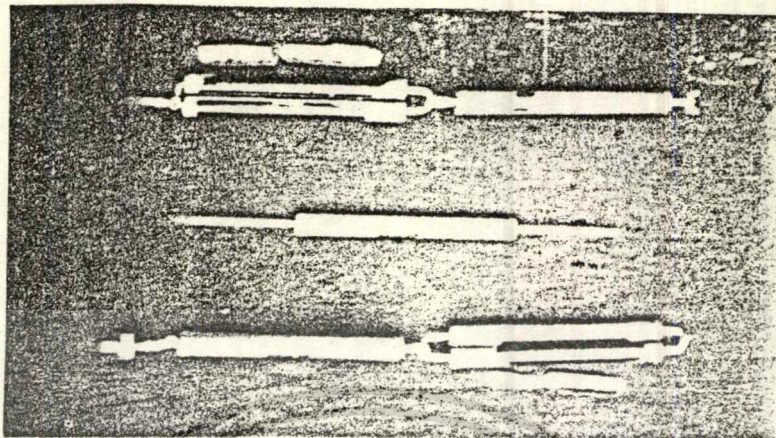
$$\begin{aligned}\Delta R/R &= \alpha \Delta\theta \\ &= 10 \times 10^{-6} \times 323 \times 100\% \\ &= 0.32\%\end{aligned}$$

ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้ตามต้องการ (กำหนดไว้ 0.5%)

### C) ความต้านทานแบบฟิล์ม โลหะออกไซด์

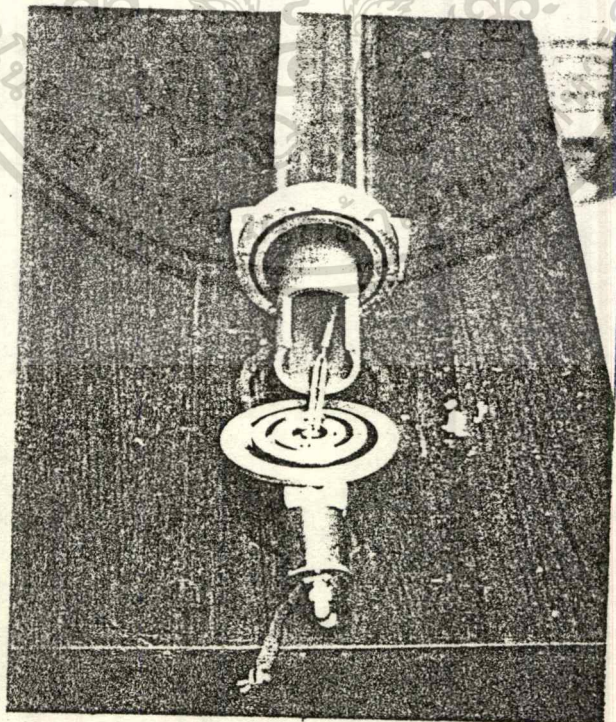
ความต้านทานแบบฟิล์ม โลหะออกไซด์ ที่นำมาใช้ในที่นี้ เป็นความต้านทานแบบที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง (high voltage resistors) ซึ่งสร้างขึ้นด้วยกรรมวิธีทันสมัย โดยเผาสารความต้านทานให้ระเหิดไปเกาะบนแกนเซรามิกส์ที่วางอยู่ในอากาศที่อุณหภูมิมากกว่า 760 องศาเซลเซียส ความต้านทานแบบนี้มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน (thermal-shock) มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิน้อยกว่า 80 ppm/°C เนื่องจากเป็นฟิล์มบางจึงมีผลกระทบเกี่ยวกับกระแสไหลในผิว (skin effect) น้อย

เช่น ตัวความต้านทานที่ใช้เป็นความต้านทานภาคแรงสูง ในที่นี้มีค่า 10.28 กิโลโอห์ม ซึ่งประกอบด้วยตัวความต้านทาน 10 ชุด ชุดละ 2 ตัวต่อขนานกัน แต่ละตัวมีขนาด 2 กิโลโอห์ม 7.5 วัตต์ และมีแรงดันที่กำหนด 15 กิโลโวลต์ ทนต่อแรงดันเกินได้ 1.5 เท่าของแรงดันที่กำหนดภายในเวลา 5 วินาที ตัวอย่างความต้านทานแสดงไว้ในรูป 3.14 สีดำที่ปรากฏในภาพนั้นเป็นฟิล์ม โลหะออกไซด์ ซึ่งฉาบหุ้มด้วยวัสดุฉนวนสีน้ำตาล



รูปที่ 3.14 ความต้านทานแบบฟิล์ม โลหะออกไซด์

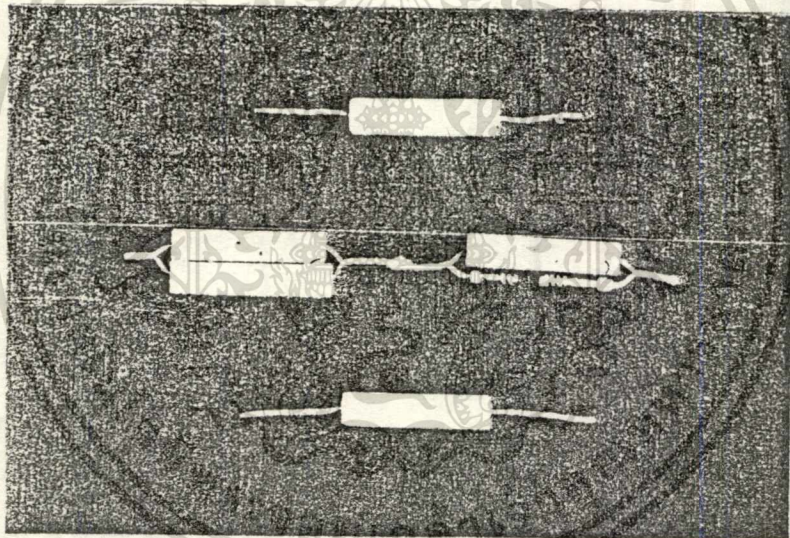
การประกอบความต้านทานภาคแรงสูงแบบฟิล์ม โลหะออกไซด์ แสดงในรูป 3.15 ตัวความต้านทานภาคแรงสูงจะยึดอยู่ในที่จอนวนเพวช (สี่เท้าในรูป) แล่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งบรรจุอยู่ในที่จอนวนเพวชอีกชั้นหนึ่ง (สีน้ำตาลแดง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.15 การประกอบความต้านทานภาคแรงสูงแบบฟิล์ม โลหะออกไซด์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D) ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

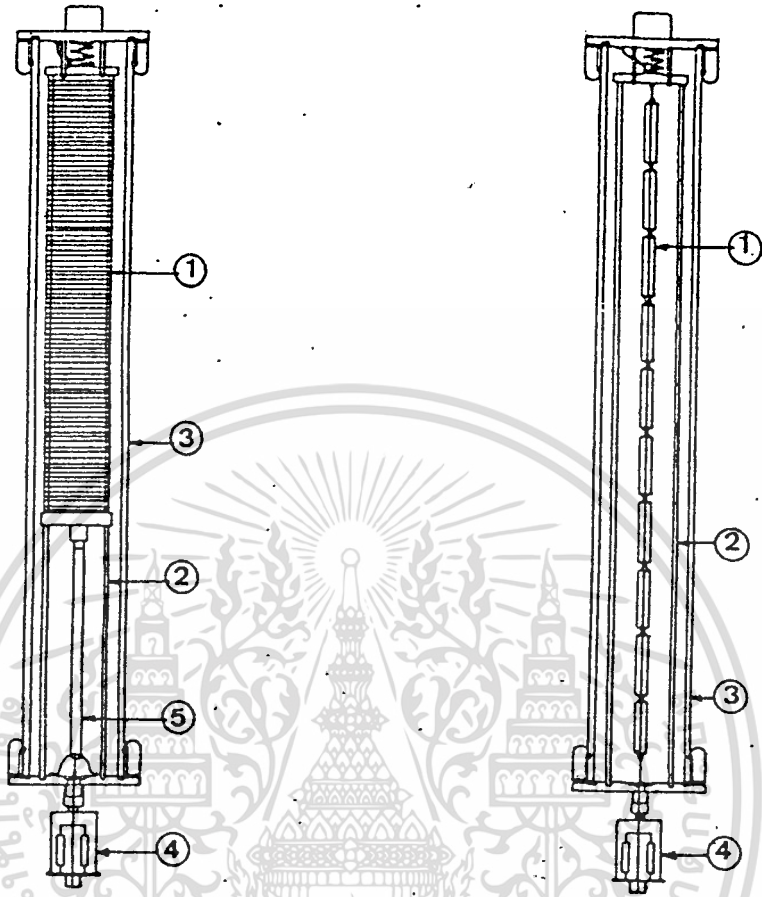
ตัวความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด เป็นความต้านทานภาคแรงสูง ความต้านทานแบบที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ คือ มีค่าประมาณ  $-230 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  ถ้าฟิล์มมีความหนาลดลงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะยิ่งน้อยลง อาจลดลงถึง  $-400 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  เช่น ใช้ความต้านทานรวม 9870 โอห์ม ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน 10 ชุด ชุดละ 2 ตัวต่อขนานกัน แต่ละตัวมีขนาด 2 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ ตั้งในรูป 3.16 ตัวความต้านทานเหล่านี้บรรจุไว้ในท่อพีวีซี ทำนองเดียวกันกับตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์



รูปที่ 3.16 ความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

E) ภาพเขียนแบบแสดงการประกอบตัวความต้านทานภาคแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงการประกอบตัวความดันทานทานแรงสูง

ก. แบบหลอดความดันทาน

1. หลอดความดันทานพันบนท่อพีวีซี
2. ท่อพีวีซีรองรับ
3. ท่อพีวีซีบรรจุน้ำมัน
4. ความดันทานทานแรงต่ำ
5. สายเคเบิลวัด

ข. แบบฟิล์ม โลหะออกไซด์และฟิล์มคาร์บอน

1. ตัวความดันทานแบบฟิล์ม
2. ท่อพีวีซียึดตัวความดันทาน
3. ท่อพีวีซีบรรจุน้ำมัน
4. ความดันทานทานแรงต่ำ

3.3.4 การออกแบบความดันทานแรงต่ำ

จากรูปที่ 3:17 คือภาพรวมของชุดโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความดันทาน ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนใหญ่ คือชุดความดันทานแรงสูง ซึ่งเราได้กล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ไปแล้ว ต่อไปเราจะมาพิจารณาการออกแบบความดันทานแรงต่ำดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(A) หลักเกณฑ์ทั่วไป

การออกแบบความต้านทานแรงต่ำคำนึงถึงปัญหาต่าง ๆ ดังนี้

- 1) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น กระแสที่ไหลในเปลือกนอกของสายเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่าง ๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไป จะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด
- 2) การจัดวางองค์ประกอบความต้านทานภาคแรงต่ำต้องพิจารณาเป็นพิเศษ เพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กบนสายนำออกจากโวลเตจดีไวเดอร์ อันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน จึงควรวางตัวความต้านทานให้เป็นทรงกระบอกโคแอคเซียลกับสายนำออก คือ ตัวความต้านทานอยู่รอบนอกและสายนำออกเป็นแกนกลาง
- 3) ตัวความต้านทานที่ใช้ทำเป็นอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ต้องมีเสถียรอินดักแตนซ์น้อยมาก ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งผลตอบสนองที่เนื่องมาจากภาคแรงต่ำ
- 4) ความต้านทานภาคแรงต่ำต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในภาวะทรานเซียนต์น้อยมาก เพื่อรักษหัตตราส่วนแรงดันให้คงที่
- 5) ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์พัฒนาขึ้นใช้ควรเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนได้ง่าย เพื่อให้ได้แรงดันขาออกเหมาะสมกับเครื่องวัดที่มีอยู่ จึงออกแบบโครงสร้างของภาคแรงต่ำแยกต่างหากจากภาคแรงสูง เพื่อให้ถอดเปลี่ยนได้สะดวก จะทำให้ได้โวลเตจดีไวเดอร์ที่มีความคล่องตัวในการใช้งานมากขึ้น

B) การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเดอร์ จะกำหนดด้วยแรงดันป้อนเข้าสูงสุดของเครื่องวัดด้านแรงต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด ออสซิลโลสโคปแบบธรรมดาที่ใช้อยู่ทั่วไปจะรับแรงดันขาเข้าได้ไม่เกิน 200 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้เข้ากับออสซิลโลสโคปที่มีอยู่ทั่วไปดังกล่าวนี้ได้ แรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์จึงไม่ควรเกิน 200 โวลต์ เว้นเสียแต่ว่าจะใช้กับอิมพัลส์ออสซิลโลสโคป หรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่ออกแบบมาวัดแรงดันอิมพัลส์โดยเฉพาะ หรืออาจสอดทอนแรงดันขาออกด้วยไฟรปช่วยอีกทอดหนึ่ง เมื่อทราบแรงดันสูงและแรงดันขาออกที่กำหนด จะทำให้คำนวณอัตราส่วนแรงดัน  $a$  ของโวลเตจดีไวเดอร์จากสมการ (3.13) ได้ซึ่งอัตราส่วนแรงดันนี้มีความสัมพันธ์อยู่ในเทอมของอัตราส่วนความต้านทาน ดังที่ได้นิยามไว้เพราะเหตุไว้ในภาคผนวก 1 คือ

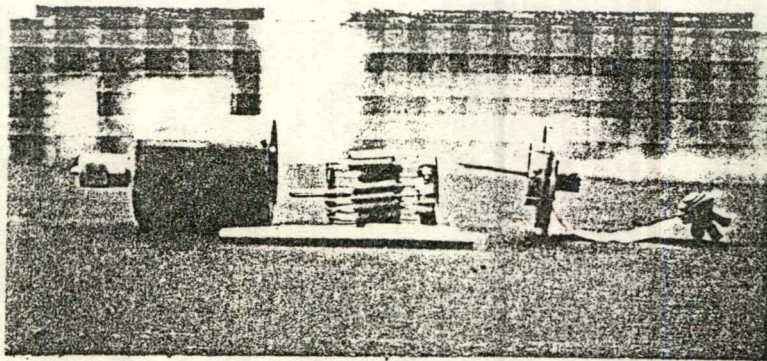
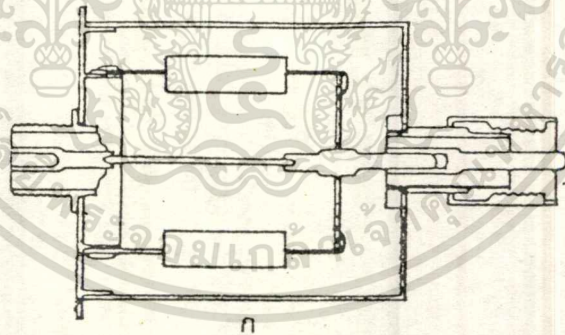
$$a = \frac{R_m (R_d + R_1 + R_2) + R_2 (R_d + R_1)}{R_2 R_m} \dots (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง
- $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
- $R_d$  คือ ความต้านทานหน่วงในสายนำ
- $R_m$  คือ ความต้านทานแม่เหล็ก

ฉะนั้น จากสมการ (3.9) จะคำนวณหาความต้านทานภาคแรงต่ำได้

ตัวอย่างเช่น ใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ขนาด 500 โอห์ม 4 วัตต์ จำนวน 23 ตัวต่อขนานกัน ความต้านทานแต่ละตัวมีแรงดันที่กำหนด 2 กิโลโวลต์ ทนแรงดันเกินได้ 1.5 เท่าของแรงดันที่กำหนดภายในเวลา 5 นาที อุณหภูมิใช้งานสูงสุด  $275^{\circ}\text{C}$  ใช้ไหลดเกินได้ 5 เท่าภายใน 5 วินาที สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  ตัวความต้านทานชุดนี้บรรจุอยู่ในทรงกระบอกทองเหลือง เพื่อกันการรบกวนที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก ลักษณะโครงสร้างและการประกอบตัวความต้านทานภาคแรงต่ำที่สร้างขึ้น แสดงให้ดูในรูป 3.18 ความต้านทานภาคแรงต่ำชุดนี้ใช้ได้สำหรับความต้านทานภาคแรงสูงแบบลวดความต้านทาน และแบบฟิล์มโลหะออกไซด์ ส่วนความต้านทานภาคแรงต่ำสำหรับใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์ ที่มีตัวความต้านทานภาคแรงสูงเป็นแบบฟิล์มคาร์บอน ใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนขนาด 220 โอห์ม จำนวน 10 ตัวต่อขนานกัน ได้ความต้านทานรวม 22.2 โอห์ม



ข

รูปที่ 3.18 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำขนาด 21.7  $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เหมือนญาติเหินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ก. ลักษณะโครงสร้าง ข. การประกอบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4) ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าแรงดันสูง (Capacitor in High-Voltage Circuits)

ในวงจรกำเนิดแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุเราสามารถแบ่งตามหน้าที่ของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

3.4.1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์,  $C_u$  ลักษณะของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันอิมพัลส์จะแตกต่างจากตัวเก็บประจุที่ใช้แรงดันสูงกระแสตรงก็คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จะเกิดการอัดประจุหรือคายประจุเป็นไปอย่างรวดเร็วแบบทรานเซียน เกิดขึ้นในช่วงระยะสั้นและรวดเร็ว ฉะนั้นตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ และการต่อขั้วของตัวเก็บประจุที่แผ่นฟอยล์จะต้องดีพออย่างไรก็ตามขนาดแรงดันที่กำหนดจะมีค่าเท่ากับแรงดันกระแสตรง นั่นคือตัวเก็บประจุอิมพัลส์สามารถใช้เป็นตัวเก็บประจุเดียวกัน ตัวเก็บประจุกรองกระแสได้

การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุอิมพัลส์  $C_u$  ขึ้นอยู่กับความต้องการพลังงานของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W = 1/2 C_u V_o^2$$

เมื่อ  $V_o$  คือแรงดันอัดประจุ

### 3.4.2) โหลดความจุไฟฟ้า, $C_b$

โหลดความจุไฟฟ้า  $C_b$  จะเป็นองค์ประกอบสร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ ซึ่งแทนค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ เช่น เคเบิลแรงสูง ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า ปลอกนำสาย กับดักแรงดันเกิน สวิตช์ตัดตอน และตัวเก็บประจุ และอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.1 ข้างต้น ในหัวข้อ 3.2

และในการเลือกขนาดความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ ความจุไฟฟ้าจะต้องไม่มากเกินไป เพราะจะกลายเป็นโหลดของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีผลต่อรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น แต่ก็ไม่ควรมีน้อยเกินไป เพราะจะทำให้เกิดผลกระทบจากความจุไฟฟ้าสเตร ทำให้เวลาตอบสนองของดีไวเดอร์มีค่าสูงเกินไป โดยทั่วไปค่าความจุไฟฟ้าในการออกแบบทำโวลเตจดีไวเดอร์จะมีค่าประมาณ 300-1000 พิโคฟารัด และจากความจริงที่ว่าในตัวเก็บประจุแรงสูงจะมีค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งของผลตอบสนองแรงดันสูงรูปขึ้น การแก้ปัญหาทำได้โดยต่อความต้านทานหน่วง  $R_d$  อนุกรมเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งค่า  $R_d$  นี้ประมาณค่าได้โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_d \approx \sqrt{4 L/C}$$

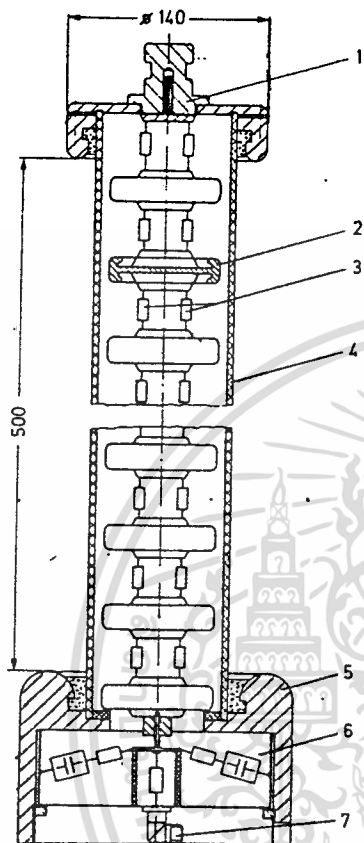
เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าสแตต  
L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

### 3.4.3) ลักษณะที่สำคัญของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าแรงดันสูง

หน้าที่สำคัญของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงก็คือ ใช้กำเนิดแรงดันกระแสตรง ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจुरองกระแสใช้ในการกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และใช้เป็นตัวโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ซึ่งได้กล่าวมาบ้างแล้วในหัวข้อ 3.4.1, 3.4.2 มาพิจารณาส่วนประกอบของตัวเก็บประจุซึ่งได้แก่ ชนิดของสารไดอิเล็กตริก โดยปกติทั่วไปจะใช้กระดาษฉนวนขุ่นน้ำมันแบบหลาย ๆ ชั้น โดยความหนาของสารไดอิเล็กตริกจะอยู่ในลำดับไมโครเมตร คือ 50...100 ไมโครเมตร อิเล็กโตรดที่ใช้เป็นอลูมิเนียมฟอยล์แบบบาง ๆ เมื่อเราต้องการตัวเก็บประจุที่มีแรงดันบางส่วน (partial voltage) มีค่าหลาย ๆ กิโลโวลต์ เราจะนำตัวเก็บประจุซึ่งเกิดจากการพันของสารไดอิเล็กตริก โดยมีอลูมิเนียมฟอยล์เป็นอิเล็กโตรดมาต่ออนุกรมกันเป็นจำนวนมาก ทำเป็นชุด ๆ และวางลงในภาชนะ (ตัวหุ้ม) ที่เป็นฉนวนภาชนะจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ภายในบรรจุน้ำมันซึ่งเป็นฉนวนและระบายความร้อน ส่วนภาชนะที่เป็นของเหลวสังเคราะห์หรือการฉนวนที่เป็นก๊าซก็จะทำในลักษณะเช่นเดียวกับการฉนวนน้ำมัน ส่วนใหญ่เราจะใช้พลาสติกฟอยล์แทน กระดาษฉนวนเพราะเกิดค่าความสูญเสียน้อยกว่า เทคโนโลยีปัจจุบันการผลิตตัวเก็บประจุสามารถผลิตได้ โดยค่าโวลต์ต่อชุดขององค์ประกอบประมาณเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และเมื่อต้องการโวลต์ที่สูงขึ้นก็จะนำเอาแต่ละชุดมาต่ออนุกรมกันหลายชุด ในการผลิตตัวเก็บประจุโดยอาศัยการฉนวนที่เป็นเซรามิกซ์ดังรูป 3.19 ซึ่งจุ่มลงในอากาศหรือน้ำมัน แต่ข้อเสียของการฉนวนเซรามิกซ์ก็คือ การลดลงของแฟคเตอร์การแผ่กระจาย (dissipation factor) เมื่อความถี่การใช้งานสูงขึ้น จากรูปที่ 3.19 เป็นอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกซ์ ซึ่งมีผลตอบสนอง (T) = 6 นาโนวินาที และใช้ได้กับแรงดันอิมพัลส์ได้สูงถึง 200 กิโลโวลต์ การใช้ก๊าซอัดความดันเป็นฉนวนเพื่อผลิตตัวเก็บประจุที่มีความสูญเสียต่ำก็สามารถทำได้ดังรูป 3.20 ซึ่งเป็น ก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 3.5 บาร์ มีค่าแฟคเตอร์การแผ่กระจายต่ำกว่า 10<sup>-5</sup> ใช้ได้กับระดับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 100 กิโลโวลต์ ส่วนคุณสมบัติของตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ควรมีลักษณะดังนี้คือ มีค่าอินดักแตนซ์ตกค้าง (residual inductance) น้อย ๆ และขณะที่มันคายประจุ จะต้องทนต่อแรงทางกลและแรงทางไฟฟ้าได้ดี

ปัจจุบันการผลิต condenser ที่ใช้ เช่น ของยี่ห้อ "ABB" ในประเทศไทยมีค่าเอาก์พสูงสุด คือ 480 กิโลโวลต์, 60 เฮริทซ์ หรือ 400 กิโลโวลต์, 50 เฮริทซ์ แรงดันสูงถึง 22 กิโลโวลต์ ซึ่งสามารถดูได้จากภาคผนวก 2

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



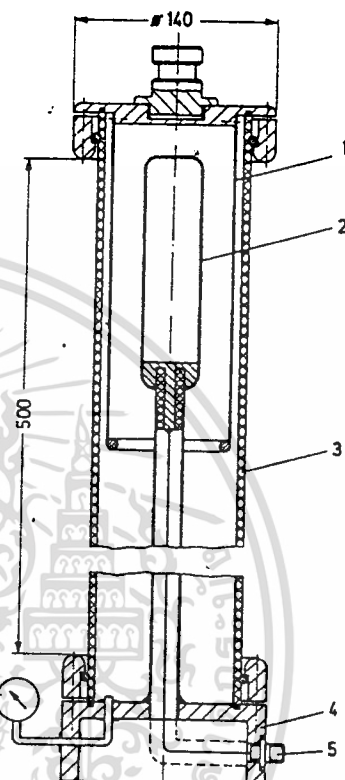
รูปที่ 3.19

เซรามิกซ์คาปาซิเตอร์

ใช้ในระบบโวลต์เตจดีไวเซอร์

วัดแรงดันอิมพัลส์ขนาดสูงสุด 200 กิโลโวลต์

- 1) ขั้วต่อแรงดันสูง
- 2) เซรามิกซ์คาปาซิเตอร์
- 3) ความต้านทานหน่วง
- 4) หลอดฉนวน
- 5) ฐาน (โลหะทำหน้าที่เป็นขั้วดิน)
- 6) ส่วนแรงดันต่ำ
- 7) ขั้วต่อสายเคเบิลวัด



รูปที่ 3.20

คาปาซิเตอร์ฉนวนแบบก๊าซอัดความดัน (SF<sub>6</sub>)

ใช้กับแรงดันสูงถึง 100 กิโลโวลต์

ขนาด 26 นิโคฟวาร์ด

- 1) ขั้วต่อแรงดันสูง
- 2) อีเลคโตรดที่ใช้วัด
- 3) หลอดฉนวน
- 4) ฐาน (โลหะที่ทำหน้าที่เป็นขั้วดิน)
- 5) ขั้วต่อสายเคเบิลวัด
- 6) มาโนมิเตอร์

### 3.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider)

โวลต์เตจดีไวเดอร์แบ่งการใช้งานตามชนิดของแรงดันสูงที่จะวัด คือ

#### ก) โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับ

การวัดแรงดันสูงกระแสสลับโดยทั่วไปจะวัดด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเป็นส่วนใหญ่

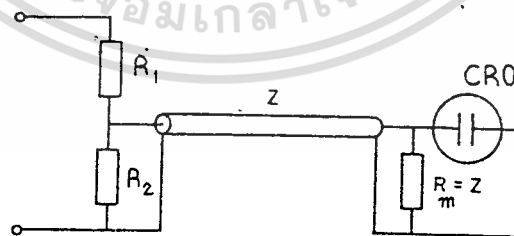
#### ข) โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสตรง

การวัดแรงดันสูงกระแสสลับโดยทั่วไป จะวัดด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานภาคแรงสูง และแรงต่ำคือ  $R_1$  และ  $R_2$  ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนแรงดัน  $a$  คือ

$$a = (R_1 + R_2) / R_2$$

การออกแบบเลือกขนาดความต้านทานจะใช้เงื่อนไขที่ว่า ความต้านทานต้องมีค่าโอห์มสูงมากพอ เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่แรงดันกำหนดไม่ควรเกิน 1 มิลลิแอมป์ เป็นความต้านทานภาคแรงสูง

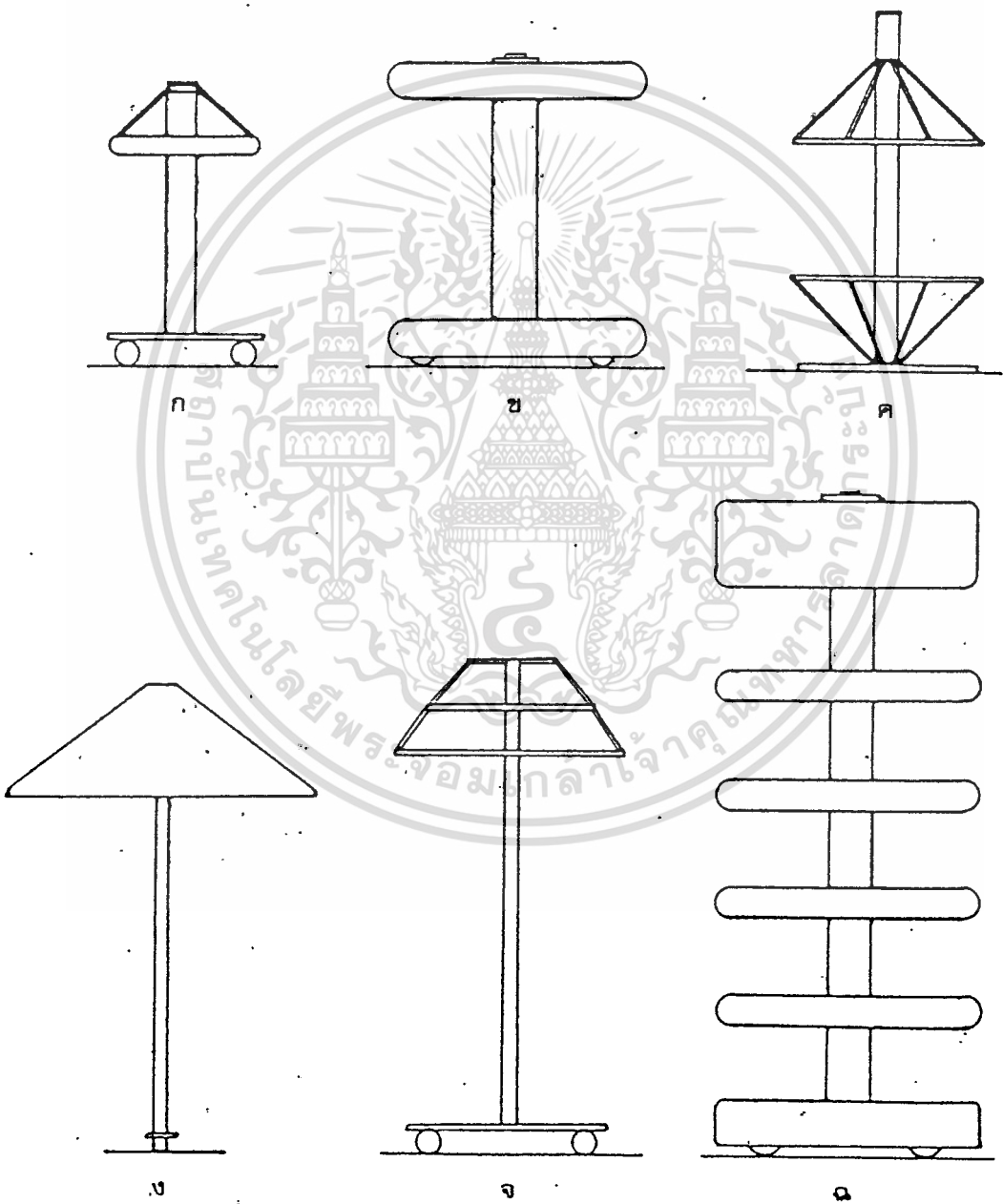
การต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ระบบการวัดโดยใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้น จะวัดแรงดันจากส่วนที่เป็นภาคแรงดันต่ำด้วยเครื่องวัด แม้ว่าจะเป็แรงดันต่ำก็ตามก็ไม่สามารถที่จะใช้เครื่องวัดเข้าไปวัดโดยตรงได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน จำเป็นต้องต่อวงจรด้วยสายเคเบิลวัด เพื่อไม่วักรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนยท์า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้

นำแรงดันขาออกที่ต้องการวัดไปเข้าเครื่องวัดในระยะที่ห่างไกลพอสมควร และโดยที่วัดต้องใช้เครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูง และสัญญาณแรงดันที่ต้องการวัดมีความถี่สูง จะเป็นเหตุให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับที่จุดต่อของสายเคเบิลกับเครื่องวัด ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดแรงดัน จึงจำเป็นต้องใส่แม่ซึ่งอิมพีแดนซ์ (matching impedance) ที่มีค่าโอห์มเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลวัดที่ปลายสายก่อนเข้าเครื่องวัด ดังในรูป 3.21 ส่วนการปรับปรุงเวลาตอบ



รูปที่ 3.22 ไวลเตจดีไวเดอร์แบบมีลักษณะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนองให้ดีขึ้นนั้น ไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัว จึงมีการโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่หลากหลายแบบดังในรูป 3.22 รูป ก. เป็นซีลด์อิลเลกโตรดตามมาตรฐานบีเอส มีลักษณะเป็นวงแหวนตัวนำติดตั้งตอนบนแต่ต่ำกว่าระดับบนสุดของโวลเตจดีไวเดอร์ รูป ข. และ จ. เป็นซีลด์อิลเลกโตรดออกแบบโดย Berger มีลักษณะเป็นวงแหวนตัวนำติดตั้งที่ตอนบนและล่างหรือติดตั้งเป็นช่วง ๆ ตลอดความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ รูป ค. เป็นซีลด์อิลเลกโตรดตามแบบของ Kuffel มีลักษณะเป็นซี่ ๆ เชื่อมติดกับวงแหวนติดตั้งทั้งตอนบนและล่างของโวลเตจดีไวเดอร์ รูป ง. เป็นซีลด์อิลเลกโตรดแบบกรวย รูป จ. เป็นอิลเลกโตรดที่มีลักษณะแบบรูป ก. แต่มีชั้นมากขึ้นติดตั้งตอนบนของโวลเตจดีไวเดอร์

### ค) โวลต์เตจดีไคเดอรวัดแรงดันสูงอิมพัลส์

โวลต์เตจดีไคเดอรวัดแรงดันอิมพัลส์ อาจจะเป็นแบบความต้านทานซึ่งเหมาะสำหรับแรงดันฟ้าผ่า อีกแบบหนึ่งคือ แบบตัวเก็บประจุ ซึ่งเหมาะนำไปใช้ในถาวรวัดอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตซ์ ซึ่งแต่โวลต์เตจดีไคเดอรวัดแรงดันอิมพัลส์แบบความต้านทานมีความเหมาะสมที่สุดที่จะพัฒนาและสร้างขึ้น เนื่องจาก

- 1) หลักการของโวลต์เตจดีไคเดอรวัดแรงดันอิมพัลส์เป็นแบบง่าย ๆ การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นทำได้ง่ายกว่า และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาขั้นต่อไปได้อย่างดี
- 2) สามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองดีตามต้องการได้ง่าย โดยเพียงแต่เลือกใช้ค่าความต้านทานและออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสม การปรับปรุงผลตอบสนองอาจทำได้โดยเพียงแต่เพิ่มซีลด์อิลเลกโตรดประกอบที่ตอนบนของโวลเตจดีไวเดอร์
- 3) องค์ประกอบวงจรหาได้ง่ายกว่า ราคาถูกกว่าแบบที่ต้องใช้คาปาซิเตอร์ เพราะคาปาซิเตอร์ที่มีคุณภาพดีเหมาะกับการใช้วัดแรงดันสูง ความถี่สูง ค่าความสูญเสียเปล่าน้อย และเสถียรในดัดแปรที่ต่ำ ราคาจะแพงมาก
- 4) ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีต่ออัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานน้อยกว่าแบบอื่น ๆ ทำให้ไม่มีปัญหาซับซ้อนในทางปฏิบัติมากนัก

### 3.5.1) เทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ช้อยกันทั่วไป คือ การวัดด้วยช่องว่างทรงกลม (sphere gap) และการวัดด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ (voltage divider)

#### 1) การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม อาศัยการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศภายในช่องว่างทรงกลม แรงดันเบรกดาวน์ระหว่างช่องว่างทรงกลมขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม และสภาวะอากาศรอบ ๆ ทรงกลม การวัดแรงดันโดยใช้ช่องว่างทรงกลมมีลักษณะสมบัติดังนี้ คือ

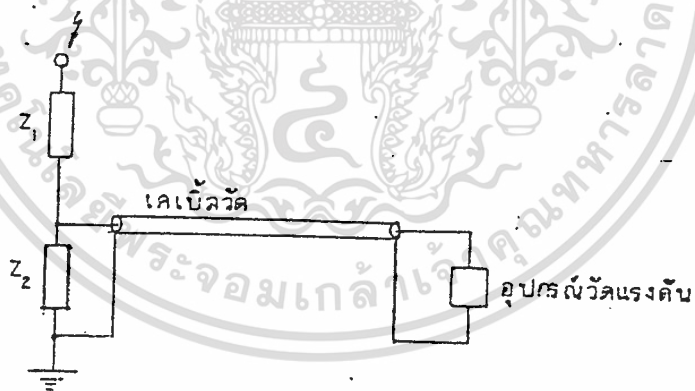
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก) ใช้วัดได้ทั้งแรงดันกระแสตรง กระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์
- ข) มีความถูกต้องเที่ยงตรง  $\pm 3\%$
- ค) เป็นถาวรวัดค่ายอดแรงดันเท่านั้น
- ง) ค่าแรงดันที่วัดได้ที่สภาวะทดลองต้องปรับไปที่สภาวะมาตรฐาน
- จ) ค่าที่ถูกต้องได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง

เนื่องจากการวัดด้วยช่องว่างทรงกลมไม่มีตัวชี้ จึงไม่สะดวกในการใช้งาน แต่เหมาะสำหรับใช้เปรียบเทียบกับอุปกรณ์วัดแรงดันสูงอื่น

2) การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้ต่ำพอที่จะใช้อุปกรณ์วัดแรงดันต่ำวัดได้ โวลเตจดีไวเดอร์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงอนุกรมกับอิมพีแดนซ์แรงต่ำ ดังรูปที่ 3.23 ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูง จะต่ออยู่กับสายแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายหนึ่งของภาคแรงต่ำ ปลายอีกข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำต่อลงดิน แรงดันที่ตกคร่อมภาคแรงต่ำจะต่อ ไปยังอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำด้วยเคเบิลวัด



รูปที่ 3.23 วงจรทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์

- $Z_1$  คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง
- $Z_2$  คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ เป็นวิธีการวัดโดยตรงสะดวกและรวดเร็ว สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำ ความถูกต้องของการวัดขึ้นกับความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดและอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงหรือได้รับผลกระทบจากความร้อน ไม่วากรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้กดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

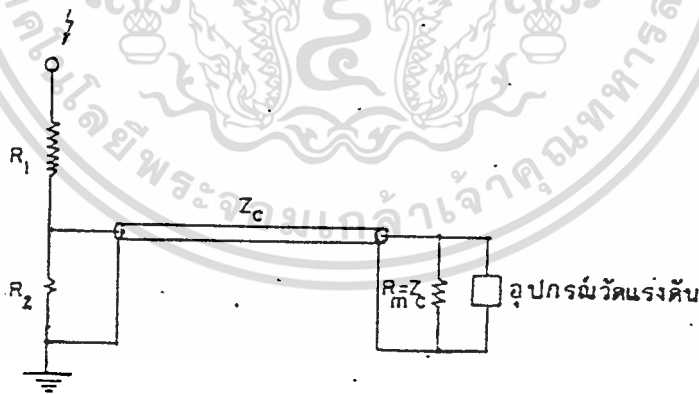
โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิด สามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้ดังนี้ คือ

- ก) แบบความต้านทาน (resistor voltage divider)
- ข) แบบตัวเก็บประจุ (capacitor voltage divider)
- ค) แบบผสม (mixed voltage divider)
- ง) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (damped capacitive voltage divider)

ก) โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดนี้มีทั้งในย่านความถี่สูง และย่านความถี่ต่ำเป็นความต้านทาน ดังรูปที่ 3.24 ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดหนืดให้เกิดความเหนียวนำต่ำแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดนี้ ใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่าหนึ่งร้อยกิโลโวลต์ เหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัดแรงดันสูงอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจากความความจุสเตรลงดิน จึงนิยมใช้วัดไม่เกิน 2,300 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.24 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

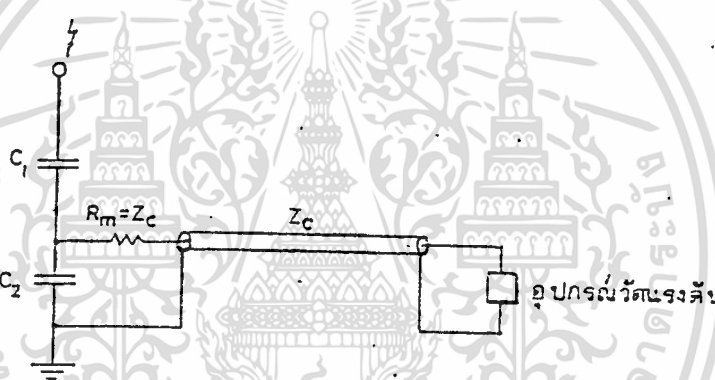
- $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง
- $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
- $R_m$  คือ ความต้านทานแมชชีงของเคเบิลวัด
- $Z_c$  คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้มีอิทธิพลต่อความถี่ของสัญญาณ และภาคแรงต่ำเป็นแบบตัวเก็บประจุ ดังรูป 3.25

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุย้อยหรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุย้อยจะใช้ตัวเก็บประจุย้อยมาต่ออนุกรมกัน ให้ได้ค่าความจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุย้อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมันหรือแบบเซรามิกส์ เป็นต้น ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบก๊าซอัดความดัน มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น ก๊าซอัดความดันที่ใช้ อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ( $SF_6$ )



รูปที่ 3.25 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

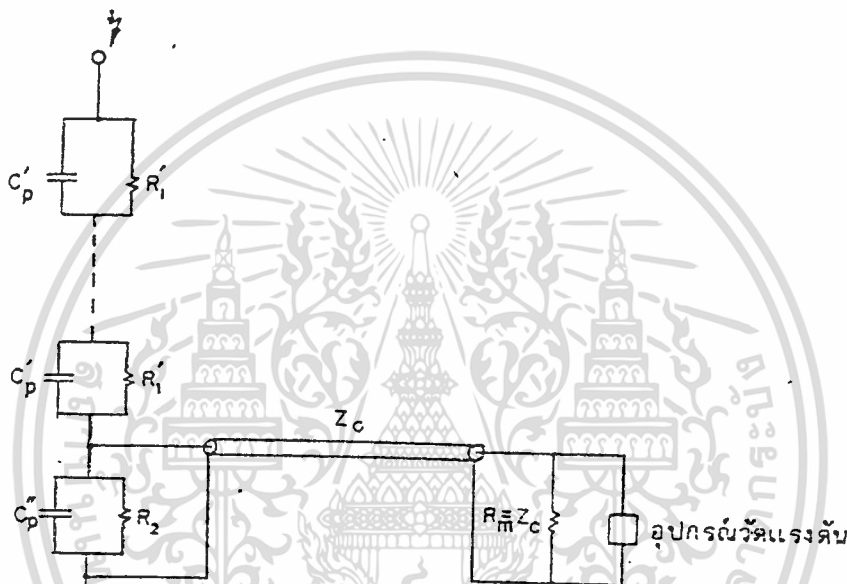
- $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง
- $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ
- $R_m$  คือ ความต้านทานแมชชีงของเคเบิลวัด
- $Z_c$  คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดนี้ เมื่อใช้วัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเกิดการแกว่งอย่างมาก แต่ถ้าใส่ความต้านทานแมชชีงและความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม ร่วมกับตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ที่เป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่นด้วยก๊าซอัดความดัน จะให้ผลตอบสนองและเวลาตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันที่คงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ ใช้วัดได้ทั้งแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค) โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม

โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ ดัดแปลงมาจากโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจุย่อยขนาดเข้ากับความต้านทาน เพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ผลตอบแทนจะดีขึ้น เมื่อตัวเก็บประจุขนาดที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่าของความจุสเตรลงดิน และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน วงจรทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.26 โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้จะเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุขนาดที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป



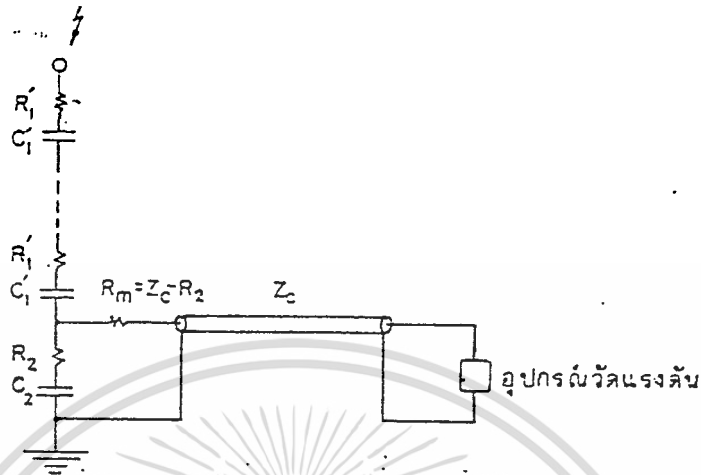
รูปที่ 3.26 โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม

- $R_1$  คือ ความต้านทานย่อยในภาคแรงสูง
- $C_p'$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยขนานในภาคแรงสูง
- $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
- $C_p$  คือ ตัวเก็บประจุขนานในภาคแรงต่ำ
- $R_m$  คือ ความต้านทานแมชชีงของเคเบิลวัด
- $Z_c$  คือ เลี้ยวอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

### ง) โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ ประกอบด้วย ความต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 3.27 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวโวลเตจดีไวเดอร์ ถ้าเลือกใช้ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ก็ให้ผลตอบแทนที่ดี แม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

$R_1$  คือ ความต้านทานอนุกรมย่อย ในภาคแรงสูง

$C_1$  คือ ตัวเก็บประจุย่อย ในภาคแรงสูง

$R_2$  คือ ความต้านทานอนุกรมภาคแรงต่ำ

$C_2$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

$R_m$  คือ ความต้านทานแมชชีงของเคเบิลวัด

$Z_c$  คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

3.5.2) วงจรมูลฐานของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

วงจรมูลฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์แสดงไว้ในรูป 3.26

ระบบวัดแรงดันจะเริ่มจากจุดต่อระหว่างวัสดุทดสอบ กับความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูงไปจนถึงอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำ อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่าง ๆ กัน ดังต่อไปนี้

1) ความต้านทานหน่วง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่ง (oscillation) ที่ภาะกรานเขียน เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในสายนำแรงสูงกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงที่ใช้จะเป็นแบบที่มีค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ความต้านทานหน่วงนี้อาจจะต่อไว้ที่ปลายขาเข้าของสายนำแรงสูงดังรูปที่ 3.28 หรืออาจจะต่อไว้ที่ขาเข้าของโวลเตจดีไวเดอร์ก็ได้ ถ้าต่อไว้ที่ขาเข้าของสายนำแรงสูงเรียกระบบวัดว่า "ระบบสามองค์ประกอบ" (three component system) ถ้าต่อไว้ที่ขาเข้าของโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงจะถือเป็นส่วนหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์ และเรียกระบบวัดนี้ว่า "ระบบสององค์ประกอบ"

นอกจากนี้ทั้งนี้ทั้งนั้น การเลือกใช้อุปกรณ์วัดแรงดันอิมพัลส์จะต้องคำนึงถึงประโยชน์ด้านราคา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(two component system) ถ้าสายนำแรงสูงมีความยาวมาก การต่อความต้านทานหน่วงแบบระบบสามองค์ประกอบ โดยใช้ค่าความต้านทานหน่วงเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำแรงสูง จะช่วยลดการแกว่งที่เกิดขึ้นในภาวะทรานเซียน อันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมชกันของสายนำแรงสูงกับวงจรกำเนิดแรงดัน และโวลเตจดีไวเดอร์

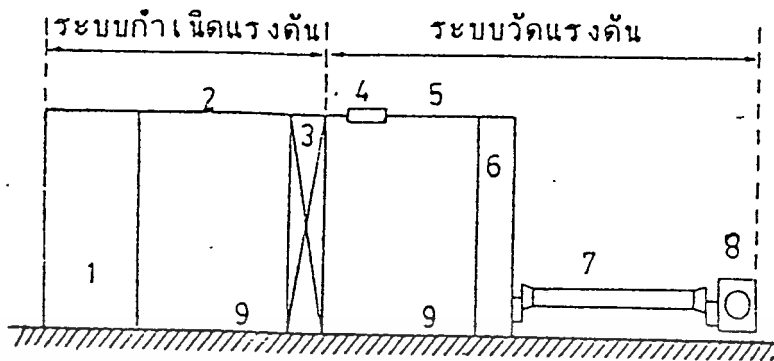
2) สายนำแรงสูงที่ต่อระหว่างวัสดุทดสอบ กับโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปจะยาวเท่ากับความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์หรือวัสดุทดสอบ เพื่อให้ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์ลดลง สายนำแรงสูงต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อวงจรวัดแรงดันได้ และต้องไม่ยาวเกินไปจนทำให้เกิดการล่าช้าของสัญญาณมากเกินไป

3) โวลเตจดีไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้อยู่ในย่านที่เครื่องวัดแรงดันต่ำสามารถวัดได้

4) สายเคเบิลวัดแรงดัน ทำหน้าที่นำแรงดันที่ปลายขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์มายังเครื่องวัดแรงดันต่ำ และแยกเครื่องวัดแรงดันต่ำให้ห่างจากโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดสัญญาณรบกวนที่จะมีต่อเครื่องวัดแรงดันต่ำ สายเคเบิลวัดเป็นชนิดใช้งานกับความถี่สูง มีการลดทอนสัญญาณน้อยและเป็นแบบโคแอกเซียล (coaxial)

5) เครื่องวัดแรงดันต่ำ อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป เครื่องวัดนี้มักจะอยู่ในห้องที่มีชิลด์โลหะ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก เว้นแต่ได้ออกแบบให้มีชิลด์ป้องกันสัญญาณรบกวนในตัว

6) สายดิน ทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อลดแรงดันตกในสายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่น ทองแดงแผ่นบาง



รูปที่ 3.28 วงจรพื้นฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงอิมพัลส์

1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2 คือ สายนำแรงสูงจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไปยัง  
วัสดุทดสอบ

3 คือ วัสดุทดสอบ

4 คือ ความต้านทานหน่วงในสายนำแรงสูง

5 คือ สายนำแรงสูง

6 คือ โวลต์เกจไวเตอร์

7 คือ เคเบิลวัด

8 คือ เครื่องวัดแรงดันต่ำ

9 คือ สายดิน

### 3.5.3) ลักษณะสมบัติที่สำคัญของระบบวัด

ระบบวัดที่ดีนั้นจะมีลักษณะสมบัติดังนี้ คือ

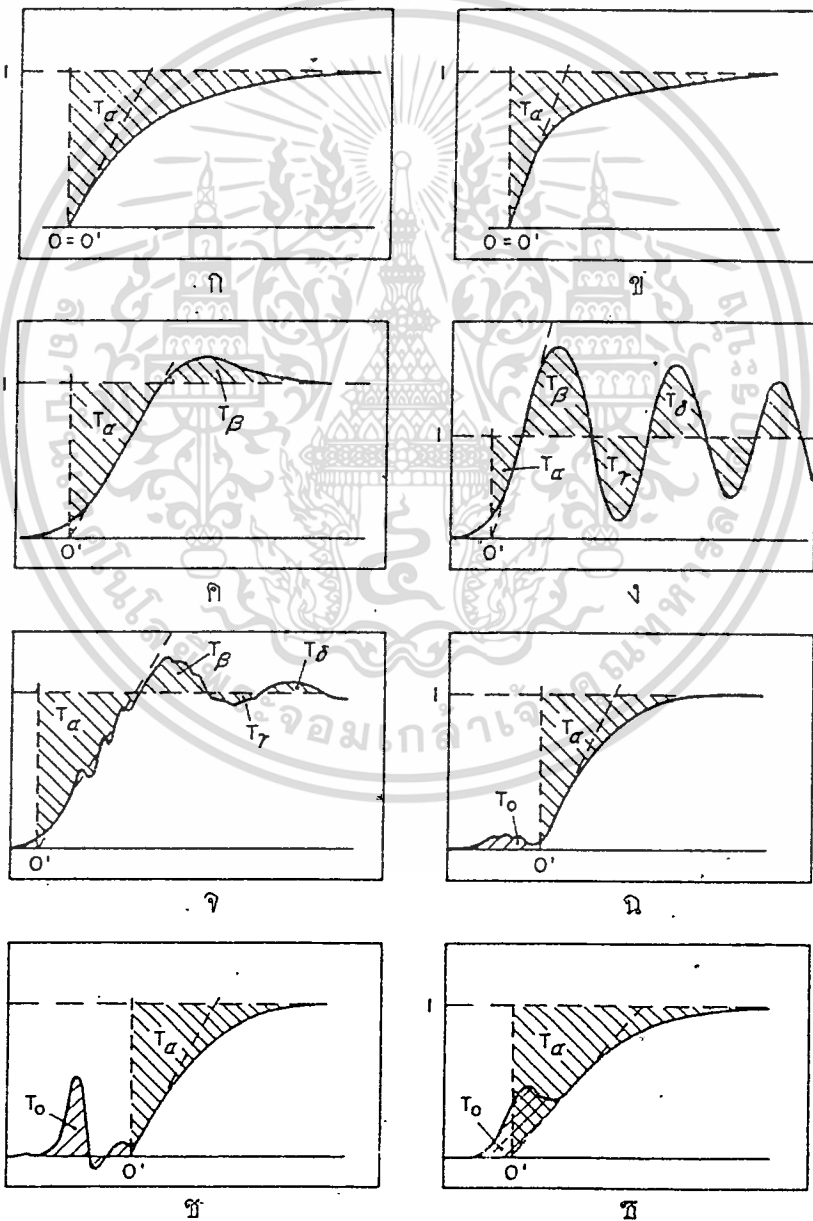
ก) มีผลตอบสนองต่อแรงดันรูปขั้นที่ตี มีการแกว่งในผลตอบสนองรูปขั้นน้อย และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (settling time) สั้น เมื่อเทียบกับเวลาขึ้น (rise time) ของแรงดันที่ต้องการวัด

ข) มีเวลาตอบสนองสั้น เพื่อจะได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค) อัตราส่วนแรงดันมีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน และไม่ขึ้นกับระดับแรงดัน ตั้งแต่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันที่กำหนด

3.5.3.1) ผลตอบสนอง

ผลตอบสนองเป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อจะบอกให้ทราบว่า โวลเตจดีไวเดอร์นั้นเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ประเภทใด การหาผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์อาจทำได้โดยใช้ผลตอบสนองรูปขึ้น อาจมีแบบต่าง ๆ ดังภาพพอสซิล โจนแกรมที่แสดงในรูป 3.29 ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของผลตอบสนองเหล่านี้จะบอกลักษณะสมบัติความถี่ของระบบการวัดไว้อย่างครบถ้วน คือ ความชันส่วนหน้าเป็นตัวบอกให้ทราบถึงขีดความสามารถความถี่เกิด ถ้ามีการแกว่งดังรูป ง. และ จ. จะแสดงถึงเรโซแนนซ์ (resonance) ของระบบวัด อิมปัลส์ของผลตอบสนองจะแสดงถึงอัตราส่วนของโวลเตจดีไวเดอร์ ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ดีหรือไม่ได้จากเวลาตอบสนอง มาตรฐานสากล ไออีซี ได้พิสูจน์หาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนอง  $T$  กับผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย  $g(t)$  ในเชิงคณิตศาสตร์ไว้ว่า

$$T = \int_0^{\infty} (1-g(t)) dt \quad \dots\dots (3.10)$$

นั่นคือ เวลาตอบสนอง  $T$  จะเท่ากับผลรวมตามพีชคณิตของพื้นที่ระหว่างเส้นอิมปัลส์ขึ้นหนึ่งหน่วยกับผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย ฉะนั้นจากออสซิลโลแกรมผลตอบสนองดังในรูป 3.29 ง. จึงอาจหาค่าเวลาตอบสนองได้จากสมการ

$$T = T_{\alpha} + T_{\beta} + T_{\gamma} \dots\dots \dots (3.11)$$

ผลตอบสนองรูปขึ้นดังกล่าวอาจทดลองหาได้ที่ระดับแรงดันสูงหรือต่ำก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ โดยสมมติเอาว่าองค์ประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์และวงจรมีคุณสมบัติเชิงเส้น เมื่อใช้กับแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดก็ยังมีคุณสมบัติความถี่สูงอย่างเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อเลือกตัวประกอบวงจรและออกแบบสร้างดีแล้วก็ถือได้ว่า โวลเตจดีไวเดอร์มีลักษณะสมบัติเชิงเส้น

ในกรณีที่ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้นอาจเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ

ก) โครโน่า (corona) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันสูงมาก และทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน ฉะนั้นการออกแบบภาคแรงสูงที่ถูกต้องควรหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่แหลมคม หรือไส้ซีลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า หรือใช้น้ำมันฉนวน หรือใช้แก๊สอัดความดัน

ข) ผลกระทบจากความร้อนภายในตัวประกอบวงจร เช่น ตัวความต้านทานและตัวคาปาซิเตอร์ ตัวประกอบบางชนิดจะเปลี่ยนแปลงค่าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น เมื่ออุณหภูมิหรือแรงดันเปลี่ยนแปลงไป

การหาผลตอบสนองที่ระดับแรงดันสูงนั้นเหมาะที่จะใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์ ที่มีค่าเอกแรงดันที่กำหนดสูง ๆ (สูงกว่า 2MV) ทั้งนี้เพราะ โวลเตจดีไวเดอร์เหล่านี้จะมีค่าอัตราส่วนแรงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

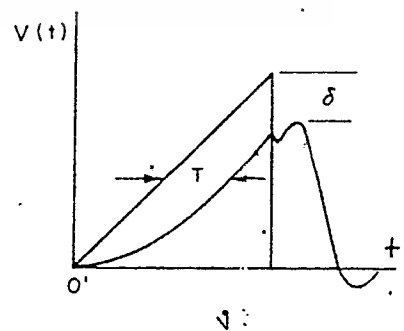
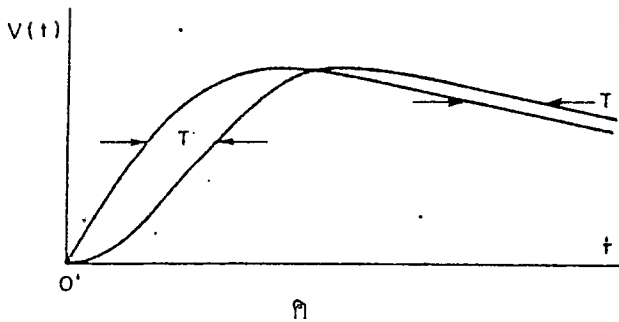
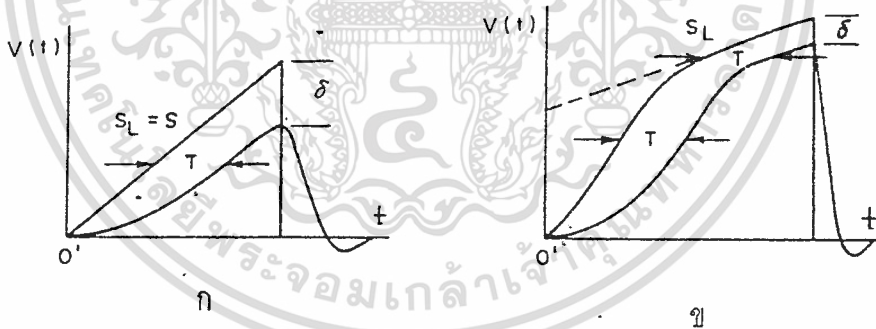
ต้นสูง ถ้าทดสอบด้วยระดับแรงต้นต่ำ จะทำให้ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ออกมาค่าน้อยค่าที่วัด ได้อาจผิดพลาดได้มาก การทดสอบหาผลตอบสนองที่แรงต้นสูงจะได้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง

เวลาตอบสนองจะมีผลต่อการวัดเวลาช่วงคลื่น และอิมพลิจูดของแรงต้นอิมพัลส์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นแรงต้นอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในรูป 3.30 แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดของแรงต้นอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาของคลื่นแรงต้นอิมพัลส์แบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก) ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอด  $\sigma_v$  คือ ความแตกต่างระหว่างค่ายอดของแรงต้นที่ป้อนกับค่าที่วัดได้จากระบบการวัด คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_v = S_L \cdot T \quad \dots\dots (3.12)$$

เมื่อ  $S_L$  = ความชันของแรงต้นที่ป้อนเข้า ไปก่อนเกิดการตัดคลื่น  
 $T$  = เวลาตอบสนองของระบบการวัด



1. รูปคลื่นแรงต้นที่ต้องการวัด

2. รูปคลื่นแรงต้นที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.30 ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากเวลาตอบสนอง ใ้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ก. เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้นรูป ข. คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น รูป ค. แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดการเพี้ยนก่อนถึงค่ายอดของแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้นในผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย (ดูรูป 3.29 ข, ช) และยิ่งแสดงให้เห็นด้วยว่าขณะที่วัดค่ายอดจะไม่ใช่เวลาเดียวกันกับขณะที่คลื่นตัด แต่จะล่าหลังอยู่เล็กน้อยซึ่งทำให้สมการ (3.12) ใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ตามการวัดนี้อาจจะเลยไม่ต้องคำนึงถึงได้ถ้ามีผลกระทบไม่มาก ในกรณีที่ผลกระทบมากจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบการวัดใหม่ การวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มดังในรูป ง. จะหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดจากสมการ (3.12) ไม่ได้ เพราะค่าความชันตรงจุดนั้นจะเป็นศูนย์ อันที่จริงค่ายอดของแรงดันจะคลาดเคลื่อนไปบ้างเหมือนกันแต่จะน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เป็แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ข) ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา  $\sigma_c$  คือ ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาของแรงดันที่วัดได้กับช่วงเวลาของแรงดันที่ต้องการวัด จากรูป 3.30 ก. เป็นกรณีที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาคือ  $\sigma_c = T$  แต่แรงดันแบบรูป 3.30 ข, ค และ ง. ไม่มีความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์ดังแบบรูป 3.30 ก. ในกรณีรูปคลื่นเต็มดังรูป 3.30 ง. นั้นความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา จะเกิดทั้งที่ตอนหน้าและตอนหางคลื่น แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบมากเมื่อวัดเวลาช่วงหน้าคลื่น

### 3.5.3.2) อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ หมายถึงอัตราส่วนแรงดันสูงที่หัวเข้าของสายนำไฟแรงสูงต่อแรงดันออกที่ปลายของเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัดนั่นคือ

$$a = V_1/V_2 \quad \dots\dots (3.13)$$

เมื่อ  $a$  = อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์

$V_1$  = แรงดันที่หัวเข้าของสายนำไฟแรงสูง

$V_2$  = แรงดันออกที่ปลายของเคเบิลวัด

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ดีต้องมีอัตราส่วนแรงดันคงที่ตลอดช่วงความถี่กว้าง และไม่ขึ้นกับระดับแรงดันตั้งแต่ค่าแรงดันต่ำจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์แบบใด ๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

- ก) โดยวิธีคำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ราบค่าจากการวัด
- ข) โดยการวัดแรงดันพร้อมกันทั้งขาเข้า  $V_1$  และขาออก  $V_2$  ของโวลเตจดีไวเดอร์
- ค) โดยใช้วงจรบริดจ์เทียบค่าแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์กับแรงดันขาออกของดีไวเดอร์มาตรฐานที่ปรับอัตราส่วนแรงดันได้
- ง) โดยวิธีเทียบกับระบบการวัดทราอัตราส่วนแรงดันแล้ว

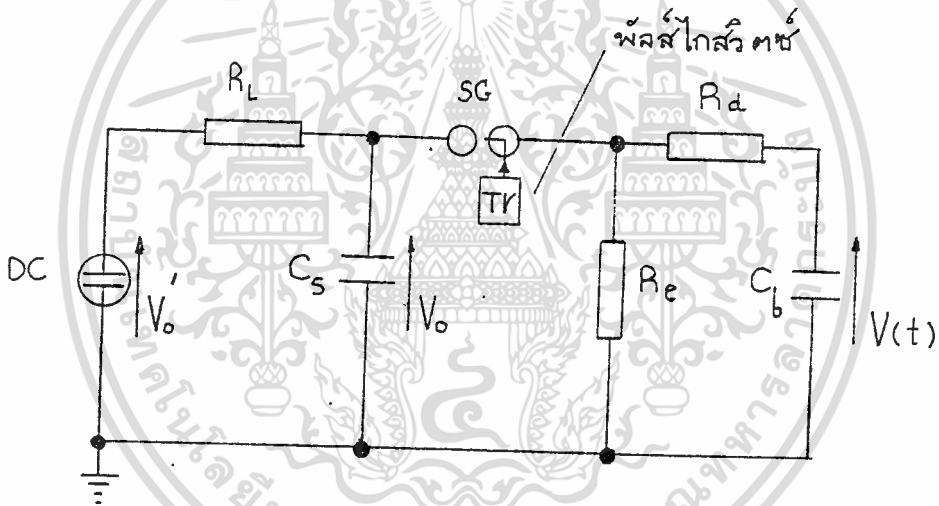
ทั้ง 4 วิธีใช้กันอยู่ วิธี ก. เหมาะสำหรับหาอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎี ซึ่งอาจแตกต่างไปจากเวลาใช้งานจริงได้ วิธี ข. และ ค. นั้นโดยมากทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ ๆ ไม่เกิน 500 โวลต์ ซึ่งอาจเป็นแรงดันไฟตรงหรือไฟสลับแล้วแต่ว่าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบใด ถ้าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานใช้ได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ แต่ถ้าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบคาปาซิเตอร์ต้องใช้แรงดันไฟสลับ และควรระมัดลองหาที่ความถี่ต่าง ๆ อย่างน้อย 2 ค่า เช่น ที่ความถี่ไฟฟ้ากำลัง 50 แฮร์ตซ์ และที่ 1 กิโลแฮร์ตซ์ ตามคำแนะนำของมาตรฐานสากลไออีซี ส่วนวิธี ง. ใช้ได้กับโวลเตจดีไวเดอร์ทุกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโวลเตจดีไวเดอร์แบบคาปาซิเตอร์และแบบผสม

## บทที่ 4

### สปาร์กแกป (Spark gap) และ ไกสวิตช์ (Trigger)

#### 4.1) บทนำ

แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า แรงสูงนั้นควรจะกำหนดหรือควบคุมได้ ทั้งนี้ เพื่อให้ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุ หรืออุปกรณ์ทดสอบหลาย ๆ ครั้งได้มีค่าคงที่ ซึ่งการควบคุมเราจะใช้ ไกสวิตช์ (Trigger) เป็นตัวเริ่มให้เกิดดีสชาร์จในสปาร์กแกปที่อยู่ในสปาร์กแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยสัญญาณอิมพัลส์ไก โดยการบังคับระยะไกล ดังรูปที่ 4.1 การใช้ไกสวิตช์บังคับให้เกิดสปาร์ก ตามที่กำหนดนี้จะช่วยให้การกระจายของแรงดันที่จ่ายออกน้อยลง นั่นคือ จะได้ค่าแรงดันทดสอบมีค่าคงที่ตามต้องการ และยังช่วยให้สามารถบังคับออสซิลโลสโคป เริ่มบันทึกภาพรูปคลื่นอิมพัลส์  $V(t)$  ได้ด้วย



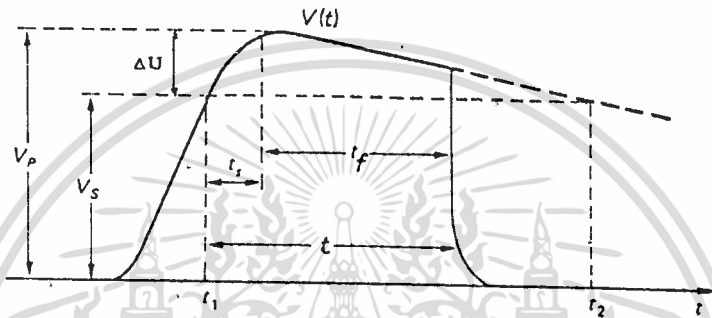
รูปที่ 4.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์มีไกสวิตช์

#### 4.2) เบรคดาวน์ของอิมพัลส์ (Breakdown of Impulse Voltage)

การเกิดเบรคดาวน์ของก๊าซในกรณีของแรงดันสถานะคงตัว (Steady state voltage) เช่น แรงดันกระแสตรงหรือ แรงดันกระแสสลับ ความถี่พลังงาน ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว ฉะนั้น แรงดันเบรคดาวน์จะเป็นฟังก์ชันของ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$  และช่วงแกป  $d$  เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การเกิด ไอออนในเซชันที่หนึ่งของทาว์นเซนด์ และ

$\beta$  คือ เป็นสัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโทด โดยการชนของไอออนบวก และ  $\eta$  เป็นสัมประสิทธิ์การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุล แต่ในกรณีที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ แรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น นั่นก็หมายความว่า สนามไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดของแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะคงตัวควรจะเป็นเบรคดาวน์ได้ แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรคดาวน์ จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะเวลาหนึ่งจึงจะเกิดขึ้นได้ ช่วงระยะเวลานั้นตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะคงตัว แล้วไปจนถึงเวลาเบรคดาวน์เกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ เวลาที่ช้ากว่านี้เรียกว่า "เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์"  $t_u$  ดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์

#### 4.2.1) เวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ (Time lag of breakdown)

จากความจริงที่ว่าเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นได้นั้น ทุกกรณีจะต้องมีอะวาลันซ์อิเล็กตรอน ซึ่งต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นอย่างน้อย หนึ่งอิเล็กตรอน และต้องเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะที่พอเหมาะ คือ มีพลังงานพอที่จะทำให้เกิด ไอออนไนเซชัน สร้างอะวาลันซ์ต่อไปได้ นั่นคือ จะเริ่มต้นด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าที่สูงพอ และมีระยะห่างอะโนดอย่างน้อยเท่ากับระยะอะวาลันซ์วิกฤต  $X_c$  ในกรณีของแรงดันสถานะคงตัวสนามไฟฟ้าจะคงอยู่เป็นเวลาเหลือพอที่จะหาหรือพบอิเล็กตรอนอิสระ เริ่มต้นได้ง่ายและมีมากงอกจากธรรมชาติ เช่น อิเล็กตรอนอิสระจากรังสีคอสมิก เป็นต้น อย่างไรก็ตามในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสนามไฟฟ้าคงตัวอยู่ในช่วงเวลาเพียงไมโครวินาที ฉะนั้น อิเล็กตรอนอิสระที่พอเหมาะจากธรรมชาติ อาจจะไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊บที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เบรคดาวน์อาจจะไม่เกิดขึ้นก็ได้ ถ้าหากไม่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เช่น การฉายรังสี เป็นต้น อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในปริมาณแก๊บกระจายเป็นสถิติ ฉะนั้น เวลานั้นตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์ เพิ่มสูงเท่าแรงดันสถานะคงตัว  $U_s$  (รูปที่ 4.2) จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นจึงเป็นสถิติด้วยเรียกว่า "เวลาล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสัณฐาน" ,  $t_s$  (Static time lag) เมื่อพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นแล้วจะต้องใช้เวลาในการโอออไนเซชัน สร้างอะวาลันซ์ตามกระบวนการกลไกเบรคดาวน์ เพื่อให้ได้จำนวนอิเล็กตรอนตามเงื่อนไข เรียกว่าเวลาในช่วงนี้ว่า "เวลาล่าช้าก่อตัว"  $t_f$  (Formative time lag) จึงสรุปได้ว่าเวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์ประกอบด้วย  $t_1 = t_s + t_f$  แรงดันเบรคดาวน์อิมพัลส์  $U_p$  จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรคดาวน์สถานะคงตัว  $U_0$  อัตราส่วนของแรงดัน  $U_p/U_0$  ต่อแรงดัน  $U_0$  คือ  $U_p$  เรียกว่า "อัตราส่วนอิมพัลส์" (impulse ratio) โดยปรกติค่าอัตราส่วนอิมพัลส์นี้จะมีค่าสูงกว่าหนึ่ง ยกเว้นในกรณีของโคโรนาเบรคดาวน์ ที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และมีผลของโคโรนาคงสภาพ (Stabilized Corona) ทำให้เกิดแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่า เมื่อไม่โคโรนา ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์จะต่ำกว่าหนึ่ง แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบ ลักษณะของอิเล็กโตรด หรือส่วนของอุปกรณ์จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดโคโรนา ฉะนั้นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ ด้วยแรงดันอิมพัลส์ (BIL) จึงต้องมีค่าสูงกว่า แรงดันสถานะอยู่ตัว ดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 1 ตารางที่ 1.1 และ 1.2

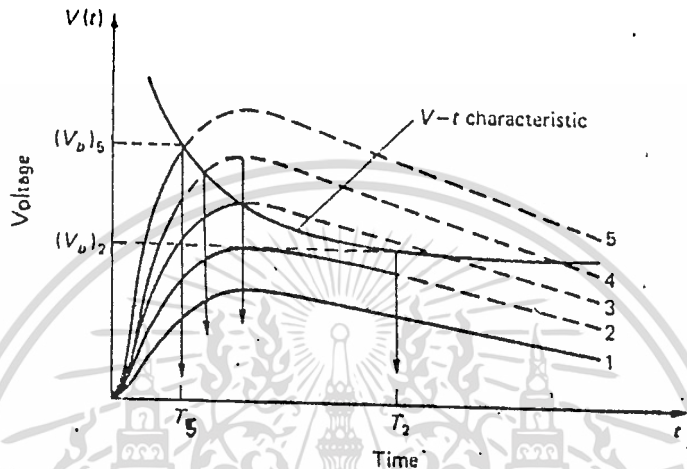
ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรคดาวน์  $t_1$  และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ป้อน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเพ้าผ่า ถ้าหากความชัน (Steepness) คือ  $du/dt$  ยังมีค่าสูง เวลาช่วงหนาคสั้น หรือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอดแล้วลดลงก็ยิ่งสั้น ย่อมหมายถึง ช่วงเวลาที่สนามไฟฟ้าคงอยู่นั้นยิ่งสั้นไปด้วย โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนก็ยิ่งลดน้อยลงไป และเวลาที่ใช้ก่อตัวอะวาลันซ์ก็อาจจะไม่พอ โอกาสที่จะเกิดเบรคดาวน์ก็ลดน้อยลง เพื่อให้มีโอกาสเบรคดาวน์สูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นคือต้องป้อนแรงดันให้สูงขึ้น

โอกาสที่จะเกิดการเบรคดาวน์มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความชันของแรงดันที่ป้อน ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติ อันหนึ่งของแก๊พนั้น เรียกว่า "ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา" (Voltage time Characteristic) ซึ่งจะกล่าวต่อไป

#### 4.2.2 ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา

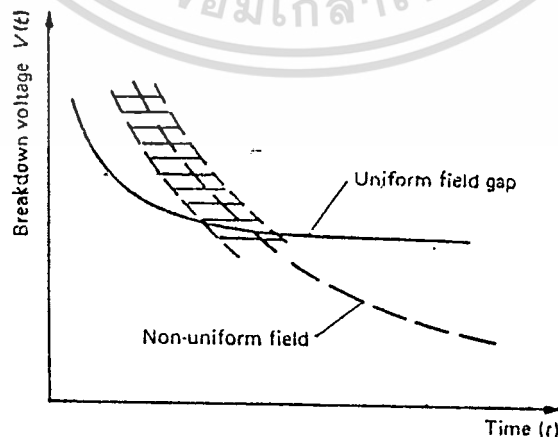
จากที่กล่าวมาแล้วเป็นการชี้ให้เห็นถึงผลของช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันมีผลอย่างมาก ต่อแรงดันเบรคดาวน์ของแก๊พ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ การสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพื่อก่ออะวาลันซ์ให้ได้ค่าวิกฤตจะต้องใช้เวลา (เวลาก่อตัวอะวาลันซ์,  $t_f$ ) ถ้าช่วงเวลาแรงดันคงอยู่มีค่าน้อย จำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้า สูงขึ้นเพื่อให้สตรีมเมอร์เกิดขึ้นได้ ตามเงื่อนไขในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์สูงขึ้น ถ้าหากช่วงเวลาคงตัวของแรงดันสั้นลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนจะดีขึ้น ถ้าใช้กับแรงดันมีช่วงเวลาสั้นลง ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ความคงทนของไดอิเล็กตริกอาจแสดงได้ด้วย

ลักษณะเส้นเซตอิมพัลส์ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ กับเวลาเบรคดาวน์ หรือเวลาคลื่นตัดได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ ที่มีความชันต่าง ๆ กันแล้ววัดค่าแรงดันเบรคดาวน์  $V_b$  ถ้าคลื่นตัดที่ช่วงหางคลื่น ค่ายอดคือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ แต่ถ้าคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น ค่าแรงดันเบรคดาวน์ คือ แรงดัน ณ จุดที่เกิดเบรคดาวน์ทุกค่าแรงดันจะได้ค่าเวลาคลื่นตัด  $T_b$  และเมื่อนำค่า  $V_b$  และ  $T_b$  มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ก็จะได้ลักษณะเส้นเซตอิมพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะเส้นเซตอิมพัลส์

จากรูปที่ 4.3 จะกล่าวได้ว่าในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ลักษณะเส้นเซตอิมพัลส์จะลดลงในช่วงเวลา  $t$  น้อย ๆ (น้อยกว่า 1 ไมโครวินาที) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นลักษณะเส้นเกือบคงตัวเป็นเส้นระดับ แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมาก ลักษณะของเส้นเซตอิมพัลส์จะลดลงเมื่อช่วงเวลา แรงดันเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงจะรวดเร็ว หรือช้าขึ้นอยู่กับ ลักษณะของอิลคโตรด เช่น ในรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะเส้นเซตอิมพัลส์ของแกปทรงกลมกับ แกปของแท่งกลมปลายแหลม



รูปที่ 4.4 ลักษณะเส้นเซตอิมพัลส์ของแกปทรงกลม และแกปแท่งกลมปลายแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ระหว่างแถบของทรงกลม กับแถบของแท่งกลมปลายแหลม อธิบายได้ด้วยผลของเวลาล้าช้าของการเกิดเบรคดาว์น  $t_1$  ในช่วงเวลาน้อย ๆ ความชันของรูปคลื่นมาก หรือช่วงเวลาแรงดันค่าตัวน้อย เวลาน้อยจนใกล้เคียงกับเวลาที่ใช้ในการสร้างอะวาลันซ์ ฉะนั้น  $t_1 = t_u + t_f$  จึงมีผลอย่างมากต่อค่า  $U_p$  ที่เวลามาก ๆ เหลือเพื่อ ( $t \gg t_1$ ) เวลาของ  $t_1$  จะไม่มีผลต่อ  $U_p$  ฉะนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะของเส้นเขตอิมพัลส์จึงขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ 2 ประการคือ

- 1) ปริมาตรของแถบยังผล
- 2) สนามไฟฟ้ากระจาย (Field Distribution) ของแถบ

จากรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่าในกรณีแถบของทรงกลมกับแถบของแท่งกลมปลายแหลม อย่างแรกย่อมมีปริมาตรของแถบยังผล (ปริมาตรที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอที่จะทำให้เกิดการชนไอออนในเซชันได้) มากกว่าอย่างหลังจำนวนอิเล็กตรอนที่มีโอกาสเริ่มต้นสร้างอะวาลันซ์มีมากกว่าและสนามไฟฟ้ากระจายของแถบทรงกลม  $E(X)$  ยิ่งลดลงไม่มากพอที่ระยะห่างออกไปจากผิวทรงกลม โอกาสสร้างอะวาลันซ์วิกฤติมีมากและง่ายกว่า ในช่วงของเวลาน้อย ๆ แถบทรงกลมจึงใช้ความเครียด สนามไฟฟ้าน้อยกว่า น้อยกว่าแถบปลายแหลม เพราะแถบของปลายแหลมยังมีปริมาตรมีผลน้อยกว่า และสนามไฟฟ้ากระจายจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ ระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด กล่าวคือ สนามไฟฟ้าจะมีความเครียดสูงแต่เฉพาะใกล้ ๆ ผิวอิเล็กโทรดเท่านั้น เพื่อให้สามารถสร้างอะวาลันซ์วิกฤติได้จากปริมาตรยังผลน้อยกว่า และเวลานั้นจึงต้องป้อนแรงดันเข้าไปสูงกว่า เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าสูงพอ แต่ที่เวลามาก ๆ คือ  $t \gg t_1$  เรื่องเวลาจึงไม่มีความหมายในเรื่องหรือมีผลต่อการสร้างอะวาลันซ์วิกฤติ แต่จะมีผลของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แถบปลายแหลมจะมี  $E_m$  สูงกว่า คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  ต่ำกว่า ค่า  $U_p$  จึงต่ำกว่า  $U_1 = E_1 d \eta^*$  เมื่อ

$$U_1 = \text{แรงดันเริ่มต้น}$$

$$E_1 = \text{ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันเริ่มต้น } U_1$$

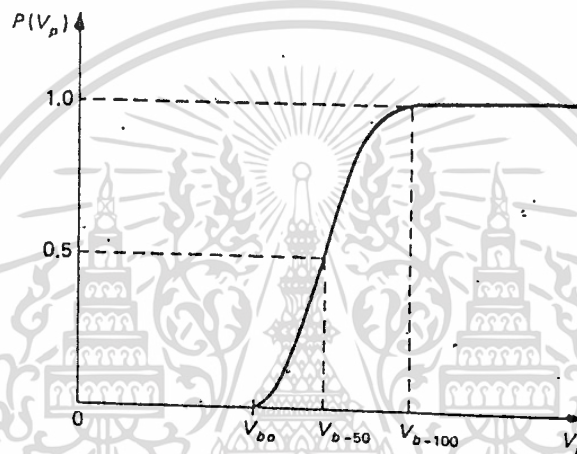
ความรู้เกี่ยวกับลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์จะมีประโยชน์ ในการออกแบบเกี่ยวกับจนวนระบบไฟฟ้าแรงสูง และการเลือกแถบป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้แก่อุปกรณ์ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลงกำลัง เป็นต้น

#### 4.2.3) ความนำจะเกิดเบรคดาว์น

ในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า แรงดันอิมพัลส์จะเกิดเบรคดาว์น ขึ้นได้ เมื่อมีแรงดันเกิน  $\Delta U = (U_p(t) - U_p)$  มีค่าสูงพอที่เวลาล้าช้าของการเกิดเบรคดาว์น  $t_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังอยู่ในช่วงของเวลาแรงดันเกิดขึ้น นั่นคือ  $t_1 < (t_2 - t_1)$  เวลา  $t_2$  มากน้อยเปลี่ยนแปลงไปตามสถิติ แต่ก็ยังอยู่ในช่วงแน่นอน แต่ละค่าของแรงดันอิมพัลส์  $U_p$  เมื่อป้อนซ้ำแล้วซ้ำอีกจะมีการเกิดเบรคดาวน์ เป็นเปอร์เซ็นต์ค่าหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันเข้าไว้ทั้งหมด ซึ่งจัดเป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิด  $P$  (Probability of breakdown) แรงดันอิมพัลส์ค่าอื่น ๆ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรคดาวน์  $P(U_p)$  อาจจะได้จากการป้อนแรงดันค่าหนึ่งให้กับแก๊ส เป็นจำนวนครั้งมาก ๆ เช่น 20 ครั้ง 100 ครั้ง หรืออาจถึง 1000 ครั้ง จำนวนครั้งที่เกิดเบรคดาวน์ในแก๊สหารด้วย จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันการกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์

- $U_{p, 50\%}$  คือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ หมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อน
- $U_{p, 100\%}$  คือ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ ที่พอดีทำให้เกิดเบรคดาวน์ทุกครั้ง
- $U_{p, 0\%}$  เป็นค่ายอดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ ซึ่งเรียกค่าแรงดันนี้ว่า "ค่าความคงทนอยู่ต่อแรงดันอิมพัลส์" (Impulse Withstand Voltage) ใช้เป็นค่ากำหนดการทดสอบการฉนวนที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า "BIL" (BASIC IMPULSE INSULATION LEVEL) ดูได้จากตารางที่ 1.1 และ 1.2 ในบทที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4) แฟลเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน

จะพิจารณาผลของแฟลเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวนของ ก๊าซ โดยจะกำหนดระยะแกปให้มีค่าเท่ากับ  $d$  แฟลเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่

1) รูปลักษณะอิเล็กโตรด

รูปลักษณะอิเล็กโตรด จะมีผลต่อแรงดันเบรคดาวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะ สนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก

2) ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

จากความสัมพันธ์ของระบบอิสระ  $\lambda$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสมบูรณ์  $T$  และเป็นสัดส่วนกลับกับความดันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แรงดันเบรคดาวนจะแปรตามความหนาแน่นของก๊าซ แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ลักษณะของแรงดันเบรคดาวน ในเทอมความดันของก๊าซจะมีลักษณะสูงสุด - ต่ำสุด (Maximum - minimum characteristics)

3) ผลของความชื้นในอากาศ

4) ผลของสิ่งเปื้อนอะเปื้อนและน้ำฝน

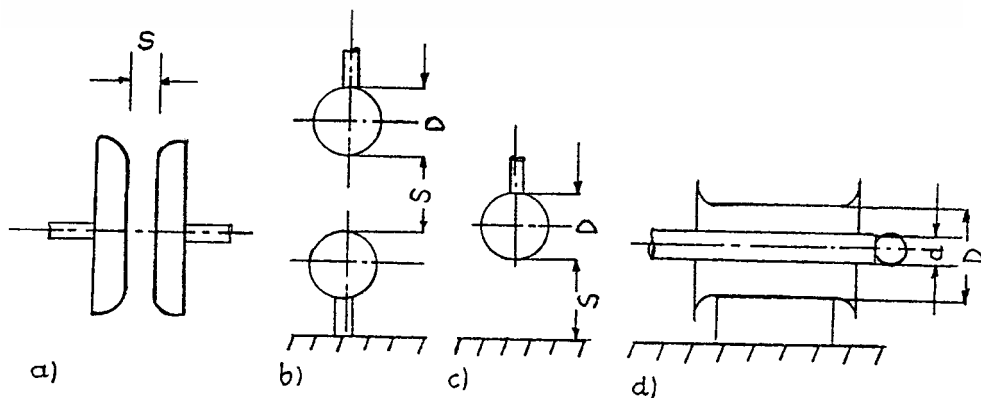
5) ผลของรูปร่างแรงดัน

6) ผลของประจุค้างที่มีต่อแรงดันเบรคดาวนต่างชั่ว

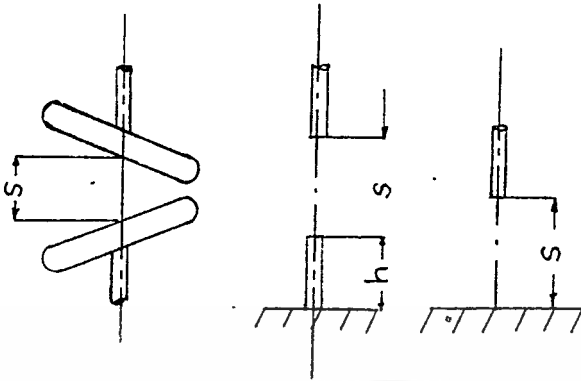
7) ผลของแผ่นฉนวนบางกั้น

4.3) แกป (GAPS)

แกปจะมีคุณสมบัติที่สำคัญในวงจรไฟฟ้าแรงสูง คือ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า หรือ ขึ้นอยู่กับเวลา แกปที่มี 2 อิเล็กโตรดส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้ารูปที่ 4.6 คือ แกป 2 อิเล็กโตรดที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่



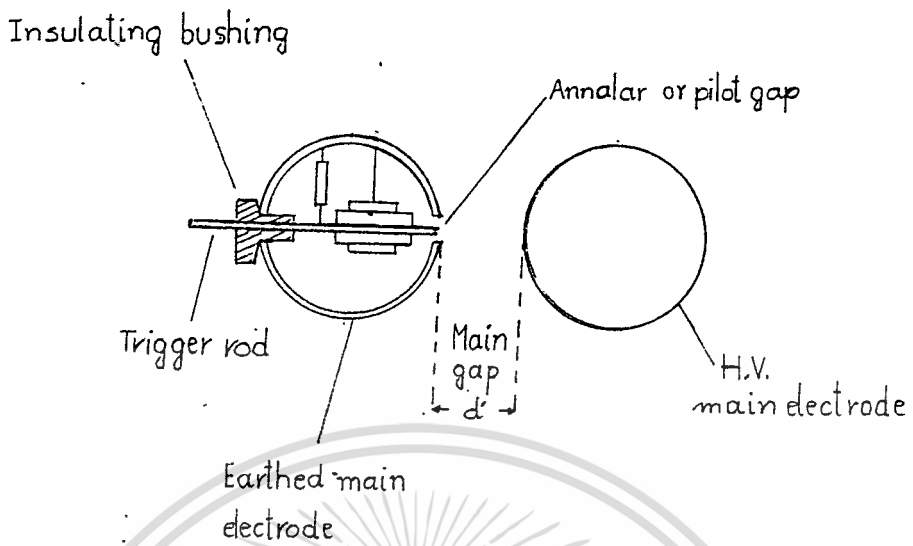
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



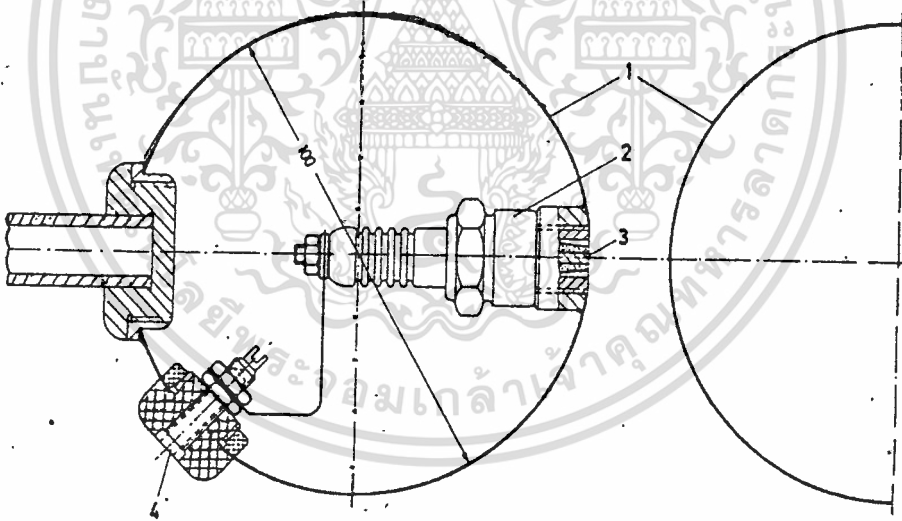
รูปที่ 4.6 ชนิดของแฉก 2 อีเลคโตรด

- a) เฟลท - เฟลท (Rogowski profile)
- b) ทรงกลม - ทรงกลม
- c) ทรงกลม - ระนาบ
- d) ทรงกระบอก โคเอ็กเซียล
- e) ทรงกระบอกวางแนวตัดขวาง
- f) แท่งรีด - แท่งรีด
- g) แท่งรีด - ระนาบ

ในเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยส่วนใหญ่ จะใช้ทรงกลม-ทรงกลมเป็นแฉก โดยสามารถปรับให้ใกล้หรือห่างจากกันได้ แต่ต้องไม่ให้ระยะแฉก ห่างกันเกินกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมอีเลคโตรดทรงกลมส่วนใหญ่ ทำมาจากโลหะทองเหลืองเป็นทรงกลมข้างในกลวงมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยเอาแผ่นทองเหลืองมาทำเป็นรูปทรงกลม สองครึ่งมาประกบกันแล้วมีซี่อดยื่นออกมาจากทรงกลมเพื่อรับไฟจากแหล่งป้อนแรงดัน ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งเป็นทริกกาตรอน สปาร์คแฉก



รูปที่ 4.7 ทริกกาตรอน สปาร์คแกป



รูปที่ 4.8 สามอิเล็กโตรดแกปใช้กับระบบแรงดันสูงสุด 140 กิโลโวลต์

- 1) อิเล็กโตรดหลัก (Main electrodes)
- 2) สปาร์คกิ้ง ปลั๊ก (Sparking - plug)
- 3) อิเล็กโตรดทริกเกอร์ (Trigger electrode)
- 4) จุดปลายสำหรับพัลส์ทริกเกอร์ (Terminal for trigger pulse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขนาดของอิเล็กโตรด นี้เราต้องการขนาดใดก็ได้แล้วแต่ขนาดของเครื่องกำเนิด แรงดันอิมพัลส์ที่เราจะสร้าง สปราร์คแกปโดยทั่วไปจะเป็นแกประหว่างทรงกลม ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันอัดประจุ  $C_u$  ถ้าต้องการเพิ่มหรือลดแรงดันอัดประจุก็ได้ โดยการเพิ่มหรือลดระยะแกป ที่ปลายทรงกลมด้านหนึ่งที่หันเข้าหากันจะเจาะรู เพื่อทำเป็นแกปช่วยทำให้เกิดสปาร์คที่แกปช่วยก่อนด้วยระบบไกสวิตช์ ส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปที่แกปช่วย แล้วทำให้เกิดสปาร์คที่แกปหลัก เป็นการกำหนดให้เกิดสปาร์ค เมื่อต้องการได้ และเป็นกำหนดให้ออสซิลโลสโคป ทำงานได้ทันด้วย

#### 4.3.1) การออกแบบสปาร์คแกป

สำหรับเป็นตัวสปาร์คเมื่อเกิดแรงดันเกินคร่อมระยะแกป นั่นคือเมื่อเกิดการสปาร์คระหว่างแกปหมายถึง การลัดวงจรระหว่างขั้วแรงสูงกับศักย์ดิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว ย่อมหมายถึง การทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์นั่นเอง ลักษณะของอิเล็กโตรดต้องเป็นแบบให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นั่นคือต้องเป็นวัสดุผิวเรียบ เป็นมัน ไม่สกปรกหรือเป็นสนิมง่ายและมีความแข็งเพียงพอ ไม่เกิดการละลายหรือทำให้ผิวขรุขระเมื่อเกิดประกายไฟขณะสปาร์ค ลักษณะของอิเล็กโตรดที่ใช้กันทั่วไปเป็นทรงกลม (sphere) หรือรูปทึบขอบมน (round shape) โดยทั่วไปกำหนดให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อตัวกลางเป็นอากาศน้อยกว่า  $25 \text{ kV/cm}$ . ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำทรงกลมใช้สูตรอย่างง่าย คือ

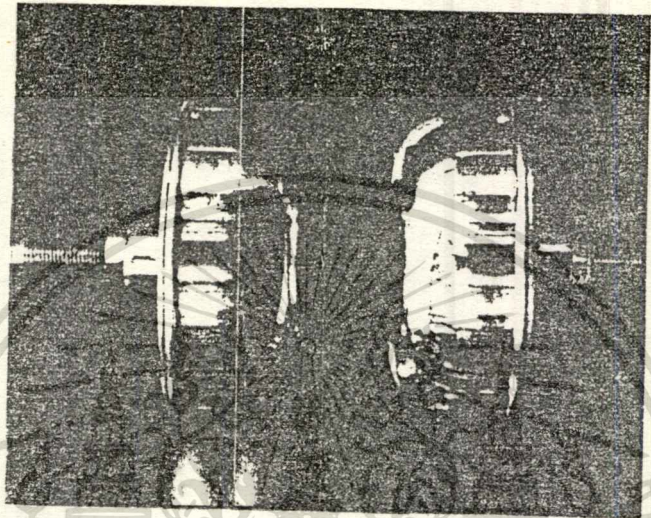
$$E = \frac{V}{r}$$

- เมื่อ  $E$  - ความเครียดสนามไฟฟ้า หน่วยเป็น  $\text{kV/cm}$ .  
 $V$  - แรงดันไฟฟ้าบนทรงกลม หน่วยเป็น  $\text{kV}$   
 $r$  - รัศมีของทรงกลม หน่วยเป็น  $\text{cm}$ .

สำหรับอิเล็กโตรดรูปทึบขอบมน ไม่มีกฎเกณฑ์อย่างง่ายในการคำนวณ แต่ในทางปฏิบัติให้ขนาดของอิเล็กโตรดใหญ่ ๆ และรัศมีความโค้งมาก ๆ จะทำให้ได้อิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ไม่เกิดโคโรนา (corona) อย่างแน่นอน แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมและความสวยงามด้วย

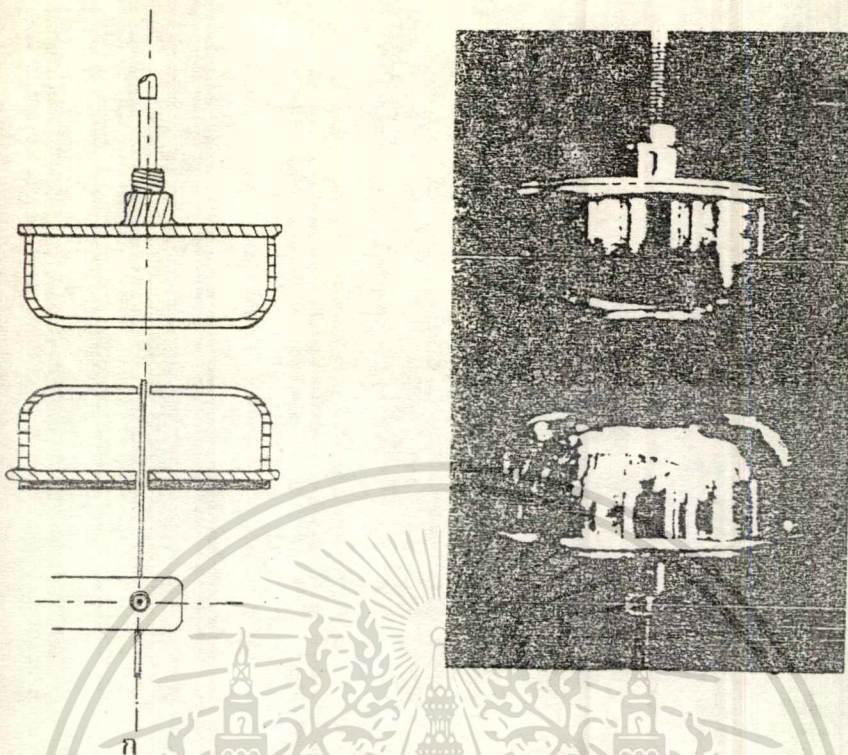
ในที่นี้เลือกใช้อิเล็กโตรดเป็นแบบรูปทึบขอบมน เพราะสามารถใช้ชิ้นน้ำสแตนเลส (Stainless) แทนได้ อิเล็กโตรดทรงกลมหาซื้อตามท้องตลาดยาก ถ้าทำเองราคาจะแพงมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของอีเลคโตรดที่ออกแบบสร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 4.9 โดยใช้ชั้นน้ำสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12.5 เซนติเมตร โดยกลึงฝาปิดส่วนปากชั้นแล้วยึดด้วยสกรูให้ฝาปิดติดกับตัวชั้น ส่วนตรงกลางของฝาปิดจะทำที่สำหรับใส่ก้านยึดแกป โดยทำเป็นเกลียวตัวเมียให้สามารถปรับระยะแกปขึ้นลงได้



รูปที่ 4.9 ลักษณะของแกปใช้อีเลคโตรดรูปชั้นขอบมน

และเราจะออกแบบให้มีแกปช่วย (Auxiliary gap) โดยเจาะรูตรงกลางชั้นที่ทำเป็นสปาร์คแกปให้หัวกระตุ่นที่ยึดอยู่บนฉนวนมีระยะห่างจากขอบรูปประมาณ 1 มิลลิเมตร หัวกระตุ่นจะได้รับสัญญาณกระตุ่นจากการบังคับภายนอกเกิดการสปาร์คที่แกปช่วยขึ้นเป็นผลทำให้เกิดสปาร์คแกปได้ แกปนี้เรียกว่าแกปมีตัวกระตุ่น (Triggered gap) ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แก๊พมีตัวกระตุ้น

ก. ลักษณะ โครงสร้าง

ข. การประกอบ

4.3.2) ลักษณะสมบัติที่สำคัญของแก๊พ

ลักษณะสมบัติของแก๊พอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติ 2 ประการ คือ พิสัยการกระตุ้น (Triggering range) และการกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด (Dispersion of chopping time)

1) พิสัยการกระตุ้น (triggering range)

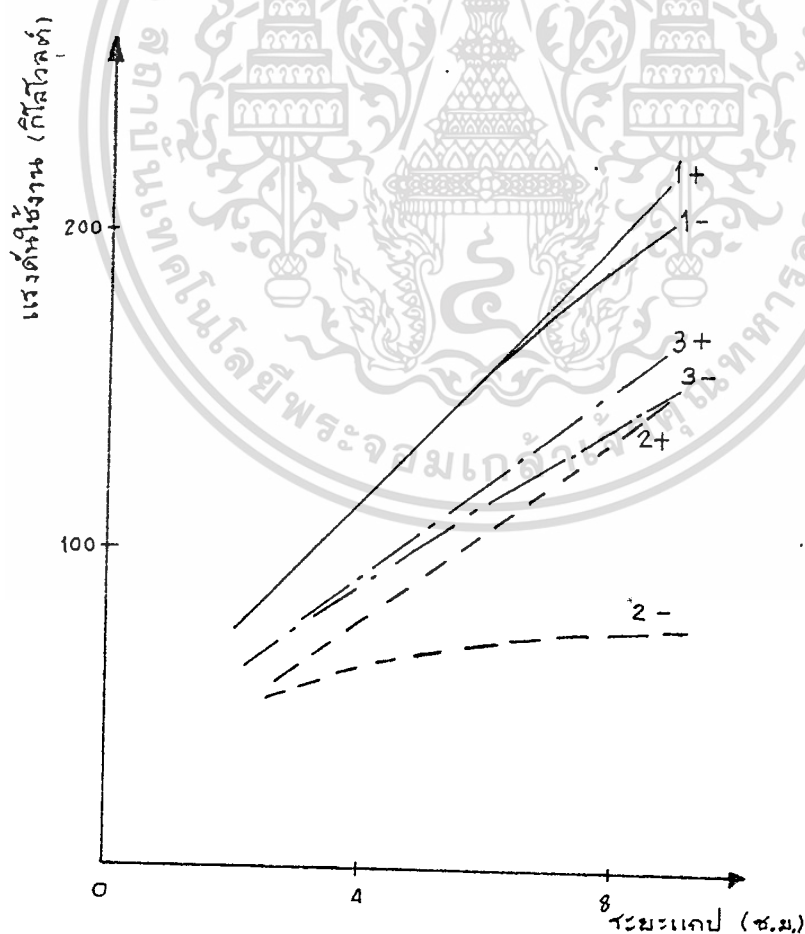
พิสัยการกระตุ้นเป็นช่วงของการกระตุ้นที่อยู่ระหว่างขีดจำกัดของ การกระตุ้นต่ำสุดของแก๊พที่สามารถทำให้แก๊พสปาร์คได้ เรียกว่าขีดจำกัดล่าง กับค่าของแรงดันใช้งานที่ทำให้แก๊พเริ่มสปาร์คได้เอง โดยไม่ต้องใช้ตัวกระตุ้นซึ่งเป็นขีดจำกัดบน พิสัยการกระตุ้นของแก๊พขึ้นอยู่กับแก๊พช่วย เป็นสำคัญ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าแรงดันเกินจะเกิดขึ้นกับแก๊พหลังจากเกิดการสปาร์คของแก๊พช่วย การสปาร์คของแก๊พจะเกิดจากผลของการกระตุ้นที่แก๊พ ซึ่งพอจะกล่าวได้เป็นสองลักษณะคือ

ก) การกระตุ้นที่เมนแก๊พ (main gap) เป็นการกระตุ้นที่เกิดจากการสปาร์คระหว่างอิเล็กโตรดของแก๊พ การกระตุ้นลักษณะนี้จะมีข้อดี คือ มีช่วงเวลาการสปาร์คของแก๊พสั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีการกระจายเวลาสปาร์คน้อย แต่มีข้อเสียในการที่จะใช้การกระตุ้นแบบนี้ เพราะต้องใช้แรงดันกระตุ้นสูง (ประมาณ 200 กิโลโวลต์) เมื่อจะใช้แรงดันกระตุ้นให้น้อยกว่านี้ต้องเปลี่ยนแก๊ปใหม่ให้เหมาะสมกับขนาดของแรงดัน ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการจัดระยะแก๊ปและขนาดของแก๊ป

ข) การกระตุ้นด้วยแก๊ปช่วย (auxiliary gap) เป็นการกระตุ้นที่เกิดจากการใส่ขั้วกระตุ้น แล้วทำให้เกิดการสปาร์คระหว่างปลายของขั้วกระตุ้น (Trigger pin) กับอิเล็กโตรดที่เมมแก๊ป การกระตุ้นลักษณะนี้มีข้อดีที่ว่าช่วงเวลากการสปาร์คของแก๊ปและการกระจายเวลาการสปาร์ค ไม่ขึ้นกับพลังงานที่ใช้กระตุ้น นอกจากนี้แรงดันกระตุ้นมีค่าต่ำกว่าวิธีแรก คือ จะใช้ประมาณ 8-10 กิโลโวลต์ ฉะนั้นจึงไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแก๊ป แก๊ปทุก ๆ อันจึงมีขนาดเท่ากันหมด

การกระตุ้นด้วยแก๊ปช่วยจะ ได้ผลเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันกระตุ้น ถ้าหากจัดให้ขั้วของแรงดันกระตุ้นตรงกันข้าม กับแรงดันใช้งานจะทำให้มีพิสัยการกระตุ้นกว้าง นอกจากนี้ขั้วของแรงดันใช้งานก็มีผลต่อพิสัยการกระตุ้น เพราะว่าถ้าแรงดันใช้งานเป็นขั้วลจะทำให้มีพิสัยการกระตุ้นมากกว่าแรงดันใช้งานที่เป็นขั้วบวกดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 พิสัยการกระตุ้นของแก๊ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1+ , 1- แรงดันเริ่มสปาร์คเมื่อ ไม่ใช้การกระตุ้นของแรงดันชั่วคราวและชั่วคราวตามลำดับ
- 2+ , 2- ชีตจำกัดล่างของการกระตุ้นสำหรับแรงดันใช้งานชั่วคราวและชั่วคราวตามลำดับ
- 3+ , 3- ชีตจำกัดล่างของการกระตุ้นสำหรับแรงดันใช้งานชั่วคราวและชั่วคราวเมื่อมีการกระจายเวลาไม่น้อยกว่า  $\pm 50$  นาโนวินาที

ลักษณะการกระตุ้นสามารถหาได้จากการทดลองกับแกป ในรูปที่ 4.11 เป็นรูปที่แสดงนิสัยการกระตุ้นของแกปทดลองกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าฟ้าชั่วคราวและชั่วคราว และให้เกิดคลื่นตัดที่คายอด ในแนวอนเป็นระยะแกปหน่วยเป็นเซ็นติเมตร ในแนวตั้งเป็นแรงดันใช้งานหน่วยเป็นกิโลโวลต์ มีค่าแรงดันสูงสุดประมาณ 240 กิโลโวลต์ กราฟเส้นหมายเลข 1+ แสดงแรงดันใช้งานชนิดชั่วคราวที่ป้อนให้แกปแล้วทำให้เริ่มต้นเกิดการสปาร์คของแกปเอง โดยไม่ต้องกระตุ้นแกป จะพบว่าที่ระยะแกปมีค่าต่ำ ๆ การสปาร์คของแกปจะเริ่มเกิดขึ้นโดยที่แรงดันใช้งานไม่สูงมากนัก ถ้าหากว่าระยะแกปเพิ่มมากขึ้น แรงดันใช้งานจะเพิ่มสูงมากขึ้นจึงทำให้เกิดการสปาร์คของแกป นั่นคือ กราฟเส้นหมายเลข 1+ จะแสดงให้เห็นว่าถ้าหากป้อนแรงดันใช้งานให้กับแกปเป็นชั่วคราวและไม่มีกระตุ้นแกป โดยที่แรงดันใช้งานและระยะแกปอยู่ภายใต้กราฟเส้นหมายเลข 1+ จะไม่ทำให้แกปเกิดการสปาร์ค หากแรงดันใช้งานและระยะแกปอยู่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 1+ จะทำให้แกปเกิดการสปาร์คได้ตลอด สำหรับกราฟเส้นหมายเลข 1- ก็เช่นเดียวกับกราฟเส้นหมายเลข 1+ แต่จะสังเกตเห็นว่าการเกิดสปาร์คของแรงดันใช้งานชั่วคราวมีมากกว่าชั่วคราว ดังนั้นที่อยู่ระหว่างเส้นหมายเลข 1- และเส้นหมายเลข 1+ หมายความว่าในขั้นที่ระหว่างนั้นแกปจะเกิดการสปาร์คด้วยแรงดันใช้งานชั่วคราวได้ แต่จะไม่เกิดการสปาร์คเมื่อแรงดันใช้งานเป็นชั่วคราว กราฟเส้นหมายเลข 2+ แสดงถึงขีดจำกัดการกระตุ้นล่างสุดขณะแรงดันใช้งานเป็นชั่วคราว หมายความว่าถ้าหากมีการกระตุ้นแกปในบริเวณนี้ที่ได้เส้นหมายเลข 2+ นี้ไม่ว่าจะอยู่ในระยะแกปและแรงดันใช้งานเท่าใดก็ตามแกปจะไม่สามารถเกิดการสปาร์คได้ ในทางตรงกันข้ามหากมีการกระตุ้นแกปในบริเวณนี้ที่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 2+ แต่อยู่ใต้กราฟเส้นหมายเลข 1+ ไม่ว่าจะอยู่ในระยะแกปและแรงดันใช้งานเป็นชั่วคราวเท่าใดก็ตาม สามารถทำให้เกิดการสปาร์คของแกปได้ แต่ถ้าอยู่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 1+ ขึ้นไปแล้วไม่มีความจำเป็นที่จะต้องกระตุ้นแกปเพราะแกปสามารถสปาร์คได้เองดังที่กล่าวมาแล้ว ในกรณีของกราฟเส้นหมายเลข 2- ก็เช่นเดียวกับกราฟเส้นหมายเลข 2+ คือ ถ้าระยะแกปและแรงดันใช้งานเป็นชั่วคราวแล้ว กระตุ้นแกปภายใต้กราฟเส้นหมายเลข 2- นี้จะไม่ทำให้เกิดการสปาร์คของแกป แต่เมื่อกระตุ้นแกปขณะที่ระยะแกปและแรงดันใช้งานเป็นชั่วคราวอยู่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 2- ไปจนถึงกราฟเส้นหมายเลข 1- จะทำให้เกิดการสปาร์คของแกป และถ้าเลขกราฟเส้นหมายเลข 1- สปาร์คแกปจะเกิดขึ้นเองโดยไม่ต้องกระตุ้น ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าพื้นที่ระหว่างกราฟเส้นหมายเลข 2- ไปจนถึงกราฟ

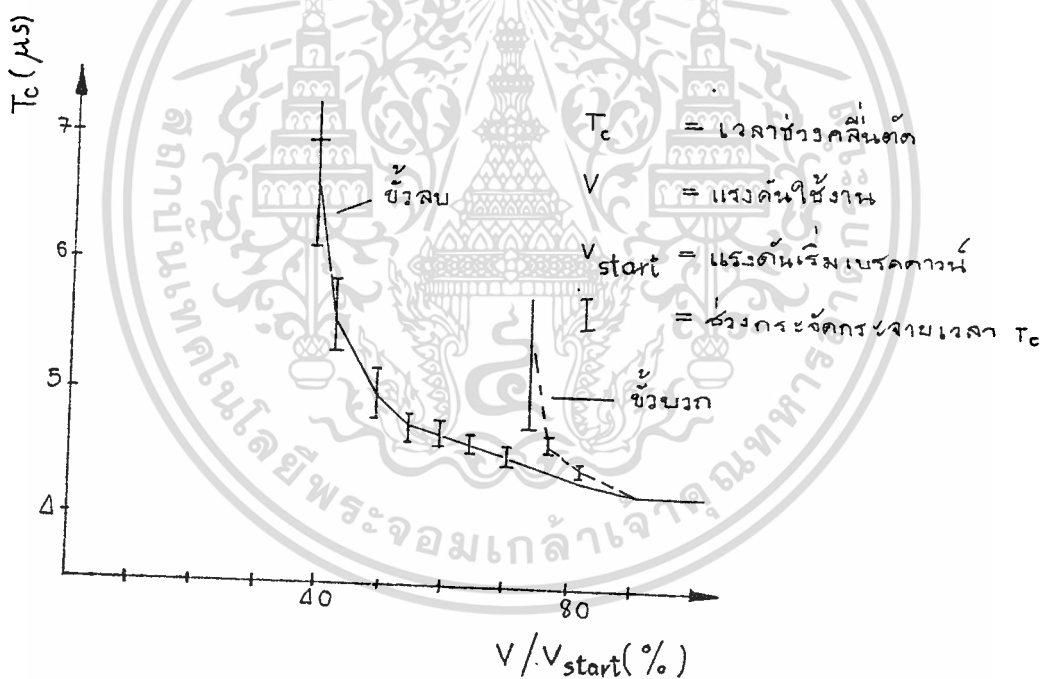
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นหมายเลข 1- มีมากกว่าพื้นที่ระหว่างกราฟเส้นหมายเลข 2+ ไปจนถึงกราฟเส้นหมายเลข 1+ ซึ่งหมายความว่าพิสัยการกระตุ่นขณะแรงดันใช้งาน เป็นขั้วลบมีมากกว่าขณะแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวก ในกรณีของกราฟเส้นหมายเลข 3+ และกราฟเส้นหมายเลข 3- จะมีความหมายเหมือนกับกราฟเส้นหมายเลข 2+ และกราฟเส้นหมายเลข 2- แต่มีข้อแตกต่างในเรื่องการจำกัดการกระจายเวลาการตัด ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $\pm 50$  นาโนวินาที จะทำให้พิสัยการกระตุ่นของกราฟทั้งสองเส้นน้อยกว่ากราฟเส้นหมายเลข 2+ และกราฟเส้นหมายเลข 2- เหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะในการทดสอบหม้อแปลงด้วยรูปคลื่นตัด ควรมีการจำกัดกระจายเวลาการตัดน้อยกว่า  $\pm 100$  นาโนวินาที จึงจะทำให้ช่วงเวลาการตัดของรูปคลื่นตัดในครั้งที่หนึ่งกับครั้งที่สองมีค่าใกล้เคียงกัน

## 2) การกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด (dispersion of chopping time)

เวลาช่วงคลื่นตัดและการกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดของสปร้าคแกปจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน ชนิดขั้วของแรงดัน และระยะห่างของแกปดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 เวลาช่วงคลื่นตัด  $T_c$  และการกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด

ในรูปที่ 4.12 แสดงเวลาช่วงคลื่นตัดและการกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดแกนในแนวนอน แสดงแรงดันใช้งานเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแรงดันใช้งาน ที่ทำให้แกปสปร้าคได้เอง โดยไม่ต้องใช้ตัวกระตุ้น แกนในแนวตั้งแสดงเวลาช่วงคลื่นตัดเป็นไมโครวินาที กราฟเส้นเต็มแสดงแรงดันใช้งานเป็นชนิดขั้วลบ กราฟเส้นประแสดงแรงดันใช้งานเป็นชนิดขั้วบวก ถ้าแรงดันใช้

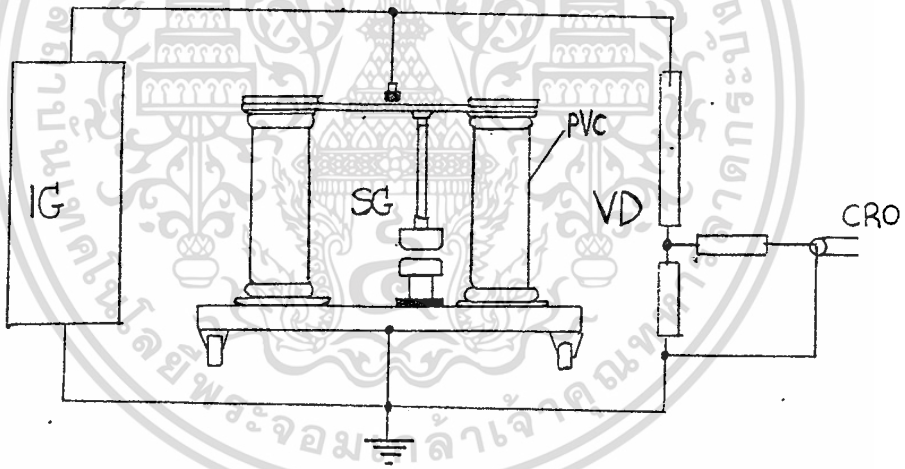
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานเป็นขั้วลบที่ค่าแรงดันต่ำ ๆ ช่วงเวลาการตัดจะมากและการกระจายเวลาการตัดมาก  
ตั้งเส้นในแนวตั้งของกราฟ การตัดจะเกิดอยู่ในช่วงของเส้นตั้งนั้น ถ้าเปอร์เซ็นต์แรงดันใช้งานมี  
ค่าสูงมากขึ้น เวลาช่วงคลื่นตัดและการกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดจะลดลง

#### 4.3.3) การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคควาน์ของอี เลค โตรดที่ใช้กับ อี เลค โตรดแบบทรงกลม

โดยเหตุที่การออกแบบแก๊ปได้ใช้ชั้นน้ำสแตนเลสขนาดประมาณ

12.5 เซนติเมตร แทนการใช้อี เลค โตรดแบบทรงกลมหรืออี เลค โตรดแบบครึ่งทรงกลมดังที่มี ใช้กัน  
อยู่นั้น จึงสมควรทดสอบคุณลักษณะขั้นน้ำที่ทำเป็นแก๊ป เพื่อพิจารณาความเหมาะสมต่อการนำมาใช้  
หรือไม่ ในการทดสอบนี้ได้อาศัย โครงสร้างของแก๊ปเป็นส่วนช่วยในการจับยึดชั้นน้ำดังกล่าว ซึ่ง  
ภายในคอลัมน์ทั้งสองของ โครงสร้างนี้ไม่ได้บรรจุอะไร เพียงแต่ให้ทำหน้าที่ช่วยจับยึดเท่านั้น ลักษณะ  
การติดตั้งทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคควาน์ของอี เลค โตรดที่ใช้กับ  
อี เลค โตรดแบบทรงกลม

- IG - เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- SG - สปาร์คแก๊ปที่ออกแบบ
- VD - โวลเตจดีไวเดอร์

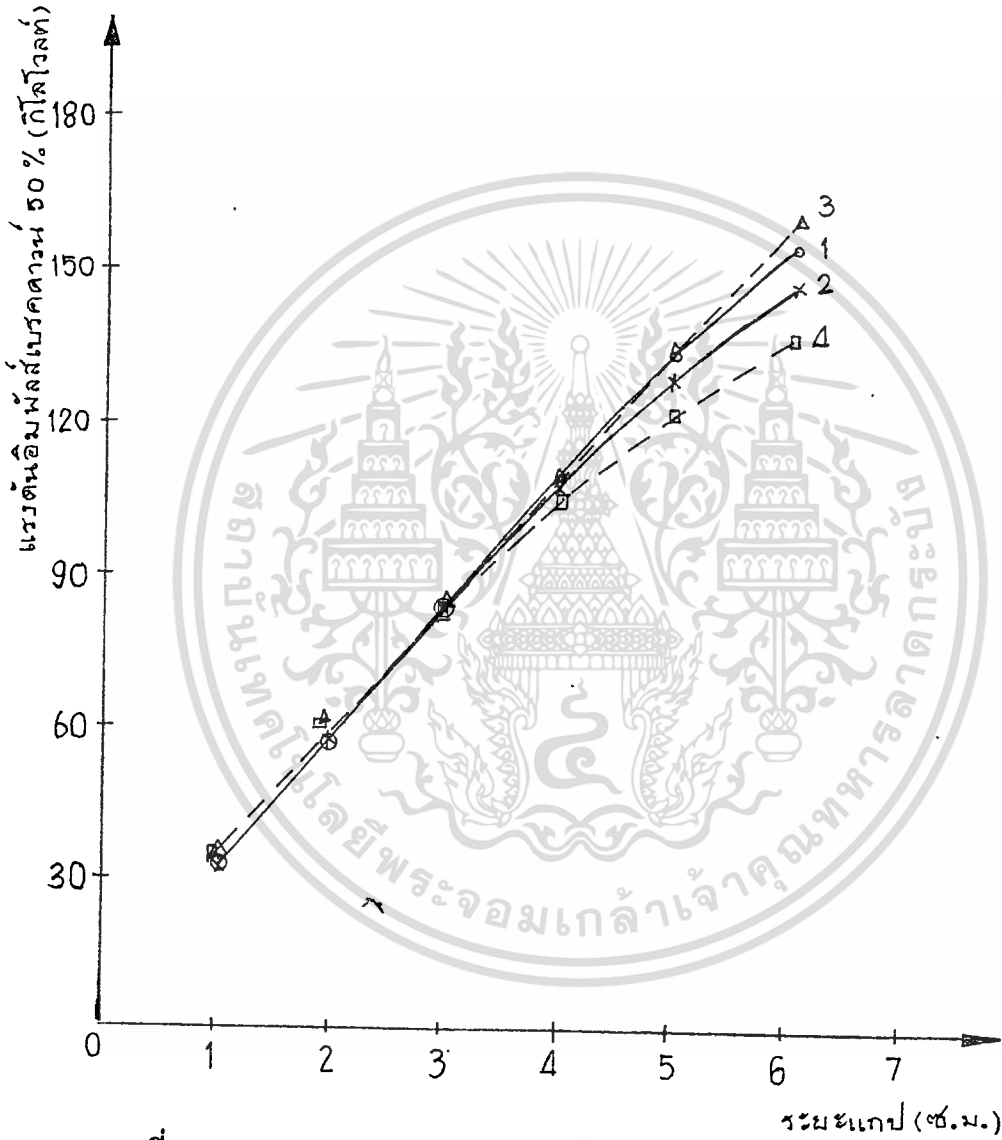
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยป้อนแรงดันเข้าที่ส่วนบนของโครงสร้างจับยึดแกบลูกบน แกบล่างต่อลงศักร์ดิน การทดลองได้ทดลองที่ระยะแกบต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1 เซนติเมตร ถึง 6 เซนติเมตร ผลที่ได้จากการทดลองนำไปเทียบกับค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ ค่ามาตรฐานที่ได้จากแกบแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และนำไปเขียนกราฟดังรูป 4.14

#### ตารางที่ 4.1

เปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอิลคโตรดที่ใช้กับอิลคโตรดแบบทรงกลม\*

ระยะแกบ (ซ.ม.)	แรงดันหัวบวก (กิโลโวลต์)		แรงดันหัวลบ (กิโลโวลต์)	
	อิลคโตรดทรงกลม	อิลคโตรดที่ใช้	อิลคโตรดทรงกลม	อิลคโตรดที่ใช้
1	31.6	33.1	31.5	32.7
2	59.2	60.4	59.2	60.2
3	85.7	85.4	85.2	84.1
4	111.0	110.6	109.0	105.4
5	154.0	158.4	149.0	137.0



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นต่อ ระหว่าง  
อิเล็กโตรดที่ใช้กับอิเล็กโตรดแบบทรงกลม  
1 หมายถึง อิเล็กโตรดแบบทรงกลมขั้ว +  
2 หมายถึง อิเล็กโตรดแบบทรงกลมขั้ว -  
3 หมายถึง อิเล็กโตรดแบบที่ใช้ขั้ว +  
4 หมายถึง อิเล็กโตรดแบบที่ใช้ขั้ว -

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้ในตารางที่ 4.1 และกราฟที่ได้ในรูปที่ 4.14 ระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองชนิด จะพบว่าระยะแกมมีค่าอยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 4 เซนติเมตร ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก นั้นหมายความว่าสามารถนำชั้นน้ำมาใช้ทำหน้าที่แทนอิเล็กโตรดทรงกลมได้ โดยเฉพาะในช่วงแรงดันประมาณ 100 กิโลโวลต์ จะให้ค่าแตกต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นเด่นชัดว่าสามารถใช้ชั้นน้ำทำเป็นสปาร์คแกปในมัลติเบิลช็อบบิ่งแกปที่ใช้กันแรงดันไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ข้อดีของการใช้ชั้นน้ำเป็นอิเล็กโตรดก็คือ มีน้ำหนักเบากว่า ทำให้การออกแบบโครงสร้างการจับยึดทำได้ง่ายขึ้น ราคาถูกกว่ามากและหาซื้อได้ง่าย

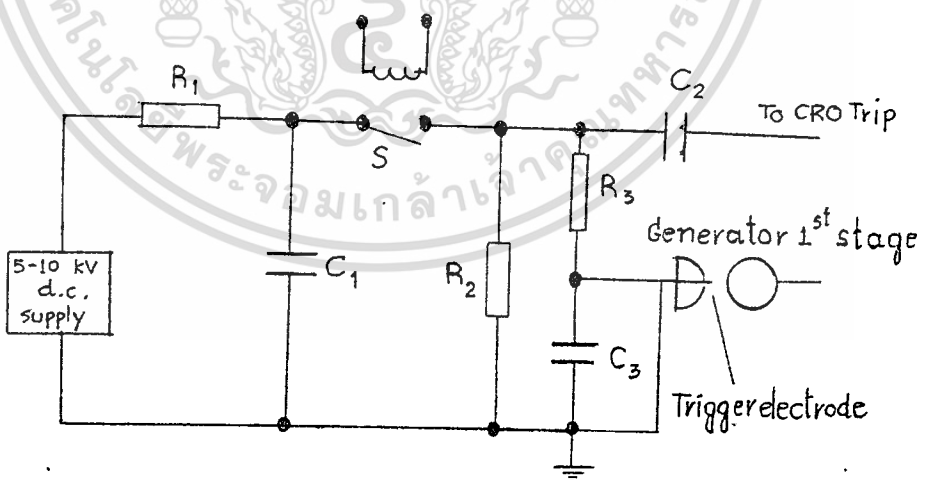
#### 4.4) โกสวิตช์ Trigger

ในการทำให้เกิดการเบรคดาวน ระหว่างอิเล็กโตรดนั้น เราจะพิจารณาเป็นการเบรคดาวนของก๊าซ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ (4.2) การเบรคดาวนของอิมพัลส์

วิธีที่จะช่วยให้เกิดการเบรคดาวนมีดังนี้คือ

##### 4.4.1) ทรริกเกตรอน แกป

ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยการต่อวงจรกำเนิดพัลส์โกสวิตช์ จะเป็นไปดังรูปที่ 4.15

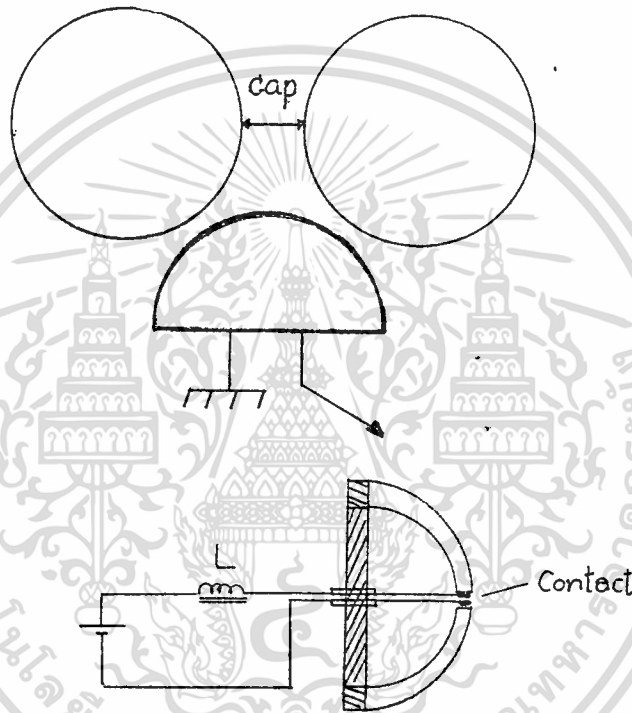


รูปที่ 4.15 วงจรทรริกเกตริงสำหรับทรริกเกตรอน แกป

หลักการทำงาน คือ D.C 5-10 กิโลโวลต์ จะอัดประจุ  $C_1$  ผ่านความต้านทานแรงสูง  $R_1$  และขึ้นอยู่กับการควบคุมสวิตช์  $S$  ด้วย ซึ่งเป็นตัวควบคุมพัลส์เพื่อป้อนให้แก่ วงจร CRO เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRIP โดยผ่านตัวคาปาซิเตอร์  $C_2$  ในขณะเดียวกัน ตัวคาปาซิเตอร์  $C_3$  จะถูกอัดประจุจนสูงขึ้น และพัลส์ไกสวิตช์ จะถูกป้อนให้แก่ อิเล็กโตรดไกสวิตช์ความต่างศักย์ทริปปิงบนอิเล็กโตรดสามารถที่ปรับแต่งได้โดยการเปลี่ยนค่า  $R_3$  และ  $C_3$  วงจร  $R_3C_3$  เป็นตัวหน่วงในการทำงานของทริกเกอร์ และสปาร์คแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ค่าความต้านทานแรงสูง  $R_2$  จะใช้ในการรับประจุจากประจุข้างในตัวคาปาซิเตอร์  $C_3$

4.4.2) ระบบการสร้างสัญญาณทริกเกอร์ โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบครึ่งทรงกลม ดังรูปที่ 4.16 เพื่อวางได้ระหว่างอิเล็กโตรดหลักทั้งสอง



รูปที่ 4.16 สปาร์คแกปแบบ ทริกเกอร์ครึ่ง (Triggering)

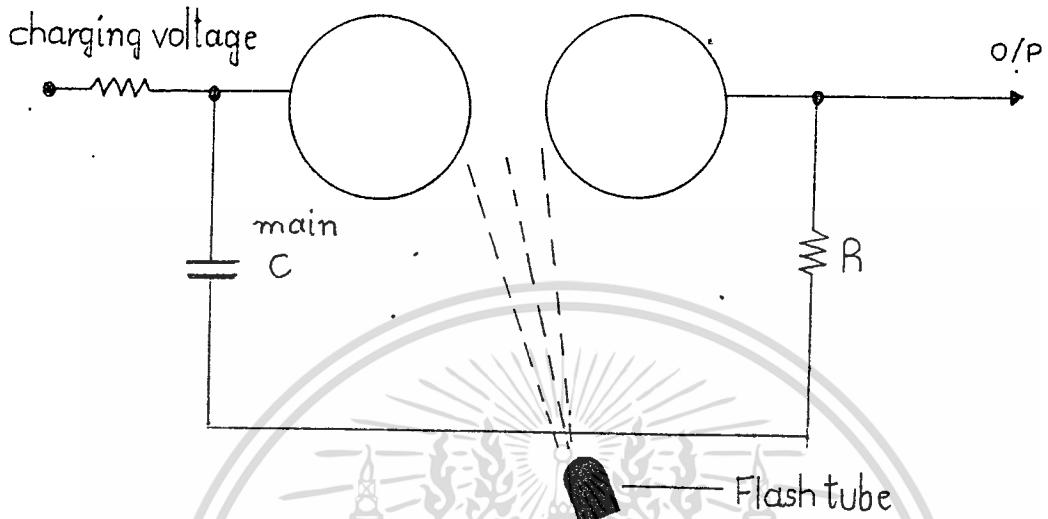
#### การทำงาน

สปาร์คแกปประกอบด้วย อิเล็กโตรดรูปทรงกลม 2 ชุด และมี Contact 1 คู่ ซึ่งติดไว้ที่ผิวหน้าของทรงกลมสัมผัส และต่อกับแบตเตอรี่ที่มีค่าแรงดันต่ำ โดยมีตัวอินดักแตนซ์,  $L$  ต่ออนุกรมเมื่อ Contact แยกจากกัน พลังงานที่เก็บไว้ในเหนี่ยวนำ จะมาปรากฏในรูปของการสปาร์ค ตกคร่อม Contact ทั้งสอง แล้วก็ทำให้เกิดการเบรคดาวขึ้นที่แกปหลัก

4.4.3) ระบบการกระตุ้นโดยใช้ ริงส์ลิตร้าไวโอเล็ต ดังรูปที่ 4.17

การทำงานของระบบสร้างการกระตุ้นจะใช้ ริงส์ลิตร้าไวโอเล็ต ฉายไปบนแกปของอิเล็กโตรด ทำให้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (work function) ของอิเล็กโตรดเอกซาร์เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอิลเลคโตรดลดลง และทำให้เกิดการปลดปล่อยประจุไฟฟ้า คือ การหลุดของอิลเลคตรอนออกมา จากอิลเลคโตรด จึงทำให้เกิดการเบรคดาวนัชั้นที่แกปหลัก



รูปที่ 4.17 สปาร์คแกปแบบทริปปิง (Trigging)

#### 4.4.4) การสร้างพัลส์โกสวิตซ์จากเซรามิกไฟฟ้าเปียโซ (Piezoelectric Ceramics)

หลักการทำงาน เมื่อแท่งเซรามิกไฟฟ้าเปียโซได้รับแรงอัด ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเป็นลักษณะพัลส์ป้อนเข้าไปที่สปาร์คแกปช่วยเกิดสปาร์คขึ้น ก็จะทำให้เมกนเกปเกิดการสปาร์คและประจุที่อัดไว้ใน  $C_u$  ก็จะดีสชาร์จผ่าน  $R_u$ ,  $R_o$  และ  $C_o$  ได้รูปคลื่นอิมพัลส์ตามที่ต้องการ

วงจรถูก้าเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบขั้นเดียวที่ออกแบบ

5.1) ข้อกำหนดของเครื่องก้าเนิดแรงดันอิมพัลส์

- 1) Nominal Voltage : 22 KV
- 2) Generating Voltage : 20 KV
- 3) Maximum Charging Energy : 12.5 จูล
- 4) Charging Voltage : 22 KV
- 5) Waveform : 1.2/50  $\mu$ sec
- 6) Polarization : positive
- 7) Triggering System : needle gap
- 8) ประสิทธิภาพของวงจรถูก้า ,  $\eta$  : 98%

5.2) ส่วนประกอบของเครื่องก้าเนิดแรงดันอิมพัลส์

- 1) Impulse voltage Generator Single stage
- 2) Discharge Capacitor
  - nominal voltage : 22 KV
  - static capacitance : 0.0625  $\mu$ F
  - 1 phase
- 3) Charging Resistor ( $R_c$ ) : 100 K $\Omega$
- 4) damping Resistor ( $R_d$ ) : 412  $\Omega$
- 5) Discharging Resistor ( $R_u$ ) : 1.1 K $\Omega$
- 6) Shunt capacitor for waveform : 1000 PF
  - nominal voltage : 22 KV
- 7) Discharge gap :  $\phi$  125 mm

5.3) ตัวอัดประจุ (Charger)

เป็นตัวสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงเพื่อทำการอัดประจุให้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Discharge Capacitor 0.0625  $\mu$ F โดยมีส่วนประกอบดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

5.3.1) หม้อแปลง 1 ชุด มีพิกัดดังนี้

5-2

Primary	250	โวลต์
Secondary	37.5	กิโลโวลต์
Capacity	1	KVA
ความถี่	50	เฮิร์ตซ์ . 1 เฟส

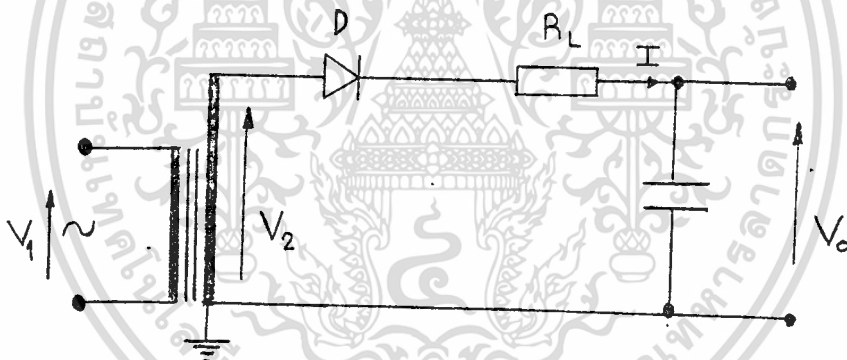
5.3.2) Rectifier

Peak Reverse voltage	100	KV
Nominal current	25	mA

- Reservoir Capacitance

Nominal Voltage	53	KV
Static Capacitance	0.0625	$\mu F$

5.3.3) วงจร charger ที่ออกแบบ



รูปที่ 5.1 วงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น

รายละเอียดมีดังนี้

- 1)  $V_1$  = (AC) 250 โวลต์
- 2)  $V_2$  = (AC) 37.5 กิโลโวลต์
- 3) D = diode 100 กิโลโวลต์
- 4)  $R_L$  = ความต้านทานจำกัดกระแส 1.5 เมกกะโอห์ม
- 5)  $C_r$  = ตัวเก็บประจุกรองกระแส 0.0625 ไมโครฟารัด
- 6)  $V_o$  = แรงดันอัดประจุกระแสตรง 45 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

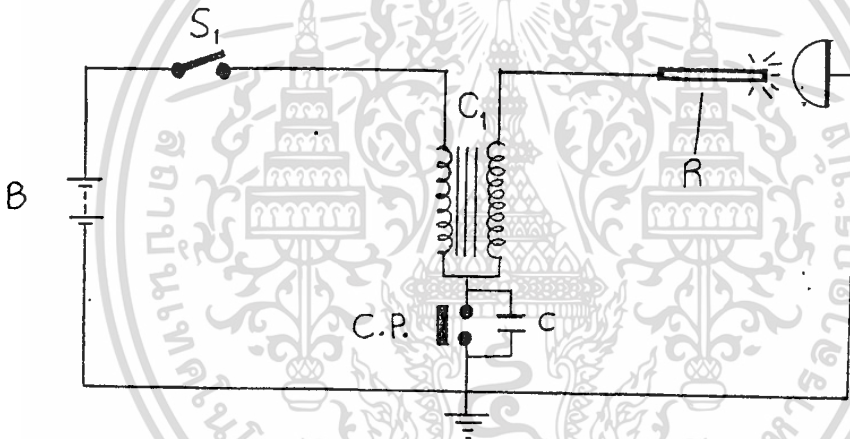
$$\begin{aligned} \text{จากค่าแรงดันเบรคตาว์นของไดโอด} &= 2\sqrt{2} V_{AC} \\ &= 2 V_p = 106 \text{ กิโลโวลต์} \end{aligned}$$

$$\text{ค่าแรงดันระลอก (ripple) , } V_r = 8 \text{ กิโลโวลต์}$$

$$\begin{aligned} \text{ขนาดของ } C_r &= \frac{I}{fV_r} = \frac{25 \text{ mA}}{50 \text{ Hz} \times 8 \text{ KV}} = 0.0625 \mu\text{F} \end{aligned}$$

5.4) ระบบพัลส์ไกสวิตซ์ที่เลือกใช้

5.4.1) วงจรระตุ้น (Triggering System)



รูปที่ 5.2 วงจรระตุ้น

องค์ประกอบของวงจร

- B = แบตเตอรี่ 12 โวลต์
- $C_1$  = ทริกเกอร์คอยล์ 12/1000 โวลต์
- $S_1$  = switch on - off
- C.P = contact point
- C = condensor or capacitor 0.25  $\mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 R = trigger rod  
 ไม่ว่าจะผิดใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ on switch  $S_1$  และกดคอนแทคให้ต่อวงจร จะมีกระแสไหลจากแบตเตอรี่ผ่านขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กคล้อยผ่านขดลวดทุติยภูมิ และปฐมภูมิ เมื่อปล่อยคอนแทคแยกออกจากกันเป็นการตัดวงจร กระแสหยุดไหลอย่างรวดเร็ว โดยมีคอนเดนเซอร์ทำหน้าที่ช่วยไม่ให้เกิดการอาร์คที่หน้าคอนแทคขณะที่แยกออก

การยุบตัวอย่างรวดเร็วของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นผลให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิ และปฐมภูมิ ที่ขดทุติยภูมิจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีค่าสูงส่งต่อไปที่ trigger rod ที่อยู่ใน ground electrode จึงเกิดค่าความแตกต่างศักย์ระหว่าง rod กับ ground electrode ทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าค่าสูงบริเวณอากาศกับ ground electrode ทำให้เกิดอวาลานซ์เบรคดาวน (avalanche break down) เป็นการสร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้นให้กับการเกิด bread down ระหว่าง main seam ซึ่งเป็นการกำหนดให้เกิดสปาร์คเมื่อต้องการได้

#### 5.4.2) องค์ประกอบที่ควบคุมการเกิดไฟฟ้าแรงดันสูงที่ขดลวดทุติยภูมิ

1) อัตราส่วนระหว่างขดลวดปฐมภูมิ กับ ทุติยภูมิ ถ้ายังมีค่าน้อย จะทำให้ผลการเหนี่ยวนำมีค่าสูง

2) ความเข้มสนามแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นส่วนสำคัญกับกระแสในวงจรแรงต่ำ ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีกระแสไหลผ่านมาก ก็จะทำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กในแกนมากขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิสูงขึ้นด้วย

3) ความเร็วในการยุบตัวเมื่อคอนแทคแยกตัวออกจากกันกระแสไฟฟ้าในวงจรแรงต่ำจะหยุดไหล ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กยุบตัวตัดขดลวดทุติยภูมิ ถ้าการลดลงของกระแสเป็นไปอย่างรวดเร็ว ก็จะทำให้การยุบตัวของสนาม

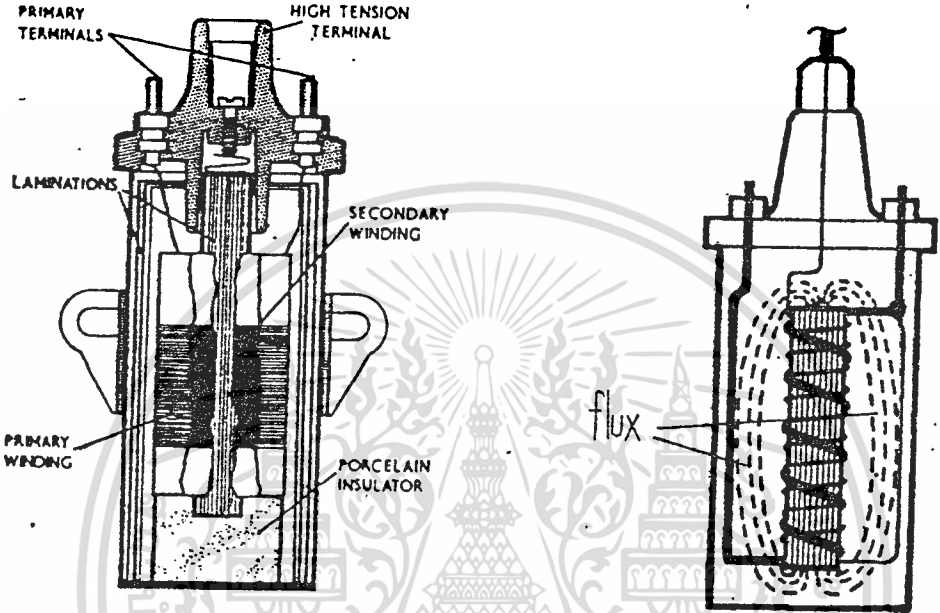
แม่เหล็ก หรือ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเร็วขึ้นตามไปด้วย เป็นผลทำให้เกิดการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก จะยุบตัวตัดกับขดลวดปฐมภูมิด้วย ทำให้เกิดการเหนียวนำภายในขดปฐมภูมิด้วยเช่นกัน เป็นการเหนียวนำตัวเอง โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้ามี่ค่าประมาณ 250 - 300 โวลต์ ซึ่งสามารถเคลื่อนตัวข้ามช่องว่างบริเวณหน้าคอนแทคได้ ทำให้หน้าคอนแทคเกิดการอาร์ค ขณะที่ off switch  $\epsilon_1$  กระแสไฟฟ้าที่ยังไม่หยุดไหลทันทีขณะที่หน้าคอนแทคแยกออก จะทำให้การยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็กช้าลง เราแก้ไขโดยต่อคอนเดนเซอร์คร่อมขานานคอนแทคทำให้ไม่เกิดการอาร์ค เพราะคอนเดนเซอร์จะเก็บประจุไว้ ทำให้การยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็กเร็วขึ้น นอกจากนี้คอนเดนเซอร์ยังช่วยให้แรงดันด้านทุติยภูมิสูงขึ้นด้วย โดยการคายประจุที่เก็บไว้ เข้าไปยังขดลวดทุติยภูมิ

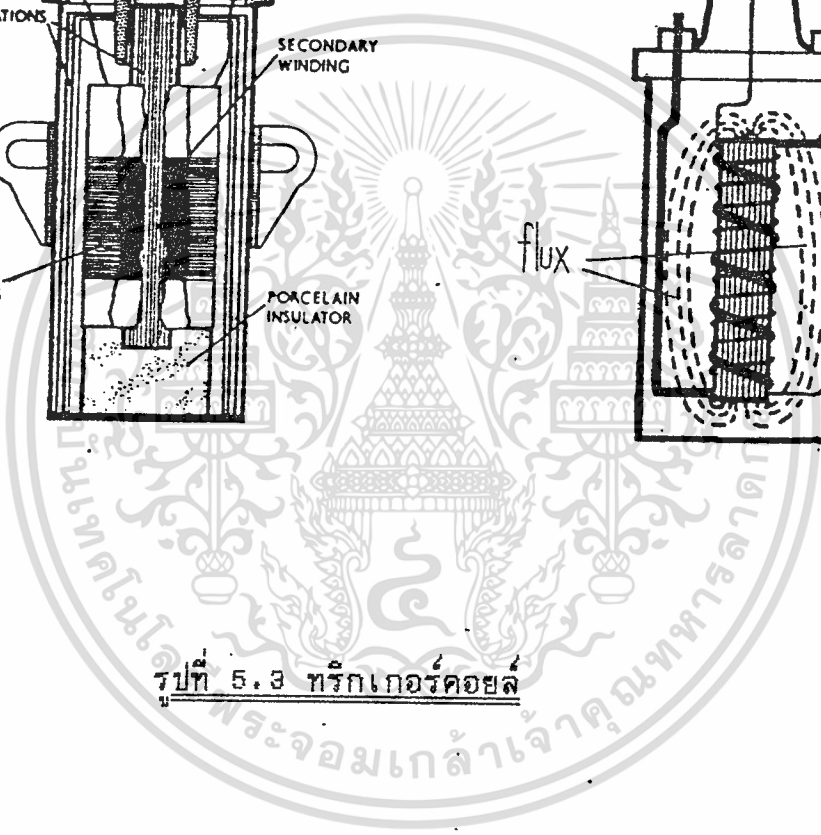
#### 5.4.3) คุณสมบัติของ Trigger coil

คอยล์จุดชนวน ทำหน้าที่แปลงแรงดันจาก 10 โวลต์ เป็น 5,000 - 20,000 KV เพื่อใช้ในการกระตุ้นทำให้เกิดการสปาร์คที่ main gap องค์ประกอบของคอยล์ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิมีจำนวนรอบประมาณ 150 - 250 รอบ ใช้ลวดเบอร์  $25\frac{1}{2}$  S.W.G. พันอยู่บนแกนเหล็กอ่อน ที่ทำจากแผ่นเหล็กบาง ๆ

เรียงซ้อนกัน (laminated) ขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนรอบประมาณ 15,000 - 25,000 รอบ ขนาดใช้ลวดเบอร์ 44 S.W.G. การพันขดลวดจะพันขดลวดทุติยภูมิไว้ด้านในและขดปฐมภูมิอยู่ด้านนอกเพื่อการระบายความร้อนของขดลวดปฐมภูมิ และทำให้ผลการเหนียวนำของเส้นแรงแม่เหล็กดีกว่าระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิจะมีกระดาษฉนวน (Paper Wax) ชุดคอยล์ จะบรรจุอยู่ในถังโลหะ ที่มีน้ำมันเป็นการฉนวน และใช้ในการระบายความร้อน



รูปที่ 5.3 ทรานส์ฟอร์เมอร์



## บทที่ 6

### การฉนวน

#### 6.1) เงื่อนไขในการออกแบบการฉนวน

เงื่อนไขการออกแบบองค์ประกอบการสร้างแรงดันสูง มีเงื่อนไขบางประการที่เหมือนกัน หรือร่วมกัน เช่น การฉนวน ซึ่งแยกเป็นการฉนวนภายนอก และการฉนวนภายใน

6.1.1) การฉนวนภายนอก คือ ฉนวนอากาศกับฉนวนแข็งของอุปกรณ์ที่รับสภาวะบรรยากาศ นั่นคือ ฉนวนจะต้องทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า และผลของสภาพดินฟ้าอากาศ เช่น ความชื้น และสิ่งเปราะเปื้อนทั้งหลายได้ เป็นต้น โดยเหตุที่อุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันสูงเหล่านี้ จะต้องติดตั้งอยู่ในสภาวะของบรรยากาศภายในหรือนอกห้อง ซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนสำคัญ ส่วนฉนวนแข็งภายนอกเป็นเพียงตัวยึด หรือรองรับน้ำหนัก หรือแรงกลเท่านั้น ฉนวนมีมิติภายนอก ความสูง, ความยาว, ความกว้างของการฉนวน จะกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ ซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นผิวของฉนวนแข็ง ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวฉนวนมีผลสำคัญยิ่งต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากล่าวคือ จะต้องผิวเรียบสม่ำเสมอ, ไม่เก็บสะสมฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกได้ง่าย, ไม่ดูดซึมความชื้น, ทนความร้อนได้พอสมควร, ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี กับฉนวนเหลวหรือก๊าซอื่น มีความแข็งแรงทางกลเพียงพอ สามารถกลึงตัดต่อประกอบเข้ารูปตกแต่งได้ง่าย

ฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติการฉนวนดังกล่าวข้างต้น เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุที่ผลิตได้ภายในประเทศ ราคาไม่แพง หาได้ง่ายในปัจจุบันได้แก่ ท่อฉนวนพีวีซี จากข้อมูลของผู้ผลิตท่อพีวีซีดู ตารางที่ 6.1 ท่อพีวีซี ไม่ดูดความชื้น ทนความดันได้สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของท่ออุตสาหกรรมใช้งานปกติ 60 องศาเซลเซียส และไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันหม้อแปลง ในด้านไฟฟ้าพีวีซีมีความต้านทานจำเพาะสูง  $10^{13} - 10^{16}$  โอห์มเซนติเมตร มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 40 กิโลโวลต์ต่อ มิลลิเมตร และจากการทดสอบท่อพีวีซี ระยะการฉนวน 50 ซม. วางตั้งบนพื้นพบว่ามีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามผิวที่สภาวะของห้อง (757 mm Hg 32°C ความชื้น 75%) ประมาณ 4 kV/cm สำหรับแรงดันกระแสสลับ 50 Hz และสำหรับแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 ไมโครวินาที ชั่วลบได้ประมาณ 7.9 kV/cm และชั่วบวกได้ประมาณ 6.6 kV/cm จากข้อมูลค่าความไปตามผิวฉนวนพีวีซี เมื่อคำนึงถึงแฟคเตอร์แห่งความปลอดภัยจึงเลือก

- ความยาวตามผิวฉนวนพีวีซี สำหรับแรงดัน AC 2kV/cm
- ความยาวตามผิวฉนวนพีวีซี สำหรับแรงดันอิมพัลส์ 4 kV/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.2) การฉนวนภายใน

ซึ่งประกอบด้วยฉนวนแข็ง กับฉนวนเหลวหรือก๊าซ ฉนวนภายในจะ อยู่ในถัง ๗ สิ่งห่อหุ้มเพื่อมิให้สัมผัสกับสภาวะบรรยากาศ

การฉนวนภายในอาจจะเป็น อากาศ ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซซิลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ( $SF_6$ ) หรือน้ำมันหม้อแปลง ถ้าเป็นอากาศหรือก๊าซอัดความดันจะทำให้หน้าหม้อเบ้า แต่การระบายความร้อนไม่ดีเท่ากับการฉนวนด้วยน้ำมันหม้อแปลง การออกแบบจะต้องคำนึงถึงรูปลักษณะของสนามไฟฟ้า โดยมิให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวนภายใน สำหรับแรงดัน AC หรือ แรงดัน DC จะมีค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ คือ

- อากาศหรือ ไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศประมาณ 30 กิโลโวลต์ (peak) ต่อ เซนติเมตร
- ก๊าซ  $SF_6$  ประมาณ 88 kV/cm.bar
- น้ำมันหม้อแปลง 100-250 kV/c

หลักการออกแบบการฉนวนผู้ออกแบบจะพยายามให้เกิดพลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) น้อยที่สุด เพื่อป้องกันมิให้เกิดความร้อนจนทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินขีดจำกัด ลักษณะของไดอิเล็กตริกพยายามหลีกเลี่ยงลักษณะปลายแหลม หรือขอบคม เพราะจำทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง เกินความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวนได้ และนำไปสู่การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ หรือเบรคดาวน์ ซึ่งจะทำการกั้นกันเสียหายได้

### 6.1.3) การฉนวนของวัสดุ และอุปกรณ์จะทนต่อแรงดันไฟฟ้า ได้มาหรือน้อย จะขึ้น อยู่กับลักษณะ และสภาพของฉนวน ซึ่งกำหนดด้วย

ก) ระยะรั้ว (leakage distance or Creepage distance) หมายถึง ระยะที่สั้นที่สุดระหว่างไดอิเล็กตริกหรือโลหะประกอบติดฉนวน โดยวัดไปตามผิวฉนวนภายนอก

ข) ระยะอาร์ค (arcing distance) หมายถึง ระยะตามแนวที่เกิดอาร์คหรือสปาร์คผ่าน นั่นคือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดระหว่างไดอิเล็กตริกหรือโลหะประกอบติดฉนวน โดยวัดผ่านไปในอากาศ หรือฉนวนก๊าซ หรือฉนวนเหลวที่ล้อมรอบฉนวนแข็ง ในสภาพแห้ง ระยะอาร์คจะยาวกว่าในสภาพเปียก หรือสภาพเปลี่ยน

ค) สภาพแห้ง (dry condition) หมายถึง ตัวอย่างที่ทดสอบอยู่ในสภาพแห้งและสะอาด โดยมีเงื่อนไขเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง) สภาพเปียก (wet condition) หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่เลียนแบบสภาวะการใช้งานในสภาพเปียกฝน เพื่อทดสอบผลกระทบจากฝนตกชวมรสชาติที่มีต่อการฉนวนภายนอก

ตารางที่ 6.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC

การดูดซึมน้ำ	มก./ตร.ซม.	0.04-0.06
กำลังดึงที่ 15 °C	กก./ตร.ซม.	500-550
กำลังบิด	กก./ตร.ซม.	860
กำลังอัด	กก./ตร.ซม.	660
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	K cal/m-h-C°	0.11-0.14
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตร	$\Omega$ -cm	$> 10^{15}$
แฟคเตอร์ tan $\delta$ ที่	20 °C 1 kHz	0.02
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	$\epsilon_r$	3.2
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	กิโลโวลต์/มม.	$> 40$
อุณหภูมิอ่อนตัว	°C	76.3

ตัวอย่างการทดสอบการวางไฟตามผิวท่อ PVC ด้วยแรงดันความถี่กำลัง โดยมีระยะ  
ฉนวน 50 cm.

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6
แรงดันเบรคดาวน์ kV	250	220	234	210	210	210

คิดค่าความคงทนต่อแรงดันวางไฟตามผิว โดยมีอิเล็กโตรดเป็นวงแหวน รัศมีความ  
โค้งประมาณครึ่งเซนติเมตร ที่แรงดัน 210 kV เท่ากับ  $210/50 = 4$  kV/cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### การใช้ประโยชน์อุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันอิมพัลส์ (Impulse)

#### 7.1) บทนำ

อุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ 20 kV ที่ออกแบบขึ้นมาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงได้ ตามค่าอ้างอิงหรือตกลงกันระหว่างประเทศ IEC Publ 71-1976 : Insulation Co-ordination part 1 ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบตามช่วงระบบแรงดันตาม Table ที่ 1.1

ตาม Table ที่ 1.1 เราจะได้ว่าถ้าต้องการทดสอบอุปกรณ์หรือการฉนวนที่นำไปใช้กับระบบแรงดัน 3.6 kV (RMS value) จะต้องใช้ระดับแรงดันทดสอบแบบ Lightning Impulse 1.2/50 usec, 20 kV (peak value)

#### 7.2) แนวทางการใช้งานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

##### 1. ใช้สำหรับภาคปฏิบัติการทดลอง

การปฏิบัติการทดลองในห้องปฏิบัติการในเรื่องต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐาน  
การศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปมักจะมีการทดลองเกี่ยวกับ

- 1.1 การสร้างและวัดแรงดันสูงกระแสสลับ (AC)
- 1.2 การสร้างและวัดแรงดันสูงกระแสตรง (DC)
- 1.3 การสร้างและการวัดแรงดันสูงอิมพัลส์ (Impulse)
- 1.4 การสร้างและวัดกระแสอิมพัลส์
- 1.5 เทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์
- 1.6 ศึกษาการเกิดการดิสชาร์จโคโรนาและเบรคดาวน์ในก๊าซ
- 1.7 ศึกษาการเกิดการดิสชาร์จเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง
- 1.8 การเกิดวาทไฟตามผิวบนลูกถ้วยฉนวน
- 1.9 การวัดค่าความจุไฟฟ้า, แฟคเตอร์สูญเสีย ( $\tan\delta$ ) ของวัสดุทดสอบฉนวนแข็ง

##### 2. ใช้สำหรับงานวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าแรงดันสูงอิมพัลส์ขนาด 20 kV สามารถที่จะนำไปทำการศึกษาวิจัยปรากฏการณ์ต่าง ๆ อันเป็นผลจากความเครียดสนามไฟฟ้าได้อย่างกว้าง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขวาง เช่น การศึกษาความคงทนของการฉนวนก๊าซ, ฉนวนเหลว, ฉนวนแข็ง, ฉนวนผสม ต่อความเครียดสนามไฟฟ้าและต่อแรงดัน เบรคดาวน์ การวัดดีสชาร์จบางส่วนของสวิตช์และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงสูง การศึกษาเกี่ยวกับแรงดันเกินและการป้องกัน ซึ่งผลของการศึกษาวิจัยจะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้

### 3. ใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับงานทดสอบ

ปัจจุบันประเทศไทย ได้มีโรงงานอุตสาหกรรมที่สามารถผลิตหม้ออุตสาหกรรมวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายชนิด เช่น ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า เคเบิล ปลอกฉนวนนำสาย สวิตช์ตัดตอน กักเก็บแรงดันเกิน ซึ่งสามารถใช้ชุดประกอบสร้างแรงดันนี้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามที่มาตรฐานกำหนดให้ ซึ่งเป็นการศึกษาให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถจัดหาอุปกรณ์ทดสอบประจำ หรือทำการวิจัยเพื่อการพัฒนาคุณภาพ เพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนการผลิตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 8.1) บทนำ

เพื่อให้ทราบว่าชุดสร้างสัญญาณกระตุ้น ที่ออกแบบสร้างนี้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการหรือไม่ และใช้งานได้ผลมากน้อยเพียงใดจึงทำการทดสอบหาคคุณลักษณะดังต่อไปนี้

ก) ทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับอิเล็กทรอนิกส์แบบทรานซิมิสเตอร์

ข) ทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของสปาร์คแกป

#### 8.2) ผลการทดลอง

8.2.1) การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคดาว์น ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรานซิมิสเตอร์

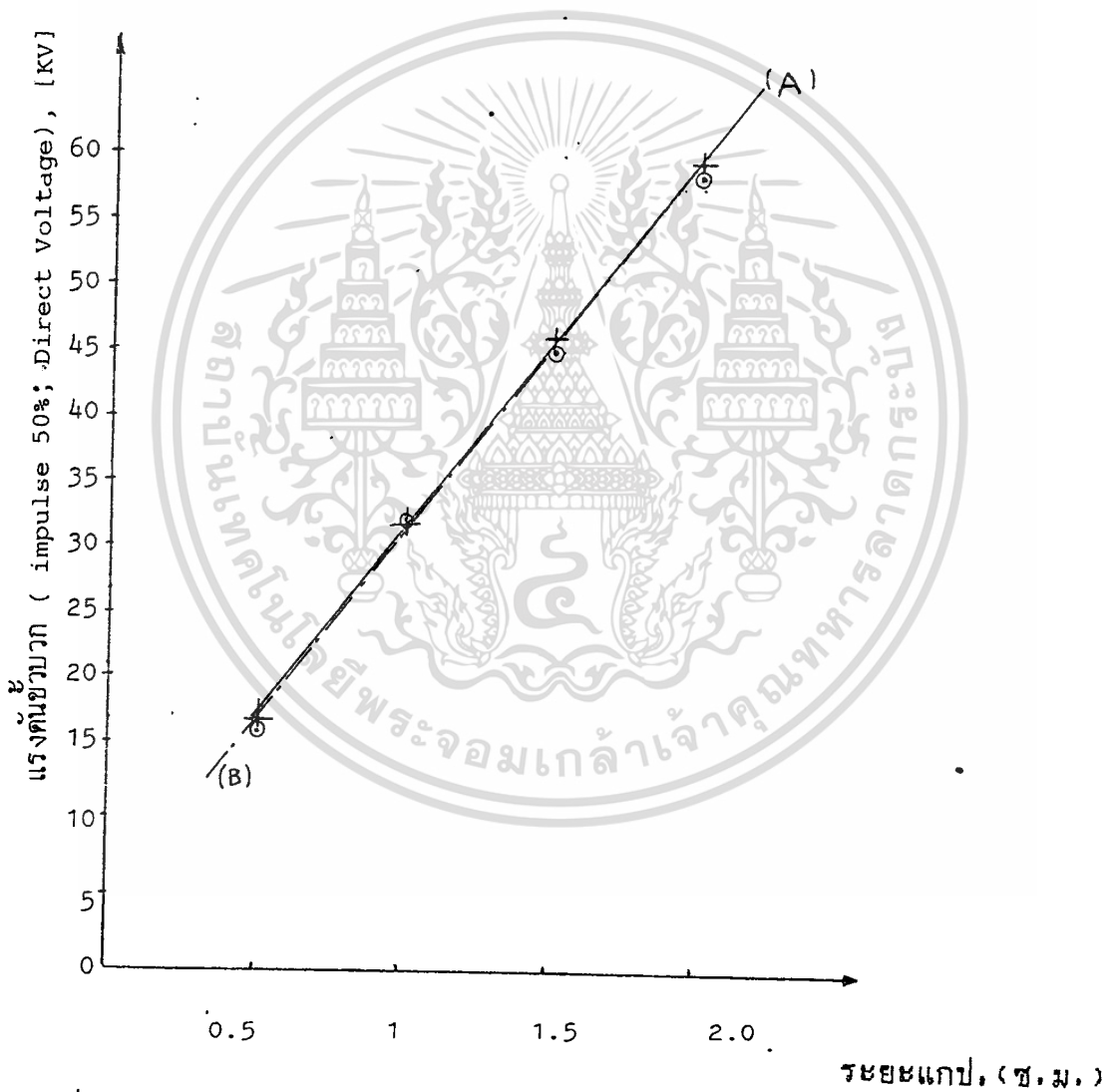
โดยเหตุที่การออกแบบแกปดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ได้ใช้ชั้นน้ำสแตนเลสขนาดประมาณ 12.5 เซนติเมตร แทนการใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบทรานซิมิสเตอร์ที่มีใช้กันอยู่ และได้มีการทดสอบคุณลักษณะของชั้นน้ำที่ทำการเป็นแกปเพื่อพิจารณาว่าเหมาะสมต่อการนำมาใช้หรือไม่ ซึ่งผลการทดลองในบทที่ 4 นั้น เป็นการทดสอบโดยใช้แรงดันอิมพัลส์เบรคดาว์น 50 เปอร์ เซนต์ที่ระยะแกปตั้งแต่ 1 เซนติเมตร ถึง 6 เซนติเมตร ที่สภาวะมาตรฐาน ที่ได้จากแกปแบบทรานซิมิสเตอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับแกปที่เราเลือกใช้ และในบทนี้ได้เพิ่มเติมผลการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้แรงดันสูงกระแสตรงซึ่งจะได้การทดลองตามตารางที่ 8.1 และนำไปเขียนกราฟ ดังรูป 8.1 โดยปรับระยะแกปที่ค่า 0.5 เซนติเมตร ถึง 2 เซนติเมตร

ตารางที่ 8.1

เปรียบเทียบแรงดันกระแสตรงขั้วบวก ระหว่างอิเล็กโตรดที่ใช้กับอิเล็ก-  
โตรดแบบทรงกลม (ที่สภาวะมาตรฐาน)  
(เป็นจริงสำหรับแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์)

ระยะแก๊ป (ซ.ม.)	แรงดันขั้วบวก(กิโลโวลต์)	
	อิเล็กโตรดทรงกลม	อิเล็กโตรดที่ใช้
0.5	15.8	16.5
1	31.7	32
1.5	45.5	45
2	59.0	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.1 แสดงกราฟค่าแรงดันชววกระหว่างอิเล็กโตรดที่ใช้กับอิเล็กโตรดแบบทรงกลม

— A หมายถึง อิเล็กโตรดแบบทรงกลมชี้ +

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หมายถึง อิเล็กโตรดแบบที่ใช้ชี้ + นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้ในตาราง ที่ 8.1 และกราฟในรูป 8.1 ระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองชนิด จะพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน (จากบทที่ 4 ระยะแกปไม่ควรเกิน 4 เซนติเมตร) นั่นหมายความว่าสามารถนำชั้นน้ำมาใช้ในการทำหน้าที่แทนอิเล็กโตรดทรงกลมได้

ข้อดีของการใช้อิเล็กโตรดก็คือ มีน้ำหนักเบากว่า ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย

### 8.2.2 การทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของสปาร์คแกป

การทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของสปาร์คแกป — หนึ่งใช้สัญญาณกระตุ้นช่วย และไม่ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยของแรงดันขั้วบวก

ป้อนแรงดันขั้วบวก เข้าที่ขั้วต่อแรงสูง และต่ออิเล็กโตรดอีกด้านลงดินหาค่าแรงดันเริ่มเบรคดาวนที่ระยะแกปตั้งแต่ 0.5 เซนติเมตรถึง 2 เซนติเมตร โดยไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น ในทำนองเดียวกันได้ทดลองใช้สัญญาณกระตุ้น ช่วยที่แกปด้วย ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 8.2 และนำไปเขียนกราฟดังรูป 8.2 เพื่อหาขีดจำกัดล่างของพิสัยการกระตุ้นของการเบรคดาวนของแกป (สัญญาณกระตุ้นที่ใช้เป็นสัญญาณกระตุ้นขั้วลบ)

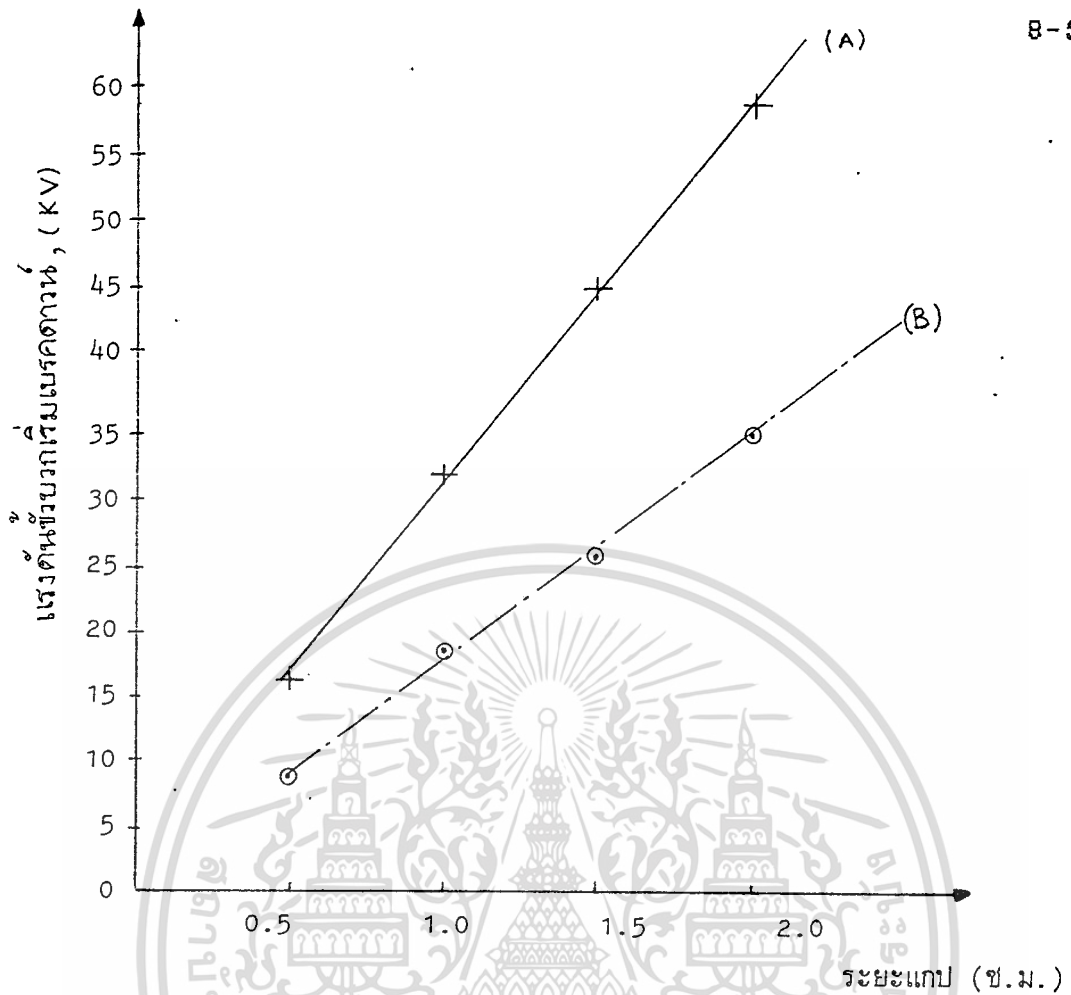
ตารางที่ 8.2

ค่าแรงดันขั้วบวกเริ่มเบรคดาวนของสปาร์คแกป

ระยะแกป (ซ.ม.)	แรงดันขั้วบวกเริ่มเบรคดาวน (กิโลโวลต์)	
	ไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น	ใช้สัญญาณกระตุ้น
0.5	16.5	8
1	32	18
1.5	45	25.5
2	58	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.2 แสดงนิสัยการกระตุ้นของสปาร์คแกป

- A ขีดจำกัดบนของแรงดันเริ่มเบรคตงานนี้ขั้วบวกไม่ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วย
- B ขีดจำกัดล่างของแรงดันเริ่มเบรคตงานนี้ขั้วบวก ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วย

### 8.3) สรุปผลการทดลอง

เหตุที่แรงดันเบรคดาว์นเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะแก๊ปเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก ระยะห่างมากขึ้นทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้โอกาสรวมตัวกับประจุที่เป็นกลางมากขึ้น เกิดเป็นไอออนลบทำให้เกิดไอออนในเซชันน้อยลง และการเกิดเบรคดาว์นของก๊าซ หรืออากาศในกรณีของแรงดันสถานะคงตัว เช่น แรงดันกระแสตรง เป็นต้น ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว แต่ในกรณีป้อนแรงดันอิมพัลส์ แรงดันจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น นั่นก็หมายถึง สนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย ทำให้การเกิดเบรคดาว์นต้องรอเวลาอีกช่วงระยะหนึ่งเบรคดาว์นจึงเกิดขึ้นได้ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากว่า อิเล็กตรอนที่พอเหมาะจากธรรมชาติอาจจะไม่เพียงพอ ที่จะทำให้เกิดไอออนในเซชัน และสร้างอะวาลานซ์ต่อไปได้ จึงมีการใช้วงจรกระตุ้นซึ่งเป็นการสร้างแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ทำให้มีอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะที่พอเหมาะคือ มีพลังงานพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเซชันสร้างอะวาลานซ์ต่อไปได้ นั่นคือ จะเริ่มต้นด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าที่สูงพอและมีระยะห่างอะโปกอย่างน้อยเท่ากับระยะอะวาลานซ์วิกฤติ

สปาร์คแก๊ปโดยทั่วไป ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันอัดประจุ ถ้าเราต้องการเพิ่ม หรือ ลดแรงดันอัดประจุ ก็ทำได้โดยการเพิ่มหรือลดระยะแก๊ปที่ปลายของอิเล็กโตรดที่ใช้ข้างหนึ่งด้านที่หันเข้าหากันจะเจาะรู เพื่อทำเป็นแก๊ปช่วยทำให้เกิดสปาร์คที่แก๊ปช่วยก่อน ด้วยระบบไมโครวิตซ์ ส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปที่แก๊ปช่วย แล้วทำให้เกิดสปาร์คที่แก๊ปเมน เป็นการกำหนดให้เกิด การสปาร์คเมื่อต้องการได้

ผลของอุณหภูมิ และความดันมีผลต่อแรงดันเบรคดาว์นที่วัดได้ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดขบวนการเทอร์มัลไอออนในเซชันมากขึ้น ทำให้แรงดันเบรคดาว์นลดลงกว่าปกติ และผลของแรงดันถ้าความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของอากาศมากขึ้น ระยะอิสระเฉลี่ยน้อยลง และพื้นที่หน้าตัดการชน มากขึ้น ทำให้แรงดันเบรคดาว์นมากกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) การจัดเงื่อนไขไม่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้
- 2) สภาพของอากาศไม่คงที่และไม่แน่นอน ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้
- 3) ผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากเครื่องมือวัด
- 4) ผลจากการอ่านค่าจากมิเตอร์

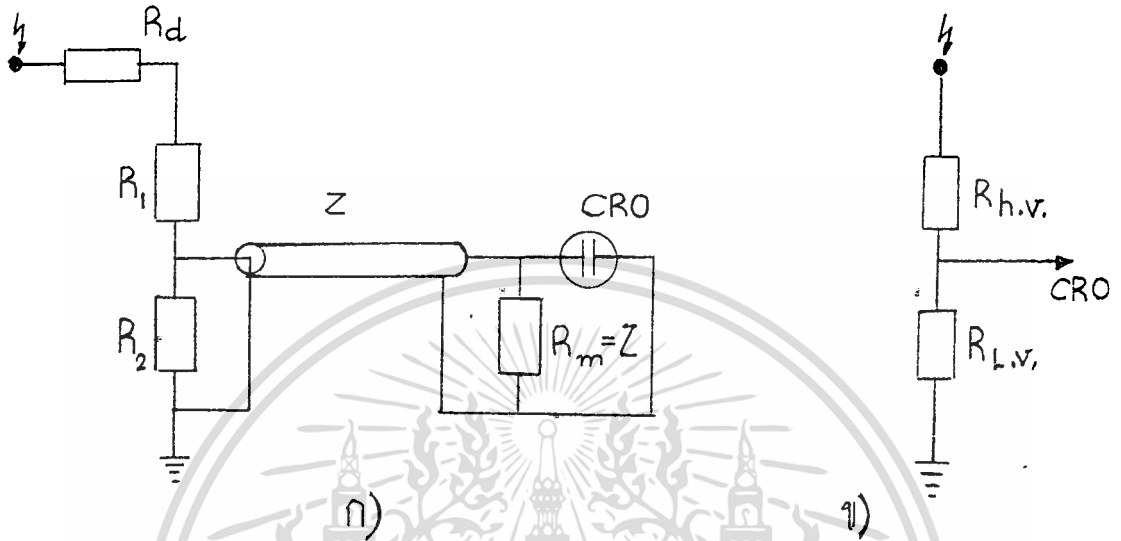
#### 8.4) ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อนี้มีอุปสรรคในเรื่อง อุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบในการกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ได้แก่ ตัวคาปาซิเตอร์อัดประจุ และ โหลดคาปาซิเตอร์ ไม่สามารถที่จัดหาหรือได้ตามท้องตลาดทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ดังนั้น การสร้างเองโดยอาศัยเทคนิคที่มีอยู่ในประเทศซึ่งจะเป็นไปได้มากกว่า ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบในการสร้างอื่น ๆ เช่นส่วน charger ทางผู้จัดทำได้ติดต่อขอความอนุเคราะห์ในการจัดสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1 KVA , 250 V/37.5 KV จาก หจก. กิจวัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้า ในส่วนของเรกติฟายเออร์อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถหาซื้อได้ ส่วนตัวความต้านทานแรงสูงสามารถที่จะทำเองได้ โดยอาศัยเทคนิคในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3 จากอุปสรรคข้างต้น ทางผู้จัดทำจึงได้ทำการออกแบบสร้างระบบไกสวิตซ์ขึ้นมาโดยอาศัยอุปกรณ์ ที่สามารถหาได้และมีราคาถูก เช่น ฉนวนภายนอกที่เป็นฐานตั้ง ได้แก่ ท่อพีวีซี และ วงจรกระตุ้นทางผู้จัดทำได้เลือกใช้ชุด trigger คอยล์ ในการทำให้เกิดการกระตุ้นที่แก่ปช่วย ซึ่งผลการทดลองสามารถที่จะสรุปได้ว่า ประสบความสำเร็จในการจัดสร้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 1 การคำนวณอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน



รูปผนวก (1) วงจรการวัดแรงดันอิมพีแดนซ์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ก) วงจรการใช้งาน

ข) วงจรสมมูลย์

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ทำได้โดยคำนวณจากค่าความต้านทานที่ใช้ เมื่อภาวะทรานเซียนผ่านพ้นไปแล้วการแบ่งแรงดันขึ้นกับความต้านทานล้วน ๆ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์  $R_{h.v.}$  จะเท่ากับ  $R_d + R_1$  และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำจะเท่ากับ  $R_2$  ต่อขนานกับ  $R_m$  ในทางปฏิบัติต้องพยายามออกแบบให้  $R_m$  มีค่าเท่ากับ  $Z$  เสมอเพื่อไม่ให้คลื่นเกิดการสะท้อน

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนแรงดันไฟตรง} &= \frac{R_{h.v.} + R_{1.v.}}{R_{1.v.}} \\
 &= \frac{(R_d + R_1) + R_2 // R_m}{R_2 // R_m} \\
 &= \frac{(R_d + R_1)(R_2 + R_m) + R_2 R_m}{R_2 R_m} \\
 \text{a} &= \frac{(R_m(R_d + R_1 + R_2)) + R_2(R_d + R_1)}{R_2 R_m}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SINGLE PHASE UNITS STANDARD SPECIFICATION

<u>Max. Output</u>	400 kvar, 50Hz. 480 kvar, 60 Hz.
<u>Voltage</u>	Up to 22kV For output and voltage outside this this range, please contact the factory
<u>Frequency</u>	50Hz or 60Hz
<u>Losses</u>	Capacitor Units have average service losses of 0.2 watt/kvar. This loss includes the loss due to the discharge resistor.
<u>Dielectric</u>	Polypropylene Film
<u>Impregnant</u>	Faradol 600.
<u>Internal Fuses</u>	Available on request.
<u>Discharge Resistors</u>	Discharge Resistors are mounted in all units to discharge the unit in accordance with the relevant standard.

## QUALITY ASSURANCE

<u>Factory Tests</u>	All units are subjected to the following tests unless agreed otherwise Sealing Test A.C. Voltage between terminals - 2.15 x rated voltage for 10 seconds. A.C. Voltage - terminals to container for 10 seconds. Discharge Resistance Measurement Loss measurement. Capacitance Measurement. Type tests may be performed (at extra charge).
<u>Standards</u>	Capacitor Units comply with:- IEC 871-1. IEC 70. BS1650. VDE 0560 Part 4. ANSI/IEEE 18. C155.
<u>Quality Control</u>	Q.C. procedures comply with requirements of BS5750. Regular audits ensure compliance.

## OPERATING CONDITIONS

Maximum Operating Temperature	
Mean Over 1 Hr	50°C
Mean Over 24 Hrs	45°C
Mean Over 1 Year	35°C
Minimum Operating Temperature	- 40°C
Location	Indoors or Outdoors
Maximum Altitude without de-rating	2000M

## PERMISSIBLE OVERLOADS

Current	1.3 x Rated Current continuously
Voltage	1.1 x Rated Voltage continuously
Output	1.35 x Rated Output continuously

## CAPACITOR CONTAINER

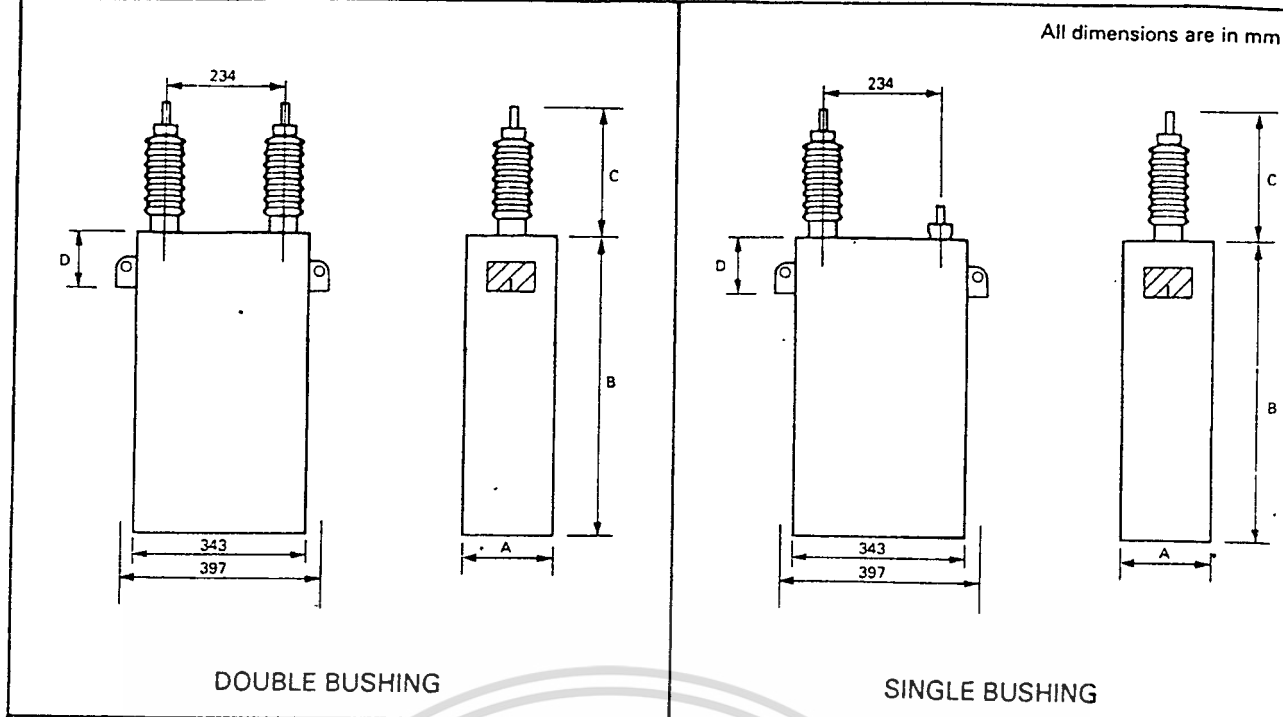
<u>Material</u>	Mild Steel subjected to following treatment 1. Shot Blast 2. Zinc Spray 3. Priming Coat 4. Undercoat 5. Finishing coat of light grey enamel Alternatively Stainless Steel-subjected to following treatment 1. Special etch-priming coat 2. Undercoat 3. Finishing coat of light grey enamel
<u>Colour</u>	ANSI 70 grey.
<u>Fixing Centres</u>	2-11mm x 16mm holes on 397mm centres. Fixing brackets are either uneven or level dependent on mounting arrangement.
<u>Rating Plate</u>	Durable Plastic Type.

## TERMINATIONS

<u>Bushings</u>	1 or 2 dependent on mounting arrangement. Characteristics vary to suit insulation and pollution requirements. Standard Colour—Grey.
<u>Terminals</u>	M16 x 2.0.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

All dimensions are in mm



DOUBLE BUSHING

SINGLE BUSHING

Table 1 gives references, approximate weights and dimensions for units with bushing insulators rated 75kV Bil. For higher rated bushing insulators please refer to Table 2.

TABLE 1

Output kvar	Dimensions (mm)				Weight kg	Unit Reference	
	A	B	C	D		2 Bushings	1 Bushing
50	138	203	204	107	21.5	4/20/L2A1	4/20/L1A1
75	138	303	204	107	24.0	4/30/L2A1	4/30/L1A1
100	138	343	204	107	27.0	4/34/L2A1	4/34/L1A1
125	138	373	204	107	31.0	4/37/L2A1	4/37/L1A1
150	138	443	204	107	35.0	4/44/L2A1	4/44/L1A1
175	138	513	204	107	39.0	4/51/L2A1	4/51/L1A1
200	138	583	204	257	43.5	4/58/L2A1	4/58/L1A1
225	138	623	204	257	47.0	4/62/L2A1	4/62/L1A1
250	138	693	204	257	51.0	4/69/L2A1	4/69/L1A1
275	138	743	204	327	55.0	4/74/L2A1	4/74/L1A1
300	138	783	204	327	57.5	4/78/L2A1	4/78/L1A1
325	178	663	204	257	63.5	5/66/L2A1	5/66/L1A1
350	178	703	204	327	67.0	5/70/L2A1	5/70/L1A1
375	178	743	204	327	70.5	5/74/L2A1	5/74/L1A1
400	178	783	204	327	74.5	5/78/L2A1	5/78/L1A1

TABLE 2

Bushing Bil	Dimension C	Reference
95kV	233 mm	Change A1 to A2
125kV Normal Creepage	285 mm	Change A1 to A3
125 kV Increased Creepage	285 mm	Change A1 to A4

Note—All outputs shown here are at 50 Hz. Multiply by 1.2 for 60 Hz.

The ABB group is the world's leading capacitor manufacturer having manufacturing plants in 5 countries and assembly plants in many more.

Your Local Contact:-

ABB has an extensive network of branch offices and service centres all over the world providing excellent local service.

For further information on the range of capacitor equipment available, please contact either the local office or our factory in the U.K.

เพื่อสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sphere Gap With One Sphere Grounded

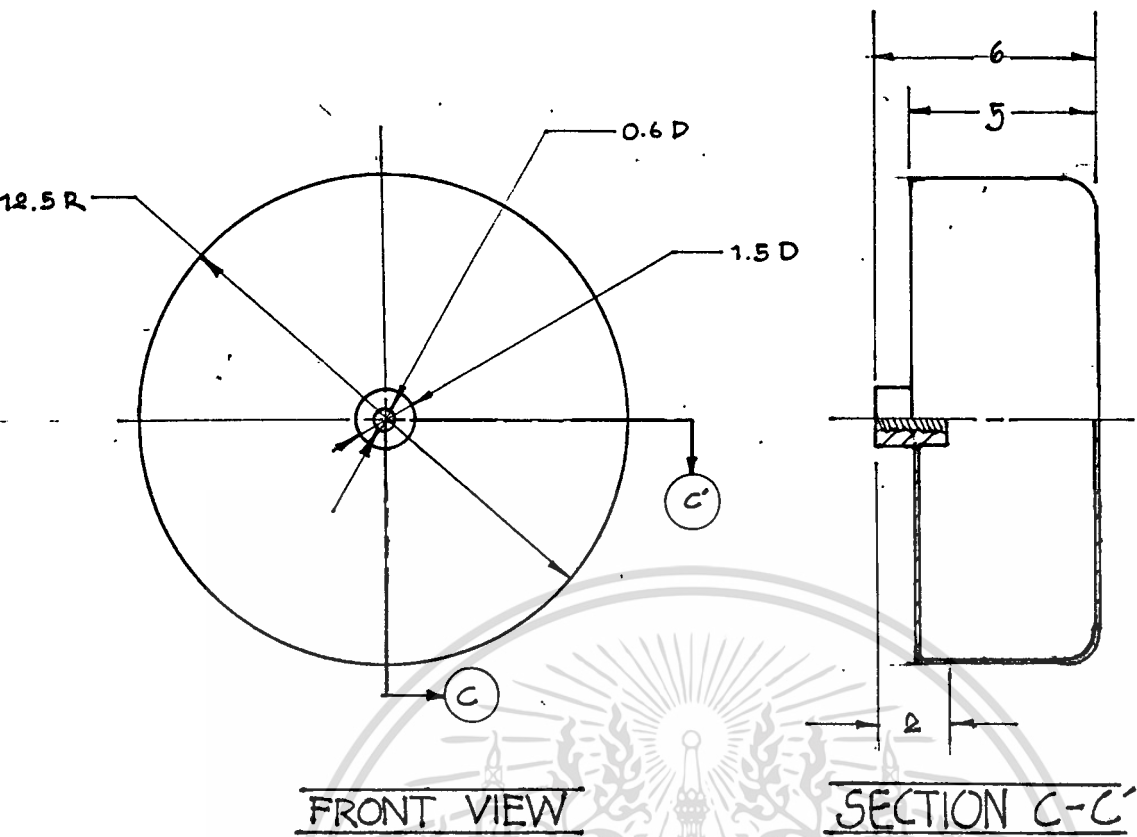
Peak values of disruptive-discharge voltages (50 percent values) are valid for:

- positive lightning impulses
- positive switching impulses.

Atmospheric reference conditions:  
20°C and 101.3 kPa.

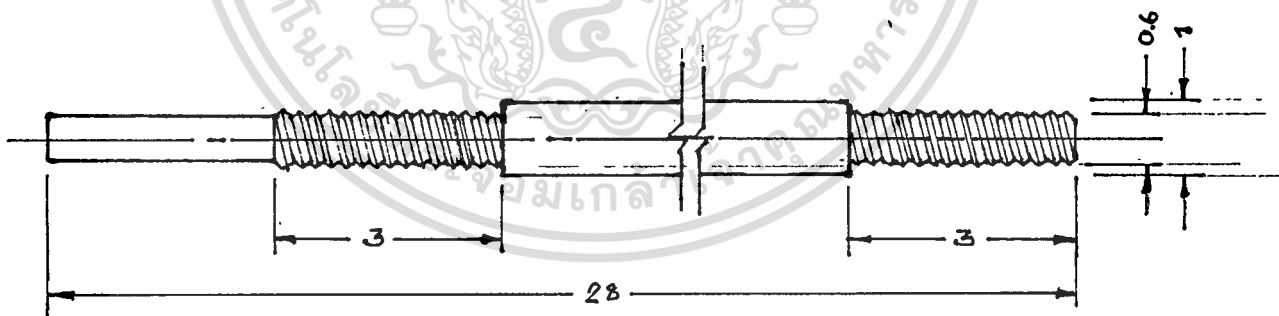
Sphere Gap Spacing (mm)	Voltage, kV Peak		
	Sphere Diameter (cm)		
	6.25	12.5	25
5	17.2	16.8	
10	31.9	31.7	
15	45.9	45.5	
20	59.0	59.0	
25	71.0	72.5	72.7
30	82.0	85.5	86.0
35	(91.5)	98.0	
40	(101)	110	112
45	(108)	122	
50	(115)	134	138
55	(122)	145	
60	(127)	155	163
62.5	(128)	160	
70		(173)	187
80		(189)	211
90		(203)	233
100		(215)	254
110		(229)	273
120		(234)	291
125		(239)	299
150			(337)
175			(368)
200			(395)
225			(416)
250			(433)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**PART 1**

SCALE 1:2  
UNIT CM

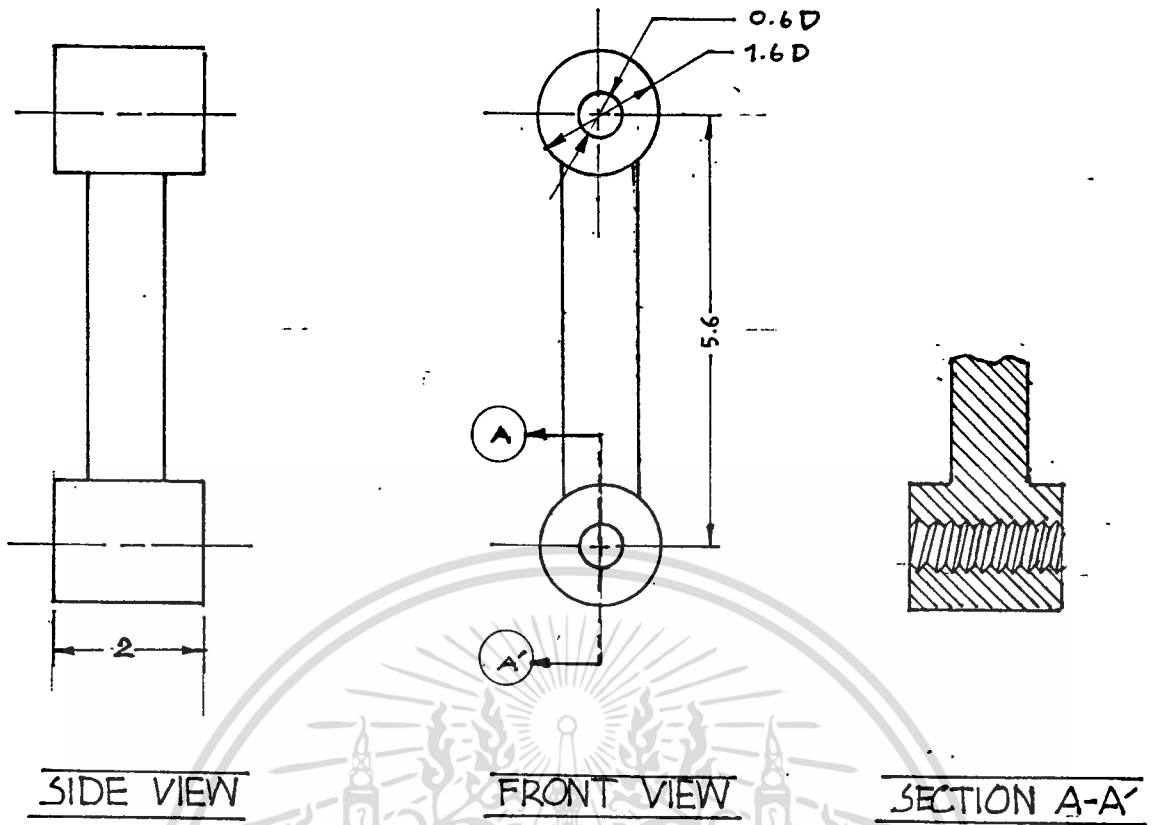


SIDE VIEW

**PART 2**

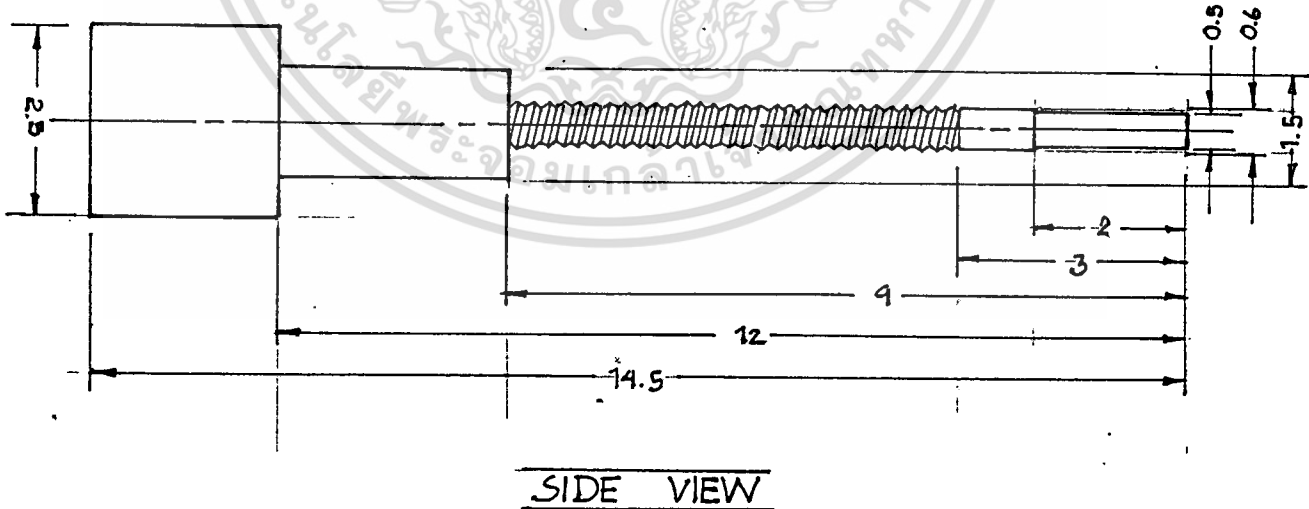
SCALE 1:1  
UNIT CM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**PART 3**

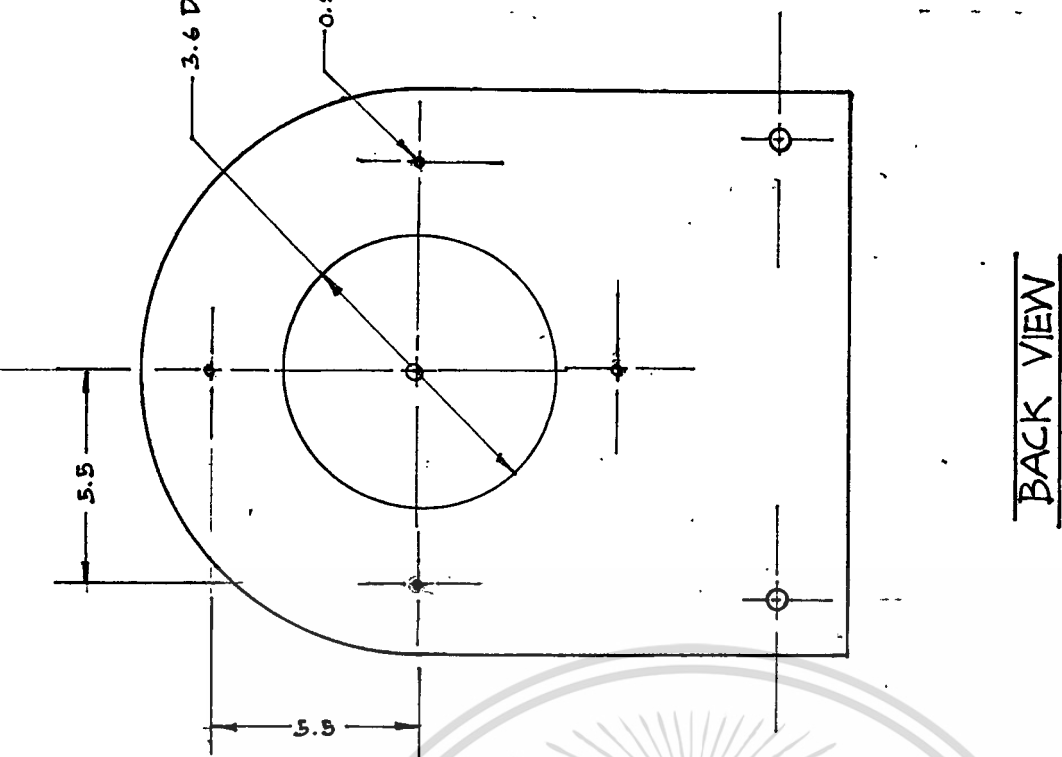
SCALE UNIT 1:1 Cm.



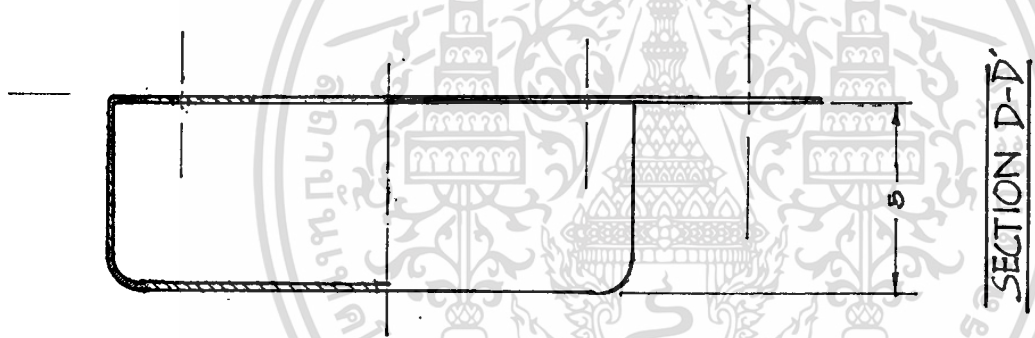
**PART 4**

SCALE UNIT 1:1 Cm.

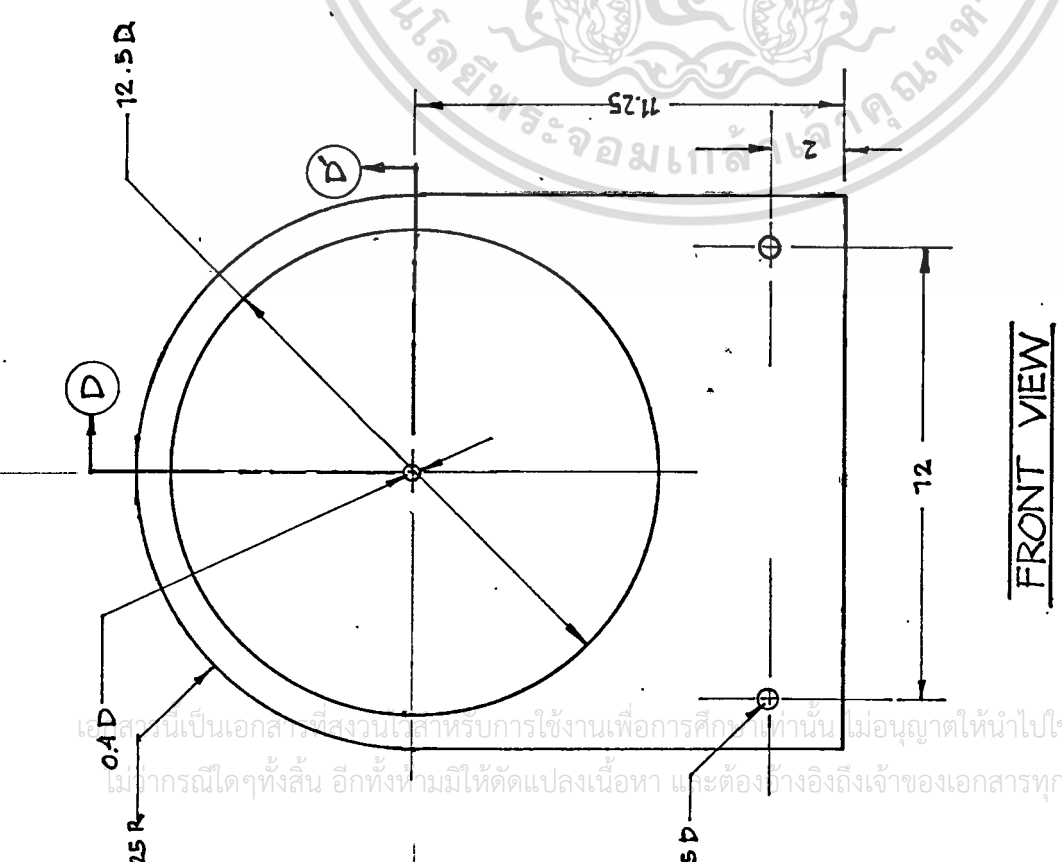
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BACK VIEW



SECTION D-D



FRONT VIEW

**PART 5**  
 SCALE 1:2  
 UNIT CM

B

B

10 D.

11 D.

TOP VIEW

0.2 D

0.4 D

5.5

5.5

2

13.5

FRONT VIEW

1.5

0.5

2.25

50

PART 7

SCALE  
UNIT

1:2  
Cm.

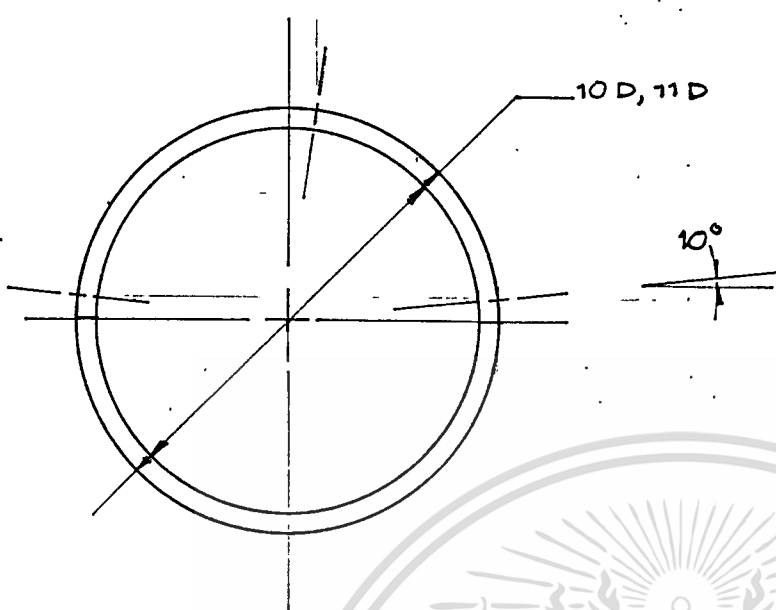
SECTION B-B

PART 6

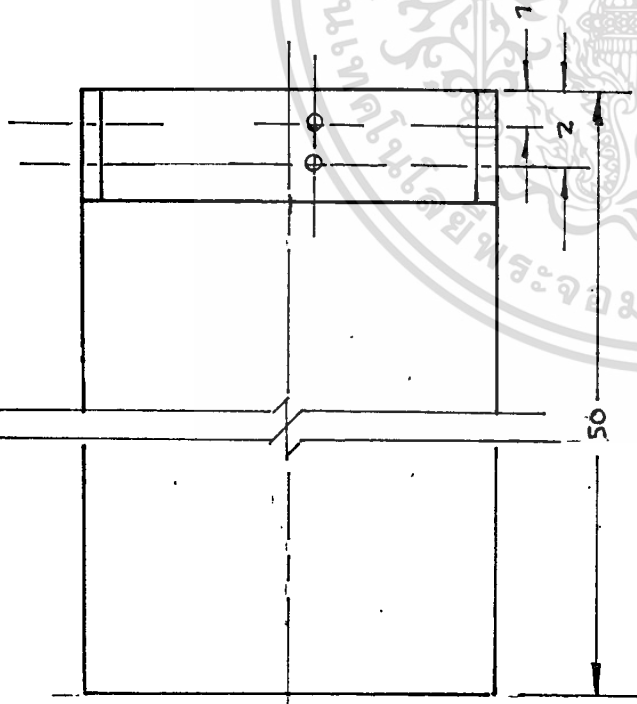
SCALE  
UNIT

1:2  
Cm.

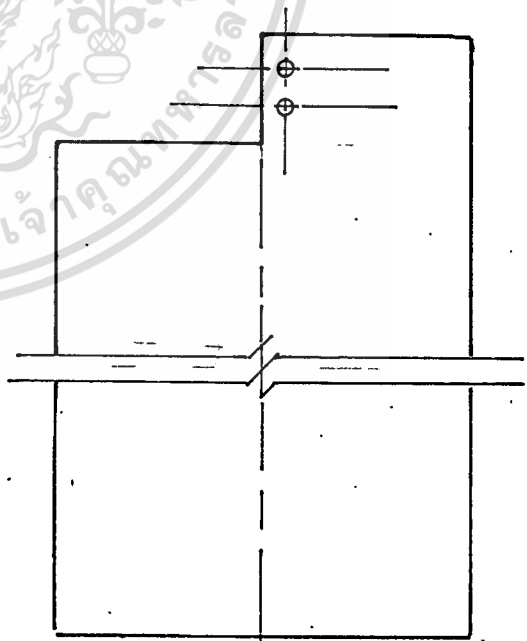
เอกสารนี้เป็นเอกสารในวาระการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOP VIEW



FRONT VIEW



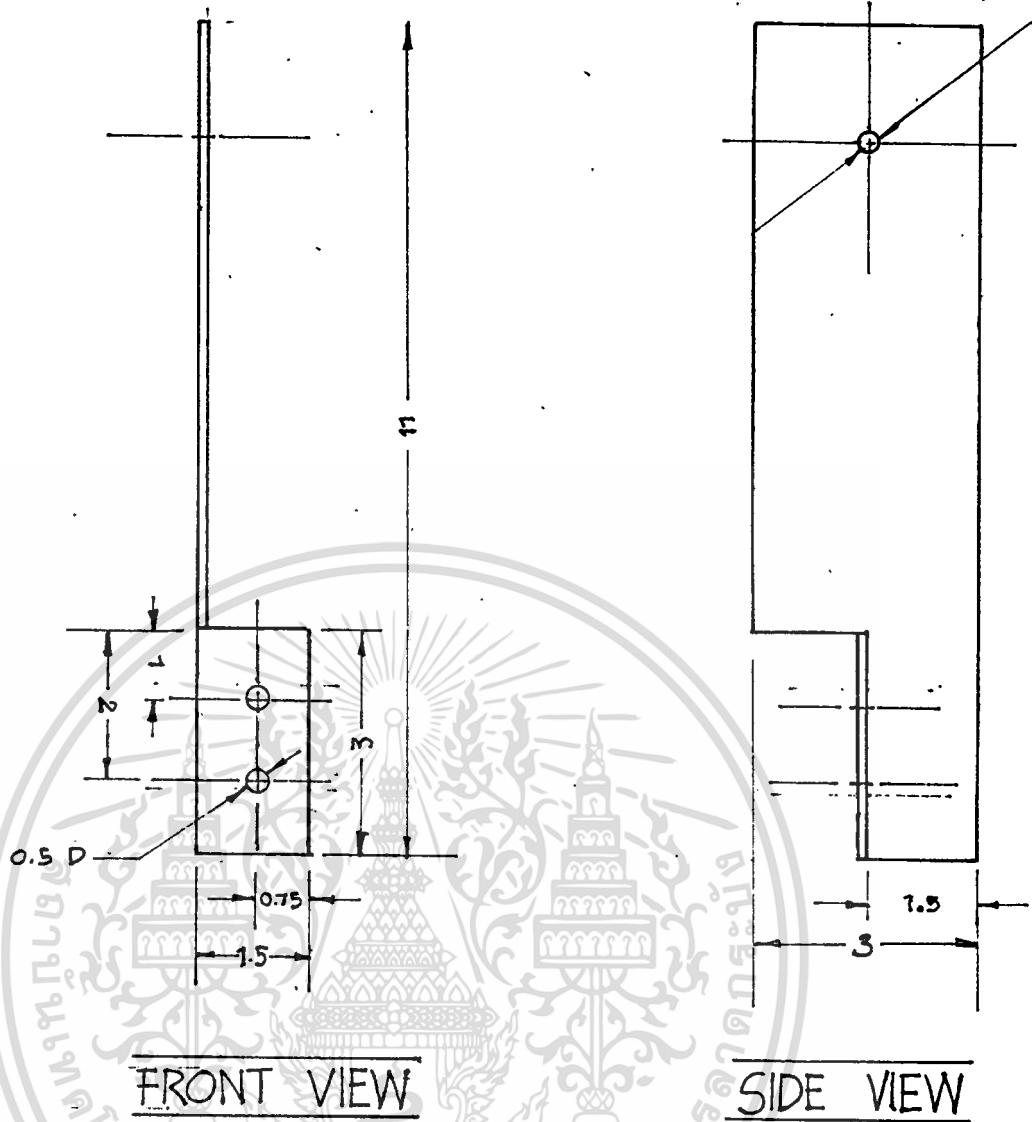
SIDE VIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

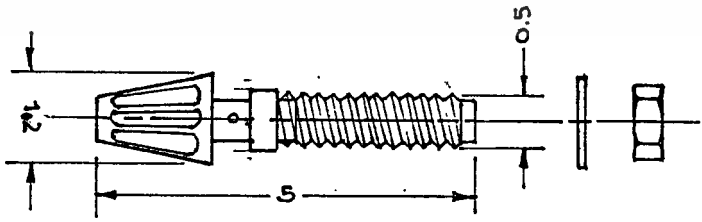
**PART 8**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCALE 1:2  
UNIT cm



**PART 9**  
 SCALE UNIT 1:1  
 cm.



**PART 10**  
 SCALE UNIT 1:1  
 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วย ความกรุณาจาก อาจารย์ ศุภี บรรจงจิตร  
ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจน เอกสารและบทความประกอบการดำเนินการต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณ สุเทพ กิตติรัตน์สัจจา หจ.ก. กิจวิวัฒนาหม้อแปลง ที่ได้ให้ความ  
อนุเคราะห์จัดสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 1 KVA 250V/37.5KV แก่ภาควิชา วิศวกรรม  
ไฟฟ้า เพื่อใช้ประโยชน์งานการศึกษาต่อไป

อย่างไรก็ตาม หากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อบกพร่องประการใด คณะผู้จัดทำ  
ขอรับไว้แต่เพียงฝ่ายเดียว ส่วนความดีและคุณค่าของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้  
คณาจารย์ที่ได้สั่งสอนอบรมมา ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนช่วยจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้  
สำเร็จลงด้วยดี

บรรณานุกรม

- 1) Kuffel. E ., Zaengl. W.S. " High Voltage Engineering " Fundamentals Pergamon Press, Oxford , 1984
- 2) IEC Standard Publ. No 60. " High Voltage Test Technique
- 3) ดร. สำรวย สังข์สะอาด "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,2528
- 4) ดร. สำรวย สังข์สะอาด "อุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันสูงอิมพัลส์ 100 KV วารสารวิศวกรรมศาสตร์, ฉบับที่ 2 ธันวาคม 2532 - พฤษภาคม 2533
- 5) " เอกสารคู่มือการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันสูงรูปคลื่นอิมพัลส์ 1,500 KV " Pulse Electronic Engineering Co.,Ltd ( เอกสารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ส.จ.ล.)
- 6) บริษัท อุตสาหกรรมท่อน้ำไทย จำกัด " ท่อน้ำไทย " กรุงเทพฯ
- 7) " การออกแบบสร้างตัวต้านทานสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันสูง 100 KV " รายงานโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2531
- (8) บริษัท คู่ครอง " การออกแบบสร้างมัลติเบิลช็อบบิ่งแกป 400 KV " วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2524
- 9) สัจฉินต์ ตันท์วรกุล " ไฟฟ้าในรถยนต์ " ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2527
- 10) IEC Standard Publ. No 71-1976 " Insulation Co-Ordination Part I "
- 11) IEC " High Voltage Test Technique " Part 4 Measuring Devices Application Guide " Publ 60-4 ; IEC ,1978
- 12) IEEE . " IEEE Standard Technique For High Voltage Testing " 6<sup>th</sup> ed . IEEE Std 4-1978

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้