สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเปรียบเทียบผลของเสิร์จ

Insulation Test for Induction Machine by Surge Comparison Testing

T042603

โดย

นายมีชัย พิจารณ์

นายไมตรี จินานุสรณ์

นายยงค์ยุทธ์ แต่งสวน

นายวรเจตน์ ชัยวิรัตนะ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.พิชิต ลำยอง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42603
วัน, เดือน, ปี 4 มิ.ย. 2545

.b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเปรียบเทียบผลของเสิร์จ

ผู้จัดทำ

1. นายมีชัย พิจารณ์
2. นายไมตรี จินานุสรณ์
3. นายยงค์ยุทธ์ แต่งสวน
4. นายวรเจตน์ ชัยวิรัตนะ

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พิชิต ลำยอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเปรียบเทียบผลของเสิร์จ

นายมีชัย พิวารณ์
นายไมตรี จินานุสรณ์
นายยงค์ยุทธ์ แต่งสวน
นายวรเจตน์ ชัยวิรัตนะ
ผศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ในทางอุตสาหกรรม ความล้มเหลวในการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหยุดชะงักของระบบไฟฟ้า หรือสายการผลิตได้ สาเหตุหลักประการหนึ่งคือการเบรคดาวน์ของฉนวนขดลวดซึ่งนำไปสู่การรั่วลงกราวด์ การตรวจสอบสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ทำได้หลายวิธี วิธีการหนึ่งคือการเปรียบเทียบผลของเสิร์จ ซึ่งสามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ระหว่างเฟสกับเฟส และสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ โครงงานนี้จึงได้นำวิธีการเปรียบเทียบเสิร์จมาประยุกต์โดยใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าซึ่งมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นเป็น 1.2/50 ไมโครวินาที เพื่อทดสอบขดลวดสเตเตอร์ในกรณีต่างๆ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นได้ใช้เอสซีอาร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ และออกแบบขนาดแรงดันไว้ที่ 6,000 โวลต์ เพื่อจะครอบคลุมพิกัดเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดต่างๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulation Test for Induction Machine by Surge Comparison Testing

Meechai Pijarn
Maitree Jinanusorn
Yongyoot Tangsuan
Worajate Chaiwiratana
Asst. Prof. Pichit Lumyong Advisor
2000

ABSTRACT

Industrially, an induction machine failure can result in the shutdown of an electrical system or production line. One major cause of failures is breakdown of the turn insulation leading to puncture of the groundwall. The detection of insulation in stator winding is a variety of ways. One method is surge comparison test which can detect many type of faults, such as turn-to-turn, phase-to-phase and coil-to-ground insulation. Surge comparison test is applied to this project by using lightning impulse voltage which has a front time of 1.2 μsec and a tail time of 50 μsec to test stator winding in many cases. The impulse generator using SCR as switch was designed a maximum voltage of 6 kV, to cover in various machine voltage ratings.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การทดสอบสภาพฉนวนมอเตอร์	3
2.1 การทดสอบความต้านทานฉนวน	3
2.2 การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก	4
2.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง	4
2.3.1 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่	4
2.3.2 การทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรง	5
2.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ	5
2.5 การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ	6
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	8
3.1 ทฤษฎีแรงดันอิมพัลส์	8
3.1.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	8
3.1.2 แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิ่งรูปคลื่นเต็ม	11
3.1.3 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	12
3.1.4 การคำนวณวงจร	14
3.2 ทฤษฎีการสร้างแรงดันกระแสตรง	19
3.2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	19
3.2.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงที่มีแท็ป	20
3.2.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	22
3.3 ทฤษฎีการสร้างสัญญาณพัลส์เดียว	23
3.4 ไทริสเตอร์	28
3.4.1 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	28
3.4.2 การจุดชนวนไทริสเตอร์	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.4.3 การปิดกระแสของไทริสเตอร์ 34
3.4.4 การนำไทริสเตอร์มาต่ออนุกรม 35
3.5 ตัวเหนี่ยวนำ 38
บทที่ 4 การออกแบบการทดลอง 41
4.1 การออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลอง 41
4.1.1วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง 41
4.1.2 วงจรโมโนสเตเบิล 41
4.1.3 วงจรทริกเอสซีอาร์ 42
4.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 43
4.2 การออกแบบหม้อแปลง 44
4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร 46
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง 48
5.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ 48
5.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบการลัดวงจรที่เอาท์พุทของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 54
5.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์เมื่อป้อนให้กับขดสเตเตอร์ของมอเตอร์ 55
5.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์ 62
5.5 การทดลองที่ 5 การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ 71
5.6 การทดลองที่ 6 การทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส 73
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 76
ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ	7
รูปที่ 3.1	แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	9
รูปที่ 3.2	แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด	10
รูปที่ 3.3	แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิชชิ่งรูปคลื่นเต็ม	11
รูปที่ 3.4	แสดงวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	12
รูปที่ 3.5	แสดงวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ไกสวิตช์	14
รูปที่ 3.6	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม	16
รูปที่ 3.7	วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	19
รูปที่ 3.8	รูปวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบแทปกลางพร้อมทั้งคลื่นสัญญาณ v(t) และ i(t)	21
รูปที่ 3.9	(ก) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (ข) ทิศทางของกระแสในขณะที่ v_{AC} เป็นบวก (ค) ทิศทางของกระแสในขณะที่ v_{AC} เป็นลบ (ง) รูปคลื่นของ v_0	22
รูปที่ 3.10	การตอบสนองต่อสัญญาณกระตุ้นของวงจรโมโนสเตเบิลทั้งสองแบบ	24
รูปที่ 3.11	วงจรโมโนสเตเบิลแบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำ	25
รูปที่ 3.12	วงจรกระตุ้นสำหรับโมโนสเตเบิลแบบยอมรับการกระตุ้นซ้ำ	25
รูปที่ 3.13	วงจรโมโนสเตเบิลที่สร้างจากไอซี 555	26
รูปที่ 3.14	วงจรภายในไอซี 555	27
รูปที่ 3.15	(ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์ (ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์	29
รูปที่ 3.16	(ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก (ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	29
รูปที่ 3.17	เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกท	32
รูปที่ 3.18	(ก) วงจรไทริสเตอร์กับภาระ (ข) การเปลี่ยนแปลงกระแสและการเปลี่ยนแปลงแรงดันของไทริสเตอร์ขณะเปิดกระแส	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 3.19 (ก) เอสซีอาร์สองตัวต่ออนุกรม (ข) แรงดันแบ่งตกคร่อมเอสซีอาร์สองตัวมีค่าไม่เท่ากัน 37
รูปที่ 3.20 การใช้ความต้านทานเข้าต่อขนานเพื่อแบ่งเฉลี่ยแรงดันกั้นให้ไปตกคร่อมเอสซีอาร์แต่ละตัว 37
รูปที่ 3.21 แสดงการเกี่ยวคล้องของสนามแม่เหล็กของขดลวด 2 ขด 39
รูปที่ 4.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง 41
รูปที่ 4.2 วงจรโมโนสเตเบิล 42
รูปที่ 4.3 วงจรทริกเอสซีอาร์ 42
รูปที่ 4.4 วงจรป้องกันเอสซีอาร์ 43
รูปที่ 4.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ 43
รูปที่ 4.6 ลักษณะของแกน EI 44
รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1 49
รูปที่ 5.2 สัญญาณทริกเอสซีอาร์ 49
รูปที่ 5.3 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์(R_1=273 โอห์ม, R_2=433 โอห์ม) 50
รูปที่ 5.4 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=368 โอห์ม) 50
รูปที่ 5.5 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 500 โวลต์ 51
รูปที่ 5.6 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1000 โวลต์ 51
รูปที่ 5.7 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 2000 โวลต์ 52
รูปที่ 5.8 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 3000 โวลต์ 52
รูปที่ 5.9 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 4000 โวลต์ 53
รูปที่ 5.10 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 5000 โวลต์ 53
รูปที่ 5.11 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 6000 โวลต์ 54
รูปที่ 5.12 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 2 54
รูปที่ 5.13 แสดงรูปคลื่นเมื่อเอาท์พุทเกิดการลัดวงจร 55
รูปที่ 5.14 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 3 56
รูปที่ 5.15 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=368 โอห์ม, R_M=1000 โอห์ม) 57
รูปที่ 5.16 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, ไม่ต่อR_2ในวงจร, R_M=1000 โอห์ม) 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.17 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, ไม่ต่อR_2ในวงจร, R_M=1500 โอห์ม) 58

รูปที่ 5.18 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 58

รูปที่ 5.19 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 500 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 59

รูปที่ 5.20 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1000 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 59

รูปที่ 5.21 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 2000 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 60

รูปที่ 5.22 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 3000 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 60

รูปที่ 5.23 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 4000 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 61

รูปที่ 5.24 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 5000 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 61

รูปที่ 5.25 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 6000 โวลต์(R_1=233 โอห์ม, R_2=668 โอห์ม, R_M=1500 โอห์ม) 62

รูปที่ 5.26 วงจรการทดลองที่ 4 63

รูปที่ 5.27 แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดทดสอบ 63

รูปที่ 5.28 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ 64

รูปที่ 5.29 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ 64

รูปที่ 5.30 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่ 5.28) 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.31 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(ขยายรูปที่ 5.29) 65

รูปที่ 5.32 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(500 โวลต์) 66

รูปที่ 5.33 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(500 โวลต์) 66

รูปที่ 5.34 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(500 โวลต์, ขยายรูปที่5.32) 67

รูปที่ 5.35 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(500 โวลต์, ขยายรูปที่5.33) 67

รูปที่ 5.36 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(4000 โวลต์) 68

รูปที่ 5.37 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(4000 โวลต์) 68

รูปที่ 5.38 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(4000 โวลต์, ขยายรูปที่5.36) 69

รูปที่ 5.39 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(4000 โวลต์, ขยายรูปที่5.37) 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.40 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(4000 โวลต์) 70

รูปที่ 5.41 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่(4000 โวลต์, ขยายรูปที่ 5.40) 70

รูปที่ 5.42 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส A มีสภาพฉนวนที่อ่อนแอเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ส่วนขดลวดเฟส สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ 71

รูปที่ 5.43 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 5 71

รูปที่ 5.44 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบยังมีสภาพฉนวนดีอยู่ 72

รูปที่ 5.45 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ตรงตำแหน่งใกล้กับต้นขดของขดลวดทดสอบ 72

รูปที่ 5.46 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ตรงตำแหน่งใกล้กับต้นขดของขดลวดททดสอบ 73

รูปที่ 5.47 รูปคลื่นที่ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ตรงตำแหน่งที่ไกลออกไปจากต้นขดของขดลวดทดสอบ 73

รูปที่ 5.48 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 6 73

รูปที่ 5.49 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดททดสอบยังมีสภาพฉนวนดีอยู่ 74

รูปที่ 5.50 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเฟส A เกิดการลัดวงจรกับเฟส B ตรงตำแหน่งใกล้กับต้นขดของขดลวดทดสอบ 74

รูปที่ 5.51 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเฟส A เกิดการลัดวงจรกับเฟส B ตรงตำแหน่งที่ไกลออกไปจากต้นขดของขดลวดทดสอบ 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	แสดงค่าแฟคเตอร์ B_1, B_0 และ K สำหรับวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ก) และ (ข)	16
ตารางที่ 3.2	แสดงค่าแฟคเตอร์ต่างๆ ของแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน	17
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	18
ตารางที่ 5.1	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ฉนวนของมอเตอร์สมัยใหม่มีความน่าเชื่อถือสูงมาก ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ ไม่เกิดการใช้งานที่เกินพิกัดทางด้านไฟฟ้า ไม่เกิดการใช้งานในทางที่ผิดทางกลหรือทางเคมี เช่น มีไอของสารเคมีในพื้นที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนของมอเตอร์อาจมีอายุยาวนานถึง 100,000 ชั่วโมงทำงาน นั่นคือใช้งานได้นานถึง 20 ปี หากใช้งานปีละ 5,000 ชั่วโมง

การเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อน คือสาเหตุหลักของการเสียสภาพการเป็นฉนวนก่อนเวลาอันสมควรของฉนวนมอเตอร์ เราอาจจะกล่าวได้ว่าการให้มอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ทุกๆ 10 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือถ้าอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 50% ของอายุที่ควรจะเป็น และถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ 20 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 25% ของอายุที่ควรจะเป็น ความชื้นจากบรรยากาศเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียสภาพ อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียสภาพคือการรบกวนจากระบบไฟฟ้า เช่นเกิดจากแรงดันเสิร์จ จากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อระบบหรือจากฟ้าผ่า แรงดันเสิร์จค่าสูงๆ จะทำให้เกิดความเสียหายตรงจุดอ่อนของฉนวนโดยทำให้เสียสภาพฉับพลัน

การเสียสภาพของฉนวนของชุดขดลวดของมอเตอร์จะไม่แสดงผลของมันออกมา เมื่อมอเตอร์ถูกเก็บไว้ไม่ได้ใช้งาน แต่มอเตอร์จะทำงานไม่ได้เมื่อถึงเวลาที่เราจะใช้งาน ด้วยเหตุนี้มอเตอร์ที่ต้องทำงานในจุดที่สำคัญจึงต้องมีการทดสอบสภาพฉนวนเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน ด้วยโปรแกรมการทดสอบในลักษณะนี้ฉนวนที่มีคุณภาพลดลงจะถูกตรวจพบและได้รับการแก้ไขล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเสียสภาพในระหว่างใช้งาน และสำหรับโรงงานที่ผลิตมอเตอร์หลังจากกระบวนการผลิตแล้วก็ต้องมีการทดสอบฉนวนของมอเตอร์เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

การทดสอบสภาพฉนวนของมอเตอร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test) การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก (Polarization Index Test) การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง (High Direct Voltage Test) การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ (High Alternating Voltage Test) การทดสอบทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาเหมาะกับการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ ไม่สามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ระหว่างขดลวดต่อขดลวด และระหว่างเฟสกับเฟสได้ จึงต้องใช้การทดสอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเสิร์จ (Surge Voltage Test) ซึ่งสามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดกับฉนวนของมอเตอร์ดังกล่าวได้

จากสาเหตุที่กล่าวมาทั้งหมด โครงงานนี้จึงได้ศึกษาวิธีการทดสอบด้วยแรงดันเสิร์จที่มีต่อความผิดปกติของสภาพฉนวนมอเตอร์ในลักษณะต่างๆ เพื่อการศึกษานี้จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันเสิร์จในลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นตามมาตรฐาน IEEE Std 4-1995(R1978) โดยมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นเท่ากับ 1.2/50 ไมโครวินาที ใช้เอสซีอาร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สามารถจ่ายแรงดันอิมพัลส์ได้สูงสุด 6,000 โวลต์ ขึ้นเพื่อทดสอบกับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การทดสอบสภาพฉนวนมอเตอร์

การทดสอบสภาพฉนวนมอเตอร์สามารถทำได้หลายวิธี ดังจะยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test)

การทดสอบความต้านทานฉนวนหรือที่เราเรียกว่าการวัดค่าเมกะโอห์มของฉนวนเป็นวิธีที่ง่าย และสะดวกที่สุดในการใช้กับการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนาย วิธีนี้มีการประยุกต์ใช้มาตั้งแต่เมื่อปี ค.ศ. 1912 ถึงแม้ว่าจะปฏิบัติได้ง่ายและรวดเร็ว แต่ผลการทดสอบจะใช้บ่งถึงสภาพของฉนวนเมื่อเทียบกับกราวด์เท่านั้น เช่นฉนวนของชุดขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเสียสภาพทำให้ชุดขดลวดต่อลงกราวด์ ซึ่งการวัดหาค่าเมกะโอห์มของฉนวนทำได้โดยการ ป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าไปที่ฉนวนแล้ววัดกระแสที่ไหล โดยมีตัวความต้านทานตัวหนึ่งที่เรารู้ค่ามาต่ออนุกรมกับฉนวน แล้วใช้หลักการแบ่งแรงดันก็สามารถรู้ค่าความต้านทานของฉนวนได้ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดความต้านทานฉนวนในลักษณะนี้เรียกว่า เมกะโอห์มมิเตอร์

การทดสอบด้วยวิธีนี้จะต่อสายกราวด์ของเมกะโอห์มมิเตอร์เข้ากับกรอบ (frame) ของมอเตอร์แล้วป้อนแรงดันกระแสตรงขนาด 500 โวลต์ 1,000 โวลต์ หรือ 2,500 โวลต์ (ทั้งนี้ขึ้นกับเมกะโอห์มที่ใช้) เข้าที่ชุดขดลวดของมอเตอร์ ถ้าเป็นชุดขดลวดที่ดีไม่ชำรุดและแห้งจะอ่านค่าความต้านทานฉนวนได้หลายร้อยหรือหลายพันเมกะโอห์ม แต่ถ้าฉนวนอยู่ในสภาพเสื่อมมีความชื้นหรือเปื้อนจารบี น้ำมัน หรือสารเคมี จะอ่านค่าความต้านทานฉนวนได้เพียงไม่กี่เมกะโอห์มเท่านั้น ถ้าอ่านได้ต่ำกว่า 1 เมกะโอห์ม จะเป็นสัญญาณชี้ให้เห็นว่าถึงจุดอันตรายที่ฉนวนจะเสียสภาพเมื่อไรก็ได้ มาตรฐาน IEEE Std 43-1974(R1991) ได้กำหนดเกณฑ์ต่ำสุดของค่าที่ยอมรับได้ ไว้ว่าต้องอ่านค่าเมกะโอห์มได้ไม่ต่ำกว่า 1 เมกะโอห์ม บวกกับอีก 1 เมกะโอห์มต่อ 1,000 โวลต์ ของพิกัดแรงดันของมอเตอร์ ด้วยเกณฑ์นี้มอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 460 โวลต์ (เป็นมอเตอร์ที่ใช้งานในอเมริกา) จะต้องอ่านค่าความต้านทานฉนวนได้ไม่ต่ำกว่า 1.46 เมกะโอห์ม เป็นต้น

เพื่อความถูกต้องของการวัด จะต้องปรับค่าที่อ่านได้ไปที่สภาวะอุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียสด้วยโดยใช้ตารางปรับค่าที่ให้มาพร้อมกับเมกะโอห์มมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก (Polarization Index Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบขยายผลของการทดสอบความต้านทานฉนวน โดยการอ่านค่าความต้านทานฉนวนสองค่าคือค่าที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที นับตั้งแต่เริ่มป้อนแรงดันให้กับฉนวน แล้วนำมาหาค่าดัชนีความต้านทานฉนวน (Polarization Index : PI) โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่าความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที ต่อความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานานๆ โมเลกุลของฉนวนจะมีสภาพเป็นขั้วบวกขั้วลบเกิดขึ้น มีผลทำให้อ่านค่าความต้านทานฉนวนได้สูงขึ้น ค่าดัชนีความต้านทานฉนวนเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความสะอาดและแห้งของฉนวนได้ ถ้าค่าดัชนีความต้านทานฉนวนสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดแสดงว่าฉนวนสะอาดและแห้ง แต่ถ้าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดแสดงว่าฉนวนเปียกและสกปรก ตามมาตรฐาน IEEE Std 43-1974(R1991) ได้กำหนดค่าต่ำสุดของค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ของฉนวนชั้น(Class) ต่างๆ ไว้ดังนี้ ฉนวนชั้น A ต้องวัดได้ไม่ต่ำกว่า 1.5 ฉนวนชั้น B และชั้น F ต้องวัดได้ไม่ต่ำกว่า 2.0 การทดสอบความต้านทานฉนวนและการทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก จะทำก่อนการทดสอบแรงดันสูง เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนไม่เปียกหรือสกปรกจนเกินไป

2.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง (High Direct Voltage Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวนเทียบกับกราวด์ เป็นการทดสอบเพื่อหาจุดอ่อนของฉนวนที่อาจจะตรวจหาไม่พบ จากการทดสอบด้วยแรงดันที่ค่อนข้างจะต่ำจากเมกะโอห์มมิเตอร์ ตัวอย่างเช่นมอเตอร์พิกัดแรงดัน 460 โวลต์ เมื่อถูกทดสอบด้วยเมกะโอห์มมิเตอร์ที่ให้แรงดัน 500 โวลต์ อาจจะอ่านค่าความต้านทานฉนวนได้สูงถึง 1,000 เมกะโอห์ม ซึ่งสูงกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับ ในกรณีนี้อาจมีจุดอ่อนที่ฉนวนของมอเตอร์ซึ่งจะเสียสภาพฉับพลันเมื่อได้รับแรงดัน 800 โวลต์ ซึ่งแรงดันระดับนี้มักจะพบได้เสมอในระบบไฟฟ้ากำลังของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอาจจะเกิดมาจากการเหนี่ยวนำชั่วครู่จากการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอนหรือจากฟ้าผ่า

การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.3.1 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่ (DC Hipotential Test)

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งจะมีผลทำให้ฉนวนที่อ่อนแอเกิดการเบรคดาวน์ขึ้น โดยการป้อนแรงดันกระแสตรง ตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R1991) ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ 1.7 เท่าของการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ ทั้งการทดสอบเพื่อการรับรอง (Acceptance Proof Test) ที่โรงงานใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบมอเตอร์ที่ผลิตขึ้นใหม่และการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา (Maintenance Proof Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรง (Control Over Voltage Test)

การทดลองนี้นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา โดยสามารถที่จะคาดการณ์ระดับแรงดันเบรคดาวน์ได้ โดยฉนวนที่อ่อนแอยังไม่เกิดการเบรคดาวน์ขึ้น ตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R1991) กำหนดให้ป้อนแรงดันเริ่มต้นประมาณ 1/3 เท่าของแรงดันทดสอบสูงสุด (โดยแรงดันทดสอบสูงสุดเท่ากับระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่) โดยคงที่แรงดันไว้ 10 นาที เพื่อหาค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ซึ่งค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ต้องมากกว่าค่าที่กำหนดตามที่กล่าวมาแล้วถึงจะทำการทดสอบต่อ แต่ถ้าน้อยกว่าค่าที่กำหนดจะต้องหยุดทำการทดสอบ หลังจากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไม่เกิน 3% ของแรงดันทดสอบสูงสุดในทุกๆ 1 นาที เมื่อครบ 1 นาที ก็ทำการบันทึกค่าแรงดันและกระแสไว้ จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกราฟ ถ้ากราฟมีลักษณะของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไม่เป็นเส้นตรง ก็ให้หยุดทำการทดสอบทันที ซึ่งแสดงว่าฉนวนอ่อนแอ และจะเสียสภาพฉับพลันได้หากทำการทดสอบต่อไป แต่ถ้าลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงก็ให้ทำการเพิ่มแรงดันไปจนถึงแรงดันทดสอบสูงสุด ถ้าลักษณะกราฟยังเป็นเส้นตรงอยู่แสดงว่าฉนวนของขดลวดยังมีสภาพดีอยู่

2.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ (High Alternating Voltage Test)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบฉนวนด้วยการป้อนแรงดันสูงกระแสสลับก็เพื่อทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ การทดสอบจะเป็นการจำลองการเกิดแรงดันเกินขึ้นชั่วระยะเวลาหนึ่งแล้วหายไป เช่น การเปิดปิดวงจรขนาดใหญ่ของเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ , การโอนย้ายโหลด ฯลฯ ระยะเวลาที่เกิดแรงดันเกินจะนานกว่าการเกิดจากแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครวินาที

การทดสอบแรงกันสูงกระแสสลับนี้ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์ ซึ่งการทดสอบนี้บอกได้ว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้หรือไม่ ในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งตามมาตรฐาน IEC และ NEMA MG1 กำหนดระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบเพื่อการรับรองไว้ที่ 2E+1 kV (E คือค่าของแรงดันเฟสต่อเฟสที่พิกัดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น kV) และมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R1991) ได้กำหนดระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาไว้ที่ 1.25 ถึง 1.5 เท่าของพิกัดแรงดันเฟสต่อเฟส โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 60 วินาที การทดสอบนี้อาจจะเป็นการทำลายฉนวนของขดลวดได้ และอาจจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ซึ่งจะทำให้อายุของฉนวนสั้นลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ (Surge Comparison Test)

การทดสอบทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาเหมาะกับการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ ไม่สามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด และระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งความบกพร่องเหล่านี้ จะนำไปสู่ความบกพร่องเทียบกับกราวด์ การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จจะช่วยให้ค้นพบความบกพร่องดังกล่าวก่อนที่จะลุกลามรุนแรงต่อไป

ถึงแม้ว่าการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จจะได้มีการประยุกต์ใช้งานในโรงงานผลิตมอเตอร์ และโรงงานซ่อมมอเตอร์เพื่อประกันคุณภาพของมอเตอร์มาเป็นเวลานานแล้ว แต่เทคนิคดังกล่าวได้มีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนายในช่วงไม่กี่ปีมานี้เอง

การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จอาศัยหลักการที่ว่ามอเตอร์ที่มีชุดขดลวดที่ไม่บกพร่องชุดขดลวดทั้ง 3 เฟส (มอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ซิงโครนัส) จะมีลักษณะเหมือนกันทุกอย่าง การทดสอบจะทำการทดสอบเปรียบเทียบชุดขดลวดทีละคู่เปรียบเทียบกัน เช่น เฟส A กับ B , เฟส B กับ C และ เฟส C กับ A การทดสอบจะทำโดยป้อนด้วยพัลส์แรงดันตรงที่มีลักษณะเหมือนกันเข้าไปที่ขดลวดทั้ง 2 พร้อมกัน พัลส์ที่เกิดการสั่น (Ringing Pulse) จากชุดขดลวดทั้ง 2 จะถูกตรวจจับด้วยออสซิสโลสโคป ชนิด 2 เส้น (Dual trace) ถ้าชุดของขดลวดมีลักษณะเหมือนกัน พัลส์ทั้งสองจะเหมือนกัน และซ้อนกันสนิทปรากฏให้เห็นบนจอภาพเพียงเส้นเดียว ในกรณีที่มีการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (turn-to-turn short circuit) คลื่นสะท้อนทั้งสอง จะไม่เหมือนกันจึงไม่ซ้อนกัน และสภาพความเสียหายในลักษณะอื่นๆ เช่นกรณีที่เกิดจากชุดขดลวดชุดหนึ่งต่อลงกราวด์ หรือชุดขดลวดขาดลัดวงจรระหว่างเฟส ก็สามารถตรวจสอบได้โดยเปรียบเทียบรูปคลื่นที่วัดได้กับรูปคลื่นตัวอย่างที่ผู้ผลิตเครื่องทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จให้ไว้ การทดสอบวิธีนี้ทำได้ง่ายโดยไม่ต้องถอดสายไฟที่ต่อมอเตอร์ออกเพียงแต่ปลด (OFF) เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือถอดฟิวส์ที่ใช้ป้องกันมอเตอร์ออกก็สามารถทดสอบได้เลย

จากสาเหตุและวิธีการทดสอบที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นว่าการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จสามารถระบุความบกพร่องต่างๆ ของฉนวนในมอเตอร์ได้ โดยเฉพาะการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ซึ่งการทดสอบลักษณะอื่นๆ ไม่สามารถตรวจสอบได้ โครงงานนี้จึงได้นำการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จมาประยุกต์ เพื่อทำการศึกษาการทดสอบสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานซึ่งมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเป็น 1.2/50 ไมโครวินาทีในการทดสอบ

การทดสอบสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโครงงานนี้ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะคือ

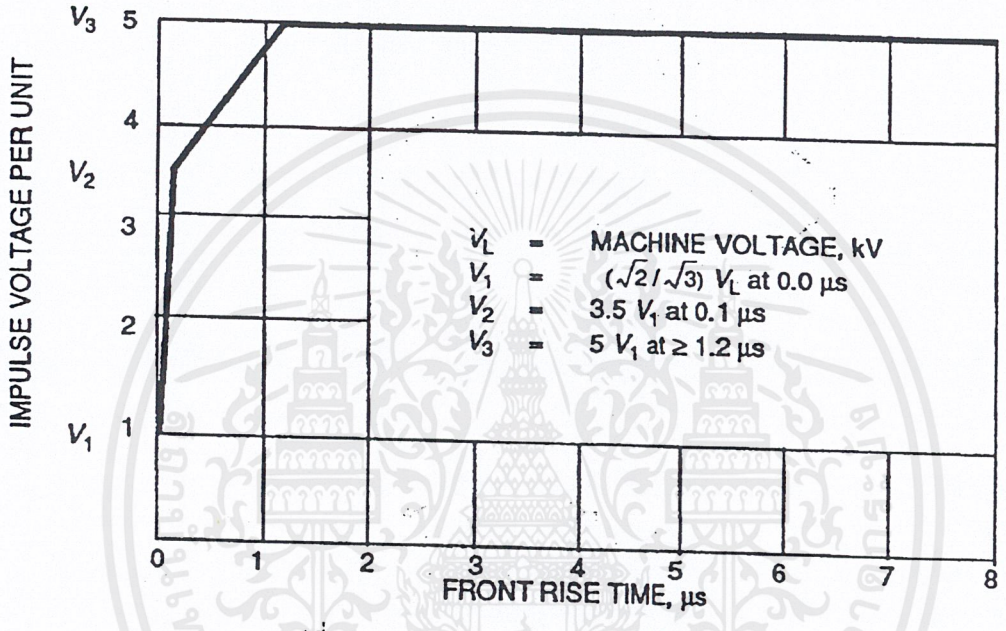
1. การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบการลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบ

3. การทดสอบการลัดวงจรระหว่างเฟสกับเฟส

ตามมาตรฐาน IEEE Std 522-1992(R1977) ได้กำหนดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบครอบขดลวดโดยสัมพันธ์กับช่วงเวลาหน้าคลื่นไว้ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ

โครงงานนี้ได้ใช้แรงดันอิมพัลส์ทดสอบที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่น 1.2 ไมโครวินาที จากรูปที่ 2.1 จะได้ระดับแรงดันอิมพัลส์ทดสอบเท่ากับ $5\left(\sqrt{2}/\sqrt{3}\right)V_L$ โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

3.1 ทฤษฎีแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกิน ที่เกิดจากเหตุภายนอก คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าเรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรคเกอร์เมื่อมีความผิดปกติขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิ่ง ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อจะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้หรือไม่ ความคงทนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ของฉนวน มิใช่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันสูงสุดเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วยฉะนั้นเพื่อสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้นโดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

ลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์กำหนดด้วย

1) ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากการออสซิเลชั่นใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2) ขั้วของแรงดัน อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
4) เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

3.1.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปคลื่น คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม (full wave) และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (chopped wave)

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มมีลักษณะตามข้อกำหนดทั้ง 4 ข้อดังกล่าว ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 (front time)

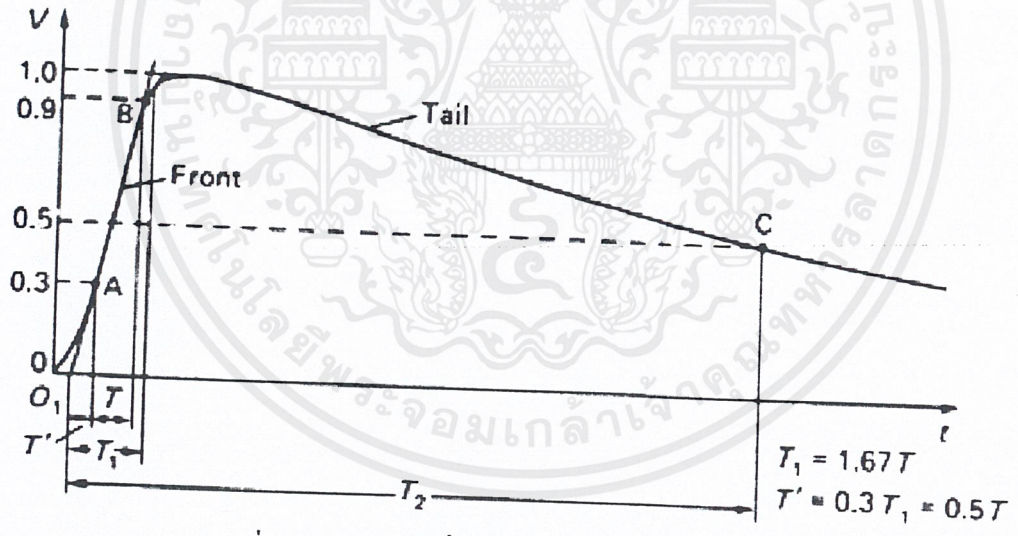
เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าคือ 1.67 ของช่วงเวลา T ระหว่างจุดที่แรงดันมีค่า 30 และ 90 % ของค่ายอดคือจุด A และ B ถ้ารูปคลื่นมีคลื่นระลอกซ้อนซ้อนอยู่ด้วยให้ลากเส้นโค้งเฉลี่ยสัญญาณเสียก่อนแล้วจึงค่อยหาจุด A และ B

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 (virtual origin)

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า คือ จุดซึ่งคิดเป็นเวลาห่างจากจุด A ไปข้างหน้าเท่ากับ $0.3T_1$ หรือคือจุดตัดของแกนเวลากับเส้นตรงที่ผ่านจุด A และ B

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 (time of half-value)

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าคือ ช่วงระยะเวลาวัดจากจุดเริ่มต้นเสมือน O_1 ถึงจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด



รูปที่ 3.1 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะยึดตามมาตรฐาน IEEE Std 4-1995(R1978) ซึ่งกำหนดไว้ดังนี้

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 = 1.2 μsec ± 30 %

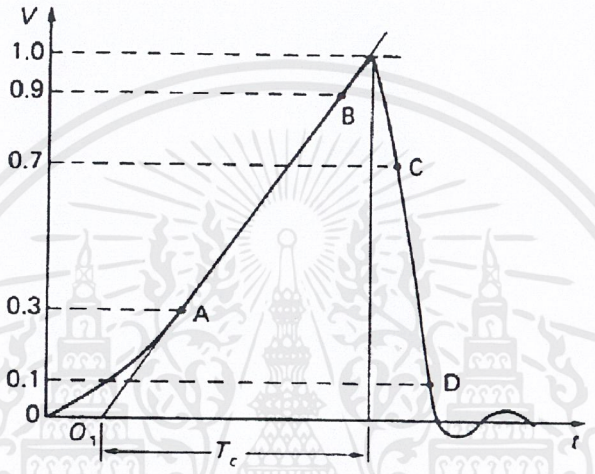
เวลาช่วงหน้าคลื่น T_2 = 50 μsec ± 20 %

ค่ายอดแรงดัน Um ± 3 %

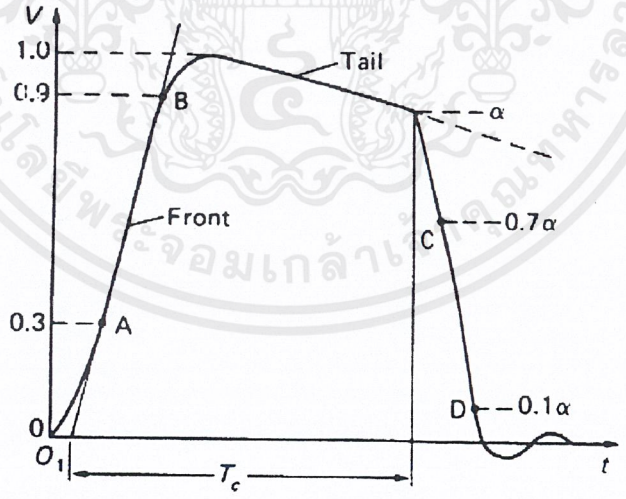
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดเกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้จึงเกิดการสปาร์คผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรคดาวน์ผ่าทะลุทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนั้นอาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหางคลื่นหรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น



(ข) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

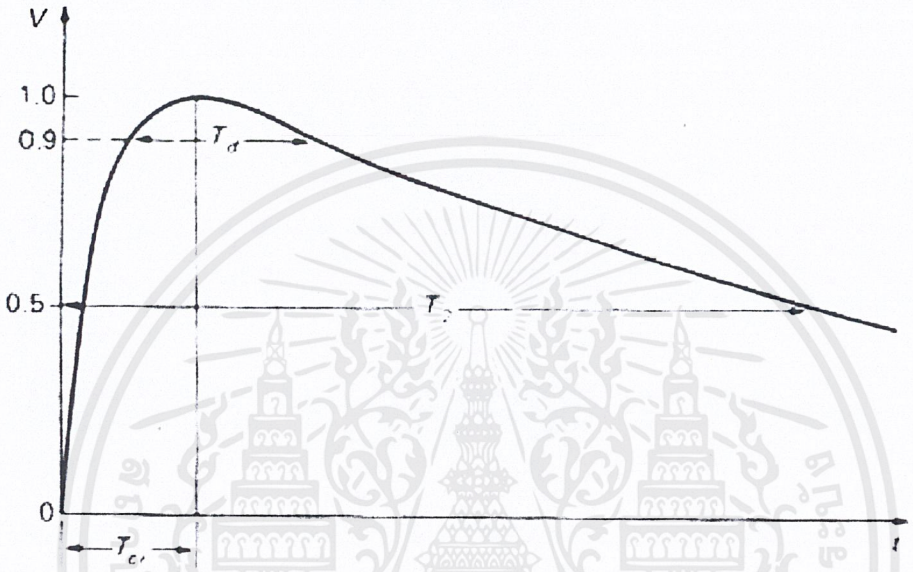
<u>เวลาช่วงคลื่นตัด</u> T_C (time to chopping)

เวลาช่วงคลื่นตัด T_C คือ ช่วงเวลาวัดจากจุดเริ่มต้นเสมือนกับขณะที่เกิดคลื่นตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิ่งรูปคลื่นเต็ม (full switching impulse)

แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิ่งรูปคลื่นเต็ม หมายถึง แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งที่ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของรูปคลื่นถูกรบกวนเนื่องจากเกิดการดิสชาร์จทำลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งรูปคลื่นเต็ม

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งจะยึดตามมาตรฐาน IEEE Std 4-1995(R1978) ซึ่งกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้อยู่ในเกณฑ์ ดังนี้

ค่ายอดแรงดัน Um $\pm$ 3 %

T_{cr} = 250 μsec $\pm$ 20 %

T_2 = 2500 μsec $\pm$ 60 %

<u>เวลาถึงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง</u> T_{cr} (time to crest value)

เวลาถึงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง คือ ช่วงเวลาวัดจากจุดเริ่มต้นจริงถึงจุดที่แรงดันเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุด

<u>เวลาช่วงหางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง</u> T_2 (time to half-value)

เวลาช่วงหางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง คือ ช่วงเวลาวัดจากจุดเริ่มถึงจุดที่แรงดันลดเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดตอนหางคลื่น

<u>เวลาเหนือ 90 % ของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง</u> T_d (time above 90 percent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

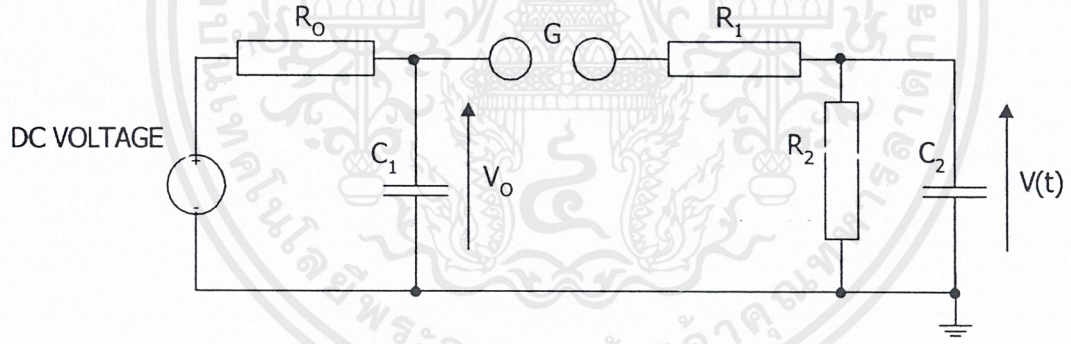
เวลาเหนือ 90 % ของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง คือช่วงเวลาในระหว่างแรงดันอิมพัลส์เกิน 90 % ในขณะแรงดันเพิ่มขึ้น และแรงดันอิมพัลส์เกิน 90 % ในขณะแรงดันลดลง

3.1.3 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

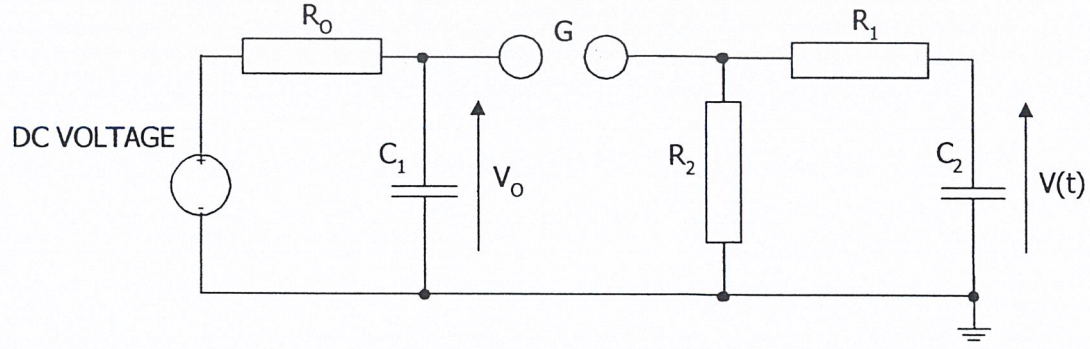
แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรทรานเซี้ยน RC หรือวงจรทรานเซี้ยน RLC โดยทั่วไปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นใช้กันมาก มักจะได้จากวงจร RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ (U= Q/C) แล้วปล่อยให้คายประจุหรือดิสชาร์จผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลา (time constant)ให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการได้

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) ข้อแตกต่างกันของวงจรทั้งสองอยู่ที่ลักษณะการต่อค่า R_1 และR_2 ซึ่งทำให้สูตรคำนวณค่าคงที่เวลาต่างกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 แสดงวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายขององค์ประกอบในรูปวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายขององค์ประกอบในรูปวงจร

DC :แรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่าย

V_O :แรงดันอัดประจุกระแสตรง

V(t) :แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น

C_1 :ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_2 :โหลดตัวเก็บประจุ(รวมทั้งตัวเก็บประจุของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)

R_0 :ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_1 :ความต้านทานหน่วง

R_2 :ความต้านทานปล่อยประจุขณะดิสชาร์จ

G :สปาร์คแกปทรงกลม

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด V_O
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_1
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและแบบสวิตชิ่ง

หลักการทำงานของวงจร

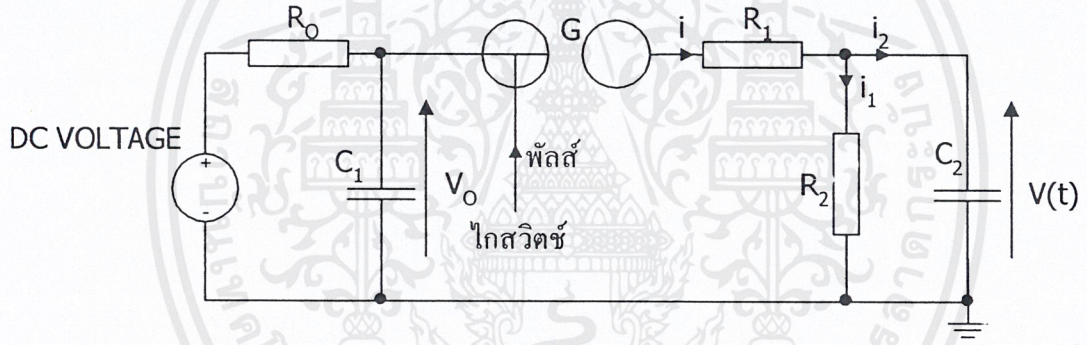
แรงดันกระแสตรงที่ป้อนจากแหล่งจ่ายจะอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์(C_1) จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ V_O การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_0 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุให้เร็วหรือช้า (ปกติ 2-3 วินาที) ค่าแรงดันอัดประจุ V_O นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของแกป G ที่ปรับได้ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ ได้มากน้อยตามต้องการ นอกจากนี้สปาร์คแกปยังทำหน้าที่เหมือนสวิตช์หรือไก (trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_1 ปล่อยประจุให้กับโหลด การสปาร์คจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 100 μsec) ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คในแต่ละครั้งจะต่างกันไม่มากถ้าหากปราศจากฝุ่นละออง (น้อยกว่า 1 %) ส่วนช่วงเวลาระหว่างการสปาร์คต่อเนื่องจะถี่หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_1 โดยถ้าแรงดันมากก็จะสปาร์คง่ายหรือถี่ขึ้น หลังจากเกิดสปาร์คแล้วแรงดัน V_O จะคร่อม R_1 และC_2 ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_2 การถ่ายทอดประจุนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_1 และC_2 จึงกล่าวได้ว่า R_1 และC_2 เป็นตัวกำหนดช่วงเวลาหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้กับ C_2 จนเต็มแล้ว ประจุนี้ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะดิสชาร์จออกไปสู่ R_2 ดังนั้น R_2 จึงทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น T_2 โดยถ้า R_2 มีค่ามาก T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย

3.1.4 การคำนวณวงจร

แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นควรจะต้องกำหนดหรือควบคุมได้ทั้งนี้เพื่อให้ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบหลายๆ ครั้งนั้นมีค่าคงที่ ซึ่งควบคุมได้โดยใช้ไกสวิตช์ เป็นตัวเริ่มให้เกิดดิสชาร์จในสปาร์คแกป ช่วงที่อยู่ในสปาร์คแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยสัญญาณอิมพัลส์ไก โดยการบังคับระยะไกลดังแสดงในรูปที่ 3.5 การใช้ไกสวิตช์บังคับให้เกิดสปาร์คตามที่กำหนดนี้ จะช่วยให้การกระจัดกระจายของแรงดันที่จ่ายออกน้อยลง นั่นคือจะได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ทดสอบมีค่าคงที่ตามต้องการ



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ไกสวิตช์

<u>การแปรของแรงดันในเทอมของเวลา</u>

อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน (ก) ในรูปที่ 3.4 เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ด้วยแรงดันอัดประจุ V_o และเกิดสปาร์คที่สปาร์คแกป G จะมีกระแสไหลในส่วนต่างๆ ของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.5 สมมติว่าเมื่อเกิดสปาร์คที่ G และไม่มีแรงดันตกคร่อมในช่องสปาร์คโดยอาศัยกฎของเคอร์ชอฟจะเขียนสมการได้ว่า

$$iR_1 + i_1R_2 = V_O - \frac{1}{C_1}\int i\,dt \qquad (3.1)$$

แทนค่า $$i = i_1 + i_2$$

จะได้ $$i_1R_1 + i_2R_1 + i_1R_2 = V_O - \frac{1}{C_1}\int i_1\,dt - \frac{1}{C_1}\int i_2\,dt \qquad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_2 = R_2C_2\frac{di_1}{dt} \tag{3.4}$$

จาก (3.2) $$\frac{1}{C_1}\int i_1\,dt + i_1\left(R_1 + R_2 + \frac{R_2C_2}{C_1}\right) + R_1R_2C_2\frac{di_1}{dt} = V_O \tag{3.5}$$

ดิฟเฟอเรนชิเอทสมการ (3.5) และคูณตลอดด้วย R_2C_1

$$i_1R_2 + R_2C_1\left(R_1 + R_2 + \frac{R_2C_2}{C_1}\right)\frac{di_1}{dt} + R_1R_2C_1C_2\frac{d^2i_1}{dt^2} = 0 \tag{3.6}$$

$$V(t) + C_1\frac{dV(t)}{dt}\left(R_1 + R_2 + \frac{R_2C_2}{C_1}\right) + R_1R_2C_1C_2\frac{d^2V(t)}{dt^2} = 0 \tag{3.7}$$

ซึ่งอาจเขียนในรูปสมการ

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + B_1\frac{dV(t)}{dt} + B_0V(t) = 0 \tag{3.8}$$

โดยที่

$$B_0 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \tag{3.9}$$

$$B_1 = \frac{R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2}{R_1R_2C_1C_2} \tag{3.10}$$

ผลลัพธ์อาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$V(t) = \frac{V_O}{K(\alpha_2 - \alpha_1)}\left[\exp^{-\alpha_1 t} - \exp^{-\alpha_2 t}\right] \tag{3.11}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \sqrt{\left\{\frac{B_1}{2} \pm \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 - B_O\right\}} \tag{3.12}$$

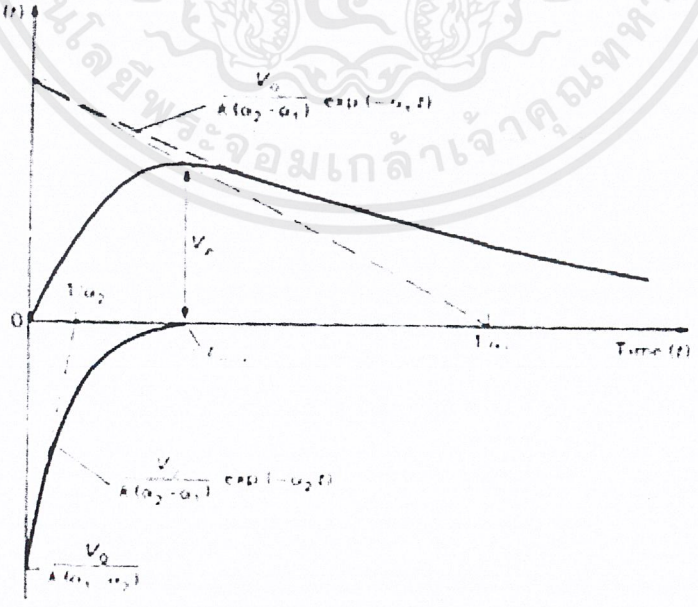
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแฟคเตอร์ B_1, B_0 และ K สำหรับวงจร (ก) และ (ข) แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	B_1	B_0	K
แบบ ก	$\frac{R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2}{R_1R_2C_1C_2}$	$\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$	R_1C_2
แบบ ข	$\frac{R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2}{R_1R_2C_1C_2}$	$\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$	R_1C_2

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแฟคเตอร์ B_1, B_0 และ K สำหรับวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ก) และ (ข)

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของ เวลาประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โพเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาเท่ากับ $\frac{1}{\alpha_1}$ และ $\frac{1}{\alpha_2}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$T_1 = \frac{k2}{\alpha_2} \tag{3.13}$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha 1} \tag{3.14}$$

ค่าแฟคเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นต่างๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3. 2

T_1/T_2	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (μsec)	$1/\alpha_2$ (μsec)
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	0.87	2.41	2875	104

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแฟคเตอร์ต่างๆ ของแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

<u>คำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร</u>

เมื่อทราบว่าจะต้องสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นใด กำหนดด้วยค่า T_1 และ T_2 ปกติเราจะเริ่มต้นจากค่าความจุไฟฟ้าของโหลด C_2 ก่อนเลือกตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_1 ให้สอดคล้องกับ C_2 กล่าวคือ C_1 เป็นตัวเก็บพลังงานได้มากพอที่จะจ่ายให้กับโหลด ดังนั้นเมื่อทราบค่า C_1 และ C_2 แล้ว องค์ประกอบที่เหลือต้องคำนวณคือ ความต้านทาน R_1 และ R_2 ซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวเวลา ซึ่งคำนวณค่า R_1 และ R_2 ได้คือ

สำหรับวงจรรูป 4(ก)

$$R_1 = \frac{1}{2C_1}\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}-\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_2}}\right) \tag{3.15}$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1+C_2)}\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}+\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_2}}\right) \tag{3.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

42603

สำหรับวงจรรูป 3.4(ข)

$$R_1 = \frac{1}{2C_2}\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}-\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_1}}\right) \tag{3.17}$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1+C_2)}\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}+\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_1}}\right) \tag{3.18}$$

<u>ประสิทธิภาพของวงจร η</u>

ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึงอัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงดันอัดประจุ ปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร(ก) หรือ(ข)

สำหรับวงจรรูป 3.4(ก) $$\eta = \frac{R_2C_1}{(R_1+R_2)(C_1+C_2)} \tag{3.19}$$

สำหรับวงจรรูป 3.4(ข) $$\eta = \frac{C_1}{C_1+C_2} \tag{3.20}$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรเลือกให้ C_1 มีค่าสูงกว่าโหลด C_2 มากๆ($C_1 >> C_2$)

<u>ค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและเวลาช่วงหางคลื่น T_1 และ T_2</u>

ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆของวงจรอิมพัลส์ อาจคำนวณค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่นโดยประมาณได้จากได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังตารางที่ 3.3

องค์ประกอบ	วงจร(ก)	วงจร(ข)
T_1	$\frac{k_2R_1R_2}{(R_1+R_2)}\frac{C_1C_2}{(C_1+C_2)}$	$k_2R_1\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}$
T_2	$\frac{k_1R_1R_2}{(R_1+R_2)}\frac{C_1C_2}{(C_1+C_2)}$	$k_1R_2(C_1+C_2)$
η	$\frac{R_2C_1}{(R_1+R_2)(C_1+C_2)}$	$\frac{C_1}{C_1+C_2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

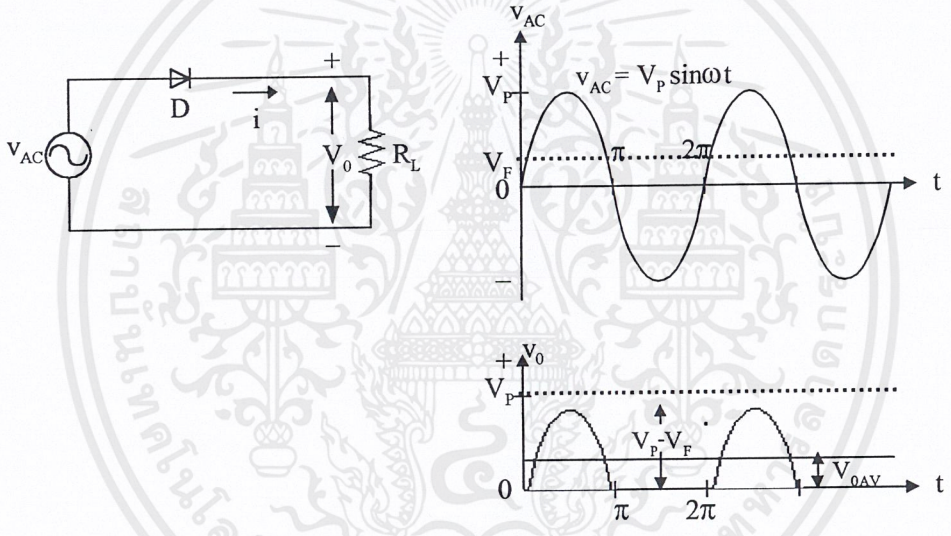
3.2 ทฤษฎีการสร้างแรงดันกระแสตรง

วงจรเรียงกระแสเป็นวงจรที่เปลี่ยนไฟกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง วงจรเรียงกระแสสำหรับไฟเฟสเดียว ถ้าแบ่งตามมุมของกระแสที่ไหลผ่านโหลด จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ

-วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier)

-วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) สามารถต่อวงจรได้ 2 แบบคือ วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบหม้อแปลงมีแทปและวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

3.2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น



รูปที่3.7 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เป็นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดเพียง 1 ตัว สามารถสร้างได้ง่ายที่สุดดังวงจรในรูปที่ 3.7 และจากวงจรสามารถเขียนสมการ KVL ได้ดังนี้

$$v_{AC} = v_D + v_0 \tag{3.21}$$

ในขณะที่ไฟสลับมีค่าเป็นบวก ($0 < \omega t < \pi$) ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง แรงดันเอาท์พุทจะมีค่าเป็น

$$v_0 = v_{AC} - v_D \tag{3.22}$$

$$v_0 = V_P \sin\omega t - 0.6 \qquad ; 0 < \omega t < \pi \tag{3.23}$$

ในขณะที่ไฟสลับมีค่าเป็นลบ ($\pi < \omega t < 2\pi$) ไดโอดจะได้รับไบอัสย้อนกลับจะไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอดแรงดันเอาท์พุทก็จะมีค่าเป็น 0

$$v_0 = 0 \qquad ; \pi < \omega t < 2\pi \tag{3.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสจะไหลผ่าน R_L ในทิศทางเดียวเท่านั้น ถึงแม้ว่าแรงดันที่ R_L และกระแสที่ผ่าน R_L จะเป็นกระแสตรง แต่ก็มีลักษณะคล้ายพัลส์ (Pulsating DC) มีการกระเพื่อมสูงมาก คลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 ลูกคลื่น จะได้ลูกคลื่นของไฟตรง 1 ลูก ดังในรูปที่ 3.7 นั่นคือความถี่ของการกระเพื่อม (Ripple Frequency) จะเป็น

$$F_R(HW) = F_{line} \tag{3.25}$$

ในขณะที่ไฟสลับเป็นซีกลบ ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับจะไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอด แรงดันเอาท์พุทจะเป็น 0 จะได้

$$v_D = v_{AC} \qquad ; \pi < \omega t < 2\pi \tag{3.26}$$

แรงดันของไฟสลับทั้งหมดจะตกคร่อมที่ไดโอด ในการเรียงกระแส ไดโอดจะต้องไม่พังทะลายไดโอดที่ใช้จะต้องมีค่าแรงดันพังทะลายอย่างต่ำเท่ากับค่าสูงสุดของไฟสลับ

$$V_{R(MAX)} \geq V_{P(AC)} \tag{3.27}$$

ในวงจรทั่วไป ค่าสูงสุดของไฟสลับจะมีค่าสูงกว่าแรงดันไบอัสตรงที่ตกคร่อมไดโอด ($\approx$ 0.6 โวลต์) อย่างมากเราจะถือว่าค่าสูงสุดของไฟตรงมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของไฟสลับ ค่าแรงดันเอาท์พุทของวงจรจะมีค่าเท่ากับ

$$v_{0(DC)}(t) = \begin{cases} V_P \sin\omega t & ; 0 < \omega t < \pi \\ 0 & ; \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \tag{3.28}$$

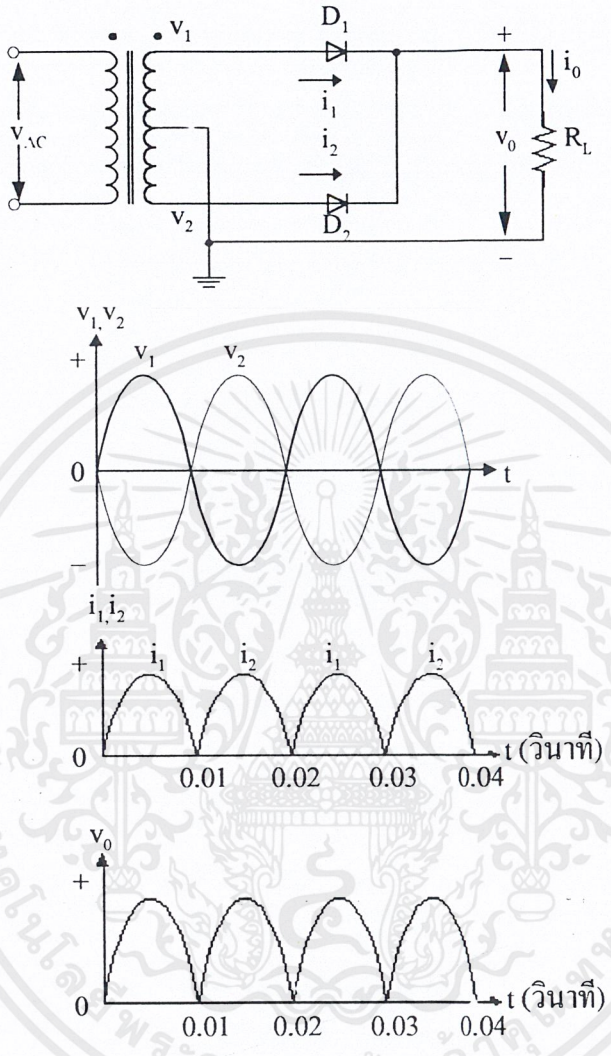
ถ้าเรากลับขั้วไดโอดก็จะได้ค่าเป็นไฟตรงลบ

$$v_{0(DC)}(t) = \begin{cases} 0 & ; 0 < \omega t < \pi \\ V_P \sin\omega t & ; \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \tag{3.29}$$

3.2.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงที่มีแทป

จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่ผ่านมา เราได้ทราบว่าเฟสของไฟสลับที่จุดต้นกับจุดปลาย จะต่างกัน 180 องศา เมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลาง โดยการใช้หม้อแปลงที่มีแทปกลางร่วมกับไดโอด 2 ตัว หม้อแปลงจะทำหน้าที่สลับเฟสของไฟสลับที่ป้อนให้กับไดโอดทั้งสองตัว ให้สลับกันทำงานตัวละ 180 องศา เราจะได้กระแสที่ผ่านโหลดตลอดเวลาเต็มคลื่นของไฟสลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 รูปวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบแทปกลางพร้อมทั้งคลื่นสัญญาณ v(t) และ i(t)

จากรูป จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า

$$i_o = i_1 + i_2 \tag{3.30}$$

ให้ I_1 และ I_2 เป็นค่ากระแสเฉลี่ยของไดโอด D_1 และ D_2 ตามลำดับ ค่าของ I_1 และ I_2 คือ

$$I_1 = I_2 = I_{pk}/\pi \tag{3.31}$$

ซึ่งค่าสูงสุดของ i_1 และ i_2 คือ

$$I_{pk} = \frac{V_{pk} - 0.6}{R_L} \tag{3.32}$$

ซึ่ง V_{pk} คือค่าสูงสุดของ $v_1(t)^*$ หรือ $v_2(t)^*$

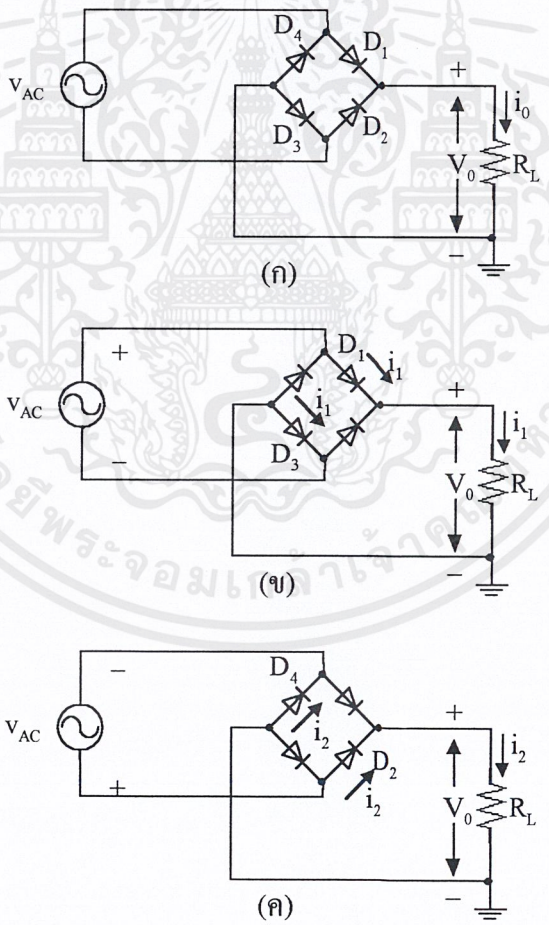
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานค่าของ $V_{pk} >> 0.6$ ค่าของ 0.6 โวลต์อาจไม่จำเป็นต้องนำมาคิด และจะเห็นได้ว่า 1 คาบของไฟสลับ แรงดันเอาท์พุท V_0 จะมีการกระเพื่อม 2 ลูกคลื่น ความถี่ของการกระเพื่อมจะเป็น

$$F_R\ (FW) = 2\ F_{line} \tag{3.34}$$

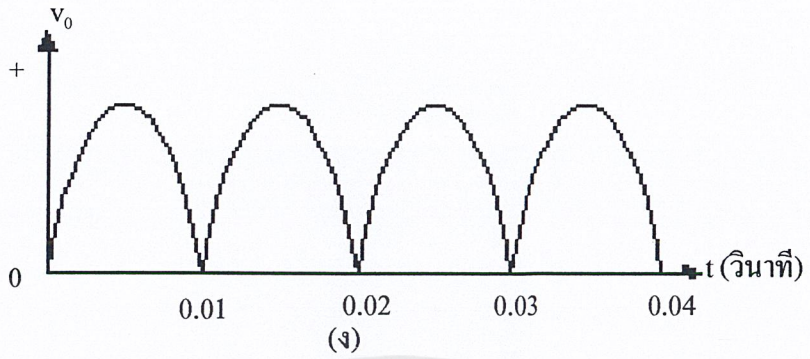
3.2.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์นี้ นิยมใช้งานอย่างมาก โดยการใช้ไดโอด 4 ตัว โดยที่ไดโอด 2 ตัว ในวงจรสลับกันทำงานให้มีกระแสไหลผ่านในเวลาครึ่งคาบของไฟสลับ และในเวลาอีกครึ่งคาบไดโอดอีก 2 ตัวก็จะทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 (ก) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (ข) ทิศทางของกระแสในขณะที่ v_{AC} เป็นบวก (ค) ทิศทางของกระแสในขณะที่ v_{AC} เป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 3.9 (ต่อ) (ง)รูปคลื่นของ v_0

ในขณะที่ v_{AC} เป็นบวกจะมีกระแสไหลผ่าน D_1,D_3 ซึ่ง i_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ถูกไบอัสย้อนกลับ) และเมื่อ v_{AC} เป็นลบ i_1 จะเป็นศูนย์กระแสจะไหลผ่าน D_2,D_4

ค่าของกระแส $i_0(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$ กระแสเฉลี่ย I_0, I_1 และ I_2 ค่าความถี่ของการกระเพื่อมจะอยู่ในรูปแบบเดียวกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบหม้อแปลงมีแทป คือ

$$I_1 = I_2 = I_0/2 \tag{3.35}$$

$$V_{0(pk)} = V_{AC(pk)} - 1.2 \tag{3.36}$$

$$F_R = 2F_{line} \tag{3.37}$$

ในการสร้างวงจรบริดจ์ของไดโอด เราอาจจะใช้ไดโอดเดี่ยว 4 ตัว มาต่อวงจร หรืออาจจะใช้ไดโอดบริดจ์ภายในเป็นไดโอด 4 ตัว ต่อวงจรในลักษณะของบริดจ์เรียบร้อยแล้ว สำหรับบริดจ์ไดโอดมีให้เลือกใช้งานตั้งแต่ขนาดของกระแสเอาท์พุทเฉลี่ย 0.5 แอมป์ ขึ้นไปถึงหลายร้อยแอมป์ และทนแรงดันได้มากกว่า 1000 โวลต์

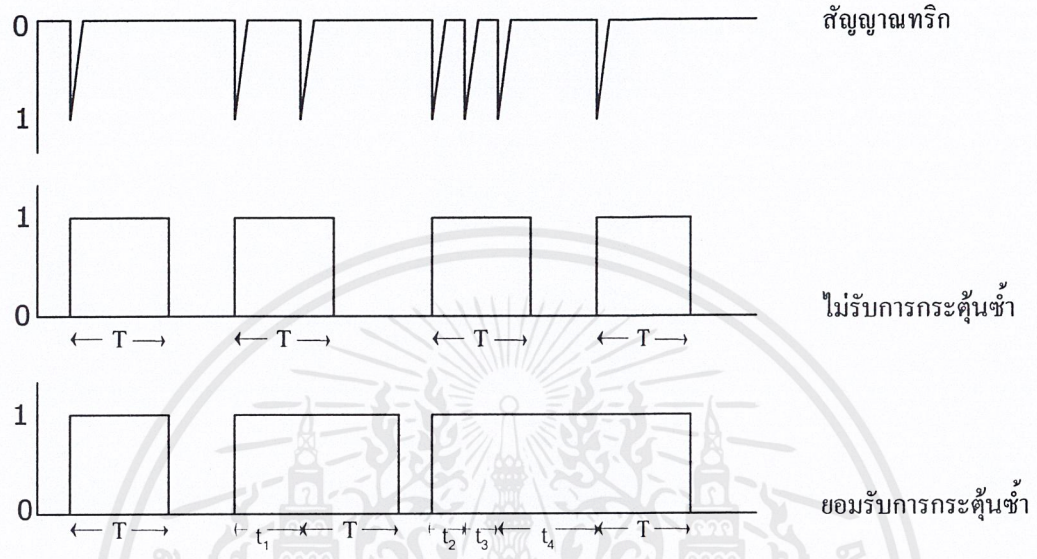
3.3 ทฤษีการสร้างสัญญาณพัลส์เดียว(โมโนสเตเบิล)

วงจรโมโนสเตเบิลเป็นวงจรที่สร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาลูกเดียว ซึ่งสามารถกำหนดช่วงกว้างของพัลส์ได้ ซึ่งปกติเอาท์พุทของวงจรจะคงสถานะอยู่สถานะหนึ่ง อาจเป็น 0 หรือ 1 ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร เอาท์พุทของวงจรจะเปลี่ยนเป็นสถานะตรงข้ามทันทีเมื่อได้รับการกระตุ้น (Triggering) และจะเปลี่ยนกลับคืนสู่สถานะปกติเมื่อเวลาผ่านไปเป็นคาบเวลา (T) ที่แน่นอนค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถกำหนดได้ด้วยอุปกรณ์ในวงจร วงจรโมโนสเตเบิลนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำ (Non-retriggerable)
2. แบบยอมรับการกระตุ้นซ้ำ (Retriggerable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองแบบมีหลักการทำงานคล้ายกัน ต่างกันที่มีการยอมรับการกระตุ้นของอินพุทซ้ำอีกหรือไม่ดังแสดงในรูปที่ 3.10

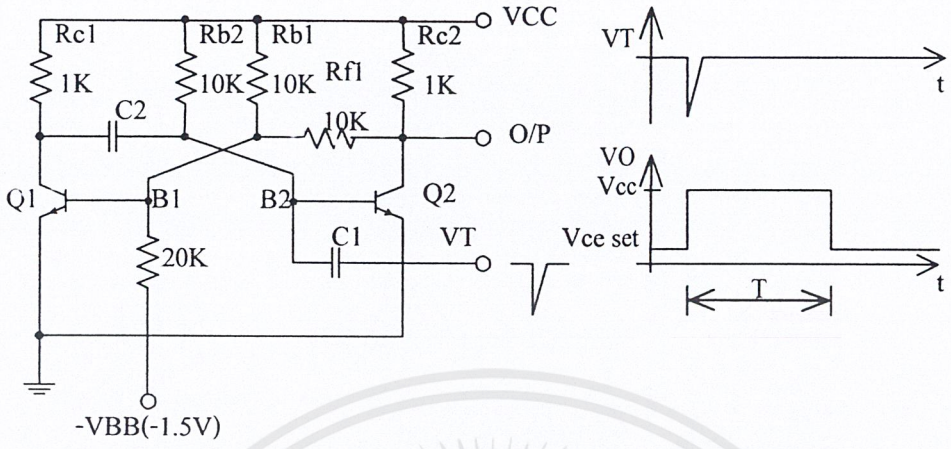


รูปที่ 3.10 การตอบสนองต่อสัญญาณกระตุ้นของวงจรโมโนสเตเบิลทั้งสองแบบ

วงจรที่ไม่รับการกระตุ้นซ้ำจะเริ่มทำงานตั้งแต่สัญญาณกระตุ้นอันแรก และในขณะที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียรนั้น จะไม่สนใจสัญญาณกระตุ้นอีก จนกว่าจะกลับเข้าสู่สถานะปกติแล้ว จึงยอมรับการกระตุ้นใหม่ ส่วนวงจรที่ยอมรับการกระตุ้นซ้ำนั้น คาบเวลาจะเริ่มนับใหม่ทุกครั้งที่ได้รับสัญญาณกระตุ้น จะเห็นได้ว่า คาบเวลาทั้งหมดของสถานะกึ่งเสถียรแตกต่างกันในกรณีทั้งสอง กล่าวคือในกรณีของวงจรโมโนสเตเบิลแบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำคาบเวลาจะคงที่ตลอด แต่ในกรณีของวงจรโมโนสเตเบิลแบบยอมรับการกระตุ้นซ้ำจะไม่คงที่ โดยขึ้นอยู่กับสัญญาณกระตุ้น

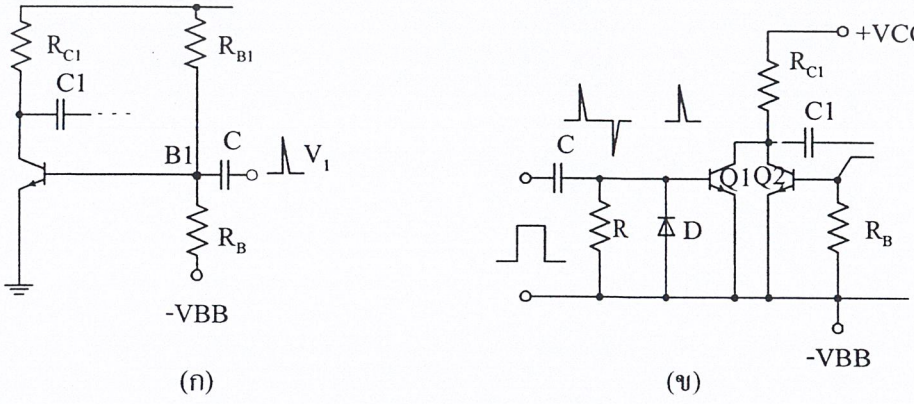
วิธีการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะนั้นทำได้หลายวิธี นอกจากจะกระตุ้นโดยป้อนพัลส์ลบเข้าทาง B_2 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 แล้วอาจใช้วิธีป้อนพัลส์บวกเข้าทาง B_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.12(ก) หรือถ้าเพิ่มเติมวงจรตามรูปที่ 3.12(ข) แล้ววงจรจะตอบสนองต่อขอบขาขึ้นของสัญญาณกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรโมโนสเตเบิลแบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำ

การกระตุ้นด้วยพัลส์ลบตามรูปที่ 3.11 เป็นแบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำ ซึ่งได้รับการออกแบบให้มีสถานะเสถียรคือ เมื่อ Q_2 นำกระแสอาจกระตุ้นให้วงจรเปลี่ยนสถานะได้ชั่วคราวโดยการทำให้ Q_2 หยุดนำกระแสชั่วขณะ เช่น ป้อนพัลส์ลบที่ Q_2 เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันที่คอลเลกเตอร์ของ Q_2 เปลี่ยนสถานะจาก ต่ำ เป็นสูง การเปลี่ยนแปลงนี้จะป้อนกลับผ่าน R_{F1} ทำให้ Q_1 นำกระแส แรงดันที่คอเลกเตอร์ของ Q_1 จึงลดลง แต่เนื่องจากแรงดันคร่อม C_2 จะเปลี่ยนทันทีไม่ได้ แรงดันที่ B_2 จึงลดลงด้วย การลดลงของแรงดันที่ B_2 เองทำให้ Q_2 หยุดนำกระแสทั้ง ๆ ที่พัลส์ลบที่มากระตุ้นได้ผ่านพ้นไปแล้วอย่างไรก็ตามสถานะที่ Q_2 หยุดนำกระแสนี้ไม่อาจคงอยู่ได้ตลอดไป เพราะ C_1 ต่อผ่าน R_{B2} ขึ้นสู่ V_{CC} ดังนั้นในขณะที่ Q_1 นำกระแส และแรงดันที่คอลเลกเตอร์ของ Q_1 มีค่าต่ำอยู่นั้น C_2 จะเริ่มประจุผ่าน R_{B2} ทำให้แรงดันที่ B_2 สูงขึ้นตามลำดับ จนในที่สุดเมื่อแรงดันที่ B_2 สูงพอ ก็จะทำให้ Q_2 นำกระแสขึ้นมาอีก และการป้อนกลับผ่าน R_{F1} ก็จะบังคับให้ Q_1 หยุดนำกระแส วงจรก็จะกลับคืนสู่สถานะเสถียรตามเดิม สถานะที่ Q_1 นำกระแสและ Q_2 ไม่นำกระแสนั้นเรียกว่า สถานะกึ่งเสถียร (Quasi-stable)

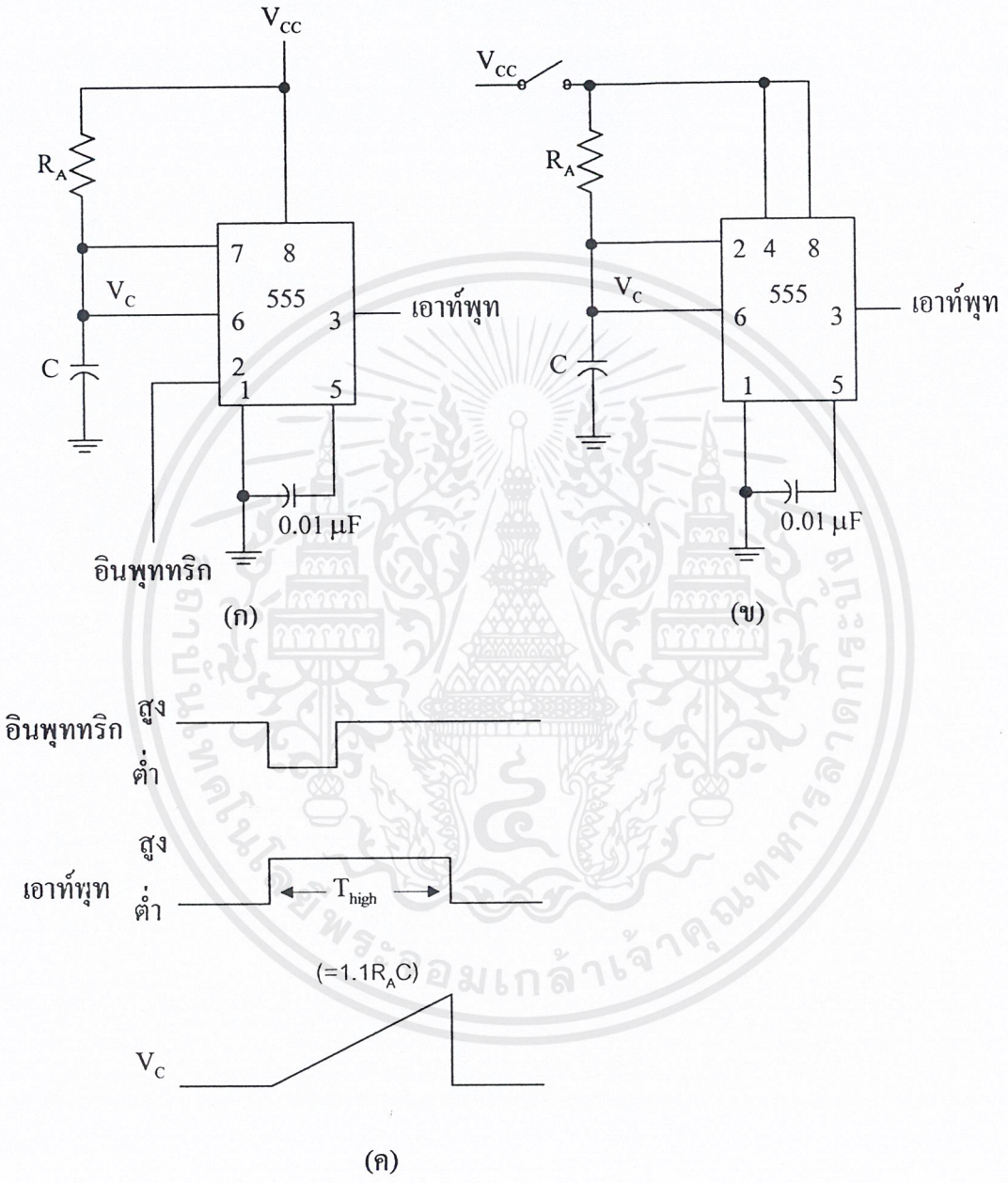


รูปที่ 3.12 วงจรกระตุ้นสำหรับโมโนสเตเบิลแบบยอมรับการกระตุ้นซ้ำ

(ก) กระตุ้นด้วยพัลส์บวก (ข) กระตุ้นด้วยขอบขาขึ้นของสัญญาณกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากวงจรโมโนสเตเบิลที่สร้างด้วยทรานซิสเตอร์ดังกล่าวแล้ว ในทางปฏิบัติเราอาจใช้ไอซี 555แทนทรานซิสเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรโมโนสเตเบิลที่สร้างจากไอซี 555

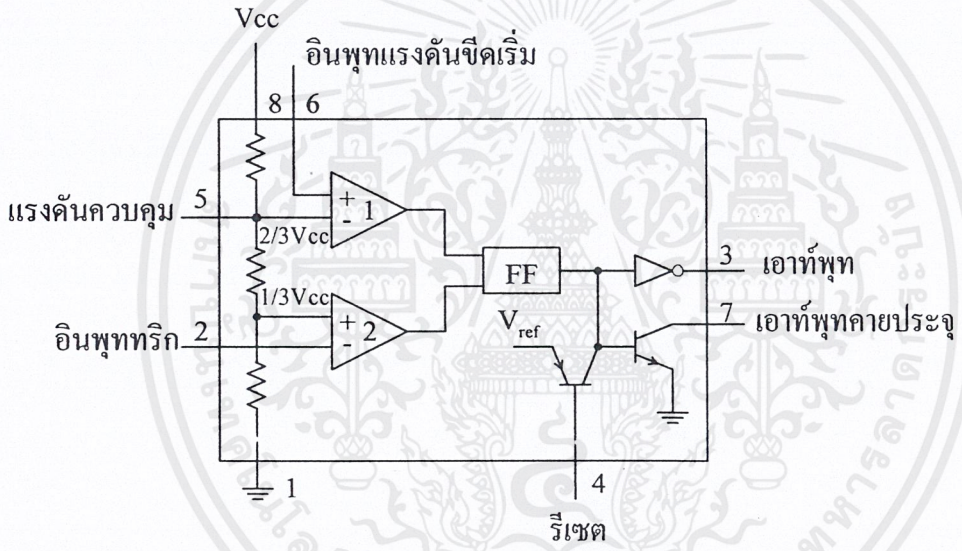
ไอซี 555 ออกแบบมาสำหรับใช้เป็นวงจรจับเวลา (Timer) มีลักษณะการทำงานเป็นวงจรโมโนสเตเบิลแบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำ ดังรูปที่ 3.13 โดยอินพุททริกเกอร์ที่ขา 2 เมื่อได้รับการทริกจากสัญญาณภายนอก และระดับของสัญญาณทริกลดลงต่ำ (ต่ำกว่า 1/3 V_{CC}) จะทำให้เอาท์พุทที่ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 มีสถานะสูง ตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุผ่านตัวต้านทาน R_A จนกระทั่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันมีค่าเข้าใกล้ V_{CC} โดยใช้เวลาประมาณ

$$T_{HIGH} = 1.1\ R_A C \qquad (3.38)$$

ในระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว เอาท์พุทยังคงเป็นสถานะสูงจนกระทั่งแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ เพิ่มขึ้นสูงกว่า 2/3 V_{CC} ซึ่งทำให้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 1 ทำงานและทริกฟลิปฟลอป ทำให้เอาท์พุทที่ขา 3 กลับเป็นสถานะต่ำอีก รวมทั้งเอาท์พุทคายประจุที่ขา 7 ลดสถานะลงเป็นต่ำ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีค่าเกือบเป็น 0 โวลต์ จนกว่าจะมีสัญญาณมาทริกที่ขา 2 อีก โดยรูป 3.13 (ก) ไอซี 555 มีไฟเลี้ยงตลอดเวลา ส่วนในรูปที่ 3.13 (ข) มีไฟเลี้ยงเฉพาะตอนสวิตช์ปิด



รูปที่ 3.14 วงจรภายในไอซี 555

ภายในไอซี 555 มีตัวต้านทาน 5 กิโลโอห์ม สามตัวที่ต่ออนุกรมกัน ตามรูปที่ 3.14 ซึ่งถูกต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดัน 2 ระดับคือ 1/3 V_{CC} และ 2/3V_{CC} (V_{CC} คือไฟเลี้ยงของไอซี 555 ซึ่งอาจมีค่าตั้งแต่ 4.5 โวลต์ ถึง 18 โวลต์) เมื่อแรงดันขีดเริ่ม (THRESHOLD VOLTAGE) ที่ขา 6 มีค่าสูงกว่า 2/3 V_{CC} วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 1 จะทำการเซตฟลิปฟลอป ดังนั้นเอาท์พุท (ขา 3) จะเป็นสถานะต่ำ รวมทั้งเอาท์พุทคายประจุ (ขา 7) จะลดลงเป็นต่ำด้วย เมื่ออินพุททริกเกอร์ (ขา 2) มีค่าลดลงต่ำกว่า 1/3 V_{CC} วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 2 จะรีเซตฟลิปฟลอป ดังนั้นเอาท์พุทที่ขา 3 จะเป็นสถานะสูง และทรานซิสเตอร์ที่ขา 7 จะอยู่ในสภาวะเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขา 5 เป็นขาควบคุมแรงดัน ใช้สำหรับเปลี่ยนระดับแรงดันของอินพุทของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน 1 ตามปกติถ้าไม่ใช้ขา 5 ควรต่อกับตัวเก็บประจุ 0.01 ไมโครฟารัด เพื่อช่วยลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง อินพุทรีเซต (ขา 4) เมื่อเป็นสถานะต่ำจะทำการขับเอาท์พุทคายประจุ (ขา 7) โดยทั่วไปถ้าระดับแรงดันที่ขา 4 ต่ำกว่า 0.4 โวลต์ ไอซีจะไม่สามารถทำงานได้

3.4 ไทริสเตอร์

จากวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งโดยทั่วๆไปจะใช้สปาร์คแกปทรงกลมทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในการเปิดปิดวงจรโดยอาศัยการเกิดเบรคดาวน์ผ่านช่องอากาศ ซึ่งค่าแรงดันเบรคดาวน์ในแต่ละครั้งจะไม่แน่นอน เพราะมีแฟคเตอร์ต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความชื้นของอากาศในห้องทดลอง เป็นต้น โครงงานนี้จึงได้นำไทริสเตอร์ชนิดเอสซีอาร์มาประยุกต์ใช้แทนสปาร์คแกปทรงกลมทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

ไทริสเตอร์เป็นชื่อรวมหรือชื่อตระกูล (family name) ของสิ่งประดิษฐ์ทางสถานะของแข็ง (solid state) ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเอ็นเรียงสลับกันเป็นชั้นๆ ตั้งแต่สี่ชั้นขึ้นไป ซึ่งทำให้เกิดมีรอยต่อพีเอ็นสามรอยต่อขึ้นไปเรียงกันเป็นอนุกรม สามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดวงจร สามารถควบคุมจังหวะการเปิดให้นำกระแสได้ สามารถนำไปควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้

ไทริสเตอร์มีสมาชิกหลายชนิดซึ่งอาจมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทางเดียว หรือให้กระแสไหลได้หลายทางและอาจมีขั้ว สองขั้ว สามขั้ว หรือสี่ขั้ว แต่ในโครงงานนี้ได้นำเอาไทริสเตอร์ชนิดเอสซีอาร์มาทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดวงจร

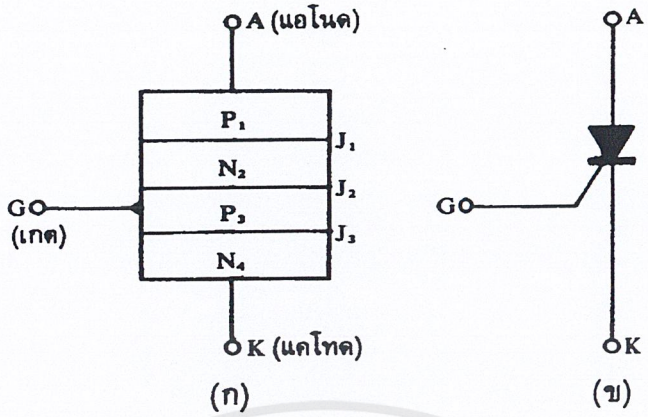
เอสซีอาร์ (SCR = silicon controlled rectifier) เป็นไทริสเตอร์ที่มีสามขั้วคือแอโนด แคโทด และเกต มีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียวจากแอโนดไปยังแคโทด และอาจเรียกชื่อว่าไตรโอดไทริสเตอร์ที่กั้นไม่ให้กระแสไหลกลับ

สำหรับในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ หลังจากนี้แล้วถ้ามีการกล่าวถึงไทริสเตอร์ จะหมายถึงเอสซีอาร์เท่านั้น

3.4.1 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

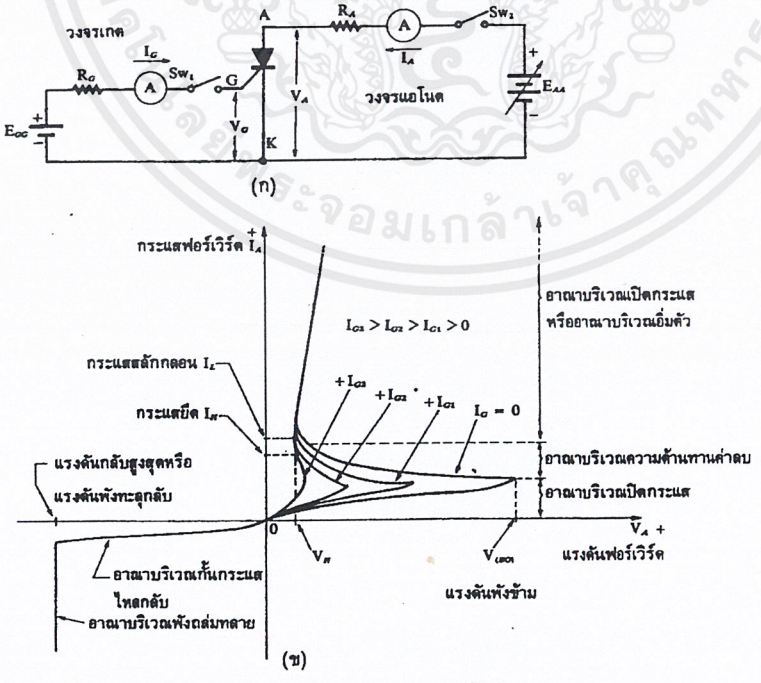
เอสซีอาร์เป็นไทริสเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วคือ แอโนด(A) แคโทด(K) และเกต(G) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายรูปที่ 3.15 (ก) และเขียนสัญลักษณ์แทนด้วยรูปที่ 3.15 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 (ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์
(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เมื่อต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) ถ้าปิดสวิตช์ Sw1 และ Sw2 ลง แล้วปรับค่าแรงดันเลี้ยงวงจรแอโนด E_{AA} และวงจรเกต E_{GG} ให้เหมาะสม เราจะได้เส้นโค้งลักษณะสมบัติดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ข) โดยให้ยึดถือหลักที่ว่า กระแสแอโนด I_A และกระแสเกต I_G มีค่าบวกถ้ากระแสไหลเข้าสู่ขั้วของเอสซีอาร์ และแรงดันแอโนด V_A และแรงดันเกต V_G มีค่าบวกถ้าแอโนดและเกตมีศักย์สูงกว่าแคโทด ดังที่ได้เขียนไว้ในรูปที่ 3.16 (ก)



รูปที่ 3.16 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก
(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเริ่มต้นการทดลองให้เปิดสวิตช์ Sw_1 ไว้ ปิดสวิตช์ Sw_2 ลง และให้แรงดันแอโนด V_A มีค่าเริ่มต้นจากน้อยไปหามาก โดยให้ $I_G = 0$ แล้วเพิ่มค่าแรงดันแอโนดจากศูนย์ให้สูงขึ้นทางบวก หรือในทิศฟอร์เวิร์ดเราจะเห็นกระแส I_A เพิ่มค่าจากศูนย์เพียงเล็กน้อย เรียกว่า "เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแส" แต่เมื่อแรงดัน V_A เพิ่มค่าสูงถึงค่า $V_{(BO)}$ ซึ่งเรียกว่า "แรงดันพังข้าม" (breakover voltage) แล้วเอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้เอง โดยต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง เรียกว่า "เวลาเปิดกระแส" (turn-on-time) เราเรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณปิดกระแส หรือ อาณาบริเวณกั้นกระแสทิศฟอร์เวิร์ด" (cut-off region หรือ forward blocking region)

ถ้าเราควบคุมกระแส I_A ให้เพิ่มค่าสูงขึ้นทีละน้อยด้วยการเพิ่มค่าแรงดันแอโนด E_{AA} เราจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ V_A ดังแสดงในรูปที่ 3.16(ข) ซึ่งเมื่อภายหลังที่ค่าแรงดัน V_A นี้ได้ผ่านค่าแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ แล้ว เราสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้ออกได้เป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงที่แรงดันแอโนด V_A ลดค่าลงจากแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ ไปสู่ค่า V_H และกระแส I_A เพิ่มค่าสูงขึ้นจากค่า $I_{(BO)}$ (อยู่ตรงจุดเกินแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$) ไปสู่ค่า I_H (อยู่ตรงจุดเกิด V_H) โดยกระแส I_H นี้เป็นค่ากระแสที่น้อยที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแส เรียกกระแสนี้ว่า "กระแสยึด" (holding current) โดยช่วงนี้เป็นช่วงของเอสซีอาร์กำลังเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณของความต้านทานค่าลบ" (negative resistance region) ช่วงที่สองเป็นช่วงที่กระแส I_A มีค่าใหญ่กว่ากระแสยึด I_H เล็กน้อยไปจนถึงค่าที่ใหญ่มากมาย โดยแรงดันแอโนดเพิ่มค่าลูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เรียกช่วงที่สองนี้ว่า "อาณาบริเวณเปิดกระแส หรืออาณาบริเวณอิ่มตัว" (high conducting region หรือ saturation region) กระแส I_A ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้มีค่าใหญ่มากจะสามารถทำอันตรายต่อเอสซีอาร์ให้ชำรุดเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทาน R_A ที่มีค่าใหญ่เข้าต่อเป็นอนุกรมในวงจรแอโนดเพื่อจำกัดกระแส I_A ไม่ให้ใหญ่มากเกินไป ถ้าเราต้องการให้เอสซีอาร์ที่อยู่ในสถานะเปิดกระแสเปลี่ยนกลับไปสู่สถานะปิดกระแส ให้เราลดกระแสแอโนด I_A ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสยึด I_H ในขณะที่ $I_G = 0$ ยังมีกระแสอีกชื่อหนึ่งคือ "กระแสสลักกลอน" (latching current) I_L ซึ่งนิยามว่าเป็น กระแสที่เล็กที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแสทันทีทันใดภายหลังจากเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสไปสู่สภาวะเปิดกระแสโดยปลดเอาสัญญาณป้อนเข้าเกตออก ซึ่งเมื่อเราได้ลดกระแส I_H ให้ต่ำกว่ากระแส I_L ได้แล้ว เอสซีอาร์จะหยุดเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณปิดกระแส หรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิศฟอร์เวิร์ด (forward blocking region) การเปลี่ยนสภาวะนี้ต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง เรียกว่า "เวลาปิดกระแส" (turn-off time) t_q การลดกระแสแอโนดให้ต่ำกว่ากระแสสลักกลอน I_L แล้วเปลี่ยนกลับเพิ่มกระแสสูงขึ้นไปใหม่ในระยะเวลาที่สั้นกว่าเวลาปิดกระแสของเอสซีอาร์ แล้วเอสซีอาร์จะกลับเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไม่ต้องใช้แรงดันแอโนด V_A สูงมาก ซึ่งเมื่อเราจัดให้ I_G มีค่าใหญ่มากขึ้นจะยิ่งทำให้แรงดันพังข้ามของเอสซีอาร์ต่ำลง

เมื่อเราจัดให้แรงดันแอโนด V_A มีค่าลบหรือมีแรงดันกลับ (reverse voltage) กระแสแอโนดจะไหลกลับทางและมีค่าน้อยมาก เรียกช่วงนี้ว่า "อาณาบริเวณกั้นกระแสไหลกลับ" (reverse blocking region) ต่อเมื่อเราเพิ่มค่าแรงดันแอโนดค่าลบไปจนถึงค่าที่เรียกว่า "แรงดันพังทะลุกลับ" (reverse breakdown voltage) กระแสแอโนดจะไหลเพิ่มค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วๆไป ผู้ผลิตเอสซีอาร์จะออกแบบให้เอสซีอาร์มีค่าแรงดันพังทะลุกลับมีค่าเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่าแรงดันพังข้ามทิศฟอร์เวิร์ดในขณะ $I_G = 0$

3.4.2 การจุดชนวนไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์สามารถเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้โดยอาศัยกระบวนการป้อนกลับค่าบวกที่เกิดขึ้นในตัวไทริสเตอร์ ถ้าเราสามารถควบคุมให้มีกระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ เราก็จะสามารถจุดชนวน (trigger) ให้ไทริสเตอร์เปิดกระแสได้

วิธีการจุดชนวนมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในโครงงานนี้ได้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

การป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกต การป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกตของเอสซีอาร์ เป็นผลให้มีกระแสเกตเพิ่มค่าสูงขึ้นและเกิดมีกระบวนการป้อนกลับค่าบวกเกิดขึ้น เอสซีอาร์ก็จะเปิดนำกระแสได้ วิธีการนี้เป็นวิธีที่เรานิยมใช้จุดชนวนให้ไทริสเตอร์เปิดนำกระแสทั่วๆไป

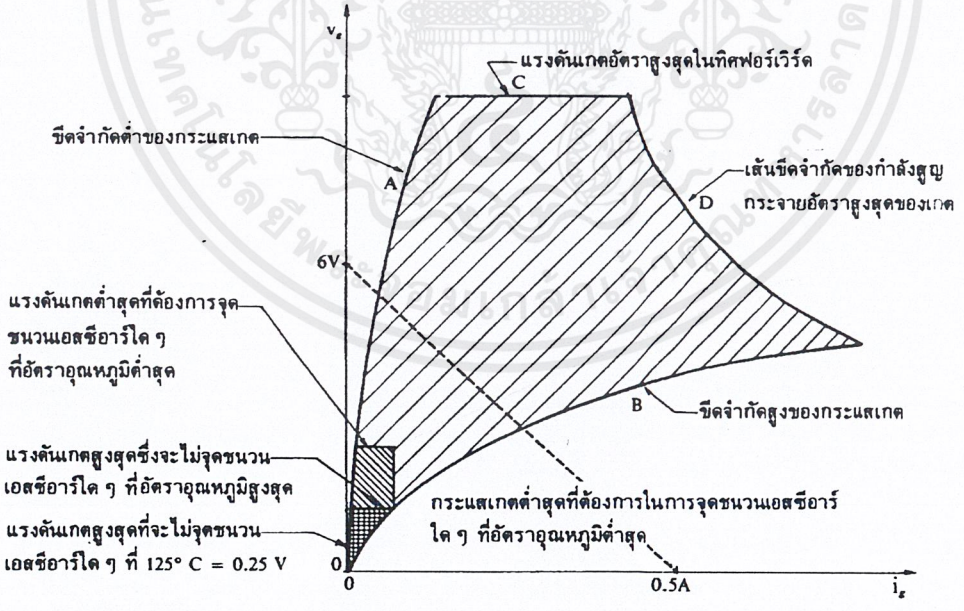
ศักย์บวกที่ดีที่ป้อนให้เกตต้องสามารถให้กระแสเกตเป็นพัลส์ที่มีสันหน้าสูงชัน และเนื่องจากเมื่อไทริสเตอร์เปิดกระแสก็สามารถนำกระแสต่อไปได้โดยไม่ต้องการกระแสเกตอีก ดังนั้นกระแสเกตควรเป็นพัลส์ที่มีช่วงสั้นๆ แต่มีความสูงของพัลส์สูงขึ้นเมื่อช่วงของพัลส์สั้นลง ก็สามารถทำให้ไทริสเตอร์เปิดกระแสได้ดีและทำงานเชื่อถือได้ โดยลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกตจะคล้ายกับลักษณะสมบัติของไดโอด แต่จะเปลี่ยนบ้างระหว่างไทริสเตอร์แต่ละตัวและได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นอาณาบริเวณที่ล้อมรอบด้วยขีดจำกัดต่ำและขีดจำกัดสูงของกระแสเกต ค่าแรงดันเกตสูงสุด และเส้นไฮเพอร์โบลาที่แทนกำลังสูงสุดของเกต ภายในอาณาบริเวณนี้เราสามารถแบ่งออกเป็นบริเวณ 3 บริเวณ คือ

บริเวณที่หนึ่ง อยู่ใกล้จุดกำเนิดและแสดงด้วยเส้นแรเงาตัดกันเป็นบริเวณที่ถูกจำกัดด้วยค่าแรงดันเกตสูงสุดที่ไม่สามารถจุดชนวนไทริสเตอร์ใดๆ แต่ไทริสเตอร์อาจทำงานบริเวรนี้เมื่อไทริสเตอร์ไม่ต้องการกระแสเกต เช่น การจุดชนวนด้วยแรงดันพังทะลุที่ป้อนเข้าที่แอโนด หรือจุดชนวนด้วย dv/dt วิธีการเหล่านี้นับว่าเป็นสิ่งรบกวนการเปิดไทริสเตอร์ให้นำกระแสตามต้องการซึ่งต้องหาวิธีการป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณที่สอง แสดงด้วยเส้นแรเงาถี่ๆ เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบริเวณแรกซึ่งแสดงตำแหน่งของจุดจุดชนวนต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ล้อมรอบด้วยแรงดันเกตและกระแสเกตที่มีค่าต่ำสุดที่แท้จริงของไทริสเตอร์ทุกตัว โดยถ้าใช้จุดจุดชนวนอยู่ในบริเวณนี้วงจรเกตต้องการกำลังสูงเมื่ออุณหภูมิของรอยต่อยิ่งมีค่าต่ำลง เกตก็ยิ่งต้องการกำลังป้อนเข้าแรงขึ้น เพื่อเปิดให้ไทริสเตอร์นำกระแส บริเวณนี้จึงไม่ควรใช้เพราะว่า สัญญาณในบริเวณนี้ไม่สามารถจุดชนวนไทริสเตอร์ได้ทุกตัวเสมอไปหรืออาจไม่สามารถจุดชนวนไทริสเตอร์ใดๆ แม้แต่ตัวเดียวก็เป็นได้

บริเวณที่สาม แสดงด้วยเส้นแรเงาห่างๆเป็นบริเวณแสดงตำแหน่งของจุดจุดชนวนที่ใช้ได้ดีและทำงานเชื่อถือได้ จึงเป็นบริเวณที่ชอบใช้ขับวงจรเกต ซึ่งมีเส้นล้อมรอบ A,B,C และ D โดย A เป็นเส้นขีดจำกัดสูงของกระแสเกต C เป็นเส้นที่ระบุถึงค่าแรงดันเกตอัตราสูงสุดในทิศฟอร์เวิร์ด และ D เป็นเส้นขีดจำกัดของกำลังสูญกระจายอัตราสูงสุด ถ้าจุดของการจุดชนวนอยู่ภายในบริเวณนี้ไทริสเตอร์จะเปิดกระแสเสมอ ถ้าจุดจุดชนวนอยู่ในส่วนล่างซ้ายมือของบริเวณจะเป็นจุดที่เหมาะสมในการใช้งาน ถ้าจุดจุดชนวนอยู่ทางส่วนบนขวามือของอาณาบริเวณ จะทำให้ไทริสเตอร์เปิดกระแสอย่างรวดเร็วแต่ต้องการกระแสเกตสูงซึ่งอาจต้องการใช้ในวงจรบางชนิด ถ้าหากจุดจุดชนวนอยู่นอกบริเวณนี้จะทำให้ไทริสเตอร์เกิดชำรุดเสียหาย

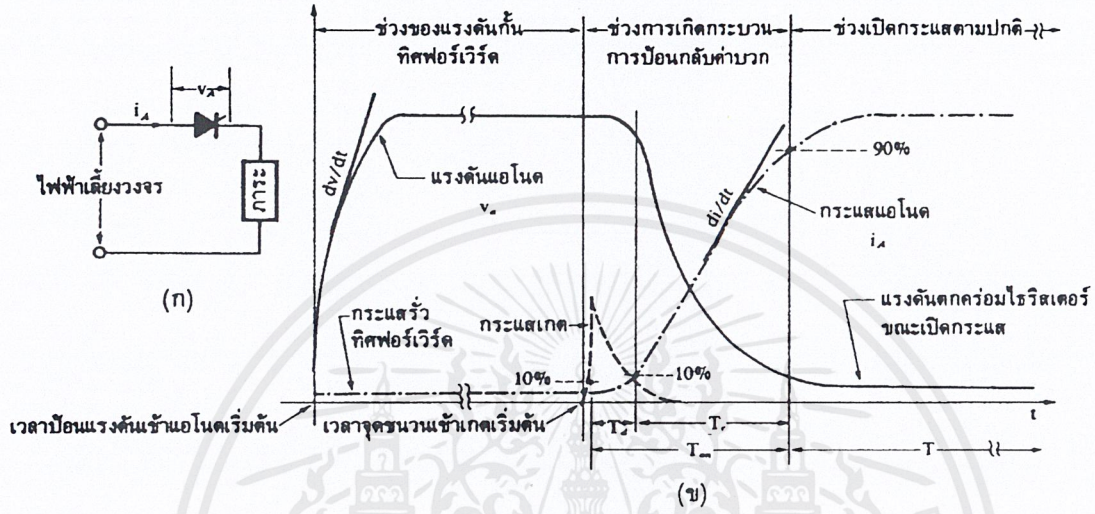


รูปที่ 3.17 เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกต

เมื่อไทริสเตอร์ได้เปิดกระแสจะต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่งจึงจะสิ้นสุดกระบวนการนี้ โดยจะมีศักย์คร่อมไทริสเตอร์เปลี่ยนแปลงจากแรงดันพังทะลุลดลงสู่ศักย์ตกคร่อมไทริสเตอร์ขณะเปิดกระแส (ซึ่งมีค่าต่ำประมาณ 1 – 1.5 โวลต์) และมีกระแสที่เปลี่ยนแปลงจากค่าน้อยขึ้นไปหาค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะถูกจำกัดไว้ด้วยความต้านทานภาระดังแสดงในรูปที่ 3.18 และมีนิยามเกี่ยวกับเวลาในการเปิดกระแสต่างๆ



รูปที่ 3.18 (ก) วงจรไทริสเตอร์กับภาระ
(ข) การเปลี่ยนแปลงกระแสและการเปลี่ยนแปลงแรงดันของไทริสเตอร์ขณะเปิดกระแส

รูปที่ 3.18 (ข) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั่วครู่ของแรงดันและกระแสในระหว่างไทริสเตอร์เปิดกระแส ซึ่งเราสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงแรกเป็นช่วงที่ไทริสเตอร์อยู่ในสถานะแรงดันกั้นทิศฟอร์เวิร์ดซึ่งเป็นสถานะที่เกิดขึ้นตอนเริ่มต้นของการป้อนแรงดันเข้าไทริสเตอร์แต่ยังไม่จุดชนวน ประจุต่างๆในไทริสเตอร์จะมีการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งรอยต่อต่างๆเข้าสู่สถานะคงที่ จะทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปสู่ค่าแรงดันป้อนเข้า ถ้าแรงดันนี้มีค่าไม่สูงเกินกว่าแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ จึงยังไม่มีการเปิดกระแส มีแต่เพียงกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อย โดยรอยต่อ J_2 อยู่ในสถานะไบแอสกลับ ค่าความเก็บประจุของรอยต่อ J_2 จะช่วยส่งกระแสจำนวนมากผ่านเข้าสู่ชั้น P_3 ซึ่งเป็นชั้นที่มีขั้วเกตเข้าต่อ จึงอาจเป็นผลทำให้ไทริสเตอร์เปิดกระแสได้โดยเราไม่ต้องการ เพื่อให้ไทริสเตอร์ทำงานได้ถูกต้อง เราต้องพิจารณาอัตรา dv/dt สูงสุดที่ไทริสเตอร์สามารถทนได้

ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ไทริสเตอร์อยู่ในสถานะการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อป้อนสัญญาณจุดชนวนเข้าที่เกตซึ่งจะเป็นผลให้ไทริสเตอร์เปิดกระแส การเปิดกระแสจะเริ่มต้นที่บริเวณเล็กๆของชั้นตรงที่เกตเข้าต่อติด แล้วแผ่ขยายออกไปด้วยอัตราเร็วประมาณ 0.1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไมโครวินาที ถ้าบริเวณเกตมีพื้นที่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จะต้องการเวลาประมาณ 100 ไมโครวินาที ที่จะเปิดกระแสได้เต็มพื้นที่เกต ในขณะนั้นแรงดันทิศฟอร์เวิร์ดสามารถเข้าสถานะคงที่ได้ก่อนกระแส ทั้งนี้เพราะว่าการเปิดกระแสเริ่มต้นที่บริเวณเล็กมาก กระแสจึงมีความหนาแน่นสูงมาก ถ้าอัตราของการเพิ่มกระแสมีค่าสูงมากด้วย ก็จะเป็นสาเหตุให้มีความร้อนเกิดขึ้นในบริเวณเล็กๆนั้น ซึ่งสามารถทำให้ไทริสเตอร์ชำรุดเสียหายได้ จึงทำให้เราต้องพิจารณาถึงอัตรา di/dt สูงสุดขณะเปิดกระแสของไทริสเตอร์ด้วย

ช่วงที่สามเป็นช่วงที่ไทริสเตอร์เปิดกระแสตามปกติ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อการเปิดกระแสได้แผ่ขยายไปทั่วอาณาบริเวณของชั้น P_3 ทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสดังกล่าวข้างต้น ทำให้เรานิยามได้ว่า

เวลาประวิง (delay time) : T_d เป็นช่วงเวลาระหว่างเวลาที่กระแสพัลส์ของเกตมีค่า 10% ของค่าสูงสุดไปถึงเวลาที่กระแสแอโนดไรทิศฟอร์เวิร์ดมีค่าสูงถึง 10 % ของค่าสูงสุด ในระหว่างที่ไทริสเตอร์เปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสเมื่อวงจรมีภาระเป็นความต้านทาน

เวลาเพิ่มค่าขึ้น (rise time) : T_r เป็นช่วงเวลาของกระแสแอโนดในทิศฟอร์เวิร์ดระหว่างเวลาที่กระแสแอโนดมีค่า 10% เพิ่มค่าสูงขึ้นถึง 90% ของค่าสูงสุด ในระหว่างที่ไทริสเตอร์เปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสเมื่อวงจรมีภาระเป็นความต้านทาน

เวลาเปิดกระแส (turn-on time) : T_{on} เป็นช่วงเวลาการเปิดกระแสของไทริสเตอร์ โดยนับตั้งแต่ตอนเริ่มต้นของเวลาประวิงไปจนถึงตอนสิ้นสุดของเวลาเพิ่มค่าขึ้น $T_{on} = T_d+T_r$ หรือหมายถึงเวลาที่เริ่มต้นของการจุดชนวนไปจนถึงเวลาที่ประจุต่างๆได้เข้าสมดุลตลอดทั่วไทริสเตอร์ พร้อมกันนั้นแรงดันตกคร่อมในทิศฟอร์เวิร์ดได้เข้าสู่สถานะคงตัว

ขอให้สังเกตว่า ไทริสเตอร์ทั่วๆไป มีเวลาเพิ่มค่าขึ้นสั้น ทำให้มีอัตราการเพิ่มค่ากระแส di/dt มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งไทริสเตอร์ทั่วๆไป มีค่า di/dt สูงสุดได้ถึง 1,000 แอมแปร์ต่อไมโครวินาที หรือ 1 แอมแปร์ต่อนาโนวินาที อัตรา di/dt มีค่าสูงอาจทำให้ไทริสเตอร์ชำรุดได้

3.4.3 การปิดกระแสของไทริสเตอร์

การปิดกระแสของไทริสเตอร์หมายถึง การหยุดการนำกระแสในทิศฟอร์เวิร์ดทั้งหมดของไทริสเตอร์ โดยป้อนแรงดันกลับคืนเข้ากับแอโนดใหม่และไม่ป้อนสัญญาณเกตอีก แล้วจะไม่มีการเปิดกระแสขึ้นอีก การปิดกระแสของไทริสเตอร์สามารถกระทำได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) **การทำให้กระแสหยุดไหลตามธรรมชาติ** ทำได้โดยการลดกระแสแอโนดลงให้ต่ำกว่าค่ากระแสยึด (holding current) ของไทริสเตอร์ (อัตรากระแสแอโนดปกติมีค่าใหญ่กว่าค่ากระแสยึดประมาณ 1000 เท่า)

2) **การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันกลับ** โดยการป้อนแรงดันกลับเข้าระหว่างแอโนดและแคโทด (คือป้อนแรงดันให้แคโทดมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับแอโนด) ของไทริสเตอร์ จะทำให้รอยต่อถูกไบแอสกลับกับกรณีที่ไทริสเตอร์เปิดกระแสโดยรอยต่อ J_1 และ J_3 (รูปที่ 3.15 (ก)) จะถูกไบแอสกลับ แต่รอยต่อ J_2 จะถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส พาหะต่างๆจะไหลสวนทางกับกรณีไทริสเตอร์เปิดกระแส ทำให้กระแสไหลกลับจากแคโทดสู่แอโนด กระแสนี้จะไหลกระโชกและถูกจำกัดค่า di/dt ด้วยค่าความต้านทานของวงจรภายนอกซึ่งจะไหลอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งส่วนใหญ่ของพาหะที่รอยต่อ J_1และ J_3 ได้เคลื่อนที่ออกไปหมดเป็นผลให้รอยต่อ J_1 และ J_3 อยู่ในสภาวะกั้นกระแส ทำให้กระแสที่รอยต่อทั้งสองนี้ลดค่าลงเป็นศูนย์ ขณะเดียวกันรอยต่อ J_2 ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสและมีประจุจำนวนมากตกค้างอยู่ที่รอยต่อนี้ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลจะกลับเข้ารวมกัน เป็นผลให้การป้อนกลับค่าบวกลดค่าลงต่ำเป็นศูนย์ในชั่วครู่หนึ่งแล้วไทริสเตอร์ก็เข้าสู่สภาวะปิดกระแส ถ้าอุณหภูมิของรอยต่อมีค่าสูงหรือสาเหตุอื่น การกลับเข้ารวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลจะกินเวลานานออกไปทำให้ไทริสเตอร์ใช้เวลาปิดกระแสนานออกไปด้วย

3.4.4 การนำไทริสเตอร์มาต่ออนุกรม

ในบางกรณีเรานำไทริสเตอร์มาต่ออนุกรมกันหลายตัว เพื่อใช้กับแรงดันเลี้ยงวงจรที่มีขนาดสูงกว่าอัตราแรงดันของไทริสเตอร์แต่ละตัวได้ โดยแรงดันฟอเวิร์ดหรือแรงดันกลับจะแบ่งไปตกคร่อมไทริสเตอร์แต่ละตัว ซึ่งตามความเป็นจริงแรงดันที่ตกคร่อมไทริสเตอร์เหล่านั้นอาจมีค่าไม่เท่ากันทุกตัว ถึงแม้ว่าเราจะใช้ไทริสเตอร์เบอร์เดียวกัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.19 (ก) เมื่อเราใช้เอสซีอาร์ที่มีอัตราแรงดันปกติสูงสุด V_{DRM} เท่ากันสองตัวต่ออนุกรมกัน เพื่อคาดหวังว่าจะสามารถใช้กับแรงดันเลี้ยงวงจร V ที่มีค่า $2V_{DRM}$ เนื่องจากเอสซีอาร์ที่ต่ออนุกรมกันจะต้องมีกระแสไหลผ่านเท่ากัน ขณะที่เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะกั้นกระแสฟอร์เวิร์ดอยู่นั้นจะมีกระแสรั่ว I_l ไหลผ่านเอสซีอาร์ทั้งสองเท่ากัน แต่เพราะว่าเอสซีอาร์ทั้งสองมีลักษณะสมบัติไม่เหมือนกันเป็นเอกลักษณ์ จึงมีแรงดันกั้นกระแสฟอร์เวิร์ดตกคร่อมเอสซีอาร์ไม่เท่ากัน สมมติว่าแรงดันนี้มีค่า V_1 และ V_2 โดยให้ $V_1 < V_2$ และ V_2 ต้องมีค่าไม่เกินกว่า $V_{(BO)2}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 (ข) ซึ่งเราจะเห็นว่าเอสซีอาร์ทั้งสองอยู่ในสภาวะที่จะเปิดกระแสไม่พร้อมกัน ครั้นเมื่อมีเอสซีอาร์ตัวหนึ่งเปิดกระแสขึ้นก่อนจะทำให้มีแรงดันตกคร่อมมีค่าน้อยมากประมาณ 1 ถึง 1.5 โวลต์ เป็นผลทำให้แรงดันของสายไฟฟ้าเลี้ยงวงจรซึ่งมีค่าประมาณ $2V_{DRM}$ ไปตกคร่อมเอสซีอาร์ตัวที่เปิดกระแสช้าเป็นผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เอสซีอาร์ตัวที่เปิดกระแสช้านี้ชำรุดเสียหายได้ เราต้องป้องกันการเสียหายกรณีนี้โดยเอาตัวความต้านทานเข้าต่อขนานเพื่อแบ่งแรงดันเฉลี่ยไปทั่วๆทุกตัวของเอสซีอาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นกรณีเอสซีอาร์ n ตัวเข้าต่ออนุกรมกัน R_p เป็นค่าความต้านทานที่ใช้ต่อขนานกับเอสซีอาร์ โดยสมมติให้กรณีนี้เป็นกรณีที่เลวที่สุดของการแบ่งแรงดันไม่เท่ากันโดยที่เอสซีอาร์ตัวที่หนึ่ง SCR_1 มีกระแสรั่วน้อยที่สุด $I_l(min)$ เอสซีอาร์ที่เหลือ (n-1) ตัวมีกระแสรั่ว $I_l(max)$ เท่ากันหมดทุกตัว เราจะเห็นได้ว่า

$$I_l(max) - I_l(min) = \Delta I_l \tag{3.39}$$

เราจะเห็นว่า $I_1 > I_2$ เมื่อกระแส I_1 และ I_2 เป็นกระแสที่ไหลอยู่ในความต้านทาน R_p ตัวที่หนึ่งและตัวที่เหลืออยู่ตามลำดับ เราจะเขียนนำได้ว่า

$$I_2 = I_1 - \Delta I_l \tag{3.40}$$

ถ้าเราให้ V_p เป็นค่าแรงดันกั้นสูงสุดของ SCR_1 เราจะเขียนได้ว่า

$$V_p = I_1 R_p \tag{3.41}$$

และ

$$E = V_p + (n-1)R_p I_2 \tag{3.42}$$

เมื่อ E เป็นค่าแรงดันกั้นสูงสุดที่ป้อนเข้าอนุกรมของเอสซีอาร์ทั้งหมดด้วยสมการที่ (3.40) ถึงสมการที่ (3.42) เราจะได้

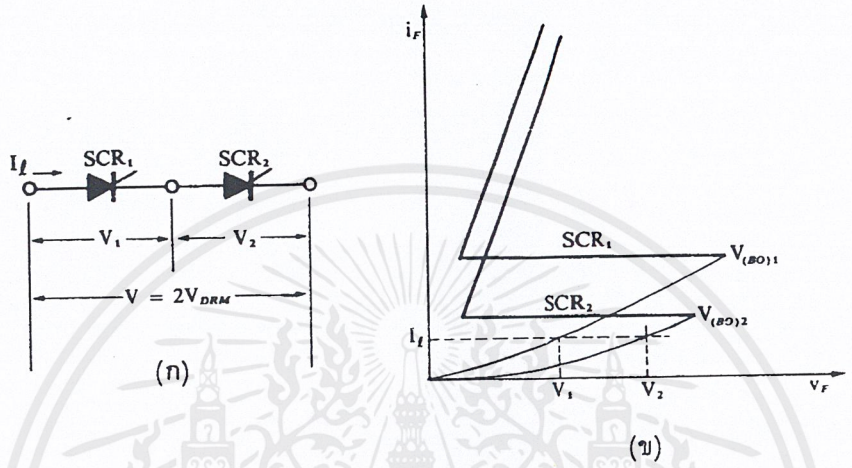
$$R_p \leq \frac{nV_p - E}{(n-1)\Delta I_l} \tag{3.43}$$

โดยทั่วๆไป ผู้ผลิตจะให้ค่ากระแสกั้นสูงสุดไว้สำหรับเอสซีอาร์หนึ่งๆ และถ้าเราใช้กรณีเลวที่สุดและสมมติให้ $I_l(min)$ มีค่าเท่ากับศูนย์สมการที่ (3.43) จะกลายเป็นสมการที่ (3.44) ข้างล่างนี้

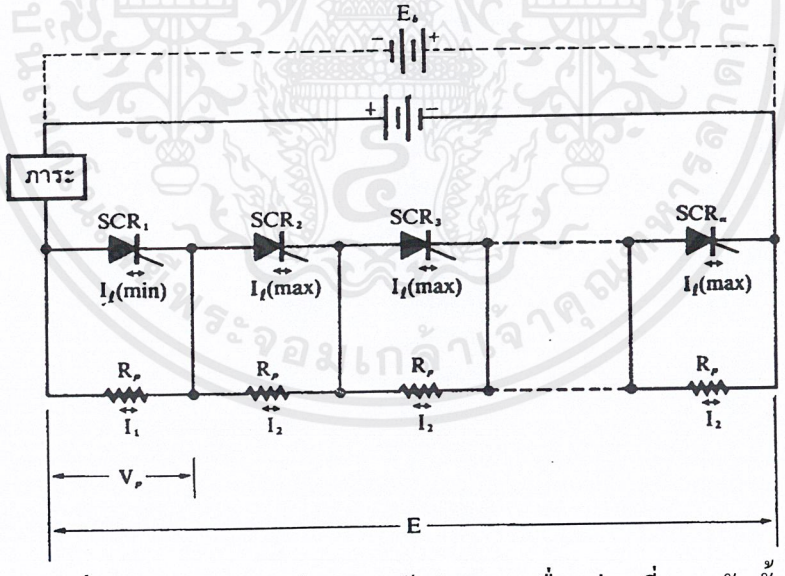
$$R_p \leq \frac{nV_p - E}{(n-1)I_l(max)} \tag{3.44}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานเหล่านี้อาจจะแบ่งเฉลี่ยให้แรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ไม่เท่ากันทุกตัว



รูปที่ 3.19 (ก) เอสซีอาร์สองตัวต่ออนุกรม
(ข) แรงดันแบ่งตกคร่อมเอสซีอาร์สองตัวมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.20 การใช้ความต้านทานเข้าต่อขนานเพื่อแบ่งเฉลี่ยแรงดันกั้น
ให้ไปตกคร่อมเอสซีอาร์แต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ตัวเหนี่ยวนำ(Inductor)

ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องทั้งหมดในขดลวด(Flux Linkage) กับกระแสที่ไหลในขดลวด(i) ซึ่งหน่วยของความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็น เฮนรี่(Henry,H) สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$L = \frac{\lambda}{i} \tag{3.45}$$

เมื่อ L :เป็นค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี่

λ :เป็นค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องทั้งหมดในขดลวดมีหน่วยเป็น Wbt

i :เป็นค่าของกระแสที่ไหลในขดลวด มีหน่วยเป็น A

ในกรณีที่มีขดลวดขดเดียวในวงจรแม่เหล็กค่าของความเหนี่ยวนำคำนวณหาได้จากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องในขดลวดหารด้วยกระแสที่ไหลในขดลวด โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \ldots + \phi_n \tag{3.46}$$

เมื่อ $\phi_1, \phi_2, \ldots, \phi_n$:เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องขดลวดขดที่ 1, ขดที่ 2 จนถึงขดที่ n ตามลำดับมีหน่วยเป็น Wb

แต่ถ้าวงจรแม่เหล็กไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว(Leakage Flux) หรือมีเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดแต่ละขดเท่ากันคือเท่ากับ ϕ จะได้ว่า

$$\lambda = N\phi \tag{3.47}$$

เมื่อ N :เป็นจำนวนรอบของขดลวด หน่วยเป็นรอบ(turn)

ความสัมพันธ์ระหว่าง mmf กับ ϕ ในวงจรแม่เหล็ก

$$Ni = \frac{\phi}{\mu A} l_{av}$$

$$Ni = \phi \Re \tag{3.48}$$

เมื่อ l_{av} :ความยาวของแกนเหล็กโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็นเมตร(m)

$\Re = \frac{l_{av}}{\mu A}$:เป็นความต้านทานแม่เหล็ก(Reluctance) มีหน่วยเป็น At/Wb

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ(L)ได้จาก

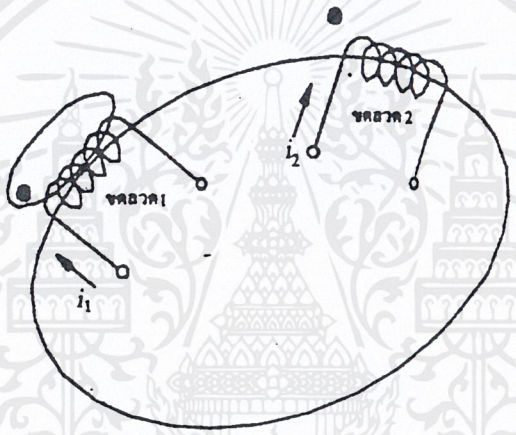
$$L = \frac{N\phi}{i} \tag{3.49}$$

จากสมการที่(3.48)แทนค่าลงในสมการที่(3.49)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{N^2}{\Re} \tag{3.50}$$

ในกรณีที่มีขดลวดในวงจรแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งขดค่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มาเกี่ยวคล้องขดลวดจึงประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็กของตัวเอง(Self Flux Linkage) กับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดรอบข้าง(Mutual Flux Linkage) ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดจึงประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง(Self-Inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วม(Matual-Inductance) ดังแสดงตามรูปที่ 3.21 เป็นขดลวด 2 ขดซึ่งมีสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องถึงกันตั้งชื่อว่าเป็นขดลวดที่ 1 กับขดลวดที่ 2



รูปที่ 3.21 แสดงการเกี่ยวคล้องของสนามแม่เหล็กของขดลวด 2 ขด

จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ 1(L_1) และขดลวดที่ 2(L_2) ได้จาก

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{11} + L_{12} \\ &= N_1\phi_1 + N_2K_{12}\phi_2 \\ &= \frac{N_1^2}{\Re_1} + K_{12}\frac{N_1N_2}{\Re_2} \end{aligned} \tag{3.51}$$

$$\begin{aligned} L_2 &= L_{21} + L_{22} \\ &= N_2K_{21}\phi_1 + N_2\phi_2 \\ &= \frac{K_{21}N_1N_2}{\Re_1} + \frac{N_2^2}{\Re_2} \end{aligned} \tag{3.52}$$

เมื่อ $L_{11} = \frac{N_1^2}{\Re_1}$:เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดที่ 1 มีหน่วยเป็น H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L_{22} = \frac{N_2^2}{\Re_2}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดที่ 2 มีหน่วยเป็น H

$L_{12} = K_{12}\frac{N_1 N_2}{\Re_2}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่ 1 ที่ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2 มีหน่วยเป็น H

$L_{21} = K_{21}\frac{N_1 N_2}{\Re_1}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่ 2 ที่ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1 มีหน่วยเป็น H

K_{12} : เป็นสัมประสิทธิ์ของการเกี่ยวคล้อง (Coupling coefficient) ของขดลวดที่ 1 ที่ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2

K_{21} : เป็นสัมประสิทธิ์ของการเกี่ยวคล้อง (Coupling coefficient) ของขดลวดที่ 2 ที่ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1

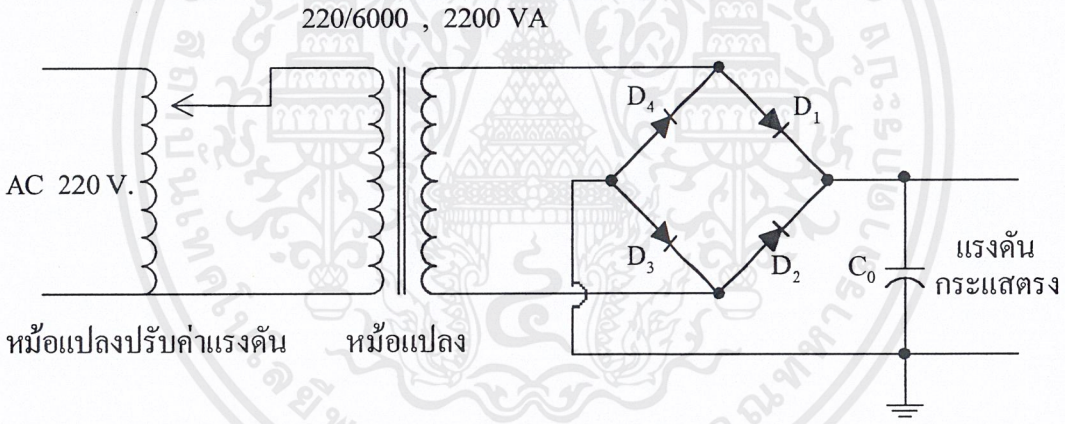
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบการทดลอง

4.1 การออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง จะใช้หม้อแปลงยกระดับแรงดันขึ้น จากนั้นก็ผ่านบริดส์ไดโอดเป็นตัวเรียงกระแสจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง และมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองลดแรงดันกระเพื่อม ซึ่งแรงดันกระแสตรงที่ออกมาสามารถปรับค่าได้และระดับแรงดันกระแสตรงที่ออกแบบไว้อยู่ที่ 8 kV โดยมีหม้อแปลงปรับค่าแรงดัน (Variac) เป็นตัวปรับระดับแรงดันเข้าดังรูปที่ 4.1

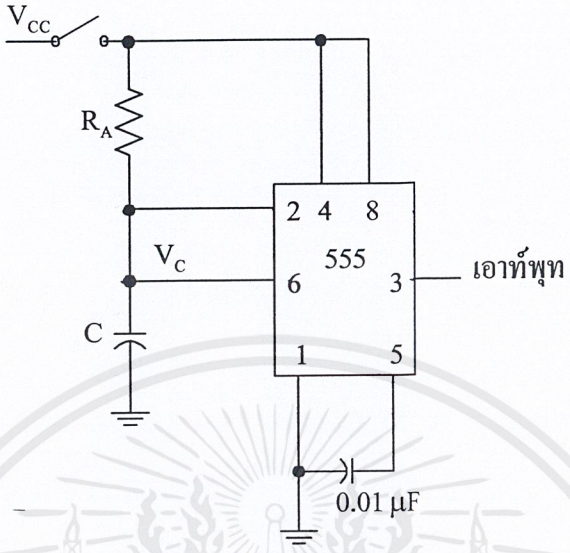


รูปที่ 4.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

4.1.2 วงจรโมโนสเตเบิล

เป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 1 ลูก เพื่อเป็นสัญญาณไปขับทรานซิสเตอร์ให้กำเนิดสัญญาณทริกเอสซีอาร์ โดยวงจรสร้างจากไอซี 555 ซึ่งสามารถปรับค่าความกว้างของพัลส์ได้ โดยการปรับค่า R_A และ C ซึ่งในวงจรนี้ใช้ C มีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครฟารัด และใช้ R_A เป็นตัวความต้านทานปรับค่า 1 กิโลโอห์ม เพื่อให้ได้ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่เหมาะสมในการทริกเอสซีอาร์ และแรงดัน V_{CC} ที่ใช้ในวงจรเท่ากับ 9 โวลต์ วงจรโมโนสเตเบิลแสดงดังรูปที่ 4.2

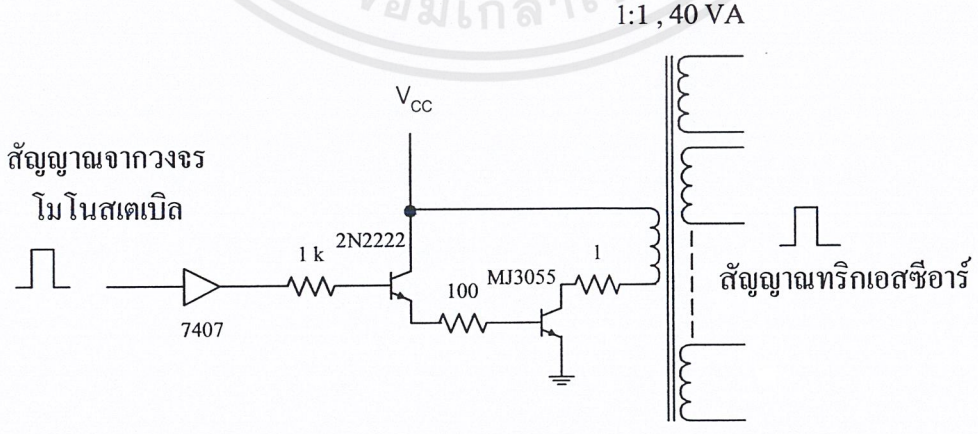
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรโมโนสเตเบิล

4.1.3 วงจรทริกเอสซีอาร์

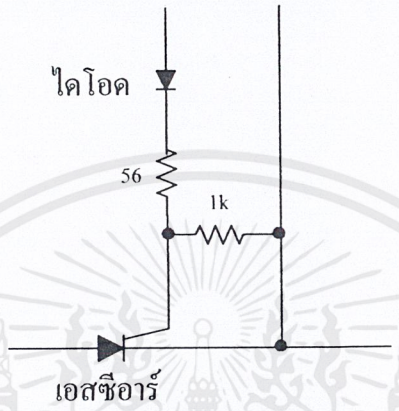
การควบคุมการทำงานของเอสซีอาร์ให้ทำงานพร้อมกันใน 1 ชุด สามารถทำได้โดยการใช้หม้อแปลงสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนเข้าที่ขาเกตของเอสซีอาร์ เพื่อทริกให้เอสซีอาร์ทำงาน โดยได้ออกแบบสร้างหม้อแปลงที่มีขดทางด้านเข้า (primary) 1 ขด และมีขดทางด้านออก (secondary) 8 ขด ซึ่งขดลวด 1 ขด ใช้ในการทริกเอสซีอาร์ 1 ตัว ดังนั้นจึงสามารถทริกเอสซีอาร์ได้พร้อมกัน 8 ตัว โดยหม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงแบบ 1:1 ขนาด 40 VA โดยวงจรทริกเอสซีอาร์แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรทริกเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

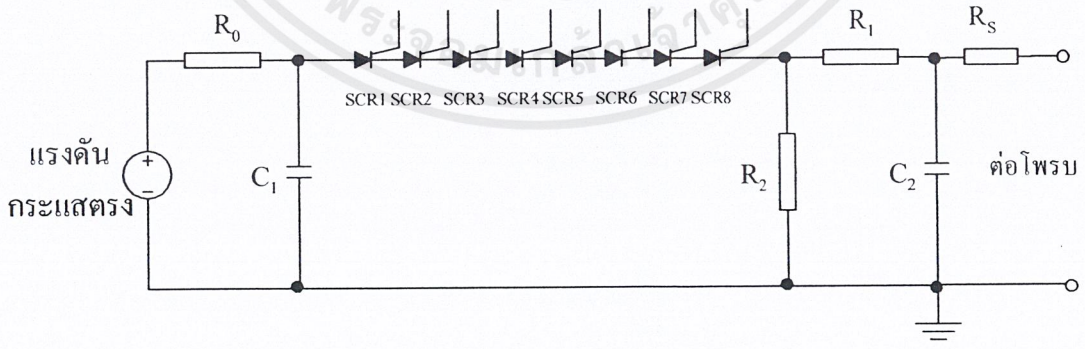
ในส่วนของวงจรป้องกันขาเกตของเอสซีอาร์ ใช้ไดโอดทำหน้าที่กั้นกระแสไหลย้อนกลับที่ขาเกต มีตัวความต้านทานขนาด 56 โอห์ม เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลเข้าขาเกต และยังใช้ตัวความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่อคร่อมระหว่างขาเกตและขาแคโทดของเอสซีอาร์ เพื่อดิสชาร์จประจุที่รอยต่อภายในของเอสซีอาร์ ช่วยให้เอสซีอาร์กลับคืนสู่สภาพปกติได้เร็วยิ่งขึ้นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรป้องกันเอสซีอาร์

4.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ออกแบบระดับแรงดันไว้ที่ 6 kV ซึ่งจะใช้เอสซีอาร์ 8 ตัว มาต่ออนุกรมกัน โดยเลือกใช้เอสซีอาร์เบอร์ 25RIA120 ซึ่งแต่ละตัวทนแรงดันได้ 1,200 โวลต์ ดังนั้นทั้งวงจรสามารถทนแรงดันได้ 9,600 โวลต์ ดังวงจรในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบหม้อแปลง

ในโครงงานชิ้นนี้ มีการใช้หม้อแปลงเพื่อยกระดับแรงดัน จาก 220 V ขึ้นเป็น 6000 V เพื่อนำไปจ่ายให้กับวงจรเรียงกระแส ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันไฟตรงซึ่งใช้เป็นอินพุท ของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

พิกัดหม้อแปลง *220/6000 volt* *2200 VA*

การออกแบบขั้นต้น

1.) ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A_m)

จาก volt per turn = $4.44fB_mA_mF_s$

โดย เลือก volt per turn = 2

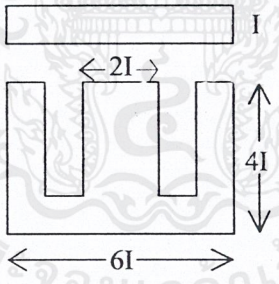
B_m = 1 Tesla

Stacking Factor (F_S) = 0.9

Frequency = 50 Hz

จะได้ A_m =15.52 ตารางนิ้ว

ดังนั้น เลือกบ๊อบบิ้นขนาด 3×5 ตารางนิ้ว , I = 1.5 นิ้ว



รูปที่ 4.6 ลักษณะของแกน E,I

2.) ขนาดของลวด : โดยเลือกใช้ J = 2 A/mm^2

ขดปฐมภูมิ

$$I_1 = \frac{2200}{220} = 10\text{A}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดขดลวด} = \frac{I_1}{J} = \frac{10}{2} = 5\text{mm}^2$$

เลือกใช้ลวดเบอร์ 12 SWG มีพื้นที่หน้าตัด 5.584 mm^2 , เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.642 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดทุติยภูมิ

$$I_2 = \frac{2200}{6000} = 0.37A$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดขดลวด} = \frac{I_2}{J} = \frac{0.37}{2} = 0.185mm^2$$

เลือกใช้ลวดเบอร์ 25 SWG มีพื้นที่หน้าตัด 0.206 mm^2 , เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.508 mm

3.) จำนวนรอบ

โดย volt per turn = 2

$$\text{ขดลวดปฐมภูมิ}: N_1 = \frac{220}{2} = 110\text{รอบ}$$

$$\text{ขดลวดทุติยภูมิ}: N_2 = \frac{6000}{2} = 3000\text{รอบ}$$

4.) ตรวจสอบพื้นที่ของหน้าต่างว่าเพียงพอสำหรับการพันหรือไม่

$$\text{พื้นที่หน้าต่าง} = 3I^2 = 43.55cm^2$$

$$\text{พื้นที่ที่ใช้พัน} = \frac{\left[N_1 \cdot A_{cp} + N_2 \cdot A_{cs}\right]}{F_w} = 35.21cm^2$$

A_{cp} : พื้นที่หน้าตัดขดลวดปฐมภูมิ

A_{cs} : พื้นที่หน้าตัดขดลวดทุติยภูมิ

F_w : แฟคเตอร์หน้าต่าง = 0.35

จะเห็นได้ว่า พื้นที่หน้าต่างเพียงพอสำหรับการพันลวด แต่เพื่อการฉนวนที่ดีเราจะใช้พื้นที่ประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าต่าง ดังนั้น เราจะเปลี่ยนขนาดแกนเหล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าต่างนอกจากนี้จะทำการเพิ่มความหนาของแกนเหล็ก เพื่อป้องกันการเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก จึงได้มีการเปลี่ยนขนาดบ๊อบบิ้นเป็น 4×6 ตารางนิ้ว เมื่อทำการคำนวณใหม่จะได้ค่าต่างๆ สำหรับการพันหม้อแปลงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) $A_m = 4\times6$ ตารางนิ้ว , $I = 2$ นิ้ว

2.) volt per turn = 2.92

3.)จำนวนรอบ

ปฐมภูมิ : 77 รอบ

ทุติยภูมิ : 2100 รอบ

4.) เบอร์ลวด

ปฐมภูมิ : 12 SWG

ทุติยภูมิ : 25 SWG

4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร

ในโครงงานนี้เลือกใช้วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในรูปที่3.4(ข) เนื่องจากประสิทธิภาพของวงจร(ข) มากกว่าของวงจร(ก) กำหนดค่า C_2= 1.5 nF ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบที่ใช้งานโดยทั่วๆไป และเพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรให้ $C_1 >> C_2$ ในที่นี้จึงเลือกใช้ค่า C_1 =156.7 nF ออกแบบเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μsec จากตารางที่ 3.2 จะได้ $\frac{1}{\alpha_1}$= 68.5 μsec และ $\frac{1}{\alpha_2}$= 0.405 μsec แทนค่าในสมการหาค่า R_1 และ R_2

จาก C_1 =156.7 nF , C_2= 1.5 nF

$$\alpha_1 = \frac{1}{68.5\times10^{-6}} \qquad \alpha_2 = \frac{1}{0.405\times10^{-6}}$$

$$R_1 = \frac{1}{2C_2}\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}-\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_1}}\right)$$

R_1 = 272.6 โอห์ม

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1+C_2)}\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}+\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_1}}\right)$$

R_2 = 432.97 โอห์ม

R_0 เป็นความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ C_1 มีค่า 140 กิโลโอห์ม C_0 เป็นตัวเก็บประจุช่วยกรองไฟให้เรียบมีค่า 4.167 μF R_S เป็นความต้านทานจำกัดกระแสลัดวงจรเพื่อป้องกันอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรซึ่งมีค่า 50 โอห์ม นำค่าที่คำนวณได้ไปสร้างวงจร และคำนวณประสิทธิภาพของวงจรได้จาก

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{156.7\,\text{nF}}{(156.7 + 1.5)\,\text{nF}} = 99.05\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตท 1 ชุด
2. สตอเรจสโคป (Storage Scope) 1 เครื่อง
3. โพรบแรงสูง 1000:1 2 ชุด
4. โพรบ 1:1 1 ชุด
5. หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน 1 เฟส : 10 A , 0-260 V 1 ตัว
6. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า , 220/380 V , 50 Hz , 1420 rpm , 3.5/2 A , 4 pole
7. เครื่องวัด R,L,C 1 เครื่อง

5.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

จุดประสงค์การทดลอง

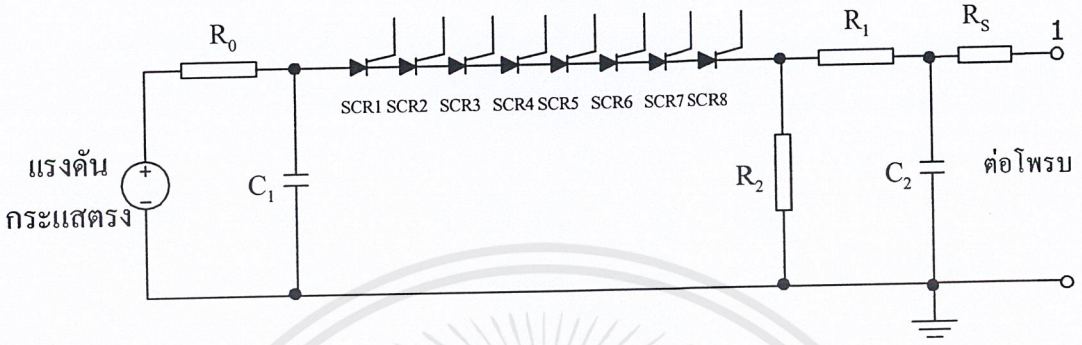
1. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยอุปกรณ์โซลิดสเตท
2. เพื่อศึกษาลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เมื่อค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์เปลี่ยนแปลงไป แล้วลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ยังตรงตามมาตรฐานอยู่หรือไม่
3. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรทริกเอสซีอาร์ และหาความกว้างของสัญญาณทริกที่เหมาะสม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.1 โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ แล้วใช้โพรบ 1000:1 จับที่จุด 1 เทียบกับกราวด์ดังแสดงในรูป ที่ 5.1
2. ปรับแรงดันอินพุทให้ได้แรงดันอิมพัลส์เป็น 1500 โวลต์ แล้วทำการปรับความกว้างของสัญญาณทริกเอสซีอาร์โดยปรับค่าความต้านทาน R_A ในวงจรรูปที่ 4.2 เพื่อหาความกว้างที่น้อยที่สุดที่สามารถทริกเอสซีอาร์ให้ทำงานพร้อมกันได้ แล้วบันทึกรูปสัญญาณไว้
3. ปรับพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ใกล้เคียงมาตรฐานมากที่สุด แล้วทำการปรับระดับแรงดันอินพุท ให้ได้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 500 , 1000 , 2000 , 3000 , 4000 , 5000 และ 6000 โวลต์

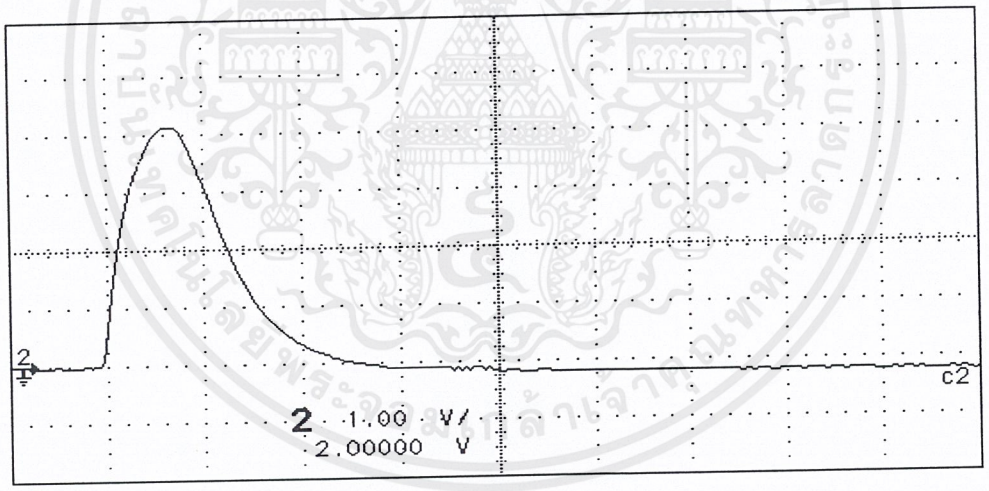
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สังเกตลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากสตอเรจสโคป แล้วบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1

ผลการทดลอง



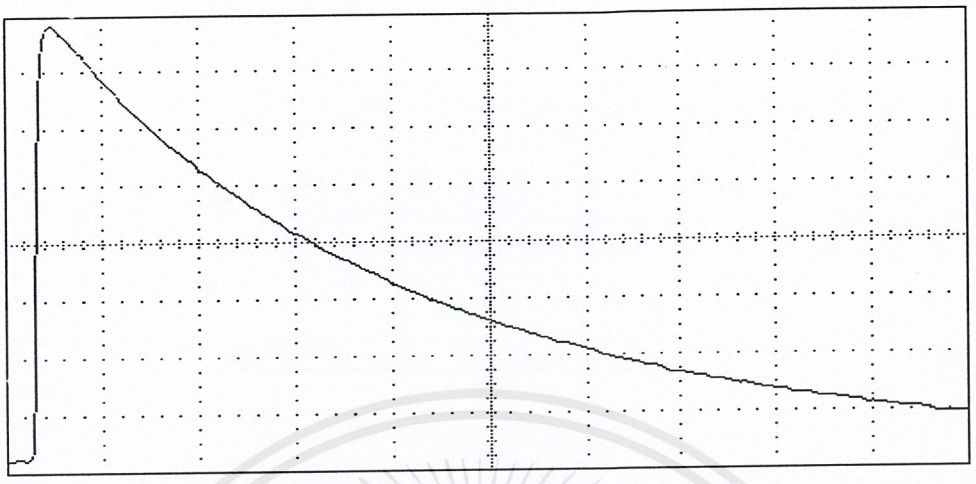
V(max) = 4.125 Volt

1.00 Volt/div

2 μsec/div

รูปที่ 5.2 สัญญาณทริกเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



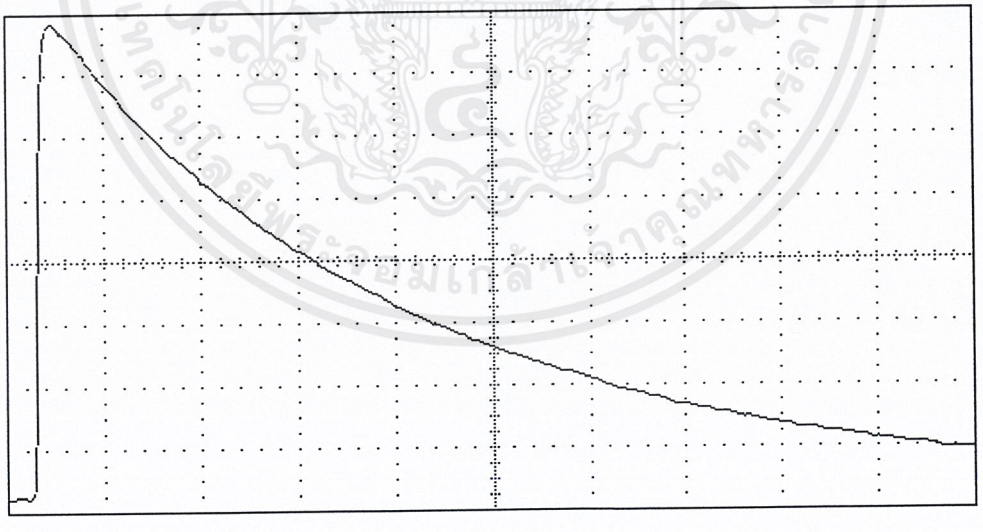
V(max) = 1500 Volt , 200 Volt/div , 20 μsec/div

T_1 = 1.303 μsec (คลาดเคลื่อน +8.58 %)

T_2 = 57.098 μsec (คลาดเคลื่อน +14.196 %)

R_1 = 273 โอห์ม , R_2 = 433 โอห์ม

รูปที่ 5.3 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์



V(max) = 1500 Volt , 200 Volt/div , 20 μsec/div

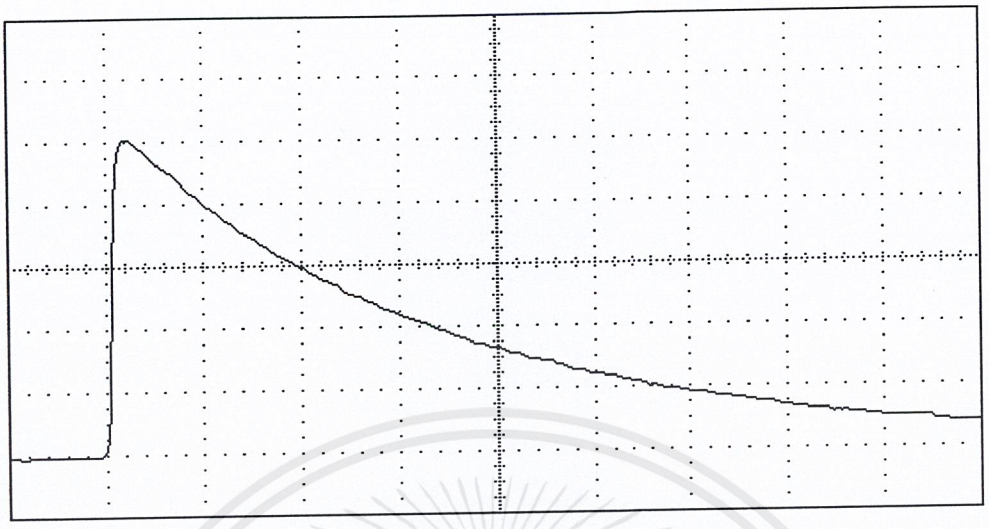
T_1 = 1.210 μsec (คลาดเคลื่อน +0.833 %)

T_2 = 49.982 μsec (คลาดเคลื่อน –0.036 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.4 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



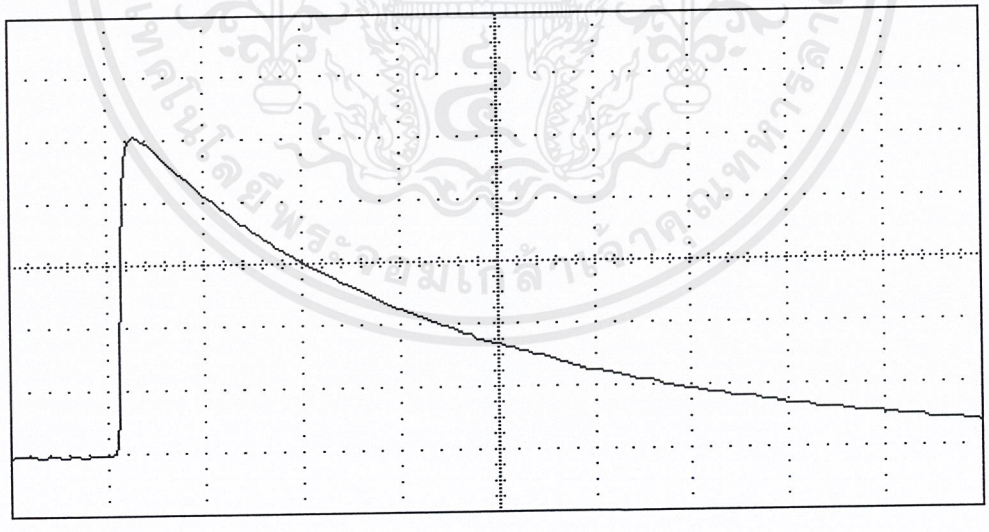
V(max) = 500 Volt , 100 Volt/div , 20 µsec/div

T_1 = 1.394 µsec (คลาดเคลื่อน +16.17 %)

T_2 = 50.048 µsec (คลาดเคลื่อน +0.10 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.5 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 500 โวลต์



V(max) = 1000 Volt , 200 Volt/div , 20 µsec/div

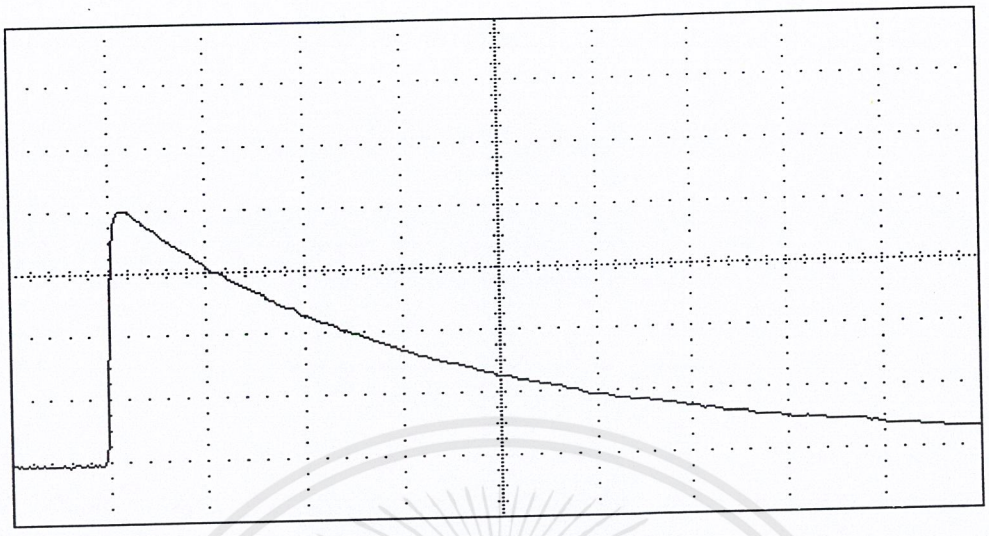
T_1 = 1.253 µsec (คลาดเคลื่อน +4.42 %)

T_2 = 49.997 µsec (คลาดเคลื่อน –0.30 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.6 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



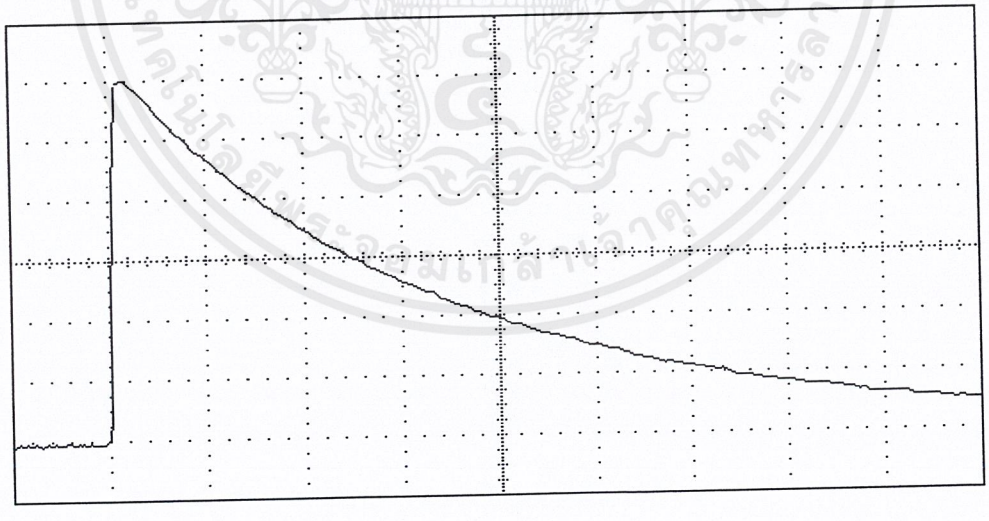
V(max) = 2000 Volt , 500 Volt/div , 20 μsec/div

T_1 = 1.174 μsec (คลาดเคลื่อน –2.17 %)

T_2 = 49.557 μsec (คลาดเคลื่อน –0.89 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.7 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 2000 โวลต์



V(max) = 3000 Volt , 500 Volt/div , 20 μsec/div

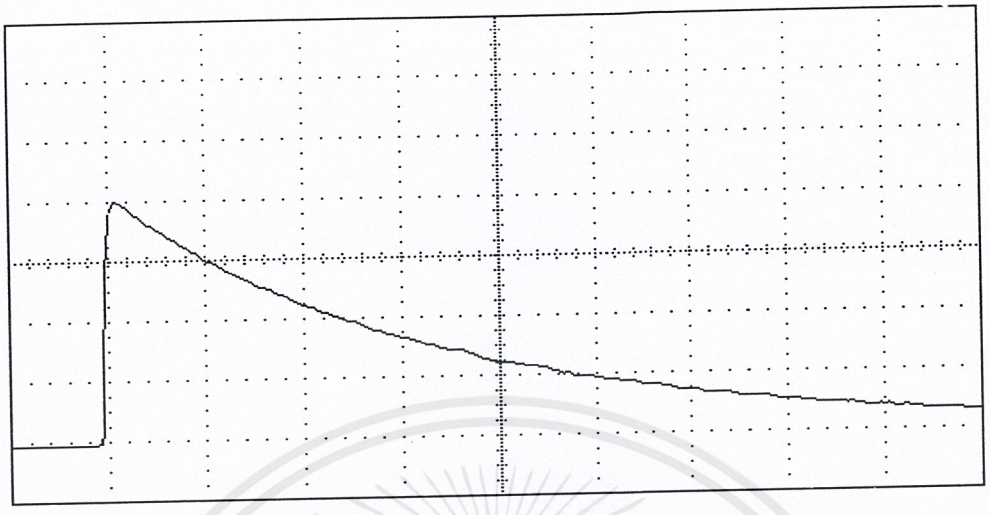
T_1 = 1.161 μsec (คลาดเคลื่อน –3.25 %)

T_2 = 49.556 μsec (คลาดเคลื่อน –0.89 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.8 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 3000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



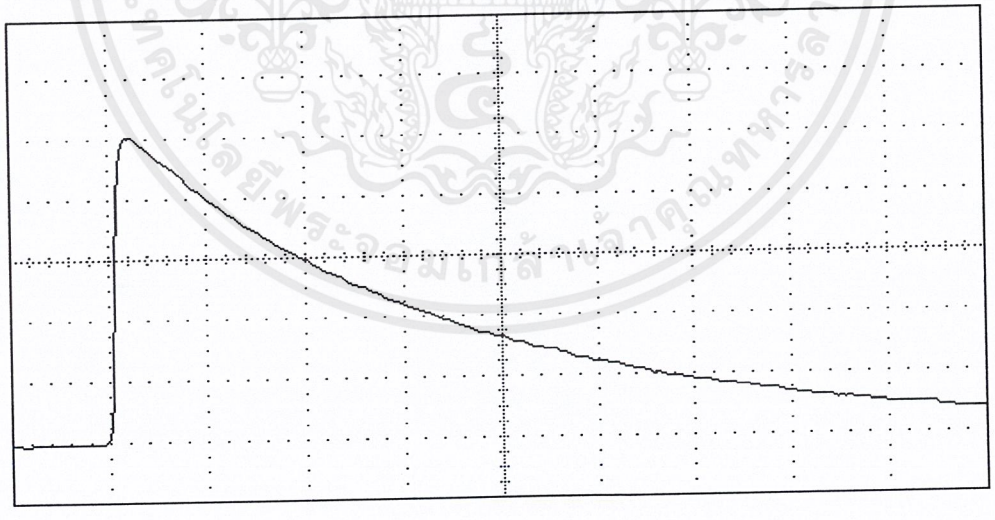
V(max) = 4000 Volt , 1000 Volt/div , 20 μsec/div

T_1 = 1.225 μsec (คลาดเคลื่อน +2.08 %)

T_2 = 48.742 μsec (คลาดเคลื่อน –2.52 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.9 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 4000 โวลต์



V(max) = 5000 Volt , 1000 Volt/div , 20 μsec/div

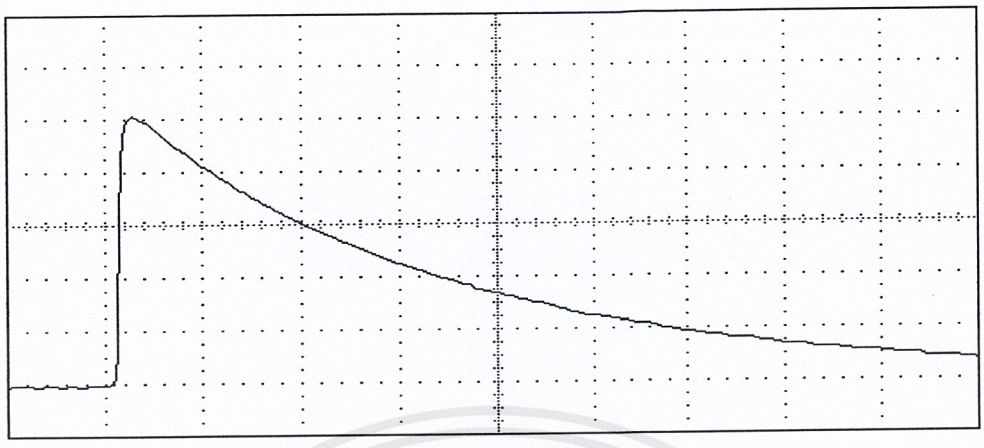
T_1 = 1.092 μsec (คลาดเคลื่อน –9.00 %)

T_2 = 49.960 μsec (คลาดเคลื่อน –0.08 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.10 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 5000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V(max) = 6000 Volt ,1000 Volt/div , 20 μsec/div

T_1 = 1.223 μsec (คลาดเคลื่อน +1.92 %)

T_2 = 50.400 μsec (คลาดเคลื่อน +0.80 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.11 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 6000 โวลต์

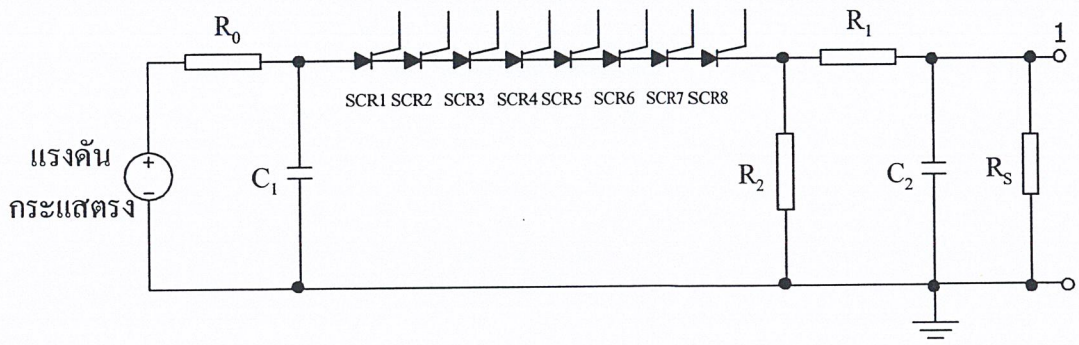
5.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบการลัดวงจรที่เอาท์พุทของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อทดสอบการลัดวงจรที่เอาท์พุทซึ่งยังทำให้วงจรไม่เสียหายและหาค่ากระแสลัดวงจร

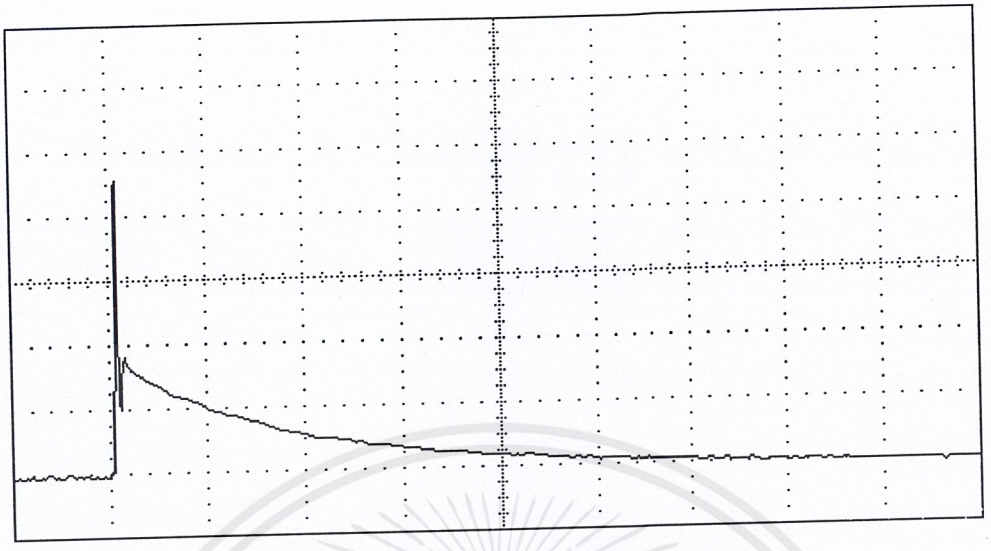
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 5.12
2. ปรับระดับแรงดันอิมพัลส์ขณะเปิดวงจรอยู่ให้ได้ 6000 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่วงจรสามารถจ่ายได้ แล้วทำการลัดวงจรที่เอาท์พุท วัดแรงดันที่จุด 1 เทียบกับกราวด์และบันทึกผล



รูปที่ 5.12 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V(max) = 2281.25 Volt , 500 Volt/div , 20 μsec/div

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

รูปที่ 5.13 แสดงรูปคลื่นเมื่อเอาท์พุทเกิดการลัดวงจร

5.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์เมื่อป้อนให้กับขดสเตเตอร์ของมอเตอร์

จุดประสงค์การทดลอง

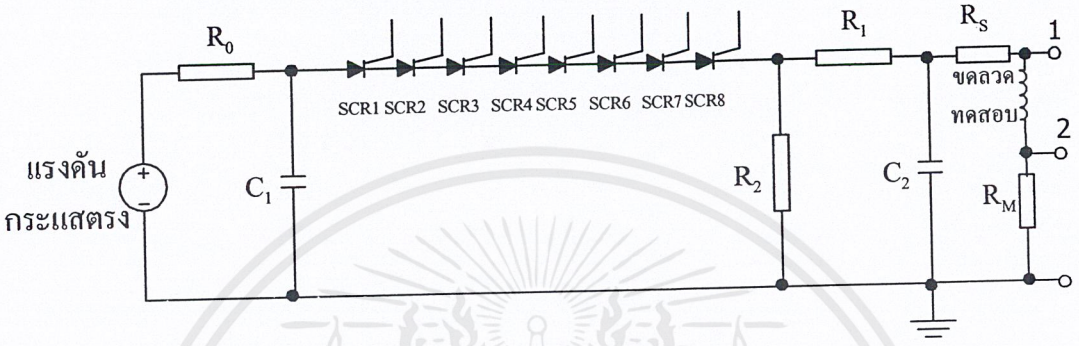
1. เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เมื่อป้อนให้กับขดลวดทดสอบ
2. เพื่อปรับพารามิเตอร์ในวงจรให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ยังตรงตามมาตรฐานเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับขดสเตเตอร์ของมอเตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำมอเตอร์ทดสอบไปวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส โดยไม่ใส่โรเตอร์
2. หาค่าความต้านทานแมชชิ่ง(R_M)ที่เหมาะสม แล้วนำไปต่อกับวงจรตามรูปที่ 5.14
3. ปรับระดับแรงดันอินพุท ให้ได้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 1500 โวลต์ แล้วสังเกตลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
4. ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรเพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตรงตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปรับระดับแรงดันอินพุท ให้ได้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 500 , 1000 , 2000 , 3000 , 4000 , 5000 และ 6000 โวลต์
6. สังเกตลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากสตอเรจสโคป แล้วบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 5.14 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ผลการทดลอง

เมื่อนำขดลวดสเตเตอร์ไปวัดค่าความเหนี่ยวนำ ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5.1

ขดลวดสเตเตอร์	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
เฟส A	15.03
เฟส B	15.00
เฟส C	15.05

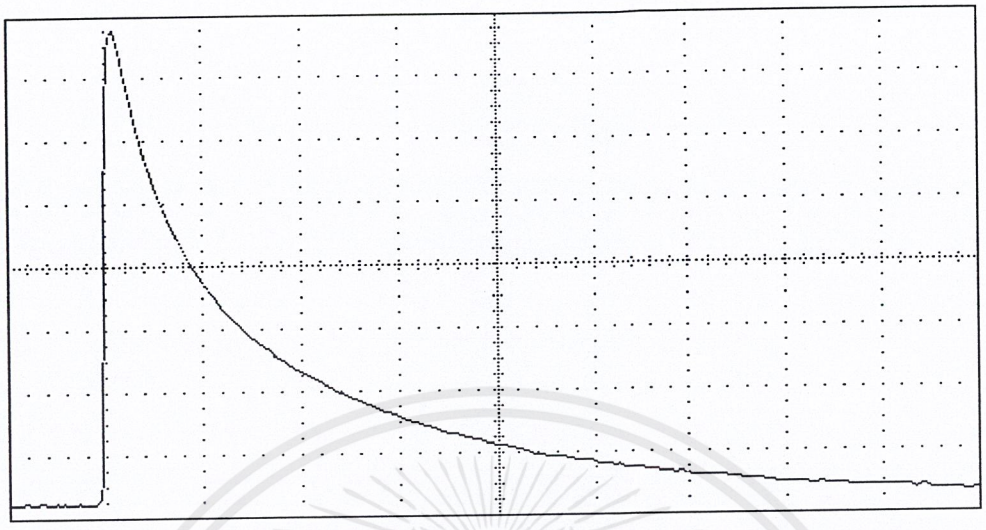
ตารางที่ 5.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์

ใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 15 mH มาคำนวณหาค่า X_L โดยถือว่าอิมพัลส์ 1 ลูก มีคาบเท่ากับ 100 μsec ดังนั้นความถี่จะเป็น 1/100 μsec หรือเท่ากับ 10 kHz ได้ค่า X_L ดังนี้

$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 10000 \times 0.015 = 942.5$ โอห์ม

เลือกค่าความต้านทานแมชชิ่งให้ใกล้เคียงกับค่า X_L ดังนั้นจึงเลือกค่า 1000 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



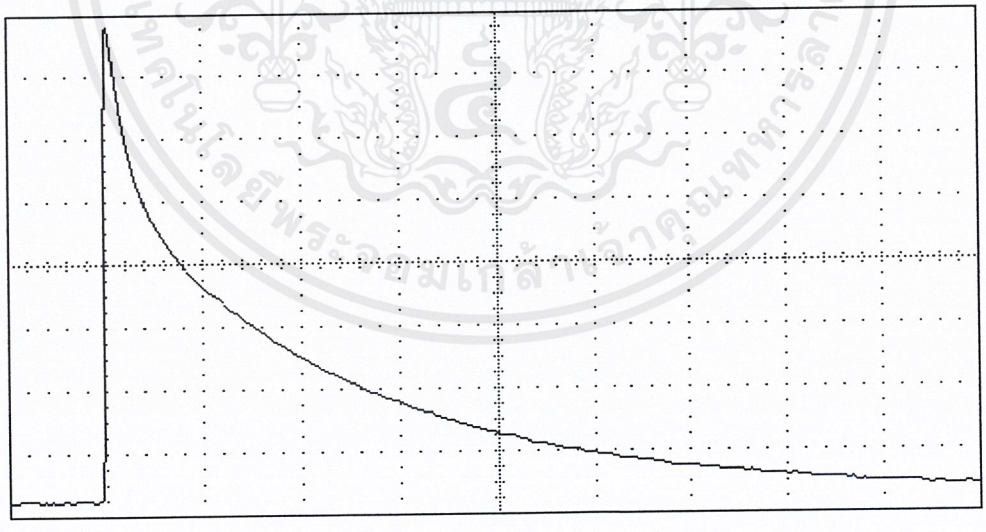
V(max) = 1500 Volt , 200 Volt/div , 20 μsec/div

T_1 = 1.019 μsec (คลาดเคลื่อน –15.08 %)

T_2 = 17.419 μsec (คลาดเคลื่อน –65.16 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม , R_M = 1000 โอห์ม

รูปที่ 5.15 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์



V(max) = 1500 Volt , 200 Volt/div , 20 μsec/div

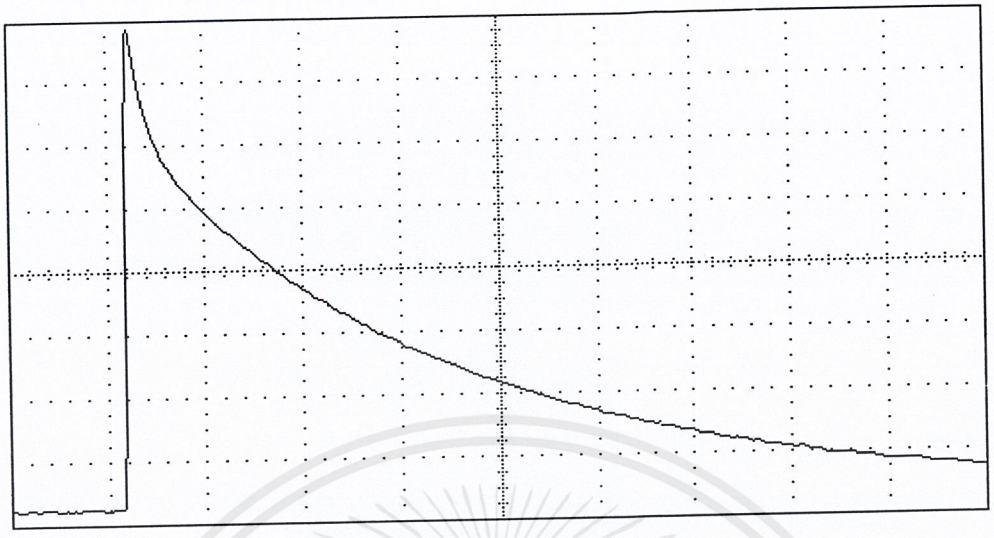
T_1 = 1.225 μsec (คลาดเคลื่อน +2.08 %)

T_2 = 36.00 μsec (คลาดเคลื่อน –28.00 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 ไม่ต่อในวงจร , R_M = 1000 โอห์ม

รูปที่ 5.16 แรงดันอิมพัลส์ขนาด1500 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



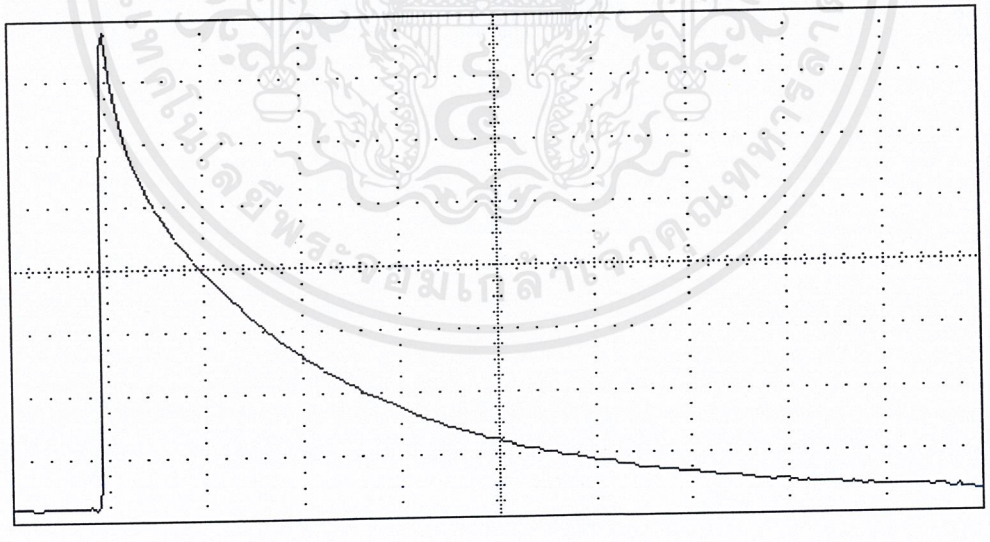
V(max) = 1500 Volt , 200 Volt/div , 50 µsec/div

T_1 = 1.304 µsec (คลาดเคลื่อน +8.67 %)

T_2 = 75.680 µsec (คลาดเคลื่อน +51.36 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 ไม่ต่อในวงจร , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.17 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์



V(max) = 1500 Volt , 200 Volt/div , 50 µsec/div

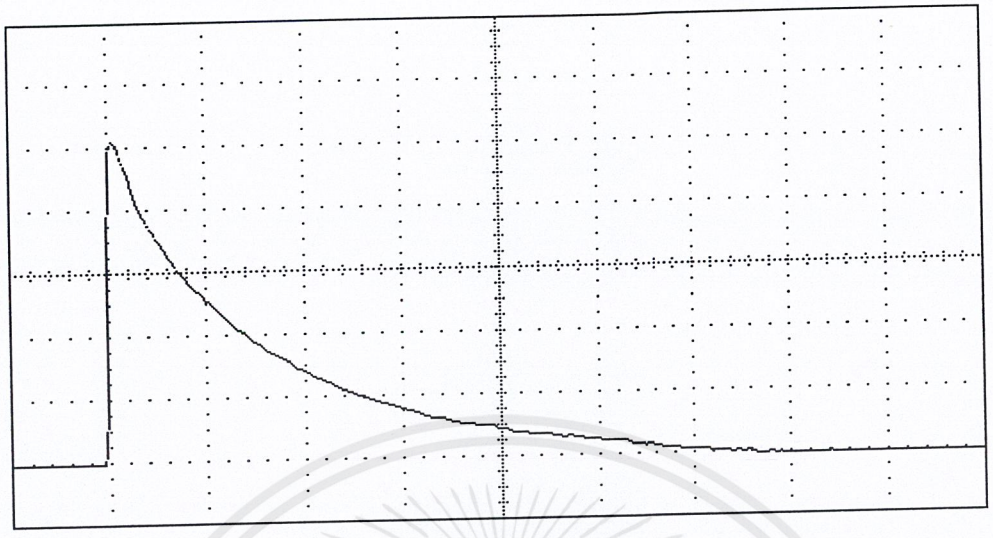
T_1 = 1.336 µsec (คลาดเคลื่อน +11.33 %)

T_2 = 52.028 µsec (คลาดเคลื่อน +4.06 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.18 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1500 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



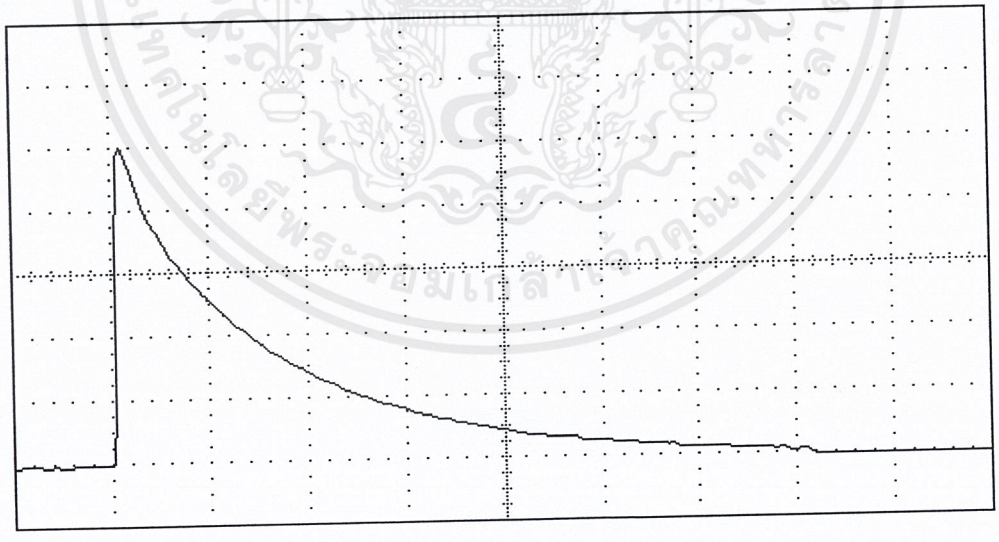
V(max) = 500 Volt , 100 Volt/div , 50 μsec/div

T_1 = 1.462 μsec (คลาดเคลื่อน +21.83 %)

T_2 = 51.151 μsec (คลาดเคลื่อน +2.30 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.19 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 500 โวลต์



V(max) = 1000 Volt , 200 Volt/div , 50 μsec/div

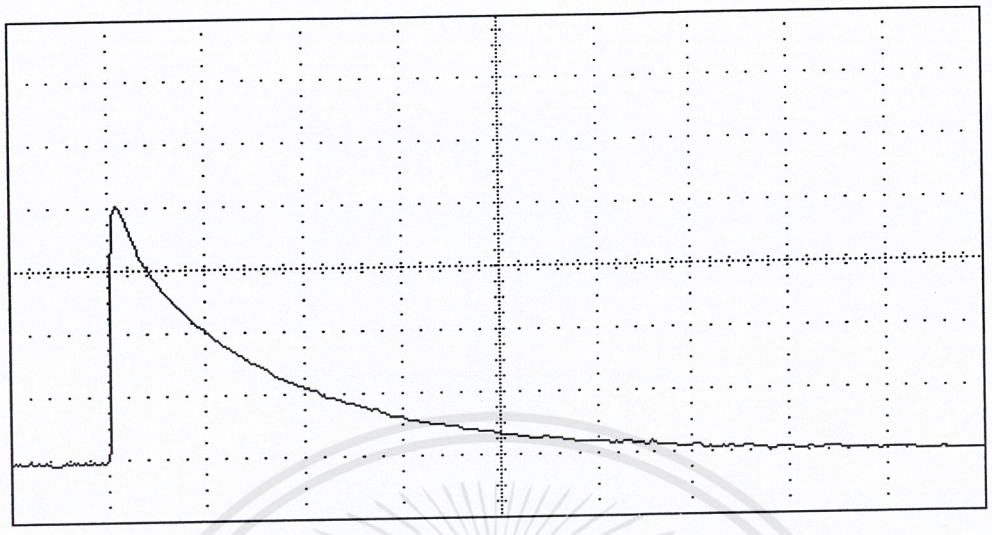
T_1 = 1.309 μsec (คลาดเคลื่อน +9.08 %)

T_2 = 50.00 μsec (คลาดเคลื่อน +0.00 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.20 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 1000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



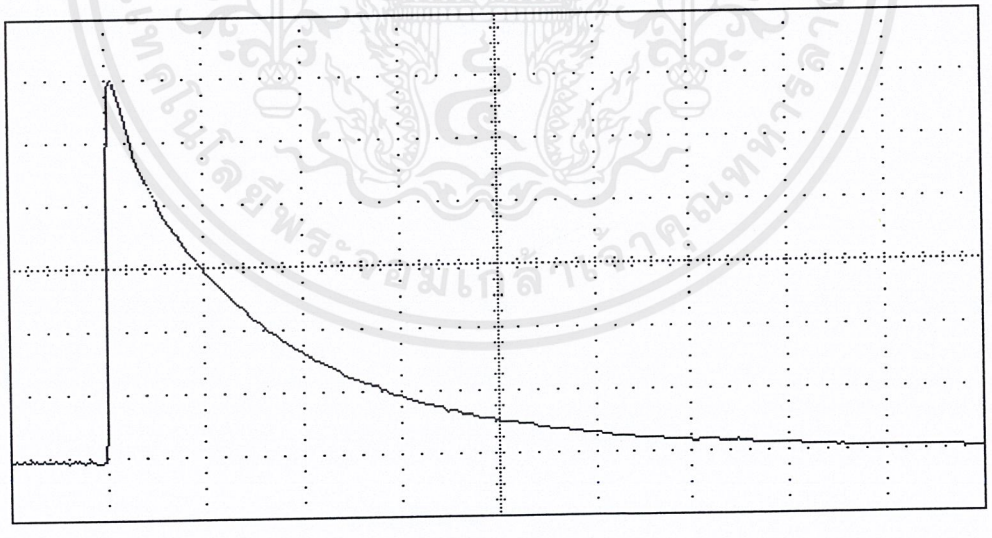
V(max) = 2000 Volt , 500 Volt/div , 50 μsec/div

T_1 = 1.217 μsec (คลาดเคลื่อน +1.42 %)

T_2 = 47.978 μsec (คลาดเคลื่อน –4.04 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.21 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 2000 โวลต์



V(max) = 3000 Volt , 500 Volt/div , 50 μsec/div

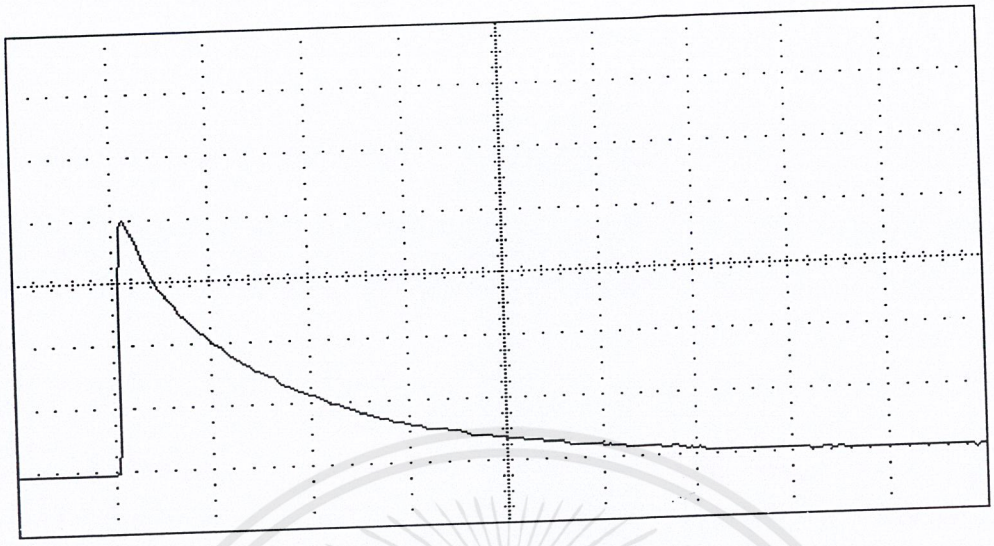
T_1 = 1.193 μsec (คลาดเคลื่อน –0.58 %)

T_2 = 47.959 μsec (คลาดเคลื่อน –4.08 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.22 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 3000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



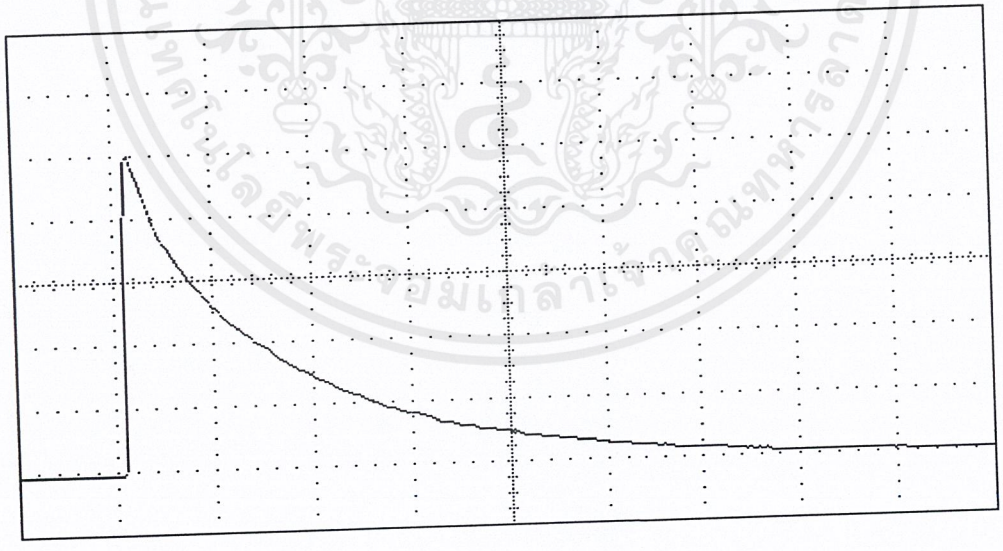
V(max) = 4000 Volt , 1000 Volt/div , 50 μsec/div

T_1 = 1.240 μsec (คลาดเคลื่อน +3.33 %)

T_2 = 47.000 μsec (คลาดเคลื่อน –6.00 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.23 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 4000 โวลต์



V(max) = 5000 Volt , 1000 Volt/div , 50 μsec/div

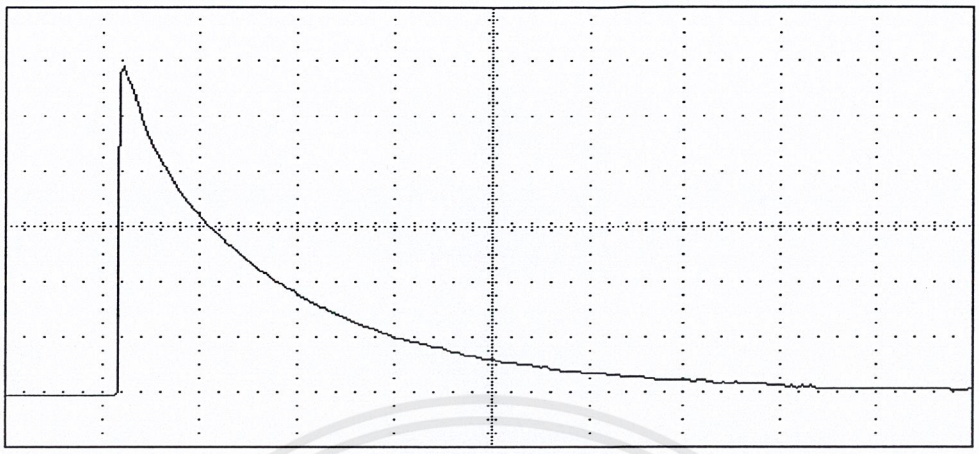
T_1 = 1.165 μsec (คลาดเคลื่อน –2.92 %)

T_2 = 46.912 μsec (คลาดเคลื่อน –6.18 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.24 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 5000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V(max) = 6000 Volt , 1000 Volt/div , 50 μsec/div

T_1 = 1.241 μsec (คลาดเคลื่อน +3.42 %)

T_2 = 47.370 μsec (คลาดเคลื่อน –5.26 %)

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 668 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.25 แรงดันอิมพัลส์ขนาด 6000 โวลต์

5.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์

จุดประสงค์การทดลอง

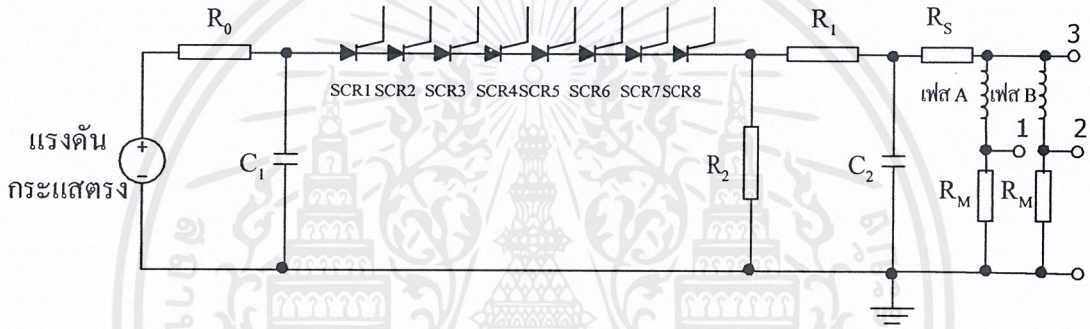
1. เพื่อศึกษาลักษณะของรูปคลื่นเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด
2. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับเฟรม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 5.26 ปรับความต้านทาน R_2 เป็น 1868 โอห์ม และต่อขดลวดทดสอบทั้ง 2 ขด อนุกรมกับความต้านทาน R_M 1500 โอห์ม โดยขดที่ไม่ได้ทำการทดสอบให้ต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วต่อลงกราวด์พร้อมทั้งต่อเฟรมลงกราวด์ด้วย
2. เตรียมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยขดลวดเฟส A และ B ยังมีสภาพฉนวนที่ดีอยู่ ส่วนขดลวดเฟส C ได้ทำการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดไว้
3. ป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 552-1992(R1977) ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ $5\left(\sqrt{2}/\sqrt{3}\right)V_L$ มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีพิกัดV_L เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 1500 โวลต์ เข้าสู่ขดลวดเฟส A และ B พร้อมกัน สังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขดเทียบกัน โดย CH1 วัดแรงดันที่จุด 1 เทียบกราวด์ และ CH2 วัดแรงดันที่จุด 2 เทียบกับกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

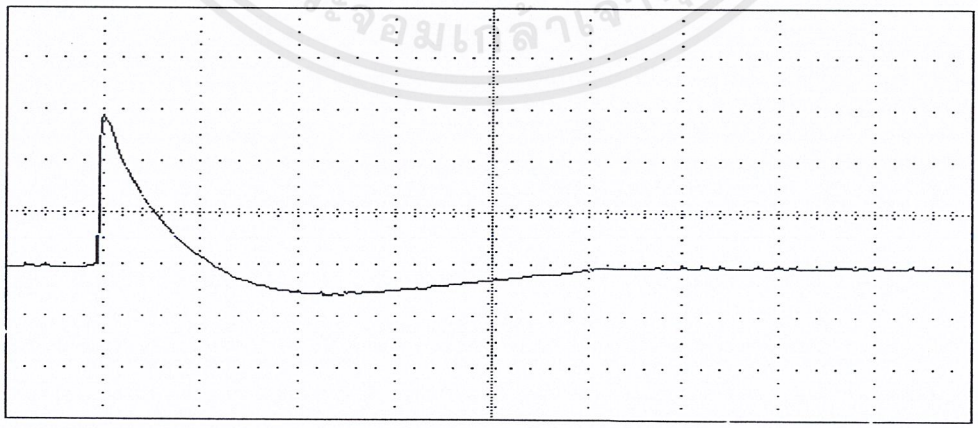
4. เปลี่ยนขดลวดทดสอบจากเฟส A เป็นเฟส C ป้อนแรงดันทดสอบเข้าสู่ขดลวดทั้ง 2 เฟสพร้อมกัน สังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขดเทียบกัน โดย CH1 วัดแรงดันที่จุด 1 เทียบกับกราวด์ และ CH2 วัดแรงดันที่จุด 2 เทียบกับกราวด์
5. ป้อนแรงดันทดสอบที่ระดับต่ำกว่าและสูงกว่ามาตรฐานกำหนดเพื่อเปรียบเทียบผลกับค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยการป้อนระดับแรงดันที่ 500 โวลต์ และ 4000 โวลต์ ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนในข้อที่ 3 และ 4 จากนั้นที่ระดับแรงดัน 4000 โวลต์ ก็เพิ่มรอบของการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด แล้วสังเกตผลที่ได้



รูปที่ 5.26 วงจรการทดลองที่ 4

ผลการทดลอง

1. เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบที่ 1500 โวลต์

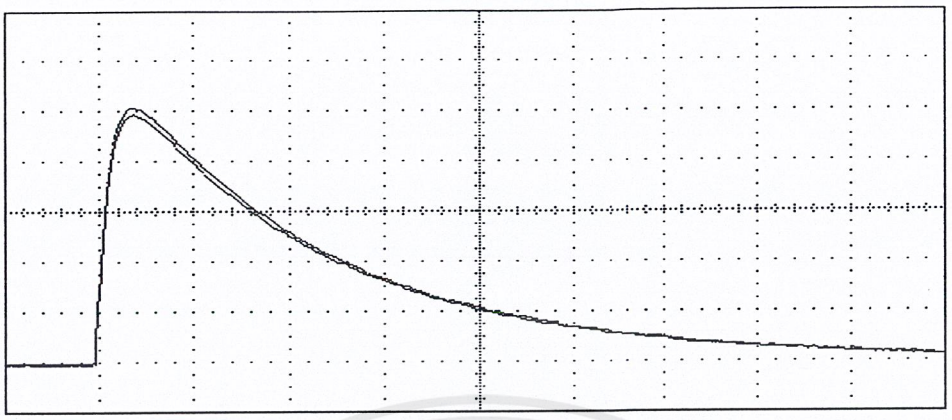


V(max) = 1437.5 Volt , 500 Volt/div , 50 μsec/div

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 1868 โอห์ม , R_M = 1500 โอห์ม

รูปที่ 5.27 แรงดันที่ตกตร่อมขดลวดทดสอบ

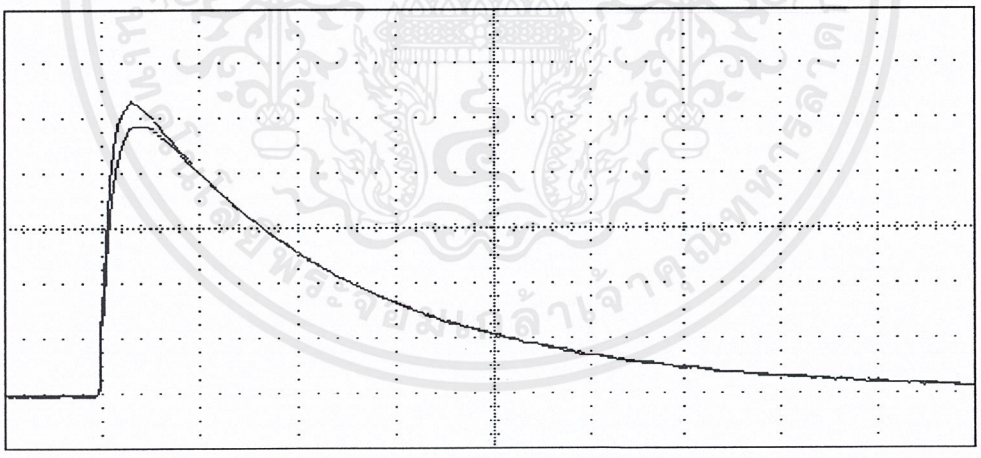
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



200 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 1012.5 Volt	V(max) = 987.5 Volt
T_1 = 10.106 μsec	T_1 = 10.185 μsec
T_2 = 104.381 μsec	T_2 = 103.257 μsec

รูปที่ 5.28 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

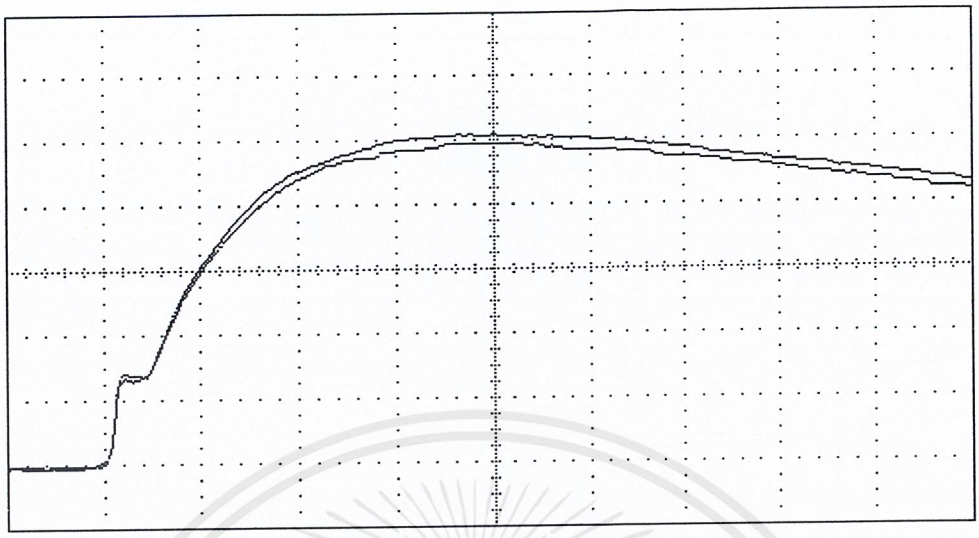


200 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 1062.5 Volt	V(max) = 968.75 Volt
T_1 = 8.560 μsec	T_1 = 10.005 μsec
T_2 = 97.749 μsec	T_2 = 105.719 μsec

รูปที่ 5.29 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

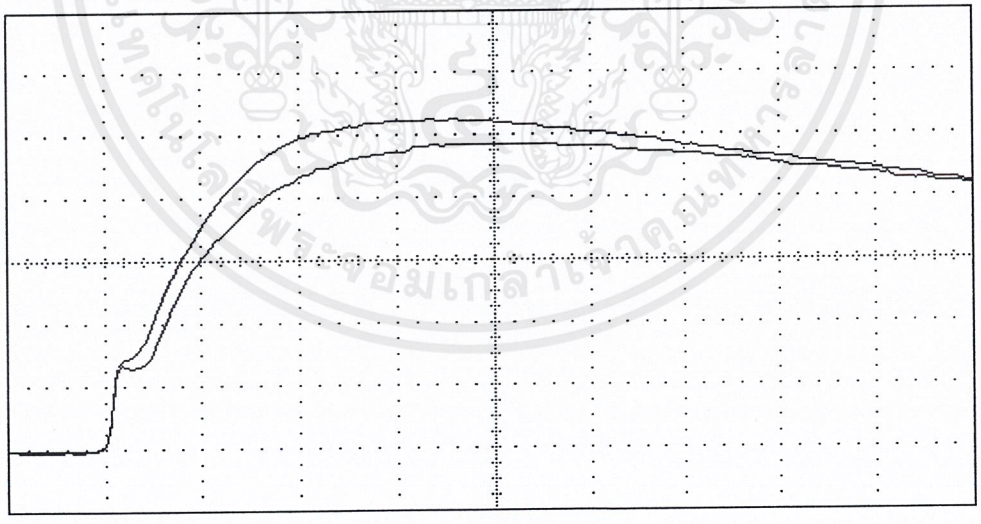
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



200 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 1018.75 Volt	V(max) = 987.5 Volt
T_1 = 9.839 μsec	T_1 = 9.801 μsec

รูปที่ 5.30 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่ 5.28)



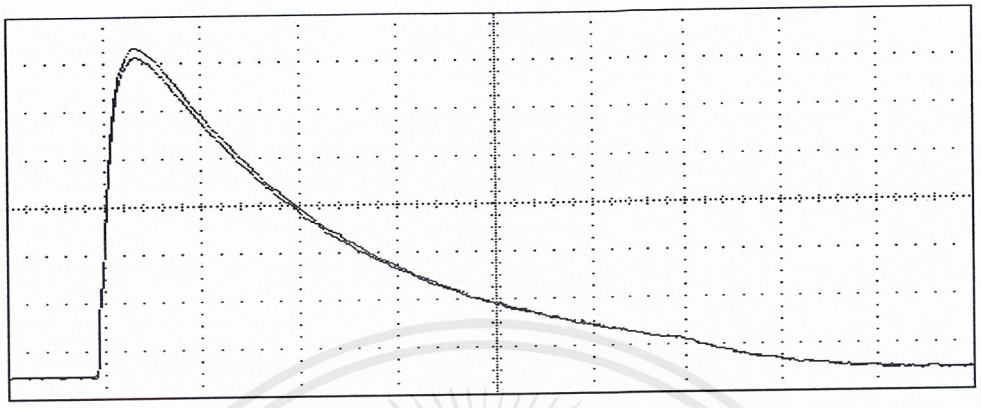
200 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 1050.0 Volt	V(max) = 968.75 Volt
T_1 = 8.162 μsec	T_1 = 9.831 μsec

รูปที่ 5.31 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่5.29)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

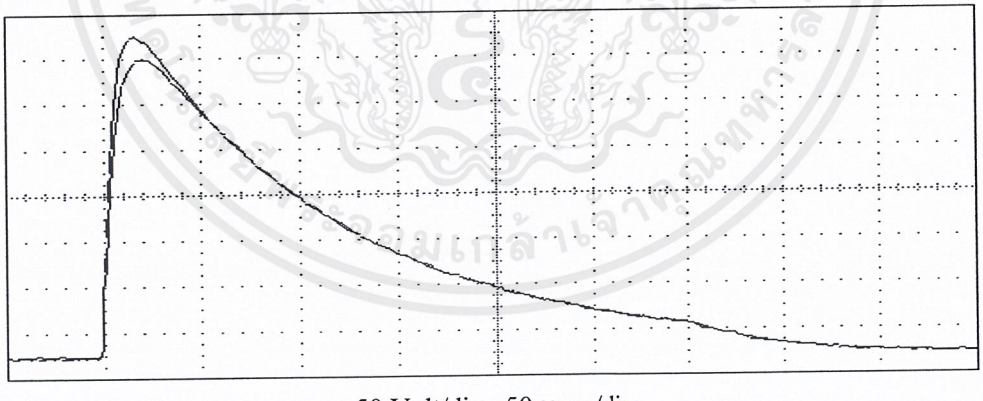
2. เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบที่ 500 โวลต์



50 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 340.63 Volt	V(max) = 331.25 Volt
T_1 = 9.829 μsec	T_1 = 9.827 μsec
T_2 = 103.932 μsec	T_2 = 103.319 μsec

รูปที่ 5.32 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_Mในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

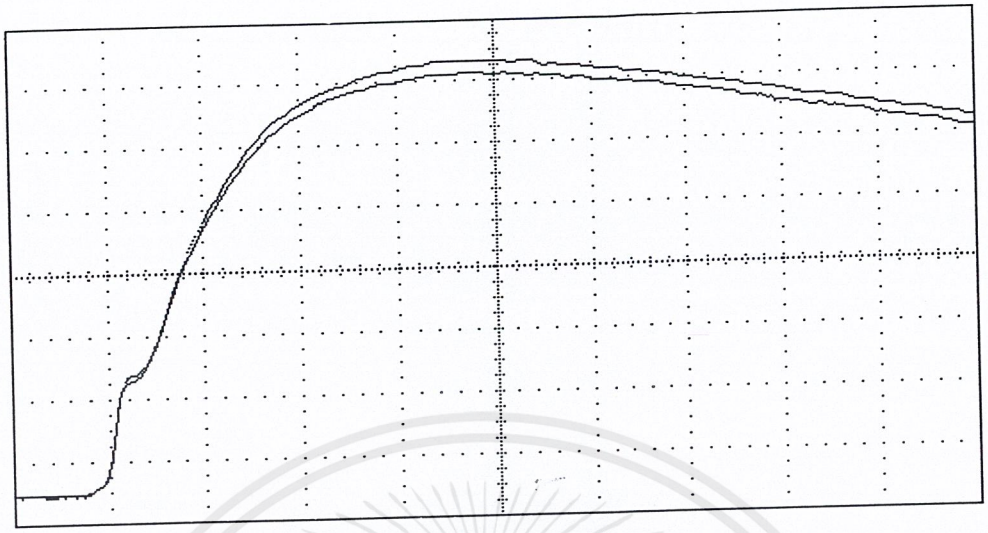


50 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 350.0 Volt	V(max) = 323.44 Volt
T_1 = 8.398 μsec	T_1 = 10.067 μsec
T_2 = 98.135 μsec	T_2 = 106.682 μsec

รูปที่ 5.33 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

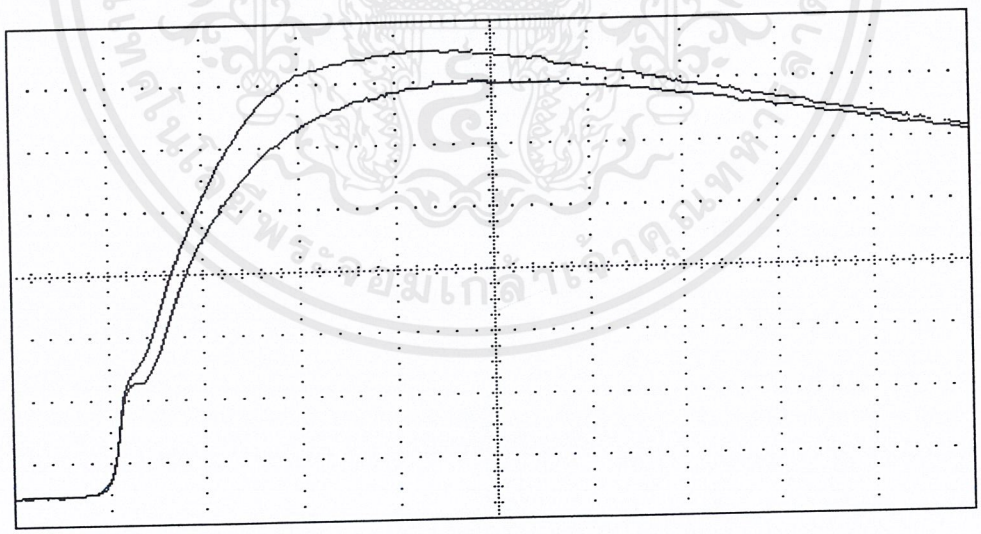
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



50 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 340.63 Volt	V(max) = 331.25 Volt
T_1 = 9.527 μsec	T_1 = 9.444 μsec

รูปที่ 5.34 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่5.32)



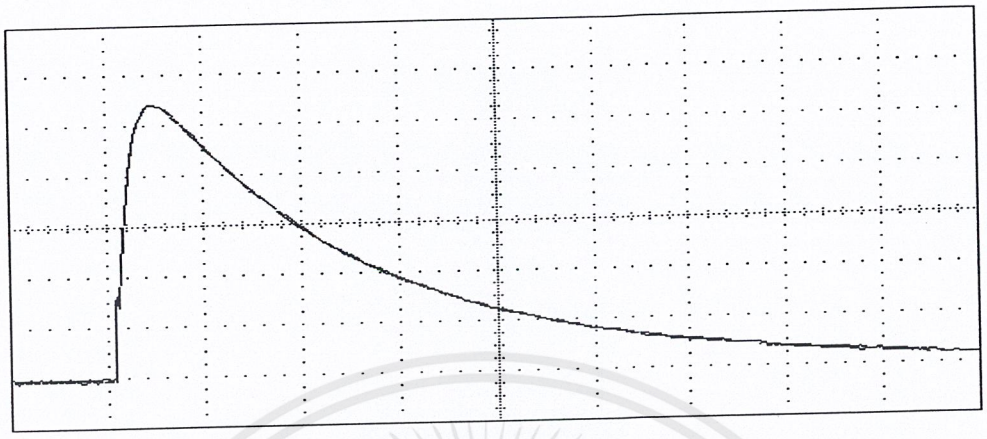
50 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 350.0 Volt	V(max) = 326.56 Volt
T_1 = 7.985 μsec	T_1 = 9.681 μsec

รูปที่ 5.35 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่5.33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

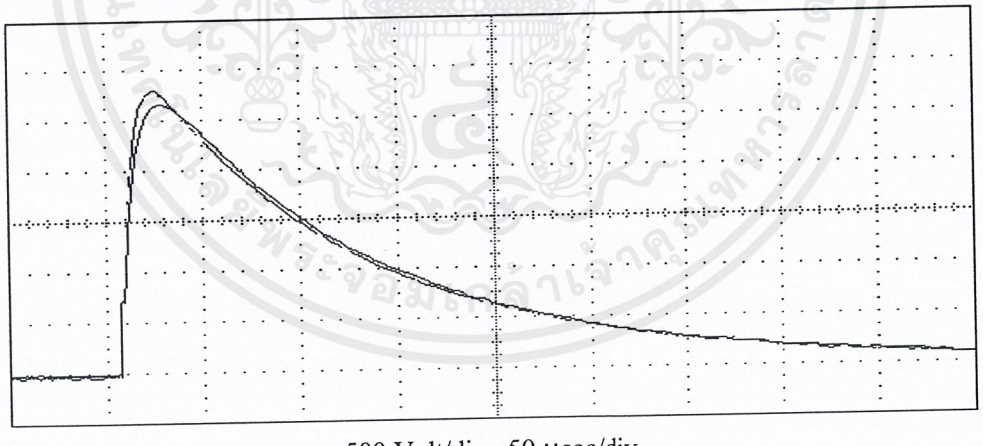
3. เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบที่ 4000 โวลต์



500 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 2703.13 Volt	V(max) = 2703.13 Volt
T_1 = 10.499 μsec	T_1 = 10.420 μsec
T_2 = 105.696 μsec	T_2 = 104.695 μsec

รูปที่ 5.36 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

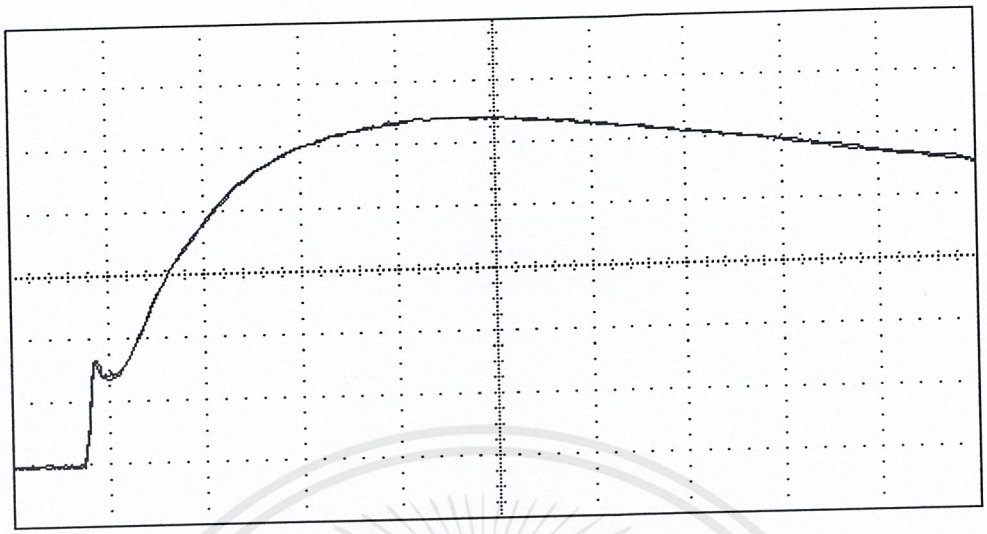


500 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 2796.88 Volt	V(max) = 2656.25 Volt
T_1 = 9.134 μsec	T_1 = 11.034 μsec
T_2 = 99.039 μsec	T_2 = 107.646 μsec

รูปที่ 5.37 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

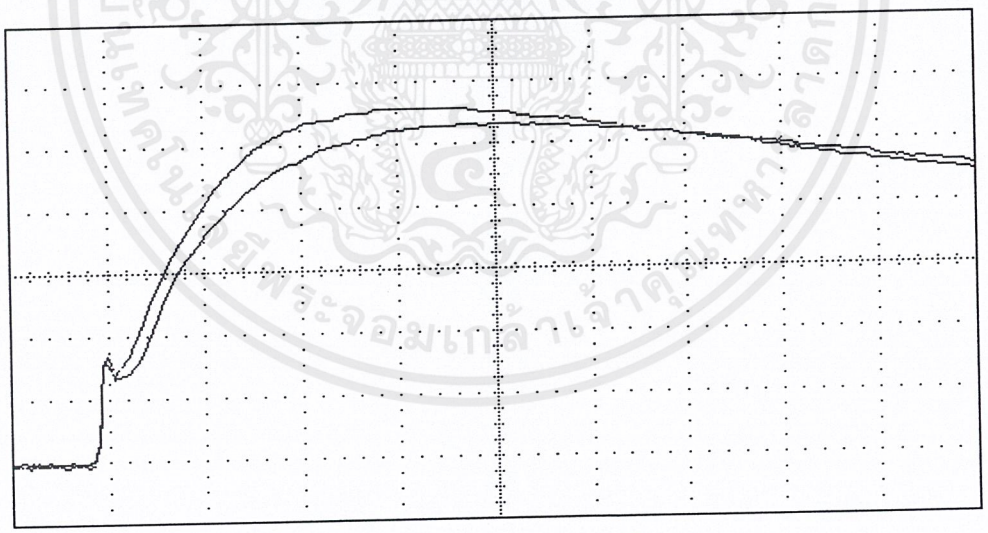
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



500 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 2703.13 Volt	V(max) = 2703.13 Volt
T_1 = 10.026 μsec	T_1 = 10.295 μsec

รูปที่ 5.38 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดทดสอบคือ เฟส A และ B ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่ 5.36)

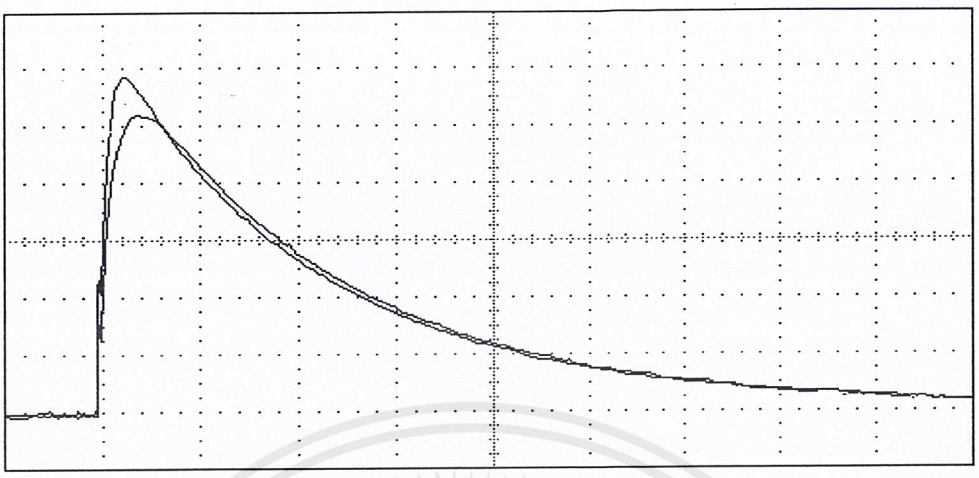


500 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 2781.25 Volt	V(max) = 2656.25 Volt
T_1 = 8.214 μsec	T_1 = 10.316 μsec

รูปที่ 5.39 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่ 5.37)

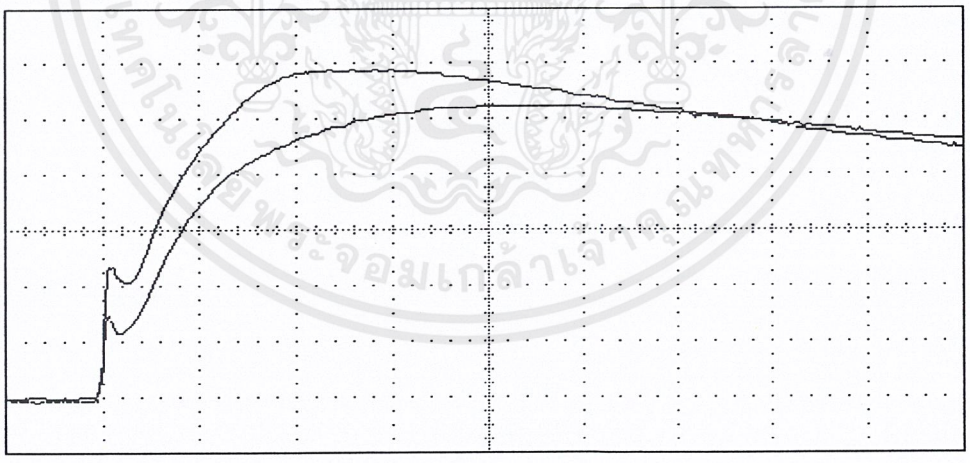
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



500 Volt/div , 50 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 2921.88 Volt	V(max) = 2593.75 Volt
T_1 = 7.905 μsec	T_1 = 11.240 μsec
T_2 = 87.210 μsec	T_2 = 110.723 μsec

รูปที่ 5.40 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

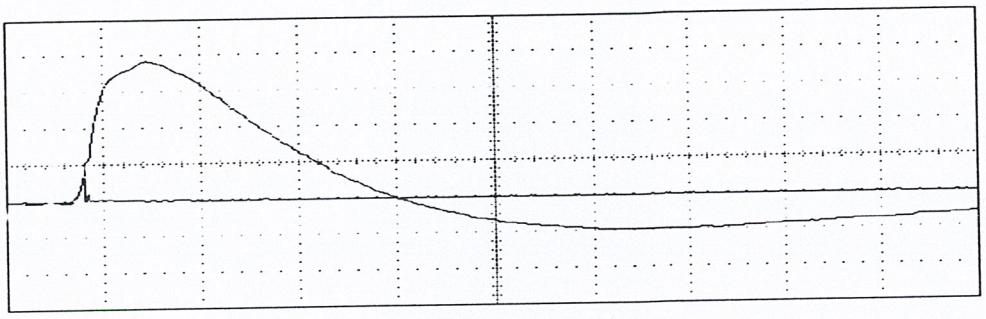


500 Volt/div , 5 μsec/div

CH1	CH2
V(max) = 2937.5 Volt	V(max) = 2609.38 Volt
T_1 = 7.182 μsec	T_1 = 10.701 μsec

รูปที่ 5.41 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น ส่วนขดลวดเฟสB สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่ (ขยายรูปที่ 5.40)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



500 Volt/div , 20 μsec/div

CH1 CH2

V(max) = 343.75 Volt V(max) = 1921.9 Volt

รูปที่ 5.42 รูปคลื่นแรงดันที่คร่อมความต้านทาน R_M ในกรณีที่ขดลวดเฟส A มีสภาพฉนวนที่อ่อนแอเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ส่วนขดลวดเฟส B สภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่

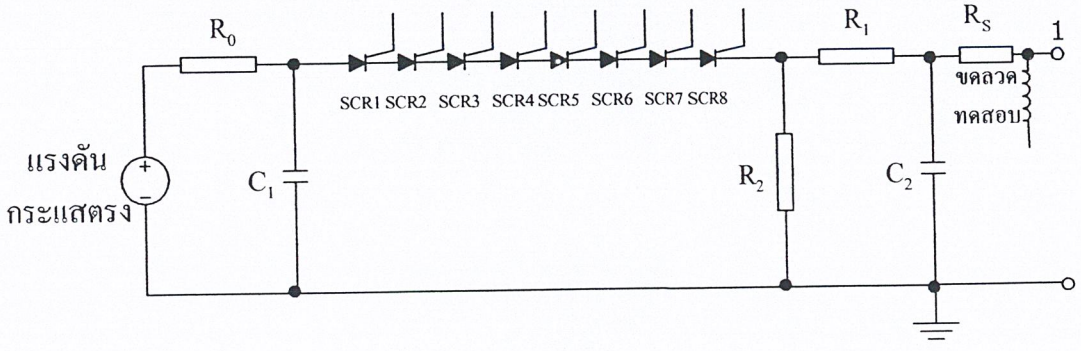
5.5 การทดลองที่ 5 การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์

ขั้นตอนการทดลอง

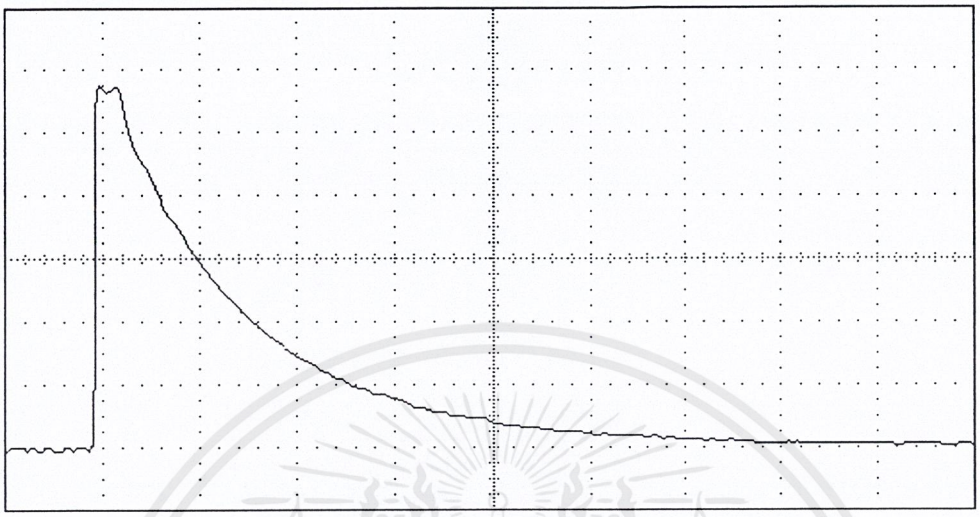
1. ปรับแรงดันอินพุทให้ได้แรงดันอิมพัลส์ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 141-1986 ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ $1.25\sqrt{2}(2V_L + 1000)$ โวลต์ มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีพิกัด V_L เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 3,111 โวลต์(ในขณะยังไม่ต่อขดลวดทดสอบ)
2. ต่อวงจรตามรูปที่ 5.43 โดยต่อต้นขดลวดทดสอบเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ส่วนปลายขดลวดปล่อยลอยไว้ ส่วนขดอื่นที่ไม่ได้ทดสอบปล่อยลอยไว้ และต่อเฟรมลงกราวด์แล้วสังเกตลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้โดยวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่จุด 1 เทียบกับกราวด์



รูปที่ 5.43 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง



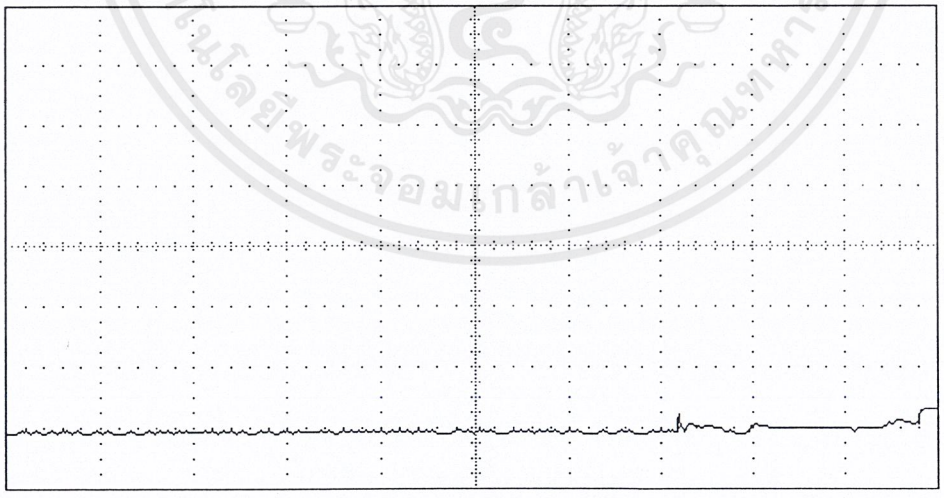
V(max) = 2875.0 Volt , 500 Volt/div , 50 µsec/div

T_1 = 1.192 µsec

T_2 = 54.2 µsec

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

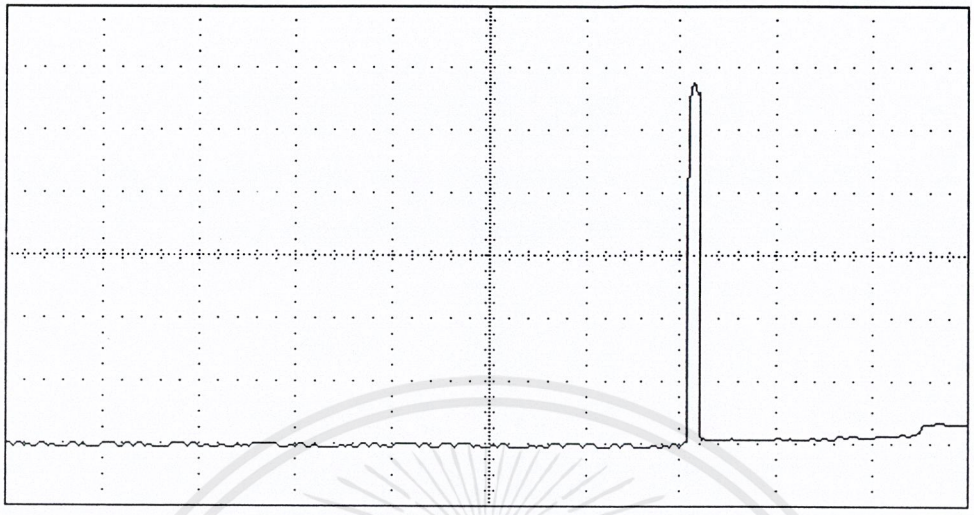
รูปที่ 5.44 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบยังมีสภาพฉนวนดีอยู่



V(max) = 156.25 Volt , 500 Volt/div , 50 µsec/div

รูปที่ 5.45 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ ตรงตำแหน่งใกล้กับต้นขดของขดลวดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

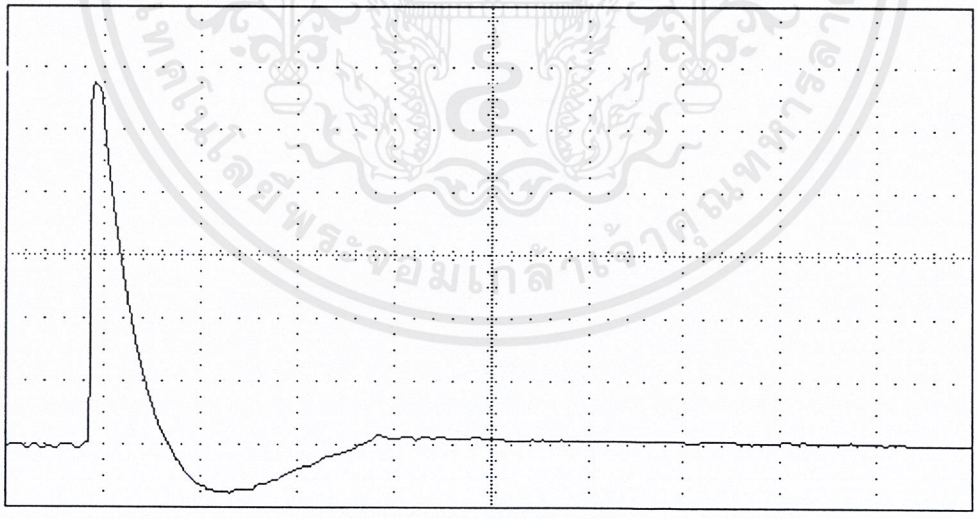


V(max) = 2875.0 Volt , 500 Volt/div , 50 μsec/div

T_1 = 1.320 μsec

T_2 = 6.417 μsec

รูปที่ 5.46 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ตรงตำแหน่งใกล้กับต้นขดของขดลวดทดสอบ



V(max) = 2875.0 Volt , 500 Volt/div , 50 μsec/div

T_1 = 1.147 μsec

T_2 = 16.416 μsec

รูปที่ 5.47 รูปคลื่นที่ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ตรงตำแหน่งที่ไกลออกไปจากต้นขดของขดลวดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

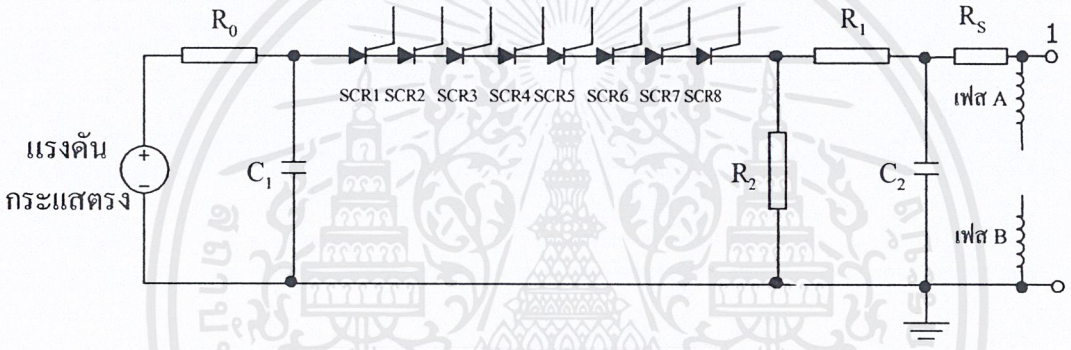
5.6 การทดลองที่ 6 การทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

จุดประสงค์การทดลอง

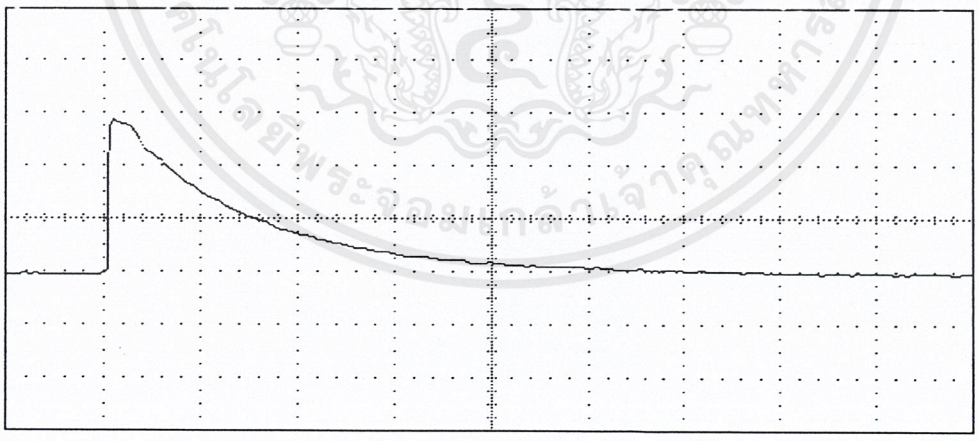
1. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างเฟสกับเฟสของมอเตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 5.48 โดยต่อต้นขดลวดทดสอบเฟส A เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ส่วนปลายของขดลวดปล่อยลอยไว้ และต่อขดลวดทดสอบเฟส B ลงกราวด์
2. ป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 1500 โวลต์(ในขณะไม่ต่อขดลวดทดสอบ) แล้วสังเกตลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้โดยวัดรูปคลื่นแรงดันที่จุด 1 เทียบกับกราวด์



รูปที่ 5.48 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 6



V(max) = 1437.5 Volt , 500 Volt/div , 50 μsec/div

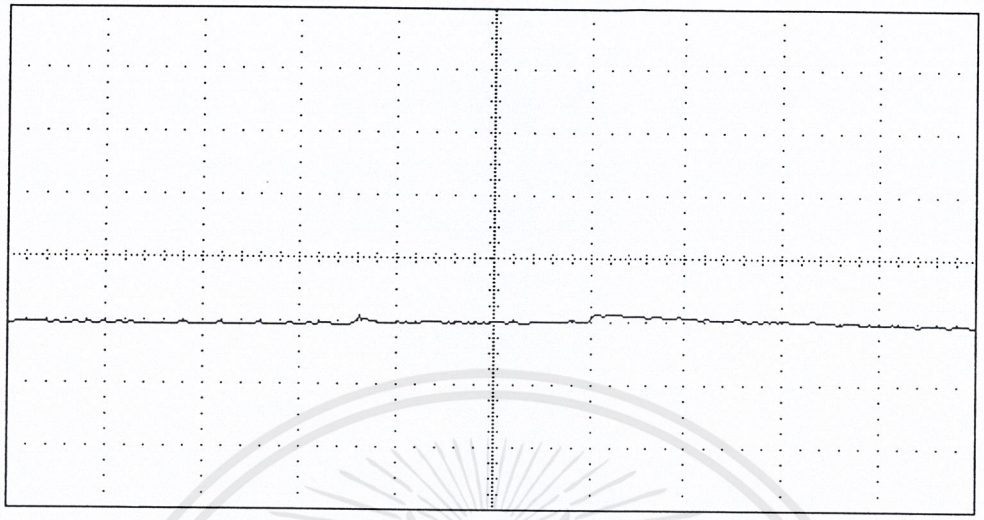
T_1 = 1.261 μsec

T_2 = 51.513 μsec

R_1 = 233 โอห์ม , R_2 = 368 โอห์ม

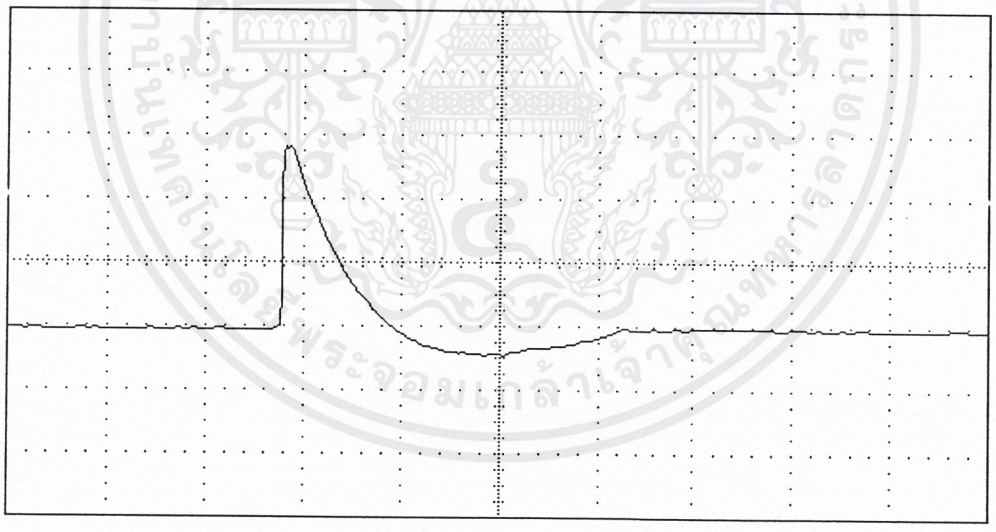
รูปที่ 5.49 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบยังมีสภาพฉนวนดีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V(max) = 62.5 Volt , 500 Volt/div , 50 µsec/div

รูปที่ 5.50 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเฟส A เกิดการลัดวงจรกับเฟส B ตรงตำแหน่งใกล้กับต้นขดของขดลวดทดสอบ



V(max) = 1406.25 Volt , 500 Volt/div , 50 µsec/div

T_1 = 1.270 µsec

T_2 = 22.638 µsec

รูปที่ 5.51 รูปคลื่นแรงดันโดยขดลวดทดสอบเฟส A เกิดการลัดวงจรกับเฟส B ตรงตำแหน่งที่ไกลออกไปจากต้นขดของขดลวดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ จะเห็นว่าเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากทฤษฎี รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีลักษณะตรงตามมาตรฐานแต่มีความคลาดเคลื่อนของเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นมาก เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ในวงจร จึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ของวงจรใหม่ โดยเปลี่ยนความต้านทาน R_1 จาก 273 โอห์ม เป็น 233 โอห์ม และความต้านทาน R_2 จาก 433 โอห์ม เป็น 368 โอห์ม ซึ่งทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มีความคลาดเคลื่อนของเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นน้อยมาก ถึงแม้ว่าจะปรับแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับต่างๆ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ก็ยังตรงตามมาตรฐาน

จากผลการทดสอบการลัดวงจรที่เอาท์พุทของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ขณะเปิดวงจรที่พิกัดสูงสุด (6,000 โวลต์) จะได้กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านความต้านทานจำกัดกระแสเท่ากับ 45.625 A (2281.25/50) ซึ่งเป็นค่าพิกัดกระแสสูงสุดที่วงจรสามารถจ่ายได้

จากผลการทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์เมื่อป้อนให้กับขดสเตเตอร์ของมอเตอร์ จะเห็นว่าเมื่อนำแรงดันอิมพัลส์มาทดสอบกับขดลวดทดสอบต้องทำการปรับพารามิเตอร์ในวงจรใหม่เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ยังตรงตามมาตรฐาน

จากผลการทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์ จะได้ว่าจากการเปรียบเทียบระหว่างขดลวด 2 ขดซึ่งสภาพฉนวนยังดีอยู่ เมื่อวัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานแมชชิ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกันหรือ ทับกันสนิท ส่วนในกรณีที่ขดใดขดหนึ่งเกิดลัดวงจรระหว่างรอบ ลักษณะรูปคลื่นที่วัดได้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแตกต่างกันและทับกันไม่สนิท โดยขดที่เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบจะมีค่ายอดแรงดันที่สูงกว่า แสดงว่ากระแสที่ไหลผ่านสูงกว่าด้วยอันเป็นผลมาจากการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดทำให้จำนวนรอบลดลง ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดลดลงด้วยตามสมการที่ 3.50 และ 3.51 และหากจำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มขึ้นก็จะทำให้กระแสไหลผ่านขดลวดมีค่ามากขึ้น และสามารถสังเกตความแตกต่างของรูปคลื่นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

จากผลการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์ จะเห็นว่าหากฉนวนขดลวดเทียบกราวด์ยังมีสภาพดีอยู่รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ยังมีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์อยู่ แต่ถ้าสภาพฉนวนเทียบกราวด์มีความอ่อนแอจนเกิดการเบรคดาวน์หรือถ้าขดลวดมีการลัดวงจรลงกราวด์ รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้จะไม่มีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์และอาจเกิดการออสซิเลชั่นขึ้น โดยรูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ขึ้นอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงกราวด์ ยิ่งตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงกราวด์ไกลกับต้นขดมากเท่าไร ก็จะทำให้เกิดการออสซิเลชั่นมากขึ้นด้วย

จากผลการทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส จะเห็นว่าหากฉนวนขดลวดระหว่างเฟสกับเฟสยังมีสภาพดีอยู่รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ยังมีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์อยู่ แต่ถ้าสภาพฉนวนขดลวดระหว่างเฟสกับเฟสมีความบกพร่อง รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้จะไม่มีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์และอาจเกิดการออสซิเลชั่นขึ้น

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า "การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ" สามารถตรวจหาการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดได้ โดยในการทดสอบต้องอาศัยขดลวดที่มีสภาพของฉนวนสมบูรณ์เป็นขดมาตรฐานของการทดสอบ แต่ในวิธีการทดสอบนี้ก็มีข้อจำกัดคือ จะตรวจหาความบกพร่องไม่พบในกรณีที่ขดลวดทดสอบมีสภาพฉนวนอ่อนแอ แต่ยังไม่ถึงขั้นที่เกิดการเบรคดาวน์ของฉนวน หรือในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบ แต่จำนวนรอบน้อยมากทำให้บางครั้งไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นของขดทดสอบกับขดมาตรฐานได้ และนอกจากนี้แรงดันเสิร์จยังสามารถนำไปใช้ตรวจสอบสภาพของฉนวนเทียบกับกราวด์ และสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟสได้ โดยทำการทดสอบกับขดลวดทดสอบเพียงขดเดียวก็สามารถระบุได้ว่าเกิดความบกพร่องของฉนวนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในโครงงาน

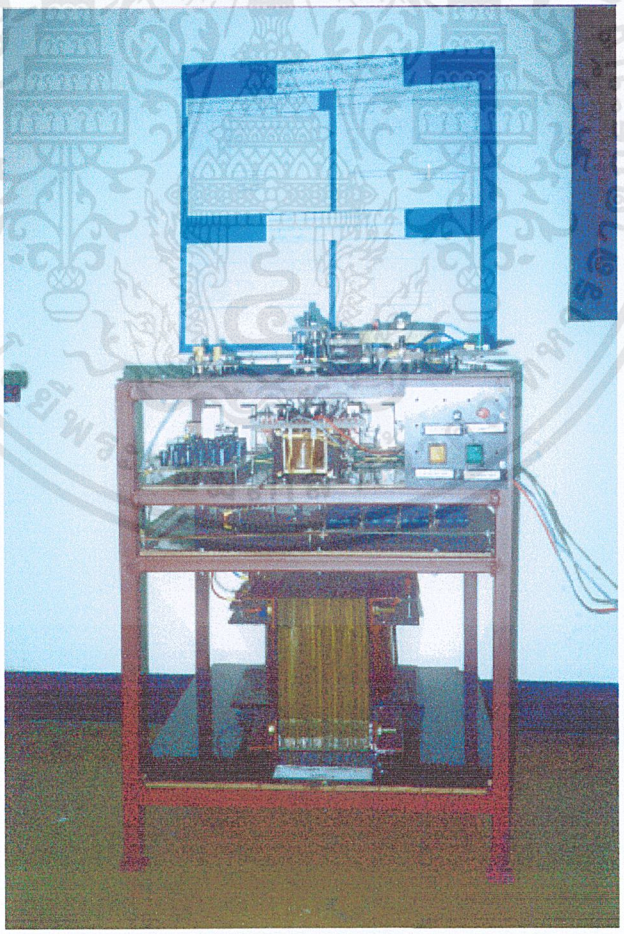
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μsec ของเครื่องกำเนิด
  มีค่าเท่ากับ 6 kV
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด V_o
  มีค่าเท่ากับแรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้เครื่องกำเนิด
  ซึ่งเท่ากับ 8 kV
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_1
  มีค่าเท่ากับ 156.7 nF
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
  คำนวณจาก C_1=156.7 nF V_o= 8 kV โวลต์

$$W = \frac{1}{2} C_1 V_o^2$$

  เมื่อ W=พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
  พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด = 5.014 จูล
- อัตราการดิสชาร์จเท่ากับ 60 ครั้งต่อนาที
- พิกัดกระแสลัดวงจรสูงสุด
  มีค่าเท่ากับ 45.625 A
- ความถี่ของสัญญาณแรงดันอิมพัลส์
  มีค่าเท่ากับ 10 kHz (1/100μs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงหม้อแปลง 220/6000 V 2200 VA



รูปแสดงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดพิกัด 6 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bulletin I2402 rev. A 07/00

International
IOR Rectifier

25RIA SERIES

MEDIUM POWER THYRISTORS **Stud Version**

25A

Features

- Improved glass passivation for high reliability and exceptional stability at high temperature
- High di/dt and dv/dt capabilities
- Standard package
- Low thermal resistance
- Metric threads version available
- Types up to 1600V V_{DRM}/ V_{RRM}

Typical Applications

- Medium power switching
- Phase control applications
- Can be supplied to meet stringent military, aerospace and other high-reliability requirements

Major Ratings and Characteristics

Parameters		25RIA		Units
		10 to 120	140 to 160	
$I_{T(AV)}$		25	25	A
	@T_C	85	85	°C
$I_{T(RMS)}$		40	40	A
I_{TSM}	@50Hz	420	398	A
	@60Hz	440	415	A
I^2t	@50Hz	867	795	A^2s
	@60Hz	790	725	A^2s
V_{DRM}/V_{RRM}		100 to 1200	1400 to 1600	V
t_q	typical	110		µs
T_J		- 65 to 125		°C

Case Style
TO-208AA (TO-48)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Voltage Ratings

Type number	Voltage Code	V_{DRM}/V_{RRM}, max. repetitive peak and off-state voltage (1) V	V_{RSM}, maximum non-repetitive peak voltage (2) V	I_{DRM}/I_{RRM} max. @ $T_J = T_J$ max. mA
25RIA	10	100	150	20
	20	200	300	10
	40	400	500	
	60	600	700	
	80	800	900	
	100	1000	1100	
	120	1200	1300	
	140	1400	1500	
	160	1600	1700	

(1) Units may be broken over non-repetitively in the off-state direction without damage, if dI/dt does not exceed 20A/µs
(2) For voltage pulses with $t_p \leq 5$ms

On-state Conduction

Parameter		25RIA 10 to 120	25RIA 140 to 160	Units	Conditions		
$I_{T(AV)}$	Max. average on-state current	25	25	A	180° sinusoidal conduction		
	@ Case temperature	85	85	°C			
$I_{T(RMS)}$	Max. RMS on-state current	40	40	A			
I_{TSM}	Max. peak, one-cycle non-repetitive surge current	420	398	A	t = 10ms	No voltage reapplied	Sinusoidal half wave, Initial $T_J = T_J$ max.
		440	415		t = 8.3ms		
		350	335		t = 10ms	100% V_{RRM} reapplied	
		370	350		t = 8.3ms		
I^2t	Maximum I^2t for fusing	867	795	A^2s	t = 10ms	No voltage reapplied	
		790	725		t = 8.3ms		
		615	560		t = 10ms	100% V_{RRM} reapplied	
		560	510		t = 8.3ms		
$I^2\sqrt{t}$	Maximum $I^2\sqrt{t}$ for fusing	8670	7950	$A^2\sqrt{s}$	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied, $T_J = T_J$ max.		
$V_{T(TO)1}$	Low level value of threshold voltage	0.99	0.99	V	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.		
$V_{T(TO)2}$	High level value of threshold voltage	1.40	1.15		$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.		
r_{t1}	Low level value of on-state slope resistance	10.1	11.73	mΩ	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.		
r_{t2}	High level value of on-state slope resistance	5.7	10.05		$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.		
V_{TM}	Max. on-state voltage	1.70	—	V	I_{pk} = 79 A, T_J = 25°C		
		—	1.80				
I_H	Maximum holding current	130		mA	T_J = 25°C. Anode supply 6V, resistive load,		
I_L	Latching current	200					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Switching

	Parameter		25RIA	Units	Conditions
di/dt	Max. rate of rise of turned-on current	$V_{DRM} \le 600V$	200	A/µs	$T_J = T_J$ max., V_{DM} = rated V_{DRM} Gate pulse = 20V, 15Ω, t_p = 6µs, t_r = 0.1µs max. I_{TM} = (2x rated di/dt) A
		$V_{DRM} \le 800V$	180		
		$V_{DRM} \le 1000V$	160		
		$V_{DRM} \le 1600V$	150		
t_{gt}	Typical turn-on time		0.9	µs	T_J = 25°C, at = rated V_{DRM}/V_{RRM}, T_J = 125°C
t_{rr}	Typical reverse recovery time		4		$T_J = T_J$ max., $I_{TM} = I_{T(AV)}$, t_p > 200µs, di/dt = -10A/µs
t_q	Typical turn-off time		110		$T_J = T_J$ max., $I_{TM} = I_{T(AV)}$, t_p > 200µs, V_R = 100V, di/dt = -10A/µs, dv/dt = 20V/µs linear to 67% V_{DRM}, gate bias 0V-100W

(*) t_q = 10µsup to 600V, t_q = 30µs up to 1600V available on special request.

Blocking

	Parameter	25RIA	Units	Conditions
dv/dt	Max. critical rate of rise of off-state voltage	100	V/µs	$T_J = T_J$ max. linear to 100% rated V_{DRM}
		300 (*)		$T_J = T_J$ max. linear to 67% rated V_{DRM}

(**) Available with: dv/dt = 1000V/µs, to complete code add S90 i.e. 25RIA160S90.

Triggering

	Parameter	25RIA	Units	Conditions	
P_{GM}	Maximum peak gate power	8.0	W	$T_J = T_J$ max.	
$P_{G(AV)}$	Maximum average gate power	2.0			
I_{GM}	Max. peak positive gate current	1.5	A	$T_J = T_J$ max.	
$-V_{GM}$	Maximum peak negative gate voltage	10	V	$T_J = T_J$ max.	
I_{GT}	DC gate current required to trigger	90	mA	T_J = - 65°C	Max. required gate trigger current/ voltage are the lowest value which will trigger all units 6V anode-to-cathode applied
		60		T_J = 25°C	
		35		T_J = 125°C	
V_{GT}	DC gate voltage required to trigger	3.0	V	T_J = - 65°C	
		2.0		T_J = 25°C	
		1.0	V	T_J = 125°C	
I_{GD}	DC gate current not to trigger	2.0	mA	$T_J = T_J$ max., V_{DRM} = rated value	
V_{GD}	DC gate voltage not to trigger	0.2	V	$T_J = T_J$ max. V_{DRM} = rated value	Max. gate current/ voltage not to trigger is the max. value which will not trigger any unit with rated V_{DRM} anode-to-cathode applied

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal and Mechanical Specification

	Parameter	25RIA		Units	Conditions
T_J	Max. operating temperature range	- 65 to 125		°C	
T_{stg}	Max. storage temperature range	- 65 to 125		°C	
R_{thJC}	Max. thermal resistance, junction to case	0.75		K/W	DC operation
R_{thCS}	Max. thermal resistance, case to heatsink	0.35		K/W	Mounting surface, smooth, flat and greased
T	Mounting torque	to nut	to device		
		20(27.5)	25	lbf-in	Lubricated threads
		0.23(0.32)	0.29	kgf.m	(Non-lubricated threads)
		2.3(3.1)	2.8	Nm	
wt	Approximate weight	14 (0.49)		g (oz)	
	Case style	TO-208AA (TO-48)			See Outline Table

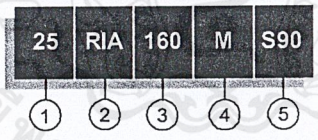
ΔR_{thJC} Conduction

(The following table shows the increment of thermal resistence R_{thJC} when devices operate at different conduction angles than DC)

Conduction angle	Sinusoidal conduction	Rectangular conduction	Units	Conditions
180°	0.17	0.13	K/W	$T_J = T_J$ max.
120°	0.21	0.22		
90°	0.27	0.30		
60°	0.40	0.42		
30°	0.69	0.70		

Ordering Information Table

Device Code



1 - Current code

2 - Essential part number

3 - Voltage code: Code x 10 = V_{RRM} (See Voltage Rating Table)

4 - None = Stud base TO-208AA (TO-48) 1/4" 28UNF-2A

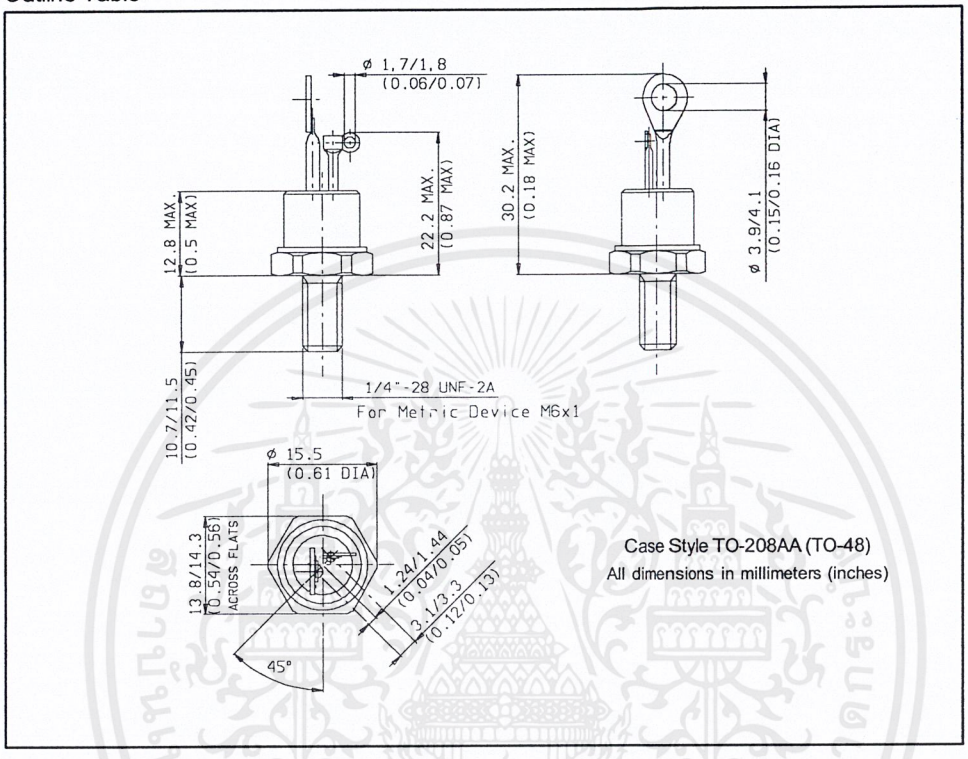
M = Stud base TO-208AA (TO-48) M6 X 1

5 - Critical dv/dt: None = 300V/µs (Standard value)

S90 = 1000V/µs (Special selection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Outline Table



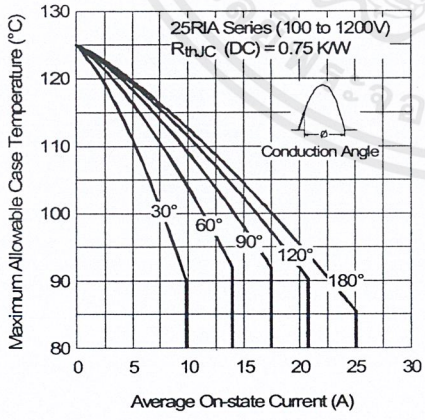


Fig. 1 - Current Ratings Characteristic

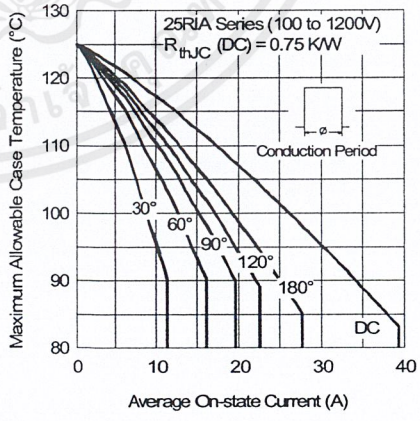


Fig. 2 - Current Ratings Characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

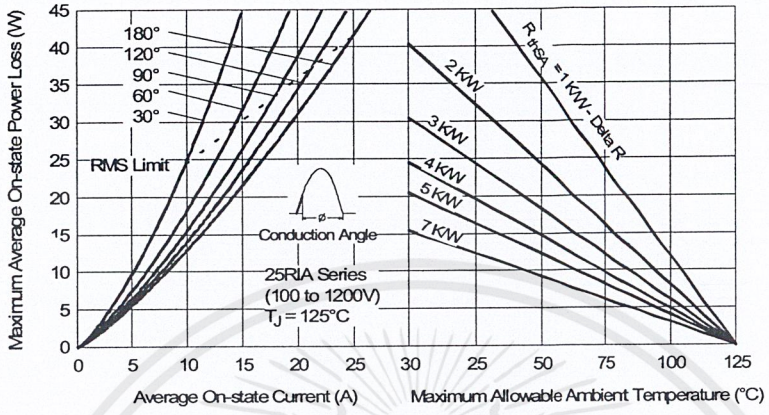


Fig. 3 - On-state Power Loss Characteristics

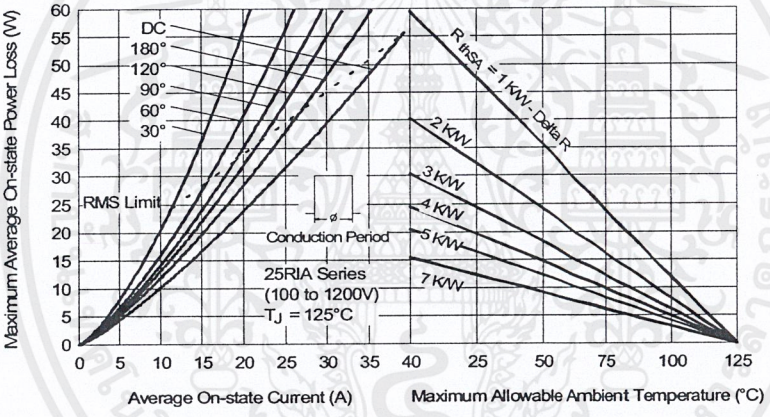


Fig. 4 - On-state Power Loss Characteristics

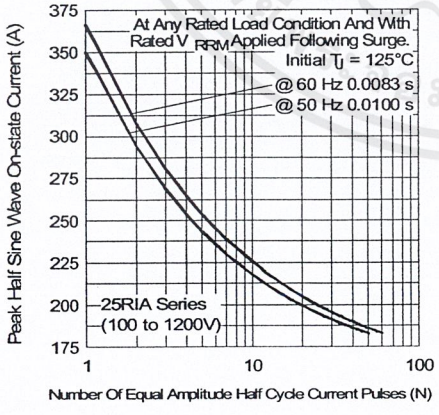


Fig. 5 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

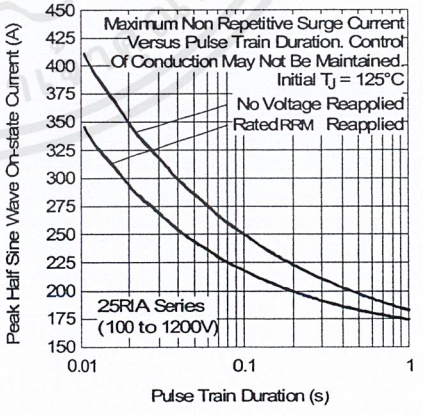


Fig. 6 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

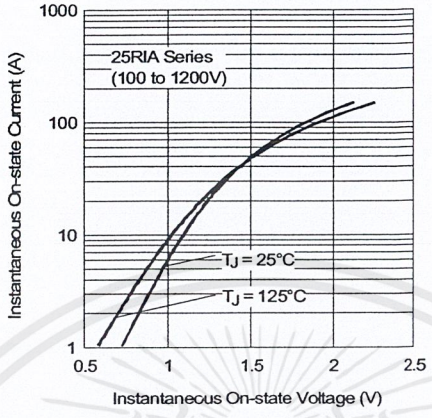


Fig. 7 - Forward Voltage Drop Characteristics

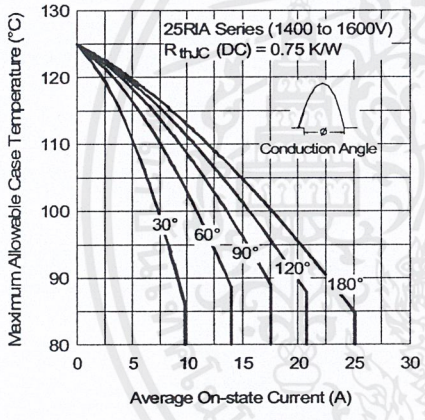


Fig. 8 - Current Ratings Characteristics

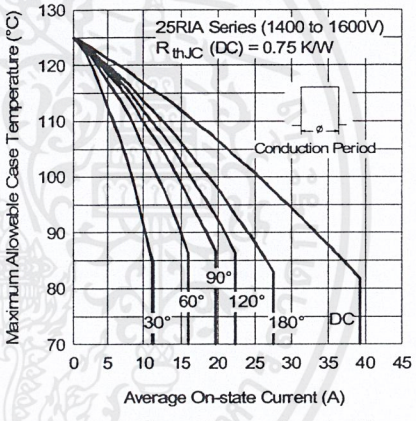


Fig. 9 - Current Ratings Characteristics

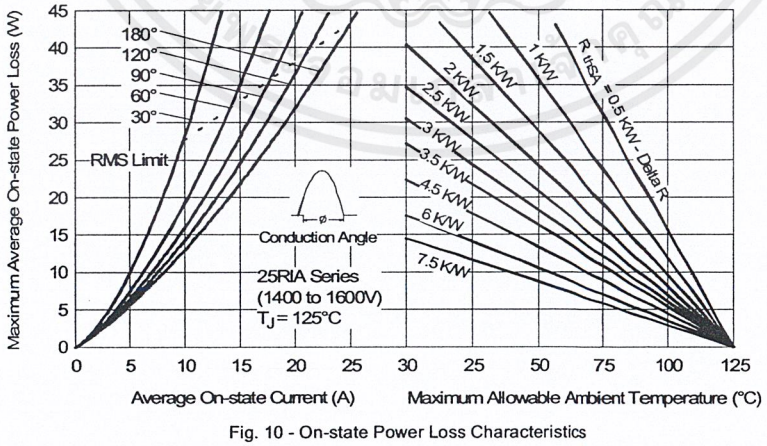


Fig. 10 - On-state Power Loss Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

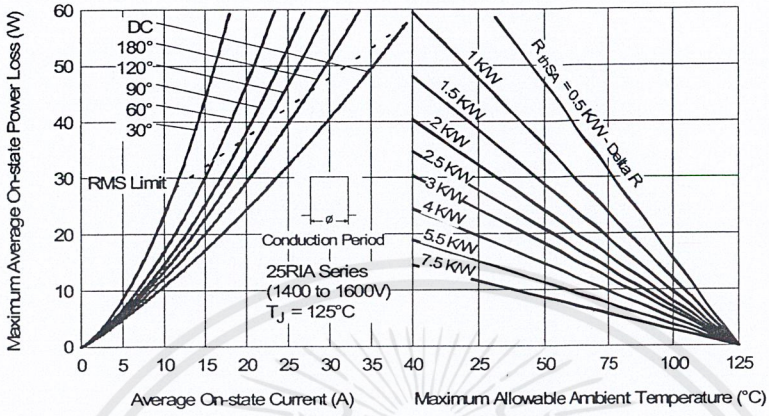


Fig. 11 - On-state Power Loss Characteristics

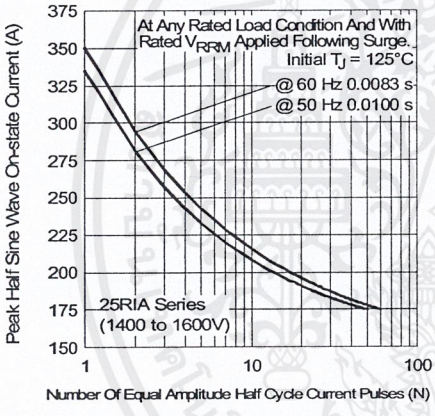


Fig. 12 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

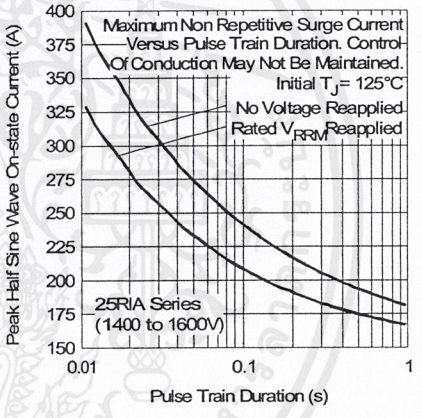


Fig. 13 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

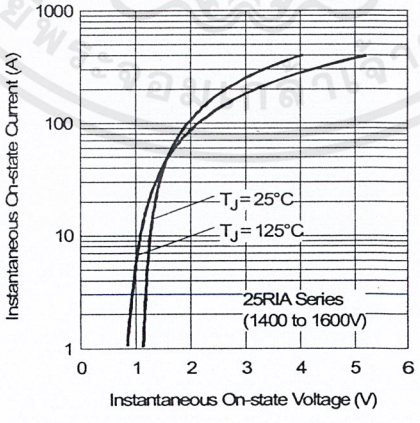


Fig. 14 - Forward Voltage Drop Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

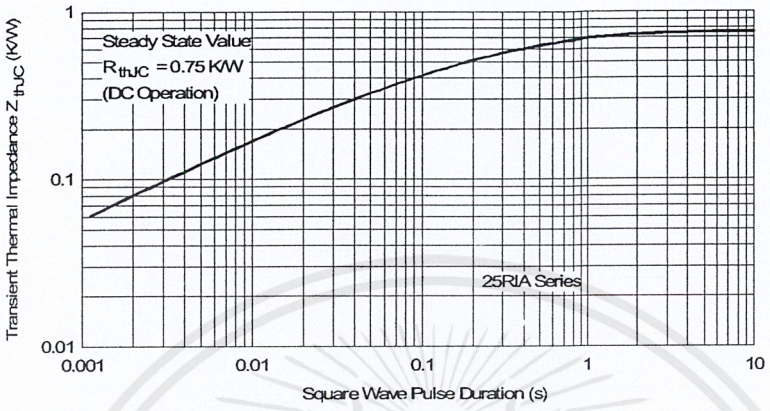


Fig. 15 - Thermal Impedance Z_{thJC} Characteristics

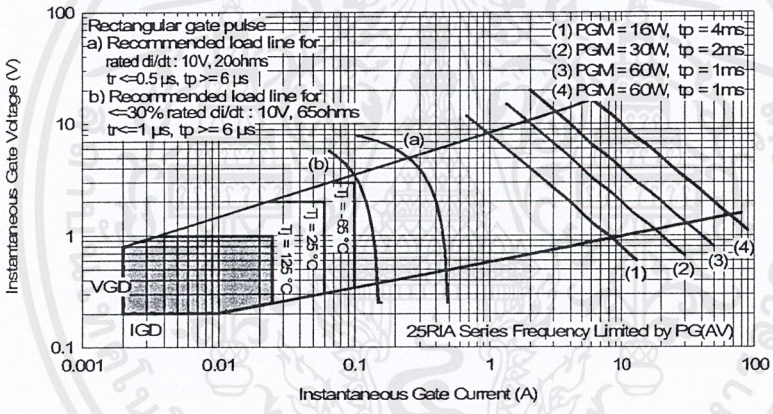


Fig. 16 - Gate Characteristics

International
IOR Rectifier

WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245 U.S.A. Tel: (310) 322 3331. Fax: (310) 322 3332.
EUROPEAN HEADQUARTERS: Hurst Green, Oxted, Surrey RH8 9BB, U.K. Tel: ++ 44 1883 732020. Fax: ++ 44 1883 733408.
IR CANADA: 15 Lincoln Court, Brampton, Markham, Ontario L6T3Z2. Tel: (905) 453 2200. Fax: (905) 475 8801.
IR GERMANY: Saalburgstrasse 157, 61350 Bad Homburg. Tel: ++ 49 6172 96590. Fax: ++ 49 6172 965933.
IR ITALY: Via Liguria 49, 10071 Borgaro, Torino. Tel: ++ 39 11 4510111. Fax: ++ 39 11 4510220.
IR FAR EAST: K&H Bldg., 2F, 30-4 Nishi-Ikebukuro 3-Chome, Toshima-Ku, Tokyo, Japan 171. Tel: 81 3 3983 0086.
IR SOUTHEAST ASIA: 1 Kim Seng Promenade, Great World City West Tower, 13-11, Singapore 237994. Tel: ++ 65 838 4630.
IR TAIWAN: 16 Fl. Suite D.207, Sec. 2, Tun Haw South Road, Taipei, 10673, Taiwan. Tel: 886 2 2377 9936.

http://www.irf.com *Fax-On-Demand: +44 1883 733420* *Data and specifications subject to change without notice.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานชิ้นนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ต้องขอขอบคุณ ผศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้เสียสละเวลาให้การชี้แนะ และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำโครงงานตลอดจนคำแนะนำในด้านต่างๆ ขอขอบคุณศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่

ท้ายสุดขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ และให้คำปรึกษาแก่ศิษย์มาโดยตลอดจนกระทั่งประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] พิชิต ลำยอง,"เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1",คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537

[2] ดร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ,"พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์",คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537

[3] วิชัย ศังขจันทรานนท์,"การควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง",สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537

[4] ดร.สำรวย สังข์สะอาด,"วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง",คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528

[5] ไชยะ แช่มช้อย,"การทดสอบฉนวนมอเตอร์เพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนาย", 36 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า ชุดที่ 4, หน้า 120-124, เอ็มแอนด์อี, 2542

[6] "คู่มือการพันหม้อแปลงและมอเตอร์", ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2532

[7] E.Kuffel and M.Abdullah,"High-Voltage Engineering",Pergamon Press, 1977

[8] V.Warren and G.stone,"Recent Developments in Diagnostic Testing of Stator Windings", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.14, No.5, pp.16-24, September/October, 1998

[9] ANSI/IEEE,"IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing", IEEE Std 4-1995 (R1978)

[10] ANSI/IEEE,"IEEE Guide for Testing Turn-to-turn Insulation on Form-Wound stator coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines", IEEE Std 522-1992 (R1977)

[11] ANSI/IEEE,"IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Rotating Machinery", IEEE Std 43-1974 (R1991)

[12] ANSI/IEEE,"IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage", IEEE Std 95-1977 (R1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้