

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
Insulation Test for Induction Machine



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถำบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เลขหม.....
เลขทะเบียน.....45975
วัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Insulation Test for Induction Machine

โดย

นาย กัมปนาท สิงห์ทอง
นาย ปณต นิติธรรมกุล
นาย เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์
นาย วีระชัย กองโกย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.พิชิต ล้ายอง

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

- 
- 1.นาย กัมปนาทสิงห์ทอง
 - 2.นาย ปณต นิติธรรมกุล
 - 3.นาย เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์
 - 4.นาย วีระชัย กองโกย


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.พิชิต ถ่ายอง)

การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นายกำปนาท	สิงห์ทอง
นายปณต	นิติธรรมกุล
นายเปี่ยมภูมิ	สฤกพฤกษ์
นายวีระชัย	กองโกย
ผศ.พิชิต	ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

การทดสอบฉนวนเป็นสิ่งสำคัญในทางอุตสาหกรรม เพราะการเสื่อมสภาพของฉนวนเป็นสาเหตุของความล้มเหลวในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โครงการนี้จึงเสนอวิธีการทดสอบฉนวนตามมาตรฐานการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่างๆ คือ การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบการดูดกลืนไดอิเล็กตริก การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ การทดสอบโดยการเปรียบเทียบผลของเสร็จ และได้ทำการศึกษาการทดสอบขดลวดโดยวงจรกำเนิดความถี่สูง ซึ่งวิธีการต่างๆ จะสามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ระหว่างเฟสกับเฟส และสภาพฉนวนเทียบกราวด์ เพื่อเป็นการทดสอบสภาพขดลวดสเตเตอร์ในกรณีต่างๆ

Insulation Test for Induction Machine

Kampanart	Singthong
Panot	Nitithamkul
Piampoom	Sarikprueck
Weerachai	Kongkoay
Asst.Prof.Pichit Lumyong	Advisor

2001

ABSTRACT

Insulation Test is an important thing in the industrial system. Because the failure of insulation is the major cause of machine failure. In this project present the detection of insulation for cover standard testing consist of Insulation Resistance test, Polarization Index test, High Direct Voltage test, High alternative Voltage test, Surge Comparison test and study testing the coil with high frequency circuit which can detect each type of faults such as turn-to-turn, phase-to-phase, and coil- to ground insulation.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การทดสอบสภาพนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า	3
2.1 การทดสอบความต้านทานนวน	3
2.2 การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก	4
2.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง	4
2.3.1 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่	5
2.3.2 การทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรง	6
2.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ	7
2.5 การทดสอบเปรียบเทียบผลของเลิร์จ	7
2.6 การทดสอบโดยวงจรความถี่สูง	10
บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	11
3.1 การนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า	11
3.2 กลไกเบรคดาวน์ของนวนแข็ง	13
3.2.1 เบรคดาวน์แบบแท้จริง	14
3.2.2 เบรคดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า	15
3.2.3 เบรคดาวน์แบบสตีมเมอร์	16
3.2.4 เบรคดาวน์แบบเทอร์มัล	17
3.2.5 เบรคดาวน์เนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า	19
3.2.6 เบรคดาวน์เนื่องจากดีสชาร์จภายใน	20
3.2.7 เบรคดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว	23
บทที่ 4 ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	24
4.1 ทฤษฎีแรงดันอิมพัลส์	24
4.1.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	24

4.1.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	27
4.1.3 การคำนวณวงจร	29
4.2 ทฤษฎีการสร้างสัญญาณพัลส์เดียว(โมโนสเตเบิล)	34
4.3 ไทริสเตอร์	37
4.3.1 การจุดชนวนไทริสเตอร์	39
4.3.2 การปิดกระแสของไทริสเตอร์	43
4.3.3 การนำไทริสเตอร์มาต่ออนุกรม	44
4.4 วงจรออสซิลเลเตอร์	47
4.4.1 หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์	47
4.4.2 หน้าที่สำคัญของวงจรออสซิลเลเตอร์	48
4.4.3 ลักษณะของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ดี	49
4.5 Complementary push-pull Class AB power amplifier	50
4.5.1 ทฤษฎีและหลักการ	50
บทที่ 5 การออกแบบการทดลอง	53
5.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	53
5.1.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง	53
5.1.2 วงจรโมโนสเตเบิล	53
5.1.3 วงจรทริกเกอร์ฮิสเตอร์	54
5.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	55
5.2 วงจรทดสอบแรงดันกระแสตรง	57
5.3 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ	58
5.4 วงจรสร้างความถี่	59
5.5 วงจรออสซิลเลเตอร์และวงจรพวง-พุด	59
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	61
6.1 การทดสอบค่าความต้านทานจนวน	
และการทดสอบการดูดกลืนไดอิเล็กตริก	61
6.2 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง	62

6.3การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ	63
6.4การทดสอบแรงดันอิมพัลส์	64
6.5การศึกษาการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด(Short Turn) โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์	79

บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

92



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการพล็อตกราฟการทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรงคงที่ โดยที่ เฟส C สภาพฉนวนมีการอ่อนแอ ส่วนเฟส A และ เฟส B สภาพฉนวนยังดีอยู่	6
รูปที่ 2.2 แสดงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ	9
รูปที่ 3.1 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน	14
รูปที่ 3.2 ลักษณะดีสชาร์จเบรคดาวน์แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโตรดปลายแหลมกับ ระบาย(Cooper)	17
รูปที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ	19
รูปที่ 3.4 ฉนวนมีโพรงและวงจรสมมูลย์	21
รูปที่ 3.5 ดีสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ	22
รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	25
รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด	26
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	27
รูปที่ 4.4 แสดงวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์โกสวิตช์	29
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอกโปเนนเชียลสองเทอม	31
รูปที่ 4.6 วงจรโมนอสเตเบิลที่สร้างจากไอซี 555	34
รูปที่ 4.7 วงจรภายในไอซี 555	36
รูปที่ 4.8(ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์	37
(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์	37
รูปที่ 4.9 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก	38
(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	38
รูปที่ 4.10 เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกต	41
รูปที่ 4.11 (ก) วงจรและการเปลี่ยนแรงดันของไทรสเตอร์ขณะเปิดกระแสไทรสเตอร์ กับภาระ	41
(ข) การเปลี่ยนแปลงกระแส	42
รูปที่ 4.12 (ก) เอสซีอาร์สองตัวต่ออนุกรม	46

	หน้า
(ข) แรงดันแบ่งตกคร่อมเอสซีอาร์สองตัวมีไม่เท่ากัน	46
รูปที่ 4.13 การใช้ความต้านทานเข้าต่อขนานเพื่อแบ่งเฉลี่ยแรงดันกันให้ไปตกคร่อม เอสซีอาร์แต่ละตัว	46
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะรูปคลื่นชนิดต่างๆที่สามารถผลิตขึ้นมาจากวงจรออสซิลเล เตอร์	47
รูปที่ 4.15 ไดอะแกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์	48
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนและรูปคลื่นในอุดมคติ	49
รูปที่ 4.17 (ก) วงจร dual supply complementary push- pull class B amplifier	51
(ข) รูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรในรูป 4.17(ก)	51
รูปที่ 4.18 สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในวงจร class B power amplifier	52
รูปที่ 4.19 วงจร dual supply complementary class AB power amplifier	52
รูปที่ 5.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง	53
รูปที่ 5.2 วงจรโมโนสเตเบิล	54
รูปที่ 5.3 วงจรทริกเอสซีอาร์	54
รูปที่ 5.4 วงจรป้องกันเอสซีอาร์	55
รูปที่ 5.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	55
รูปที่ 5.6 วงจรทดสอบกระแสตรง	57
รูปที่ 5.7 วงจรควบคุมการทดสอบกระแสตรง	58
รูปที่ 5.8 วงจรการทดสอบกระแสสลับ	58
รูปที่ 5.9 วงจรสร้างความถี่	59
รูปที่ 5.10 วงจรออสซิลเลเตอร์และวงจรพวง-พุด	60
รูปที่ 6.1 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1	64
รูปที่ 6.2 สัญญาณทริกเอสซีอาร์	65
รูปที่ 6.3 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 1500 V	65
รูปที่ 6.4 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 3000 V	66
รูปที่ 6.5 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 4000 V	66
รูปที่ 6.6 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 5000 V	67
รูปที่ 6.7 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 6000 V	67
รูปที่ 6.8 วงจรการทดลองที่ 2	68

	หน้า
รูปที่ 6.9 แรงดันอิมพัลส์วัดคร่อมเฟส A และค่าความต้านทาน R_M และแรงดันคร่อมเฟส B และค่าความต้านทาน R_M ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังคงอยู่	69
รูปที่ 6.10 แรงดันอิมพัลส์วัดคร่อมเฟส A และค่าความต้านทาน R_M และแรงดันคร่อมเฟส C และค่าความต้านทาน R_M ซึ่งเฟส A สภาพขดลวดยังคงอยู่ ส่วนเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด	69
รูปที่ 6.11 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 3	70
รูปที่ 6.12 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบขณะที่ขดลวดยังคงอยู่	70
รูปที่ 6.13 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคความถี่ลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ	71
รูปที่ 6.14 แสดงภาพขยายช่วงหัวคลื่นขณะขดลวดทดสอบเบรคความถี่ลงกราวด์	71
รูปที่ 6.15 แสดงภาพขยายช่วงหัวคลื่นขณะขดลวดทดสอบเบรคความถี่ลงกราวด์	72
รูปที่ 6.16 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคความถี่ลงกราวด์ ไกลจากต้นขดทดสอบ	72
รูปที่ 6.17 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ	73
รูปที่ 6.18 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ไกลกับต้นขดทดสอบ	73
รูปที่ 6.19 ขยายกราฟรูปที่ 6.18	74
รูปที่ 6.20 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 4	74
รูปที่ 6.21 แรงดันอิมพัลส์คร่อมระหว่างเฟส A และเฟส B ซึ่งขดลวดทดสอบยังมีสภาพดีอยู่	75
รูปที่ 6.22 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคความถี่ระหว่างเฟสของขดลวดใกล้กับต้นขดทดสอบ	75
รูปที่ 6.23 ขยายกราฟรูปที่ ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการเบรคความถี่ระหว่างเฟสของขดลวดบริเวณหัวคลื่น	76
รูปที่ 6.24 ขยายกราฟรูปที่ ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการเบรคความถี่ระหว่างเฟสของขดลวดบริเวณหางคลื่น	76
รูปที่ 6.25 ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการเบรคความถี่ระหว่างเฟสของขดลวดไกลจากต้นขดทดสอบ	77
รูปที่ 6.26 ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดใกล้กับต้นขดทดสอบ	77
รูปที่ 6.27 ขยายกราฟรูปที่ 6.26	78

รูปที่ 6.28 ขดลวดเฟส A และเฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดไกลจาก ต้นขดทดสอบ	78
รูปที่ 6.29 พันขดลวดจำนวน 10 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	80
รูปที่ 6.30 พันขดลวดจำนวน 10 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	80
รูปที่ 6.31 พันขดลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	81
รูปที่ 6.32 พันขดลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	81
รูปที่ 6.33 พันขดลวดจำนวน 30 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	82
รูปที่ 6.34 พันขดลวดจำนวน 30 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	82
รูปที่ 6.35 พันขดลวดจำนวน 40 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	83
รูปที่ 6.36 พันขดลวดจำนวน 40 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	83
รูปที่ 6.37 พันขดลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	84
รูปที่ 6.38 พันขดลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	84
รูปที่ 6.39 พันขดลวดจำนวน 70 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	85
รูปที่ 6.40 พันขดลวดจำนวน 70 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	85
รูปที่ 6.41 พันขดลวดจำนวน 80 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	86
รูปที่ 6.42 พันขดลวดจำนวน 80 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	86
รูปที่ 6.43 พันขดลวดจำนวน 90 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	87
รูปที่ 6.44 พันขดลวดจำนวน 90 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	87
รูปที่ 6.45 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	88
รูปที่ 6.46 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	88
รูปที่ 6.47 พันขดลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	89
รูปที่ 6.48 พันขดลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	89
รูปที่ 6.49 พันขดลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	90
รูปที่ 6.50 พันขดลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	90
รูปที่ 6.51 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short	91
รูปที่ 6.52 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short	91

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าต่ำสุดของค่าโพลาริเซชันอินเดกซ์	4
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าความคงทนทางไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันอย่างรวดเร็ว ของสารฉนวน	11
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงชั้นของฉนวนกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน	12
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงสารเอนาเมลกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานปกติ	13
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแฟกเตอร์ B_1 และ B_0 สำหรับวงจรพื้นฐาน ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	31
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าแฟกเตอร์ต่างๆ ของแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	32
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	34
ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงค่าผลการทดสอบ ค่าความต้านทานขดลวดที่ 1 นาที และที่ 10 นาที	61
ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงผลการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง	62
ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงผลการทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ	63

บทที่ 1

บทนำ

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

การเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อน คือสาเหตุหลักของการเสียหายการเป็นฉนวนก่อนเวลาอันสมควรของฉนวนมอเตอร์ เราอาจจะกล่าวได้ว่าการให้มอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียสจะทำให้อายุของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือถ้าอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของอายุที่ควรจะเป็น และถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ 20 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของอายุที่ควรจะเป็น ความชื้นจากบรรยากาศเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียหายอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนมอเตอร์เสียหายคือการรบกวนจากระบบไฟฟ้า เช่น ถ้าเกิดแรงดันลี้รจจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อระบบหรือจากฟ้าผ่า แรงดันลี้รจค่าสูง ๆ จะทำให้เกิดความเสียหายตรงจุดอ่อนของฉนวนโดยทำให้เสียหายโดยฉับพลัน

การเสียหายของฉนวนของชุดขดลวดมอเตอร์จะไม่แสดงผลของมันออกมา เมื่อมอเตอร์ถูกเก็บไว้ไม่ได้ใช้งาน เราจึงไม่สามารถจะรู้ได้เลยว่าเกิดความผิดปกติของสภาพของฉนวนของชุดมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้มอเตอร์ที่ต้องทำงานในจุดที่สำคัญจึงต้องมีการทดสอบสภาพฉนวนเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวน

การประเมินคุณภาพของฉนวนด้วยโปรแกรมการทดสอบในลักษณะนี้ฉนวนที่มีคุณภาพลดลงจะถูกตรวจพบและได้รับการแก้ไขล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเสียหายในระหว่างใช้งาน และสำหรับโรงงานที่ผลิตมอเตอร์หลังจากกระบวนการผลิตแล้วก็ต้องมีการทดสอบฉนวนของมอเตอร์เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

การทดสอบสภาพฉนวนของมอเตอร์สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การทดสอบความต้านทานฉนวน(Insulation Resistance Test) การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก(Polarization Index Test)การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง(High Direct Voltage Test) การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ(High Alternating Voltage Test) การทดสอบทั้ง 4 วิธี ที่กล่าวมาเหมาะกับการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ ไม่สามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ระหว่างขดลวดต่อขดลวด และระหว่างเฟสกับเฟสได้ จึงต้องใช้การทดสอบด้วย

แรงดันเสิร์จ(Surge Voltage Test)ซึ่งสามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดกับฉนวนของมอเตอร์ดังกล่าวได้

จากสาเหตุที่กล่าวมาทั้งหมด โครงการนี้จึงได้ศึกษาวิธีการทดสอบ ด้วยวิธีการทดสอบทั้งหมดข้างต้น และการทดสอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ ที่มีผลต่อความผิดปกติของสภาพฉนวนมอเตอร์ในลักษณะต่าง ๆ เพื่อการศึกษานี้จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะตามมาตรฐาน IEEE และวงจรออสซิลเลเตอร์ ขึ้นเพื่อทดสอบกับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



การทดสอบสภาพฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การทดสอบสภาพฉนวนสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

2.1 การทดสอบความต้านทานฉนวน(Insulation Resistance Test)

การทดสอบความต้านทานฉนวนหรือที่เราเรียกว่า การวัดค่าเมกะโอห์มของฉนวนเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการใช้กับการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนาย วิธีนี้มีการประยุกต์ใช้มาตั้งแต่เมื่อปี ค.ศ.1912 ถึงแม้ว่าจะปฏิบัติได้ง่ายและรวดเร็วแต่ผลการทดสอบจะใช้บ่งถึงสภาพของฉนวนเมื่อเทียบกับกราวด์เท่านั้นเช่น ฉนวนของชุดขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเสียสภาพทำให้ชุดขดลวดต่อลงกราวด์ ซึ่งการวัดค่าเมกะโอห์มของฉนวนทำได้โดยการป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าไปที่ฉนวนแล้ววัดกระแสที่ไหล โดยมีตัวความต้านทานตัวหนึ่งที่เรารู้ค่ามาต่ออนุกรมกับฉนวน แล้วใช้หลักการแบ่งแรงดันก็สามารถรู้ค่าความต้านทานของฉนวนได้ ซึ่งเครื่องมือใช้วัดความต้านทานฉนวนในลักษณะนี้เรียกว่า เมกะโอห์มมิเตอร์

การทดสอบด้วยวิธีนี้จะต่อสายกราวด์ของเมกะโอห์มมิเตอร์เข้ากับกรอบ(flame)ของมอเตอร์ แล้วป้อนแรงดันกระแสตรงขนาด 500 โวลต์ 1000 โวลต์หรือ 2500 โวลต์(ทั้งนี้ขึ้นกับเมกะโอห์มที่ใช้) เข้าที่ชุดขดลวดของมอเตอร์ ถ้าเป็นชุดขดลวดที่ดีไม่ชำรุดและแห้งจะอ่านค่าความต้านทานได้หลายร้อยหรือหลายพันเมกะโอห์ม แต่ถ้าฉนวนอยู่ในสภาพเสื่อม มีความชื้นหรือเปื้อนจารบี หรือสารเคมี จะอ่านค่าความต้านทานเพียงไม่กี่เมกะโอห์มเท่านั้น ถ้าหากได้ต่ำกว่า 1 เมกะโอห์ม จะเป็นสัญญาณชี้ให้เห็นว่าถึงจุดอันตรายที่ฉนวน จะเสียสภาพเมื่อไรก็ได้ มาตรฐาน IEEE Std 43-1974(R 1991) ได้กำหนดเกณฑ์ต่ำสุดของค่าที่ยอมรับได้ไว้ว่าต้องอ่านค่าเมกะโอห์มได้ไม่ต่ำกว่า 1 เมกะโอห์มบวกกับอีก 1 เมกะโอห์มต่อ 1000 โวลต์ ของพิกัดแรงดันของมอเตอร์ ด้วยเกณฑ์นี้มอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 460 โวลต์ (เป็นมอเตอร์ที่ใช้งานในอเมริกา) จะต้องอ่านค่าความต้านทานได้ไม่ต่ำกว่า 1.46 เมกะโอห์ม เป็นต้น

เพื่อความถูกต้องของการวัด จะต้องปรับค่าที่อ่านได้ไปที่สถานะอุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียสด้วย โดยใช้ตารางปรับค่าที่ให้มาพร้อมกับเมกะโอห์มมิเตอร์

2.2 การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก(Polarization Index Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบขยายผลของการทดสอบความต้านทานฉนวนโดยการอ่านค่าความต้านทานฉนวนสองค่าคือ ค่าที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที นับตั้งแต่เริ่มป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้ว นำมาหาค่าดัชนีความต้านทานฉนวน(Polarization Index : PI) โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่าความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที ต่อความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานานๆ โมเลกุลของฉนวนจะมีสภาพเป็นขั้วบวกขั้วลบเกิดขึ้น มีผลทำให้อ่านค่าความต้านทานฉนวนได้สูงขึ้น ค่าดัชนีความต้านทานฉนวนเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความสะอาดและแห้งของฉนวนได้ ถ้าดัชนีความต้านทานของฉนวนสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด แสดงว่าฉนวนสะอาดและแห้ง แต่ถ้าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดแสดงว่าฉนวนเปียกและสกปรกตามมาตรฐาน IEEE Std 43-1974(R 1991) ได้กำหนดค่าต่ำสุดของดัชนีความต้านทานฉนวน ของฉนวนชั้น(Class) ต่างๆ ไว้ดังตารางที่ 2.1 การทดสอบความต้านทานและการทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก จะทำการทดสอบแรงดันสูง เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนไม่เปียกหรือสกปรกจนเกินไป

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าต่ำสุดของค่าโพลาไรเซชันอินเด็กซ์

ชั้นของฉนวน	ค่าต่ำสุดของโพลาไรเซชันอินเด็กซ์ (PI)
A	1.5
B	2.0
F	2.0
H	2.0

2.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง(High Direct Voltage Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวนเทียบกับกราวด์ เป็นการทดสอบเพื่อหาจุดอ่อนของฉนวนที่อาจจะตรวจหาไม่พบ จากการทดสอบด้วยแรงดันที่ค่อนข้างจะต่ำจากเมกะโอห์มมิเตอร์ ตัวอย่างเช่นมอเตอร์ฟัดด์แรงดัน 460 โวลต์ เมื่อถูกทดสอบด้วยเมกะโอห์มมิเตอร์

ทำให้แรงดัน 500 โวลต์ อาจจะทำอันตรายต่อความต้านทานฉนวนได้สูงถึง 1,000 เมกะโอห์ม ซึ่งสูงกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับในกรณีนี้อาจมีจุดอ่อนที่ฉนวนของมอเตอร์ซึ่งจะเสียสภาวะฉนวนล้มเหลวเมื่อได้รับแรงดัน 800 โวลต์ ซึ่งแรงดันระดับนี้มักจะพบได้เสมอในระบบไฟฟ้ากำลังของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งอาจจะเกิดมาจากการเหนี่ยวนำชั่วคราวจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอนหรือจากฟ้าผ่า

การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.3.1.การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่(Proof test)

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งจะมีผลทำให้ฉนวนที่อ่อนแอเกิดการเบรคความชื้นซึ่งสามารถแบ่งการทดสอบได้เป็น 2 วิธีคือ

2.3.1.1การทดสอบเพื่อการรับรอง(Acceptance Proof test)

เป็นการทดสอบในขดลวดที่มีการฉนวนใหม่ก่อนที่จะมีการนำไปใช้ อาจทำการทดสอบที่โรงงานผลิตหรือภายหลังการติดตั้งเพื่อใช้งานหรืออาจจะทำทั้งคู่ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R 1991) จะอยู่ที่ 1.7 เท่าของแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับเพื่อการรับรองซึ่งแรงดันที่ใช้คือ $2E+1$ kV(E คือค่าแรงดันเฟสต่อเฟสที่พิกัดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น kV)

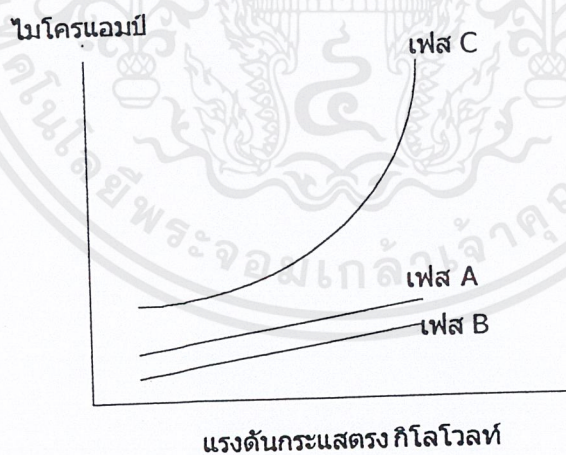
1.1 การทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา(Maintenance Proof test)

เป็นการทดสอบไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ ภายหลังการใช้เพื่อการทดสอบว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อหรือไม่โดยปกติจะใช้ที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเพื่อการยอมรับซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R 1991) คือ 1.7 เท่าของแรงดันที่ใช้ทดสอบเพื่อการบำรุงรักษาในแรงดันสูงกระแสสลับ(ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับประมาณ 1.2-1.5 เท่าของแรงดันพิกัดเฟสต่อเฟส)

การทดสอบทั้ง 2 วิธีจะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 1 นาทีต่อ 1 เฟส โดยผลการทดสอบเราสามารถดูได้จากความผิดปกติที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จาก การคายประจุอย่างรวดเร็ว(Sharp Capacitive Discharge)หรือความผิดปกติจากกระแสรั่วไหล(Leakage Current)หรือความผิดปกติจากการไหม้หรือความร้อนถ้าหากไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้นก็ถือว่าฉนวนนั้นใช้ได้

2.3.2. การทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรง(Control Over Voltage Test)

การทดลองนี้นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา โดยสามารถที่จะคาดการณ์ระดับแรงดันเบรคความได้ โดยฉนวนที่อ่อนแอยังไม่เกิดการเบรคความขึ้น ตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977(R1991) กำหนดให้ป้อนแรงดันเริ่มต้นประมาณ $1/3$ เท่าของแรงดันทดสอบสูงสุด(โดยแรงดันทดสอบสูงสุดเท่ากับระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่) โดยคงที่แรงดันไว้ 10 นาที เพื่อหาค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ซึ่งค่าดัชนีความต้านทานฉนวน ต้องมากกว่าค่าที่กำหนดตามที่กล่าวมาแล้วถึงจะทำการทดสอบต่อ แต่ถ้าน้อยกว่าค่าที่กำหนดจะต้องหยุดทำการทดสอบหลังจากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไม่เกิน 3% ของแรงดันทดสอบสูงสุดในทุกๆ 1 นาทีซึ่งในการปรับแรงดันควรเพิ่มภายใน 10 วินาที เมื่อครบ 1 นาที ก็ทำการบันทึกค่าแรงดันและกระแสไว้ จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกราฟ ถ้ากราฟมีลักษณะของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไม่เป็นเส้นตรง ก็ให้หยุดทำการทดสอบทันที ซึ่งแสดงว่าฉนวนอ่อนแอ และจะเสียสภาพฉนวนได้หากทำการทดสอบต่อไป แต่ถ้าลักษณะกราฟเป็นก็ให้ทำการเพิ่มแรงดันไปจนถึงแรงดันทดสอบสูงสุด ถ้าลักษณะกราฟยังเป็นเส้นตรงอยู่แสดงว่าฉนวนของขดลวดยังมีสภาพดีอยู่ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบแต่ละเฟสจะใช้ประมาณ 30-45 นาที



รูปที่ 2.1 แสดงการพล็อตกราฟการทดสอบโดยการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรงคงที่ โดยที่เฟส C สภาพฉนวนมีการอ่อนแอ ส่วนเฟส A และ เฟส B สภาพฉนวนยังดีอยู่

2.4 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ(High Alternating Voltage Test)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบฉนวนด้วยการป้อนแรงดันสูงกระแสสลับก็เพื่อทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์ การทดสอบจะเป็นการจำลองการเกิดแรงดันเกินขึ้นชั่วระยะเวลาหนึ่งแล้วหายไป เช่น การเปิดปิดวงจรขนาดใหญ่ของเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ การโอนย้ายโหลด เป็นต้น ระยะเวลาที่เกิดแรงดันเกินจะนานกว่าการเกิดจากแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครวินาที

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

2.5 การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ(Surge Comparison Test)

การทดสอบทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาเหมาะกับการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ไม่สามารถตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด และระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งความบกพร่องเหล่านี้ จะนำไปสู่ความบกพร่องเทียบกับกราวด์ การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จจะช่วยให้ค้นพบความบกพร่องดังกล่าวก่อนที่จะลุกลามรุนแรงต่อไป

ถึงแม้ว่าการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จจะได้มีการประยุกต์ใช้งานในโรงงานผลิตมอเตอร์ และโรงงานซ่อมมอเตอร์เพื่อประกันคุณภาพของมอเตอร์มาเป็นเวลานานแล้ว แต่เทคนิคดังกล่าวได้มีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการบำรุงรักษาแบบทำนายในช่วงไม่กี่ปีมานี้เอง

การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จอาศัยหลักการที่ว่ามอเตอร์ที่มีขดลวดขดลวดที่ไม่บกพร่องขดลวดทั้ง 3 เฟส(มอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ซิงโครนัส)จะมีลักษณะเหมือนกันทุกอย่าง การทดสอบจะทำการทดสอบเปรียบเทียบขดลวดทีละคู่เปรียบเทียบกับกัน เช่น เฟสA กับ เฟสB , เฟสB กับ เฟสC

และเฟส A กับ C การทดสอบจะทำโดยป้อนด้วยพัลส์แรงดันตรงที่มีลักษณะเหมือนกันเข้าไปที่ขดลวด ทั้ง 2 พร้อมกัน สิ่งที่จะใช้เป็นตัววัดว่ามีความผิดปกติได้คือ รูปคลื่นของคลื่นที่เกิดการสั่น(100 kHz Ringing Wave ตามมาตรฐาน IEEE C2.41-1991) และผลรวมของรูปคลื่นแรงดันและกระแสซึ่งแรงดัน มีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นคือ 1.2/50 ไมโครวินาที ส่วนกระแสจะมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลัง คลื่นคือ 8/20 ไมโครวินาที การทดสอบจะใช้แบบรูปคลื่นรวมแรงดันเปิดวงจร(Open circuit Voltage) พัลส์ที่เกิดการสั่น(Ringing Pulse)จากชุดของขดลวดทั้ง 2 จะถูกตรวจจับด้วยออสซิลโลสโคป ชนิด 2 เส้น(Dual trace) ถ้าชุดของขดลวดมีลักษณะเหมือนกันพัลส์ทั้งสองจะเหมือนกัน และซ้อนกันสนิทปรากฏให้เห็นจอภาพเพียงเส้นเดียว ในกรณีที่มีการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด(turn-to-turn short circuit)คลื่นสะท้อน จะไม่เหมือนกันจึงไม่ซ้อนกัน และสภาพความเสียหายในลักษณะอื่นๆเช่น กรณีที่เกิดจากชุดขดลวดชุดหนึ่งต่อลงกราวด์ หรือชุดขดลวดขาด ลัดวงจรระหว่างเฟส ก็สามารถตรวจสอบได้โดยเปรียบเทียบรูปคลื่นที่วัดได้กับรูปคลื่นตัวอย่างที่ผู้ผลิตเครื่องทดสอบเปรียบเทียบเสร็จให้ไว้ การทดสอบวิธีนี้ทำได้ง่ายโดยไม่ต้องถอดสายไฟที่ต่อมอเตอร์ออกเพียงแต่ปลด(OFF)เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือถอดฟิวส์ที่ใช้ป้องกันมอเตอร์ออกก็สามารถทดสอบได้เลย

จากสาเหตุและวิธีการทดสอบที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นว่าการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสร็จ สามารถระบุความบกพร่องต่างๆของฉนวนในมอเตอร์ได้ โดยเฉพาะการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดซึ่งการทดสอบลักษณะอื่นๆ ไม่สามารถตรวจสอบผลได้ โครงการนี้จึงได้นำการทดสอบเปรียบเทียบผลของเสร็จมาประยุกต์ เพื่อทำการศึกษาการทดสอบสภาพฉนวนของลวดสเตเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานซึ่งมีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นเป็น 1.2/50 ไมโครวินาทีในการทดสอบ

การทดสอบสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโครงการนี้ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะคือ

- 1.การทดสอบสภาพฉนวนเทียบกับกราวด์
- 2.การทดสอบการลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบ
- 3.การทดสอบการลัดวงจรระหว่างเฟสกับเฟส

ตามมาตรฐาน IEEE Std 522-1992(R1977) ได้กำหนดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบคร่อมขดลวดโดยสัมพันธ์กับช่วงเวลาหน้าคลื่นไว้ตามรูปที่ 2.2

โครงการนี้ได้ใช้แรงดันอิมพัลส์ทดสอบที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่น 1.2 ไมโครวินาที จาก รูปที่ 2.2

จะได้ระดับแรงดันอิมพัลส์ทดสอบเท่ากับ $5\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)V_L$ โวลต์

ขนาดพิกัดสูงสุดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้มาจากมาตรฐาน IEEE C62.41.1991

ซึ่งแบ่งโซนต่าง ๆ ออกเป็น 3 โซนคือ

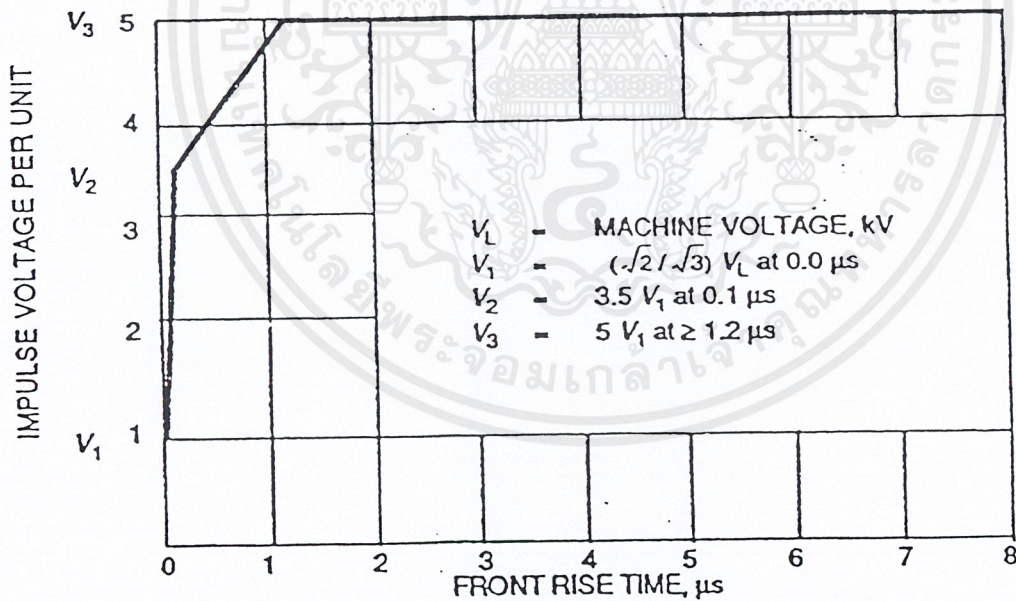
โซน A คือ โซนของตัวรับ วงจรย่อยขนาดยาว ได้รับจาก โซน B ซึ่งยาวกว่า 10 เมตร และได้รับจากโซน C ซึ่งยาวกว่า 20 เมตร

โซน B คือ โซนของสายป้อน บัสจ่ายโรงงาน วงจรย่อยขนาดต้นอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าในตึกสูง

โซน C คือ โซนภายนอก แหล่งจ่ายป้อนเข้า ระบบสายดิน ระบบขนาดใหญ่ ซึ่งพิกัดแรงดันที่ใช้ทดสอบ ณ โซนต่าง ๆ คือ

A มีพิกัด 6 kV B มีพิกัด 6 kV C มีพิกัด 10 kV หรือมากกว่า

ในโครงการนี้จะทำการทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้ในโซน A



รูปที่ 2.2 แสดงค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ

2.6 การทดสอบโดยวงจรกำเนิดความถี่สูง(Oscillator)

การทดสอบโดยวิธีนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาการลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบ (Short turn) ของขดลวดภายในสเตเตอร์ (Stator) โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับแกนเหล็กที่เตรียมไว้ แล้วนำไปคร่อมร่องสลอต (Slot) ของสเตเตอร์ (Stator) เปรียบเทียบกราฟระหว่างขดลวดปกติและขดลวดที่ลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบ จะเห็นว่ากราฟที่ได้ของขดลวดที่ลัดวงจรสูงกว่า เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดจะทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดในเฟสนั้นมากกว่าปกติ



บทที่ 3

ทฤษฎีเกี่ยวกับฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

3.1 การฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ระบบการฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งซึ่งจะนำไปซึ่งผลของความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งมักจะถูกละเลยทำให้เกิดความเสียหายง่ายขณะจับถือหรือบำรุงรักษา การเสื่อมของฉนวนยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมด้วย วัสดุที่จะนำมาทำฉนวนต้องพิจารณาด้วย

1.คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก(Dielectric Properties)

2.เสถียรภาพของอุณหภูมิ(Thermal Stability)

3.คุณลักษณะทางกล(Mechanical Characteristics)

4.กระบวนการทำงาน(Processability)

5.ความต้านทานทางเคมี(Chemical Resistance)

6.ความเข้ากันได้(Compatibility)

ซึ่งข้อมูลของฉนวนเพื่อช่วยในการเข้าใจหลักการฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

1.คุณลักษณะฉนวน หมายถึง ค่าความคงทนทางไฟฟ้า(Electric Strength)ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการทนได้ของความเครียดทางไฟฟ้าและค่าความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength)ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของคุณสมบัติฉนวน จะเป็นพื้นฐานที่ควรรู้ในการทดสอบฉนวนซึ่งค่าแรงดันที่ป้อนอย่างรวดเร็วในวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความคงทนทางไฟฟ้าเมื่อป้อนแรงดันอย่างรวดเร็วของสารฉนวน

วัสดุสารฉนวน	ค่าความคงทนทางไฟฟ้า กิโลโวลต์/มิลลิเมตร
ฟิล์ม	
โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม	80-120
โพลีไธไมด์ฟิล์ม	120-160
พลาสติก	
โพลิสไตรีน	20-28
โพลีเอทิลีน	16-18
โพลีไวนิล คลอไรด์	18-20
โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน	20-28

2.อายุของฉนวน (Insulation Life) ฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีอายุการใช้งานถึง 20 ปีกับการบำรุงรักษาเล็กน้อย ในการทำงานของฉนวนจะมีผลกระทบที่ทำให้ฉนวนมีอายุน้อย

3.ชั้นของฉนวน(Insulation Class)เป็นค่าที่ใช้บอกอุณหภูมิที่ยอมรับได้ในการใช้งานจะแบ่งตามลำดับอักษร Y,A,B,E,F,H ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงชั้นของฉนวนกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน

Class	อุณหภูมิ (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

4.วัสดุที่ใช้เคลือบฉนวนตัวนำ ซึ่งตัวนำที่ถูกหุ้มโดยปกติหมายถึงทองแดงซึ่งจะถูกเคลือบด้วยสายของฉนวนอาจเป็นแบบคลุมกลมหรือเหลี่ยม ทั้งด้านเดียวหรือ 2 ด้าน สิ่งที่ยากที่สุดในการฉนวนคือสารเอนาเมล(enamel) ในอดีตเราใช้โอเรโอเรซินีเอสในการฉนวนแต่มีปัญหาที่ความอ่อนแอทางกลและสามารถลอกได้ง่าย ในการประยุกต์ใช้งานซึ่งมีปัญหาทางด้านการทำงานทางกลหรือมีปัญหาทางการลอกเราสามารถเพิ่มการฉนวนโดย ฝ้าย,เรยอน,ไหม,ใยหินหรือไฟเบอร์แก้ว ประมาณ 30 ปี การพัฒนาประสบความสำเร็จโดยการรวม โพลีไวนิล ฟอर्मัล(Polyvinlyl formal PF) กับ โพลีไวนิล อะเซเตท (Polyvinyl acetal PVA) ที่มีความเหนียวใช้เป็นสารเอนาเมลซึ่งมีความยืดหยุ่นและการป้องกันการลอกได้ดี การเคลือบตัวนำโดยระบบเรซินนี้เป็นระบบที่ใช้อยู่ในระบบ ; PVA-PF เป็นการเคลือบที่ใช้สำหรับฉนวน ชั้น E การพัฒนาด้านนี้สามารถจัดปัญหาทางกลโดยการเคลือบด้วยเส้นใยได้ โดยค่าความหนาของฉนวนแต่ละค่าจะทำให้ค่าความคงทนทางไฟฟ้าแตกต่างกัน และการเคลือบด้วยสารโพลีเอสเตอร์เทอร์โมอิด(Polyesterimide)อย่างเดี่ยวหรือการเคลือบด้วยสาร โพลีเอสเตอร์เทอร์โมอิดและสารโพลีเอไมด์(Polyamide)บาง ๆ รวมกันจะเป็นการเคลือบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าใน ชั้น F ซึ่งสารที่นำมาเคลือบฉนวนมอเตอร์ได้แสดงดังตารางที่

3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงสารเอนาเมทกับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานปกติ

สารเอนาเมท	ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน (° C)
โอเร โอเรซินีเยส(Oleoresinous)	105
โพลิไวนิล อะซิเทท(Polyvinyl acetal)	105
โพลิไวนิลฟอร์มัล(Polvinyl formal)	105
โพลิเอไมด์(Polyamide nylon)	105
โพลิยูเรทีน(Polyurethane)	130
โพลิเอสเตอร์(Polyester)	155
อีพอกซี(Epoxy)	155
โพลิไฮดราติน(Polyhydantoin)	155
โพลิเอสเตอร์ไรม์(Polyesterimide)	180
โพลิเอสเตอร์ไรม์/เอไมด์(เคลือบ 2 ชั้น)	180
ซิลิโคน(Silicone)	180+
โพลิไอไมด์(Polyimide)	200
โพลิเตตระฟลูออโรเอทีริน(Polytetrafluoroethylene)	200

3.2 กลไกเบรคดาวน์ของฉนวนแข็ง

ผลของการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว คือ ฉนวนก๊าซสามารถกลับเข้าสู่สภาพการฉนวนได้ดังเดิมภายในเวลาอันรวดเร็วหลังจากการเบรคดาวน์นั้นได้ผ่านพ้นไปแล้ว ฉนวนเหลวก็ทำนองเดียวกันฉนวนสามารถกลับคืนสภาพการฉนวนได้แต่อาจช้ากว่าก๊าซ แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรคดาวน์แล้วฉนวนจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรใช้งานอีกไม่ได้

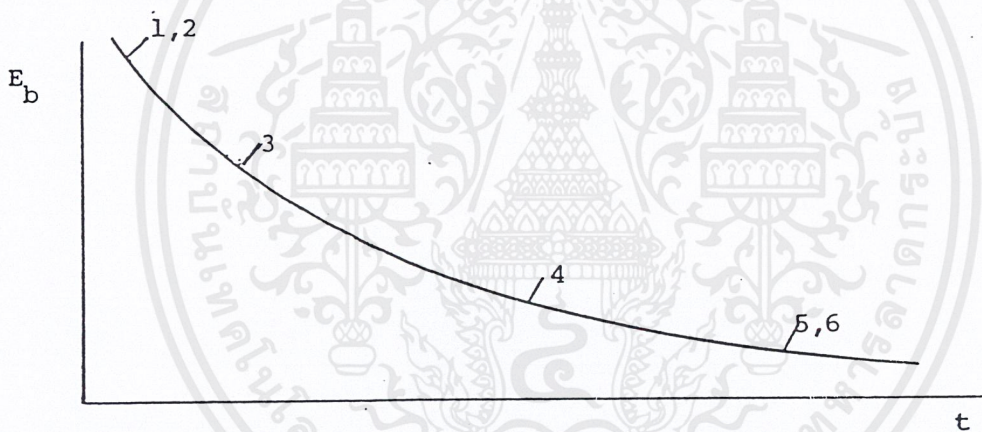
กลไกเบรคดาวน์ของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนแรงดันและที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรค

ความในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของการเกิดเบรคความได้ คือ

- 1 เบรคความแบบบริสุทธ์หรือแบบไอออนิก
- 2 เบรคความเนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
- 3 เบรคความแบบสตรีมเมอร์
- 4 เบรคความแบบเทอร์มัล
- 5 เบรคความเนื่องจากผลทางเคมี
- 6 เบรคความเนื่องจากคิซซาร์จภายใน
- 7 เบรคความเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว

การเกิดเบรคความตามลักษณะหรือสาเหตุต่างๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างกันตาม

รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน

3.2.1 เบรคความแบบแท้จริง (intrinsic breakdown)

เบรคความแบบแท้จริงหมายถึง การเกิดเบรคความจากการป้อนแรงดันที่มีช่วงระยะเวลาอันสั้นมาก คือ ราว 0.01 ไมโครวินาที ต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก และถือเป็นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรคความของฉนวนแบบบริสุทธ์ การที่จะให้ได้เบรคความแบบแท้จริงซึ่งมีความคงทนสูงนี้ จะได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขพิเศษ โดยจัดผลกระทบจากแฟกเตอร์อื่นๆ ออกให้หมดเพื่อให้เบรคความนั้นขึ้นอยู่กับการโครงสร้างและอุณหภูมิของสารฉนวนเท่านั้น ค่าความคงทนแรงดันต่อแรงดันไฟฟ้าเบรคความแบบบริสุทธ์นี้สูงกว่า 10 MV/cm ตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีนแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ -196°C ทนความเครียดสนามไฟฟ้าถึง 15 MV/cm โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5-10

MV/cm อย่างไรก็ตามเป็นการทดลองค่อนข้างยากที่จะบอกได้ว่าเบรคความนั้นเป็นเบรคความแบบแท้จริงหรือไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท้จริงหรือไม่แท้จริง เกือบจะเรียกได้ว่าค่าเบรคควาน์แบบแท้จริงนั้นเป็นค่าอุดมการณ์ ฉะนั้นในทางภาคปฏิบัติก็มักจะถือเอาค่าที่ทดลองได้สูงของสารฉนวนแต่ละชนิด โดยขจัดผลสืบเนื่องอื่นๆ ออกหมด ความเครียดสนามไฟฟ้าของเบรคควาน์บริสุทธิ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากที่มีอยู่ตามธรรมชาติในไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนมากพอที่จะข้ามช่องแถบพลังงานต้องห้ามจากวาเลนซ์ไปสู่แถบการนำไฟฟ้าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มทวีคูณมากขึ้นในแถบการนำไฟฟ้านั้น และนำไปสู่การเบรคควาน์ในที่สุด

3.2.2 เบรคควาน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า

ฉนวนแข็งเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจากแรงดันที่ป้อน จะมีประจุอยู่ที่ผิวของฉนวนด้านสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างด้านผิวของฉนวนดังกล่าว ทำให้เนื้อฉนวนได้รับแรงอัดบีบได้ และถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะเกิดแตกสลาย โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนฉนวนจากสนามไฟฟ้ารวม 1 MV/cm จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เงื่อนไขของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงกลไฟฟ้าวิกฤตอาจคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

แรงอัดที่เกิดจากสนามไฟฟ้ายังอยู่ในสภาพสมดุลย์ได้ถ้า

$$\frac{\epsilon E^2}{2} = y \ln \frac{d_o}{d} \quad (3.1)$$

$$V^2 = d^2 \frac{2y}{\epsilon} \ln \frac{d_o}{d} \quad (3.2)$$

โดยที่	E	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า $\frac{V}{d}$
	V	คือ แรงดันที่ป้อน
	D	คือ ความหนาของฉนวนขณะที่ได้รับแรงอัด
	d_o	คือ ความหนาเริ่มต้นของฉนวน
	ϵ	คือ $\epsilon_r \epsilon_o$
	y	คือ ยังโมดูลัส

แรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น(แรงดันที่ป้อนสูงขึ้น) ความหนาจะลดลงจนนั้นหาค่าสูงสุด $d^2 \ln (d_0/d)$ โดยดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (3.1) เทียบกับ d ได้เมื่อ

$$\frac{d_0}{d} = e^{0.5} = 1.67 \quad (3.3)$$

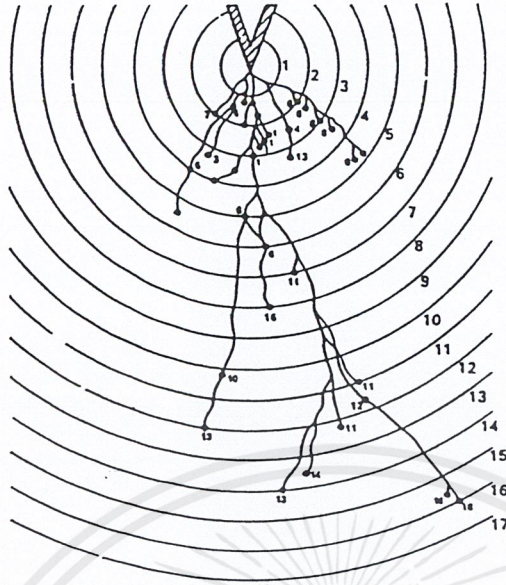
ซึ่งแสดงว่าจะเกิดความไม่สมดุลระหว่างความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนกับแรงกลไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าเมื่อ $d_0/d = 1.67$ เท่ากันหรือมากกว่า 1.67 นั่นคือฉนวนแข็งจะเริ่มแตกสลายเมื่อความสนามไฟฟ้าสูงสุด จะหาได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{V}{d_0} = 0.6\sqrt{Y/\varepsilon} \quad (3.4)$$

3.2.3 เบรคดาวน์แบบสติมเมอร์

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรดฝังเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง เบรคดาวน์อาจเกิดขึ้นได้จากอะวาลานซ์เดี่ยวของอิเล็กตรอนที่ไปในลักษณะเดียวกับทฤษฎีสติมเมอร์ที่อธิบายการเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซ อิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่ทะลุทะลวงเคลื่อนที่ไปหาอะโนด และได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้านี้เกินค่าพลังงานไอออไนเซชันของโครงสร้างผลึก(Lattice Ionizing Energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมโครงสร้างผลึก จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะทวีเพิ่มขึ้นเป็นอะวาลานซ์และเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต

ในทางปฏิบัติเบรคดาวน์มักจะไม่เกิดการดิสชาร์จครั้งเดียวหรือในแนวเส้นทางเดียว แต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการดิสชาร์จหลายครั้งดังในรูป 3.2 ที่ได้จากการทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่างปลายแหลมรัศมี 0.254 มิลลิเมตรกับแผ่นระนาบ โยฟิงปลายอิเล็กโตรดเข้าไปในเนื้อฉนวนโปร่งไสหนา 4.8 มิลลิเมตร แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนมีรูปคลื่น $1/30 \mu\text{sec}$ จำนวน 190 ครั้ง สังกะยมของดิสชาร์จแต่ละครั้งแต่ไม่เกิดแนวดิสชาร์จทุกครั้งที่มีป้อนแรงดัน ร่องรอยจะเกิดขยายตัวออกไปเป็นชั้นๆจนกระทั่งรอยดิสชาร์จเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรดเบรคดาวน์ก็เกิดขึ้น ในกรณีของแรงดันกระแสสลับเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นใช้เวลาของการป้อนแรงดันตั้งแต่หลายวินาทีไปจนถึงหลายนาที่



รูปที่ 3.2 ลักษณะคีสสารจเบรคควาน์แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ(Cooper)

3.2.4 เบรคควาน์แบบเทอร์มัล

ค่าเบรคควาน์ของฉนวนแข็งจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฉนวน แต่ข้อนี้จะเป็นจริงจนถึงความหนาค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากฉนวนแข็งหนามากกว่านั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสไหลผ่านจะเป็นให้เกิดเบรคควาน์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือค่าแรงดันเบรคควาน์ไม่แปรเพิ่มขึ้นตามความหนา

เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลผ่านฉนวนแต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทแผ่กระจายออกไปสู่ ตัวกลางรอบๆ โดยการนำผ่านฉนวนและส่วนหนึ่งทำให้ฉนวนมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งจะยังคงสภาพอยู่ได้ ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถระบายออกไปสู่ในตัวกลางรอบๆ ได้ทัน โดยไม่ทำอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไปก็จะทำให้เสียความสมดุลและนำไปสู่การเกิดเบรคควาน์แบบเทอร์มัลขึ้นได้ อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานความสมดุลจะยังคงรักษาอยู่ได้เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันให้กับฉนวนจะต้องเท่ากับความร้อนที่แผ่กระจายออกไปรวมกับความร้อนที่ทำให้ปริมาตรของฉนวนร้อนขึ้นด้วยอุณหภูมิ T

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีแรงดันกระแสตรง คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$w_g = \sigma E^2 \quad (3.5)$$

โดยที่ w_g คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน
 σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับความร้อนที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$w_g = \omega \varepsilon \cdot \tan \delta \cdot E^2 \quad (3.6)$$

โดยที่ f คือ ความถี่เป็น Hz
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า
 $\tan \delta$ คือ แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริก

ความร้อนที่ระบายออกไปคำนวณได้จากสมการ

$$w_d = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(k \cdot \text{grad} T) \quad (3.7)$$

โดยที่ C_v คือ ความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรของฉนวน
 T คือ อุณหภูมิฉนวน
 k คือ สภาพนำความร้อนของฉนวน

ฉะนั้นเทอร์มัลเบรคดาวน์จะไม่เกิดขึ้นถ้า

$$W_d \geq W_g \quad (3.8)$$

เนื่องจากพลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่ามากกว่าในสนามไฟฟ้ากระแสตรง เพราะในสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีพลังงานสูญเสียต่อเนื่องจากโพลาไรเซชัน ซึ่งโมเมนต์ของไดอิเล็กตริกจะกลับหัวไปมาตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงดันเทอร์มัลเบรคดาวน์ของกระแสสลับจึงมีค่าต่ำกว่า และจะยังลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

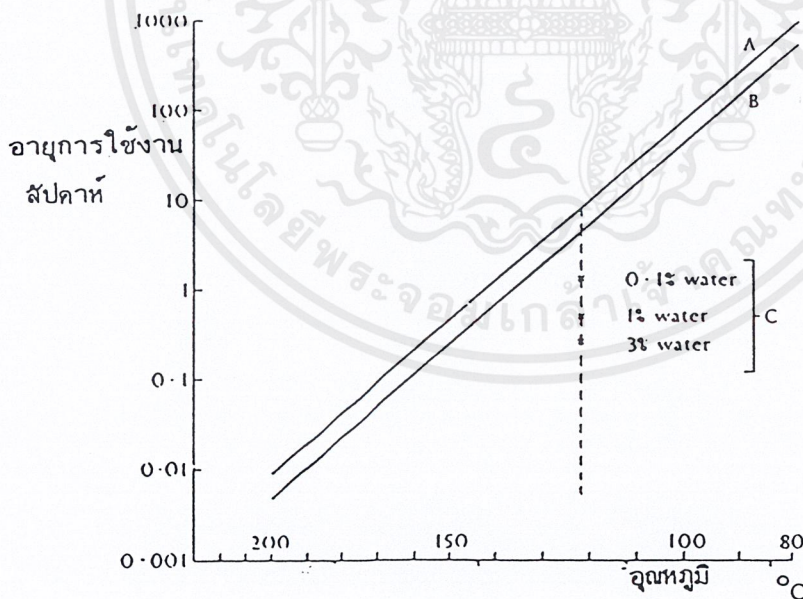
3.2.5 เบรคดาวน์เนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า

3.2.5.1 ผลเคมี

สารฉนวนอาจเสื่อมสภาพทางเคมีได้แม้ว่าจะไม่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าก็ตามเสถียรภาพทางเคมีเสื่อม ฉนวนเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอินทรีย์สารสภาพทางเคมีจะเสื่อมช้าลงมากในสถานะใช้งานปกติได้ แต่จะขึ้นอยู่อย่างมากกับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจเป็นผลมาจากการแตกสลายของโครงสร้างเนื้อสาร เช่น คาร์บอนในเซลลูลอส หรือ สารสังเคราะห์ เช่น กระดาษ ฉนวนจะเสียสภาพทางแรงกลภายในสองสามวันที่อุณหภูมิ 150°C ถึงแม้ว่าจะไม่มีอากาศหรือความชื้น กระบวนการเสื่อมสภาพนี้จะนำไปอย่างรวดเร็วมากถ้าหากมีออกซิเจนและความชื้น ดังในรูปที่ 3.3 อีกตัวอย่างหนึ่งก็คือ ไมกา ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500°C จะเริ่มเสียสภาพอย่างช้าๆ ทางไฟฟ้าและทางกล ฉะนั้นในมาตรฐานทั้งหลายเกี่ยวกับการใช้ฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะกำหนดแยกประเภทตามอุณหภูมิสูงสุดของการใช้งาน

ออกซิเจน เป็นผลทางเคมีอันหนึ่งที่ทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ถ้าสารนั้นมีอากาศหรือโอโซนเช่นยาง และโพลิเทน จะเกิดออกซิเดชันทำให้ผิวแตกครากเมื่อยืดและได้รับแสงแดด

ไฮโดรลิซิส สารฉนวนบางชนิดถ้าได้รับทั้งความชื้นและร้อนจะเกิดไฮโดรลิซิสขึ้น ทำให้เสียสภาพทางกลและไฟฟ้า เช่น โพลิทีลีน เทเลพธาลเอท เซลลูลอสของเอสเตอร์และของโพลิเอสเตอร์



A : กระดาษอบแห้งในสูญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับ N_2

B : กระดาษอบแห้งในสูญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับ O_2

C : กระดาษขึ้นจุ่มน้ำมันสัมผัสใน N_2

รูปที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5.2 ผลทางเคมีไฟฟ้า

ไม่มีสารละลายใดที่ปราศจากไอออน หรือ อีกนัยหนึ่งก็คือ ไม่มีสารละลายใดที่มีความต้านทานเป็นอนันต์ ฉะนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าจึงเป็นผลให้มีกระแสรั่ว (leakage current) ไอออนเหล่านี้ อาจเกิดจากการเจือปนหรือเกิดไอออนในเซชันภายในฉนวนเอง เมื่อไอออนมาถึงอิเล็กโทรดอาจเกิดปฏิกิริยาเคมี อาจเกิดก๊าซขึ้น หรือเกิดสารเกาะบนผิวอิเล็กโทรดในลักษณะอิเล็กโทรไลซิสนั่นเอง กระบวนการนี้จะมีผลเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงและเป็นผลให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสนามไฟฟ้ากระแสตรง กล่าวโดยสรุปก็คือ อัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากผลทางเคมีไฟฟ้ากำหนดด้วยกระแสรั่ว ซึ่งขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ ประการแรกคือ ความหนาแน่นของไอออนในฉนวนอันเกิดจากสิ่งเจือปนในฉนวน จึงต้องระมัดระวังหรือป้องกันมิให้มีสิ่งเจือปนในกระบวนการผลิตและประกอบ แฟกเตอร์ประการที่สองคือ อุณหภูมิที่ทำให้กระแสเพิ่มเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากเคมีไฟฟ้าเร็วขึ้น ยกเว้นเสียแต่ฉนวนมีความชื้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้แห้งเร็วขึ้น แฟกเตอร์ประการที่สามก็คือ สารที่เป็นโพลาร์ คือ โมเลกุลมีขั้ว จะมีกระแสรั่วมากกว่าสารที่ไม่เป็น โพลาร์

ตัวอย่างฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของเคมีไฟฟ้าสายไฟหุ้มฉนวนและใช้ในที่ความชื้น เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขดลวดหรือระหว่างชั้นในขดเดียวกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ปฏิกิริยากัดกร่อนสายไฟเกิดขึ้นได้ ถ้าฉนวนมีสิ่งเจือปนไอออน (เช่น น้ำมีสายละลาย) เช่น ผ้าฝ้ายหุ้มสายทองแดง ในที่ชื้นจะมีสีเขียว การฉนวนจะเสียหายถ้าผ้าฝ้ายนั้นดูดความชื้นได้

3.2.6 เบรคดาวน์เนื่องจากดิสชาร์จภายใน

ดิสชาร์จภายในไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นได้เพราะมีไดอิเล็กตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวนหรือที่เขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด สารเจือปนนี้จะเกิดเบรคดาวน์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนทั้งนี้เพราะว่า ปกติสารเจือปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าเนื้อฉนวน ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดเบรคดาวน์ในโพรงก่อน

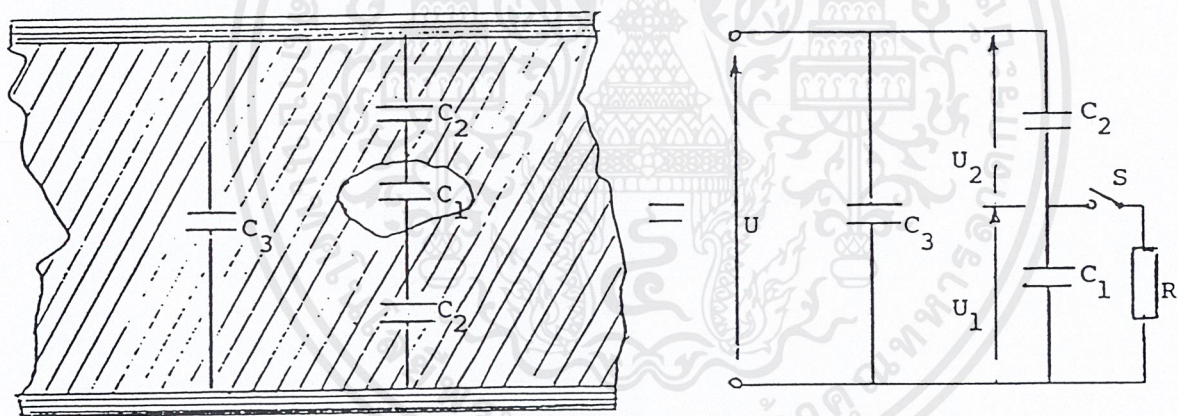
ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์ หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดหรือเบรคดาวน์ของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน และมิติของโพรง

โพรงฉนวนเป็นลิ่งเจือปน

กระบวนการหล่อหรือหุ้มด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรคความในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรง ค่าแรงดันเบรคความจะลดต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรคความครั้งแรกแล้ว

โพรงฉนวนในน้ำมัน

โพรงฉนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มขุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลงหรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีของโพรงก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน(ϵ_1) จะเป็น ϵ_2/ϵ_1 เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน(ϵ_2) ในกรณีที่โพรงตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรคความในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดคิสซาร์ภายในขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีโพรงก๊าซหรือน้ำมันอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ดังในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 ฉนวนมีโพรงและวงจรสมมูล

ในรูป 3.4 C_1 แทนค่าปาดิเต้นซ์ของโพรงก๊าซ C_2 แทนค่าปาดิเต้นซ์ของฉนวนส่วนที่ต่ออันดับกับโพรง C_3 แทนค่าปาดิเต้นซ์เนื้อฉนวนที่เหลือ เมื่อป้อนแรงดัน V ระหว่างอิเล็กโตรดที่คั่นด้วยฉนวนนี้ทั้งหมด และ V_1 เป็นแรงดันคร่อมโพรงซึ่งอาจคำนวณในลักษณะของโวลเตจดิไวเดอร์จะได้

$$V_1 = V \epsilon_r \cdot \frac{d_1}{d_2} \quad (3.9)$$

โดยที่ ε_r คือ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน

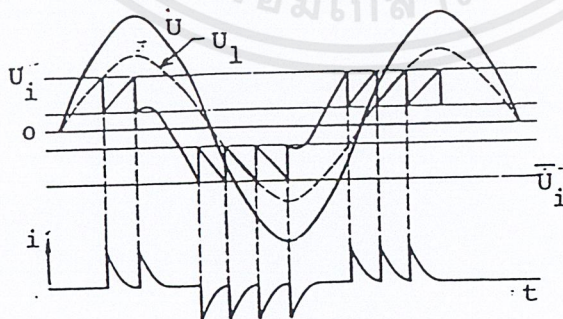
d_1, d_2 คือ ความหนาของโพรงและของฉนวนตามลำดับปกติ

$$d_1 \ll d_2$$

ถ้าแรงดันคร่อมโพรงถึงค่าความคงทนของก๊าซในโพรงเท่ากับ V_i ก็จะเบรคความหรือดีสชาร์จในโพรง ค่าแรงดัน V_i เรียกแรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จ(discharge inception voltage) ในกรณีแรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับ เบรคความจะเกิดขึ้นที่ยอดทั้งสองของรูปคลื่น จำนวนครั้งดีสชาร์จขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนดังรูปที่ 3.5 เห็นประแสงถึงแรงดันคร่อมโพรงที่ควรจะเป็นถ้าหากไม่เกิดดีสชาร์จ เมื่อ V_i มีค่าถึง V_i' หรือ V_i'' ดีสชาร์จจะเกิดขึ้น แรงดันคร่อมโพรงจะเป็นศูนย์ เมื่อหยุดดีสชาร์จแรงดันคร่อมโพรงก็เพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งถึง V_i อีกก็ดีสชาร์จใหม่อีก เกิดซ้ำเช่นนี้ทั้งทางครึ่งบวกและครึ่งลบของรูปคลื่น ทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จก็จะมีกระแสพัลส์เกิดขึ้นทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบเช่นกัน

เมื่อก๊าซในโพรงเบรคความเกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกในโพรง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงผนังของโพรง ถ้าพลังงานมากพอก็จะทำให้ผนังแตกสลาย และเกิดความร้อนขึ้นในโพรง สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พลังงานสูญเสียไปค่าอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้น ผลทางปฏิกิริยาเคมีทำให้ฉนวนเสื่อมลง

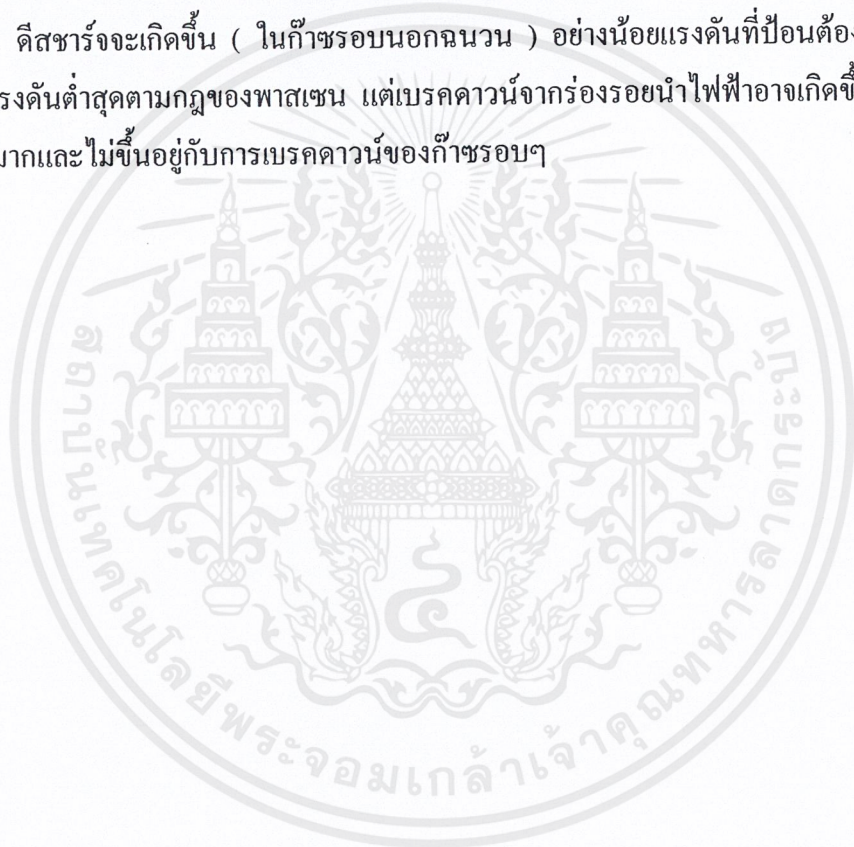
ความหนาของฉนวนลดน้อยลงและนำไปสู่การเกิดเบรคความในที่สุด อายุของฉนวนที่มีดีสชาร์จภายในขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนและจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จ เบรคความโดยกระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นภายในสองสามวันหรือหลายปีอย่างไรก็ตามหากมีการดีสชาร์จภายในจะทำอายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง



รูป 3.5 ดีสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ

3.2.7 เบรคดาวนเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking)

เมื่อฉนวนแข็งได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน สภาพการฉนวนอาจเสียหายเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เนื่องจากมีร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิวฉนวนฉนวนอันอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเอง และเพราะความชื้นในบรรยากาศประกอบกับความสกปรกบนผิวฉนวน เช่น ผงฝุ่นและเกลือ กระแสรั่วตามผิวนำไฟฟ้านี้ ทำให้ความชื้นที่ผิวแห้งไปได้ ทำให้ความชื้นที่ผิวแห้งไปได้ ทำให้เกิดสปาร์คในช่วงที่ผิวนำไฟฟ้าขาดไป ทำให้ผิวฉนวนเสียหาย เช่น กระดาษเบคกะไลต์ การเกิดเสียหายเนื่องจากร่องรอยไฟฟ้านี้จะแตกต่างไปจากการเสียหายเพราะดิสชาร์จ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้น (ในก๊าซรอบนอกฉนวน) อย่างน้อยแรงดันที่ป้อนต้องเท่ากันหรือมากกว่าแรงดันต่ำสุดตามกฎของพาสเซน แต่เบรคดาวนจากร่องรอยนำไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่านั้นมากและไม่ขึ้นอยู่กับการเบรคดาวนของก๊าซรอบๆ



บทที่ 4

ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

4.1 ทฤษฎีแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกิน ที่เกิดจากเหตุภายนอก คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าเรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และแรงดันที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบเรียกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ซึ่ง ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อจะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้หรือไม่ ความคงทนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ของฉนวน มิใช่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันสูงสุดเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้นเพื่อสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลของการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดถือเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

ลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์กำหนดด้วย

- 1.ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มียอดคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากการออสซิลเลชั่น ใกล้ๆยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดัน อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

4.1.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

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

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มมีลักษณะตามข้อกำหนดทั้ง 4 ข้อดังกล่าว ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์ดังแสดงในรูป 4.1

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 (front time)

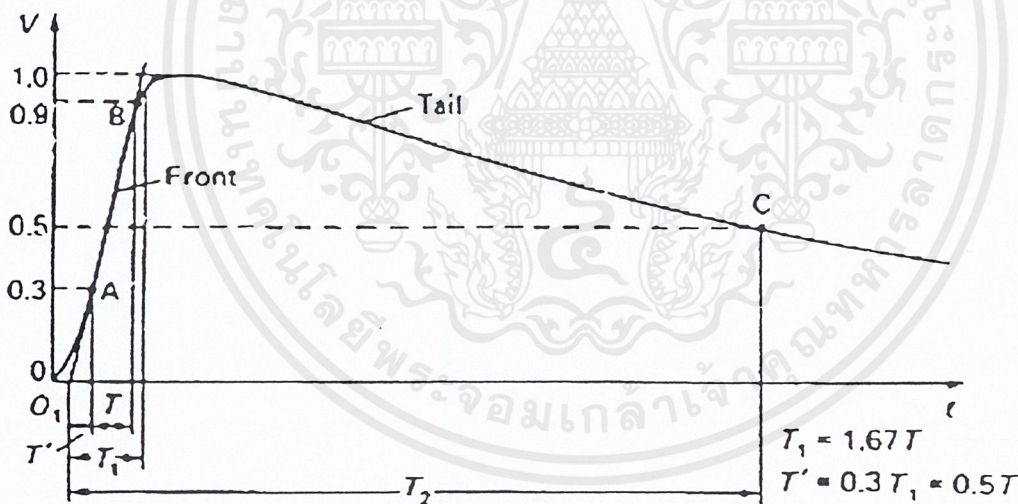
เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าคือ 1.67 เท่าของช่วงเวลา T ระหว่างจุดที่แรงดันมีค่า 30 % และ 90 % ของค่ายอดคือจุด A และ B ถ้ารูปคลื่นมีคลื่นระลอกซ้อนซ้อนอยู่ด้วยให้ลากเส้นโค้งเฉลี่ยสัญญาณเสียก่อนแล้วจึงค่อยหาจุด A และ B

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 (virtual original)

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 ช่วงระยะเวลาผ่านจุดเริ่มต้นเสมือน O_1 ถึงจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด



รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะยึดตามมาตรฐาน IEEE Std 4-1995(R1978) ซึ่งกำหนดไว้ดังนี้

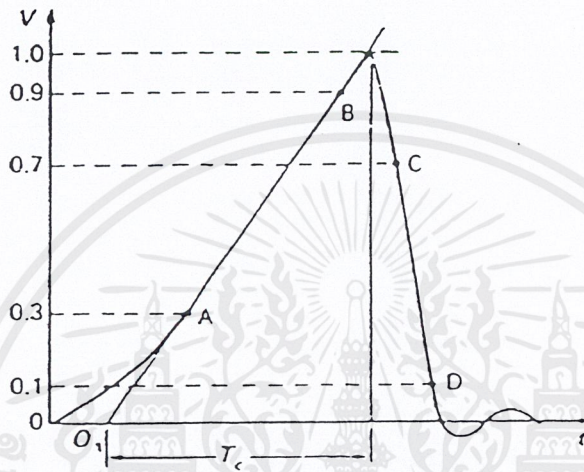
เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{sec} \pm 30 \%$

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_2 = 1.2 \mu\text{sec} \pm 30 \%$

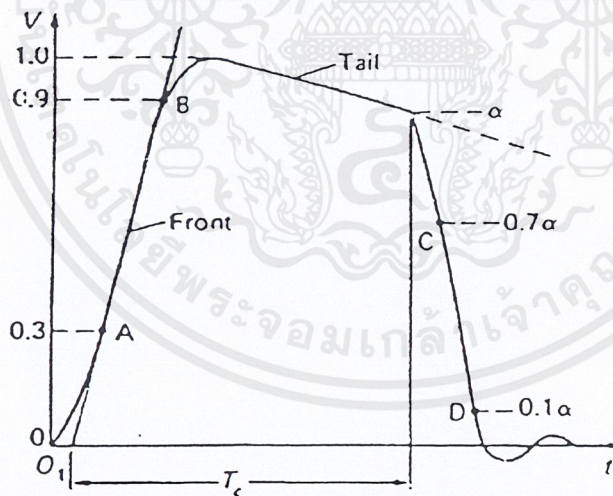
ค่ายอดแรงดัน $U_m \pm 3 \%$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดเกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้จึงเกิดการสปาร์กผ่านเกิดวาวไฟตามผิวหรือเกิดเบรคความผ่าทะลุทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนั้นอาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหางคลื่นหรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



(ก) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น



(ข) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

เวลาช่วงคลื่นตัด T_c (time to chopping)

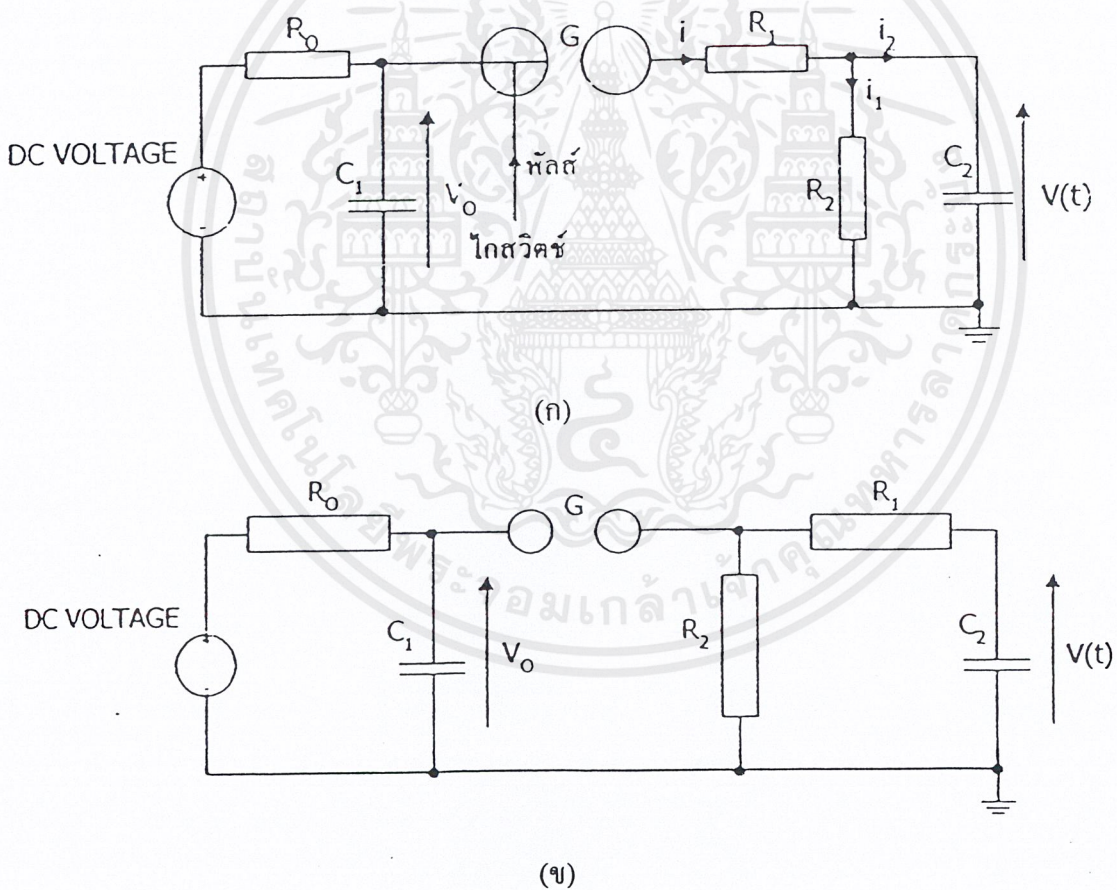
เวลาช่วงคลื่นตัด T_c คือช่วงเวลาวัดจากจุดเริ่มต้นเสมือนกับขณะที่เกิดคลื่นตัด

4.1.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยแรงดันทรานเซียน RC หรือวงจรทรานเซียน RLC โดยทั่วไปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นใช้กันมาก มักจะได้จากวงจร RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ ($V = Q/C$) แล้วปล่อยให้คายประจุหรือดีสชาร์จผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลา(timeconstant) ให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการได้

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ก) และ 4.3 (ข) ข้อแตกต่างกันของวงจรทั้งสองอยู่ที่ลักษณะการต่อค่า R_1 และ R_2 ซึ่งทำให้สูตรคำนวณค่าคงที่เวลาต่างกัน



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ความหมายขององค์ประกอบในวงจร

DC : แรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่าย

V_0 : แรงดันอัดประจุกระแสตรง

$V(t)$: แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น

C_1 : ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_2 : โหลดตัวเก็บประจุ(รวมทั้งตัวเก็บประจุของอุปกรณ์เครื่องวัด)

R_0 : ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_1 : ความต้านทานหน่วง

R_2 : ความต้านทานปล่อยประจุขณะดิสชาร์จ

G : สปรักแกปทรงกลม

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- 1 แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- 2 แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด V_0
- 3 ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_1
- 4 พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- 5 อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- 6 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและแบบสวิตชิง

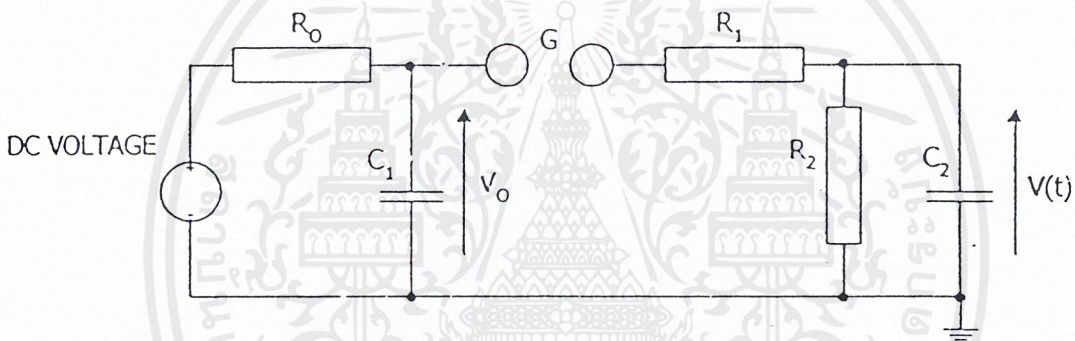
หลักการทำงานของวงจร

แรงดันกระแสตรงที่ป้อนจากแหล่งจ่ายจะอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_1) จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ V_0 การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน R_0 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุให้เร็วหรือช้า (ปกติ 2-3 วินาที) ค่าแรงดันอัดประจุ V_0 นี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของแกป G ที่ปรับได้ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ ได้มากน้อยตามต้องการ นอกจากนี้สปรักแกปยังทำหน้าที่เหมือนสวิตช์หรือไก(trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_1 ปล่อยประจุให้กับโหลด การสปรักจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว(น้อยกว่า 100 μsec) ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปรักในแต่ละครั้งจะต่างกันจะต่างกันไม่มากถ้าหากปราศจากฝุ่นละออง(น้อยกว่า 1%) ส่วนช่วงเวลาระหว่างการสปรักต่อเนื่องจะดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_1 โดยถ้าแรงดันมากก็จะสปรักง่ายหรือถี่ขึ้นหลังจากเกิดสปรักแล้วแรงดัน V_0 จะคร่อม R_1 และ C_2 ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_2 การถ่ายทอดประจุนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_1 และ C_2 จึงกล่าวได้ว่า R_1 และ C_2 เป็นตัวกำหนด

ช่วงเวลาหนัคลิ้น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้กับ C_2 จนเต็มที่แล้ว ประจุนี้ก็จะดิสชาร์จออกสู่ R_2 ดังนั้น R_2 จึงทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหนัคลิ้น T_2 โดยถ้า R_2 มีค่ามาก T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย

4.1.3 การคำนวณวงจร

แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นควรจะต้องกำหนดหรือควบคุมได้ทั้งนี้เพื่อให้ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปที่วัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบหลายๆครั้งนั้นมีค่าคงที่ ซึ่งควบคุมได้โดยใช้ไกสวิตช์ เป็นตัวเริ่มให้เกิดการดิสชาร์จในสปรักเกป ช่วงที่อยู่ในสปรักเกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยสัญญาณอิมพัลส์ไก โดยการบังคับระยะไกดังแสดงในรูปที่ 4.4 การใช้ไกสวิตช์บังคับให้เกิดการสปรักตามที่กำหนดนี้ จะช่วยให้เกิดการกระจายของแรงดันที่จ่ายออกน้อยลง นั่นคือจะได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ทดสอบมีค่าคงที่ตามต้องการ



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ไกสวิตช์

การแปรของแรงดันในทอมเวลา

อาศัยการวิเคราะห์จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์ เช่น วงจรพื้นฐาน(ก) ในรูปที่ 4.4 เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ด้วยแรงดันอัดประจุ V_0 และเกิดการสปรักที่สปรักเกป G จะมีกระแสไหลในส่วนต่างๆ ของวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.5 สมมติว่าเมื่อเกิดสปรักที่ G และไม่มีแรงดันตกคร่อมในช่องสปรักโดยอาศัยกฎของเคอร์ชอฟจะเขียนสมการได้ว่า

$$iR_1 + i_1R_2 = V_0 - \frac{1}{C_1} \int i dt \quad (4.1)$$

แทนค่า

$$i = i_1 + i_2 \quad (4.2)$$

จะได้

$$i_1 R_1 + i_2 R_1 + i_1 R_2 = V_0 - \frac{1}{C_1} \int i_1 dt - \frac{1}{C_1} \int i_2 dt \quad (4.3)$$

$$i_2 = R_2 C_2 \frac{di_1}{dt} \quad (4.4)$$

จาก(4.3)

$$\frac{1}{C_1} \int i_1 dt + i_1 \left[R_1 + R_2 + \frac{R_2 C_2}{C_1} \right] + R_1 R_2 C_2 \frac{di_1}{dt} = V_0 \quad (4.5)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ(4.5)และคูณตลอดด้วย $R_2 C_1$

$$i_1 R_2 + R_2 C_1 \left[R_1 + R_2 + \frac{R_2 C_2}{C_1} \right] \frac{di_1}{dt} + R_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^2 i_1}{dt^2} = 0 \quad (4.6)$$

$$V(t) + C_1 \frac{dV(t)}{dt} \left[R_1 + R_2 + \frac{R_2 C_2}{C_1} \right] + R_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^2 V(t)}{dt^2} = 0 \quad (4.7)$$

ซึ่งอาจเขียนในรูปสมการ

$$\frac{d^2 V(t)}{dt^2} + B_1 \frac{dV(t)}{dt} + B_0 V(t) = 0 \quad (4.8)$$

โดยที่

$$B_0 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4.9)$$

$$B_1 = \frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4.10)$$

ผลลัพธ์อาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$V(t) = \frac{V_0}{K(\alpha_2 + \alpha_1)} [\exp^{-\alpha_1 t} - \exp^{-\alpha_2 t}] \quad (4.11)$$

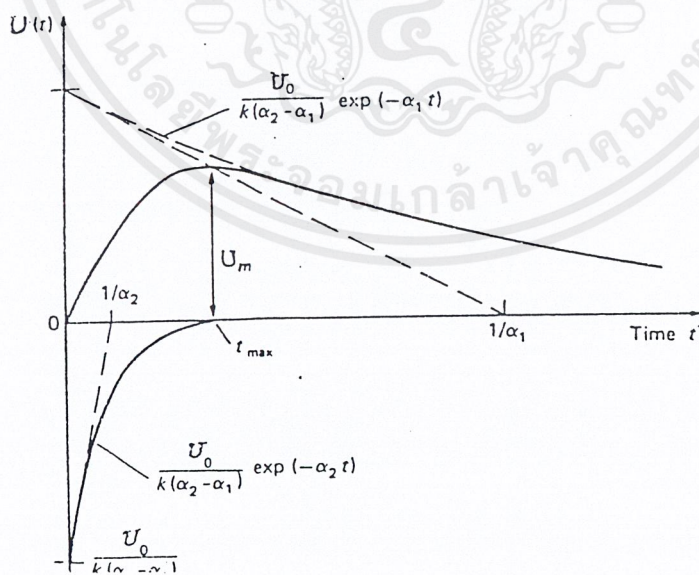
$$\alpha_1, \alpha_2 = \sqrt{\left[\frac{B_1}{2} \pm \left(\frac{B_1}{2} \right)^2 - B_0 \right]} \quad (4.12)$$

ค่าแฟกเตอร์ B_1, B_0 และสำหรับ K วงจร(ก) และ (ข) แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแฟกเตอร์ B_1 และ B_0 สำหรับวงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (ก) และ (ข)

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	B_1	B_0	K
แบบ ก	$\frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2}$	$\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$	$R_1 C_2$
แบบ ข	$\frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2}$	$\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$	$R_1 C_2$

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของ เวลาประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โพเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาเท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอกโปเนนเชียลสองเทอม

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \quad (4.13)$$

$$T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (4.14)$$

ค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นต่างๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแฟกเตอร์ต่างๆ ของแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน

T_1/T_2	k_1	k_2	$1/\alpha_1 (\mu\text{sec})$	$1/\alpha_2 (\mu\text{sec})$
1.2/50	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	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875.0	104.000

คำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร

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

สำหรับวงจรรูป 4.4 (ก)

$$R_1 = \frac{1}{2C_1} \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right] \quad (4.15)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right] \quad (4.16)$$

สำหรับวงจรรูป 4.4(ข)

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right] \quad (4.17)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right] \quad (4.18)$$

ประสิทธิภาพของวงจร η

ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ หมายถึง อัตราส่วนค่ายอดของแรงดันที่สร้างขึ้นออกมาได้ ต่อค่าแรงอัดประจุปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอทั้งวงจร(ก) หรือ (ข) สำหรับวงจรรูป 4.4 (ก)

$$\eta = \frac{R_2 C_1}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} \quad (4.19)$$

สำหรับวงจรรูป 4.4(ข)

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (4.20)$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ ควรเลือกให้ C_1 มีค่าสูงกว่าโหลด C_2 มากๆ ($C_1 \gg C_2$)

ค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่น T_1 และ T_2

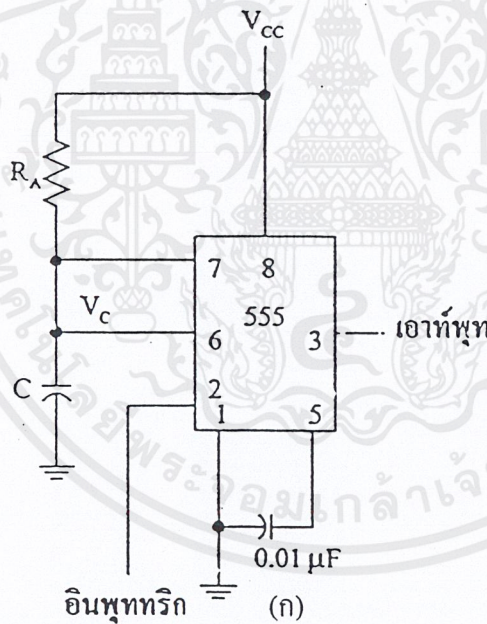
ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรอิมพัลส์ อาจคำนวณค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและช่วงหางคลื่นโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 ดังตารางที่ 4.3

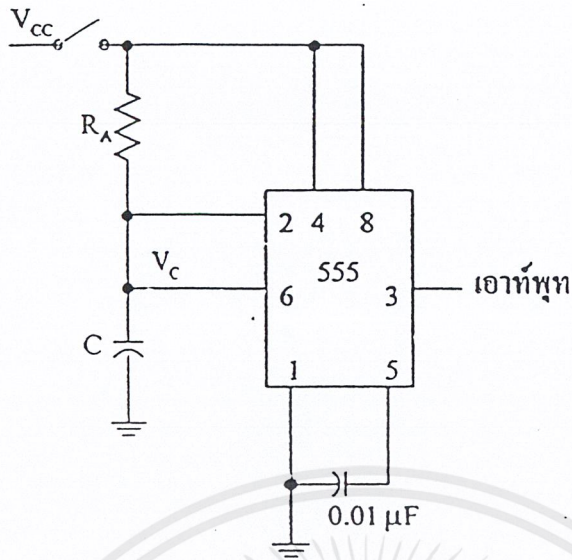
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

องค์ประกอบ	วงจร(ก)	วงจร(ข)
T_1	$\frac{k_2 R_1 R_2 C_1 C_2}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}$	$\frac{k_2 R_1 C_1 C_2}{(C_1 + C_2)}$
T_2	$\frac{k_2 R_1 R_2 C_1 C_2}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}$	$k_2 R_2 (C_1 + C_2)$
η	$\frac{R_2 C_1}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}$	$\frac{C_1}{C_1 + C_2}$

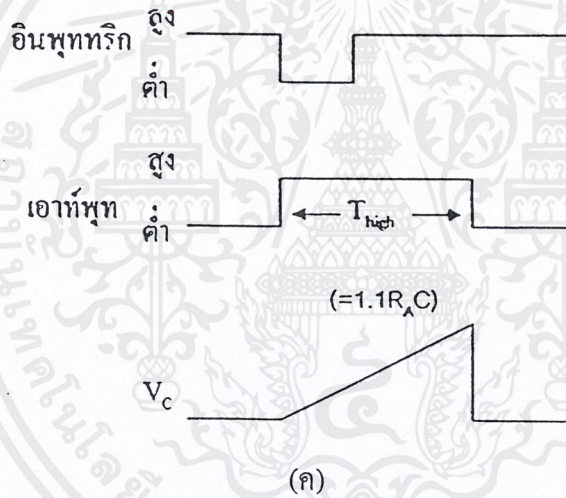
4.2 ทฤษฎีการสร้างสัญญาณพัลส์เดียว(โมโนสเตเบิล)

วงจรโมโนสเตเบิลสามารถสร้างด้วยทรานซิสเตอร์หลายตัวแต่ในทางปฏิบัติเราอาจใช้ ไอ ซี 555 แทนทรานซิสเตอร์ได้ ดังแสดงในรูป 4.6





(ข)



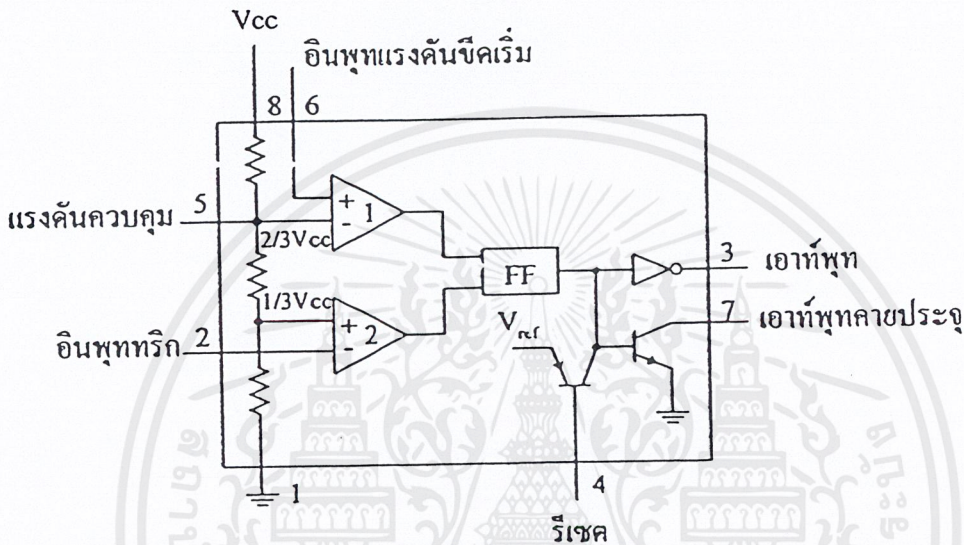
(ค)

รูปที่ 4.6 วงจรโมโนสเตเบิลที่สร้างจากไอซี 555

ไอซี 555 ออกแบบมาสำหรับใช้เป็นวงจรจับเวลา (Timer) มีลักษณะการทำงานเป็นวงจรโมโนสเตเบิลแบบไม่รับการกระตุ้นซ้ำ ดังรูป 4.6 โดยอินพุตทริกเกอร์ที่ขา 2 เมื่อได้รับการทริกจากสัญญาณภายนอก และระดับของสัญญาณทริกตกต่ำลง (ต่ำกว่า $1/3 V_{CC}$) จะทำให้เอาต์พุตที่ขา 3 มีสถานะสูง ตัวเก็บ C จะเก็บประจุผ่านตัวต้านทาน R_A จนกระทั่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันมีค่าเท่ากับ V_{CC} โดยใช้เวลาประมาณ

$$T_{high} = 1.1 R_A C \quad (4.21)$$

ในระหว่างช่วงเวลาดังกล่าวเอาต์พุตยังคงเป็นสถานะสูงจนกระทั่งแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นสูงกว่า $2/3 V_{CC}$ ซึ่งทำให้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 1 ทำงานและทริกฟลิปฟลอป ทำให้เอาต์พุตที่ขา 3 กลับเป็นสถานะต่ำอีก รวมทั้งเอาต์พุตคายประจุที่ ขา 7 ลดสถานะลงเป็นต่ำ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีค่าเกือบเป็น 0 โวลต์ จนกว่าจะมีสัญญาณมาทริกที่ขา 2 อีก โดยรูป 4.6(ก) ไอซี 555 มีไฟเลี้ยงตลอดเวลา ส่วนในรูป 4.6(ข) มีไฟเลี้ยงเฉพาะตอนสวิทช์ปิด

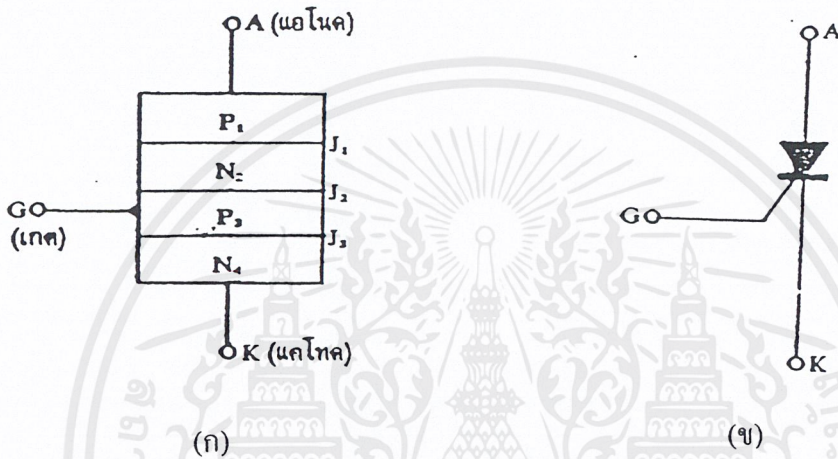


รูปที่ 4.7 วงจรภายในไอซี 555

ภายใน ไอซี 555 มีตัวต้านทาน 5 กิโลโอห์ม สามตัวที่ต่ออนุกรมกันตามรูปที่ 4.7 ซึ่งถูกต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดัน 2 ระดับคือ $1/3 V_{CC}$ และ $2/3 V_{CC}$ (V_{CC} คือ ไฟเลี้ยงของไอซี 555 ซึ่งอาจมีค่าตั้งแต่ 4.5 โวลต์ ถึง 18 โวลต์) เมื่อแรงดันขีดเริ่ม (THRESHOLD VOLTAGE) ที่ขา 6 มีค่าสูงกว่า $2/3 V_{CC}$ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 1 จะทำการเซต ฟลิปฟลอป ดังนั้น เอาต์พุตขา 3 จะเป็นสถานะต่ำรวมทั้งเอาต์พุตคายประจุ ขา 7 จะลดลงเป็น ต่ำด้วยเมื่ออินพุตทริกเกอร์ขา 2 มีค่าต่ำกว่า $1/3 V_{CC}$ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 2 จะรีเซตฟลิปฟลอป ดังนั้นเอาต์พุตที่ ขา 3 จะเป็นสถานะสูงและทรานซิสเตอร์ที่ ขา 7 จะอยู่ในสภาวะเปิดวงจร

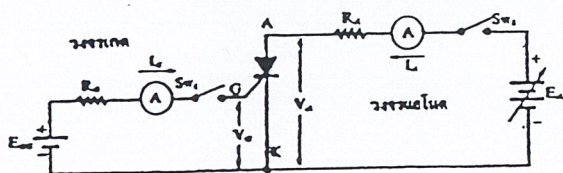
4.3 ไทริสเตอร์

ไทริสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่จะทำงานได้ต้องได้รับสัญญาณให้กับตัวมันก่อน มีโครงสร้างและสัญลักษณ์ดังรูป

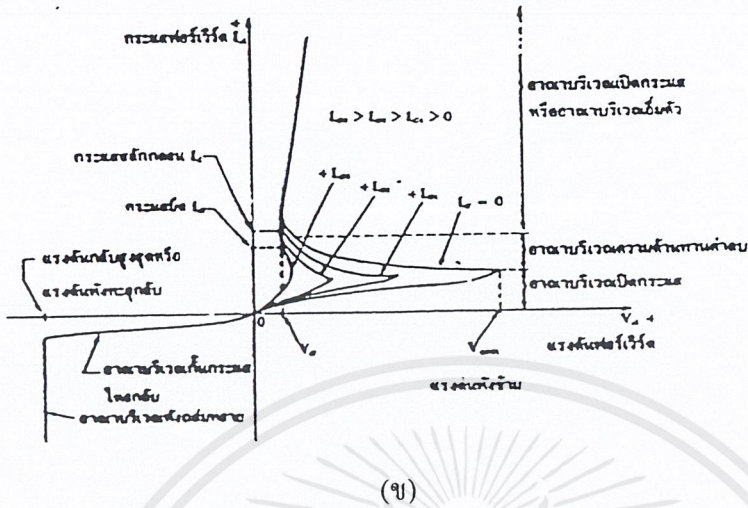


รูปที่ 4.8 (ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์
(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เมื่อต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.9(ก) ถ้าปิดสวิตช์ Sw_1 และ Sw_2 ลง แล้วปรับค่าแรงดันเลี้ยงวงจรแอนโนด E_A และวงจรเกต E_G ให้เหมาะสม เราจะได้เส้นโค้งลักษณะสมบัติดังแสดงในรูปที่ 4.9(ข) โดยยึดถือหลักที่ว่า กระแสแอนโนด I_A และกระแสเกต I_G มีค่าบวกถ้ากระแสไหลเข้าสู่ขั้วของเอสซีอาร์ และแรงดันแอนโนด V_A และแรงดันเกต V_G มีค่าบวกถ้าแรงดันแอนโนดและเกตมีศักย์สูงกว่าแคโทด ดังที่เขียนไว้ในรูปที่ 4.9(ก) -



(ก)



(ก)

รูปที่ 4.9 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก
(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

ในการเริ่มต้นการทดลองให้เปิดสวิตช์ Sw_1 ไว้ปิดสวิตช์ Sw_2 ลงและให้แรงดันแอโนด V_A มีค่าเริ่มต้นจากน้อยไปหามาก โดยให้ $I_g = 0$ แล้วเพิ่มค่าแรงดันแอโนดจากศูนย์ให้สูงขึ้นทางบวก หรือในทิศฟอว์เวิร์ดเราจะเห็นกระแส I_A เพิ่มขึ้นจากศูนย์เพียงเล็กน้อย เรียกว่า “เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแส” แต่เมื่อแรงดัน V_A เพิ่มขึ้นสูงถึงค่าแรงดัน V_{BO} ซึ่งเรียกว่า “แรงดันพังข้าม” (breakover voltage) แล้วเอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้เอง โดยต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง เรียกว่า “เวลาเปิดกระแส” (turn-on-time) เราเรียกช่วงนี้ว่า อาณาบริเวณปิดกระแส หรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิศฟอว์เวิร์ด (cut-off region หรือ forward blocking region)

ถ้าเราควบคุมกระแส I_A ให้เพิ่มค่าสูงขึ้นทีละน้อยด้วยการเพิ่มแรงดันแอโนด E_{AA} เราจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ V_A ดังแสดงในรูปที่ 4.9(ข) ซึ่งเมื่อภายหลังที่ค่าแรงดัน V_A นี้ได้ผ่านค่าแรงดันพังข้าม V_{BO} แล้วเราสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้ออกได้เป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงที่แรงดันแอโนด V_A ลดค่าลงจากแรงดันพังข้าม V_{BO} ไปสู่ค่า V_H และกระแส I_A เพิ่มขึ้นจาก I_{BO} (อยู่ตรงจุดเกินแรงดันพังข้าม V_{BO}) ไปสู่ค่า I_H (อยู่ตรงจุด V_H) โดยกระแส I_H นี้เป็นค่ากระแสที่น้อยที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแส เรียกกระแสนี้ว่า “กระแสยึด” (holding current) โดยช่วงนี้เป็นช่วงของเอสซีอาร์กำลังเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณของความต้านทานค่าลบ” (negative resistance region) ช่วงที่สองเป็นช่วงที่กระแส I_A มีค่าใหญ่กว่ากระแสยึด I_H เล็กน้อยไปจนถึงค่าที่

ใหญ่มากมาย โดยแรงดันแอโนดเพิ่มค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเรียกช่วงที่สองนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแสหรืออาณาบริเวณอิ่มตัว” (high conducting region หรือ saturation region) กระแส I_A ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้มีค่าใหญ่มากจะทำอันตรายต่อเอสซีอาร์ให้ชำรุดเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทาน R_A ที่มีค่าใหญ่เข้าต่อเป็นอนุกรมในวงจรแอโนดเพื่อจำกัดกระแส I_A ไม่ให้ใหญ่มากเกินไป ถ้าเราต้องการให้เอสซีอาร์ที่อยู่ในสถานะเปิดกระแสกลับไปสู่สถานะปิดกระแส ให้เราลดกระแสแอโนด I_A ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสยึด I_H ในขณะที่ $I_G = 0$ ยังมีกระแสอีกชื่อหนึ่งคือ “กระแสลatching” (latching current) I_L ซึ่งนิยามว่าเป็นกระแสที่เล็กที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแสทันทีที่ทันใดภายหลังจากเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสไปสู่สภาวะเปิดกระแสโดยปลดเอาสัญญาณป้อนเข้าเกิดออก ซึ่งเมื่อเราได้ลดกระแส I_H ให้ต่ำกว่ากระแส I_L ได้แล้ว เอสซีอาร์จะหยุดเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณปิดกระแส หรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิสฟอว์เวิร์ด (forward blocking region) การเปลี่ยนสภาวะนี้ต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง เรียกว่า “เวลาปิดกระแส” (turn-off time) t_q การลดกระแสแอโนดให้ต่ำกว่ากระแสลatching I_L แล้วเปลี่ยนกลับเพิ่มกระแสสูงขึ้นใหม่ในระยะเวลาที่สั้นกว่าเวลาปิดกระแสของเอสซีอาร์ แล้วเอสซีอาร์จะกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแสได้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องใช้แรงดันแอโนด V_A สูงมาก ซึ่งเมื่อเราจัดให้ I_G มีค่าใหญ่มากขึ้นจะยังทำให้แรงดันพังข้ามของเอสซีอาร์ต่ำลง

เมื่อเราจัดให้แรงดันแอโนด V_A มีค่าลบหรือแรงดันกลับ (reverse voltage) กระแสแอโนดจะไหลกลับทางและมีค่าน้อยมาก เรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณกั้นกระแสไหลกลับ” (reverse blocking region) ต่อเมื่อเราเพิ่มค่าแรงดันแอโนดกลับไปจนถึงค่าที่เรียกว่า “แรงดันพังทะลุกลับ” (reverse breakdown voltage) กระแสแอโนดจะไหลเพิ่มค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปผู้ผลิตเอสซีอาร์จะออกแบบให้เอสซีอาร์มีค่าแรงดันพังทะลุกลับมีค่าเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่าแรงดันพังข้ามทิสฟอว์เวิร์ดในขณะที่ $I_G = 0$

4.3.1 การจุดชนวนไทรสเตอร์

ไทรสเตอร์สามารถเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้โดยอาศัยกระบวนการป้อนกลับค่าบวกที่เกิดขึ้นในตัวไทรสเตอร์ ถ้าเราสามารถควบคุมให้มีกระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ เราก็สามารถจุดชนวน (trigger) ให้ไทรสเตอร์เปิดกระแสได้

วิธีการจุดชนวนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ในโครงงานนี้ได้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

การป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกต การป้อนแรงดันเข้าที่ขั้วเกตของเอสซีอาร์ เป็นผลให้มีค่ากระแสเกตเพิ่มสูงขึ้นและเกิดมีกระบวนการป้อนกลับค่าบวกเกิดขึ้น เอสซีอาร์ก็จะเปิดนำกระแสได้ วิธีการนี้เป็นวิธีที่เรานิยมใช้จุดชนวนให้ทรিসเตอร์ให้เปิดนำกระแสทั่ว ๆ ไป

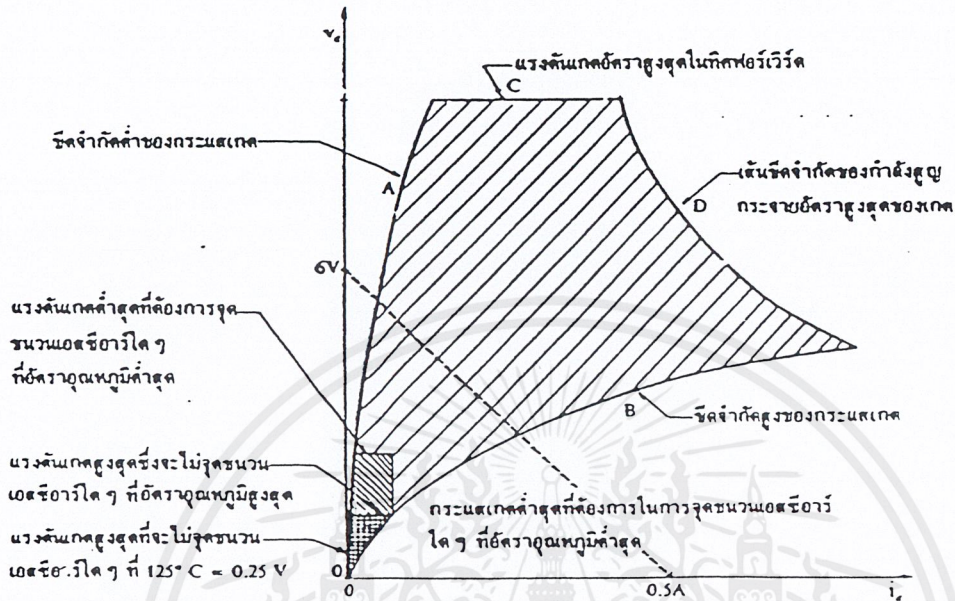
สัปดาห์ที่ดีที่ป้อนให้เกตต้องสามารถให้กระแสเกตเป็นพัลส์ที่มีส้นหน้าสูงชัน และเนื่องจากเมื่อทริสเตอร์ เปิดกระแสก็สามารถนำกระแสต่อไปได้โดยไม่ต้องการกระแสเกตอีก ดังนั้นกระแสเกตควรเป็นพัลส์ที่มีช่วงสั้น ๆ แต่มีความสูงของพัลส์สูงขึ้นเมื่อช่วงของพัลส์สั้นลง ก็สามารถทำให้ทริสเตอร์เปิดกระแสได้ดีและทำงานเชื่อถือได้ โดยลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกตจะคล้ายกับลักษณะสมบัติของไดโอด แต่จะเปลี่ยนบั้งระหว่างทริสเตอร์แต่ละตัวและได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นอาณาบริเวณที่ล้อมรอบด้วยขีดจำกัดต่ำและขีดจำกัดสูงของกระแสเกต ค่าแรงดันเกตสูงสุด และเส้นไฮเพอร์โบลาที่แทนกำลังสูงสุดของเกต ภายในอาณาบริเวณนี้เราสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ

บริเวณที่หนึ่ง อยู่ใกล้จุดกำเนิดและแสดงด้วยเส้นแรงงัดกันเป็นบริเวณที่ถูกจำกัดด้วยค่าแรงดันเกตสูงสุดที่ไม่สามารถจุดชนวนทริสเตอร์ใด ๆ แต่ทริสเตอร์อาจทำงานบริเวณนี้เมื่อทริสเตอร์ไม่ต้องการกระแสเกต เช่นการจุดชนวนด้วยแรงดันพังทะลุที่ป้อนเข้าที่เอโนด หรือจุดชนวนด้วย dv/dt วิธีการเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งรบกวนการเปิดทริสเตอร์ให้นำกระแสตามที่ต้องการ ซึ่งต้องหาวิธีการป้องกัน

บริเวณที่สอง แสดงด้วยเส้นแรงงัด ๆ เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบริเวณแรกซึ่งแสดงตำแหน่งของจุดจุดชนวนต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ล้อมรอบด้วยแรงดันเกตและกระแสเกตที่มีค่าต่ำสุดที่แท้จริงของทริสเตอร์ทุกตัว โดยถ้าใช้จุดจุดชนวนอยู่ในบริเวณนี้วงจรเกตต้องการกำลังสูงเมื่ออุณหภูมิของรอยต่อมีค่าต่ำลง เกตก็ยิ่งต้องการกำลังป้อนเข้าแรงขึ้น เพื่อเปิดให้ทริสเตอร์นำกระแส บริเวณนี้จึงไม่ควรใช้เพราะว่า สัญญาณในบริเวณนี้ไม่สามารถจุดชนวนทริสเตอร์ได้ทุกตัวเสมอไปหรืออาจไม่สามารถจุดชนวนทริสเตอร์ใด ๆ แม้แต่ตัวเดียวก็เป็นได้

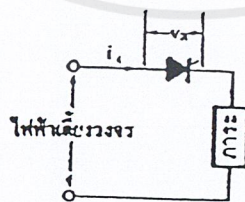
บริเวณที่สาม แสดงด้วยเส้นแรงงาห่าง ๆ เป็นบริเวณที่แสดงตำแหน่งของจุดจุดชนวนที่ใช้ได้ดีและทำงานเชื่อถือได้ จึงเป็นบริเวณที่ชอบใช้ขั้ววงจรเกต ซึ่งมีเส้นล้อมรอบ A,B,C และ D โดย A เป็นเส้นขีดจำกัดสูงของกระแสเกต C เป็นเส้นที่ระบุถึงเส้นแรงดันเกตอัตราสูงสุดในทิสฟอร์เวิร์ด และ D เป็นเส้นขีดจำกัดของกำลังสูญเสียกระจายอัตราสูงสุด ถ้าจุดของการจุดชนวนอยู่ในบริเวณนี้ทริสเตอร์จะเปิดกระแสเสมอ ถ้าจุดจุดชนวนอยู่ในส่วนล่างซ้ายมือของบริเวณจะเป็นจุดที่เหมาะสมในการใช้งาน ถ้าจุดจุดชนวนอยู่ในส่วนบนขวามือของอาณาบริเวณ จะทำให้ทริส

เตอร์เปิดกระแสอย่างรวดเร็วแต่ต้องการกระแสเกตสูงซึ่งอาจต้องใช้ในวงจรบางชนิดถ้าหากจุดจุด
ขนวนอยู่นอกบริเวณนี้จะทำให้ไทรสเตอร์เกิดชำรุดเสียหาย

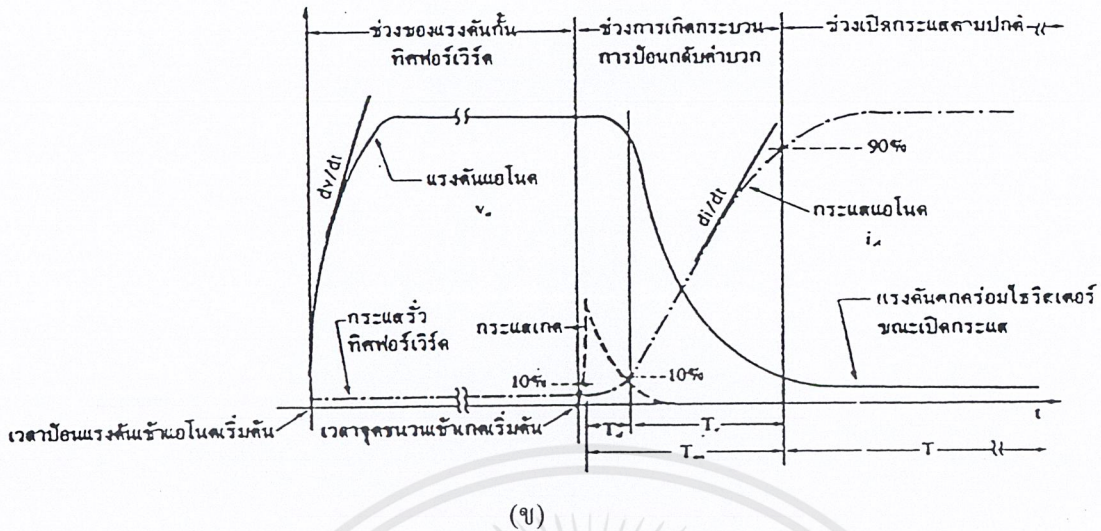


รูปที่ 4.10 เส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันกับกระแสของเกต

เมื่อไทรสเตอร์ได้เปิดกระแสจะต้องใช้เวลาชั่วครู่หนึ่งจึงจะสิ้นสุดกระบวนการนี้ โดยจะมีศักย์คร่อมไทรสเตอร์เปลี่ยนแปลงจากแรงดันพังทะลุลดลงสู่ศักย์ตกคร่อมไทรสเตอร์ขณะเปิดกระแส (ซึ่งมีค่าต่ำประมาณ 1-1.5 โวลต์) และมีกระแสที่เปลี่ยนแปลงจากค่าน้อยขึ้นไปหาค่ามากซึ่งจะถูกจำกัดไว้ด้วยความต้านทานภาระดังแสดงในรูป 4.11 และมีนิยามเกี่ยวกับเวลา ในการเปิดกระแสต่าง ๆ



(ก)



รูปที่ 4.11 (ก) วงจรและการเปลี่ยนแรงดันของไทรสเตอร์ขณะเปิดกระแสไทรสเตอร์กับภาระ
(ข) การเปลี่ยนแปลงกระแส

รูปที่ 4.11(ข) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของแรงดันและกระแสในระหว่าง ไทรสเตอร์เปิดกระแส ซึ่งเราสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่หนึ่ง เป็นช่วงที่ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะแรงดันกั้นทิศฟอร์เวิร์ดซึ่งเป็นสถานะที่เกิดขึ้นตอนเริ่มต้นของการป้อนแรงดันเข้าไทรสเตอร์แต่ยังไม่จุขนวน ประจุต่าง ๆ ในไทรสเตอร์จะมีการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งรอยต่อต่าง ๆ เข้าสู่สถานะคงที่ จะทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปยังแรงดันป้อนเข้าถ้าแรงดันนี้ไม่สูงเกินกว่าแรงดันพังข้าม V_{BO} จึงยังไม่มีกระแสเปิดกระแส มีแต่เพียงกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อย โดยรอยต่อ J_2 อยู่ในสถานะไบแอสกลับ ค่าความเก็บประจุรอยต่อ J_2 จะช่วยส่งกระแสจำนวนมากผ่านเข้าสู่ชั้น P_3 ซึ่งเป็นชั้นที่มีขั้วเกตเข้าต่อจึงอาจเป็นผลทำให้ไทรสเตอร์เปิดกระแสได้โดยเราไม่ต้องการ เพื่อให้ไทรสเตอร์ทำงานได้ถูกต้องเราต้องพิจารณาอัตรา dv/dt สูงสุดที่ไทรสเตอร์ที่สามารถทนได้

ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อป้อนสัญญาณจุขนวนเข้าที่เกตซึ่งเป็นผลทำให้ไทรสเตอร์เปิดกระแส การเปิดกระแสจะเริ่มต้นที่บริเวณเล็ก ๆ ของชั้นตรงที่เกตเข้าติดต่อกับแล้วแผ่ขยายออกไปด้วยอัตราเร็วประมาณ 0.1 มิลลิเมตรต่อไมโครวินาที ถ้าบริเวณเกตมีพื้นที่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จะต้องการเวลาประมาณ 100 ไมโครวินาที ที่จะเปิดกระแสได้เต็มพื้นที่เกต ในขณะที่นั้นแรงดันทิศฟอร์เวิร์ดสามารถเข้าสถานะคงที่ได้ก่อนกระแส ทั้งนี้เพราะว่าการเปิดกระแสเริ่มต้นที่บริเวณเล็กมาก กระแสจึงมีความหนาแน่นสูงมาก ถ้าอัตราการเพิ่มกระแสมีค่าสูงมากด้วย ก็จะเป็นสาเหตุให้ความร้อนเกิดขึ้นในบริเวณ

เล็ก ๆ นั้น ซึ่งสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ชำรุดเสียหายได้ จึงทำให้เราต้องพิจารณาถึงอัตรา di/dt สูงสุดขณะเปิดกระแสของทรานซิสเตอร์ด้วย

ช่วงที่สาม เป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์เปิดกระแสตามปกติ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อการเปิดกระแสได้แผ่ขยายไปทั่วอาณาบริเวณของชั้น P_3 ทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสดังกล่าวข้างต้น ทำให้เรานิยามได้ว่า

เวลาประวิง (delay time) : T_d เป็นช่วงเวลาระหว่างเวลาที่กระแสพัลส์ของเกตมีค่า 10 % ของค่าสูงสุดไปถึงเวลาที่กระแสแอโนดในทิสฟอว์เวิร์ดมีค่าสูงถึง 10 % ของค่าสูงสุด ในระหว่างที่ทรานซิสเตอร์เปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสเมื่อวงจรมีภาระเป็นความต้านทาน

เวลาเพิ่มค่าขึ้น (rise time) : T_r เป็นช่วงเวลาของกระแสแอโนดในทิสฟอว์เวิร์ดระหว่างเวลาที่แอโนดมีค่า 10 % เพิ่มค่าสูงขึ้นถึง 90 % ของค่าสูงสุด ในระหว่างที่ทรานซิสเตอร์เปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสเมื่อวงจรมีภาระเป็นความต้านทาน

เวลาเปิดกระแส (turn-on time) : T_{on} เป็นช่วงเวลาการเปิดกระแสของทรานซิสเตอร์ โดยนับตั้งแต่ตอนเริ่มต้นของเวลาประวิงไปจนถึงตอนสิ้นสุดของเวลาเพิ่มค่าขึ้น $T_{on} = T_r + T_d$ หรือหมายถึงเวลาที่เริ่มต้นของการจุดชนวนไปจนถึงเวลาที่ประจุต่าง ๆ ได้เข้าสมดุลย์ตลอดทั่วทรานซิสเตอร์ พร้อมกันนั้นแรงดันตกคร่อมในทิสฟอว์เวิร์ดได้เข้าสู่สถานะคงตัว

ขอให้สังเกตว่า ทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป มีเวลาเพิ่มขึ้นสั้น ทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส di/dt มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป มีค่า di/dt สูงสุดได้ถึง 1,000 แอมแปร์ ต่อไมโครวินาที หรือ 1 แอมแปร์ต่อนาโนวินาที อัตรา di/dt มีค่าสูงอาจทำให้ทรานซิสเตอร์ชำรุดได้

4.3.2 การปิดกระแสของทรานซิสเตอร์

การปิดกระแสของทรานซิสเตอร์ หมายถึง การหยุดนำกระแสในทิสฟอว์เวิร์ดทั้งหมดของทรานซิสเตอร์ โดยป้อนแรงดันกลับคืนเข้ากับแอโนดใหม่และไม่ป้อนสัญญาณเกตอีก แล้วจะไม่มีกระแสขึ้นอีก การปิดกระแสของทรานซิสเตอร์สามารถทำได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ

1 การทำให้หยุดไหลโดยธรรมชาติ ทำได้โดยการลดกระแสแอโนดลงให้ต่ำกว่า ค่ากระแสยึด (holding current) ของทรานซิสเตอร์(อัตรากระแสแอโนดปกติมีค่ามากกว่าค่ากระแสยึดประมาณ 1000 เท่า)

2 การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันกลับ โดยการป้อนแรงดันกลับเข้าระหว่างแอโนดและแคโทด(คือป้อนแรงดันให้แคโทดมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับแอโนด)ของทรานซิสเตอร์ จะทำให้

รอยต่อถูกไบแอสกลับกรณีที่ไทรสเตอร์เปิดกระแสโดยรอยต่อ J_1 และ J_3 (รูปที่ 4.8ก) จะถูกไบแอสกลับ แต่รอยต่อ J_2 จะถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส พาหะต่าง ๆ จะไหลสวนทางกับกรณีไทรสเตอร์เปิดกระแส ทำให้กระแสไหลกลับจากแคโทดสู่แอโนด กระแสนี้จะไหลกระชากและถูกจำกัดค่า di/dt ด้วยค่าความต้านทานของวงจรภายนอกซึ่งจะไหลอยู่ช่วงระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งส่วนใหญ่ของพาหะที่รอยต่อ J_1 และ J_3 ได้เคลื่อนที่ออกไปหมดจนกระทั่งรอยต่อ J_1 และ J_3 อยู่ในสภาวะกั้นกระแส ทำให้กระแสที่รอยต่อนี้มีค่าลดลงเป็นศูนย์ ขณะเดียวกันรอยต่อ J_2 ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสและมีประจุจำนวนมากตกค้างที่รอยต่อนี้ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลจะกลับเข้ารวมกัน เป็นผลให้การป้อนกลับค่าบวกลดค่าลงต่ำเป็นศูนย์ในช่วงครู่หนึ่งแล้วไทรสเตอร์ก็เข้าสู่สภาวะปิดกระแส ถ้าอุณหภูมิของรอยต่อมีค่าสูงหรือสาเหตุอื่น การกลับเข้ารวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลจะกินเวลานานออกไปทำให้ไทรสเตอร์ใช้เวลาปิดกระแสนานออกไปด้วย

4.3.3 การนำไทรสเตอร์มาต่ออนุกรม

ในบางกรณีเรานำไทรสเตอร์มาต่ออนุกรมกันหลายตัว เพื่อใช้กับแรงดันเลี้ยงวงจรที่มีขนาดสูงกว่าอัตราแรงดันของไทรสเตอร์แต่ละตัวได้ โดยแรงดันฟอร์เวิร์ดหรือแรงดันกลับจะแบ่งไปตกคร่อมไทรสเตอร์แต่ละตัว ซึ่งตามความเป็นจริงแรงดันที่ตกคร่อมไทรสเตอร์เหล่านั้นอาจมีค่าไม่เท่ากันทุกตัว ถึงแม้ว่าเราจะใช้ไทรสเตอร์ตัวเดียวกัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.12(ก) เมื่อเราใช้เอสซีอาร์ที่มีอัตราแรงดันปกติ V_{Drm} เท่ากันสองตัวต่ออนุกรมกัน เพื่อคาดหวังว่าจะใช้กับแรงดันเลี้ยงวงจร V ที่มีค่า $2 V_{Drm}$ เนื่องจากเอสซีอาร์ที่ต่ออนุกรมกันจะต้องมีกระแสไหลผ่านเท่ากัน แต่เพราะว่าเอสซีอาร์ทั้งสองมีลักษณะสมบัติไม่เหมือนกันเป็นเอกลักษณ์ จึงมีแรงดันกั้นกระแสฟอร์เวิร์ดตกคร่อมเอสซีอาร์ไม่เท่ากัน สมมติว่าแรงดันนี้มีค่า V_1 และ V_2 โดยให้ $V_1 < V_2$ และ V_2 ต้องมีค่าไม่เกิน $V_{(BO)2}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ข) ซึ่งเราจะเห็นว่าเอสซีอาร์ทั้งสองอยู่ในสภาวะที่จะเปิดกระแสไม่พร้อมกัน ครั้นเมื่อมีเอสซีอาร์ตัวหนึ่งเปิดกระแสขึ้นก่อน จะทำให้แรงดันตกคร่อมมีค่าน้อยมาประมาณ 1- 1.5 โวลต์ เป็นผลทำให้แรงดันของสายไฟเลี้ยงวงจรซึ่งมีค่าประมาณ $2V_{Drm}$ ไปตกคร่อมเอสซีอาร์ตัวที่เปิดกระแสเข้าเป็นผลให้เอสซีอาร์ตัวที่เปิดกระแสเสียรัศเสียหายนได้ เราต้องป้องกันการเสียหายในกรณีนี้โดยเอาตัวความต้านทานเข้าต่อขนานเพื่อแบ่งแรงดันเฉลี่ยไปทั่ว ๆ ทุกตัวของเอสซีอาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นกรณีเอสซีอาร์ n ตัวเข้าต่ออนุกรมกัน R_p เป็นค่าความต้านทานที่ใช้ต่อขนานกับเอสซีอาร์ โดยสมมติให้กรณีนี้เป็นกรณีที่เวลาที่สุดของการแบ่งแรงดันไม่เท่ากันโดยที่เอสซีอาร์ตัวที่หนึ่ง SCR_1 มีกระแสรั่วน้อยที่สุด $I_1(\min)$ เอสซีอาร์ที่เหลือ $(n-1)$ ตัวมีกระแสรั่ว $I_1 \max$ เท่ากันหมดทุกตัว เราจะเห็นได้ว่า

$$I_1(\max) - I_1(\min) = \Delta I_1 \quad (4.22)$$

เราจะเห็นว่า $I_1 > I_2$ เมื่อกระแส I_1 และ I_2 เป็นกระแสที่ไหลอยู่ในความต้านทาน R_p ตัวที่หนึ่ง และตัวที่เหลืออยู่ตามลำดับ เราจะเขียนได้ว่า

$$I_2 = I_1 - \Delta I_1 \quad (4.23)$$

ถ้าเราให้ V_p เป็นค่าแรงดันกั้นสูงสุดของ SCR₁ เราจะเขียนได้ว่า

$$V_p = I_1 R_p \quad (4.24)$$

และ

$$E = V_p + (n-1)R_p I_2 \quad (4.25)$$

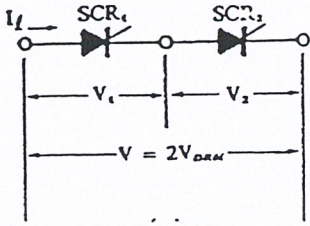
เมื่อ E เป็นค่าแรงดันกั้นสูงสุดที่ป้อนเข้าอนุกรมเอสซีอาร์ทั้งหมดด้วยสมการที่ (4.23) ถึงสมการที่ (4.25) เราจะได้

$$R_p \leq \frac{nV_p - E}{(n-1)\Delta I_1} \quad (4.26)$$

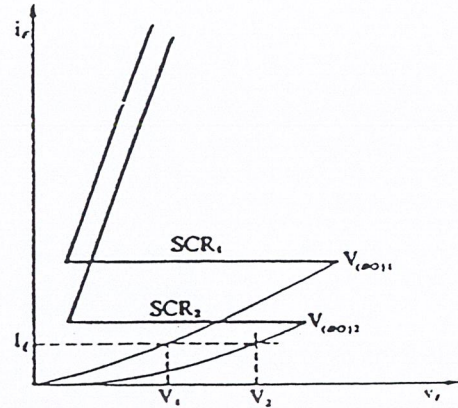
โดยทั่วไป ผู้ผลิตจะให้ค่ากระแสกั้นสูงสุดไว้สำหรับเอสซีอาร์หนึ่ง ๆ และถ้าเราใช้กรณีเลวที่สุดและสมมติให้ $I_1(\min)$ มีค่าเท่ากับศูนย์สมการที่ (4.26) จะกลายเป็นสมการที่ (4.27) ข้างล่างนี้

$$R_p \leq \frac{nV_p - E}{(n-1)I_1(\max)} \quad (4.27)$$

ความต้านทานเหล่านี้อาจจะแบ่งเฉลี่ยให้แรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ไม่เท่ากันทุกตัว



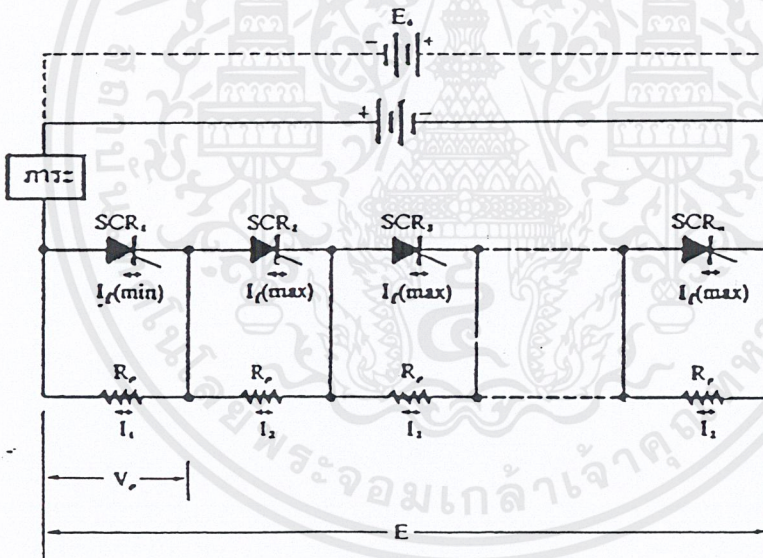
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) เอสซีอาร์สองตัวต่ออนุกรม

(ข) แรงดันแบ่งตกคร่อมเอสซีอาร์สองตัวมีไม่เท่ากัน

รูปที่ 4.13 การใช้ความต้านทานเข้าต่อขนานเพื่อแบ่งเฉลี่ยแรงดันกัน
ให้ไปตกคร่อมเอสซีอาร์แต่ละตัว

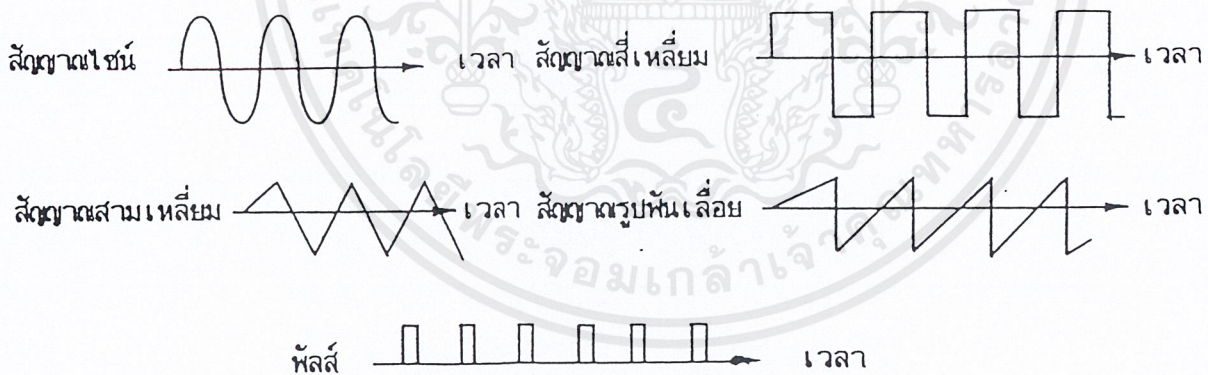
4.4 วงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรที่ใช้กันมากและพบกันบ่อยมากวงจรหนึ่งนอกเหนือจากวงจรขยายสัญญาณในอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ เช่น โทรทัศน์ วิทยุ เครื่องเล่นเทป คอมพิวเตอร์ และวิทยุรับส่ง เป็นต้น หรือแม้แต่ของเด็กเล่นก็ยังพบกับวงจรออสซิลเลเตอร์เช่นกัน

วงจรออสซิลเลเตอร์มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์แบบจูนคอลเลกเตอร์ (Tuned Collector Oscillator) วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเฟสชิฟท์ (Phase Shift Oscillator) วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวินบริดจ์ (Wien Bridge) วงจรออสซิลเลเตอร์แบบโคลพิทซ์ (Colpitts Oscillator) ฮาร์ตลีย์ออสซิลเลเตอร์ (Hartley Oscillator) เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงหลักการและวิธีการออกแบบวงจรดังกล่าวต่อไป

4.4.1 หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ คือ วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมานั้นเรียกว่า “รูปคลื่น” มีทั้งคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave) คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) คลื่นรูปสามเหลี่ยม (Triangle wave) คลื่นรูปฟันเลื่อย (sawtooth wave) หรือสัญญาณพัลส์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



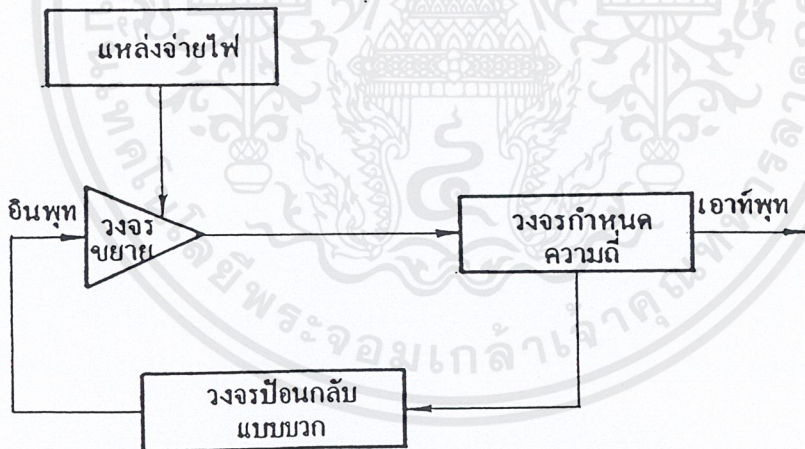
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะรูปคลื่นชนิดต่างๆที่สามารถ
ผลิตขึ้นมาจากวงจรออสซิลเลเตอร์

4.4.2 หน้าที่สำคัญของวงจรออสซิลเลเตอร์

- 1 สร้างสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ออสซิลโลสโคป เป็นต้น
- 2 ให้จังหวะและช่วงเวลาที่ถูกต้องแน่นอนแก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 3 ให้สัญญาณความถี่ในย่านต่างๆเพื่อใช้ในการทำงานของวงจรโดยรวม

เงื่อนไขวงจรที่วงจรจะทำการออสซิลเลตสัญญาณออกมาได้

- 1 ต้องมีแหล่งจ่ายไฟให้แก่วงจรออสซิลเลเตอร์
- 2 วงจรนั้นต้องมีวงจรกำหนดความถี่ที่แน่นอนในการออสซิลเลตเช่น อาจจะเป็น 1 เฮิร์ตซ์ จนถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์
- 3 วงจรนั้นต้องมีกำลังขยายแรงดันที่มากพอที่จะให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาตามที่กำหนดไว้
- 4 วงจรนั้นต้องมีส่วนของวงจรป้อนกลับหรือวงฟีดแบ็ก (Feed Back Circuit) จากเอาต์พุตกลับมาเข้าที่ส่วนอินพุตเป็นแบบบวกหรือที่เรียกว่าโพสิทีฟฟีดแบ็กนั่นเอง(Positive Feed Back) ซึ่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมหรือแผนผังตามรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 ไดอะแกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์

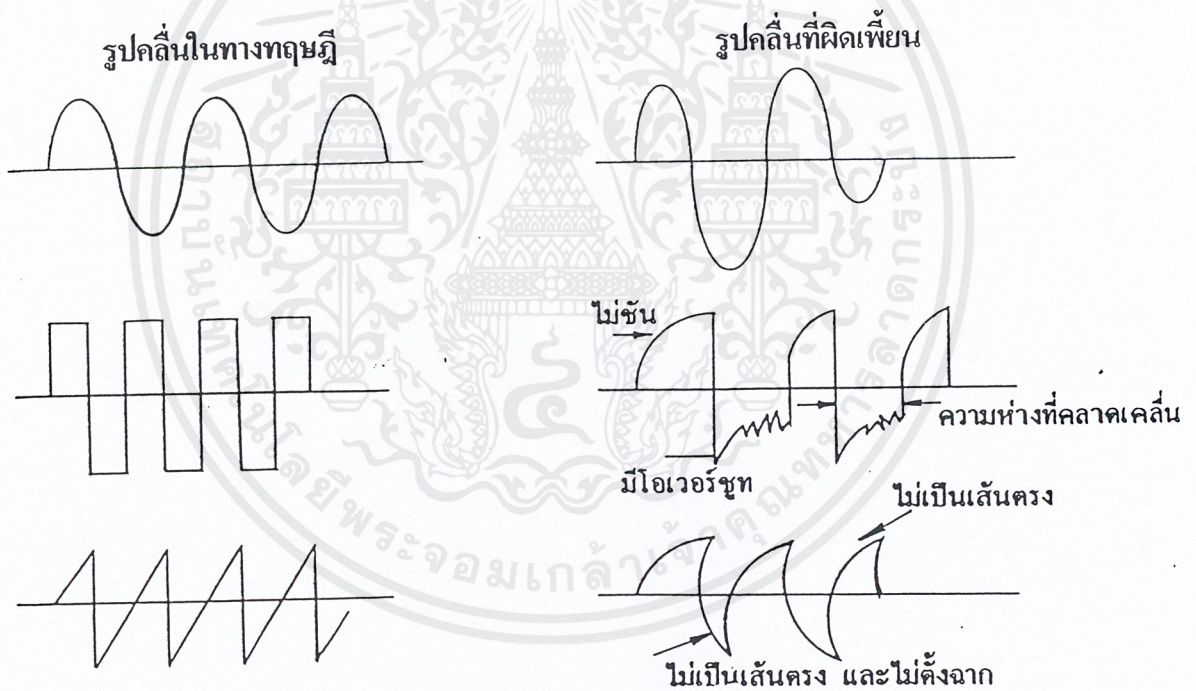
ไดอะแกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์แสดงส่วนของวงจรป้อนกลับแบบบวก ในส่วนของวงจรขยายที่ใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นอาจจะออกแบบโดยใช้ออฟแอมป์ หรือเป็นไอซีสำเร็จรูป เช่น ไอซีไทม์เมอร์เบอร์ 555 หรือ 8038 หรืออาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ก็ได้ส่วนวงจรกำหนดความถี่นั้นส่วนใหญ่แล้วจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้า เช่น R, L, C หรือคริสตัล

4.4.3 ลักษณะของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ดี

จะต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่างๆดังต่อไปนี้

1 มีความเพี้ยนของรูปคลื่นต่ำ (Low distortion)

ลักษณะของความเพี้ยนมีได้หลายลักษณะด้วยกันคือ ถ้าเป็นคลื่นรูปไซน์จะเรียกว่าความเพี้ยนฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion) คือ ถ้าสัญญาณเพี้ยนแล้วจะไม่เหมือนรูปไซน์นักจะบิดๆเบี้ยวๆไปตามความเพี้ยนว่ามีมากหรือน้อย สาเหตุอาจจะเกิดขึ้นได้จากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยาย (Non-Linear) หรือถ้าหากตัวคาปาซิเตอร์หรืออินดักเตอร์ทำงานผิดพลาดหรือผิดค่า ก็ล้วนแต่มีผลให้สัญญาณผิดเพี้ยนไปได้ สำหรับลักษณะของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปในอุดมคติที่อยากจะให้เป็นนั้นได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่น

ที่ผิดเพี้ยนและรูปคลื่นในอุดมคติ

ลักษณะความเพี้ยนของสัญญาณเมื่อเทียบกับรูปคลื่นในอุดมคติ จากรูปจะเห็นว่าในกรณีของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความเพี้ยนจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเพี้ยนในลักษณะที่ทำให้ไม่เรียบขึ้นหรือทำให้เกิดโอเวอร์ชูท (Over Shoot) อย่างไร

อย่างหนึ่งขึ้นหรือบางทีก็อาจจะทำให้ความห่างของลูกคลื่นแต่ละลูกไม่สม่ำเสมอ นั่นคือ เกิดความผิดเพี้ยนทางเวลาขึ้น

ส่วนในรูปคลื่นแบบฟันเลื่อย จะพัวพันในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงหรือนอนลิเนียร์(Non-Linear Distortion) และเวลาในการลดระดับสัญญาณลงมานั้นไม่ตั้งฉากแต่จะเกิดเวลาหน่วงหรือดีเลย์(Delay Time)ของสัญญาณอยู่บ้าง

2 มีเสถียรภาพทางความถี่ (Frequency stability)

ในการใช้งานวงจรออสซิลเลเตอร์ร่วมกับวงจรอื่นๆนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องให้ค่าความถี่ของสัญญาณคลาดเคลื่อนไปอย่างมากดังเช่น

1.แรงดันของแหล่งจ่ายไฟเปลี่ยนแปลง เช่น ไฟตก เป็นต้น

2.โหลดของวงจรเปลี่ยนแปลงไป

3.ค่าของอุปกรณ์ที่มีผลต่อการกำหนดความถี่เปลี่ยนแปลง เช่น อุปกรณ์ R, L, C มีคุณภาพไม่ดี มีค่าไม่ตรงกับที่กำหนดเป็นรหัสบนตัวอุปกรณ์ หรือหลังจากใช้งานไปแล้วเสื่อมคุณภาพ เป็นต้น

ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งที่จะพยายามนำเอาแหล่งจ่ายที่มีการปรับระดับแรงดันเอาต์พุตหรือเรกูเลท (Regulated) มาใช้ ซึ่งค่าสัญญาณเอาต์พุตไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของวงจรขยายมากนัก หรือเพิ่มเติมวงจรบัฟเฟอร์เข้าไประหว่างวงจรออสซิลเลเตอร์กับโหลด หรือใช้อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง และทนทานมีอายุการใช้งานได้นานในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำหนดความถี่ เช่น ค่าไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ เป็นต้น หรือเปลี่ยนมาใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีผลึกคริสตัลเป็นตัวกำหนดความถี่ ซึ่งจะได้ความเที่ยงตรงสูงถึง 1 ส่วนใน 10 ล้านส่วน เป็นต้น

3 มีเสถียรภาพทางขนาดของสัญญาณ(Amplitude Stability)

คือ ขนาดหรือแอมพลิจูด(Amplitude) ของสัญญาณจะต้องไม่ขึ้นๆลงๆ นั่นคือค่อนข้างจะคงที่ ทำได้โดยการออกแบบให้มีวงจรปรับอัตราขยายหรือเกน(Gain) ให้คงที่ด้วยวิธีต่างๆกัน

4.5 Complementary push – pull Class AB power amplifier

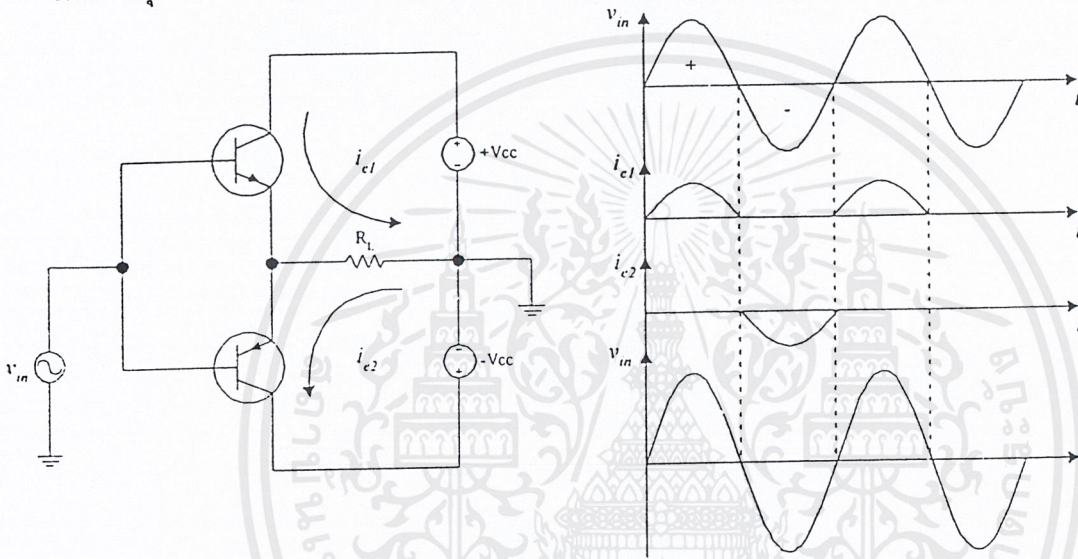
4.5.1 ทฤษฎีและหลักการ

วงจร dual supply complementary โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว แบบ npn และ pnp ต่อกัน แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยใช้แรงดัน 2 ชุดต่อกัน ชุดหนึ่งมีค่า $+V_{cc}$ และอีกชุดหนึ่งมีค่า $-V_{cc}$

พิจารณาสัญญาณอินพุต V_{in} ด้านซ้ายบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q1 npn ทำงานและทรานซิสเตอร์ Q2 pnp ไม่ทำงาน รูปคลื่นการทำงานของวงจรรูปที่ 4.17(ก) แสดงในรูปที่ 4.17(ข) ทำให้เกิดการไหลกระแสอิ่มิตเตอร์-คอลเล็คเตอร์ : I_{C1} ดังรูป

เมื่อครึ่งซีกลบของสัญญาณอินพุตเข้ามา จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 pnp ทำงานและทรานซิสเตอร์ Q1 npn ไม่ทำงานทำให้เกิดกระแส I_{c2} ไหลตามรูป ซึ่งมีทิศตรงข้ามกับ I_{c1} ผลก็คือแรงเอาต์พุตที่คร่อม V_L จะแสดงในรูปกราฟดังสุด

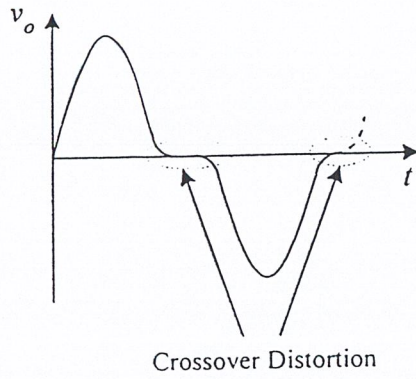
จากการทำงานในลักษณะ Class B เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าน้อย ๆ (โดยประมาณ น้อยกว่า 0.6 V) จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองไม่ทำงาน (cut off) ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต V_o จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงเวลาหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.18 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เกิด Cross over distortion จะทำให้เอาต์พุตออกมาผิดเพี้ยน



รูปที่ 4.17 (ก) วงจร dual supply complementary push pull class B amplifier

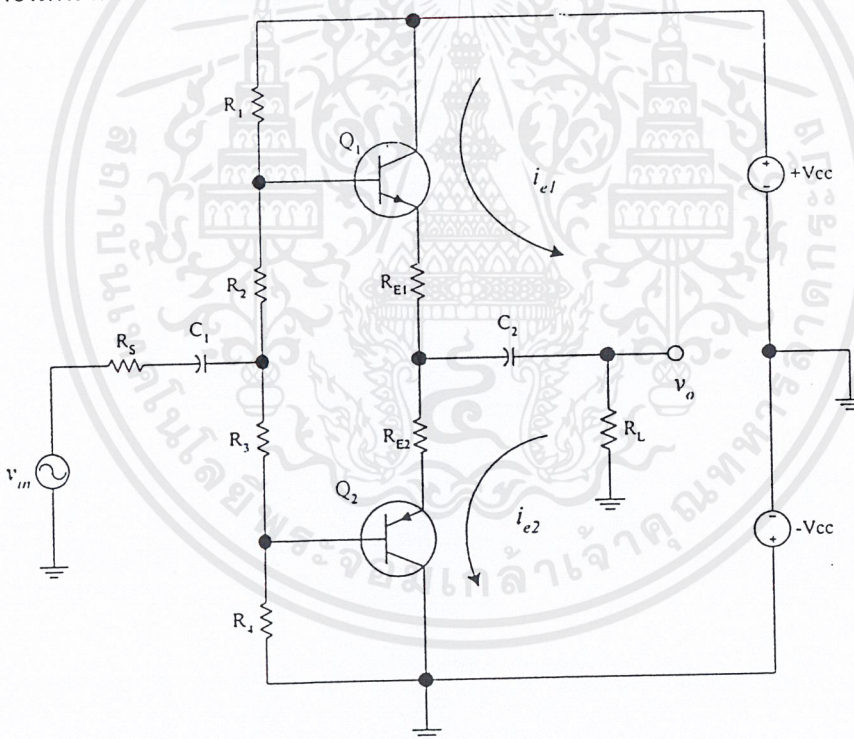
(ข) รูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรในรูป 4.17(ก)

ดังนั้นเพื่อให้ผลของ cross over distortion นั้นหายไปเราจึงต้องทำการไบอัสขาเบสของทรานซิสเตอร์จึงทำให้เกิดมีวงจรอีกลักษณะหนึ่งคือวงจร complementary push-pull โดยที่วงจรแสดงไว้ในรูปที่ 4.19 โดยมีค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 เป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ Q1 ทำงาน และในทำนองเดียวกัน ตัวต้านทาน R_3 และ R_4 จะเป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ Q2 ทำงาน ดังนั้นปัญหาของ cross over distortion จะหมดไป



รูปที่ 4.18 สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในวงจร
class B power amplifier

หลักการทำงานของวงจรในรูปที่ 4.19 จะเหมือนกับการอธิบายการทำงานของ push-pull ดังที่กล่าวในตอนต้น ค่าประสิทธิภาพของวงจร ปกติมีค่าระหว่าง 50-75 %



รูปที่ 4.19 วงจร dual supply complementary class AB power amplifier

บทที่ 5

การออกแบบการทดลอง

การออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลอง

5.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

5.1.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

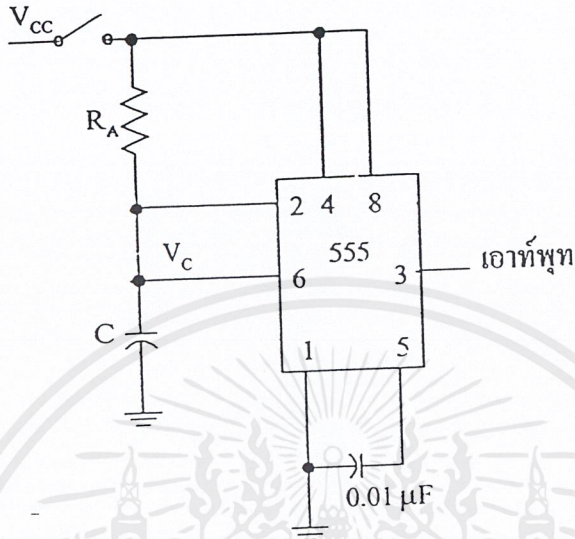
วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง จะใช้หม้อแปลงยกกระดืบแรงดันขึ้น จากนั้นก็ผ่านบริดจ์ไดโอดเป็นตัวเรียงกระแสกลับเป็นกระแสตรง และมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองลดแรงดันกระเพื่อมซึ่งแรงดันกระแสตรงที่ออกมาสามารถปรับค่าได้และระดับแรงดันกระแสตรงที่ออกแบบไว้อยู่ที่ 8 kV โดยมีหม้อแปลงปรับค่าแรงดัน (Variac) เป็นตัวปรับระดับแรงดันเข้าดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรง

5.1.2 วงจรโมโนสเตเบิล

เป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 1 ลูก เพื่อเป็นสัญญาณไปขับทรานซิสเตอร์ให้กำเนิดสัญญาณทริกเอสซีอาร์ โดยวงจรสร้างจากไอซี 555 ซึ่งสามารถปรับค่าความกว้างของพัลส์ได้ โดยการปรับค่า R_A และ C ซึ่งในวงจรนี้ใช้ C มีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครฟารัด และใช้ R_A เป็นตัวความต้าน

ทาน 10 กิโลโอห์ม เพื่อให้ได้ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่เหมาะสมในการทริกเอสซีอาร์และแรงดัน V_{CC} ที่ใช้ในวงจรเท่ากับ 9 โวลต์ วงจรโมโนสเตเบิลแสดงดังรูปที่ 5.2

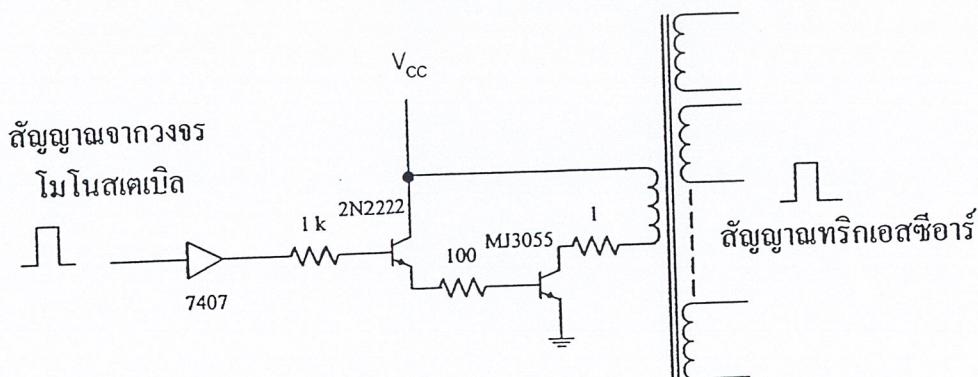


รูปที่ 5.2 วงจรโมโนสเตเบิล

5.1.3 วงจรทริกเอสซีอาร์

การควบคุมการทำงานของเอสซีอาร์ให้ทำงานพร้อมกันใน 1 ชุด สามารถทำได้โดยการใช้หม้อแปลงสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนเข้าที่ขาเกตของเอสซีอาร์เพื่อทริกให้เอสซีอาร์ทำงานโดยได้ออกแบบสร้างหม้อแปลงที่มีขดทางด้านเข้า(primary) 1 ขด และมีขดทางด้านออก(secondary) 8 ขด ซึ่งขดลวด 1 ขด ใช้ในการทริกเอสซีอาร์ 1 ตัว ดังนั้นจึงสามารถทริกเอสซีอาร์ได้พร้อมกัน 8 ตัว โดยหม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงแบบ 1:1 ขนาด 40 VA โดยวงจรทริกเอสซีอาร์แสดงดังรูปที่ 5.3

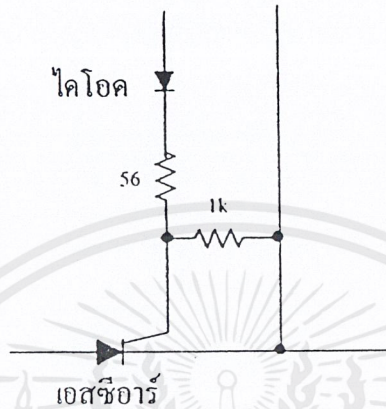
1:1 , 40 VA



รูปที่ 5.3 วงจรทริกเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

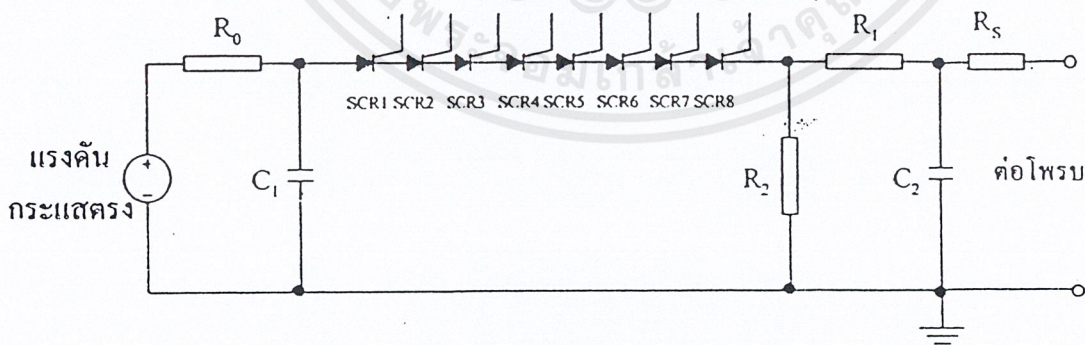
ในส่วนของวงจรป้องกันขาเกตของเอสซีอาร์ใช้ไดโอดทำหน้าที่กั้นกระแสไหลย้อนกลับที่ขาเกต มีตัวความต้านทานขนาด 56 โอห์ม เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลเข้าขาเกต และยังใช้ตัวความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่อคร่อมระหว่างขาเกตและขาแคโทดของเอสซีอาร์ เพื่อคิสดราร์จประจุที่รอยต่อภายในของเอสซีอาร์ ช่วยให้เอสซีอาร์กลับคืนสู่สภาพปกติได้เร็วขึ้นดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรป้องกันเอสซีอาร์

5.1.4 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ออกแบบระดับแรงดันได้ที่ 6 kV ซึ่งจะใช้เอสซีอาร์ 8 ตัว มาต่ออนุกรมกัน โดยเลือกใช้เอสซีอาร์เบอร์ 25RIA120 ซึ่งแต่ละตัวทนแรงดันได้ 1,200 โวลต์ ดังนั้นทั้งวงจรสามารถทนแรงดันได้ 9,600 โวลต์ ดังวงจรในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร

ในโครงงานนี้เลือกใช้วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในรูปที่ 4.3(ข) เนื่องจากประสิทธิภาพของวงจร(ข) มากกว่าของวงจร(ก) กำหนดค่า $C_2 = 1.5 \text{ nF}$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบที่ใช้งานโดยทั่วไป และเพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆควรให้ $C_1 \gg C_2$ ในที่นี้จึงเลือกใช้ค่า $C_1 = 156.7 \text{ nF}$ ออกแบบเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า $1.2/50 \text{ } \mu\text{sec}$ จากตารางที่ 3.2 จะได้ $\frac{1}{\alpha_1} = 68.5 \mu\text{sec}$ และ $\frac{1}{\alpha_2} = 0.405 \mu\text{sec}$ แทนค่าในสมการหาค่า R_1 และ

R_2

$$\text{จาก } C_1 = 156.7 \text{ nF}, \quad C_2 = 1.5 \text{ nF}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{68.5 \times 10^{-6}} \quad (5.1)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{0.405 \times 10^{-6}} \quad (5.2)$$

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - \sqrt{\left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right] \quad (5.3)$$

$$R_1 = 272.6 \text{ โอห์ม}$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - \sqrt{\left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right] \quad (5.4)$$

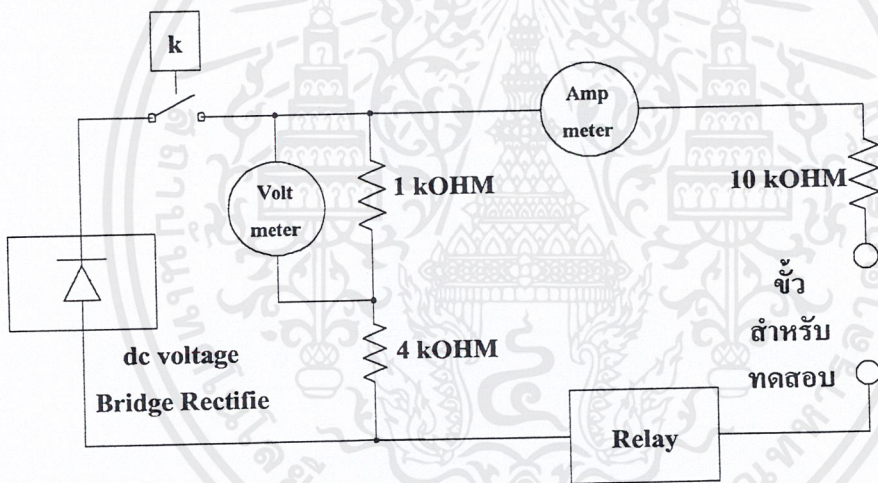
$$R_2 = 432.97 \text{ โอห์ม}$$

R_0 เป็นความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ C_1 มีค่า 140 กิโลโอห์ม C_0 เป็นตัวเก็บประจุช่วยกรองไฟให้เรียบมีค่า $4.167 \text{ } \mu\text{F}$ R_s เป็นความต้านทานจำกัดกระแสลัดวงจรเพื่อป้องกันอุปกรณ์ในวงจรซึ่งมีค่า 50 โอห์ม นำค่าที่คำนวณได้ไปสร้างวงจร และคำนวณประสิทธิภาพของวงจรได้จาก

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{156.7nF}{(156.7 + 1.5)nF} = 99.05\% \quad (5.4)$$

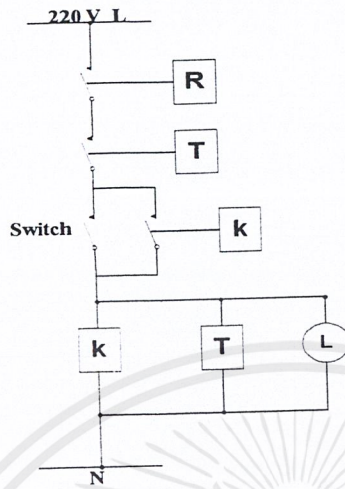
5.2 วงจรทดสอบแรงดันกระแสตรง

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันกระแสตรงสูงสุดตามมาตรฐาน IEEE std 95-1977 (R1991) จะอยู่ที่ 1.7 เท่าของแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงสุดกระแสกลับ ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบจะออกแบบแรงดันทดสอบสูงสุดไว้ที่ 969 โวลต์ ซึ่งจะมีความต้านทานจำกัดกระแส ซึ่งแรงดันทดสอบกระแสตรงจะใช้ความต้านทานมีค่าเท่ากับ 10 เมกะโอห์ม ซึ่งจะให้กระแสออกมาเป็นค่า ไมโครแอมป์ เพื่อดูกระแสแล้ว วงจรทดสอบกระแสตรงจะแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วงจรทดสอบกระแสตรง

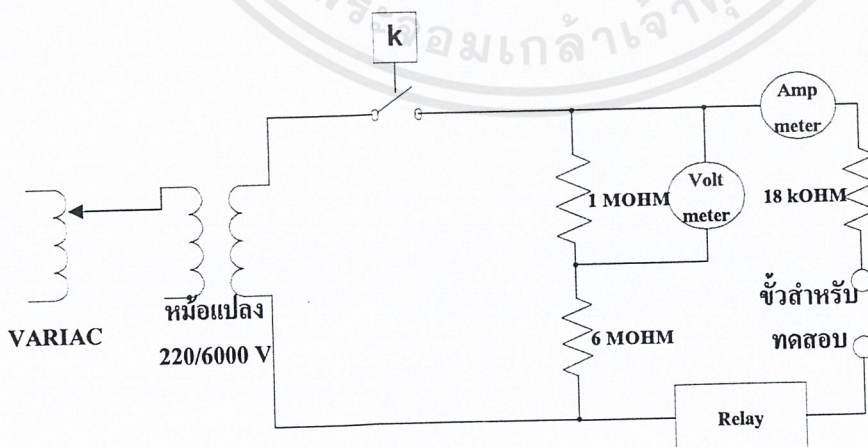
วงจรควบคุมการทดสอบกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วงจรควบคุมการทดสอบกระแสตรง

5.3 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับ

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบแรงดันกระแสสลับตามมาตรฐาน IEC และ NEMA MGI กำหนดไว้สูงสุดที่ $2E + 1kV$ มีค่าเท่ากับ 1760 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานฉนวนไว้ เพื่อจำกัดกระแสไว้ที่ 18 กิโลโอห์ม (kOHM) วงจรทดสอบกระแสสลับแสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งวงจรควบคุมจะเหมือนกับวงจรควบคุมกระแสตรง

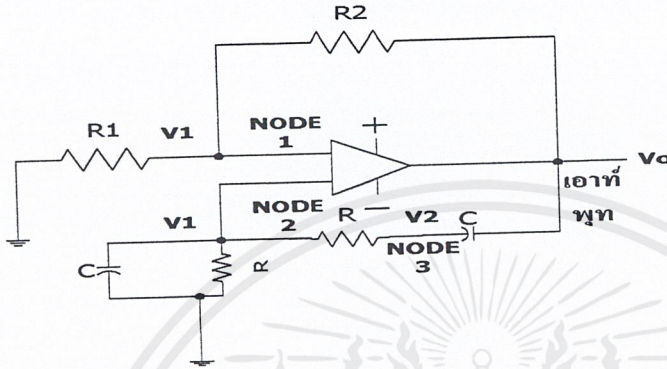


รูปที่ 5.8 วงจรการทดสอบกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 วงจรสร้างความถี่

วงจรสร้างความถี่ จะใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) เป็นตัวสร้างสัญญาณความถี่ 15 kHz โดยใช้ไอซี 741 จากนั้นผ่านวงจรขยายกำลังแบบพุช-พูล (Push-Pull) โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 3055 และ 2955 เพื่อให้ได้รูปคลื่นทั้งบวกและลบ วงจรสร้างความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 5.9



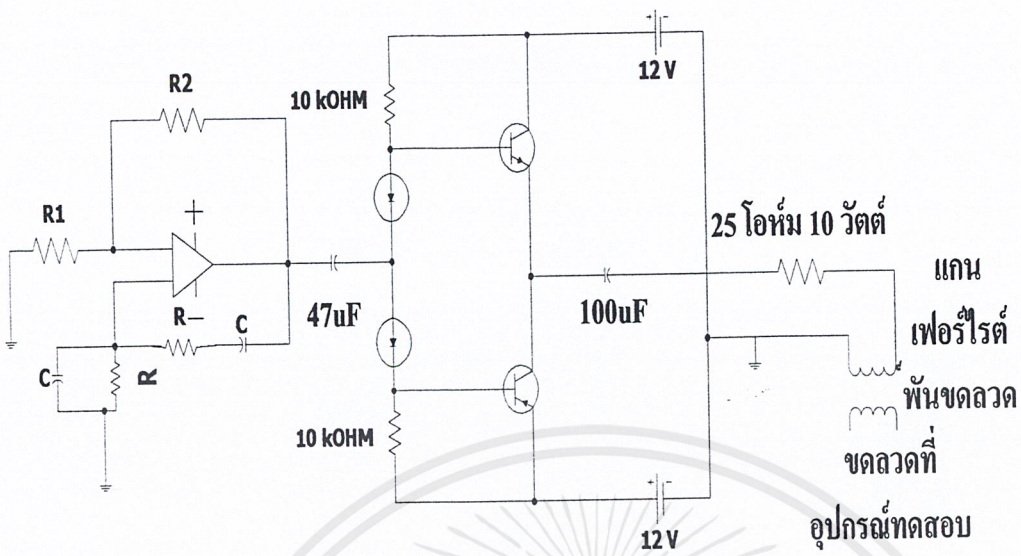
รูปที่ 5.9 วงจรสร้างความถี่

5.4.1 วงจรออสซิลเลเตอร์

เป็นวงจรสร้างความถี่เพื่อเป็นสัญญาณไปเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ โดยวงจรสร้างจากไอซี 741 ซึ่งสามารถปรับค่าความถี่ได้จาก R, C สมการที่

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

ซึ่งในวงจรนี้ใช้ R มีค่าเท่ากับ 10 กิโลโอห์ม และใช้ C มีค่าเท่ากับ 1 นาโนฟารัด ส่วน R_1 และ R_2 ต้องเป็น 1 : 2 เนื่องจากเป็นเงื่อนไขของการออสซิลเลต ดังนั้นใช้ R_1 มีค่าเท่ากับ 12 กิโลโอห์ม ส่วน R_2 มีค่าเท่ากับ 24 กิโลโอห์ม วงจรออสซิลเลเตอร์และยังมีวงจรขยายกำลังแบบพุช-พูลซึ่งเป็นวงจรขยายกำลัง เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีขนาดของสัญญาณและกำลังเพียงพอในการเหนี่ยวนำ โดยได้เลือกใช้วงจรขยายคลาส AB ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ 3055 และ 2955 วงจรขยายกำลังแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 วงจรออสซิลเลเตอร์และวงจรพัลซ-พูด

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

6.1การทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนและการทดสอบการดักกลืนไดอิเล็กตริก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1.เครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์(Megger) 1 เครื่อง
- 2.มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า ,220/380 V , 50 Hz , 1,420 rpm , 3.5/ 2 A , 4 pole

จุดประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1.เพื่อทำการวัดค่าความต้านฉนวนของขดลวดที่ดีและขดลวดสกปรก
- 2.เพื่อทำการหาค่าโพลาไรเซชันอินเด็กซ์(PI)ของฉนวน

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.ทำการป้อนแรงดัน ไปที่ขดลวดที่ฉนวนยังมีสภาพดี class E อยู่โดยเครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์วัดค่าความต้านทานของขดลวดที่อ่านได้จากเครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์ ที่ 1 นาที และ 10 นาที ตามลำดับบันทึกผล
- 2.ทำการทดลองตามข้อที่ 1 แต่เปลี่ยนไปป้อนแรงดัน ไปที่ขดลวดที่ฉนวนมีการฉีกฉนวนจนกระทั่งขดลวดอยู่บันทึกผล

ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.1 ค่าความต้านทานของขดลวดที่ 1 นาที และ 10 นาที

ชนิดของขดลวด	ค่าความต้านทานที่ 1 นาที	ค่าความต้านทานที่ 10 นาที
	MΩ	MΩ
ขดลวดสภาพดี	1500	1800
ขดลวดฉีกฉนวนจนกระทั่งขดลวด	0.5	0.5

ค่าโพลาไรเซชันอินเด็กซ์(PI)ที่ได้

$$\text{ขดลวดสภาพดี} = \frac{\text{ค่าความต้านทานที่ 1 นาที่}}{\text{ค่าความต้านทานที่ 10 นาที่}}$$

$$= \frac{1800}{1500} = 1.2$$

$$\text{ขดลวดลัดวงจรลงกราวด์} = 1$$

6.2 การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง

อุปกรณ์การทดลอง

1. วงจรการทดลองแรงดันสูงกระแสตรง
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า , 220/380 V , 50 Hz , 1,420 rpm , 3.5/ 2 A , 4 pole

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อหาจุดที่สภาพของฉนวนเกิดการอ่อนแอเทียบกับกราวด์
2. เพื่อทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดสอบกับขดลวดที่สภาพฉนวนยังดีอยู่ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.6 โดยที่ขดลวดด้านหนึ่งปล่อยลอยไว้ต่อเฟรมลงกราวด์
2. ป้อนแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977 ขนาดแรงดัน 1.7 เท่าของแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ(การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับใช้แรงดัน 1.5 เท่า ของ $V_L = 380 \text{ V}$)
 $1.5 \times 1.7 \times 380 = 969 \text{ V}$ 1 นาที่ บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่ว(Leakage Current)
3. ทำการทดสอบกับขดลวดที่เสื่อมสภาพเทียบกราวด์ ตามขั้นตอนข้อ 1,2

ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง

ชนิดของขดลวด	แรงดัน (V)	กระแสรั่ว(μA)
ขดลวดสภาพดี	969	9
ขดลวดเสื่อมสภาพ	969	170

6.3 การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรการทดลองแรงดันสูงกระแสสลับดังรูปที่
2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า , 220/380 V , 50 Hz , 1,420 rpm , 3.5/ 2 A , 4 pole

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อทดสอบสภาพฉนวนเมื่อเกิดแรงดันสูงกระแสสลับชั่วขณะหนึ่ง

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.8 โดยปล่อยขดลวดด้านหนึ่งลอยไว้แล้วต่อเฟรมต่อลงกราวด์ทำการป้อนแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 95-1977 แรงดันทดสอบเท่ากับ 1.5 เท่าของ V_L เท่ากับ 570 V ทำการทดสอบเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อเป็นการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่ว (Leakage Current)
2. ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.8 โดยปล่อยขดลวดด้านหนึ่งลอยไว้แล้วต่อเฟรมต่อลงกราวด์ทำการป้อนแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน NEMA MG1 ขนาด 2E+1kV (E คือแรงดันไลน์ของมอเตอร์ เท่ากับ 380 V) เท่ากับ 1760 V ทำการทดสอบเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อเป็นการทดสอบเพื่อการยอมรับ บันทึกค่าแรงดันและกระแสรั่ว (Leakage Current)

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ

ชนิดของขดลวด	แรงดัน (V)	กระแสรั่ว (mA)
ขดลวดสภาพดี	570	0
	1760	0
ขดลวดเสื่อมสภาพ	570	0
	1044	40

6.4 การทดสอบโดยวิธีแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วยอุปกรณ์โซลิตสเทท 1 ชุด
2. สตอเรจสโคป (Storage Scope) 1 เครื่อง
3. โพรบแรงสูง 1,000 : 1 ชุด
4. หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน 1 เฟส : 10 A , 0-260 V 1 ตัว
5. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส : 1 แรงม้า , 220 / 380 V , 50 Hz , 1,420 rpm , 3.5 / 2 A , 4 pole
6. เครื่องวัด R , L, C 1 เครื่อง

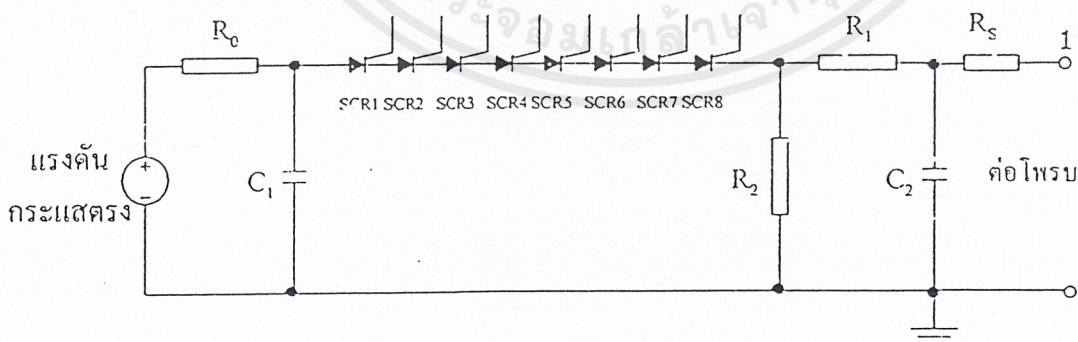
การทดลองที่ 1 การทดสอบลักษณะรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้วยอุปกรณ์โซลิตสเทท
2. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรทริกเอสซีอาร์ และหาความกว้างของสัญญาณทริกที่เหมาะสม

ขั้นตอนการทดลอง

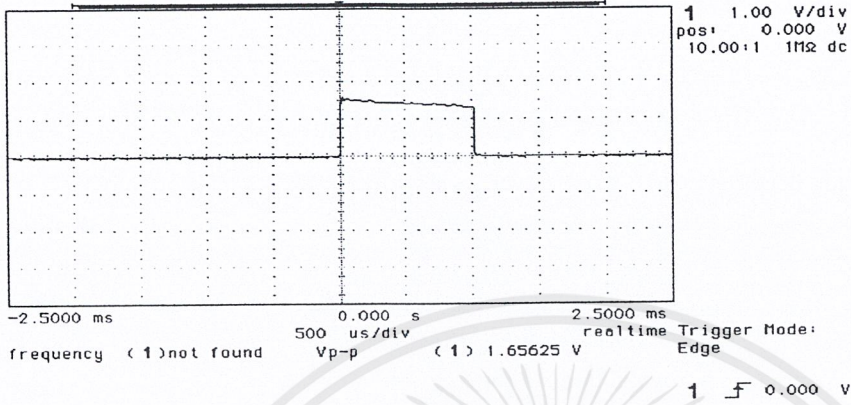
1. ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 6.1 โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ แล้วใช้โพรบ 1,000: 1 จับที่จุด 1 เทียบกับกราวด์ดังรูป
2. ปรับแรงดันอินพุทให้ได้แรงดันอิมพัลส์เป็น 1,500 โวลต์ แล้วบันทึกรูปสัญญาณไว้
3. ปรับพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ใกล้เคียงมาตรฐานมากที่สุด แล้วทำการปรับระดับแรงดันอินพุท ให้ได้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 3,000 , 4,000 , 5,000 และ 6,000 โวลต์
4. สังเกตลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากสตอเรจสโคป แล้วบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 6.1 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 1

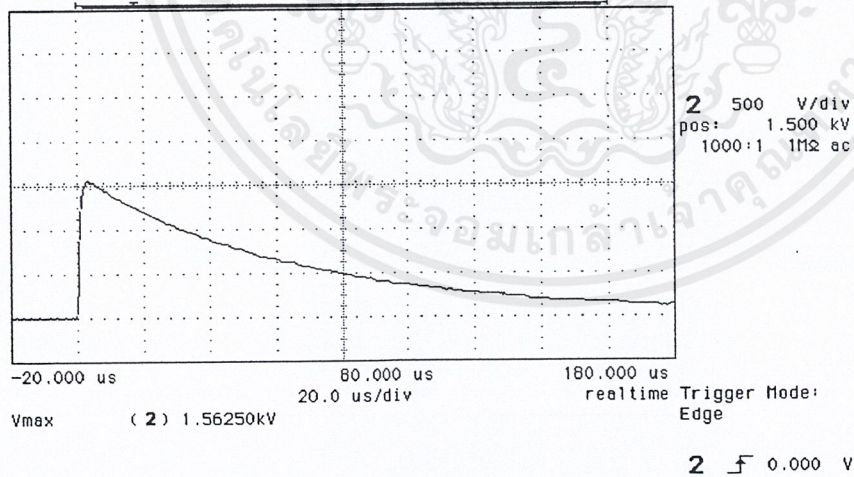
ผลการทดลอง

hp running-awaiting trigger



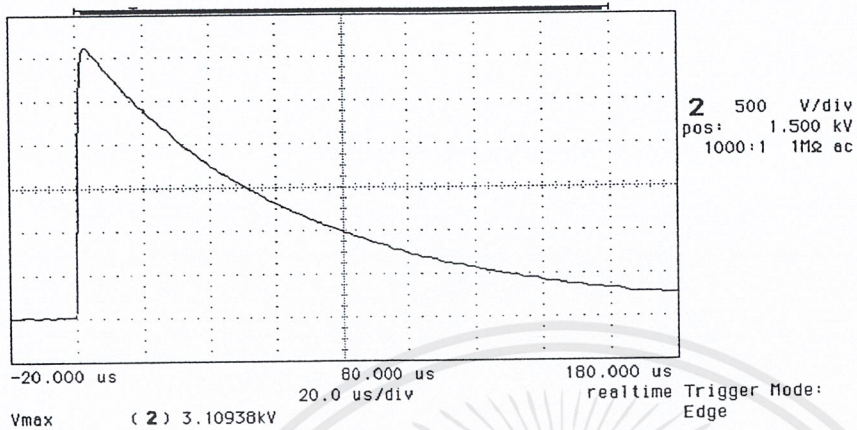
รูปที่ 6.2 สัญญาณทริกเอสซีอาร์

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.3 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 1500 V

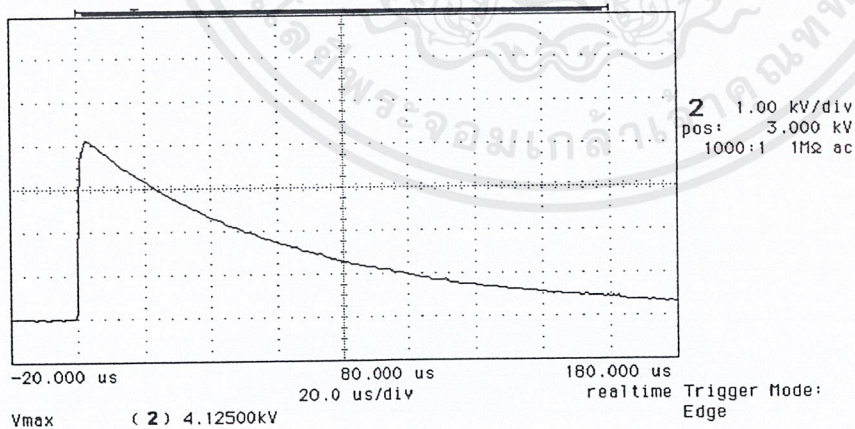
hp running-awaiting trigger



2 f 0.000 V

รูปที่ 6.4 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 3000 V

hp running-awaiting trigger

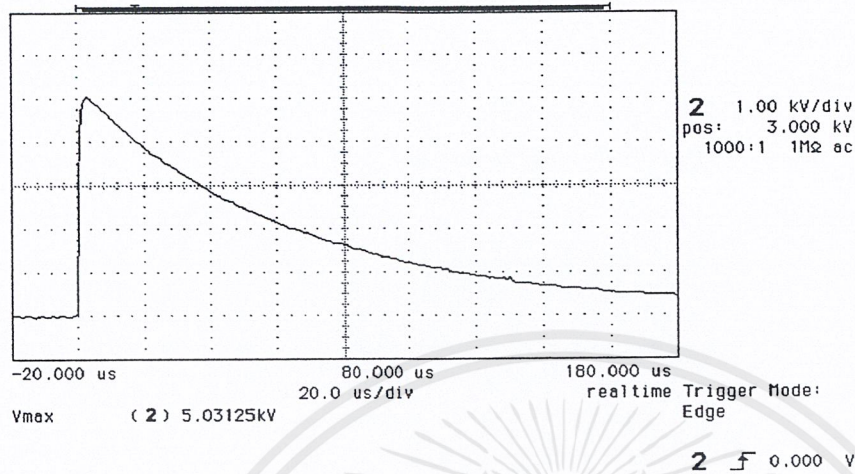


2 f 0.000 V

รูปที่ 6.5 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 4000 V

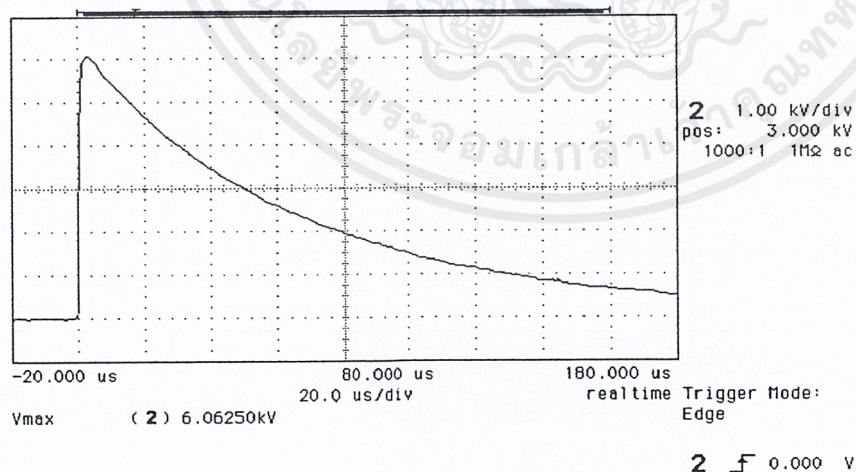
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.6 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 5000 V

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.7 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบ 6000 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

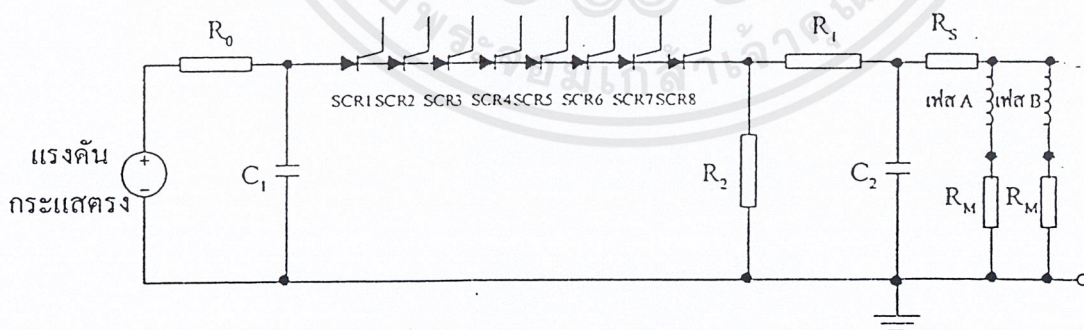
การทดลองที่ 2 การทดสอบการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาลักษณะของรูปคลื่นเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด
2. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับเฟรม

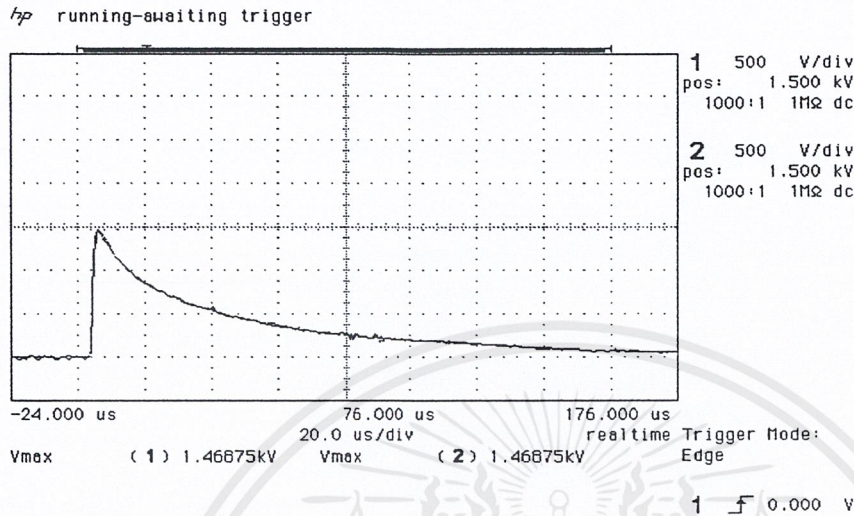
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.8 และต่อขดลวดทดสอบทั้ง 2 ขด อนุกรมกับความต้านทาน R_M 1,500 โอห์ม โดยขดที่ไม่ได้ทำการทดสอบให้ต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วต่อลงกราวด์พร้อมทั้งต่อเฟรมลงกราวด์ด้วย
2. เตรียมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยขดลวดเฟส A และ B ยังมีสภาพฉนวนที่ดีอยู่ ส่วนขดลวดเฟส C ได้ทำการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดไว้
3. ป้อนแรงดันอิมพัลส์ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE std 552-1992(R1977) ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ $5(\sqrt{2}/\sqrt{3})V_L$ มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีพิทช์ V_L เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 1,500 โวลต์ เข้าสู่ขดลวดเฟส A และ B พร้อมกัน สังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขดเทียบกับโดย CH1 วัดแรงดันคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และ CH2 วัดแรงดันคร่อม เฟส B และค่าความต้านทาน R_M
4. เปลี่ยนขดลวดทดสอบจากเฟส A เป็นเฟส C ป้อนแรงดันทดสอบเข้าสู่ขดลวดทั้ง 2 เฟสทั้ง 2 พร้อมกัน สังเกตลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขดเทียบกับ โดย CH1 วัดแรงดันคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และ CH2 วัดแรงดันคร่อม เฟส C และค่าความต้านทาน R_M

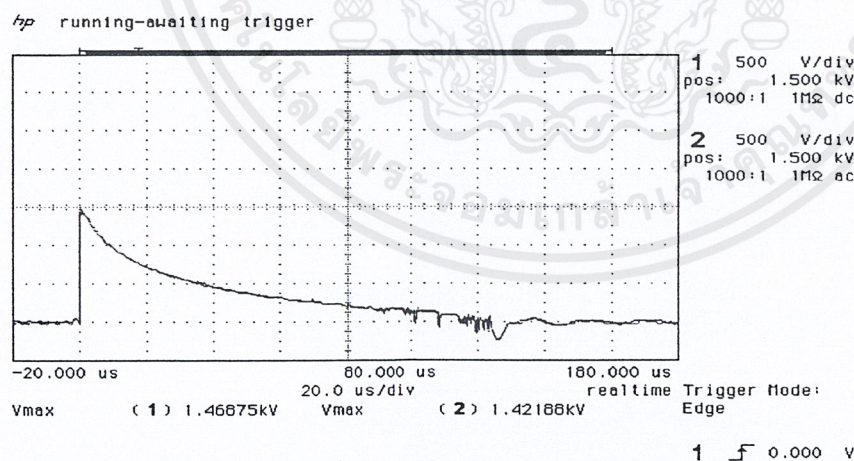


รูปที่ 6.8 วงจรการทดลองที่ 2

ผลการทดลอง



รูปที่ 6.9 แรงดันอิมพัลส์ตัวคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และแรงดันคร่อม เฟส B และค่าความต้านทาน R_M ซึ่งสภาพฉนวนของขดลวดยังดีอยู่



รูปที่ 6.10 แรงดันอิมพัลส์ตัวคร่อม เฟส A และค่าความต้านทาน R_M และแรงดันคร่อม เฟส C และค่าความต้านทาน R_M ซึ่ง เฟส A สภาพขดลวดยังดีอยู่ ส่วนเฟส C เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

การทดลองที่ 3 การทดสอบสภาพนวนเทียบกับกราวด์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์

ขั้นตอนการทดลอง

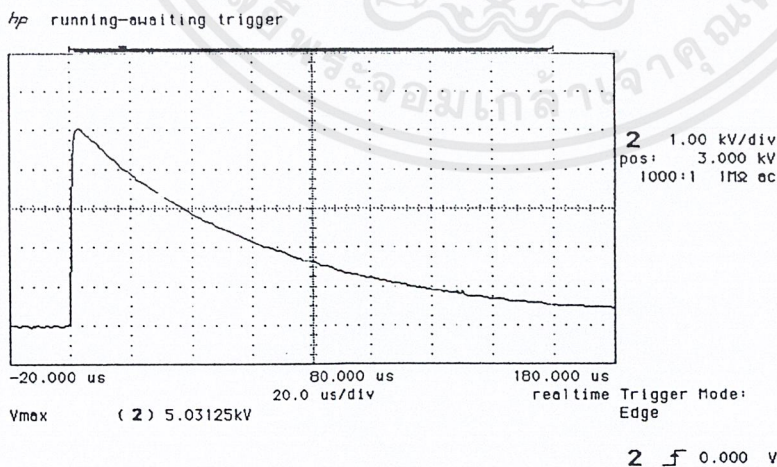
1. ปรับแรงดันอินพุตให้ได้แรงดันอิมพัลส์ทดสอบตามมาตรฐาน **IEEE std 141-1986** ซึ่งกำหนดแรงดันทดสอบไว้ที่ $1.25\sqrt{2} (2V_L + 1,000)$ โวลต์ มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบมีพิกัด V_L เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 3,111 โวลต์ (ในขณะที่ยังไม่ต่อขดลวดทดสอบ)

2. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.11 โดยต่อต้นขดลวดทดสอบเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ส่วนปลายขดลวดปล่อยลอยไว้ ส่วนขดอื่นที่ไม่ได้ทดสอบปล่อยลอยไว้ และต่อเฟรมลงกราวด์แล้วสังเกตลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้โดยวัดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่จุด 1 เทียบกับกราวด์



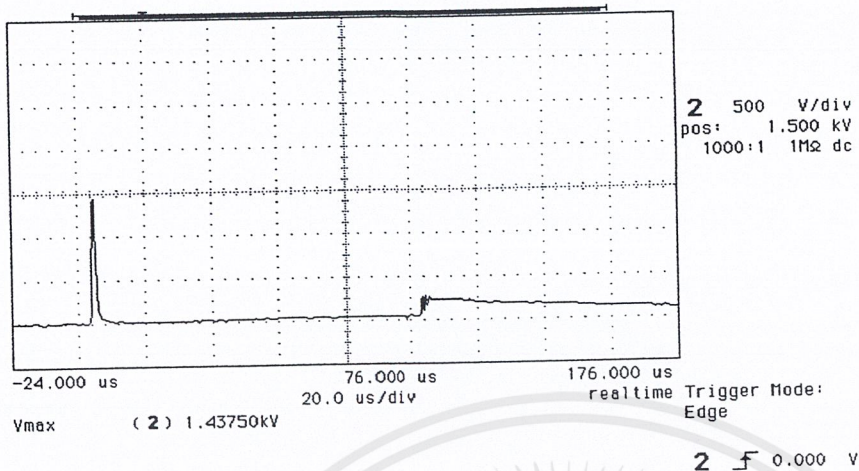
รูปที่ 6.11 วงจรที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ผลการทดลอง



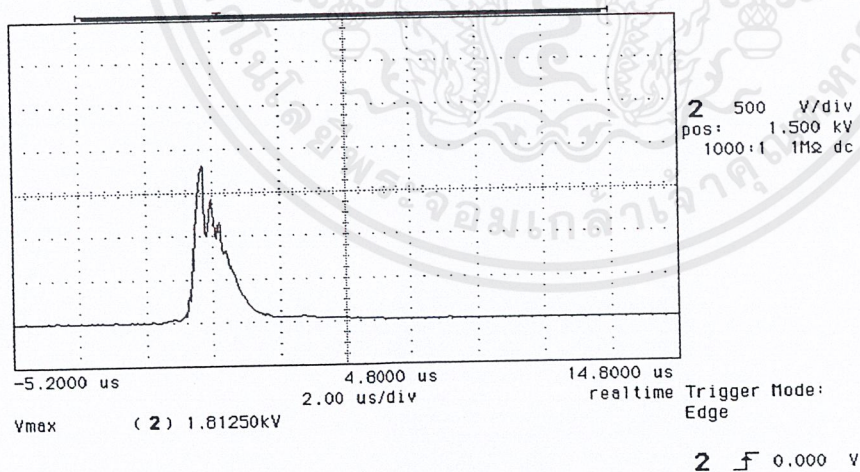
รูปที่ 6.12 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบขณะที่ขดลวดยังค้อยู่

hp running-awaiting trigger



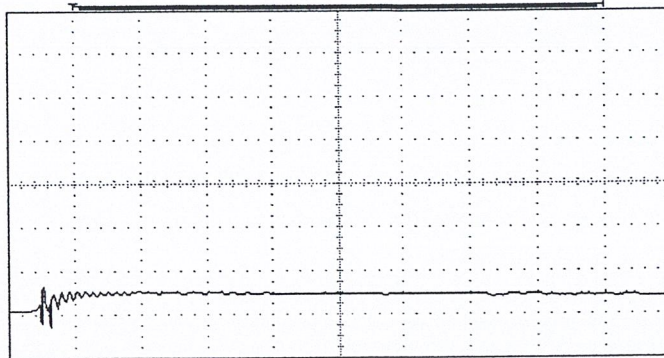
รูปที่ 6.13 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ใกล้กับต้นขดทดสอบ

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.14 แสดงภาพขยายช่วงหัวคลื่นขณะขดลวดทดสอบเบรคดาวน์ลงกราวด์

hp running-awaiting trigger



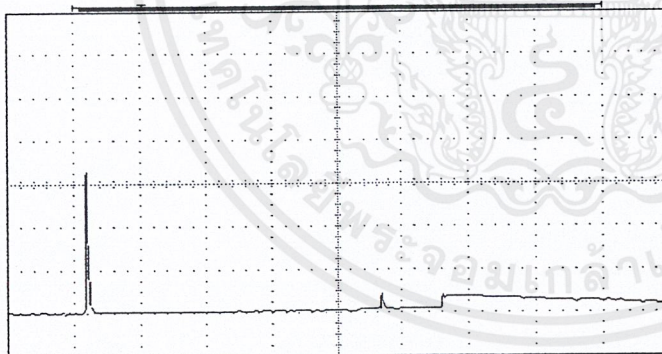
Vmax (2) 328.125 V
realtime Trigger Mode: Edge

2 500 V/div
pos: 1.500 kV
1000:1 1M Ω dc

2 0.000 V

รูปที่ 6.15 แสดงภาพขยายช่วงหัวคลื่นขณะขดลวดทดสอบเบรคดาวน์ลงกราวด์

hp running-awaiting trigger



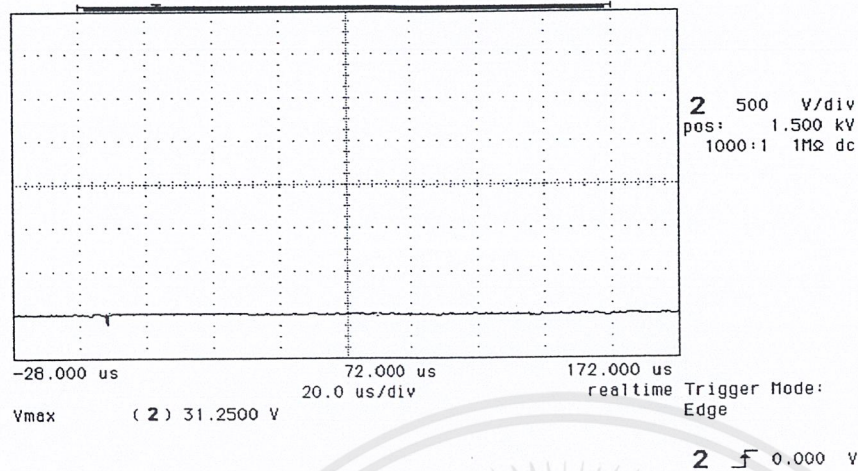
Vmax (2) 1.60938kV
realtime Trigger Mode: Edge

2 500 V/div
pos: 1.500 kV
1000:1 1M Ω dc

2 0.000 V

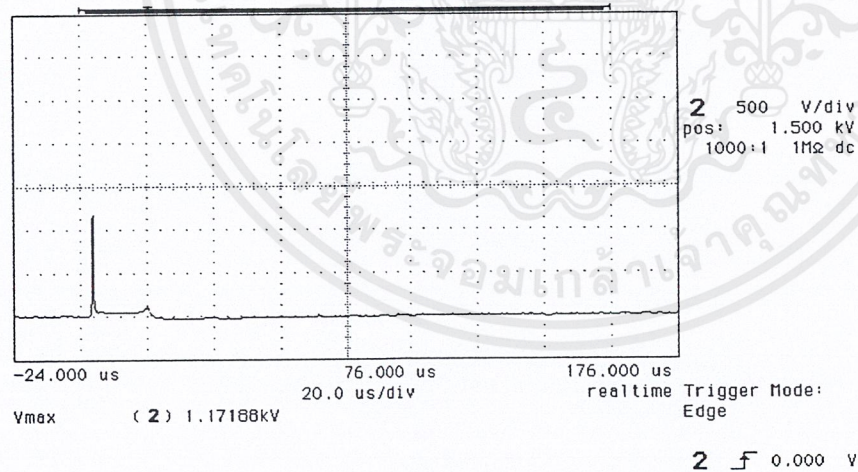
รูปที่ 6.16 ขดลวดทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ลงกราวด์ ไกลจากต้นขดทดสอบ

hp running-awaiting trigger



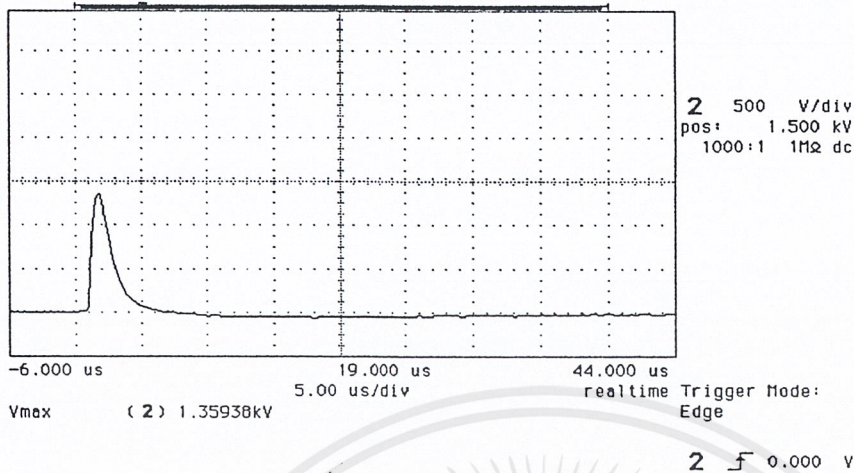
รูปที่ 6.17 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.18 ขดลวดทดสอบเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ใกล้กับต้นขดทดสอบ

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.19 ขยายกราฟรูปที่ 6.18

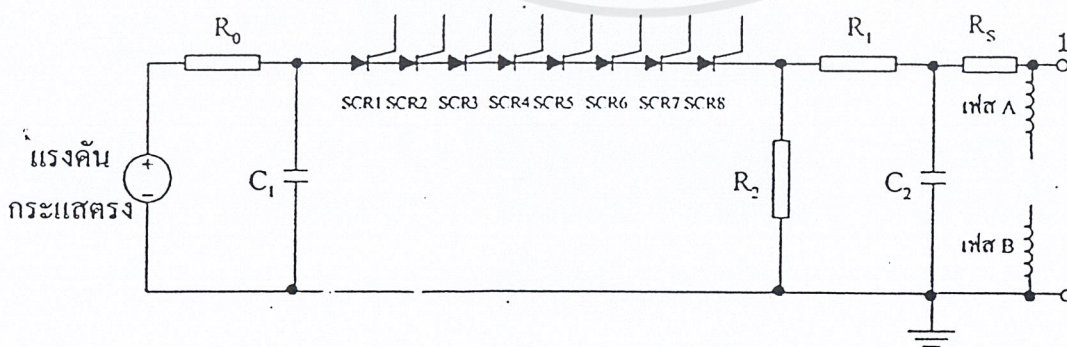
การทดลองที่ 4 การทดสอบสภาพฉนวนระหว่างเฟสกับเฟส

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนระหว่างเฟสกับเฟสของมอเตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

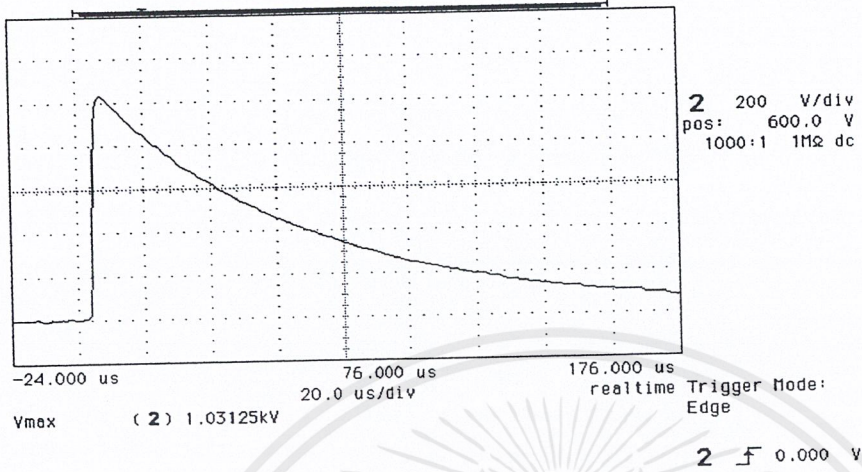
1. ต้องวงจรตามรูปที่ 6.20 โดยต่อต้นขดลวดทดสอบเฟส A เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอินพุตส์ส่วนปลายของขดลวดปล่อยลอยไว้ และต่อขดลวดทดสอบเฟส B ลงกราวด์
2. ป้อนแรงดันอินพุตส์ทดสอบ 1,500 โวลต์ (ในขณะที่ไม่ต่อขดลวดทดสอบ) แล้วสังเกตลักษณะรูปคลื่นแรงดันอินพุตส์ที่ได้โดยวัดรูปคลื่นแรงดันที่จุด 1 เทียบกับกราวด์



รูปที่ 6.20 วงจรที่ใช้ในการทดสอบที่ 4

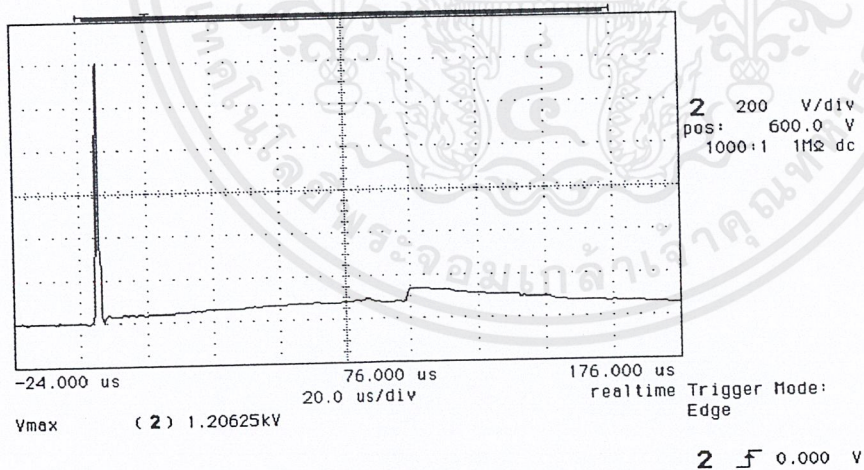
ผลการทดลอง

hp running-awaiting trigger

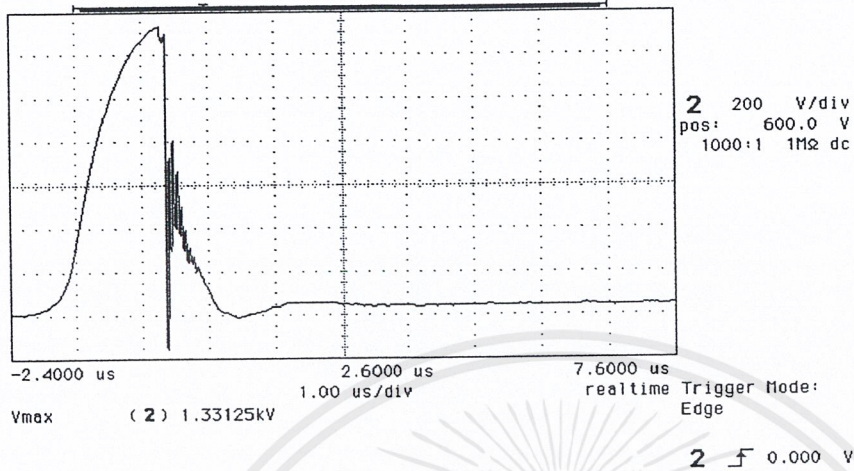


รูปที่ 6.21 แรงดันอิมพัลส์คร่อมระหว่างเฟส A และ เฟส B ซึ่งขดลวดทดสอบยังมีสภาพดีอยู่

hp running-awaiting trigger

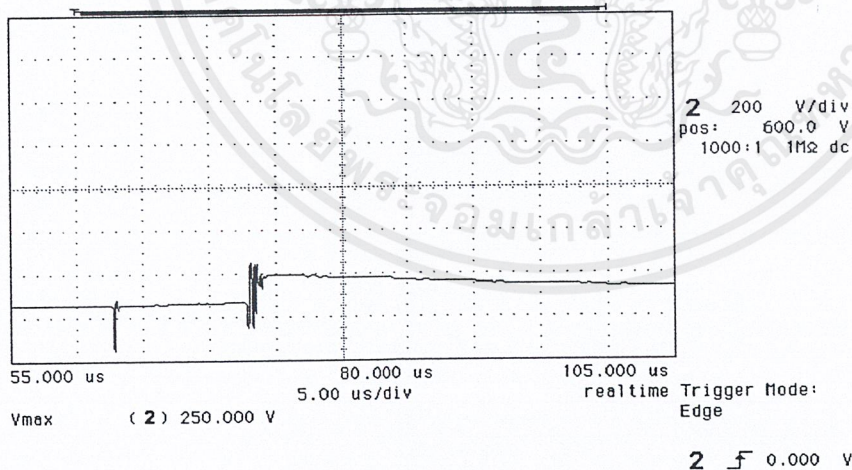
รูปที่ 6.22 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคดาวน์
ระหว่างเฟสของขดลวดใกล้กับต้นขดทดสอบ

hp running-awating trigger



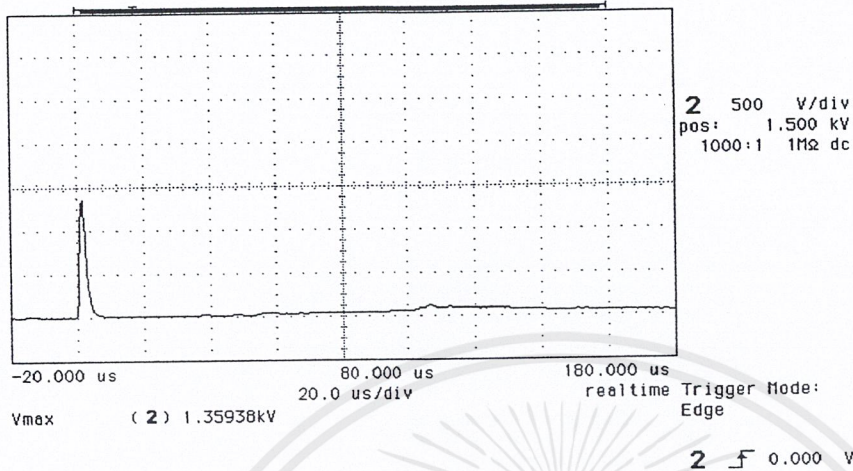
รูปที่ 6.23 ขยายกราฟรูปที่ ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคความถี่ระหว่าง
เฟสของขดลวดบริเวณหัวคลื่น

hp running-awating trigger



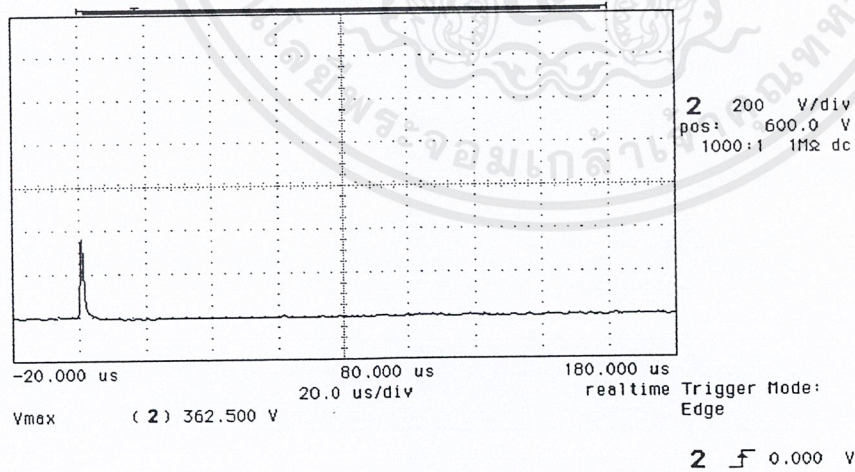
รูปที่ 6.24 ขยายกราฟรูปที่ ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคความถี่
ระหว่างเฟสของขดลวดบริเวณหางคลื่น

hp running-awaiting trigger



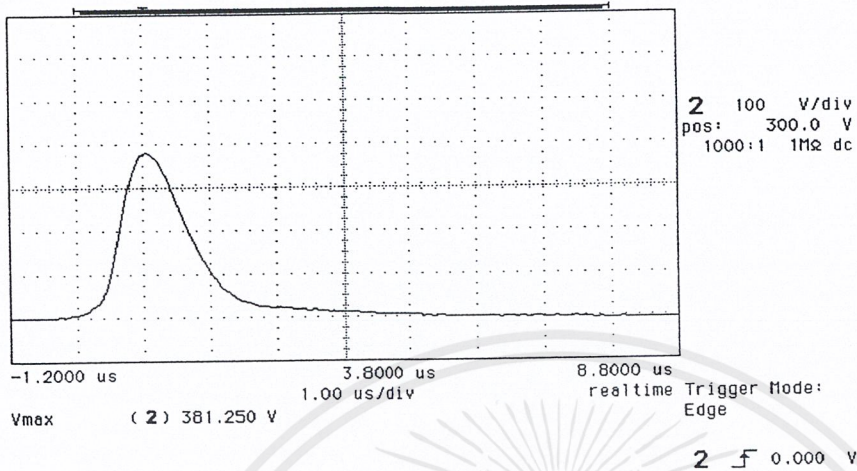
รูปที่ 6.25 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการเบรคคาน้ำ
ระหว่างเฟสของขดลวดไกลจากต้นขดทดสอบ

hp running-awaiting trigger



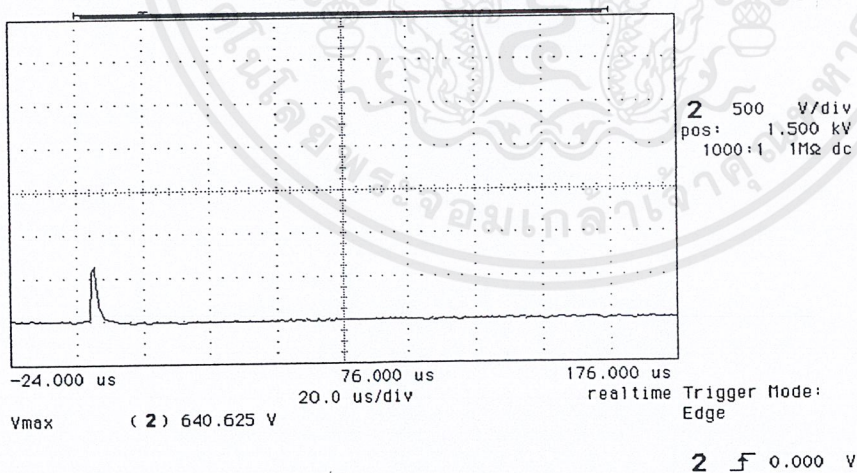
รูปที่ 6.26 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่าง
เฟสของขดลวดไกลกับต้นขดทดสอบ

hp running-awaiting trigger



รูปที่ 6.27 ขยายกราฟรูปที่ 6.27

hp running-awaiting trigger

รูปที่ 6.28 ขดลวดเฟส A และ เฟส B เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส
ของขดลวดไกลจากต้นขดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การศึกษาการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Short turn) โดยใช้

วงจรออสซิลเลเตอร์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Short turn) โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์
2. อาศัยทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหาความแตกต่างของกระแสขณะไม่มีการลัดวงจรและเกิด การลัดวงจรของขดลวดในมอเตอร์
3. หาจุดเหมาะสมสำหรับการใช้อุปกรณ์เหนี่ยวนำขดลวดของมอเตอร์ว่าควรใช้ขดลวดพันที่แกน เพอร์ไรต์จำนวนกี่รอบใช้แกนเพอร์ไรต์เป็นตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่เป็นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง และขดลวดมอเตอร์ที่พันอยู่กับสเตเตอร์ทำหน้าที่เป็นด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง
4. จากข้อ 3 สังเกตกระแสที่เปลี่ยนแปลงระหว่างขดลวดที่ไม่ลัดวงจรและขดลวดที่ลัดวงจร ศึกษา การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
5. นำการศึกษาที่ได้นี้เป็นแนวทางในการประยุกต์เพื่อหาการลัดวงจรของขดลวดระหว่างเฟส การ ลัดวงจรของขดลวดระหว่างรอบต่อรอบที่เห็นผลอย่างชัดเจนใน 1 เฟส

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. สตอเรจสโคป (Storage Scope) 1 เครื่อง
2. แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 2 ตัว
3. โพรบ 10:1 1 ชุด
4. แท่งเพอร์ไรต์ขนาด 2×2 นิ้ว 11 แท่ง โดยแต่ละแท่งพันขดลวดเบอร์ 33 เรียงกันคือ 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90, 100 ขด ซึ่งทำหน้าที่เป็นด้านปฐมภูมิและ แท่งเพอร์ไรต์พันขดลวด 1 ขดทำหน้าที่เป็นด้านทุติยภูมิ
5. มอเตอร์สำหรับการทดลอง 1 ตัว

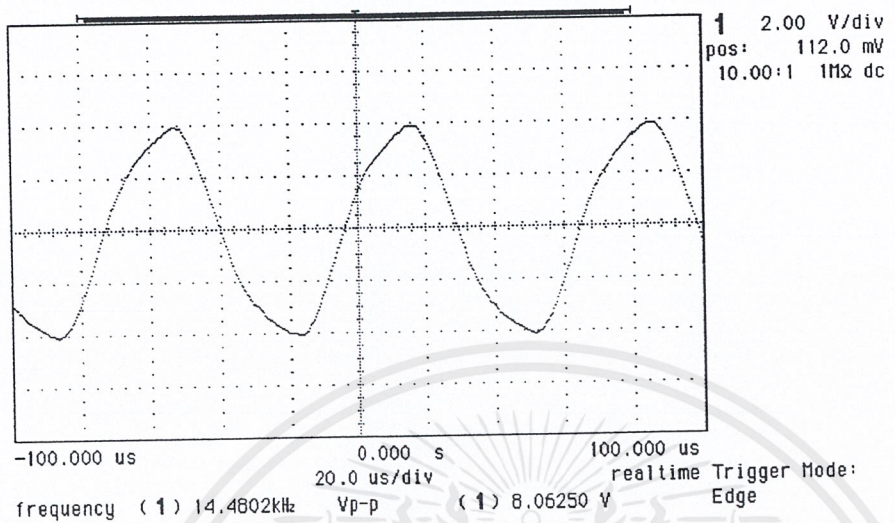
ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1

1. ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.10 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้และจากรูปแบบของวงจร แล้วใช้โพรบจับที่ ค่าความต้านทานขนาด 25Ω 10 W
2. นำแท่งเพอร์ไรต์ที่ทำการการพันขดลวดจำนวนรอบต่างๆ มาต่อที่เอาต์พุตของวงจรโดยทำการ ทดลองทีละแกน นำไปเหนี่ยวนำกับแกนเพอร์ไรต์ที่พันขดลวด 1 ขด ขณะ short และ ไม่ short ทาง ด้าน ทุติยภูมิ สังเกตรูปคลื่นแรงดัน บันทึกผลรูปสัญญาณไว้

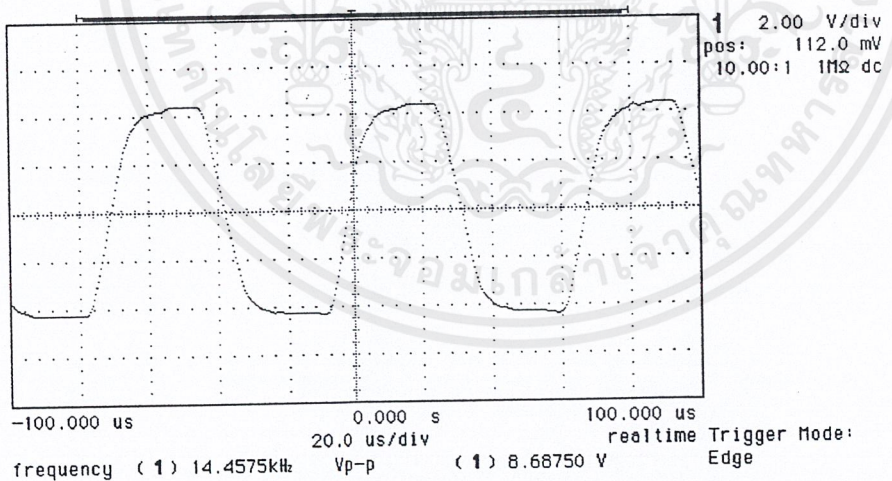
ผลการทดลองที่ 1 ทดสอบกับขดลวดทางทุติยภูมิ 1 ขด

hp running



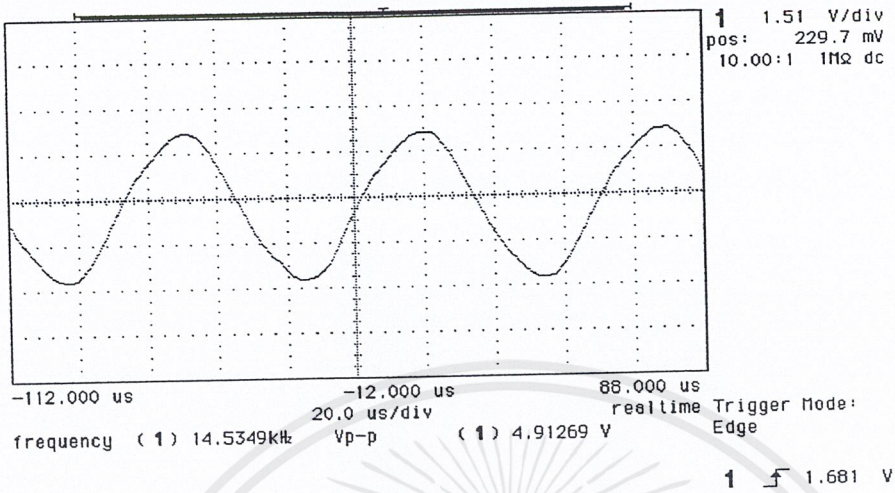
รูปที่ 6.29 พันขดลวดจำนวน 10 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่ short

hp running



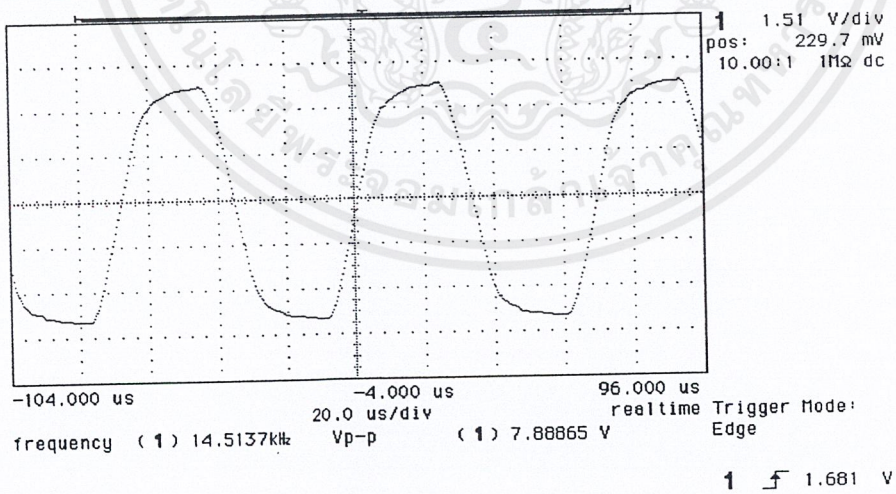
รูปที่ 6.30 พันขดลวดจำนวน 10 รอบขณะด้านทุติยภูมิ short

hp running



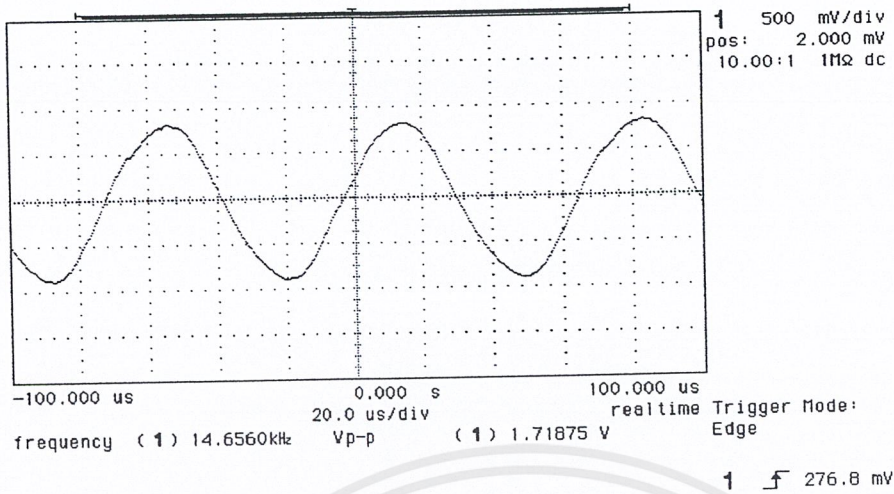
รูปที่ 6.31 พันขลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

hp running



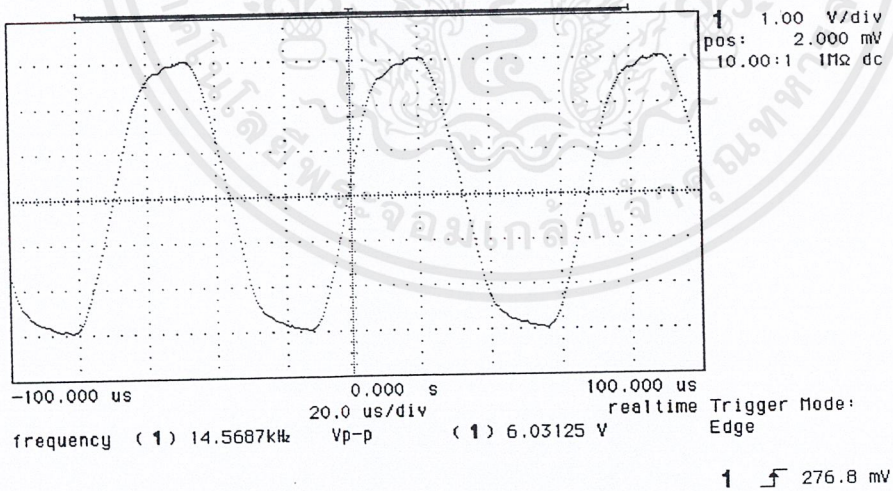
รูปที่ 6.32 พันขลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

hp running

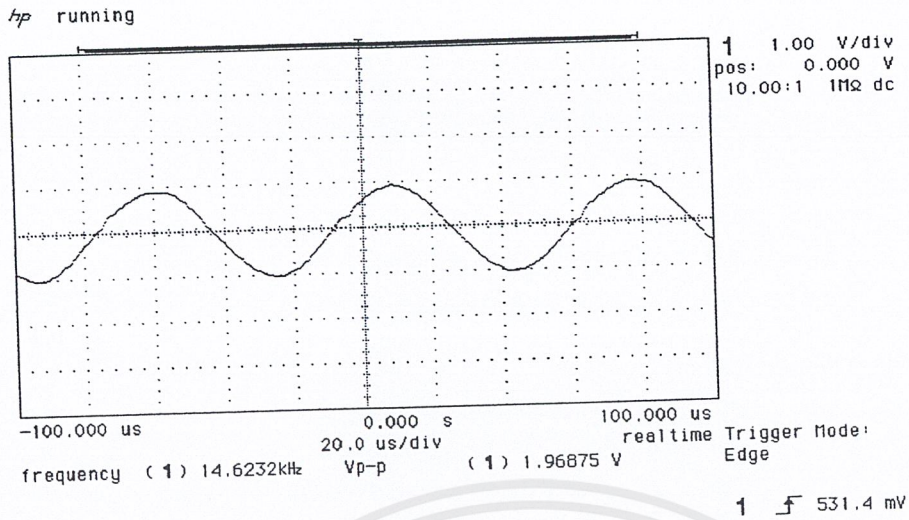


รูปที่ 6.33 พันขดลวดจำนวน 30 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

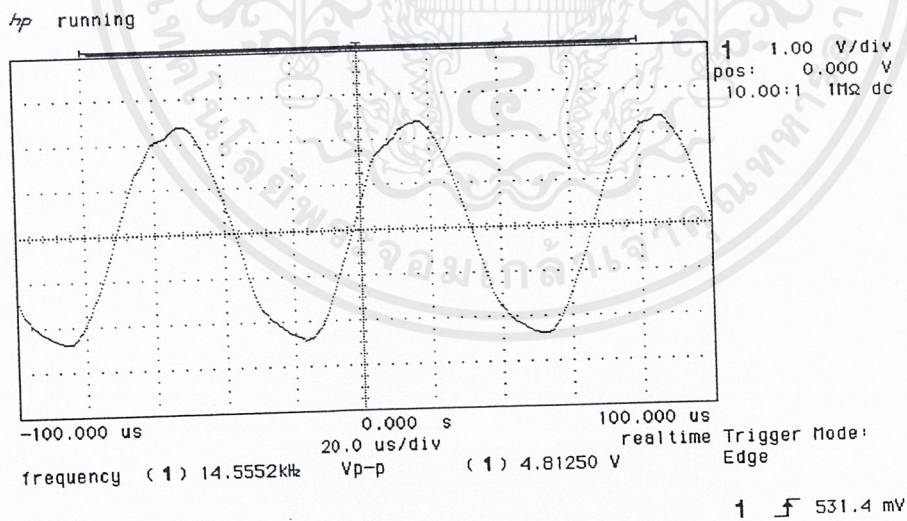
hp running



รูปที่ 6.34 พันขดลวดจำนวน 30 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

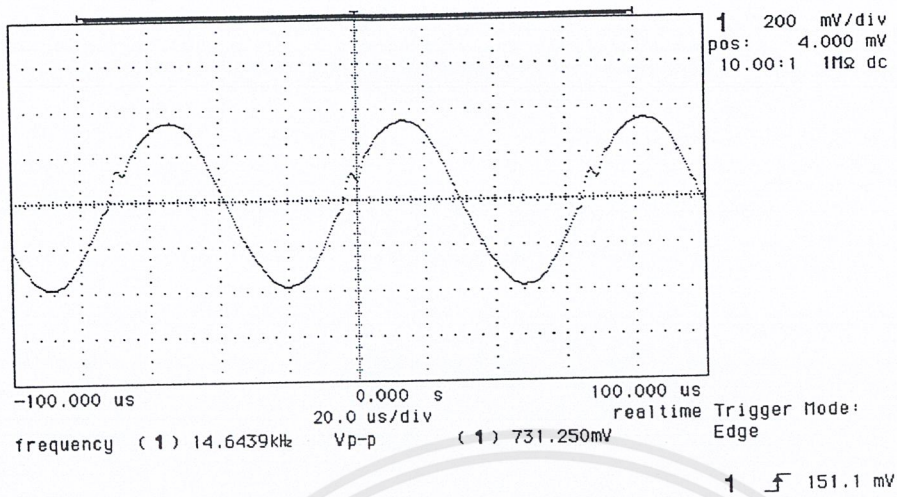


รูปที่ 6.35 พันขดลวดจำนวน 40 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short



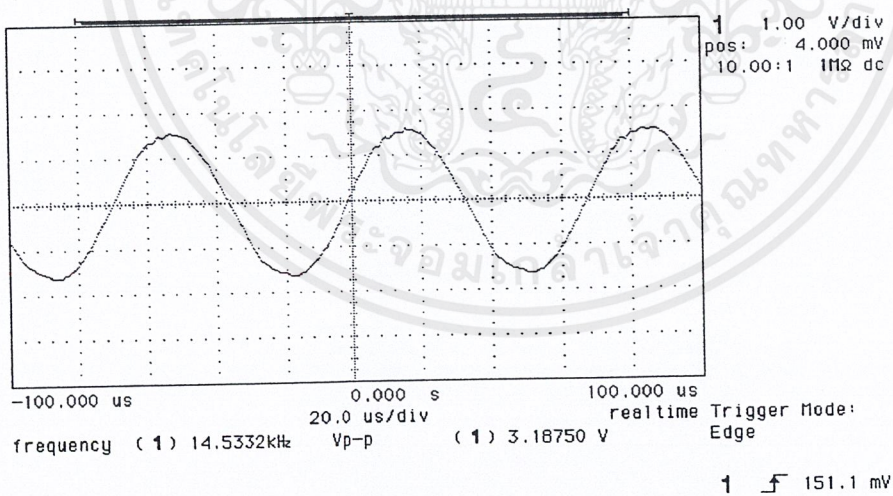
รูปที่ 6.36 พันขดลวดจำนวน 40 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

hp running



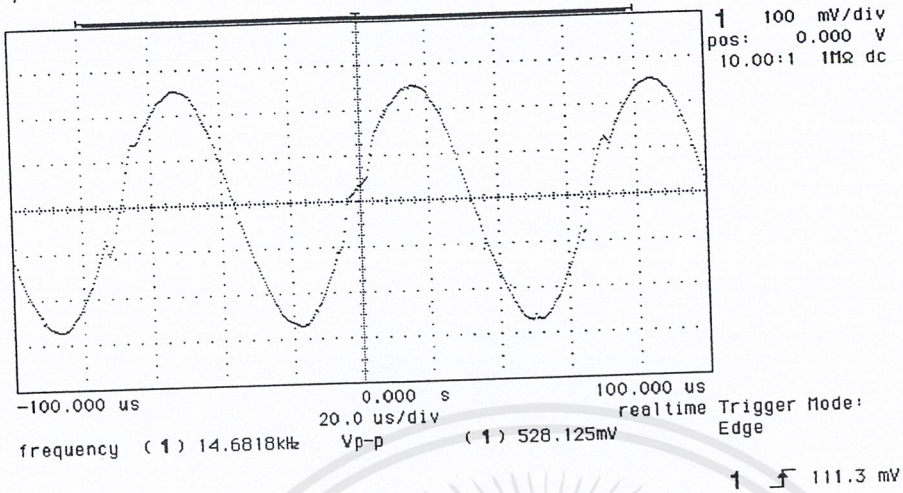
รูปที่ 6.37 พันขลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

hp running



รูปที่ 6.38 พันขลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

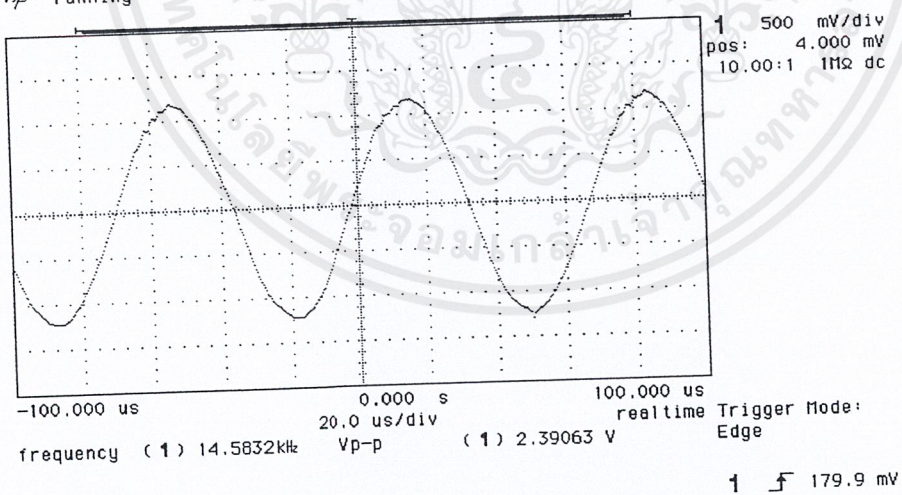
hp running



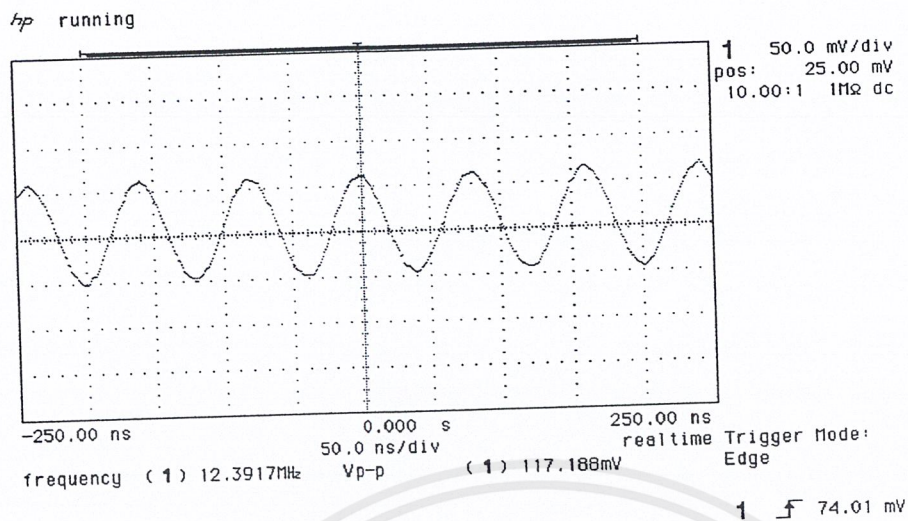
รูปที่ 6.39 พันขดลวดจำนวน 70 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

hp running

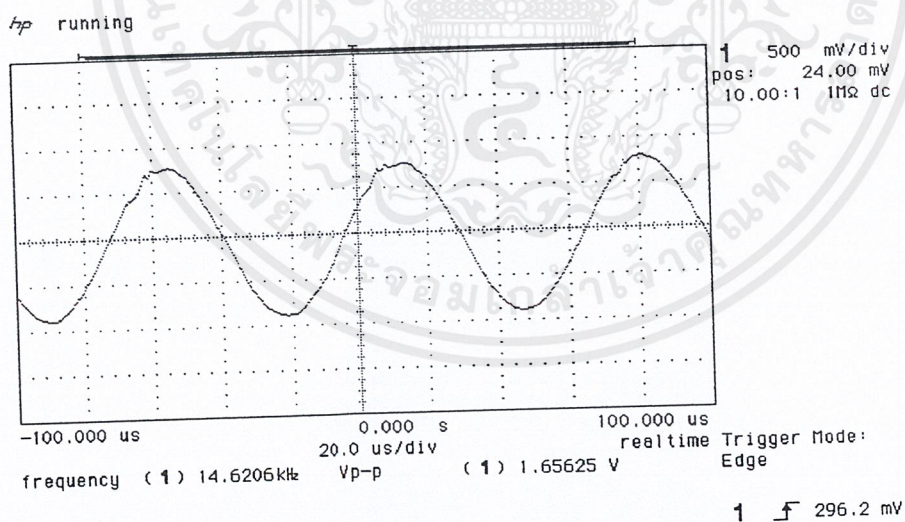
key ignored



รูปที่ 6.40 พันขดลวดจำนวน 70 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

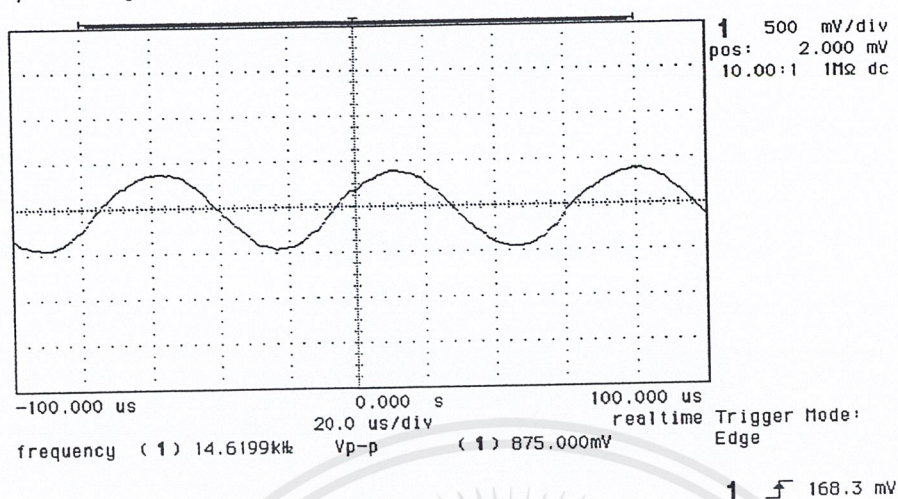


รูปที่ 6.41 พันขลวดจำนวน 80 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short



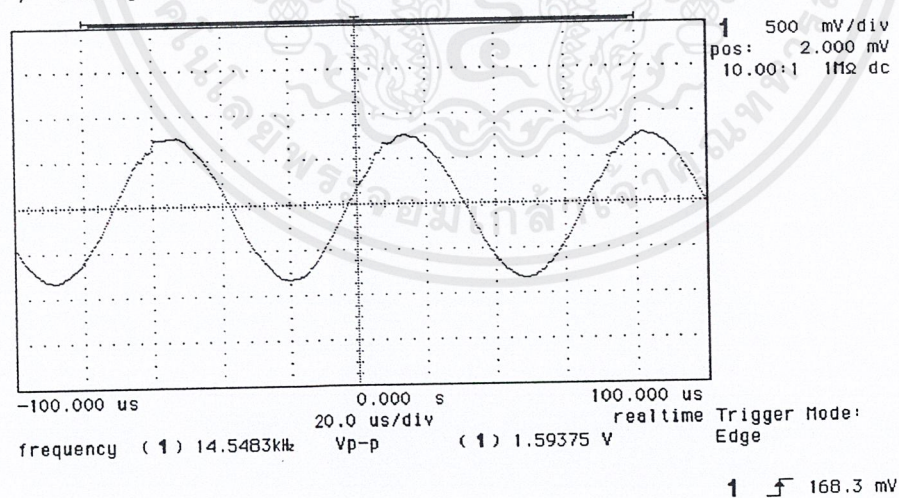
รูปที่ 6.42 พันขลวดจำนวน 80 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

hp running



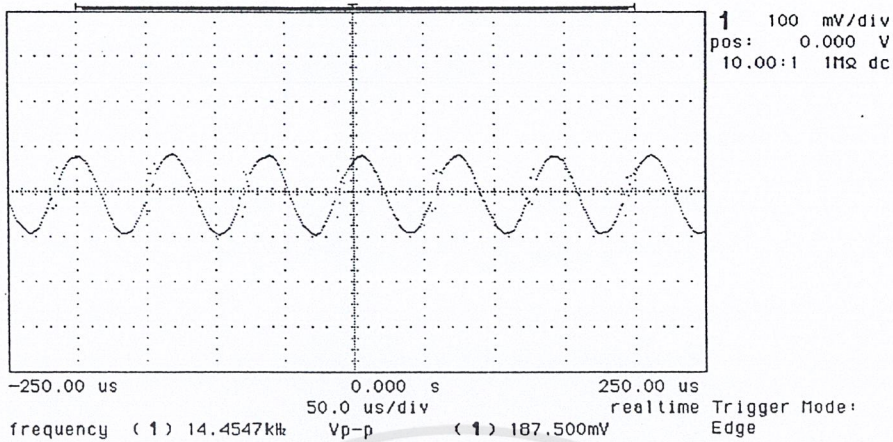
รูปที่ 6.43 พันขลวดจำนวน 90 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

hp running



รูปที่ 6.44 พันขลวดจำนวน 90 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

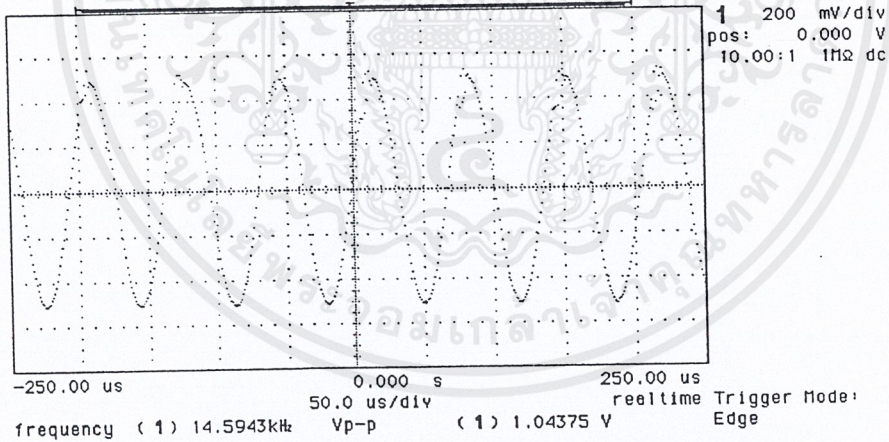
hp running



1 65.87 mV

รูปที่ 6.45 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

hp running

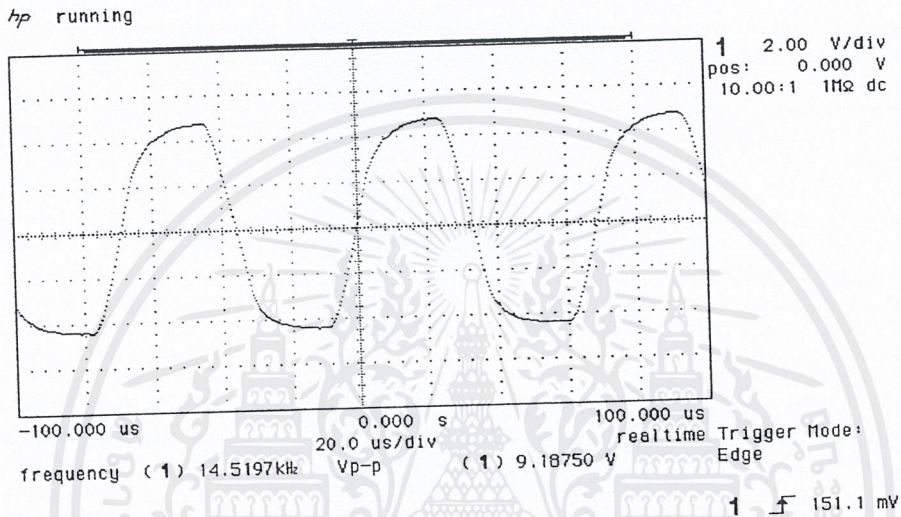


1 65.87 mV

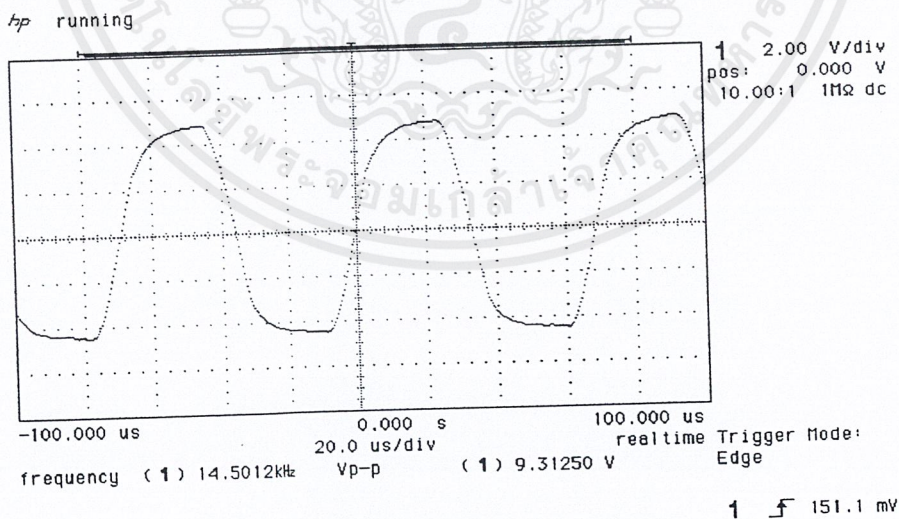
รูปที่ 6.46 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

ตอนที่ 2

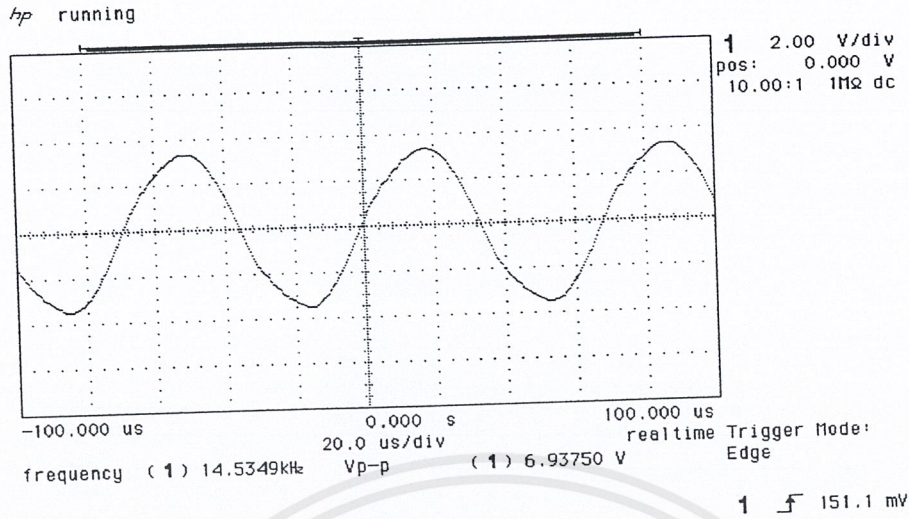
1. ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 5.10 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้และจากรูปแบบของวงจร แล้วใช้โพรบจับที่ ค่าความต้านทานขนาด $25\ \Omega$ 10 W
 2. นำแท่งเฟอร์ไรต์ที่ทำทำการการพันขดลวดจำนวนรอบต่างๆ มาต่อที่เอาต์พุตของวงจร โดยทำการทดลองทีละแกน นำไปเหนี่ยวนำมอเตอร์ บันทึกลง
- ผลการทดลองที่ 2 ทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



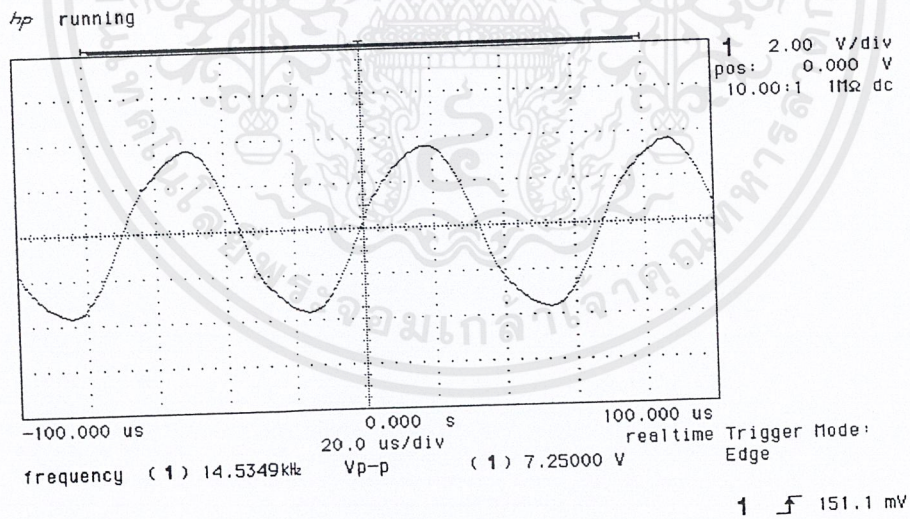
รูปที่ 6.47. พันขดลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short



รูปที่ 6.48 พันขดลวดจำนวน 20 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

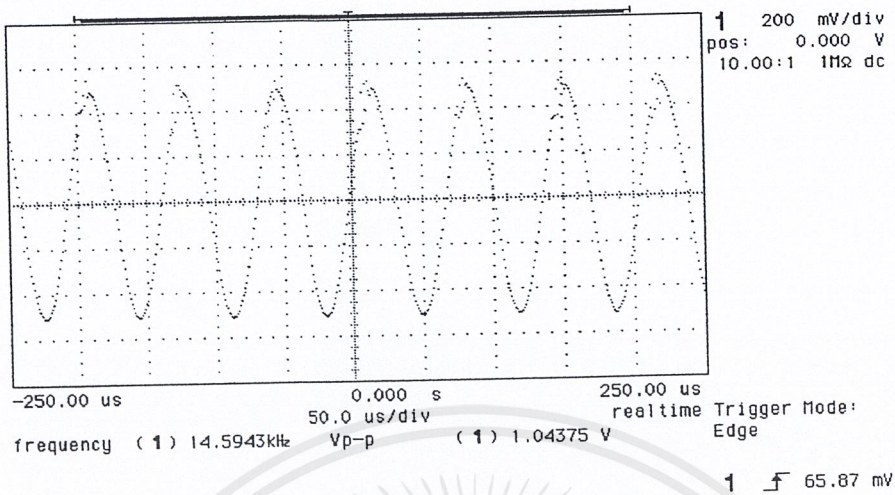


รูปที่ 6.49 พันขดลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short



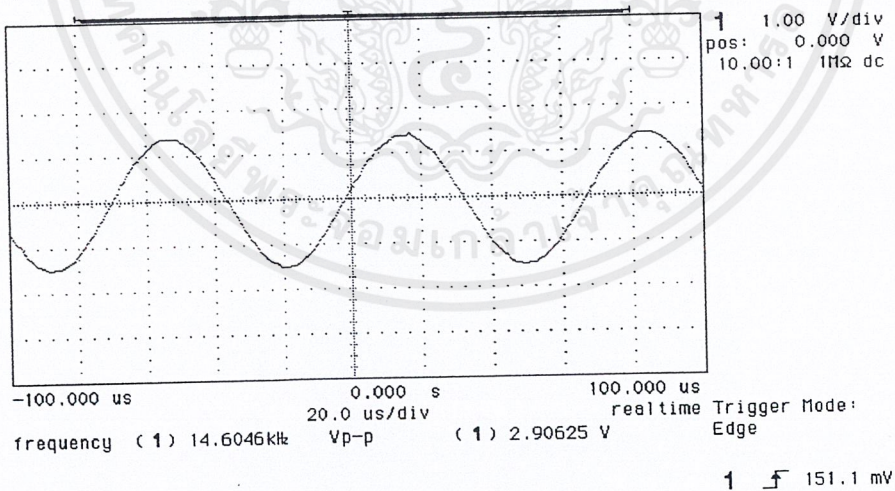
รูปที่ 6.50 พันขดลวดจำนวน 60 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

hp running



รูปที่ 6.51 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิไม่short

hp running



รูปที่ 6.52 พันขดลวดจำนวน 100 รอบขณะด้านทุติยภูมิshort

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์

การทดสอบความต้านทานฉนวนโดยเมกะโอห์ม อาศัยมาตรฐาน **IEEE Std 43-1974** โดยค่าที่ได้จากเมกะโอห์มมิเตอร์เป็นค่าความต้านทานของฉนวน บอกถึงสภาพของฉนวนเมื่อเทียบกับกราวด์ ค่าความต้านทานของฉนวนที่มีสภาพที่ดีไม่จำกัดและแห้งจะอ่านค่าได้หลายร้อยเมกะโอห์ม แต่ถ้าฉนวนมีความชื้นหรือสกปรกจะอ่านค่าได้ไม่กี่เมกะโอห์ม ถ้าค่าเมกะโอห์มต่ำกว่า 1 เมกะโอห์ม บวกกับ 1 เมกะโอห์มต่อ 1000 โวลต์ ถ้ามีค่าต่ำกว่าถือว่าฉนวนอยู่ในสภาพอันตราย ซึ่งการอ่านค่าของเมกะโอห์มจากการทดสอบมอเตอร์ส่วนมาก ค่าที่ได้จากการอ่านจะแสดงค่าได้หลายเมกะโอห์ม ซึ่งแสดงถึงสภาพที่ดีของฉนวน ซึ่งถ้าเรานำมอเตอร์ที่มีการเสื่อมสภาพเทียบกับกราวด์มาทดสอบค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์

การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก อาศัยมาตรฐาน **IEEE Std 43-1974** เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆจะทำให้โมเลกุลฉนวนสภาพเป็นขั้วบวกและขั้วลบเกิดขึ้น แต่ผลจากการทดสอบที่ค่าแรงดันกับกระแส แล้วนำมาหาค่าดัชนีความต้านทานค่าที่ได้เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเพื่อดูสภาพฉนวนที่ฉนวนชั้นต่าง ๆ (Class) จากการทดสอบโดยเครื่องเมกะโอห์มมิเตอร์ยังหาค่า โพรไบเลเซชัน อินเด็กซ์ยังได้ไม่ดี

การทดสอบแรงดันสูงกระแสตรง อาศัยมาตรฐาน **IEEE Std 95-1977** เพื่อทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวนเทียบกับกราวด์วิธีนี้เมื่อฉนวนยังมีสภาพดีอยู่ มีกระแสไหลผ่านลงกรอบ (Frame) เพียงเล็กน้อย อาจจะตรวจสอบโดยไม่โครแอมมิเตอร์ที่ใช้ไม่พบ แบบการทดสอบแรงดันสูงกระแสตรงคงที่ เพื่อดูสภาพฉนวนที่อ่อนแอบางจุดที่ตรวจสอบไม่พบโดยให้เกิดการเบรคดาวน์ขึ้น และมีค่ากระแสรั่วเกิดขึ้นที่ไม่โครแอมมิเตอร์เมื่อทำการทดสอบการทดสอบการควบคุมแรงดันสูงกระแสตรง กับมอเตอร์ซึ่งทำการทดสอบแล้วจะได้ค่าซึ่งค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงทำให้ยังไม่สามารถทำนายจุดเบรคดาวน์ได้จึงไม่นำใช้ในโรงงานนี้

การทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับ อาศัยมาตรฐาน **IEEE Std 95-1977** และมาตรฐาน **NEMA MGI** เป็นการทดสอบระหว่างฉนวนเทียบกับกราวด์ อาจจะทำให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วนซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลลงกรอบ(Frame) สามารถเห็นได้จากกระแสรั่ว(leakage current)ที่แอมป์มิเตอร์

การทดสอบเปรียบเทียบผลของเสิร์จ การทดสอบกับมอเตอร์จะสามารถดูกราฟความแตกต่างระหว่างมอเตอร์สภาพฉนวนที่ดีกับสภาพฉนวนไม่ดี ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างฉนวนระหว่างเฟสต่อเฟส ฉนวนกับกราวด์ อาศัยมาตรฐาน **IEEE Std 141-1986** แต่ยังไม่สามารถแยกความแตกต่างของกราฟจากการลัดวงจรระหว่างขดลวดในเฟสเดียวกันได้เนื่องจากแรงดันที่ใช้

ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std 522-1977 ยังไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ จึงนำไปสู่การศึกษาวจรกำเนิดความถี่สูงเพื่อนำไปดูความแตกต่างของกระแสอ้างอิงจากทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก ส่วนกราฟของแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากขดลวดที่ดีกับขดลวดที่เบรคดาวน์ระหว่างเฟส จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นอย่างเห็นได้ชัดเจนตามผลการทดลองซึ่งจะเกิดการออกซิเดชันโดยจะแกว่งไปมาก่อนจะเข้าสู่ระดับแรงดันเท่ากับศูนย์ ซึ่งแสดงว่าเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นระหว่างเฟสซึ่งฉนวนจะเสียหาย ระดับแรงดันที่เกิดการเบรคดาวน์ขึ้นอยู่กับสภาพฉนวนระหว่างเฟส ซึ่งถ้าขดลวดลัดวงจรระหว่างเฟสรูปกราฟจะคล้ายกับกราฟของแรงดันอิมพัลส์ลัดวงจรลงกราวด์ กราฟเบรคดาวน์ระหว่างเฟส กราฟของแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการเบรคดาวน์ลงกราวด์ จะมีรูปแบบคล้ายกับกราฟที่ได้จากการทดสอบระหว่างเฟส

จากผลการทดสอบทั้งหมด เป็นการทดสอบที่ครอบคลุมมาตรฐานการทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่าการทดสอบทุกอย่างสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานและครอบคลุมการทดสอบสภาพฉนวนเทียบกราวด์ การทดสอบระหว่างเฟสกับเฟส ซึ่งสามารถทดสอบโดยใช้ขดลวดทดสอบเพียงชุดเดียวก็สามารถเห็นผลได้ ยกเว้นการทดสอบการดูดกลืนไดอิเล็กตริก ซึ่งมีข้อจำกัดอยู่ที่เมกะโอห์มมิเตอร์ที่นำมาใช้งาน การทดสอบการควบคุมแรงดันสูง กระแสตรงและการทดสอบระหว่างรอบของขดลวดซึ่งขนาดของแรงดันที่ใช้ทดสอบไม่สามารถทำให้เห็นได้ชัดเจน

ภาคผนวก ก

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในโรงงาน

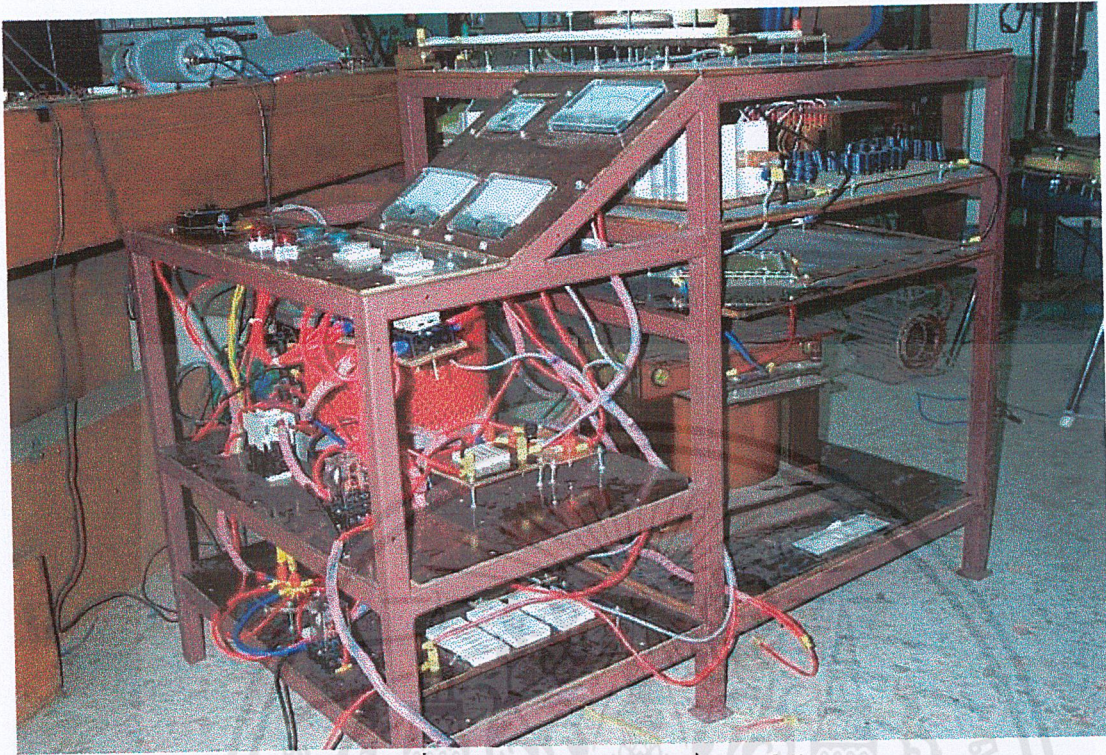
- พิกัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μsec ของเครื่องกำเนิดมีค่าเท่ากับ 6 kV
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด V_0 มีค่าเท่ากับ แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดซึ่งเท่ากับ 8 kV
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_1 มีค่าเท่ากับ 156.7 nF
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด คำนวณจาก $C_1 = 156.7 \text{ nF}$ $V_0 = 8 \text{ kV}$

$$W = \frac{1}{2} C_1 V_0^2$$

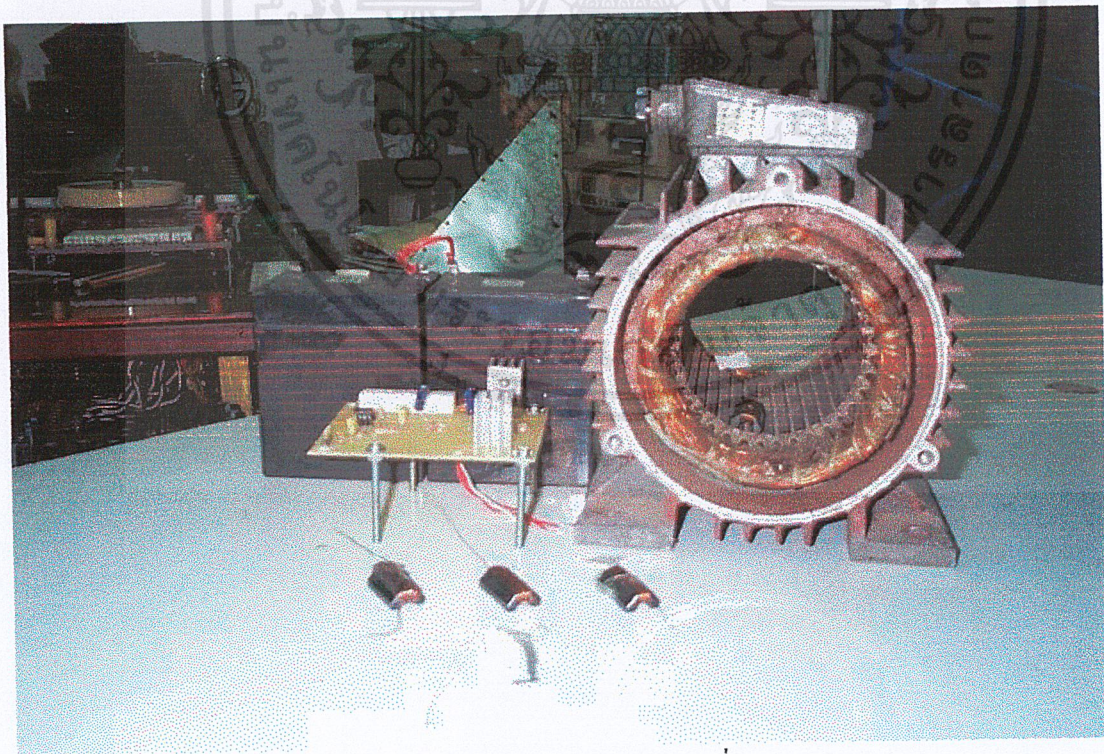
เมื่อ W = พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด = 5.014 จูล

- อัตราการดิสชาร์จเท่ากับ 60 ครั้งต่อนาที
- พิกัดกระแสลัดวงจรสูงสุดมีค่าเท่ากับ 45.625 A
- ความถี่ของสัญญาณแรงดันอิมพัลส์มีค่าเท่ากับ 10 kHz (1/100 μsec)

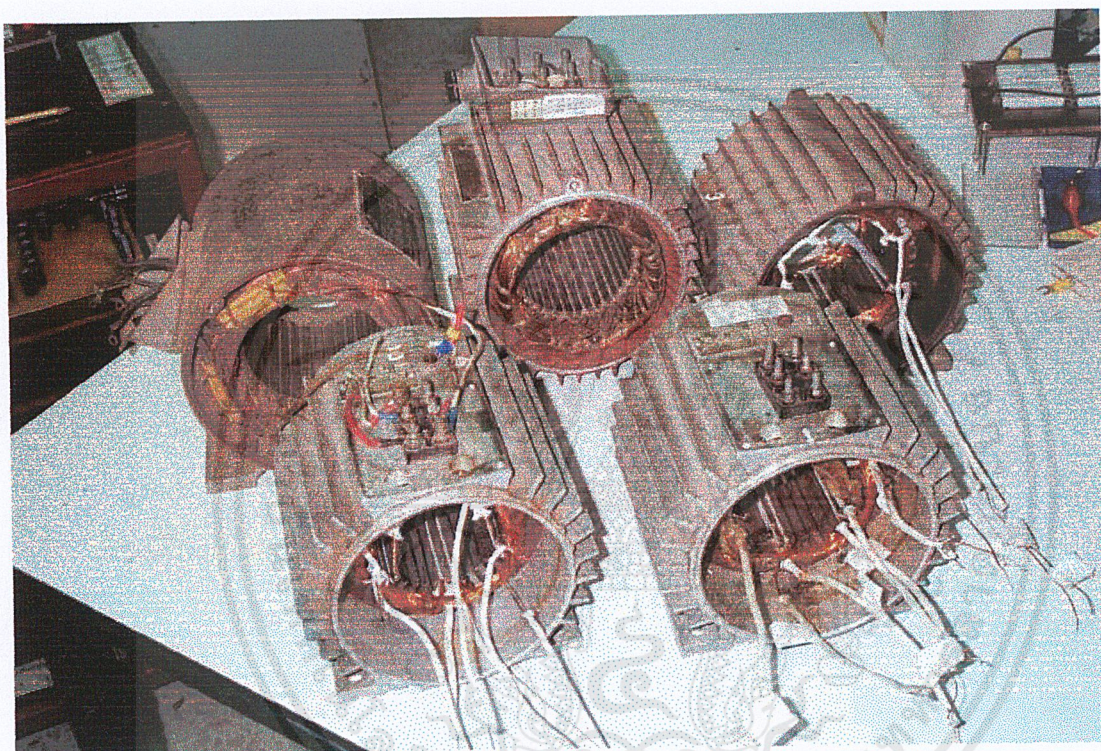


รูปแสดงเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดพิกัด 6 kV



รูปแสดงวงจรสร้างความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International IOR Rectifier

25RIA SERIES

MEDIUM POWER THYRISTORS

Stud Version

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}

25A

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 ² s
@ 60Hz	790	725	A ² s
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)

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/ μ s

(2) For voltage pulses with $t_p \leq 5$ ms

On-state Conduction

Parameter		25RIA		Units	Conditions			
		10 to 120	140 to 160					
$I_{T(AV)}$	Max. average on-state current @ Case temperature	25	25	A	180° sinusoidal conduction			
		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
		440	415		t = 8.3ms	reapplied		
		350	335		t = 10ms	100% V_{RRM}		
		370	350		t = 8.3ms	reapplied		
I^2t	Maximum I^2t for fusing	867	795	A ² s	t = 10ms	No voltage		
		790	725		t = 8.3ms	reapplied		
		615	560		t = 10ms	100% V_{RRM}		
		560	510		t = 8.3ms	reapplied		
$I^2\theta$	Maximum $I^2\theta$ for fusing	8670	7950	A ² °s	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied, $T_J = T_J$ max.			
$V_{T(OT1)}$	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.			
$V_{T(OT2)}$	High level value of threshold voltage	1.40	1.15		(I $> \pi \times I_{T(AV)}$), $T_J = T_J$ max.			
r_{11}	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_{12}	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, $T_J = 25^\circ\text{C}$			
		—	1.80					
I_H	Maximum holding current	130		mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$. Anode supply 6V, resistive load,			
I_L	Latching current	200						

Switching

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

(*) $t_q = 10\mu s$ up to 600V, $t_q = 30\mu s$ up to 1600V available on special request.

Blocking

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

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

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		Lubricated threads (Non-lubricated threads)
	20(27.5)	25	lbf-in	
	0.23(0.32)	0.29	kgf.cm	
	2.3(3.1)	2.8	Nm	
wl 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 resistance 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		25 RIA 160 M S90				
		1	2	3	4	5
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)				

Outline Table

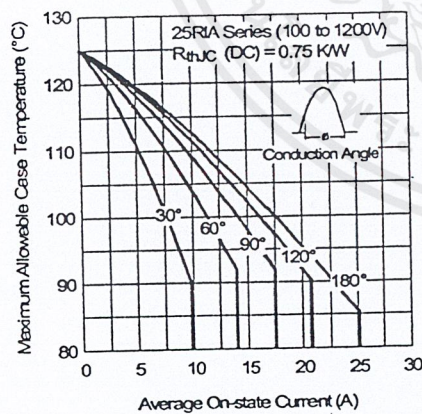
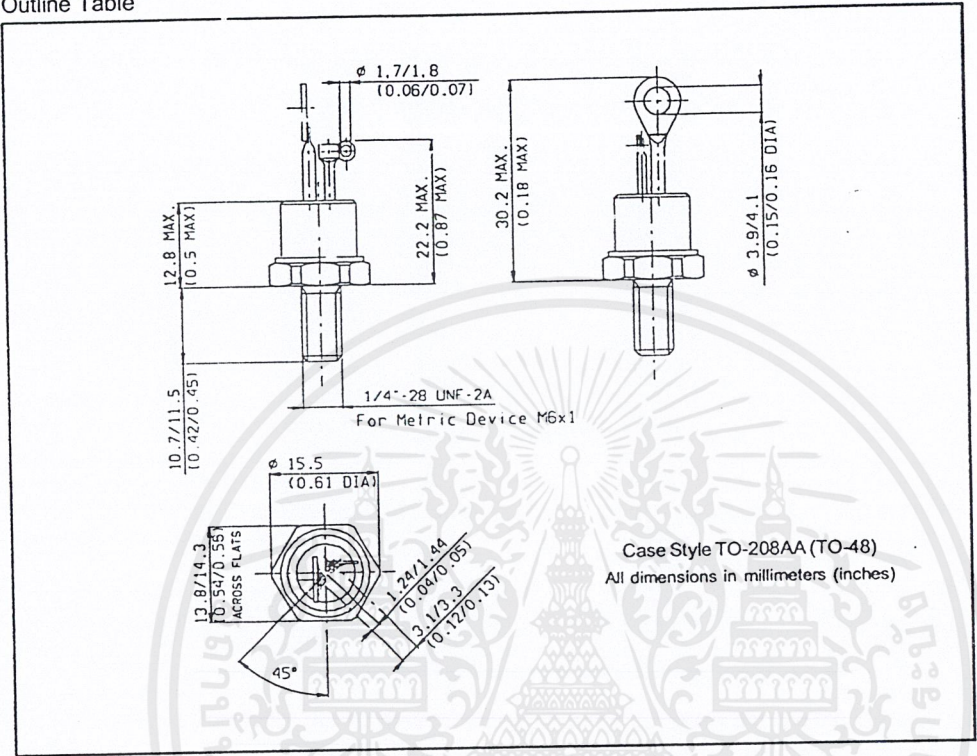


Fig. 1 - Current Ratings Characteristic

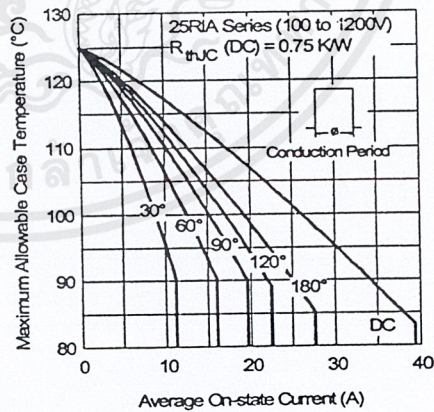


Fig. 2 - Current Ratings Characteristic

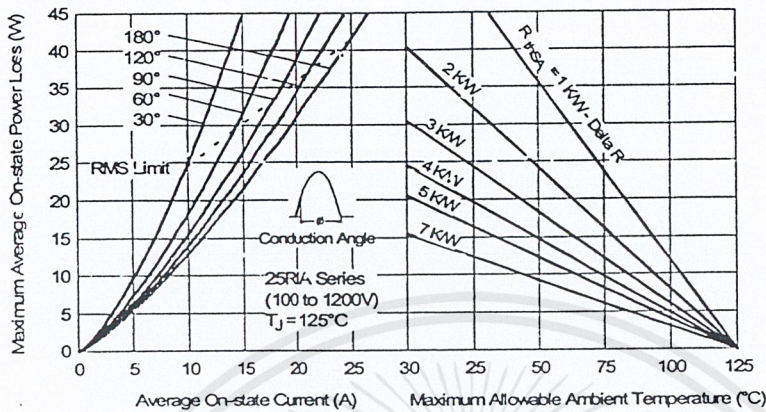


Fig. 3 - On-state Power Loss Characteristics

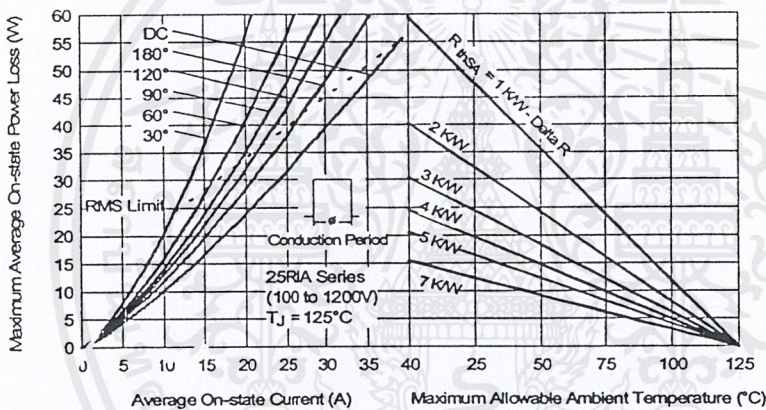


Fig. 4 - On-state Power Loss Characteristics

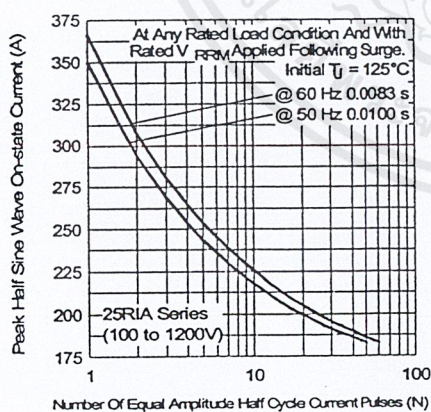


Fig. 5 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

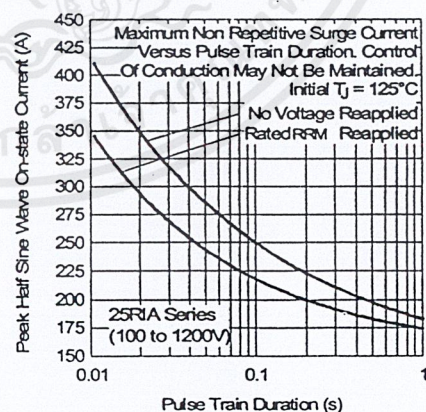


Fig. 6 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

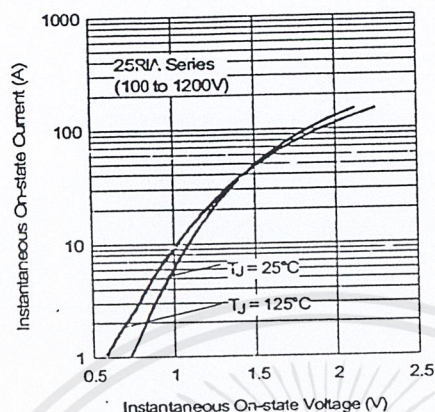


Fig. 7 - Forward Voltage Drop Characteristics

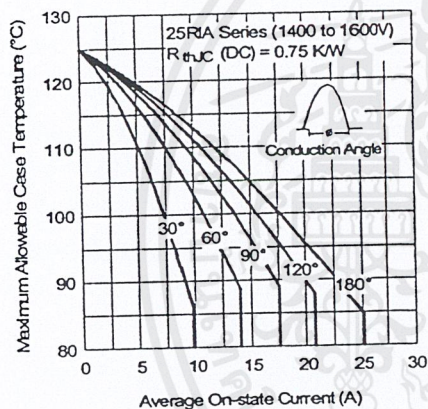


Fig. 8 - Current Ratings Characteristics

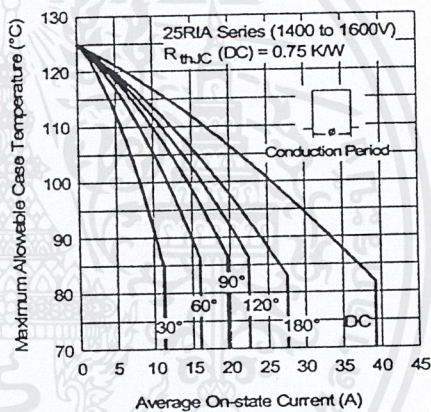


Fig. 9 - Current Ratings Characteristics

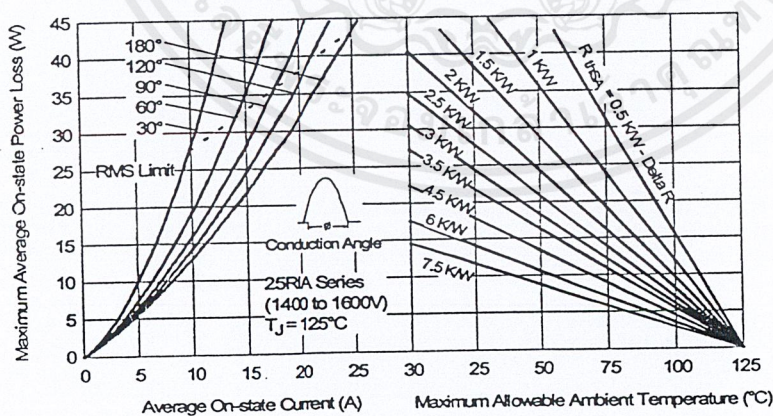


Fig. 10 - On-state Power Loss Characteristics

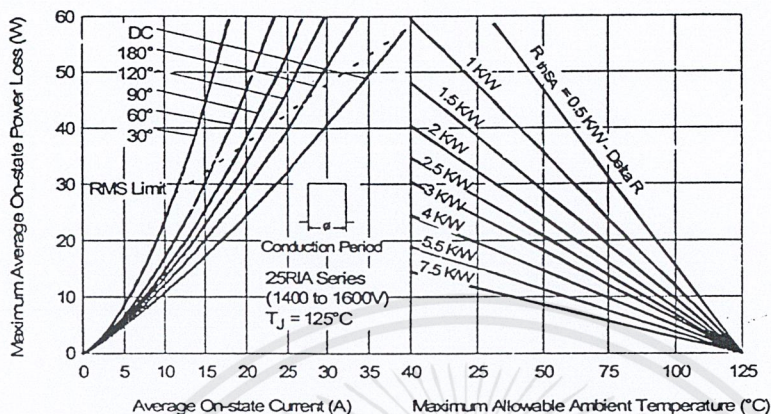


Fig. 11 - On-state Power Loss Characteristics

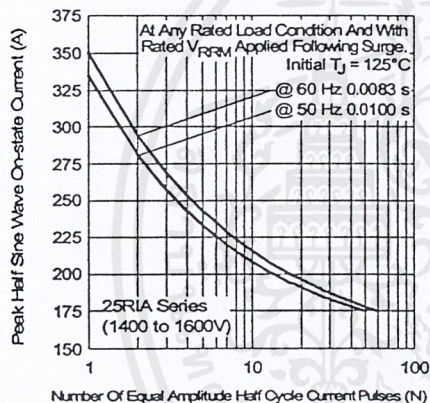


Fig. 12 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

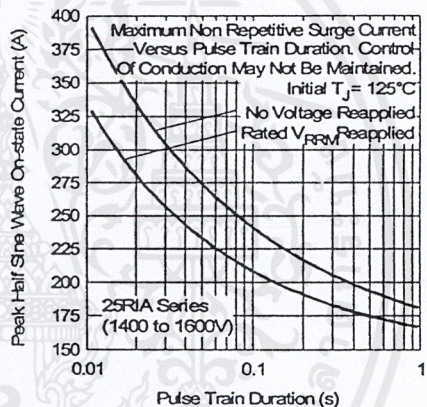


Fig. 13 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

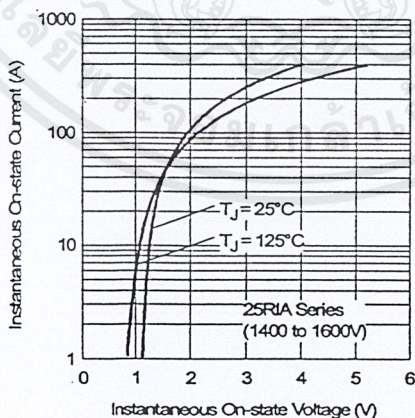


Fig. 14 - Forward Voltage Drop Characteristics

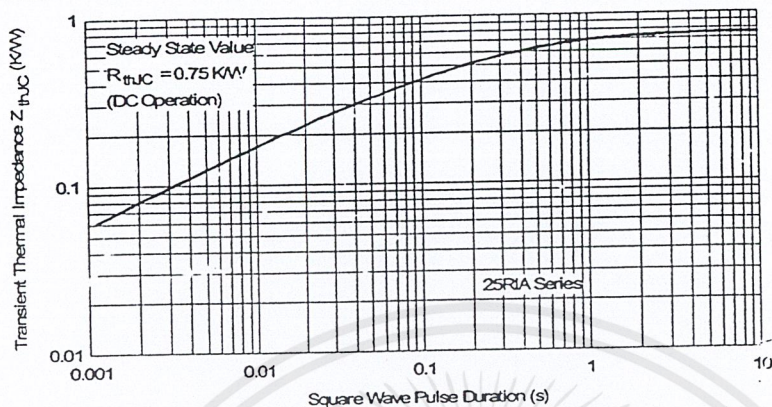


Fig. 15 - Thermal Impedance Z_{thJC} Characteristics

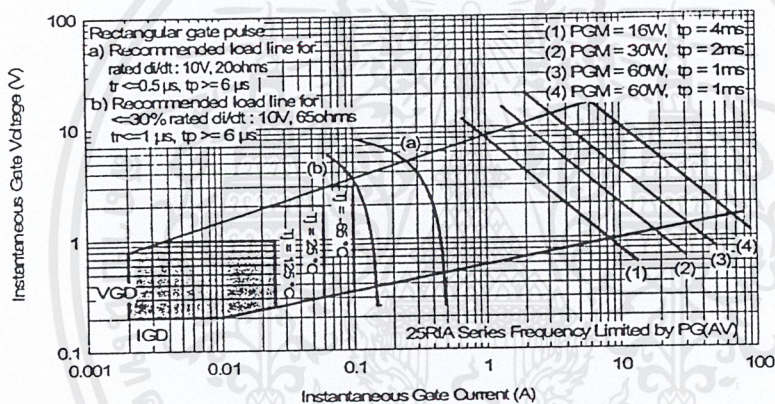


Fig. 16 - Gate Characteristics

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้นต้องขอขอบคุณ

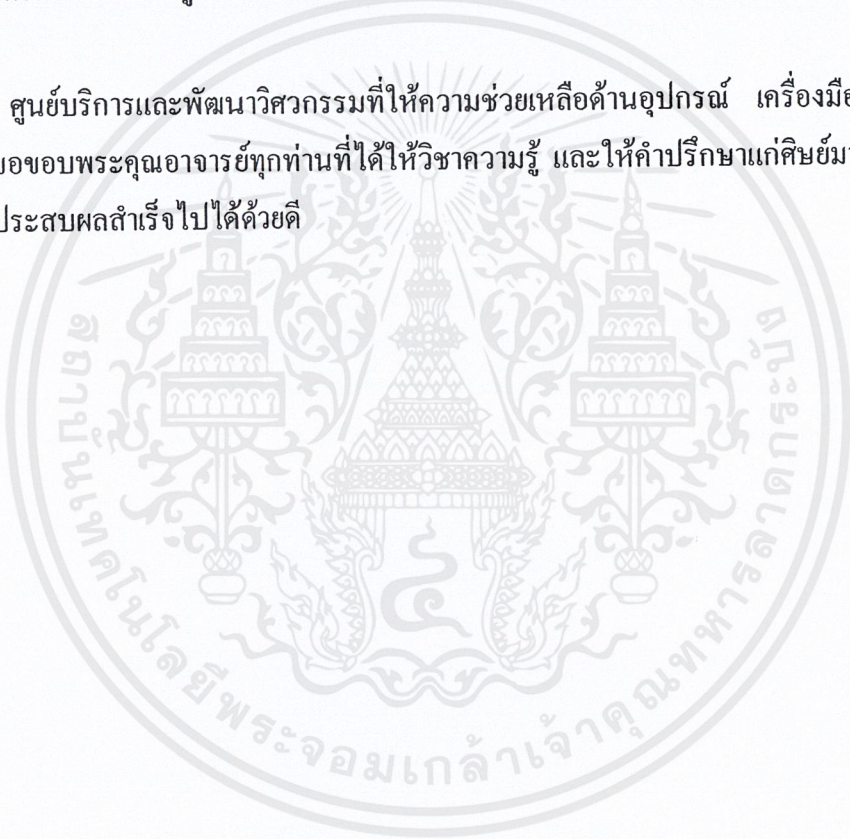
1. ผศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้เสียสละเวลาให้การชี้แนะและให้คำปรึกษากับโครงการ ตลอดจนให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

2. นายวรชาติ แซ่ก๊ก นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งได้สละเวลาให้คำปรึกษากับโครงการ

3. นายเฉลิมชัย คงมันประกายกิจ นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งได้สละเวลาให้คำปรึกษากับโครงการ

4. นายเชษฐา ศิริมัย เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม ซึ่งได้สละเวลาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการ

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ ทำயสุดขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ และให้คำปรึกษาแก้ไขมา โดยตลอดจนกระทั่งประสบผลสำเร็จไปได้ด้วยดี



เอกสารอ้างอิง

พิชิต ถ้ายอง,เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง,2540

สำรวย สังข์สะอาด,วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2528

มีชัย พิจารณ์ และคณะ,การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเปรียบเทียบผลของเส้นรั้ง,ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาโทรคมนาคม,การทดลองทางวิศวกรรมโทรคมนาคม 1 ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง,2544

ANSI/IEEE Std 95-1992(R 1977),**IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage**,1992

IEEE Std 43-2000(R 1974),**IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery**,2000

IEEE C62.1-1991,**IEEE Recommended Practice on Surge Voltage In Low-Voltage AC Power Circuit**,1995

IEEE Std 522-1992(R 1977),**IEEE Guide for Testing Turn to Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines**,1992