

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

AN IRON CRACK DETECTION EQUIPMENT

BY MAGNETIC PARTICLES



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2527

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะกรรมการบัณฑิตศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

สำหรับนักศึกษาระดับมหาบัณฑิต

ชื่อนักศึกษา นายรัชชิต ฉัตรอุทัย เลขประจำตัว ๒๕๐๐๐๖

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโคโยในเชิงสารแม่เหล็ก

... An Iron Crack Detection Equipment by Magnetic Particle

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ	ผลการสอบ
รศ.ดร.สิทธิชัย โภไคยอุดม		ผ่าน
รศ.ดร.ศิริศักดิ์ วรสุนทรโรตถ		ผ่าน
ดร.แคเนียง บริน		ผ่าน
ผศ.มนัส สัจจวิเศษ		ผ่าน
อ.นิทัศน์ กฤษณะจินกา		ผ่าน

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ ๔ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๔ เวลา ๐๙:๓๐ น. สถานที่ ห้อง A - ๓๐๕



คณะกรรมการบัณฑิตศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

017498

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 การวิเคราะห์ผลงานที่พัฒนาขึ้น	2
1.2.1 ส่วนควบคุมระบบแรงดันไฟฟ้า	2
1.2.2 ส่วนควบคุมวงจรภาคกำลัง	3
1.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชุกแซก/สตาร์	4
1.2.4 ส่วนวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น	4
1.2.5 ชุดลวดตรวจสอบ	4
1.2.6 ผงสารแม่เหล็ก	4
1.3 การทดสอบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก	5
บทที่ 2 สารแม่เหล็ก	6
2.1 บทนำ	6
2.2 การเกิดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก	6
2.2.1 โมเมนต์แม่เหล็กหมุน (magnetic spin moment)	6
2.2.2 ลักษณะการจัดวงโคจร	6
2.2.3 การกระทำร่วมกันทางไฟฟ้าสถิตย์ (exchange interaction)	7
2.3 แนวแกนที่ง่ายสำหรับการทำให้เป็นแม่เหล็ก (axis for simple magnetization)	9

2.4	โดเมนต์(magnetic domain)	10
2.4.1	โครงสร้างโดเมนต์ของแม่เหล็ก	10
2.4.2	ผนังของโดเมนต์(domain wall)	10
2.5	การทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็ก	10
2.6	วงฮิสเทอรีซิส	12
2.7	คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก	12
2.7.1	สารไดอะแมกเนติก(diamagnetic)	12
2.7.2	สารพาราแมกเนติก(paramagnetic)	12
2.7.3	สารเฟอร์โรแมกเนติก(ferromagnetic)	13
2.7.4	สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก(antiferromagnetic)	13
2.8	การทำแม่เหล็กถาวร	13
บทที่ 3	หลักการของการตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก	14
3.1	บทนำ	14
3.2	การทำสารแม่เหล็กให้เป็นแม่เหล็ก	14
3.2.1	วิธีการผ่านกระแสไฟฟ้า	15
3.2.2	วิธีการใช้ขดลวด	15
3.3	ขนาดของกระแสไฟฟ้าสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	16
3.3.1	ขนาดของกระแสไฟฟ้าสำหรับการผ่านกระแสไฟฟ้า	16
3.3.2	ขนาดของกระแสไฟฟ้าสำหรับการใช้ขดลวด	17
3.4	ลักษณะของกระแสไฟฟ้าสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	18
3.4.1	ไฟฟ้ากระแสสลับ	18
3.4.2	ไฟฟ้ากระแสตรง	18

3.5	การใช้ผงสารแม่เหล็ก	20
3.5.1	ชนิดของผงสารแม่เหล็ก	20
3.5.2	ขนาดและค่าความถ่วงจำเพาะของผงสารแม่เหล็ก	21
3.5.3	สารละลายที่ใช้ในการตรวจสอบ	21
3.5.4	ช่วงเวลาในการใช้ผงสารแม่เหล็ก	22
3.5.5	การใช้ผงสารแม่เหล็ก	22
3.6	การตรวจสอบรอยร้าว	23
3.6.1	การเตรียมชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ	23
3.6.2	ผลการทดสอบที่ผิดพลาด	23
3.7	การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน (d emagnetization)	24
3.7.1	การล้างแม่เหล็กโดยใช้สนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสสลับ	24
3.7.2	ข้อควรระวังในการตรวจสอบ	25
3.7.3	กรณีที่ต้องมีการล้างอำนาจแม่เหล็ก	25
3.7.4	กรณีที่ไม่ต้องมีการล้างอำนาจแม่เหล็ก	26
3.7.5	การทำความสะอาดชิ้นงาน	26
บทที่ 4	ขดลวดตรวจสอบ (Inspection Coil)	27
4.1	บทนำ	27
4.1.1	การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก (magnetization)	27
4.1.2	การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน (d emagnetization)	27
4.2	การออกแบบขดลวดตรวจสอบ	27
4.2.1	ขนาดของลวดตัวนำที่ใช้ทำขดลวดตรวจสอบ	27
4.2.2	การพันขดลวดตรวจสอบ	29
4.2.3	การคำนวณค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตรวจสอบ	30

4.3	การทดสอบขดลวดตรวจสอบ	33
4.3.1	ทดสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ	33
4.3.2	ทดสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง	34
4.4	การคำนวณค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ	35
4.4.1	การทำให้เป็นแม่เหล็ก	35
4.4.2	การล้างอำนาจแม่เหล็ก	35
4.5	การทดสอบค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดตรวจสอบ	35
บทที่ 5	หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ (Zigzag/star)	41
5.1	บทนำ	41
5.2	การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์	41
5.3	การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์	45
5.3.1	ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า	47
5.3.2	การคำนวณหาจำนวนรอบและขนาดของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	48
5.3.3	การพันหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	50
5.3.4	การออกแบบขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก	52
5.4	การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์	55
5.4.1	การทดสอบวงจรเปิด	55
5.4.2	การทดสอบวงจรปิด	58
บทที่ 6	วงจรควบคุม(Control Circuit)	60
6.1	บทนำ	60
6.2	วงจรควบคุมการตัดต่อวงจรภาคกำลัง	60
6.2.1	หลักการทำงาน	60

6.2.2 การออกแบบ	61
6.3 วงจรควบคุมการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า	65
6.3.1 หลักการทำงาน	65
6.3.2 การออกแบบ	71
6.4 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น	76
6.4.1 หลักการทำงาน	76
6.4.2 การออกแบบ	78
บทที่ 7 การทดสอบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก	80
7.1 บทนำ	80
7.2 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมภาคกำลัง	80
7.3 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า	81
7.4 การทดสอบการทำงานขึ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	82
7.5 การทดสอบการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน	85
บทที่ 8 บทสรุป	87
เอกสารอ้างอิง	91
กิตติกรรมประกาศ	92
ภาคผนวก	93
ผ.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง	94
ผ.2 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	95
ผ.3 กราฟแสดงคุณสมบัติของแกนเหล็ก	98
ผ.4 ไตแอก	100
ผ.5 opto coupler	101
ผ.6 ไตรแอก	103
ผ.7 การล้างอำนาจแม่เหล็ก	105
ผ.8 การวางชิ้นงานเพื่อตรวจสอบรอยร้าวในลักษณะต่าง ๆ	115
ผ.9 ตัวอย่างการคำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	2
2.1	7
2.2	8
2.3	9
2.4	11
2.5	11
2.6	12
3.1	14
3.2	15
3.3	16
3.4	20
4.1	29
4.2	29
4.3	30
4.4	31
4.5	31
4.6	32
4.7	36
4.8	36
4.9	37
4.10	38
4.10 ก)	38 ข)

4.11	ต้นแบบการทดสอบค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดตรวจสอบ	40
5.1	แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์	42
5.2	แสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์	43
5.3	แผนผังแสดงการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	46
5.4	แผนผังแสดงการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน	46
5.5	แสดงการต่อขดลวดแบบซิกแซก	49
5.6	แสดงการต่อขดลวดแบบสตาร์ทางด้านทุติยภูมิ	50
5.7	แสดงการต่อขดลวดในแต่ละเฟส	51
5.8	แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแบบซิกแซก	52
5.9	แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิแบบสตาร์	52
5.10	แสดงการเรียงแผ่นเหล็กในแต่ละชั้นของแกนเหล็ก หน่วย เซนติเมตร	54
5.11	หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ต้นแบบ	54
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขดลวดกับแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ	56
6.1	แผนผังการทำงานของภาคกำลัง	61
6.2	หน้าปัทม์เครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็ก	62
6.3	แสดงวงจรภาคกำลัง	63
6.4	แสดงวงจรควบคุมวงจรภาคกำลัง	64
6.5	วงจรควบคุมเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น ก) วงจรพื้นฐาน ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคร่อมโวลต์ที่เป็นความต้านทาน	66
6.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ กับ ∞ ขณะที่มุม θ มีค่าต่าง ๆ	66
6.7	วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่น ก) วงจรพื้นฐาน ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโวลต์ที่เป็นความต้านทาน ค) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโวลต์ที่เป็นอินดักทีฟ	67
6.8	วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นโดยใช้ไคแอกและไตรแอก	68
6.9	แผนผังแสดงการทำงานของวงจรควบคุมโดยใช้ opto coupler	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.10	แสดงแผนผังของสัญญาณต่าง ๆ ในวงจรควบคุมแบบใช้ opto coupler	70
6.11	วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นสามเฟส	71
6.12	วงจรขจัดความไวโรแอกแบบควบคุมเฟสโดยใช้ไคแอก	72
6.13	ต้นแบบวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ไคแอก	73
6.14	แสดงวงจรสร้างสัญญาณซิงค์	74
6.15	แสดงวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย	74
6.16	แสดงวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	75
6.17	แสดงวงจรปรับค่าที่คิกคาที่ต้องการเปรียบเทียบ	75
6.18	วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่นโดยใช้ไคแอก	76
6.19	แรงดันไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด R_1	77
6.20	วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น	78
6.21	วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่นต้นแบบ	79
7.1 ก)	แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคร่อมไทรแอก	81
7.1 ข)	แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคร่อมชดลวคตรวสอบ	82
7.2	เครื่องต้นแบบและชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ	82
7.3	แสดงขนาดของชิ้นงานลักษณะต่าง ๆ	84
7.4	แสดงลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้น	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ค่าสนามแม่เหล็กในการทำแม่เหล็กถาวร	13
3.1	ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กในรูปของแอมป์-รอบของขดลวดตรวจสอบ	18
3.2	ค่าความเข้มของสารละลายที่ใช้ในการตรวจสอบกำหนดโดย JIS	21
4.1	ผลการทดสอบขดลวดตรวจสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ	33
4.2	ผลการทดสอบขดลวดตรวจสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง	34
4.3	การเปรียบเทียบค่าความต้านทานและความเหนียวที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ	34
4.4	การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ	39
5.1	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิขณะไร้โหลด	55
5.2	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิขณะไร้โหลด	56
5.3	ผลการทดสอบวงจรเปิดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	57
5.4	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจากการทดสอบวงจรเปิด	58
5.5	ผลการทดสอบวงจรปิดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	58
5.6	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจากการทดสอบวงจรปิด	59
7.1	ผลการทดสอบค่าแอมป์-รอบในการทำให้เป็นแม่เหล็กของขดลวดตรวจสอบ	83
7.2	ค่าแอมป์-รอบในการทำให้เป็นแม่เหล็กสำหรับเพลารถยนต์ขนาดต่าง ๆ	84
7.3	ค่าแอมป์-รอบในการทำให้เป็นแม่เหล็กสำหรับสปริงขนาดต่าง ๆ	85
7.4	ผลการทดสอบค่าแอมป์-รอบในการล้างอำนาจแม่เหล็กของขดลวดตรวจสอบ	86
7.5	ค่าแอมป์-รอบในการล้างอำนาจแม่เหล็กสำหรับเพลารถยนต์และสปริงขนาดต่าง ๆ	86

สัญลักษณ์

- W_{ex} : พลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอม
- J_e : อินทิกรัลของการแลกเปลี่ยนพลังงาน
- M : โมเมนต์ของการหมุน
- V : ปริมาตรทั้งหมดของสารที่เป็นแม่เหล็ก หน่วย ลูกบาศก์เมตร
- J : ค่าสนามแม่เหล็ก หน่วย เทสลา
- J_s : ค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัว หน่วย เทสลา
- H : ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หน่วย แอมป์/เมตร
- H_C : แรงโคเอซิฟ หน่วย แอมป์/เมตร
- H_S : ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย แอมป์/เมตร
- B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย เทสลา
- B_r : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง หน่วย เทสลา
- R : ความต้านทาน หน่วย โอห์ม
- ρ : ความต้านทานจำเพาะของขดลวดทองแดง หน่วย โอห์ม/เมตร
- N : จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ
- L : ความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก หน่วย เฮนรี
- A : พื้นที่หน้าตัด หน่วย ตารางเมตร
- θ : เส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย เวเบอร์
- I : กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมป์
- μ : ความซึมซาบแม่เหล็ก หน่วย เฮนรี/เมตร

- E : แรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำ หน่วย โวลต์
- f : ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ หน่วย เฮิรตซ์
- ๙ : มุมจุดขนวน หน่วย องศา
- γ : ช่วงมุมนำกระแส หน่วย องศา
- C : คาปาซิเตอร์ หน่วย ฟารัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก
โดย	ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2527

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้รายงานถึงการพัฒนาค้นแบบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยอาศัยหลักการวางตัวของแนวเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องต้นแบบมีส่วนประกอบหลักดังนี้ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น ขดลวดตรวจสอบ ส่วนตรวจสอบรอยร้าวโดยใช้ผงสารแม่เหล็กเรืองแสง และ ส่วนวงจรปรับระดับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เนื้อหาสาระส่วนใหญ่ จะรายงานถึงปรัชญาในการพัฒนา การแก้ปัญหาต่าง ๆ และการทดสอบเครื่องต้นแบบ อุปกรณ์นี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรและยานพาหนะที่ทำด้วยเหล็กในประเทศไทย ซึ่งขณะนี้ เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น ได้ทำการติดตั้งและทดสอบอยู่ในโรงงานแล้ว

Thesis Title	An Iron Crack Detection Equipment by Magnetic Particles.
Name	Chaiwut Chat-uthai.
Thesis Advisor	Dr.Birasak. Varasundharosoth.
Level of study.	Master of Engineering in Electrical Engineering.
Department	Electrical Engineering.
Academic Year	1984.

Abstract

This thesis concerns the development of an iron crack detector unit and is based on the fundamental properties of magnetic flux and its path. The model consists of a three-phase Zigzag/star type transformer, a three-phase half-wave rectifier, a detection coil and an adjustable voltage regulator electronics circuit. Crack detection is achieved by using fluorescent particles. The design philosophy, development and test results of the model are illustrated in detail. This equipment would be beneficial to the local vehicle fabrication industry. The prototype has already been installed in a spring factory.

บทที่ 1

บทนำ

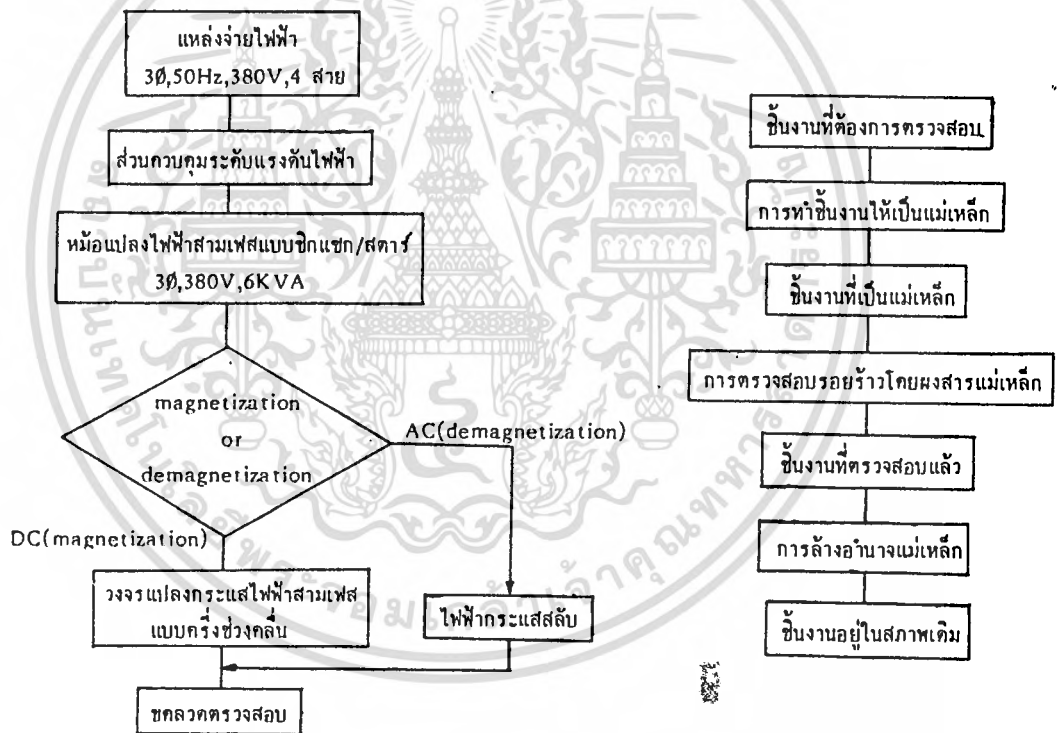
1.1 บทนำ

โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ทำด้วยเหล็กของเครื่องจักรและยานพาหนะ เช่น สปริง แหนบรถยนต์ เพลาค้าง ๆ มีอยู่หลายโรงงานมักจะประสบปัญหาในด้านคุณภาพของชิ้นส่วน เมื่อนำไปใช้งาน สปริงมักจะเกิดการล้า แหนบและเพลามีการแตกหักขณะใช้งาน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายต่อผู้ใช้ ปกติแล้วโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จะมีขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานก่อนออกจากโรงงาน โดยใช้กรรมวิธีต่าง ๆ ซึ่งเป็นการสุ่มตัวอย่าง (sample test) แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากนำไปใช้งานส่วนใหญ่เกิดจากการแตกหรือร้าวภายในผิวของชิ้นงานจากขั้นตอนการผลิต ซึ่งกรรมวิธีต่าง ๆ ที่โรงงานใช้ตรวจสอบไม่สามารถตรวจสอบหารอยร้าวลักษณะนี้ได้ ทั้งนี้เพราะชิ้นงานที่มีรอยร้าวอยู่จะไม่เกิดปัญหาในขณะตรวจสอบ แต่จะเกิดปัญหาขึ้นภายหลังเมื่อนำไปใช้งานจริง ในปัจจุบันนี้มีโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งได้เพิ่มขั้นตอนการตรวจสอบรอยร้าวในชิ้นงานขึ้น โดยใช้เครื่องตรวจสอบที่สั่งมาจากต่างประเทศ ซึ่งสามารถตรวจสอบชิ้นงานเมื่อผ่านขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ ทุกขั้นตอน หรือตรวจสอบหลังจากสิ้นสุดขั้นตอนการผลิตแล้ว ซึ่งเป็นการปรับปรุงการควบคุมคุณภาพ เพื่อให้ชิ้นงานที่ออกจากโรงงานผลิตมีความเชื่อถือเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุที่เครื่องตรวจสอบนี้ต้องสั่งมาจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมาก สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนาที่มีความจำเป็นอย่างมากที่จะพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้ขึ้นใช้เอง ซึ่งเป็นการพัฒนาทางด้านการวิจัยภายในประเทศและยังเป็นการลดการขาดดุลการค้าอีกทางหนึ่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะได้กล่าวถึงการออกแบบและการทำงานของเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็ก โดยใช้ผงสารแม่เหล็กที่ได้พัฒนาสร้างขึ้นสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีราคาต่ำกว่าและให้ประสิทธิภาพในการทำงานที่ทัดเทียมกับเครื่องที่สั่งมาจากต่างประเทศ เครื่องที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ 4 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนจ่ายต้นกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ (Zigzag/star) ส่วนวงจรควบคุมซึ่งแบ่งเป็นวงจรควบคุมภาคกำลังและวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า ส่วนวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น และส่วนสุดท้ายคือขดลวดตรวจสอบสำหรับตรวจสอบชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การวิเคราะห์ผลงานที่พัฒนาขึ้น

หลักการตรวจสอบรอยร้าวในเหล็กใช้คุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก โดยการทำให้ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบให้เป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในชิ้นงาน เมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นในชิ้นงาน จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการเบี่ยงเบนออกจากแนวปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบหาเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนนี้ได้ ทำให้ทราบถึงตำแหน่งและลักษณะของรอยร้าวได้ (บทที่ 3) ต่อจากนั้นต้องนำชิ้นงานไปล้างอำนาจแม่เหล็กเพื่อให้อยู่ในสภาพปกติ ชั้นตอนต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนผังการทำงานของเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

1.2.1 ส่วนควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ส่วนควบคุมนี้ทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการกำหนดค่าแอมป์-รอบของขดลวดตรวจสอบสำหรับสร้างแม่เหล็ก ส่วนควบคุมนี้มีอยู่หลายลักษณะดังนี้

- 1) Induction Voltage Regulator (I.V.R.) โครงสร้างของอุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวด (wound rotor) ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงโดยทั่วไป แต่จะมีขดลวดที่หมุนได้ โดยขดลวดที่หมุนไปนี้ จะทำหน้าที่ในการเสริมหรือหักล้างเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าทางออกเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ราบเรียบและอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้ อีกทั้งค่าของแรงดันไฟฟ้าสามารถออกแบบให้มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้าง ง่ายต่อการควบคุมให้ทำงานอัตโนมัติ แต่มีข้อเสียตรงที่มีโครงสร้างที่ยากต่อการขยายขนาด ทั้งนี้เนื่องจากถูกจำกัดด้วยขนาดของแปร่งถ่านที่จะเป็นตัวให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อีกทั้งมีความยากลำบากในการบำรุงรักษาและยังมีประสิทธิภาพต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้าง ซึ่งทำให้มีส่วนสูญเสียไปในช่องอากาศระหว่างตัวอยู่กับที่และตัวหมุน
- 2) การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีควบคุมเฟส (AC phase control) วงจรลักษณะนี้ มีอยู่หลายแบบด้วยกัน ซึ่งเป็นการควบคุมการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ไทรสเตอร์ วงจรที่มีความถี่ไม่เกิน 400 เฮิซ และกระแสที่ไม่สูงนัก จะนิยมใช้ไตรแอก (triac) สำหรับที่ความถี่สูงหรือใช้กระแสสูงมักจะนิยมใช้เอสซีอาร์ (SCR) แทน การออกแบบวงจรจุดชนวนไตรแอกอย่างง่าย ๆ โดยใช้ไดแอก (Diac) หรือใช้ opto coupler (photo triac driver - output) ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้าง ง่ายต่อการควบคุมให้ทำงานอัตโนมัติสามารถขยายขนาดได้ การบำรุงรักษาทำได้ง่าย สะดวก, ประสิทธิภาพสูง และที่สำคัญคือประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้าง (บทที่ 6)

1.2.2 ส่วนควบคุมวงจรภาคกำลัง

วงจรภาคกำลังประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

และขดลวดตรวจสอบ ส่วนควบคุมนี้ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรไฟฟ้าในทุกชั้นคอน เป็นส่วนกำหนดการทำงานให้ เป็นแม่เหล็ก และการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน โดยใช้สวิตช์แม่เหล็กเป็นตัวตัดต่อวงจร(บทที่ 6)

1.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์นี้ จะมีการต่อแบบซิกแซกร่วมอยู่ ทางด้านปฐมภูมิ จะเห็นได้ว่า จากการที่มีการต่อร่วมกันภายในระหว่างเฟสด้วยกันนั้น จะสามารถลดค่าแรงดัน ไฟฟ้าของฮาร์โมนิกที่ 3 (3rd harmonics) ลงไป ดังนั้นจึงสามารถใช้กับโหลดที่ไม่สมดุลได้ดี ในกรณี การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน(บทที่5)

1.2.4 ส่วนวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งวงคลื่น

ส่วนนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำไปสร้างสนาม แม่เหล็กสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก วงจรแบบนี้จะให้แรงดันไฟฟ้าทางออกมีลักษณะที่เรียบขึ้น สามารถ เพิ่มวงจรฟิลเตอร์ (filter) เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสได้ ในลักษณะนี้จะใช้ไดโอดเป็นตัวแปลงไฟ ซึ่งแรงดันขาออกจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลง นอกจากจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าขาเข้า(บทที่ 6)

1.2.5 ขดลวดตรวจสอบ

ขดลวดตรวจสอบนี้ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเป็นแม่เหล็ก เพื่อนำไปตรวจสอบหารอยร้าว โดยใช้ผงสารแม่เหล็กและทำหน้าที่ล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน เพื่อให้ ชิ้นงานอยู่ในสภาพปกติ การทำงานทั้งสองลักษณะถูกควบคุมโดยส่วนควบคุมวงจรภาคกำลัง การออกแบบขดลวด ตรวจสอบ จะออกแบบให้มีลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นแบบแนวตรง (linear magnetization) ดังนั้นการพันขดลวดตรวจสอบจะพันเป็นแบบวงกลม(circular coil) (บทที่ 4)

1.2.6 ผงสารแม่เหล็ก

ผงสารแม่เหล็กใช้สำหรับตรวจสอบหารอยร้าวของเหล็ก โดยผงสารแม่เหล็กจะถูกดูด

โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนจากชิ้นงานที่เป็นแม่เหล็ก และมีสี่ที่ชัดเจนเห็นได้ชัดขณะตรวจสอบ ซึ่งจะปรากฏเป็นเส้นตามลักษณะรอยร้าว(บทที่ 3)

1.3 การทดสอบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

การทดสอบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวโลหะ โดยใช้ผงสารแม่เหล็กเป็นการทดสอบการทำงานทั้งหมดของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เริ่มตั้งแต่การทำชิ้นงานลักษณะต่าง ๆ เช่น สปริง,เพลารถยนต์ ให้เป็นแม่เหล็ก โดยพิจารณาถึงการปรับค่าแอมป์-รอบของขดลวดตรวจสอบ พิกัดของกำลังไฟฟ้าที่ใช้,เวลาที่เหมาะสมในการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก ต่อจากนั้นนำชิ้นงานที่เป็นแม่เหล็กไปตรวจสอบหารอยร้าว โดยใช้สารละลายที่มีผงสารแม่เหล็กชนิดเรืองแสงผสมอยู่ราดบนชิ้นงาน รอยร้าวของชิ้นงานจะปรากฏให้เห็นเมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยแสงที่ทำให้เรืองแสง ขั้นตอนสุดท้ายคือการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพปกติ โดยใช้วิธีการลดค่าสนามแม่เหล็กสลับที่จ่ายให้กับชิ้นงานที่เป็นแม่เหล็กลงจนเป็นศูนย์ การทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบจากชิ้นงานจริงที่ผลิตออกจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิต สปริง,แหวนรถยนต์ และ เพลา (บทที่ 7)

บทที่ 2

สารแม่เหล็ก

2.1 บทนำ

ในบทนี้ เป็นการกล่าวถึงสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงการเกิดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก แนวแกนสำหรับการทำให้เป็นแม่เหล็ก โดเมนของแม่เหล็ก (magnetic domain) คุณสมบัติของการทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็ก วงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) (Ref.1) คุณสมบัติของสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ และ การทำแม่เหล็กถาวร (Ref.2)

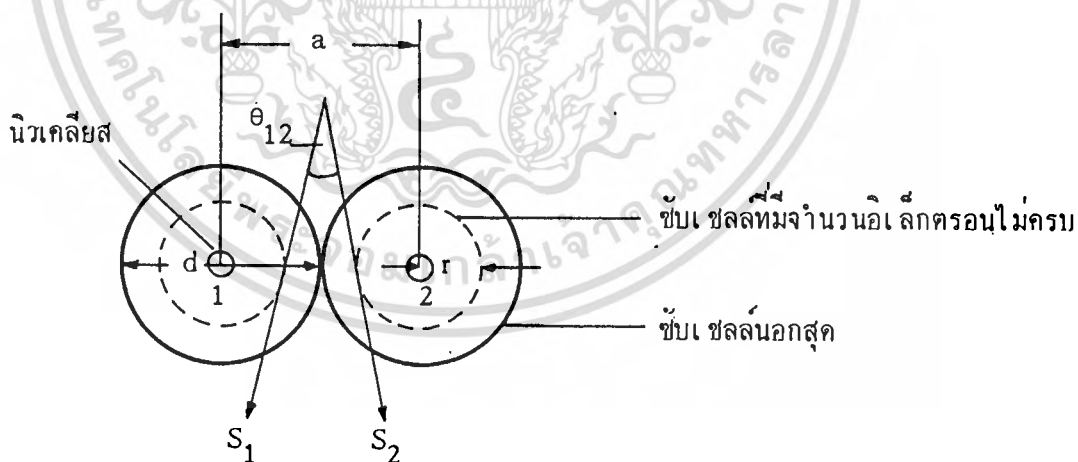
2.2 การเกิดอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็กประกอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

2.2.1 โมเมนต์แม่เหล็กหมุน (magnetic spin moment) สารแม่เหล็กที่แสดงความเป็นแม่เหล็กได้นั้น อธิบายได้โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโมเมนต์แม่เหล็ก ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของโปรตอนและอิเล็กตรอน กล่าวคือ ในขณะที่อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเองก็ยังมีหมุนรอบนิวเคลียสในแนวเส้นรอบวงที่คงที่ด้วย คุณสมบัติทางแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนนี้ เรียกว่า โมเมนต์แม่เหล็กหมุน โมเมนต์นี้จะมีค่ามากกว่าโมเมนต์แม่เหล็กของโปรตอนประมาณ 650 เท่า ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า ในสารแม่เหล็ก โมเมนต์การหมุนของอิเล็กตรอนมีบทบาทที่สำคัญมาก

2.2.2 ลักษณะการจัดวงโคจร ในการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมนั้น ไม่ได้เกิดจากอิเล็กตรอนทุก ๆ ตัว มีอิเล็กตรอนเพียงบางส่วนเท่านั้น ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดังกล่าวนี้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะโมเมนต์แม่เหล็กหมุนบางอันจะมีทิศทางตรงกันข้ามและหักล้างซึ่งกันและกัน ทำให้เป็นกลางในทางแม่เหล็ก เนื่องจากระดับพลังงานของอิเล็กตรอนต่าง ๆ ในอะตอมมีค่าที่แตกต่างกัน อิเล็กตรอนเหล่านี้จะจัดเรียงตัวตามวงโคจรหรือเชลล์(shell) หรือซับเชลล์(subshell) ต่าง ๆ วงโคจรหรือเชลล์และซับเชลล์เหล่านี้ไม่เพียงแต่จะมีระยะห่างจากนิวเคลียสที่แตกต่างกันเท่านั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่มีเติมในแต่ละวงโคจรยังแตกต่างกันไปด้วย อิเล็กตรอนในอะตอมจะมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่พยายามให้เกิดเสถียรภาพทางพลังงานขึ้น โดยจะจัดเรียงตัวจากเชลล์และซับเชลล์ที่อยู่ใกล้นิวเคลียสที่สุดและห่างออกไปเรื่อย ๆ นั่นคือ อิเล็กตรอนจะเริ่มมี

จำนวนครบพอดีในชั้นเชลล์ที่อยู่ใกล้นิวเคลียสที่สุดก่อน แล้วจึงมีจำนวนที่ครบในชั้นเชลล์ต่อไปซึ่งห่างออกไปจากนิวเคลียส แต่มีธาตุหรือสารบางชนิดมีการเรียงตัวของจำนวนอิเล็กตรอนที่ต่างออกไปจากนี้ กล่าวคือ ในขณะที่บางชั้นเชลล์ยังมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่ครบตามที่ต้องการแต่จะมีอิเล็กตรอนปรากฏในชั้นเชลล์อื่น เช่น ธาตุแมงกานีส (Mn), เหล็ก (Fe) ด้วยเหตุนี้จะทำให้เกิดมีวงโคจรที่ไม่ถูกหักล้างปรากฏเหลืออยู่ ซึ่งจะแสดงความเป็นแม่เหล็กขึ้นในธาตุนั้น ๆ อย่างไรก็ตาม เฉพาะเงื่อนไขข้อนี้ ยังไม่เป็นการเพียงพอในการอธิบาย จำเป็นต้องมีเงื่อนไขอื่น ๆ อีก

2.2.3 การกระทำร่วมกันทางไฟฟ้าสถิต (exchange interaction) เงื่อนไขสำหรับการเกิดอำนาจแม่เหล็กในข้อนี้ เกี่ยวกับการกระทำร่วมกันทางไฟฟ้าสถิตอย่างรุนแรงระหว่างอิเล็กตรอนของอะตอมซึ่งอยู่ใกล้ชิดกัน กล่าวคือ วงโคจรของอะตอมชนิดเดียวกันซึ่งอยู่ใกล้ชิดกันนั้น จะถูกยึดแน่นเข้าด้วยกันอย่างเหนียวแน่นด้วยแรงกระทำร่วมกัน พลังงานที่เกิดจากแรงที่กระทำร่วมกันนี้ เรียกว่า พลังงานแลกเปลี่ยน (exchange energy)



รูปที่ 2.1 แสดงการวางตัวใกล้ชิดกันของ 2 อะตอม

จากรูป 2.1 แต่ละอะตอมมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ d , รัศมีโคจรของชั้นเชลล์ที่มีจำนวนอิเล็กตรอนไม่ครบ มีค่าเท่ากับ r กำหนดให้ค่าการหมุนของแต่ละอะตอมเป็น S_1 และ S_2 ตามลำดับ จะได้

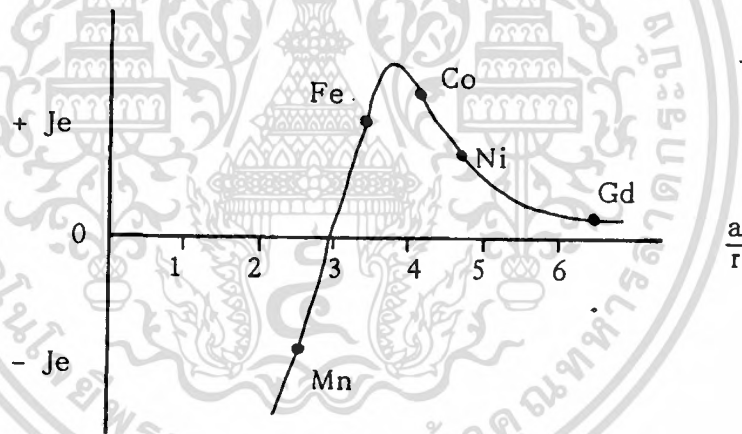
พลังงานแลกเปลี่ยน (W_{ex})

$$W_{ex} = -2 J_e S_1 S_2 \cos \theta_{12} \quad (2.1)$$

J_e : อินทิกรัลของการแลกเปลี่ยน

θ_{12} : มุมซึ่งกระทำกันระหว่าง S_1 และ S_2

ค่าของ J_e เป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงลักษณะของการกระทำร่วมกันทางไฟฟ้าสถิตย์และจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่าง a ของอะตอมทั้งสองกับรัศมี r ของซิปเซลล์ที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบจำนวนที่ต้องการ นั่นคือ J_e จะขึ้นกับค่า $\frac{a}{r}$ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_e กับอัตราส่วน $\frac{a}{r}$

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อ $\frac{a}{r}$ มีค่ามาก ค่า J_e จะมีค่าน้อยมาก และจะไม่แสดงคุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็ก ในทางตรงกันข้าม ถ้า $\frac{a}{r}$ มีค่าน้อย ค่า J_e จะมีค่าติดลบ ซึ่งหมายถึงวงโคจรวางตัวในลักษณะขนานหักล้างกัน ซึ่งเรียกว่า แอนติ-เฟอร์โรแมกเนติซึม (anti-ferrromagnetism) ดังนั้นเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการเป็นแม่เหล็ก ก็คือ ค่า J_e ต้องมีค่าเป็นบวก และ $\frac{a}{r}$ ต้องมีค่าตั้งแต่ 3 ขึ้นไป ในสารที่เป็นแม่เหล็กนั้น เนื่องจากวงโคจรมีการวางตัวเป็นกลุ่มที่มีระเบียบ และแต่ละกลุ่มจะรวมตัวกัน ซึ่งทำให้เกิดค่าอำนาจแม่เหล็ก J (strength of magnetization) ซึ่งหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

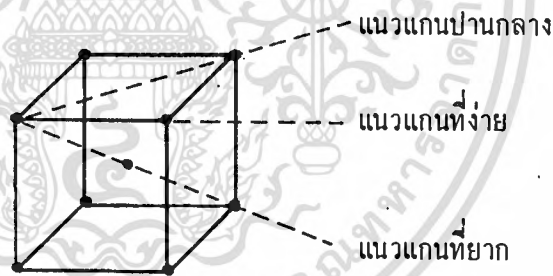
$$J = \frac{\Sigma M}{V} \quad \text{เทสลา.} \quad (2.2)$$

V : ปริมาตรทั้งหมดของสารที่เป็นแม่เหล็กหน่วยลูกบาศก์เมตร

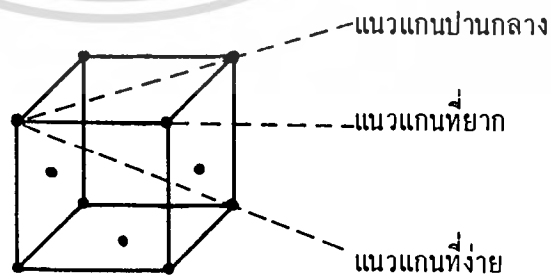
ในขณะที่ยังไม่ได้ป้อนสนามแม่เหล็กผ่านสารที่เป็นแม่เหล็ก โมเมนต์ของการหมุน(M) แต่ละอันจะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จึงไม่ปรากฏค่าของ J ออกมา แต่เมื่อโมเมนต์เหล่านี้วางตัวอย่างเป็นระเบียบขึ้นก็จะมีค่า J ปรากฏออกมา จนในที่สุดค่า J จะมีค่าเท่ากับ J_s ซึ่งเป็นค่าอิ่มตัว(saturate) และมีค่าสูงที่สุด

2.3 แนวแกนที่ง่ายสำหรับการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Axis for Simple Magnetization)

ค่า J ของสารที่เป็นแม่เหล็กจะพยายามวางตัวในแนวแกนผลึกที่จำเพาะอันหนึ่งซึ่งปรากฏการณ์นี้ จะทำให้ความแรงของการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกให้กับสารที่เป็นแม่เหล็กมีค่าต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับทิศทางของสนามที่ป้อน



ก) ธาตุเหล็ก



ข) ธาตุนิเกิล

รูปที่ 2.3 แสดงแนวแกนต่าง ๆ ของการทำให้เป็นแม่เหล็ก

2.4 โดเมนซ์ของแม่เหล็ก (Magnetic Domain)

2.4.1 โครงสร้างโดเมนซ์ของแม่เหล็ก

การกระทำร่วมกันทางไฟฟ้าสถิตย์ เป็นตัวการที่ทำให้เกิดค่า J_S และยังเป็นตัวกำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง J_S กับอุณหภูมิสมายอานางแม่เหล็ก ซึ่งถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของสารที่เป็นแม่เหล็ก ในขณะที่ไม่ได้ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับสารที่เป็นแม่เหล็ก การกระทำร่วมกันทางแม่เหล็กจะแบ่งสารที่เป็นแม่เหล็กออกเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งแต่ละส่วนจะมีอำนาจแม่เหล็กในตัวเองเกิดขึ้นด้วย (spontaneous magnetization) ส่วนย่อย ๆ ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า โดเมนซ์ของแม่เหล็ก ปริมาตรของโดเมนซ์นั้นขึ้นกับส่วนผสมของสาร ปกติจะมีขนาด $10^{-1} \sim 10^{-6}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าโมเมนต์แม่เหล็กของโดเมนซ์แต่ละอันจะหักล้างกันหมดภายใน

2.4.2 ผนังของโดเมนซ์ (domain wall)

บริเวณระหว่างโดเมนซ์กับโดเมนซ์ที่อยู่ใกล้ชิดกัน จะมีผนังของโดเมนซ์กั้นอยู่ สนามแม่เหล็กในชั้นนี้จะค่อย ๆ เปลี่ยนจากทิศทางหนึ่งไปยังอีกทิศทางหนึ่ง โดยที่ครั้งแรกการหมุนของอิเล็กตรอนจะมีทิศทางในแนว $-J_S$ และจากนั้นการหมุนจะค่อย ๆ เปลี่ยนทิศทางไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะมีทิศทาง $+J_S$ ระยะที่มีค่า $+J_S$ จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสาร ความหนาของผนังของโดเมนซ์จะถูกกำหนดโดยพลังงานแลกเปลี่ยน ซึ่งพยายามทำให้การหมุนของอิเล็กตรอนแต่ละอันวางตัวในแนวขนานซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ จะพยายามวางตัวในแนวเดียวกันกับแนวแกน ซึ่งง่ายต่อการเป็นแม่เหล็ก

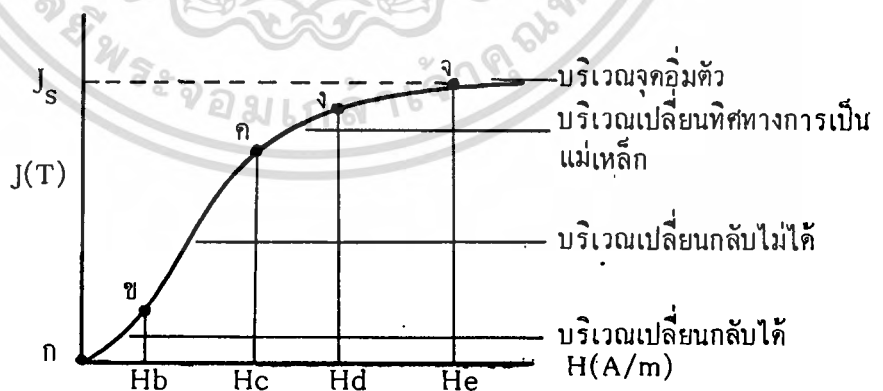
2.5 การทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็ก

เมื่อผ่านสนามแม่เหล็ก H เข้าไปในสารแม่เหล็กในทิศทางที่ทำมุมกับแนวแกนที่ง่ายต่อการเป็นแม่เหล็ก และเพิ่มขนาดของ H ไปเรื่อย ๆ ค่าอำนาจแม่เหล็ก J จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในลักษณะดังเส้นโค้งในรูปที่ 2.5 ในบริเวณเริ่มต้นของเส้นโค้งเป็นบริเวณซึ่งเมื่อเริ่มป้อนสนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยผ่านเข้าไปในสารแม่เหล็กที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ก่อน ผนังของโดเมนซ์จะเริ่มเปลี่ยนจากตำแหน่งเสถียรภาพไปที่ละน้อย โดยเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งจากตำแหน่งที่เสถียรภาพหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งมีความเสถียรภาพเช่นกัน โดเมนซ์ทั้งหมดจะรวมกันเป็น 1 โดเมนซ์ และทิศทางการเป็นแม่เหล็กจะเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนที่ง่าย

ต่อการเป็นแม่เหล็ก และถัดจากบริเวณนี้ไป แม้จะเพิ่มค่าสนาม H ให้สูงขึ้นเท่าไรก็ตาม ค่า J จะมีค่าเกือบคงที่ คือ J_s ดังรูปที่ 2.4



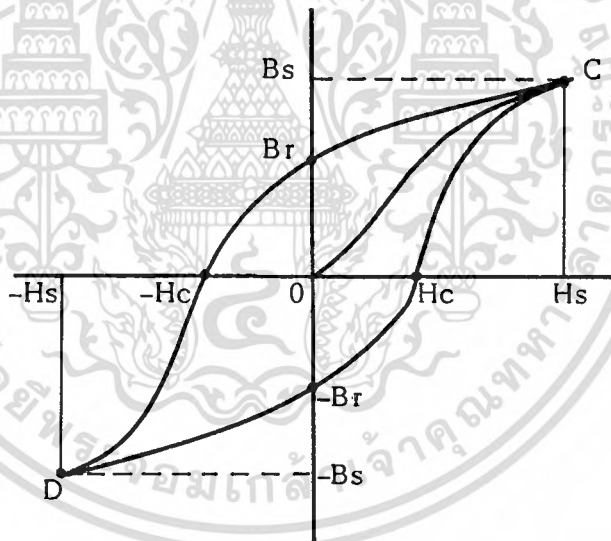
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงของผนังของโดเมน



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ J และ H

2.6 วงฮิสเทอรีซิส

เมื่อย้ายกระแสไฟฟ้าสลับหรือกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งกลับทิศวนกลับไปมาให้กับสารแม่เหล็ก ซึ่งไม่มีอำนาจแม่เหล็กอยู่เลย สารแม่เหล็กนั้นจะเกิดความเป็นแม่เหล็กขึ้น ดังรูปที่ 2.6 ตำแหน่ง H_C เรียกว่า แรงโคเอซีฟ (coercive force) ตำแหน่ง B_r เรียกว่า ความหนาแน่นแม่เหล็กตกค้าง (residual-flux density) และตำแหน่ง H_S เป็นค่าสนามแม่เหล็กที่เพียงพอในการทำให้เกิดการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ปกติเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กด้วยค่าที่น้อยกว่า H_S แล้วจะทำให้เกิดวงฮิสเทอรีซิสที่เสถียรภาพขึ้นได้ จำเป็นต้องป้อนสนามแม่เหล็กกลับทิศไปมาหลาย ๆ ครั้ง เมื่อถึงจุด H_S แล้วไม่ว่าจะเพิ่มค่าสนามแม่เหล็ก H ให้มีค่าสูงขึ้นมากเท่าใดก็ตาม เนื้อที่ของวงฮิสเทอรีซิส จะมีค่าคงที่เสมอ



รูปที่ 2.6 วงฮิสเทอรีซิส

2.7 คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

2.7.1 สารโคอะแมกเนติก (diamagnetic) ถ้าโมเมนต์แม่เหล็กหมุนของอะตอมในสารหักล้างกันหมด ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสารที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ ($\mu_0 H$) มาก สารชนิดนี้จะไม่มีความสัมพันธ์ของการเป็นแม่เหล็ก

2.7.2 สารพาราแมกเนติก (paramagnetic) ถ้าโมเมนต์แม่เหล็กหมุนของอะตอมในสารหัก

ล้างกันไม่หมด ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสารมีค่ามากกว่า $\mu_0 H$ เล็กน้อย สารชนิดนี้ถือว่าเป็นกลางในทางแม่เหล็ก

2.7.3 สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ลักษณะของโมเมนต์แม่เหล็กหมุนในสารชนิดนี้ กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2.1 สารชนิดนี้จะให้อำนาจแม่เหล็กที่นำไปใช้งานได้ แต่ถ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นมากจนถึงจุดสลายอำนาจแม่เหล็ก สารชนิดนี้จะเปลี่ยนสภาพเป็นกลางทันที

2.7.4 สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic) ถ้าโมเมนต์แม่เหล็กหมุนของอะตอมหนึ่งมีทิศทางไม่ขนานกับโมเมนต์แม่เหล็กหมุนของอะตอมข้างเคียง สารชนิดนี้จะให้ผลของสนามแม่เหล็กออกมาเพียงเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมาก สารชนิดนี้จะเปลี่ยนเป็นกลางทันที

2.8 การทำแม่เหล็กถาวร

เพื่อให้ได้ค่าเส้นแรงแม่เหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุดจากแม่เหล็กถาวร จำเป็นต้องทำให้ทุกส่วนของสารแม่เหล็กนั้น ได้รับสนามแม่เหล็กด้วยค่าที่เหมาะสมและในทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการด้วย ค่าสนามแม่เหล็กที่ต้องการนั้นจะมีค่าประมาณ 2-5 เท่า ของค่าโคเออร์ซีฟายใน (intrinsic coercivity) ของสารนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Ref.2)

สารแม่เหล็ก	Intrinsic Coercivity KA/m	สนามแม่เหล็ก KA/m
Isotropic Alnico alloys	40 - 56	200
Anisotropic Alnico alloys	80 - 160	400
Ferrite	150 - 300	1000
Cobalt/rare-earth alloys	1200 - 2400	4000 - 8000

ตารางที่ 2.1

สนามแม่เหล็กนี้สามารถสร้างได้จากไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับตัวนำที่เหมาะสมเช่นขดลวด - โขลินอยด์, แกนเหล็กที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าและขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำ.

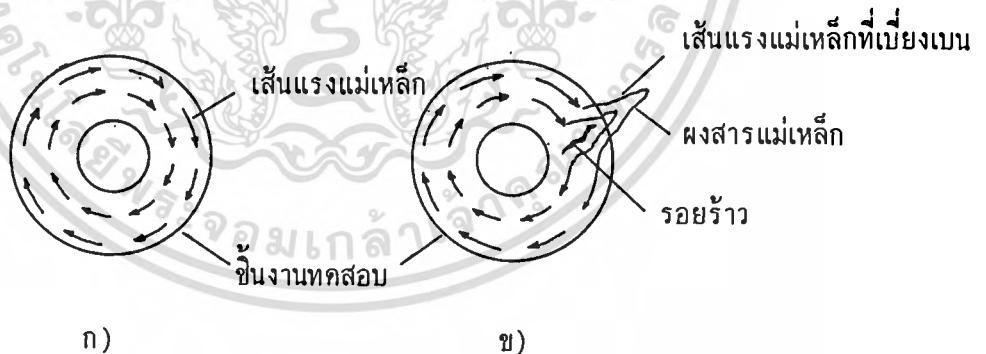
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการของการตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

3.1 บทนำ

เมื่อสารแม่เหล็ก เช่น เหล็กที่มีผิวที่เรียบ ถูกนำมาทำให้เป็นแม่เหล็กโดยลักษณะต่าง ๆ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของสารแม่เหล็กจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและขนานไปกับผิว ถ้าบริเวณผิวของสารแม่เหล็กมีรอยร้าวอยู่ ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) ที่บริเวณรอยร้าว นั้น จะมีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดการเบี่ยงเบนออกจากแนวปกติ ซึ่งทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนเบี่ยงเบนออกมาที่ผิวของสารแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อนำผงสารแม่เหล็กมาโรยบนผิวของสารแม่เหล็ก ผงสารแม่เหล็กจะถูกดูด โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนนี้ ทำให้ผงสารแม่เหล็กติดอยู่บนผิวบริเวณที่มีรอยร้าว ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่ง, ขนาด และ ลักษณะของรอยร้าวได้



รูปที่ 3.1 การตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

3.2 การทำสารแม่เหล็กให้เป็นแม่เหล็ก

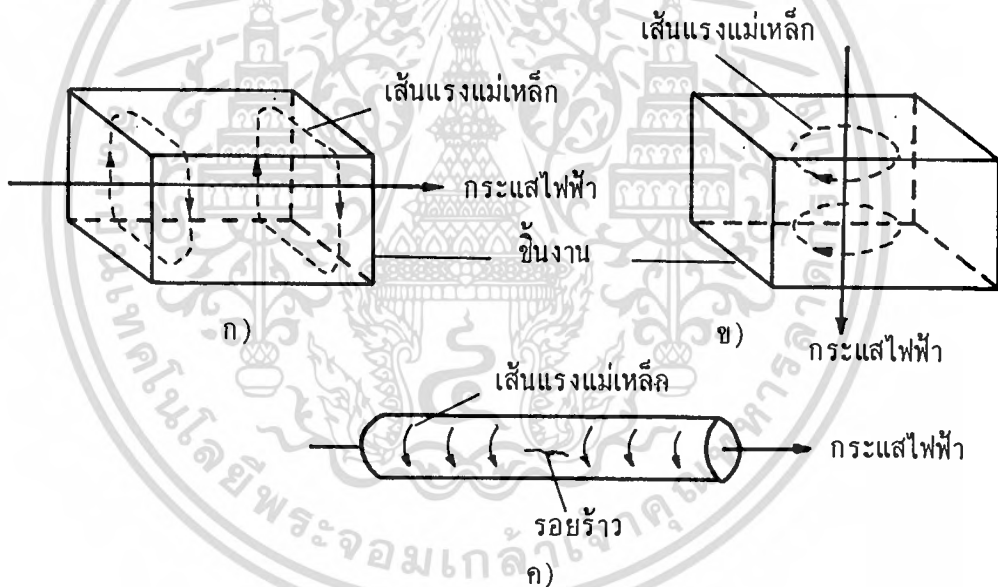
การตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยอาศัยเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาโดยการทำให้เหล็กนั้นเป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นมาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของเหล็กนั้น ในการตรวจสอบรอยร้าว ลักษณะที่ปรากฏของรอยร้าวจะชัดเจนคือ เมื่อทำให้เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับรอยร้าวนั้น และในทางตรงกันข้าม ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กขนานไปกับรอยร้าว การตรวจสอบจะได้ลักษณะที่ไม่ชัดเจน ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีทราบทิศทางของรอยร้าว การตรวจสอบจำเป็นต้องกระทำอย่างน้อย 2 ทิศทาง การทำให้เหล็กเป็นแม่เหล็กถาวร มีวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

3.2.1 วิธีการผ่านกระแสไฟฟ้า

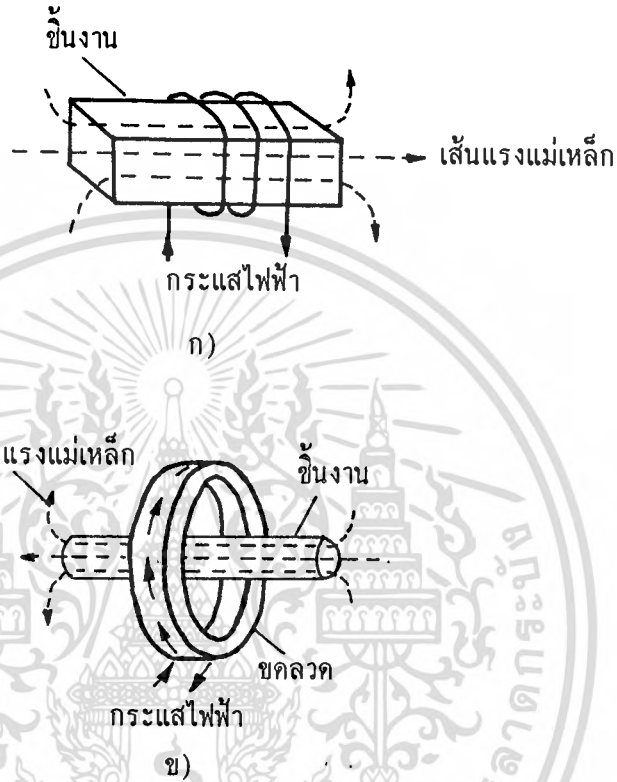
วิธีการนี้ จะให้เส้นแรงแม่เหล็กในลักษณะเป็นวง (circular magnetization) กระแสไฟฟ้าจะจ่ายให้กับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโดยตรง เส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทาง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

3.2.2 วิธีการใช้ขดลวด

วิธีการนี้ จะให้เส้นแรงแม่เหล็กในลักษณะเป็นแนวตรง (linear magnetization) ชิ้นงานที่ตรวจสอบจะใส่เข้าไปในขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

3.3 ขนาดของกระแสไฟฟ้าสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก

ในการทำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบรอยร้าวให้เป็นแม่เหล็ก ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งของรอยร้าว ซึ่งสามารถกำหนดได้จากผลการทดสอบ การใช้ขนาดกระแสไฟฟ้ามากเกินไป จะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในรูปความร้อน ซึ่งอาจมีผลทำให้สมบัติทางกลศาสตร์ของชิ้นงานถูกเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพความร้อนที่เกิดขึ้น และอาจจะทำให้ขนาดของรอยร้าวที่ปรากฏให้เห็นจากการตรวจสอบมีขนาดใหญ่ผิดความเป็นจริงไป เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนมีขนาดมากเกินไป ดังนั้นการกำหนดขนาดของกระแสไฟฟ้า จึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญในการตรวจสอบ ซึ่งอาจพิจารณาได้จาก

3.3.1 ขนาดของกระแสไฟฟ้าสำหรับการผ่านกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ จะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานโดยกำหนดได้จาก กระแสไฟฟ้า 800–1000 แอมป์ ต่อ 25 มิลลิเมตร ของเส้นผ่าศูนย์กลางนอกสุดของชิ้นงาน และในบางกรณีที่ชิ้นงานมีเส้นผ่าศูนย์กลางนอกสุดมากกว่า 100 มิลลิเมตร จะใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 600–800 แอมป์ ต่อ 25 มิลลิเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนดนี้ ใช้สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นแท่งสี่เหลี่ยมและท่อกลม ถ้ากรณีที่ชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดหลาย ๆ ขนาดในชิ้นงานเดียวกัน การตรวจสอบจะกระทำโดยผ่านกระแสไฟฟ้า สำหรับพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าก่อน ต่อจากนั้นจึงผ่านกระแสไฟฟ้าสำหรับพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่กว่า

3.3.2 ขนาดของกระแสไฟฟ้าสำหรับการใช้ขดลวด

ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับขดลวด เพื่อที่จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก สำหรับทำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบให้เป็นแม่เหล็ก จะกำหนดอยู่ในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive - force) โดยกำหนดเป็น ค่าแอมป์-รอบ โดยมีหลักในการพิจารณาดังนี้

- 1) ชิ้นงานที่ตรวจสอบจะใส่วางไว้แนบกับผนังภายในของขดลวด โดยไม่วางไว้ในตำแหน่งศูนย์กลางของขดลวด
- 2) ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบควรมีขนาดน้อยกว่า $\frac{1}{10}$ ของขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องกลางของขดลวด ทั้งนี้เป็นเพราะเส้นแรงแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอ และให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากที่สุดบนพื้นที่หน้าตัดไม่เกิน 7,000 ตารางมิลลิเมตร บริเวณใกล้กับผนังของขดลวด
- 3) ชิ้นงานที่ตรวจสอบควรมีความยาวประมาณ 500 มิลลิเมตร เพราะจากการคำนวณและทดสอบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กของขดลวดที่เกิดขึ้น จะมีค่าที่เพียงพอในการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กในระยะห่างจากขดลวดตรวจสอบไม่เกิน 250 มิลลิเมตร
- 4) อัตราส่วนของความยาวกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) ของชิ้นงานที่ตรวจสอบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2–15 ซึ่งทำให้ได้ ค่าแอมป์-รอบ ของขดลวดที่เหมาะสม
- 5) ชิ้นงานที่ตรวจสอบจะต้องวางในแนวแกนตามความยาวให้ขนานกับแนวแกนของขดลวด

จากหลักการดังกล่าวสามารถที่จะประมาณค่า A.T. ได้โดย

$$A.T. = \frac{45000}{L/D} \quad (3.1)$$

ซึ่งจะได้ค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในรูปของแอมป์-รอบ สำหรับขดลวดที่สร้างขึ้นมีจำนวนรอบเท่ากับ 115 รอบ ทำให้สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าได้ ดังตัวอย่างตารางที่ 3.1 (Ref.4)

ความยาวชิ้นงาน (ซม.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง ชิ้นงาน (ซม.)	อัตราส่วน L/D	A.T.	A.
10	5	2	22500	195
20	5	4	11250	100
30	5	6	7500	65
40	4	10	4500	40
45	3	14	3214	30

ตารางที่ 3.1

ค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้เป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งสามารถกำหนดให้แน่นอนได้จากการทดสอบจากชิ้นงานที่มีรูปร่างต่างกันไปอีกครั้ง

3.4 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก

ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการในการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กมีความสำคัญมากในการตรวจสอบรอยร้าว โดยพิจารณาได้จาก

3.4.1 ไฟฟ้ากระแสสลับ

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับจะให้ผลของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของชิ้นงาน แต่มีผลไม่มากบริเวณที่ลึกลงไปใ้ชิ้นงาน ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวบริเวณใกล้ ๆ ผิวเท่านั้น เช่น รอยร้าวบนผิวที่เกิดจากความร้อน, ความล้า ฯลฯ

3.4.2 ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อเปรียบเทียบกับไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสตรงจะสร้างสนามแม่เหล็กที่ให้ผลลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงไปในตัวของชิ้นงานดีกว่า ซึ่งสามารถที่จะตรวจสอบหารอยร้าวภายในผิวของชิ้นงานได้ดีกว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้มาจากแหล่งต่อไปนี้

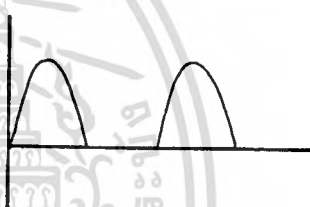
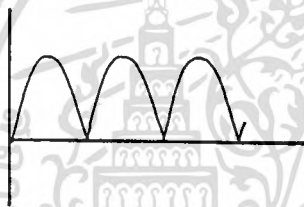
- 1) แบตเตอรี่ ในระยะแรกจะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีราคาสูงมาก และไม่สะดวกในการอัดไฟแบตเตอรี่ ในระยะต่อมาจึงหันมาใช้วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้อุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ
- 2) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบเต็มช่วงคลื่น (three phase full wave rectifier) ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรจะมีค่ากระแสเหนี่ยวนำของกระแสเหนี่ยวนำ ซึ่งจะให้ลักษณะสัญญาณที่ใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ จึงให้ผลของการตรวจสอบดีที่สุดเมื่อเทียบกับวงจรอื่น ๆ โดยเหมาะสำหรับการตรวจสอบภายในผิวที่ลึกลงไปของชิ้นงาน
- 3) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น (three phase half wave rectifier) ค่ากระแสเหนี่ยวนำของกระแส จะมียิ่งกว่าแบบเต็มช่วงคลื่น ผลของการตรวจสอบจะน้อยกว่าเล็กน้อย แต่ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและสามารถเพิ่มวงจรฟิลเตอร์ (filter) เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสได้
- 4) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวแบบเต็มช่วงคลื่น (single phase full wave rectifier) และแบบครึ่งช่วงคลื่น (single phase half wave rectifier) วงจรลักษณะนี้ ค่ากระแสเหนี่ยวนำของกระแสจะมีสูงมาก ซึ่งให้ผลของการตรวจสอบที่ไม่ดีนัก แต่ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า เหมาะสำหรับการตรวจสอบบริเวณผิวนอกของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบเต็มช่วงคลื่น

ข) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น



ค) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวแบบเต็มช่วงคลื่น

ง) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวแบบครึ่งช่วงคลื่น

รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจากวงจรแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

3.5 การใช้ผงสารแม่เหล็ก

เมื่อขึ้นงานที่ต้องการตรวจสอบถูกทำให้เป็นแม่เหล็กแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบ โดยใช้ ผงสารแม่เหล็ก ซึ่งจะถูกลดโดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนออกมาจากผิวและแสดงรอยร้าวให้เห็นได้ชัดเจน ผงสารแม่เหล็กที่ใช้ในการตรวจสอบมีลักษณะดังนี้

3.5.1 ชนิดของผงสารแม่เหล็ก

ผงสารแม่เหล็กควรจะถูกดูดโดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนจากชิ้นงานที่ตรวจสอบได้ง่าย และมีสีที่ชัดเจนเห็นได้ชัดขณะตรวจสอบ

- 1) ชนิดไม่เรืองแสง (non-fluorescent) ปกติแล้วผงสารแม่เหล็กชนิดนี้มีอยู่ 3 สี คือ ขาว, ดำ และ น้ำตาล โดยเลือกสีให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ชนิดเรืองแสง (fluorescent) เมื่อใช้แสงที่ทำให้เรืองแสง (black light) ขนาด 3,600 Å ส่องขึ้นงาน ผงสารแม่เหล็กจะเกิดสีเขียวค่อนข้างเหลือง ขึ้นงานที่ตรวจสอบจะมีสีค้ำม่วง ดังนั้นผงสารแม่เหล็กชนิดนี้ไม่ต้องคำนึงถึงสีของ ขึ้นงานที่ตรวจสอบ
- 3) ชนิดแบบเปียกและแบบแห้ง (wet and dry type) ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง จะใช้ได้กับผงสารแม่เหล็กชนิดไม่เรืองแสงและชนิดเรืองแสง

3.5.2 ขนาดและค่าความถ่วงจำเพาะของผงสารแม่เหล็ก

ขนาดของผงสารแม่เหล็กจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของผงสารแม่เหล็ก โดยมีขนาดอยู่ในช่วง ตั้งแต่ประมาณ 1 ไมครอน ถึง 50 ไมครอน การเลือกขนาดควรจะให้เหมาะสมกับขนาดของพื้นผิวขึ้นงานที่ตรวจสอบ รวมทั้งขนาดและตำแหน่งของรอยร้าว

ค่าความถ่วงจำเพาะของผงสารแม่เหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9-1.5 ปกติแล้วผงสารแม่เหล็กที่มีเนื้อละเอียด จะมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าแบบที่มีเนื้อหยาบ

3.5.3 สารละลายที่ใช้ในการตรวจสอบ

- 1) ความเข้มข้นของสารละลายตามที่กำหนดไว้โดย JIS มีค่าตามตารางที่ 3.2 ดังนี้ (Ref.4)

ผงสารแม่เหล็ก	JIS G 0565	JIS W 4031
ชนิดไม่เรืองแสง	7 - 10 กรัม/ลิตร	7.5 - 10.5 กรัม/ลิตร
ชนิดเรืองแสง	0.75 - 3.0 กรัม/ลิตร	0.75 - 1.5 กรัม/ลิตร

ตารางที่ 3.2

- 2) การตรวจสอบสารละลาย เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายจะลดลงไป เมื่อใช้งานนาน ๆ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ วิธีการตรวจสอบใช้สารละลาย 100 เซนติลิตร เทใส่ลงในเครื่องตรวจสอบที่ทำให้ตกตะกอน (sedimentation meter) ถึงขีด 100 เซนติลิตร หลังจากทิ้งไว้นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 30 นาที วัดจำนวนของผงสารแม่เหล็กที่ตกตะกอน ถ้าความเข้มข้นลดลง ต้องเติมผงสารแม่เหล็กให้เท่าเดิม อย่างไรก็ตามถ้าสารละลายมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น ผุ่นละอองและสารไม่บริสุทธิ์อื่น ๆ เนื่องจากการใช้งานมาเป็นเวลานาน หรือว่า ผงสารแม่เหล็กไม่สามารถเรืองแสงได้แล้ว จำเป็นต้องเปลี่ยนสารละลายใหม่ทั้งหมด

3.5.4 ช่วงเวลาในการใช้ผงสารแม่เหล็ก

- 1) วิธีการแบบสนามแม่เหล็กต่อเนื่อง (continuous method) วิธีการนี้ ผงสารแม่เหล็กจะใส่ให้กับชิ้นงานที่ทดสอบ ในขณะที่ทำการจ่ายกระแสเพื่อทำให้ชิ้นงานเป็นแม่เหล็ก ลักษณะนี้จะให้ผลดีในกรณีที่ตรวจสอบรอยร้าวเล็ก ๆ และรอยร้าวภายในของชิ้นงานที่มีค่าโคเออซีฟ (coercive) ต่ำ ๆ เช่น เหล็กอ่อน หรือ เหล็กหล่อ
- 2) วิธีการแบบใช้สนามแม่เหล็กตกค้าง (residual method) ผงสารแม่เหล็กจะใส่ให้กับชิ้นงานที่ตรวจสอบ หลังจากตัดกระแสทำให้ชิ้นงานเป็นแม่เหล็กออกแล้ว วิธีการนี้ใช้สำหรับกรณีที่ชิ้นงานมีค่าโคเออซีฟมาก ๆ เช่น เหล็กที่มีคาร์บอนสูง, เหล็กสปริง เวลาที่ใช้สำหรับวิธีนี้จะนานกว่าแบบต่อเนื่อง เวลาที่เหมาะสมประมาณ 10-16 วินาที การตรวจสอบโดยวิธีนี้จะไม่สามารถใช้กับรอยร้าวภายในได้ แต่ถ้าเป็นรอยร้าวบริเวณผิว จะตรวจสอบได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสะดวกในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะสามารถแยกส่วนที่ทำให้ชิ้นงานเป็นแม่เหล็กออกจากส่วนที่ตรวจสอบรอยร้าวโดยใช้ผงสารแม่เหล็กได้

3.5.5 การใช้ผงสารแม่เหล็ก

- 1) วิธีการแบบเปียก วิธีนี้ผงสารแม่เหล็กจะนำมาผสมกับของเหลวที่เหมาะสม เช่น น้ำมันก๊าด หรือ น้ำ ในการตรวจสอบจะนำเอาสารละลายฉีดไปบนชิ้นงานหรือนำชิ้นงานจุ่มลงไปในการตรวจสอบ ซึ่งสะดวกในการทำงานและสารละลายสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก ในกรณีที่สารละลายใช้น้ำเป็นของเหลว ต้องมีการทำความสะอาดผิว

ของชิ้นงานและป้องกันสนิมที่จะเกิดขึ้นด้วย ส่วนใหญ่การตรวจสอบรอยร้าวจะใช้วิธีการแบบนี้มากที่สุด

- 2) วิธีการแบบแห้ง วิธีนี้ใช้สำหรับการทาสีชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กแบบลักษณะเป็นวง โดยการฉีดผงสารแม่เหล็กลงบนผิวบริเวณที่ต้องการตรวจสอบอย่างบาง ๆ ต่อจากนั้นจึงใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้ชิ้นงานเป็นแม่เหล็ก

3.6 การตรวจสอบรอยร้าว

ลักษณะของผงสารแม่เหล็กที่ปรากฏผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบแสดงให้ทราบถึงตำแหน่ง, ขนาด และทิศทางของรอยแตกที่มีผลต่อการนำชิ้นงานนั้น ๆ ไปใช้งาน การตรวจสอบโดยใช้ผงสารแม่เหล็กให้ผลการตรวจสอบที่ดีมาก แต่อย่างไรก็ตามความลึกของรอยร้าวหรือความกว้างของรอยร้าวไม่สามารถทราบได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการพิจารณาจะคำนึงถึงลักษณะที่ปรากฏบนผิวเท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่า ชิ้นงานที่มีรอยร้าวแล้วไม่ว่าจะเล็กหรือใหญ่, ลึกหรือตื้น ก็ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับงานที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

3.6.1 การเตรียมชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ

- 1) ในกรณีที่เป็นเครื่องจักร ให้ถอดโครงสร้างออกเป็นส่วน ๆ ก่อนเพื่อที่จะสามารถตรวจสอบชิ้นงานเป็นส่วน ๆ ได้อย่างสะดวก
- 2) ในกรณีที่ตรวจสอบโดยใช้กระแสไฟฟ้าผ่านโดยตรง จะต้องระมัดระวังตรวจดูอุณหภูมิที่ห่อหุ้มรอยต่อทุกจุด เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น
- 3) ต้องทำความสะอาดผิวของชิ้นงาน เช่น ฝุ่นละออง, คราบจารบี, น้ำมัน หรือคราบสนิม เพราะจะทำให้การตรวจสอบไม่ชัดเจน
- 4) ต้องปิดรูต่าง ๆ บนชิ้นงานให้หมด เพื่อป้องกันไม่ให้ผงสารแม่เหล็กไปตกค้างอยู่ในรูนั้นหลังการตรวจสอบ

3.6.2 ผลการทดสอบที่ผิดพลาด

ในบางกรณีการตรวจสอบอาจให้ผลผิดพลาดอันเนื่องมาจากสาเหตุต่อไปนี้ได้ เช่น

- 1) ในกรณีที่ชิ้นงานมีรอยต่อ เมื่อถูกทำให้เป็นแม่เหล็กจะมีขั้วแม่เหล็กขึ้นที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นั้น ซึ่งมีผลทำให้ผงสารแม่เหล็กถูกดูดที่บริเวณนั้นมีลักษณะเป็นเส้นหรือรอยขยุกขยิก
- 2) ในกรณีที่ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่าซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ของชิ้นงานนั้นจะเปลี่ยนแปลง ผงสารแม่เหล็กจะถูกดูดที่บริเวณรอยต่อของชิ้นงานส่วนที่มีค่าซึมซาบแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง
 - 3) ในกรณีที่ชิ้นงานมีส่วนต่าง ๆ ที่มีค่าความแข็งต่างกัน ค่าซึมซาบแม่เหล็กก็จะแตกต่างกันด้วย และบางครั้งก็จะเกิดเส้นของแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนออกมาจากชิ้นงานได้

3.7 การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน (Demagnetization)

มีวิธีการอยู่ 2 วิธี ที่จะล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็ก วิธีการแรกคือทำให้ชิ้นงานนั้นร้อนจนเกิดจุดละลายอำนาจแม่เหล็ก (curie point) และปล่อยให้เย็นลง โดยไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำอีก ลักษณะนี้เป็นการล้างแม่เหล็กที่สมบูรณ์มาก แต่ไม่นิยมใช้เพราะส่วนใหญ่จะทำให้คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชิ้นงาน จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกทำให้ร้อนจัด และสิ้นเปลืองพลังงานสูง อีกวิธีการหนึ่ง คือการใช้ค่าของสนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ โดยค่อยลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งนิยมใช้มากในการล้างแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน เพราะสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ไม่สามารถล้างแม่เหล็กออกจากชิ้นงานได้หมดโดยสมบูรณ์ (ดูภาคผนวกที่ 7)

3.7.1 การล้างแม่เหล็กโดยใช้สนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสสลับ

- 1) โดยกรรมวิธีดันชิ้นงานผ่าน วิธีการนี้ทำโดยการนำเอาชิ้นงานที่ตรวจสอบผ่านเข้าไปในขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กสลับความถี่ต่ำ โดยค่อย ๆ ผ่านเข้าไปด้วยความเร็วประมาณ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที หรือ มากกว่า (Ref.4) จนกระทั่งชิ้นงานหมดอำนาจแม่เหล็ก หรือ อีกลักษณะหนึ่ง คือ ให้ชิ้นงานอยู่กับที่ โดยให้ขดลวดเคลื่อนที่แทน
- 2) โดยกรรมวิธีการลดขนาดกระแสไฟฟ้า วิธีการนี้ทำโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานที่ตรวจสอบโดยตรง หรือจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่ใช้ตรวจสอบแล้วลดขนาดกระแสไฟฟ้างจนเป็นศูนย์ สนามแม่เหล็กสลับที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่จะได้มาจากไฟฟ้ากระแสสลับ ตามความเป็นจริงแล้วการล้างแม่เหล็กด้วยวิธีนี้ไม่สามารถทำให้แม่เหล็กหมดลงอย่างสมบูรณ์ได้ เช่น ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ ชิ้นงานที่มีค่าโคเออร์ซีฟมาก ทั้งนี้ เพราะสนามแม่เหล็กไม่สามารถซึมซาบลงไปในตัวของชิ้นงานได้ลึกพอ สำหรับวิธีการที่จะทำให้การล้างแม่เหล็กดีขึ้นนั้นทำได้โดยการกลับทิศของการลดขนาดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

3.7.2 ข้อควรระวังในการตรวจสอบ

- 1) แนวแกนของชิ้นงานที่ต้องการลดอำนาจแม่เหล็ก จะอยู่ในลักษณะวางขนานกับแนวแกนของขดลวด โดยที่ความยาวทั้งหมดของชิ้นงานผ่านอยู่ในขดลวด
- 2) ค้างชิ้นงานออกจากขดลวดที่ล้างอำนาจแม่เหล็ก และตัดกระแสไฟฟ้าล้างแม่เหล็กหลังจากชิ้นงานอยู่ห่างจากขดลวดประมาณ 1.2-1.5 เมตร
- 3) เมื่อชิ้นงานมีขนาดเล็กนำมาล้างอำนาจแม่เหล็ก ให้นำชิ้นงานนั้นผ่านเข้าไปในผนังด้านในหรือบริเวณส่วนโค้งของขดลวด
- 4) เมื่อชิ้นงานมีรูปร่างกลมนำมาล้างอำนาจแม่เหล็กให้ค้างชิ้นงานออกขณะที่กำลังหมุนอยู่
- 5) เมื่อชิ้นงานมีรูปร่างที่ยู่ยากซับซ้อน การล้างอำนาจแม่เหล็กที่จะได้ผลดี ควรจะมีการหมุนชิ้นงานนั้นหรือไม้ก็เคาะชิ้นงานเบา ๆ ขณะที่ค้างชิ้นงานออก
- 6) ในการติดตั้งขดลวดสำหรับล้างอำนาจแม่เหล็ก ควรจะวางอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ทั้งนี้เพราะถ้าชิ้นงานที่มีขนาดยาว จะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กโลก
- 7) ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่มากจนไม่สามารถใส่ไปในขดลวดได้ ให้นำชิ้นงานไปวางไว้ที่บริเวณด้านหน้าช่องกลางของขดลวด แล้วหมุนชิ้นงาน จากนั้นก็ค้างชิ้นงานออกไป

3.7.3 กรณีที่ต้องการล้างอำนาจแม่เหล็ก

- 1) ชิ้นงานที่มีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ ซึ่งจะมีผลต่อการทำงาน หรือ ประสิทธิภาพของเครื่องจักร
- 2) ผงสารแม่เหล็กที่ติดอยู่บนชิ้นงาน ทำให้ขั้นตอนต่อไปในการผลิตชิ้นงานนั้นเสียหาย

- 3) รอยร้าวที่ตำแหน่งอื่นต้องการตรวจสอบ โดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าเดิม หรือสนามแม่เหล็กเดิมไม่สามารถใช้ร่วมกับการตรวจสอบที่ใช้สนามแม่เหล็ก ลักษณะอื่นได้
- 4) เมื่อไม่สามารถล้างเอาผงสารแม่เหล็กที่ติดอยู่บนชิ้นงานออกหลังจากการตรวจสอบ
- 5) ชิ้นงานที่ใช้งานในลักษณะหมุน การหล่อลื่นชิ้นงานนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากผงสารแม่เหล็กที่ติดอยู่บนผิวทำให้เกิดความฝืดได้
- 6) สนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่บนชิ้นงานมีค่าสูงมาก เนื่องจากการทำให้เป็นแม่เหล็กในขั้นตอนการตรวจสอบก่อนหน้านี้

3.7.4 กรณีที่ไม่ต้องการล้างอำนาจแม่เหล็ก

- 1) เมื่อชิ้นงานที่ตรวจสอบแล้ว ถูกนำไปผ่านขั้นตอนที่ทำให้ร้อนจัดจนกระทั่งถึงจุดสลายอำนาจแม่เหล็ก
- 2) เมื่อชิ้นงานที่ตรวจสอบแล้วต้องไปผ่านขั้นตอนที่ใช้สนามแม่เหล็กอีก

3.7.5 การทำความสะอาดชิ้นงาน

หลังจากชิ้นงานผ่านการตรวจสอบและล้างอำนาจแม่เหล็กแล้ว ต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำมันกัด หรือ น้ำ จนกระทั่งผงแม่เหล็กหลุดออกหมด หลังจากนั้นทำชิ้นงานให้แห้ง แล้วทาน้ำยากันสนิมด้วย

บทที่ 4

ขดลวดตรวจสอบ (Inspection Coil)

4.1 บทนำ

ในการตรวจสอบรอยร้าวของเหล็ก โดยใช้ผงสารแม่เหล็ก ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ รอยร้าว จะผ่านขบวนการทำให้เป็นแม่เหล็กก่อน เพื่อทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบ รอยร้าว และหลังจากนั้นจะผ่านขบวนการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน เพื่อนำไปใช้งานต่อไป ขดลวด ตรวจสอบนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดขบวนการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

4.1.1 ทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก (magnetization) เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบหารอยร้าวได้ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในแนวตรง

4.1.2 ล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน (demagnetization) เมื่อชิ้นงานถูกทำให้เป็น แม่เหล็กแล้ว หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกล้างอำนาจแม่เหล็กออก เพื่อให้ชิ้นงานกลับสู่สภาพเดิม สามารถนำไปใช้ งานตามปกติได้ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำสร้างสนามแม่เหล็กสลับขึ้นและสามารถปรับค่าความเข้มสนาม แม่เหล็กได้

การทำงานทั้งสองลักษณะนี้สามารถทำได้โดยใช้ขดลวดตรวจสอบเพียงชุดเดียวทำให้สะดวกใน การทำงานและประหยัดค่าใช้จ่าย

4.2 การออกแบบขดลวดตรวจสอบ

เนื่องจากขดลวดตรวจสอบทำหน้าที่ 2 ลักษณะ การออกแบบจะพิจารณาดังนี้

4.2.1 ขนาดของลวดตัวนำที่ใช้ทำขดลวดตรวจสอบ

- 1) การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก ดังที่กล่าวมาแล้ว การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กจะ ใช้สนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสตรงและจากการคำนวณออกแบบค่าแอมแปร์-รอบ มากที่สุดที่เหมาะสมสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก คือ ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12,000 แอมป์-รอบ โดยกำหนดจำนวนรอบของขดลวดตรวจสอบเป็น 115 รอบ จะได้ว่าค่ากระแสที่ต้องการมีค่าประมาณ 100 แอมป์ การกำหนดในลักษณะนี้ เพื่อเป็นการลดค่ากระแสที่ต้องใช้ลงมาโดยการใช้จ่ายจำนวนรอบมาก ๆ แต่ถ้าจำนวนรอบมากเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสียมากขึ้น ซึ่งต้องคำนวณให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ถ้ากำหนดค่าความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่เท่ากับ 3 แอมป์ต่อตารางมิลลิเมตร ขนาดของลวดตัวนำที่ต้องการหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{ขนาดของลวดตัวนำ} &= \frac{100}{3} \\ &= 33.3 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \end{aligned}$$

จากการคำนวณขนาดของลวดตัวนำมีค่าประมาณ 33.3 ตารางมิลลิเมตร

ในการออกแบบจะเลือกใช้ลวดทองแดงแบนหุ้มผ้า Class A ขนาด 4.5 x 7 ตารางมิลลิเมตร

2) การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน หลังจากชิ้นงานถูกทำให้เป็นแม่เหล็กแล้ว ชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นแม่เหล็กถาวร อำนาจแม่เหล็กที่แสดงออกมาจะเป็นค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (residual flux) ดังนั้นการล้างอำนาจแม่เหล็กจึงเป็นการล้างค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง โดยใช้สนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสสลับ จากการคำนวณออกแบบค่าแอมป์-รอบที่เพียงพอสำหรับการล้างอำนาจแม่เหล็ก คือ ประมาณ 6,000 แอมป์-รอบ * ในกรณีที่ใช้ขดลวดตรวจสอบชุดเดียวกันกับการทำให้เป็นแม่เหล็ก ค่ากระแสที่ต้องการใช้จะมีค่าประมาณ 50 แอมป์ พิจารณาค่าความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่} &= \frac{50}{4.5 \times 7} \\ &= 1.58 \text{ แอมป์ต่อตารางมิลลิเมตร} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าในการล้างอำนาจแม่เหล็ก โดยใช้ขดลวดตรวจสอบชุดเดียวกันไม่มี

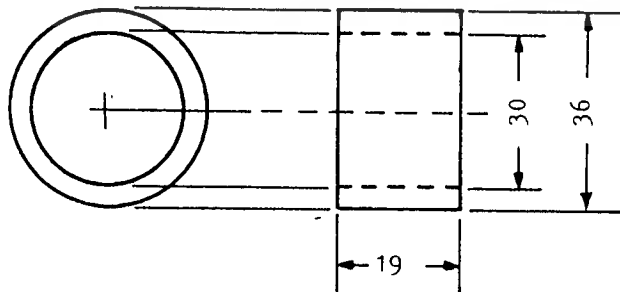
ปัญหาทางด้านขนาดของลวดตัวนำ

4.2.2 การพันขดลวดตรวจสอบ

ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ต้องการในการตรวจสอบเป็นแบบแนวตรง (linear - magnetization) ดังนั้นการพันขดลวดตรวจสอบจะพันเป็นแบบวงกลม (circular coil) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยพันขดลวดจำนวน 115 รอบ พันเป็น 5 ชั้น ๆ ละ 23 รอบ ซึ่งได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขดลวดตรวจสอบเท่ากับ 300 มิลลิเมตร เลือกใช้ลวดทองแดงแบนหุ้มผ้า Class A ขนาด 4.5 x 7 ตารางมิลลิเมตร ขนาดของขดลวดตรวจสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ขดลวดตรวจสอบแบบวงกลม



รูปที่ 4.2 ขนาดของขดลวดตรวจสอบ หน่วย เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพันขดลวดตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว นำไปชุบน้ำยาวานิช เบอร์ 23 เพื่อให้ขดลวดเกาะกันแน่นและไม่เกิดการสั้น ขณะที่มีการเสกไหล หลังจากนั้นนำเอาขดลวดนี้ไปหล่อด้วย epoxy resin เพื่อให้ขดลวดตรวจสอบมีความแข็งแรง ซึ่งเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นขดลวดตรวจสอบที่สมบูรณ์นี้ สามารถนำไปใช้งานได้อย่างสะดวก, ปลอดภัย และแข็งแรงทนทาน น้ำหนักรวมของขดลวดตรวจสอบ เท่ากับ 60 กิโลกรัม



รูปที่ 4.3 ขดลวดตรวจสอบที่สมบูรณ์

4.2.3 การคำนวณค่าความต้านทาน, ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ของขดลวดตรวจสอบ

$$\text{ค่าความต้านทาน (R)} = \rho \frac{\ell}{A} \quad \text{โอห์ม} \quad (4.1)$$

ρ : ค่าความต้านทานจำเพาะของลวดทองแดงมีค่า 1.75×10^{-8} โอห์ม-เมตร
ที่ 20°C

ℓ : ความยาวของลวดทองแดง หน่วย เมตร

A : พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง หน่วย ตารางเมตร

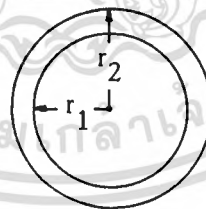
จากการออกแบบขดลวดตรวจสอบใช้ลวดตัวนำทองแดงที่พื้นที่หน้าตัด 31.5 ตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของลวดตัวนำ พิจารณาได้จากรูปที่ 4.5 มีจำนวนรอบ 115 รอบ รัศมีเฉลี่ย หาได้จาก



รูปที่ 4.4 ขดลวดตรวจสอบและชิ้นงานแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 การหารัศมีเฉลี่ยของขดลวดตรวจสอบ

$$\begin{aligned} r_{\text{เฉลี่ย}} &= \frac{r_1 + r_2}{2} \\ &= 170 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ความยาวของลวดทองแดงโดยประมาณ} = 2\pi r_{\text{เฉลี่ย}} \times \text{จำนวนรอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 122.83 \quad \text{เมตร}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานของลวดทองแดง} = \frac{1.75 \times 10^{-8} \times 122.83}{31.5 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.0682 \quad \text{โอห์ม}$$

$$\text{ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (L)} = \frac{N\emptyset}{I} \quad \text{เฮนรี่} \quad (4.2)$$

N: จำนวนรอบของขดลวดทดสอบ หน่วย รอบ

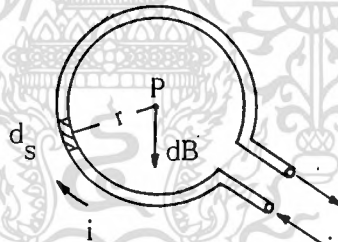
\emptyset : เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง หน่วย เวเบอร์

I : กระแสที่ไหลในขดลวดทดสอบ หน่วย แอมป์

พิจารณาค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) จากลักษณะของขดลวดตรวจสอบที่พัน

เป็นแบบวงกลม

ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแบบวงกลม

จากกฎของแอมแปร์สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$dB = \frac{\mu i ds}{4\pi r^2}$$

μ : ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก หน่วย เฮนรี่/เมตร

$$\text{จะได้} \quad B = \frac{\mu i}{2r}$$

$$\text{จำนวนตัวนำ N รอบ} \quad B = \frac{\mu Ni}{2r} \quad (4.3)$$

$$\phi = BA$$

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2r} \quad \text{เฮนรี่}$$

ขดลวดตรวจสอบมีลักษณะเป็นแกนอากาศค่า μ จะเท่ากับ μ_0 ดังนั้น

$$\text{ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตรวจสอบ} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2r}$$

μ_0 : ค่าความซึมซาบแม่เหล็กอากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี่/เมตร

A : พื้นที่หน้าตัดของช่องขดลวดตรวจสอบ มีค่า πr^2 ตารางเมตร

จากการคำนวณสมการ 4.4

$$L = 3.915 \text{ มิลลิเฮนรี่}$$

4.3 การทดสอบขดลวดตรวจสอบ

4.3.1 ทดสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดตรวจสอบบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.1

วัตต์	โวลต์	แอมป์
5	7.2	5.9
10	10.2	8.4
15	12.8	10.5
20	14.6	12.1
30	18.2	15

ตารางที่ 4.1

ผลการทดสอบ

ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_L)	1.213	โอห์ม
ค่าความต้านทาน (R)	0.137	โอห์ม
ค่ารีแอคแตนซ์ (X_L)	1.206	โอห์ม
ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (L)	3.838	มิลลิเฮนรี่

4.3.2 ทดสอบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดตรวจสอบ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า และ
กระแสไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.2

โวลต์	แอมป์	โอห์ม
0.34	3	0.113
1.04	7.4	0.106
1.5	16	0.09
2	24	0.083
2.4	30	0.08

ตารางที่ 4.2

ผลการทดสอบ

ค่าความต้านทาน (R) 0.08 โอห์ม

การคำนวณ	การทดสอบ	
	ไฟฟ้ากระแสตรง	ไฟฟ้ากระแสสลับ
R (โอห์ม) 0.0682	0.08	0.137
L (มิลลิเฮนรี่) 3.915	-	3.838

ตารางที่ 4.3

พิจารณาจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของขดลวดตรวจสอบที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ลักษณะ มีค่าแตกต่างกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมีค่ามากกว่าไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวนำที่นำมาใช้พันเป็นขดลวดตรวจสอบมีขนาดใหญ่ (31.5 ตารางมิลลิเมตร) และมีพื้นที่ผิวมาก จะเกิดลักษณะของ skin effect ที่ความถี่สูง (Ref.5) ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กที่ได้จากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จะมีความเข้มของกระแสไฟฟ้ามากที่บริเวณใกล้ผิว ซึ่งมีผลทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้นมีขนาดเล็กลง ดังนั้นค่าความต้านทานที่ได้จะมากขึ้น (ดูภาคผนวกที่ 1)

4.4 การคำนวณค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ

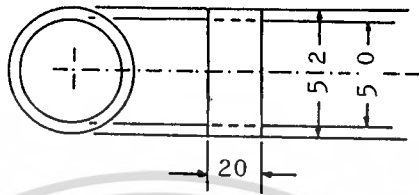
จากการทดสอบหาค่าความต้านทานและค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดตรวจสอบขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับขดลวดทั้ง 2 ลักษณะ กำหนดได้ดังนี้

4.4.1 การทำให้เป็นแม่เหล็ก โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ต้องการสำหรับการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กมีค่าประมาณ 12,000 แอมป์-รอบ ขดลวดตรวจสอบมีจำนวนรอบ 115 รอบ ดังนั้นค่ากระแสตรงที่จ่ายให้กับขดลวดประมาณ 100 แอมป์ ค่าความต้านทานของขดลวดขณะผ่านไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.08 โอห์ม แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการสำหรับขดลวด มีค่าประมาณ 8 โวลท์ ซึ่งได้มาจากวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น โดยมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15 โวลท์ต่อเฟส

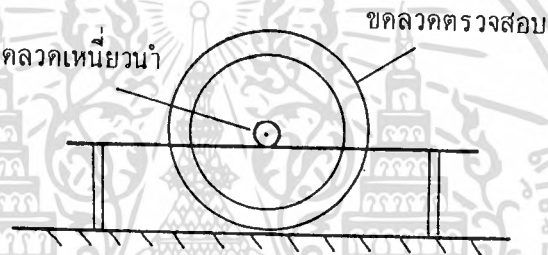
4.4.2 การล้างอำนาจแม่เหล็ก โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เหมาะสมและเพียงพอสำหรับล้างอำนาจแม่เหล็ก มีค่าประมาณ 6,000 แอมป์-รอบ ค่ากระแสสลับที่ต้องการประมาณ 45 แอมป์ ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเท่ากับ 1.213 โอห์ม แรงดันไฟฟ้าสลับที่ต้องการประมาณ 55 โวลท์

4.5 การทดสอบค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดตรวจสอบ

การทดสอบหาค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตรวจสอบ เพื่อทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก ทำโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กสลับ การทดสอบใช้ขดลวดเหนี่ยวนำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร พันด้วยลวดอบน้ำยาเบอร์ 23A.W.G. จำนวน 20 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำ หน่วย มิลลิเมตร



รูปที่ 4.8 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำและขดลวดตรวจสอบ

เมื่อนำขดลวดเหนี่ยวนำไปวางที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในขดลวดตรวจสอบมันจะถูกเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กได้

การทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้า 52 โวลท์ กระแสไฟฟ้า 45 แอมป์ ให้กับขดลวดตรวจสอบนำขดลวดเหนี่ยวนำวางตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และ 4.10

ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของขดลวดตรวจสอบ วัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 0.204 โวลท์ ซึ่งนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้

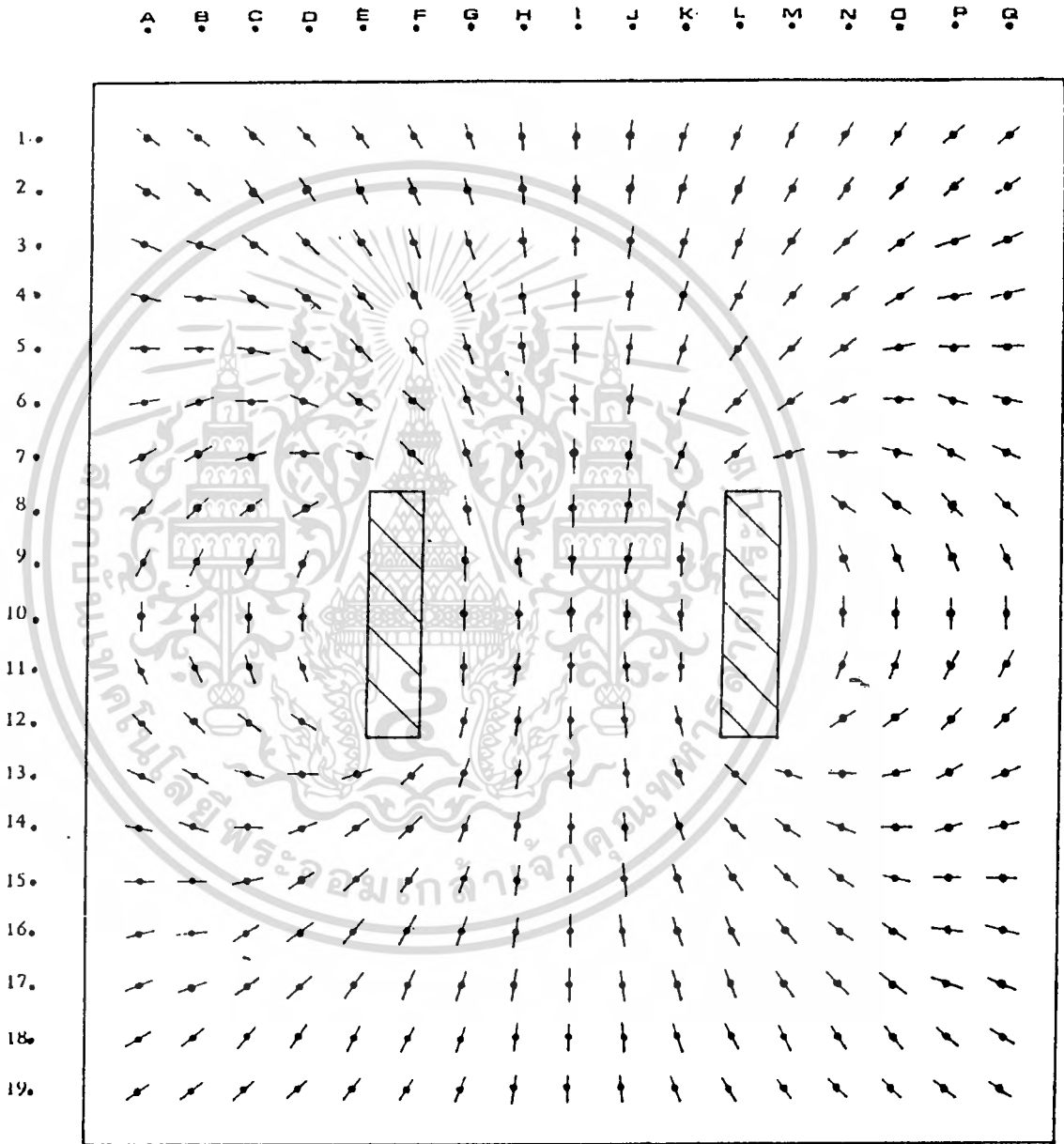
$$\begin{aligned}
 B &= \frac{E}{4.44 \times N \times f \times A} && \text{เทสลา} \\
 &= \frac{0.204}{4.44 \times 20 \times 50 \times \pi \times (0.026)^2} = 0.021 \text{ เทสลา}
 \end{aligned}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1.	3.6	4.4	5.3	6.3	7.3	8.3	9.1	9.5	9.8	9.6	9.3	8.3	7.6	6.5	5.4	4.4	3.5
2.	4.3	5.4	6.7	8.2	9.6	11.1	12.5	13.3	14.1	13.5	12.2	11.3	9.8	8.5	7	5.7	4.6
3.	5.2	6.6	8.4	10.6	13.2	15.5	18.7	19.1	21.1	19.2	18.5	15.6	13.2	10.8	8.7	6.9	5.3
4.	6	7.8	11.3	14.3	18.7	22.2	25.5	28.5	30.2	28.3	25.1	22.5	18.2	14.4	11.1	8.2	6.2
5.	7	9.6	14.2	19.1	26.1	32.5	38.3	42.3	43.5	42.3	38.5	33.1	26.3	19.3	14.3	9.9	7.2
6.	7.8	11.8	17.1	25.3	37.3	51.6	60.6	66.4	68.1	66.5	61.1	52.1	38.1	26.1	17.6	11.5	8.1
7.	8.6	12.1	21.6	34.6	59.5	88.1	102	106	107	106	102	88.3	59.1	35.3	21.4	12.3	8.8
8.	9.1	13.5	23.2	41.1			168	156	154	156	168			41.5	23.3	13.7	9.3
9.	9.5	14.3	23.8	42.7			220	195	193	196	220			42.6	24.3	14.8	9.6
10.	9.7	15.1	25.4	43.2			240	212	204	213	241			43.1	25.4	15.2	9.8

หน่วย มิลลิโวลท์

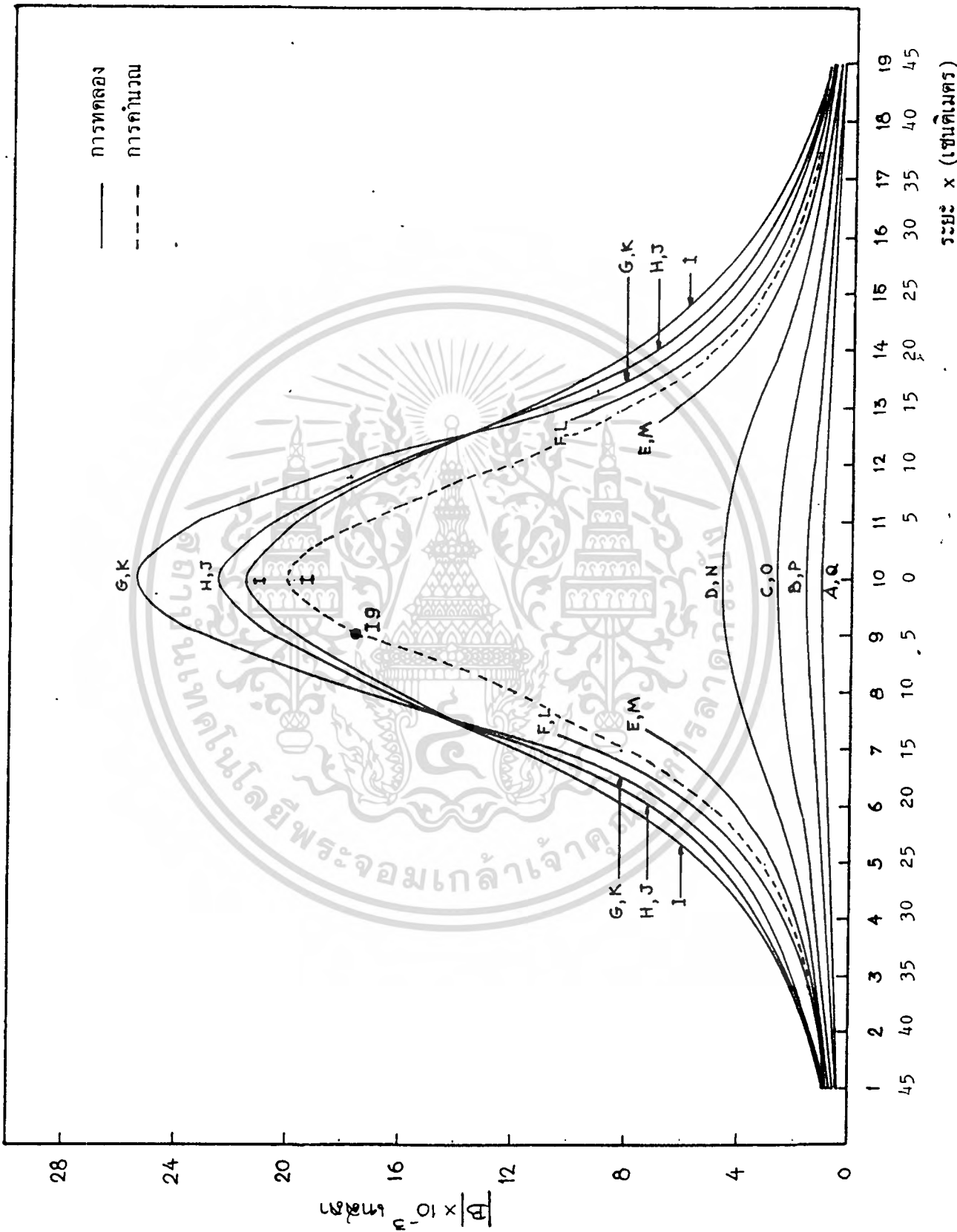
รูปที่ 4.9 แสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในขดลวดตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

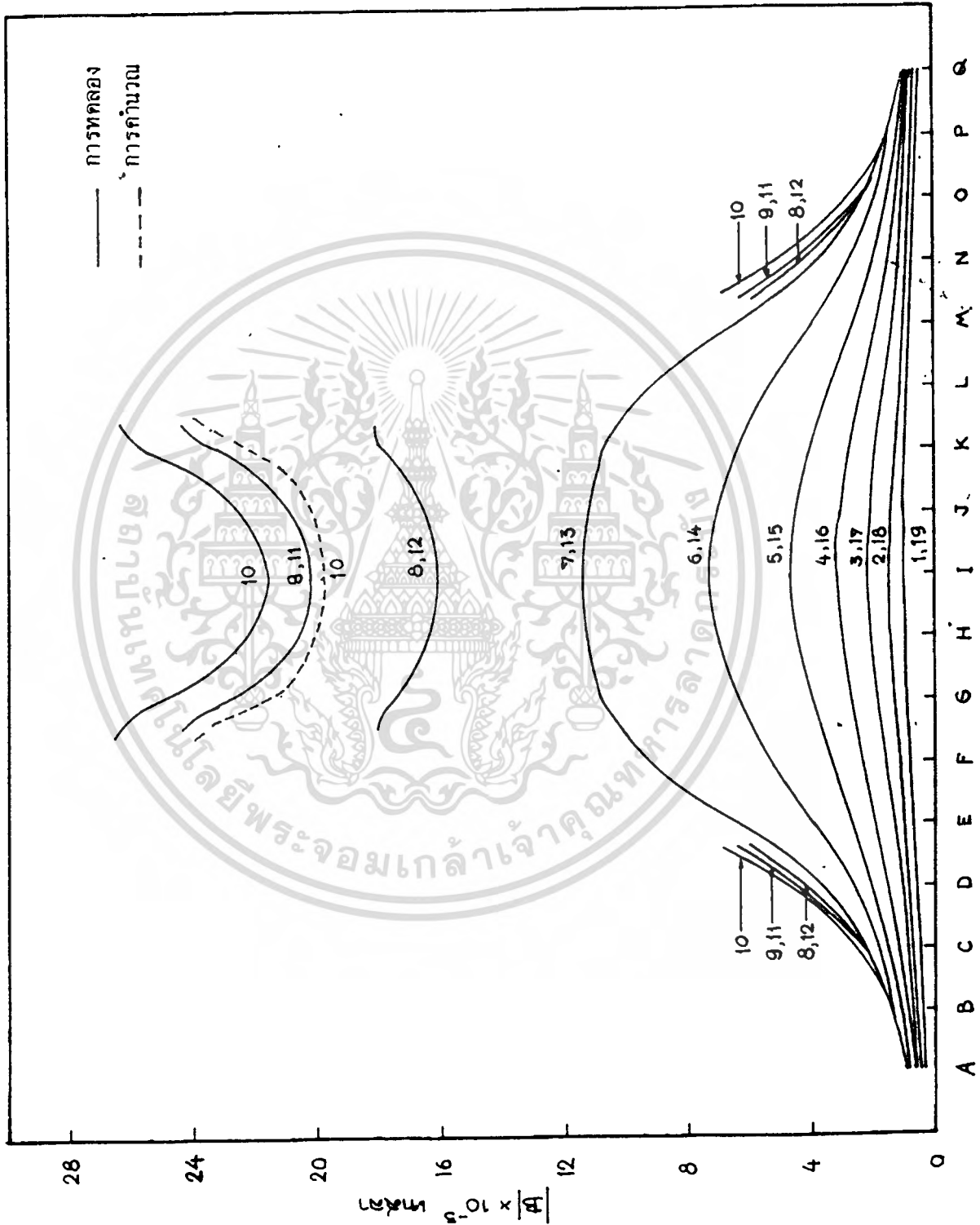


รูปที่ 4.10 แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ก) กราฟแสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแนวแกนต่าง ๆ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าจากการคำนวณดังนี้

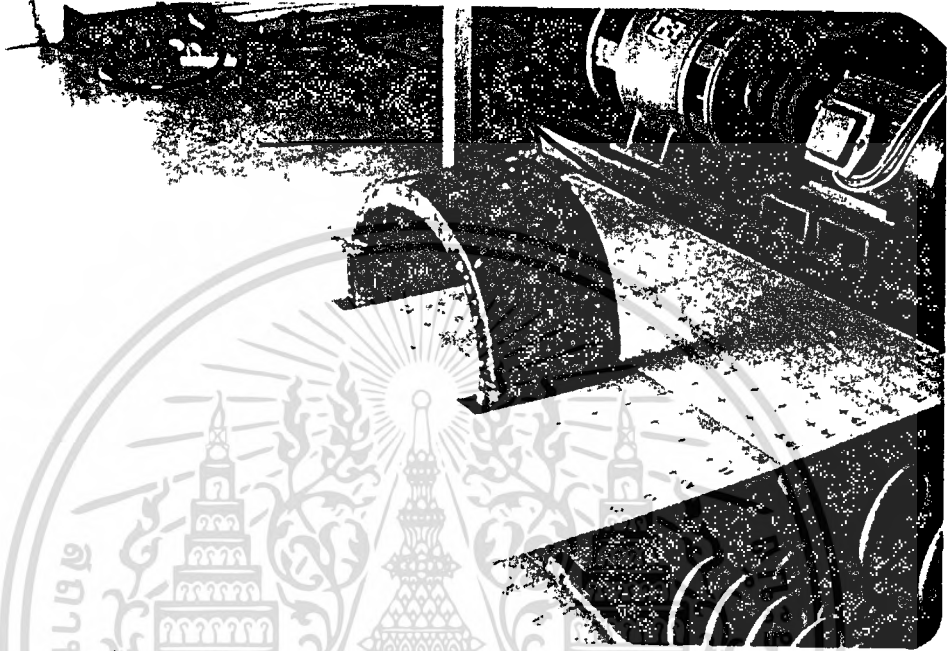
$$\begin{aligned} \text{จาก } B &= \frac{\mu_0 NI}{2r} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 115 \times 45}{2 \times 0.165} \\ &= 0.0197 \quad \text{เทสลา} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากศูนย์กลางของขดลวดตรวจสอบ (ดูภาคผนวกที่ 9)

ระยะ x (เซนติเมตร)	การทดลอง(เทสลา)	การคำนวณ(เทสลา)
0	0.021	0.0197
5	0.020	0.0172
10	0.0156	0.0131
15	0.011	0.009
20	0.0064	0.0058
25	0.0046	0.0041

ตารางที่ 4.4

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางของขดลวดตรวจสอบ ประมาณ 25 เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ และบริเวณผนังด้านในของขดลวดตรวจสอบ จะมีค่าเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุด ค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณจะมีค่าที่ผิดพลาดอยู่ประมาณ 10 % ทั้งนี้ เนื่องมาจากลักษณะของการทดลองแนวแกนที่กำหนดมุมการคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่แท้จริงได้ และการปรับหามุมที่ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากที่สุด อาจเกิดการผิดพลาดได้ การทดลองนี้มีการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ และพิจารณาลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 45 แอมป์ จะได้กราฟของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.10 ก)



รูปที่ 4.11 ต้นแบบการทดสอบค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชีกแซก/สตาร์

5.1 บทนำ

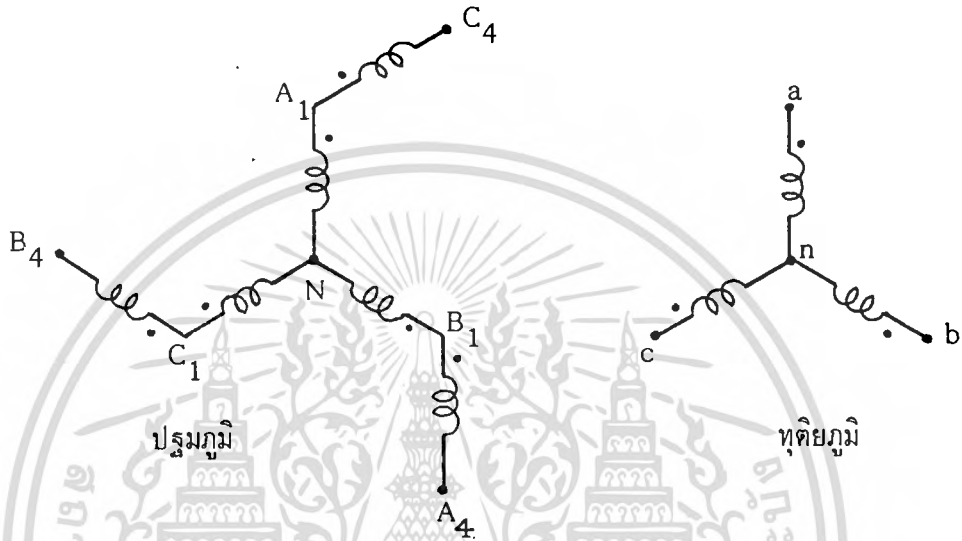
ในบทนี้เห็นการกล่าวถึงลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส โดยจะพิจารณาถึงกรณีทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อโหลดที่ไม่สมดุลกัน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิไม่สมดุลกันทั้งสามเฟส กระแสไฟฟ้าในเฟสใดเฟสหนึ่ง อาจจะมีค่ามากเกินไปก็ัก มีผลทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเสียหายได้ และทำให้ระบบทั้งหมดมีความเชื่อถือลดลง หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชีกแซก/สตาร์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการต่อโหลดที่ไม่สมดุลกันทางด้านทฤษฎี กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งต่อแบบชีกแซก จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละเฟส ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสสำหรับการตรวจสอบรอยรั่วโลหะ โดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

5.2 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชีกแซก/สตาร์

ลักษณะการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส สามารถกระทำได้โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวสามตัวมาต่อกันเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสหรือใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสในตัวเดียวกัน ถ้าพิจารณาค่าใช้จ่ายในการสร้างหม้อแปลงทั้ง 2 แบบ จะเห็นได้ว่าที่พิกัดเดียวกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียวสามตัวมาต่อกันเป็นสามเฟส จะเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าแบบสามเฟสในตัวเดียวกันประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าด้วย โดยทั่ว ๆ ไป การเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจะพิจารณาถึงลักษณะการนำไปใช้งานที่เหมาะสม การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสมืออยู่หลายแบบ (ฎภาคผนวกที่ 2) ในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส เมื่อมีโหลดไม่สมดุล เราจะเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชีกแซก/สตาร์

จากรูปที่ 5.1 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบนี้ จะมีการต่อแบบชีกแซกร่วมอยู่ด้วยทางด้านปฐมภูมิ จะเห็นได้ว่าจากการที่มีการต่อร่วมกันภายในระหว่างเฟสด้วยกันนั้น จะสามารถลดค่าแรงดันไฟฟ้าของฮาร์โมนิกที่ 3 (3^{rd} harmonics) ลงไป ดังนั้นจึงสามารถใช้กับโหลดที่ไม่สมดุลได้ดี การต่อแบบชีกแซกนี้ จะใช้ต่อสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสชนิดแรงเคลื่อนต่ำ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสของ

การต่อแบบซิกแซกนี้ ประกอบด้วยครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเฟส (phase voltage) สองส่วนรวมกันตาม



รูปที่ 5.1 แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์

เวกเตอร์ โดยที่แต่ละเฟสที่นำมาต่อกันนั้นมีเฟสต่างกันอยู่ 60° ดังนั้นจึงต้องเพิ่มจำนวนรอบขึ้นไปอีก 15 % เพื่อให้มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับการต่อแบบสตาร์ จึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าปกติ โดยต่อแบบซิกแซก/สตาร์ จะใช้ต่อเมื่อเห็นว่าการต่อแบบเดลดัดนั้นไม่มีความแข็งแรงต่อแรงทางกลต่าง ๆ ได้คือพอตามความต้องการของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นแบบแรงดันไฟฟ้าสูงอีกทั้งยังเหมาะสำหรับงานที่ต้องการนำไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (rectifier)

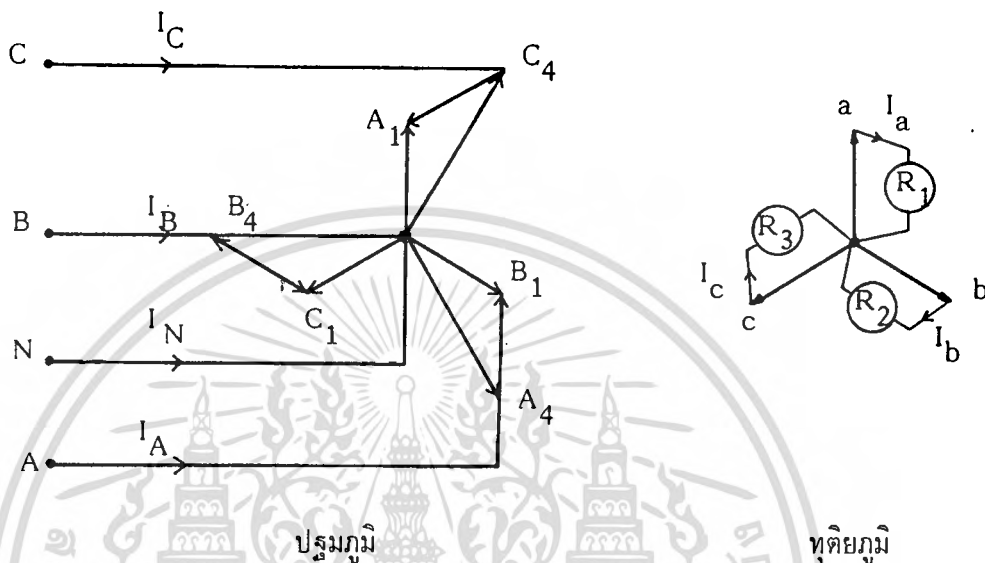
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการต่อโหลดที่ไม่สมดุลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ

ซิกแซก/สตาร์ โดยกำหนดให้โหลดทางด้านทุติยภูมิเป็นตัวต้านทาน $R_1 = R_2 = R_3$

$$V_A = V_1 \angle 0^\circ \qquad V_B = V_1 \angle 240^\circ \qquad V_C = V_1 \angle 120^\circ$$

$$V_a = V_2 \angle 150^\circ \qquad V_b = V_2 \angle 30^\circ \qquad V_c = V_2 \angle 270^\circ$$

V_1 : แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 5.2 แสดงเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชุกแซก/สตาร์

V_2 : แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ

กรณีที่มีโหลด R_1 ที่เฟส a เพียงตัวเดียว กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะดังนี้

$$I_a = I \angle 150^\circ, \quad I_b = 0, \quad I_c = 0$$

I : กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทาน R_1

จะได้ว่า I_A มีเฟสตรงกันข้ามกับ I_a

และ I_A มีเฟสตรงกันข้ามกับ I_C

เนื่องจาก $\theta_a = 0^\circ$ จะได้ $\theta_A = 30^\circ$ และ $\theta_C = 30^\circ$ ด้วย

$$\therefore V_A I_A \cos 30^\circ + V_C I_C \cos 30^\circ = V_a I_a \cos 0^\circ$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} V_1 (I_A + I_C) = V_a I_a$$

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งสามเฟส จะได้

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad I_A &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I_a \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 330^\circ \end{aligned}$$

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 150^\circ$$

I_A ไหลผ่านขดลวด C_3C_4 และ I_A ไหลผ่านขดลวด B_1B_2 ดังนั้นทำให้เกิดกระแสในขดลวด C_1C_2 และ B_3B_4 มีค่าเท่ากับกระแสในขดลวด C_3C_4 และ B_1B_2 ตามลำดับ

$$I_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 330^\circ + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 150^\circ = 0$$

และ $I_N = I_A + I_C = 0$ ด้วย

ทำนองเดียวกัน ถ้ามีโหลดที่เฟส a เพียงตัวเดียว จะได้

$$I_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 30^\circ, \quad I_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 210^\circ,$$

$$I_C = 0, \quad I_N = 0$$

จากที่กล่าวมาแล้ว ถ้ากรณีที่มีโหลดทั้งเฟส a และ b โดยการใช้ทฤษฎี super-position จะได้ว่า

$$I_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 330^\circ + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 30^\circ = \frac{V_2}{V_1} I \angle 0^\circ$$

$$I_B = 0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 210^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I \angle 210^\circ$$

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I |_{150^\circ} + 0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_2}{V_1} I |_{150^\circ}$$

$$I_N = 0$$

สรุปได้ว่า การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ เมื่อมีโหลดไม่สมดุล กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางด้านปฐมภูมิ จะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ให้ลักษณะสมดุลพอสมควร โดยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายร่วมเลย ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ จึงเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ โดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

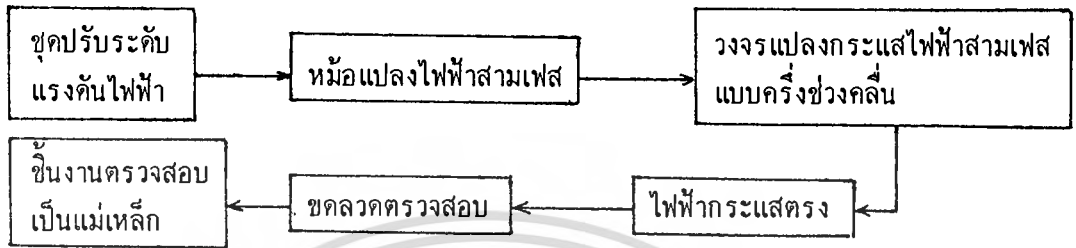
5.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์

หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดขดลวดตรวจสอบ ซึ่งมีการทำงานเป็น 2 ลักษณะ คือ การทำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบให้เป็นแม่เหล็กและการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงานนั้น ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า จะพิจารณาจากหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

1) การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก (magnetization)

จากที่กล่าวมาแล้ว การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กนิยมใช้ไฟฟ้ากระแสตรงมากกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ ทั้งนี้เพราะสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น สามารถเจาะลึกลงไปในตัวของชิ้นงานได้ดี ทำให้การตรวจสอบรอยร้าวมีประสิทธิภาพดีขึ้น ไฟฟ้ากระแสตรงอาจได้มาจากแบตเตอรี่ หรือวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากแบตเตอรี่มีราคาแพงและต้องบำรุงรักษามาก อีกทั้งไม่สะดวกในการอัดไฟแบตเตอรี่ จึงนิยมใช้วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) โดยใช้วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น (three phase half wave rectifier) ซึ่งเป็นวงจรที่สะดวก, ประหยัดค่าใช้จ่าย และให้ประสิทธิภาพในการตรวจสอบที่ดีพอสมควร

ขั้นตอนการทำงานแสดงไว้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนผังแสดงการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก

2) การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน (demagnetization)

วิธีการล้างอำนาจแม่เหล็กที่สะดวก และมีประสิทธิภาพดี คือ การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว ที่สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าจากค่ามากที่สุดลงจนเป็นศูนย์ จากที่กล่าวมาแล้วว่า วิธีการนี้ไม่สามารถล้างอำนาจแม่เหล็กให้หมดลงได้อย่างสมบูรณ์ แต่ค่าสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ มีค่าน้อยมากไม่มีผลต่อส่วนอื่น ๆ ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นที่นิยมใช้และเชื่อถือได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนผังแสดงการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน

จากลักษณะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสนี้ จะเห็นได้ว่าทางด้านทุติยภูมิ จะมีการทำงาน 2 ลักษณะ คือ จ่ายให้กับวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น และจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวสำหรับการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน ซึ่งกรณีหลังนี้จะทำให้กระแสทางด้านปฐมภูมิ เกิดการไม่สมดุลยิ่งขึ้น การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.2 พบว่าการต่อแบบซิกแซก/สตาร์ จะแก้ปัญหาเรื่องการไม่สมดุลของกระแสทางปฐมภูมิได้ดีที่สุด ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเลือกเอาหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

เพราะสามารถใช้หม้อแปลงไฟฟ้าตัวเดียวได้ทั้ง 2 กรณี

5.3.1 ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซก/สตาร์

พิจารณาได้จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เท่ากับ 220 โวลต์ ต่อ เฟส
- 2) ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ มี 2 ลักษณะ คือ
 - 2.1 กรณีการทำงานให้เป็นแม่เหล็ก ต้องการแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ เท่ากับ 15 โวลต์ ต่อ เฟส
 - 2.2 กรณีการล้างอานางแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน ต้องการแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ เท่ากับ 30 โวลต์ ต่อ เฟส
- 3) ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า
 - 3.1 กรณีการทำงานให้เป็นแม่เหล็กต้องการไฟฟ้ากระแสสลับประมาณ 30 แอมป์
 - 3.2 กรณีการล้างอานางแม่เหล็กออกจากชิ้นงานต้องการไฟฟ้ากระแสสลับประมาณ 50 แอมป์
- 4) ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์
 - 4.1 กรณีการทำงานให้เป็นแม่เหล็ก

$$\begin{aligned}
 \text{ขนาดกำลังไฟฟ้า} &= \sqrt{3} V_L I_L && \text{VA} \\
 &= 1350 && \text{VA} \\
 &= 1.35 && \text{KVA}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_L คือ แรงดันไฟฟ้าสาย (line voltage) โวลต์

I_L คือ กระแสไฟฟ้าสาย (line current) แอมป์

4.2 กรณีการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่สามารถคำนวณได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นลักษณะโวลต์ไม่สมมูลย์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งประมาณค่ากำลังไฟฟ้าได้เท่ากับ 6 KVA

5.3.2 การคำนวณหาจำนวนรอบและขนาดขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสต่อจำนวนรอบเท่ากับ 0.9 โวลต์ต่อรอบ ทางด้านปฐมภูมิมีแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ต่อเฟส เป็นการต่อแบบซิกแซก ซึ่งทำให้ในแต่ละเฟสจะมีขดลวด 2 ชุด โดยที่แต่ละชุดมีขนาดแรงดันไฟฟ้าประมาณ 127 โวลต์ จะได้ว่า

$$\text{จำนวนรอบของขดลวดแต่ละชุด} = \frac{127}{0.9} = 140 \text{ รอบ}$$

ดังนั้นจะมีขดลวดที่มีจำนวนรอบ 140 รอบ ทั้งหมด 6 ชุด โดยใช้ลวดทองแดง อาน้ำยา Class H เบอร์ 14 S.W.G ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3.296 ตารางมิลลิเมตร และความโต 2.03 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.5

ทางด้านทุติยภูมิ ต่อแบบสตาร์ มีขดลวด 2 ชุด ซึ่งมีหน้าที่ดังนี้

1) กรณีทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก ในแต่ละเฟสมีขนาดแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15 โวลต์

$$\text{จะได้ จำนวนรอบของขดลวด} = \frac{15}{0.9} = 17 \text{ รอบ}$$

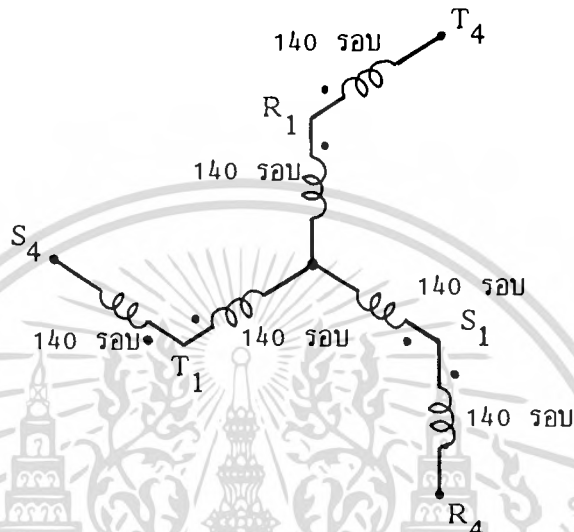
ดังนั้น ในแต่ละเฟสจะมีขดลวดจำนวน 17 รอบ ใช้ลวดทองแดงแบบหุ้มผ้า

Class A ขนาด 4.7 x 7 ตารางมิลลิเมตร

2) กรณีการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสประมาณ 30 โวลต์

$$\text{จะได้ จำนวนรอบของขดลวด} = \frac{30}{0.9} = 32 \text{ รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

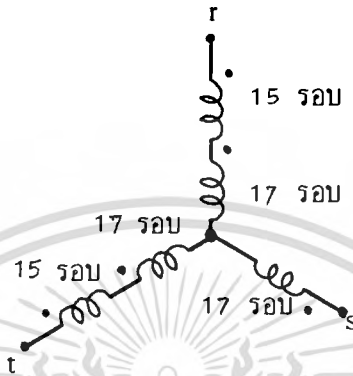


รูปที่ 5.5 แสดงการต่อขดลวดแบบซิกแซก

กรณีนี้ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสประมาณ 30 โวลต์ เพียงสองเฟสเท่านั้น และทางคานทุติยภูมิ ซึ่งมีขดลวดพันอยู่แล้วเฟสละ 17 รอบ ดังนั้น จึงสามารถพันขดลวดเพิ่มเข้าไปเพียงสองเฟส ะ ละ 15 รอบ โดยใช้ลวดทองแดงแบบหุ้มฉนวน Class A ขนาด 4.5 x 7 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.6

จะเห็นได้ว่า ขณะทำการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน จะใช้แรงดันไฟฟ้าสาย (rt)

ซึ่งเท่ากับประมาณ $28.8 \times 1.732 = 50$ โวลต์

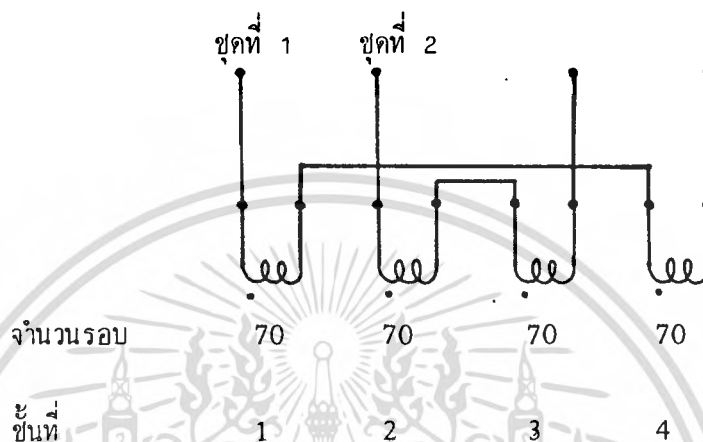


รูปที่ 5.6 แสดงการต่อขดลวดแบบสตาร์ทางด้านทุติยภูมิ

5.3.3 การพันหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์

จากการคำนวณออกแบบจำนวนรอบและขนาดของขดลวดที่ต้องการใช้ในหัวข้อ 5.3.2 จะได้ลักษณะการพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้

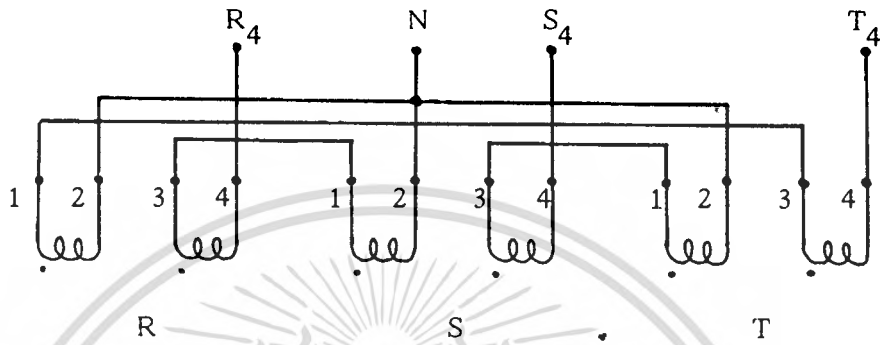
- 1) ด้านปฐมภูมิ การต่อขดลวดเป็นแบบซิกแซก เพื่อเป็นการแก้ปัญหาโหลดไม่สมดุลย์กันทางด้านทุติยภูมิ ลักษณะการต่อแบบซิกแซกในแต่ละเฟส จะมีขดลวด 2 ชุด จำนวนรอบชุดละ 140 รอบ วิธีการพันขดลวด ในแต่ละชุดจะพันลวดเป็น 2 ชั้น ๆ ละ 70 รอบ ดังนั้นในแต่ละเฟสจะมีลวดพันอยู่ 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.7



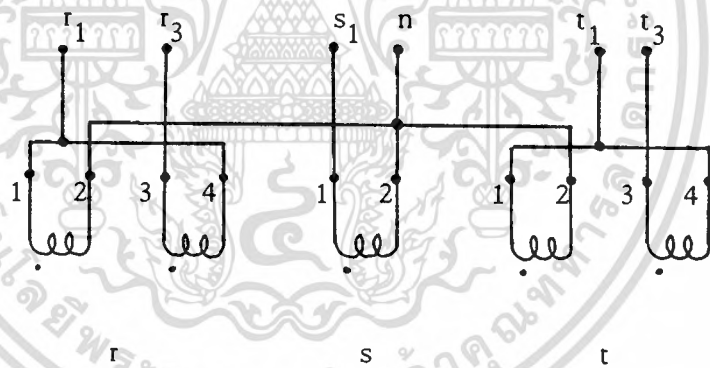
รูปที่ 5.7 แสดงการต่อขดลวดในแต่ละเฟส

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าการต่อขดลวดขั้วที่ 1 โดยใช้ลวดชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 4 และขดลวดขั้วที่ 2 โดยใช้ลวดชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 เป็นเทคนิคในการพันขดลวด ทั้งนี้ เพื่อให้ขดลวดในแต่ละขั้วมีจำนวนรอบ และความยาวของลวดตัวนำที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ขดลวดในทุกเฟส จะมีความคล้ายคลึงกันมากที่สุด วงจรการต่อแบบซิกแซกทั้งสามเฟส แสดงในรูปที่ 5.8

- 2) คำนวณขดลวด การต่อขดลวดเป็นการต่อแบบสตาร์ โดยในแต่ละเฟสจะมีจำนวนรอบเท่ากับ 17 รอบ และมีลักษณะพิเศษ คือ จะพันขดลวดเพิ่มเข้าไปอีก 15 รอบเพียงสองเฟสเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแบบซิกแซก



รูปที่ 5.9 แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิแบบสตาร์

การพันลักษณะนี้ r_1n, s_1n, t_1n นำไปใช้งานสำหรับการทำขึ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก และ r_3t_3 จะนำไปใช้งานสำหรับการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากขึ้นงาน ซึ่งทำให้เกิดการไม่สมดุลย์ของโหลดทางด้านทุติยภูมิ

5.3.4 การออกแบบขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

จากที่กล่าวมาแล้วกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเฟสต่อจำนวนรอบเท่ากับ 0.9 โวลต์ต่อรอบ แกนเหล็กที่ต้องการใช้มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 1 เทสลา ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก หาได้จาก

$$E = 4.44NfBA \quad (5.1)$$

E :	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น	หน่วย	โวลต์
N :	จำนวนรอบของขดลวด	หน่วย	รอบ
f :	ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ	หน่วย	เฮิรตซ์
B :	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	หน่วย	เทสลา
A :	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	หน่วย	ตารางเมตร

จะได้

$$A = \frac{0.9}{4.44 \times 50 \times 1.0}$$

$$= 40.5 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

ค่าพื้นที่หน้าตัดที่คำนวณได้นี้ เป็นค่าที่ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากแกนเหล็กในวงจรแม่เหล็กเป็นการนำเอาแผ่นเหล็กบาง ๆ มาวางซ้อนกัน ดังนั้นจึงต้องมีค่า Staggering factor ซึ่งกำหนดให้มีค่า 0.9

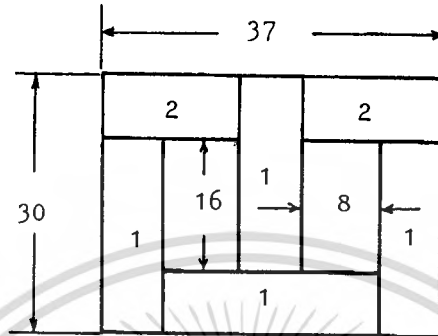
$$\therefore \text{พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของแกนเหล็ก} = \frac{40.5 \times 10^{-4}}{0.9}$$

$$= 45 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

ดังนั้น ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ต้องการใช้ในวงจรแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ $7 \times 7 \times 10^{-4}$ ตารางเมตร โดยใช้แผ่นเหล็กชนิด Grain-Oriented Silicon steel ขนาดกว้าง 7 เซนติเมตร , วางซ้อนกันสูง 7 เซนติเมตร ขนาดของแผ่นเหล็กที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กมี 2 ขนาด คือ

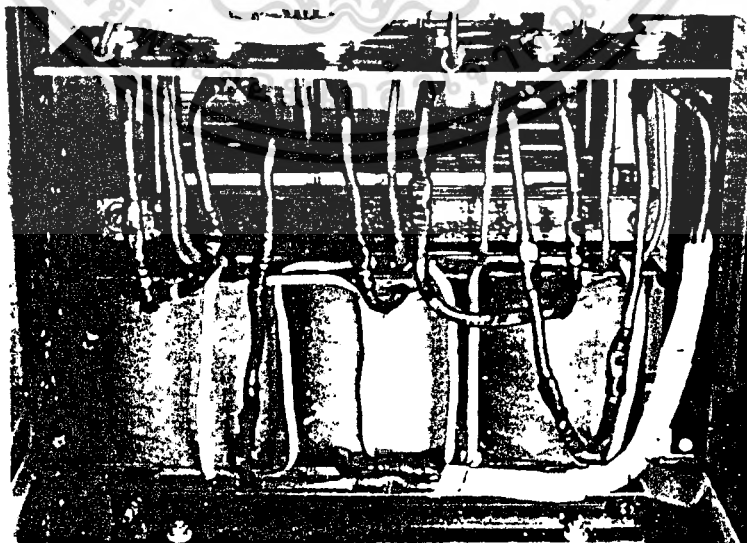
- 1) ขนาด 7 x 23 ตารางเซนติเมตร
- 2) ขนาด 7 x 15 ตารางเซนติเมตร

โดยนำแผ่นเหล็กมาเรียงกันในแต่ละชั้น ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงการเรียงแผ่นเหล็กในแต่ละชั้นของแกนเหล็ก หน่วย เซนติเมตร

แกนเหล็กที่ประกอบขึ้นเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า มีน้ำหนักรวมประมาณ 60 กิโลกรัม ค่าการสูญเสียในรูปของวัตต์ต่อกิโลกรัม หาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับค่าความสูญเสียของแกนเหล็กมีค่าประมาณ 25 วัตต์ ค่ากระแสกระตุ้น (exciting-current) ของหม้อแปลงไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 0.12 แอมป์ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ความหนาแน่นแม่เหล็กเท่ากับ 1 เทสลา แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงเท่ากับ 220 โวลต์ต่อเฟส และน้ำหนักของลวดทองแดงที่ใช้ทั้งหมดประมาณ 20 กิโลกรัม (ภาควิชา 3)



รูปที่ 5.11 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ดินแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สคาร์

ในการหาค่าพารามิเตอร์ (parameter) ต่าง ๆ และวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ คือ

5.4.1 การทดสอบวงจรเปิด (open circuit test)

การทดสอบวงจรเปิด เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) และค่ากระแสกระตุ้นไร้โหลด (exciting current) สำหรับนำไปคำนวณหาค่าความต้านทาน R_0 (resistance) และค่ารีแอกแตนซ์ X_0 (reactance)

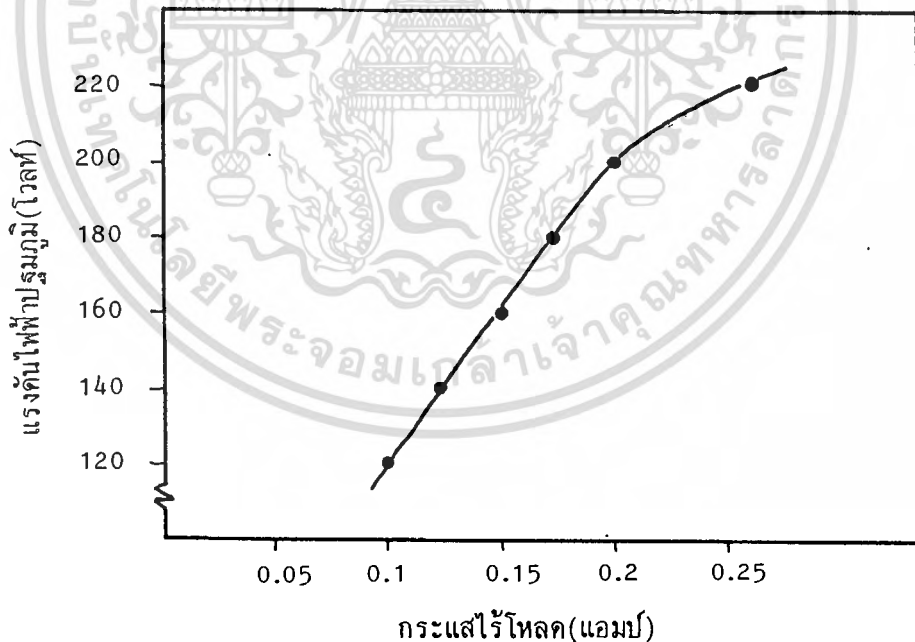
ทำการทดสอบโดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ,ทุติยภูมิ และค่ากระแสกระตุ้นไร้โหลด ดังตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2

กระแสไฟฟ้า(แอมป์)			แรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ(โวลต์)		
A_1	A_2	A_3	T_4N	S_4N	R_4N
0.09	0.1	0.11	119	120	120
0.11	0.12	0.13	138	140	141
0.14	0.15	0.155	159	160	160
0.15	0.17	0.18	178	180	181
0.19	0.2	0.21	198	200	200
0.24	0.26	0.28	219	220	221

ตารางที่ 5.1

แรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ (โวลต์)			แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ (โวลต์)				
T_4N	S_4N	R_4N	r_3n	r_1n	s_1n	t_1n	t_3n
119	120	120	16.7	8.85	8.75	8.7	16.7
138	140	141	19.3	10.3	10.2	10.1	19.2
159	160	160	22.2	11.8	11.6	11.7	22.1
178	180	181	25.1	13.2	13.1	13.1	24.9
198	200	200	27.9	14.8	14.7	14.7	27.7
218	220	221	30	16.3	16.2	16.1	29.5

ตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรีโวลต์กับแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ

ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าค่านปรุสมภูมิ 220 โวลต์ ได้ค่ากำลังไฟฟ้า(วัตต์) , กระแสขณะไร้โหลด ตามตารางที่ 5.3

เฟส	วัตต์	โวลต์	แอมป์
R	35	221	0.28
S	30	220	0.26
T	24	219	0.24

ตารางที่ 5.3

ค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาจรรยาสมมูลย์ 1 เฟส ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.4

$$P_o = V_o I_o \cos \phi$$

$$R_o = \frac{V_o}{I_o \cos \phi} \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_o = \frac{V_o}{I_o \sin \phi} \quad \text{โอห์ม}$$

P_o : ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปขณะไร้โหลด หน่วย วัตต์

V_o : แรงดันไฟฟ้าที่พิกัด หน่วย โวลต์

I_o : ค่ากระแสไฟฟ้าขณะไร้โหลด หน่วย แอมป์

I_w : ค่ากระแสไหลวนและฮิสเทอรีซิส (hysteresis and eddy - current) หน่วย แอมป์

I_ϕ : ค่ากระแสเป็นแม่เหล็ก (magnetizing current) หน่วย แอมป์

เฟส	$\cos \phi$	$\sin \phi$	I_w	I_ϕ	R_o	X_o
R	0.57	0.82	0.159	0.23	1372	952
S	0.53	0.84	0.137	0.22	1598	995
T	0.46	0.88	0.11	0.21	1981	1042

ตารางที่ 5.4

5.4.2 การทดสอบวงจรมัด (Short Circuit Test)

การทดสอบวงจรมัด เป็นการทดสอบเพื่อหาส่วนสูญเสีย เนื่องจากความต้านทานของขดลวดทองแดง (copper loss) ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{o1} (impedance)

รีแอกแตนซ์รั่ว X_{o1} (leakage reactance) และค่าความต้านทานรวม R_{o1} ได้

ทำการทดสอบโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ จนอ่านค่ากระแสปฐมภูมิถึงพิกัดแล้วบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า ของค่านปฐมภูมิ ดังตารางที่ 5.5

เฟส	วัตต์	โวลท์	แอมป์
R	35	9.5	4.8
S	30	9.4	4.6
T	30	9.4	4.6

ตารางที่ 5.5

ค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาจรรยาสมมูลย์ 1 เฟส ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังตารางที่ 5.6

$$P = I_{sc}^2 R_{o1}$$

$$Z_{o1} = V_{sc} / I_{sc}$$

$$X_{o1} = \sqrt{Z_{o1}^2 - R_{o1}^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P	: กำลังไฟฟ้าขณะทดสอบวงจรปิด	หน่วย	วัตต์
I_{sc}	: ค่ากระแสวงจรปิด	หน่วย	แอมป์
V_{sc}	: ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบวงจรปิด	หน่วย	โวลต์
Z_{o1}	: ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ เมื่อคิดทางด้านปฐมภูมิ	หน่วย	โอห์ม
R_{o1}	: ค่าความต้านทานสมมูลย์ เมื่อคิดทางด้านปฐมภูมิ	หน่วย	โอห์ม
X_{o1}	: ค่ารีแอกแตนซ์รีว เมื่อคิดทางด้านปฐมภูมิ	หน่วย	โอห์ม

เฟส	Z_{o1}	R_{o1}	X_{o1}
R	1.979	1.519	1.268
S	2.081	1.48	1.46
T	2.081	1.48	1.46

ตารางที่ 5.6

บทที่ 6

วงจรรควบคุม (Control Circuit)

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรรควบคุมส่วนต่าง ๆ ในการตรวจสอบรอยร้าวของเหล็ก โดยใช้ผงสารแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วย วงจรรควบคุมการตัดต่อวงจรภาคกำลัง วงจรรควบคุมการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า และ วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น โดยอธิบายถึงหลักการทำงานของวงจร และการออกแบบสร้างวงจรรควบคุมต่าง ๆ

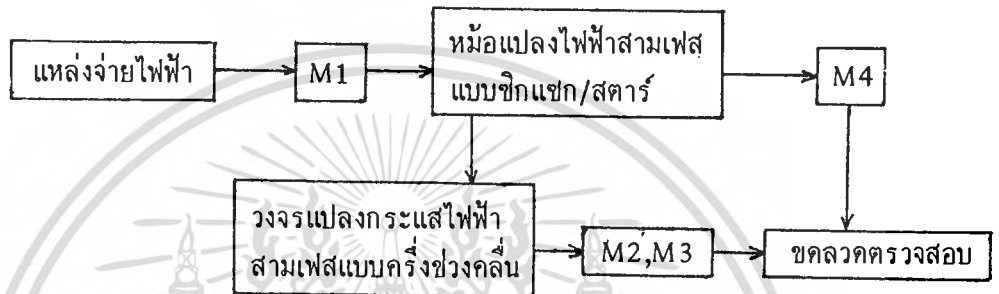
6.2 วงจรรควบคุมการตัดต่อวงจรภาคกำลัง

6.2.1 หลักการทำงาน

- 1) แหล่งจ่ายไฟฟ้า เป็นส่วนต้นกำลังที่จ่ายไฟฟ้าสามเฟส 380 V 4 สาย ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ โดยมีสวิตช์ M1 ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรทั้ง 2 ส่วน
- 2) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์ มีการทำงานเป็น 2 ลักษณะ คือจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น เพื่อเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับจ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ โดยผ่านสวิตช์ M2 และ M3 กรณีที่ต้องการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวให้กับขดลวดตรวจสอบ โดยผ่านสวิตช์ M4 กรณีที่ต้องการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน
- 3) ขดลวดตรวจสอบ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก 2 ลักษณะ คือ สนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสตรงและสนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจำเป็นต้องมีสวิตช์ตัดต่อการทำงานขดลวดให้ทำงานได้ทั้ง 2 ลักษณะ

6.2.2 การออกแบบ

จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าส่งกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจ่ายแรงดันให้กับ
 ขดลวดตรวจสอบ เขียนเป็นแผนผังได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 แผนผังการทำงานของภาคกำลัง

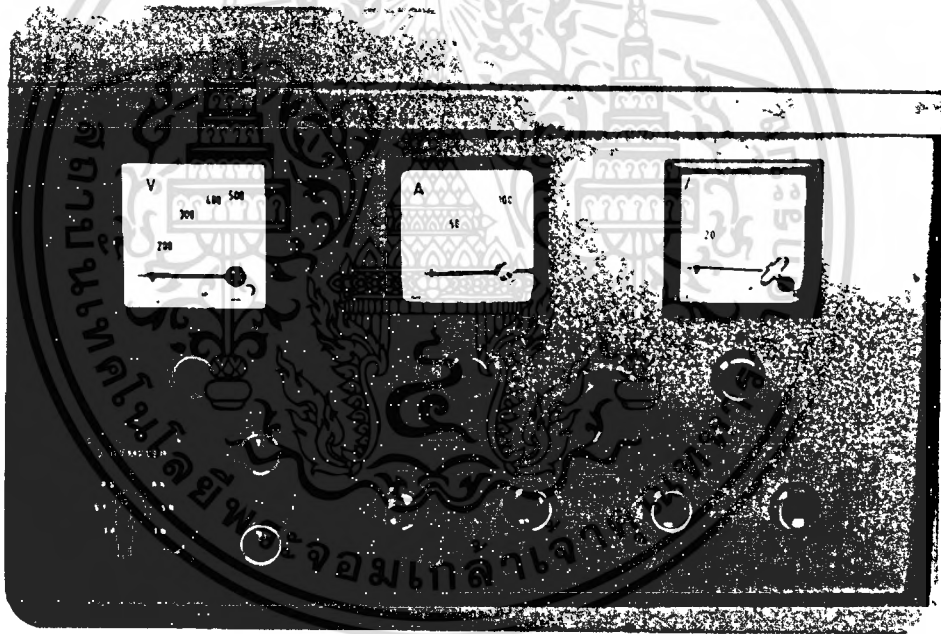
ส่วนควบคุมวงจรภาคกำลังเริ่มทำงานจากสวิทช์ M1 ต่อวงจรไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า สวิทช์ M2 และ M3 จะต่อวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้ากับขดลวดตรวจสอบ และสวิทช์ M4 จะต่อวงจรไฟฟ้าเฟสเดียวระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับขดลวดตรวจสอบ โดยที่การทำงานทั้ง 2 ลักษณะต้องไม่ทำงานพร้อมกัน ซึ่งสามารถออกแบบให้สวิทช์ M2, M3 ไม่สามารถทำงานในขณะที่สวิทช์ M4 กำลังทำงานและในทำนองเดียวกัน สวิทช์ M4 ไม่สามารถทำงานในขณะที่สวิทช์ M2, M3 กำลังทำงาน (interlocked) ส่วนหน่วงเวลา (timer relay) จะทำหน้าที่กำหนดเวลาการทำงานของสวิทช์ M2 และ M3 ซึ่งเป็นการกำหนดเวลาที่จ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงานนั่นเอง สวิทช์ทุกตัวจะมีส่วนป้องกัน (protection) คือ โอเวอร์โหลดรีเลย์ (overload relay) เพื่อป้องกันกระแสที่เกินพิกัดของสวิทช์ทุกตัว และมีหลอดไฟสำหรับแสดงการทำงานของสวิทช์ทุกตัวด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร

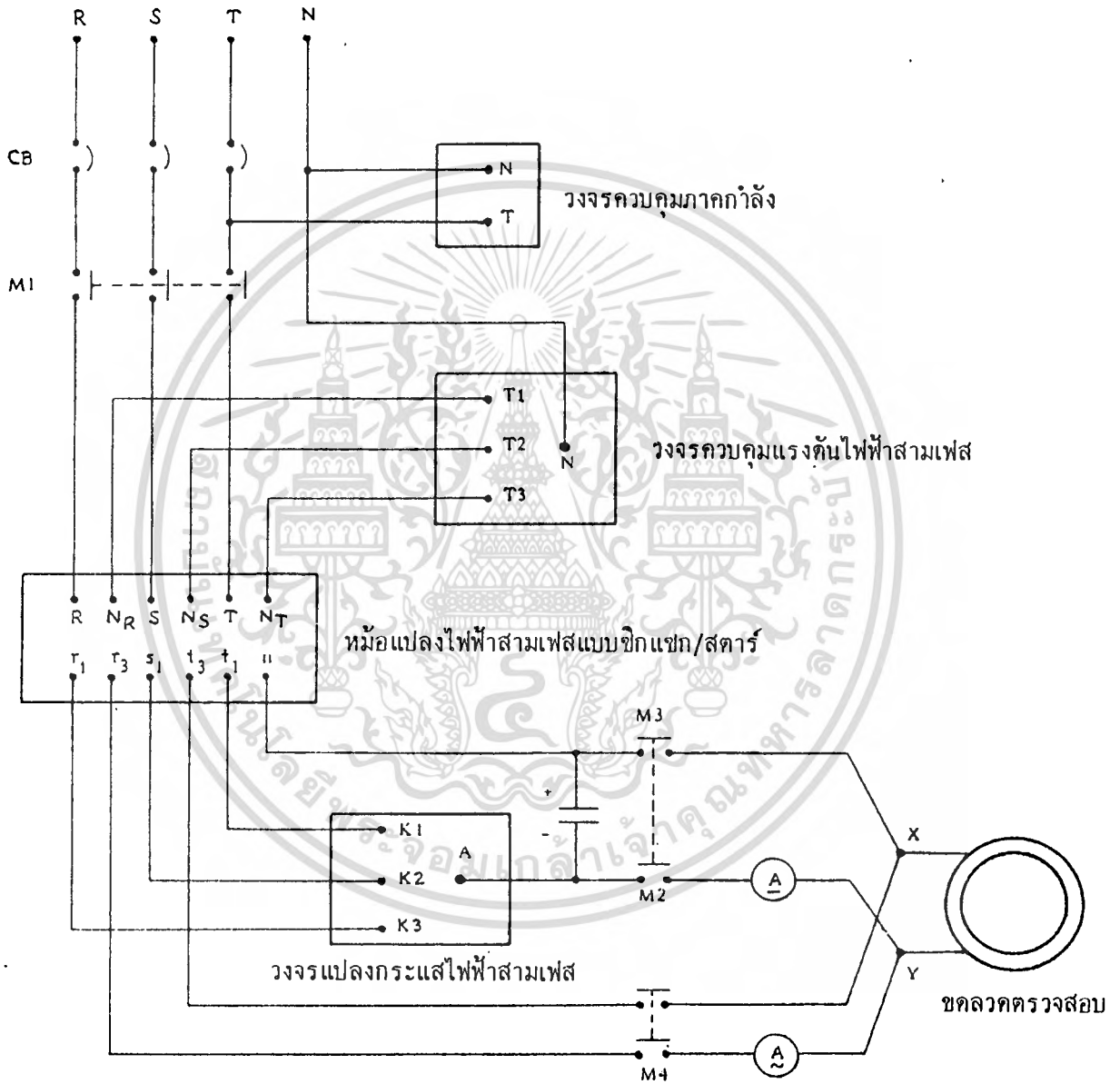
- | | | | | | |
|----|----|----------------|------|------|-----|
| 1) | M1 | สวิทช์แม่เหล็ก | ขนาด | 220V | 20A |
| 2) | M2 | สวิทช์แม่เหล็ก | ขนาด | 220V | 35A |
| 3) | M3 | สวิทช์แม่เหล็ก | ขนาด | 220V | 65A |
| 4) | M4 | สวิทช์แม่เหล็ก | ขนาด | 220V | 80A |

- 5) T ส่วนท่วงเวลา 0-30 วินาที
- 6) CB เซอร์กิตเบรกเกอร์ 20A

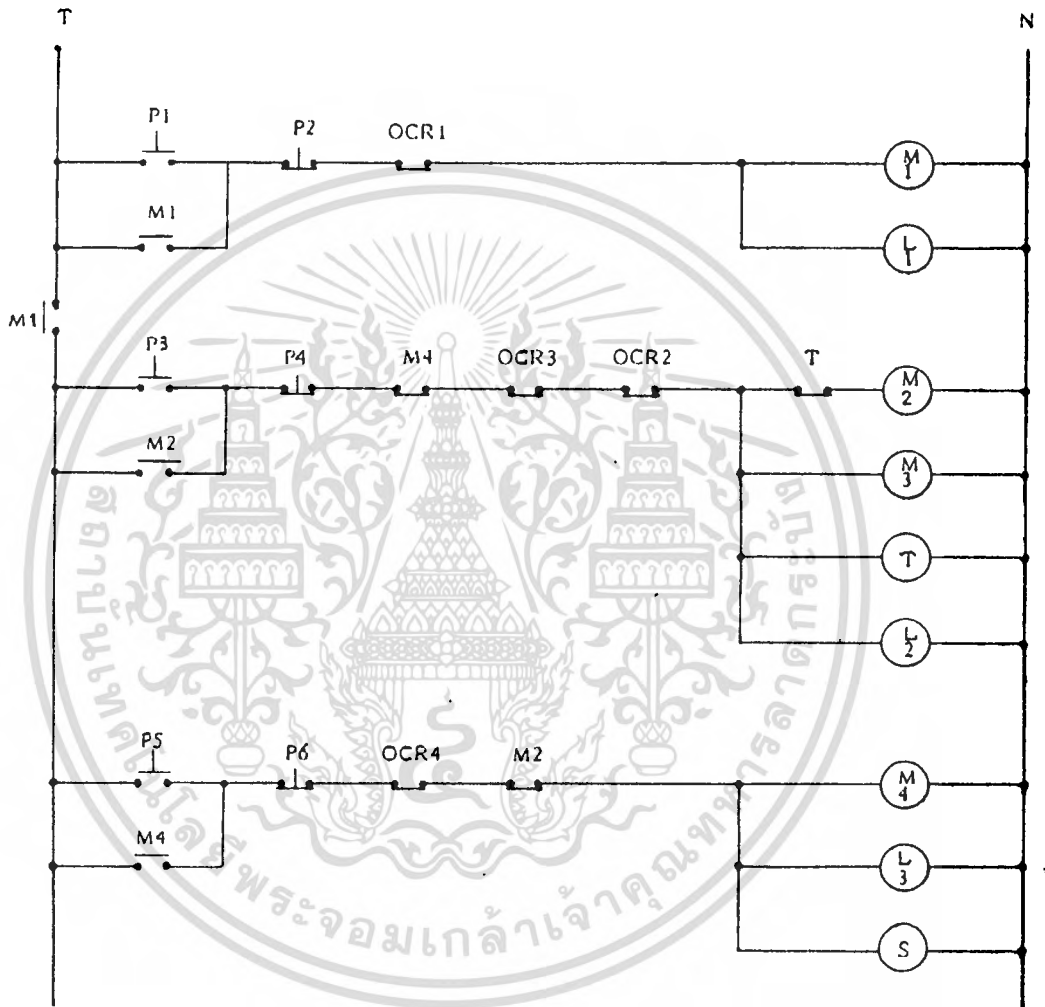
การทำงานของวงจรควบคุมเริ่มจากกด P1 จะทำให้ M1 ทำงานต่อวงจรไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าและกด P2 เมื่อต้องการตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออก กรณีการทำงานให้เป็นแม่เหล็กจะกด P3 ซึ่งทำให้ M2, M3 และ T ทำงานต่อวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้ากับชดลวดตรวจสอบ T เป็นตัวกำหนดเวลาตามที่ต้องการและกด P4 เป็นการหยุดทำงาน กรณีการล้างอำนาจแม่เหล็กจะกด P5 ซึ่งทำให้ M4 ทำงานต่อวงจรไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าถึงชดลวดตรวจสอบและกด P6 เมื่อต้องการหยุดทำงาน



รูปที่ 6.2 หน้าปัทม์เครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็ก



รูปที่ 6.3 แสดงวงจรภาคกำลัง



รูปที่ 6.4 แสดงวงจรควบคุมวงจรภาคกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วงจรควบคุมการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

วงจรควบคุมการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นส่วนกำหนดค่าแอมป์-รอบ ของขดลวด ตรวจสอบสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก

6.3.1 หลักการทำงาน

- 1) กรณีการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก วงจรนี้จะทำหน้าที่ปรับค่าแอมป์-รอบที่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน เพื่อจ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ โดยสามารถปรับค่าแอมป์-รอบ ได้ถึง 12,000 แอมป์-รอบ
- 2) กรณีการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน วงจรนี้จะทำหน้าที่ลดค่าแอมป์-รอบของสนามแม่เหล็กสลัที่จ่ายให้กับชิ้นงาน เพื่อลดวงฮิสเทอรีซิสของการเป็นแม่เหล็กลง ทำให้ชิ้นงานหมดอำนาจแม่เหล็ก

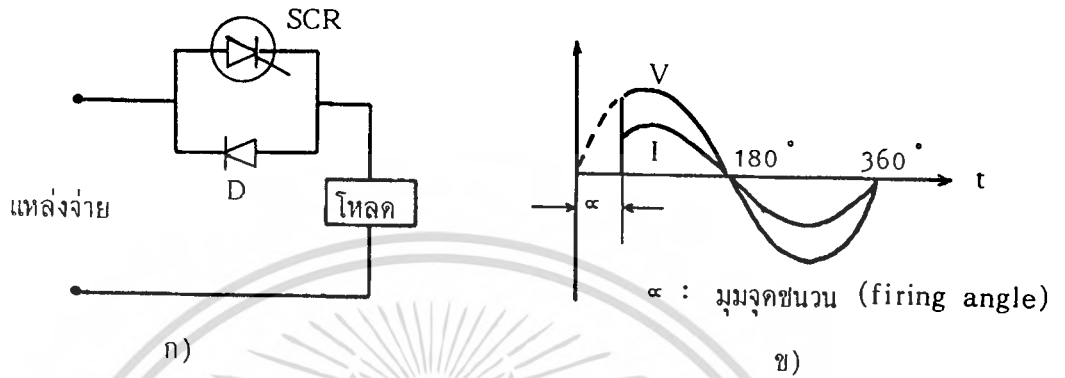
การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีควบคุมเฟส (AC phase control) วงจรลักษณะนี้มีอยู่หลายแบบด้วยกัน ซึ่งเป็นการควบคุมการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ไทรสเตอร์ วงจรที่มีความถี่ไม่เกิน 400 เฮิรตซ์ และกระแสที่ไม่สูงนัก จะนิยมใช้ไทรแอก (Triac) สำหรับที่ความถี่สูง หรือใช้กระแสสูงมาก จะนิยมใช้เอสซีอาร์ (SCR) แทน

- 1) วงจรควบคุมแบบเฟสเดียว รูปที่ 6.5 แสดงวงจรควบคุมเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น (half-wave controller) และสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่คร่อมโหลด วงจรนี้เหมาะสมที่จะใช้กับการควบคุมโหลดที่เป็นความต้านทาน เช่น ตัวนำความร้อน และ หลอดไฟ

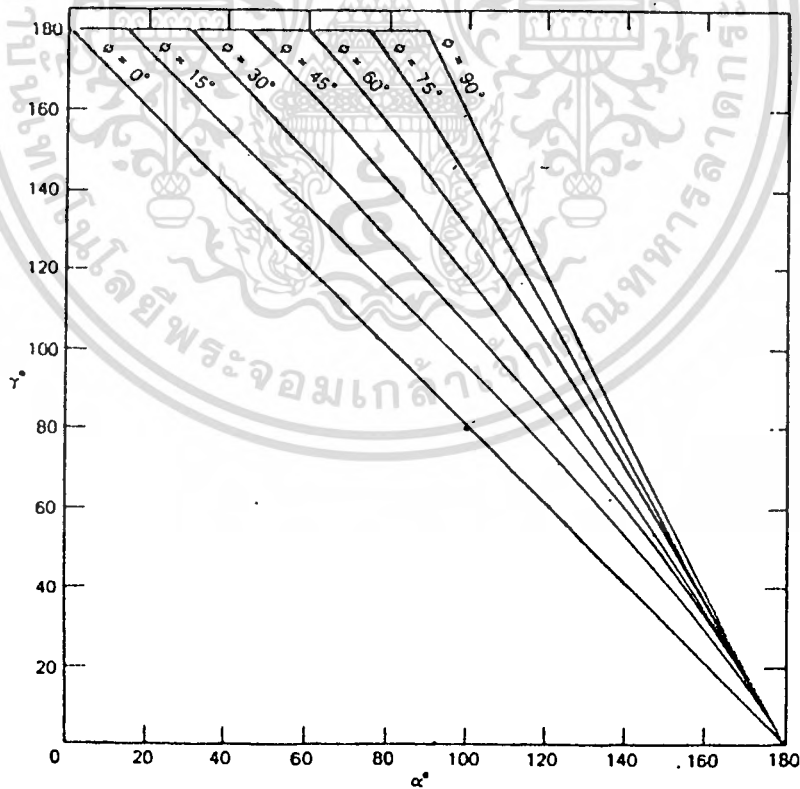
รูปที่ 6.7 แสดงวงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่น (full-wave controller)

ซึ่งสามารถใช้ควบคุมโหลดที่เป็นความต้านทาน หรือ อินдукทีฟ (inductive)

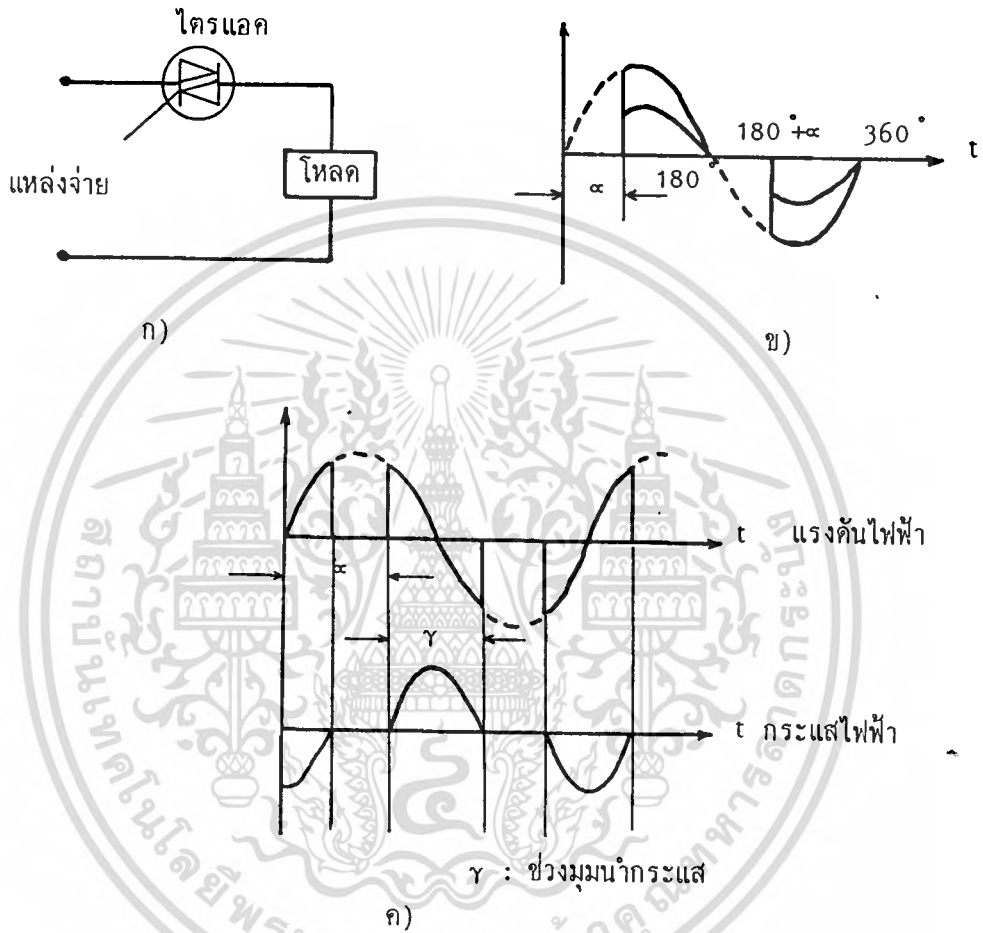
มุมจุดชนวน (α) มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศาถ้าโหลดเป็นความต้านทาน และมีค่าไม่ต่ำกว่า 90 ถึง 180 องศาถ้าโหลดเป็น อินдукทีฟ



รูปที่ 6.5 วงจรควบคุมเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น ก) วงจรพื้นฐาน
ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคร่อมโหลดที่เป็นความต้านทาน



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ กับ α ขณะที่มุม ϕ มีค่าต่าง ๆ

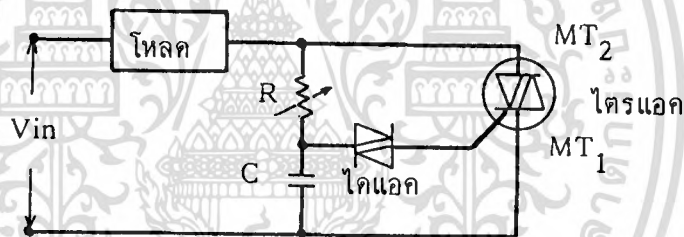


รูปที่ 6.7 วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่น ก) วงจรพื้นฐาน ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโหลดที่เป็นความต้านทาน ค) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโหลดที่เป็นอินดักทีฟ

จะเห็นได้ว่า ถ้าโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ($\phi = 90^\circ$) ค่ามุม α ควรจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 90° ซึ่งจะได้ช่วงมุมนำกระแสไม่เกิน 180° ซึ่งทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้ไม่ผิดเพี้ยนไป เนื่องจากช่วงมุมนำกระแสมากกว่า 180°

- 2) วงจรควบคุมเฟสแบบสามเฟส เป็นการนำวงจรควบคุมเฟสแบบเดี่ยวมาต่อกันเป็นสามเฟส โดยมีวงจรจุดชนวนไตรแอกแยกกันเป็นสามชุด โดยมีเฟสต่างกัน 120° ซึ่งจะให้ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งสามเฟส ลักษณะการต่อไตรแอกมีทั้งแบบสตาร์และแบบเดลต้า

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส จะใช้วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่น (full-wave phase control) อย่างง่าย ๆ โดยใช้ไดแอกและไตรแอก (diac/triac) ดังแสดงในรูปที่ 6.8 การทำงานของวงจรจะอาศัยคุณสมบัติของไดแอก เพื่อควบคุมการนำกระแสของไตรแอก (ดูภาคผนวกที่ 4)

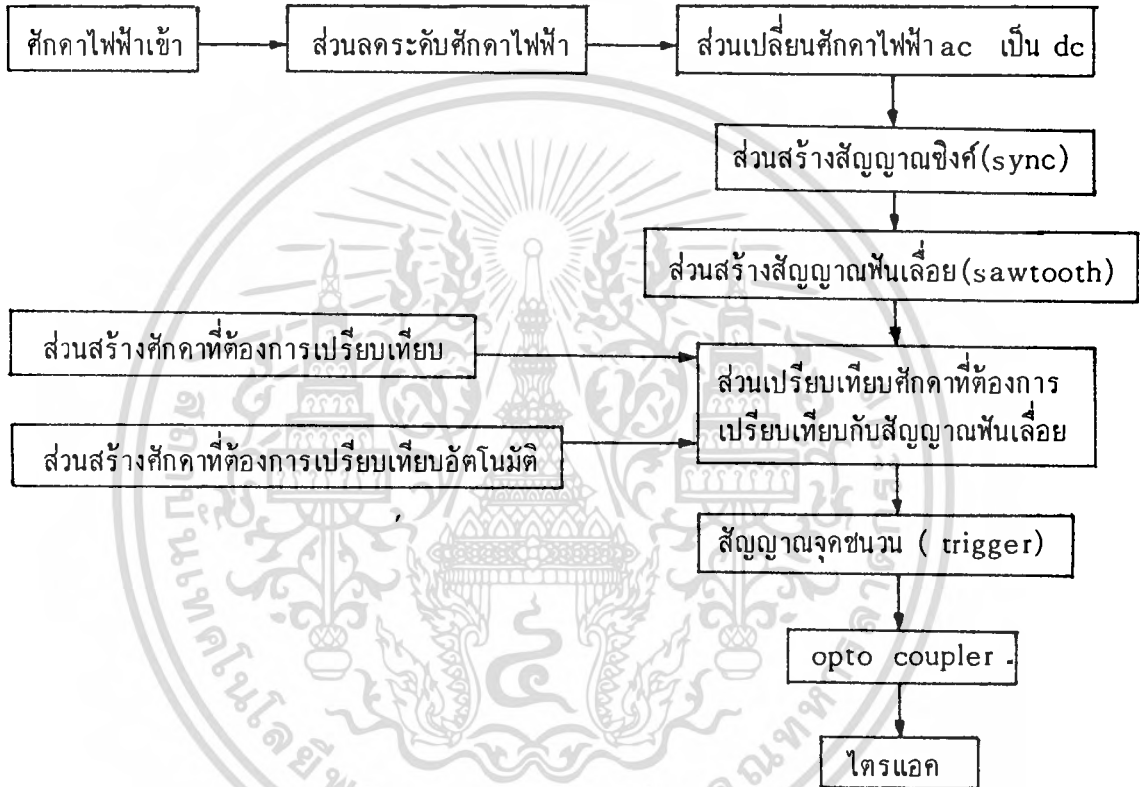


รูปที่ 6.8 วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นโดยใช้ไดแอกและไตรแอก

ขณะเริ่มต้นช่วงไซเคิล (cycle) ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า คาปาซิเตอร์ จะถูกประจุ (charge) ผ่านความต้านทานจนมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าแรงดันพังทลาย (breakdown-voltage) ของไดแอก ไดแอกจะนำกระแสจ่ายกระแสจุดชนวน (trigger) ให้กับเกต (gate) ของไตรแอกให้นำกระแส คาปาซิเตอร์จะคายประจุผ่านไดแอกจนแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแรงดันพังทลายของไตรแอก ไดแอกจะหยุดนำกระแสและไตรแอกจะหยุดนำกระแส เมื่อแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าตกเป็นศูนย์ คือ หมดครึ่งไซเคิล เมื่อเริ่มครึ่งไซเคิลใหม่ คาปาซิเตอร์จะถูกประจุใหม่ ขึ้นตอนจะเหมือนกับที่กล่าวมาแล้ว เพราะ ทั้งไดแอกและไตรแอกจะนำกระแสได้ทั้งครึ่งไซเคิลบวกและลบ วงจรนี้สามารถเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่ไตรแอกนำกระแส โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทาน R ถ้าเพิ่มค่าความต้านทาน R ให้มากขึ้นเวลาที่คาปาซิเตอร์จะถูกประจุจนมีแรงดันมากกว่าแรงดันพังทลายของไดแอกจะนานขึ้น ทำให้ไตรแอกนำกระแสที่มุมมากขึ้น ค่ามุมที่ไตรแอกนำกระแสจะ

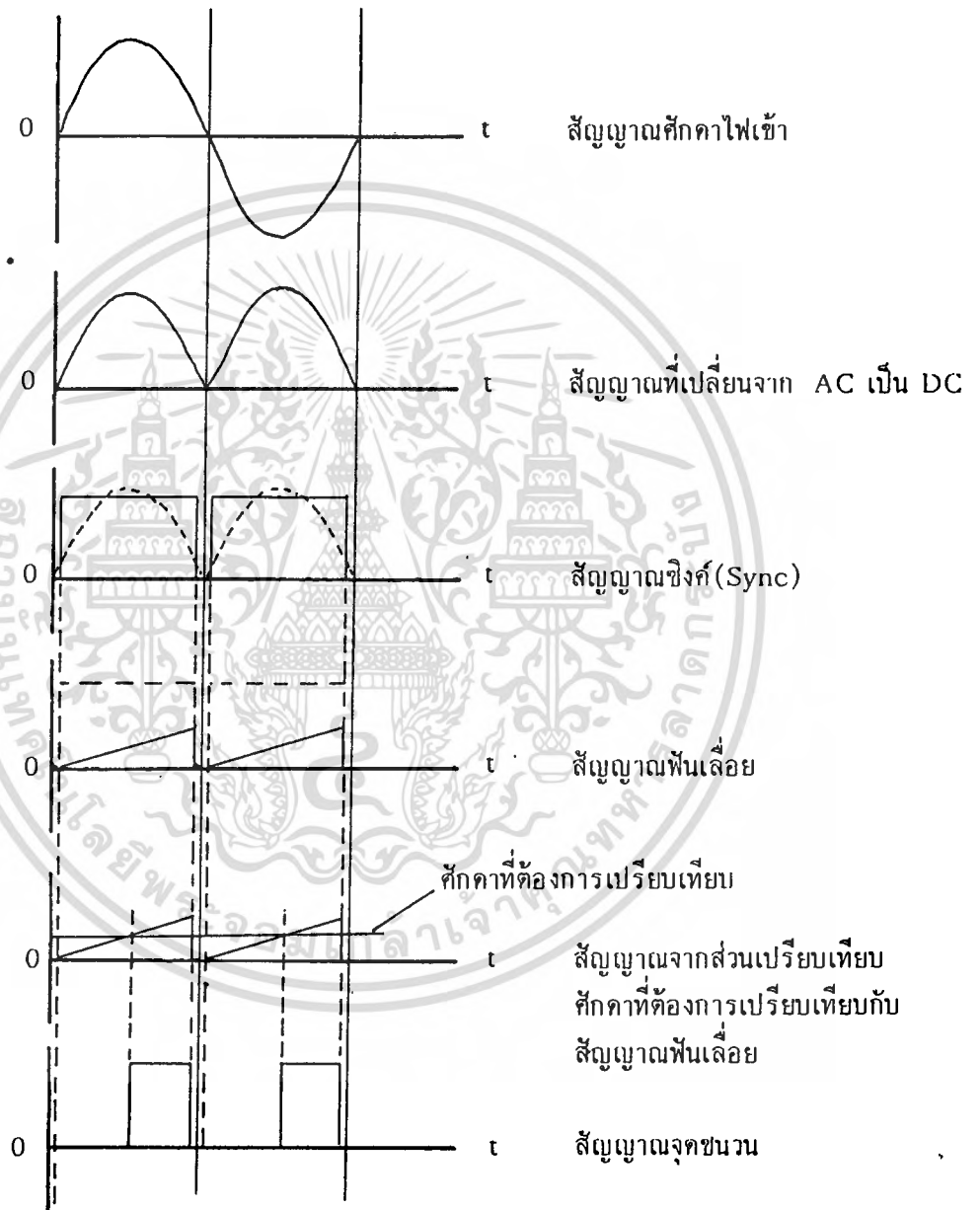
ลดลง แรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดโดยเฉลี่ยจะลดลง

วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นอีกวิธีหนึ่งโดยใช้ opto coupler (photo triac - driver output) เป็นตัวควบคุมการนำกระแสของไทรแอก (ดูภาคผนวกที่ 5)



รูปที่ 6.9 แผนผังแสดงการทำงานของวงจรควบคุมโดยใช้ opto coupler

หลักการทำงานของวงจรจากแผนผังรูปที่ 6.9 และ 6.10 อธิบายได้ดังนี้ ศักดาไฟฟ้าเข้าจะถูกลดลงระดับศักดาให้มีขนาดเล็กลง ทั้งนี้เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ร่วมกับวงจรอื่น ๆ ศักดาไฟฟ้าที่ถูกลดขนาดนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรงโดยผ่านวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวแบบเต็มช่วงคลื่น ซึ่งให้สัญญาณที่นำไปสร้างเป็นสัญญาณซิงค์(sync) ซึ่งมีความถี่เท่ากับสัญญาณศักดาไฟฟ้าเข้า โดยอาศัยวงจรเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า (comparator) จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปสร้างเป็นสัญญาณฟันเลื่อย(sawtooth) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับศักดาที่ต้องการเปรียบเทียบ เพื่อสร้างสัญญาณจุดชนวน(trigger) ออกมา ซึ่ง



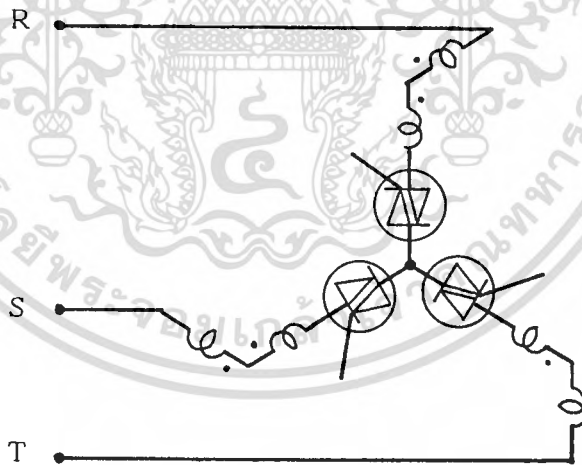
รูปที่ 6.10 แสดงแผนผังของสัญญาณต่าง ๆ ในวงจรควบคุมแบบใช้ Opto Coupler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเปลี่ยนมุมของสัญญาณจุดชนวนได้ โดยการเปลี่ยนค่าศักดาที่ต้องการเปรียบเทียบ สัญญาณจุดชนวนที่ได้จะส่งไปให้กับ opto coupler เพื่อสร้างสัญญาณที่จะไปกำหนดมุมนำกระแสของไครแอก opto coupler นี้มีคุณสมบัติในการจุดชนวนไครแอกโดยสามารถแยกสัญญาณจุดชนวนออกจากไฟฟ้ากระแสสลับได้ (isolated triac triggering) ค่ามุม α ของไครแอกจะออกแบบในลักษณะเดียวกันกับวิธีแรก ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟ คือ มีค่าไม่ต่ำกว่า 90° ซึ่งจะให้ช่วงมุมนำกระแส (γ) ไม่เกิน 180°

6.3.2 การออกแบบ

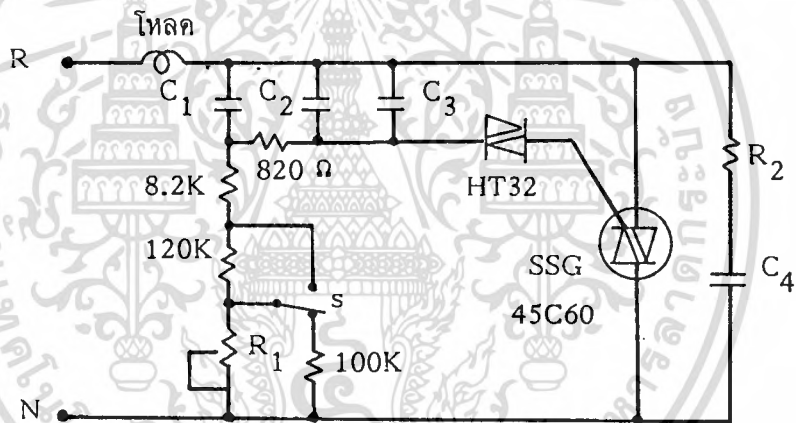
การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ทำได้โดยการนำเอาวงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นมาควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิทั้งสามเฟส โดยให้ขดลวดทางด้านปฐมภูมิเป็นโหลดของวงจรควบคุมเฟส ดังแสดงในรูปที่ 6.11 จะเห็นได้ว่า เป็นวงจรที่ใช้หลักการอย่างง่าย ๆ ซึ่งให้ผลการทำงานที่ดี สะดวก, บำรุงรักษาง่าย และ ประหยัดค่าใช้จ่าย



รูปที่ 6.11 วงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นสามเฟส

ไครแอกทั้งสามตัวจะต่อกันแบบสตาร์ โดยให้ MT_2 (main terminal 2) ต่อร่วมกันที่จุดร่วม วงจรที่จ่ายกระแสจุดชนวนให้กับเกทของไครแอกจะแยกกันเป็นสามชุด โดยแต่ละชุด จะมีวงจรที่เหมือนกันสามารถปรับค่ามุมที่ไครแอกนำกระแสได้เท่ากันทุกเฟส

รูปที่ 6.12 วงจรจะประกอบด้วยชุดหน่วงเวลาการจุกชนวนปรับค่าได้แบบสองเท่า (double - time constant) และชุดสับเบอ์ (snubber) R_2, C_4 ทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (transient voltage) ที่เกิดจากโหลดประเภทอินดักทีฟ (inductive) ซึ่งอาจไปกระตุ้นให้ไดโอดทำงานผิดช่วงเวลาที่เราต้องการได้ ความต้านทานที่ปรับค่าได้ใช้ความต้านทานแบบแกนเดี่ยวสามชั้น ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานที่เกือบเท่ากันทั้งสามวงจร ทำให้การปรับค่ามุมนำกระแสของไดโอดมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ทั้งสามตัว S คือ สวิตช์เปลี่ยนค่าความต้านทานในกรณีที่ต้องการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน เพื่อให้มุมนำกระแสของไดโอดมีค่าไม่ต่ำกว่า 90°



รูปที่ 6.12 วงจรจุกชนวนไดโอดแบบควบคุมเฟสโดยใช้ไดโอด

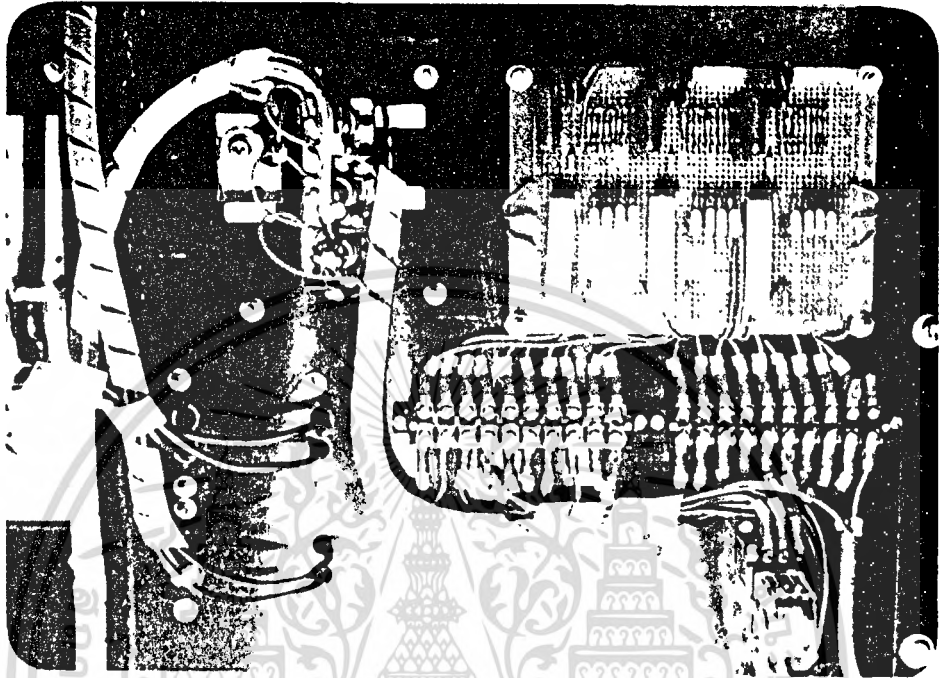
C_1 : PPN 0.1 F 630V

C_2, C_3 : 0.036 F 50V

C_4 : PPN 0.01 F 630V

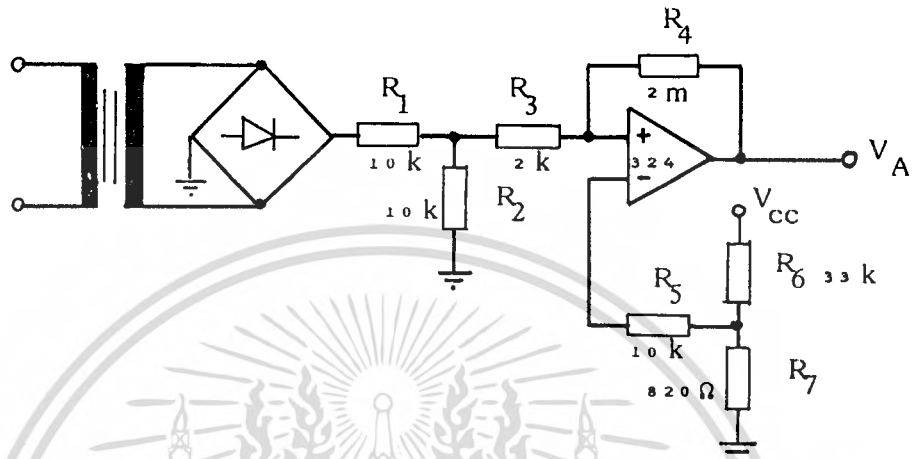
R_1 : 200 K Ω x 4 38E

R_2 : 10W 1 K Ω J

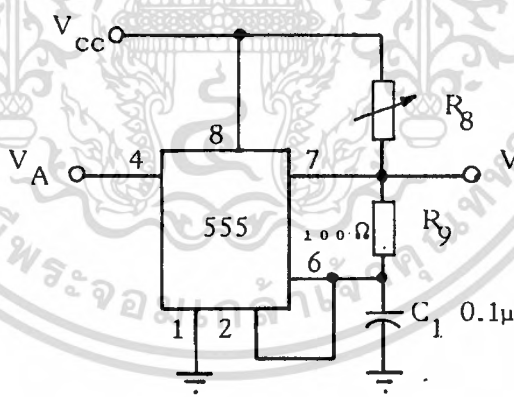


รูปที่ 6.13 ต้นแบบวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ไคแอด

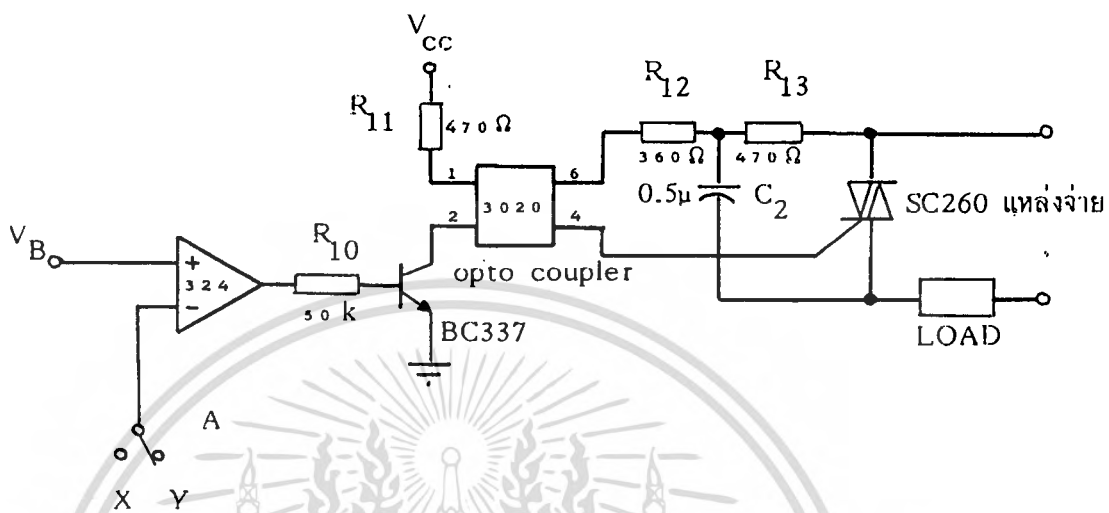
การออกแบบวงจรควบคุมเฟสแบบเต็มช่วงคลื่นอีกวิธีหนึ่ง โดยใช้ opto coupler (MOC 3020) จากรูปที่ 6.14 แสดงวงจรสร้างสัญญาณซิงค์ ซึ่งมีความถี่เท่ากับสัญญาณสัปดาห์ไฟฟ้าเข้า เมื่อนำไปป้อนให้กับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยรูปที่ 6.15 สัญญาณที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับสัปดาห์ที่ต้องการเปรียบเทียบ เพื่อสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับ opto coupler ซึ่งจะไปจุดชนวนไตรแอดให้ นำกระแสรูปที่ 6.16 มุมจุดชนวนสามารถปรับค่าได้โดยการเปลี่ยนค่าสัปดาห์ที่ต้องการเปรียบเทียบ ซึ่งเลือกใช้ได้ทั้งแบบปรับค่าความต้านทาน R และแบบอัตโนมัติ โดยใช้สวิตช์ A ดังแสดงในรูปที่ 6.17 วงจรลักษณะนี้จะให้ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แน่นอนและเชื่อถือได้ดี โดยอาศัยคุณสมบัติของ opto coupler และสามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติ



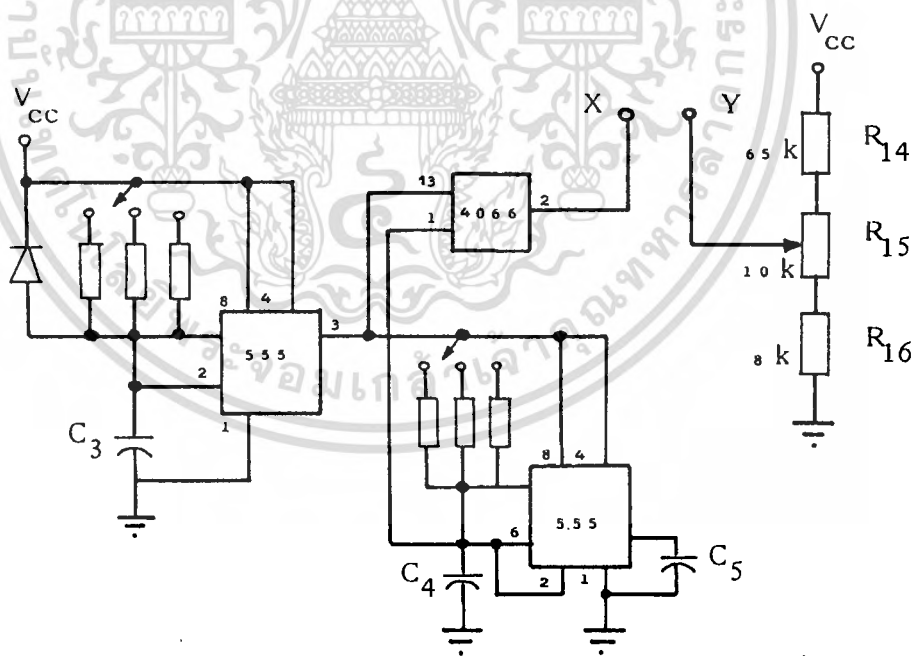
รูปที่ 6.14 แสดงวงจรสร้างสัญญาณซิงค์



รูปที่ 6.15 แสดงวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย



รูปที่ 6.16 แสดงวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

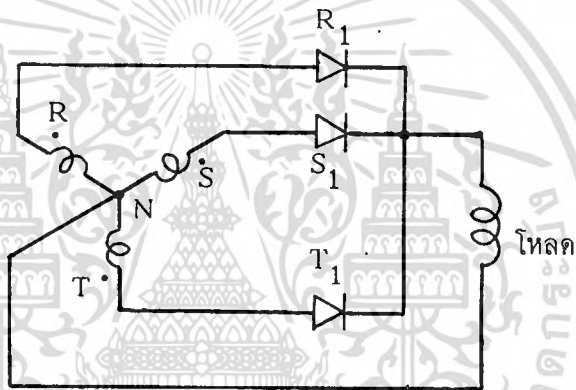


รูปที่ 6.17 แสดงวงจรปรับค่าที่ตกค้างที่ต้องการเปรียบเทียบ

6.4 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น

วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสให้เป็นกระแสตรงแบบครึ่งช่วงคลื่น เป็นวงจรที่ให้แรงดันไฟฟ้าทางออกมีลักษณะที่เรียบขึ้น และประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้าง ในลักษณะนี้จะใช้ไดโอดเป็นตัวแปลงไฟ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าขาออกจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลง นอกจากจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

6.4.1 หลักการทำงาน



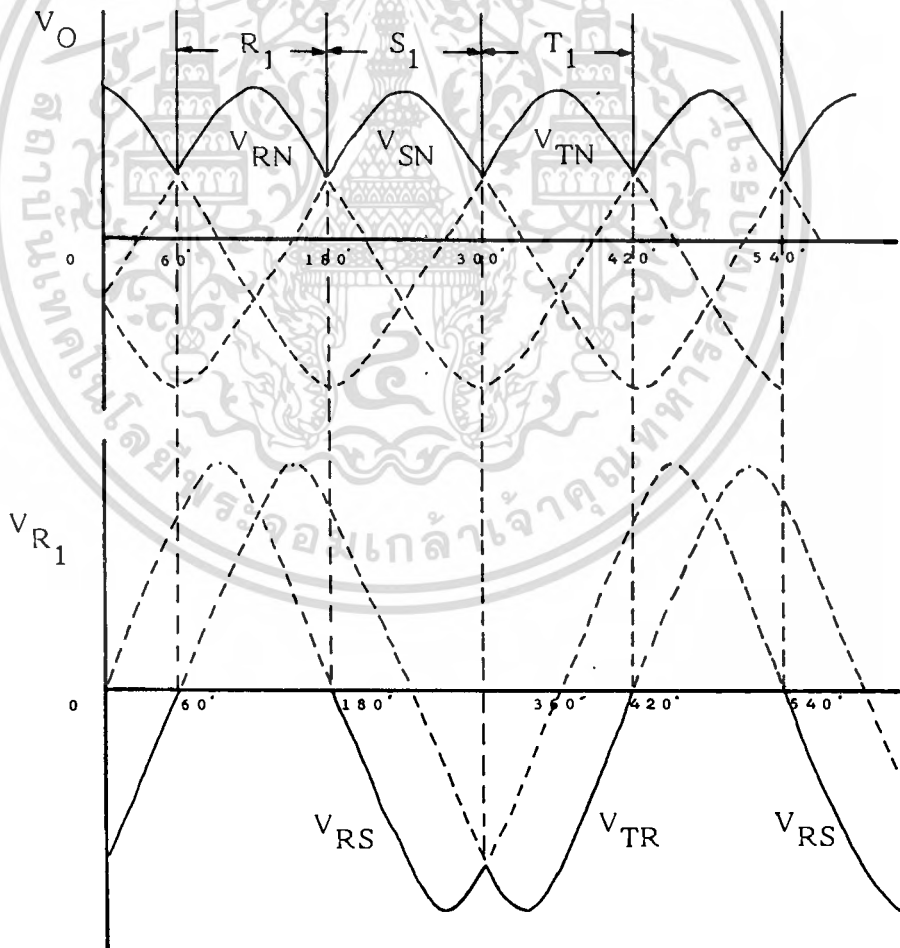
รูปที่ 6.18 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่นโดยใช้ไดโอด

จากรูปที่ 6.18 ไดโอดจะนำกระแส เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง (forward bias) นั่นคือ R_1 จะนำกระแสในช่วง $V_{RN} > V_{SN}$ และ R_1 จะหยุดนำกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) คือ $V_{RN} < V_{SN}$ และ S_1 จะนำกระแสระหว่าง $V_{SN} > V_{TN}$ ไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสเป็นมุม 120° เมื่อให้ V_{RS} เป็นแรงดันอ้างอิง จะได้ช่วงที่ไดโอดนำกระแสดังนี้

ไดโอด ช่วงนำกระแส

R_1	$60^\circ - 180^\circ$	ช่วงนำกระแสเริ่มจากขณะที่ V_{TR} เปลี่ยนจากบวกเป็นลบ จนกระทั่ง V_{RS} เป็นลบ
S_1	$180^\circ - 300^\circ$	ช่วงนำกระแสเริ่มจาก V_{RS} เป็นลบ จนกระทั่ง V_{ST} เป็นลบ
T_1	$300^\circ - 420^\circ (60^\circ)$	ช่วงนำกระแสเริ่มจาก V_{ST} เป็นลบ จนกระทั่ง V_{TR} เป็นลบ

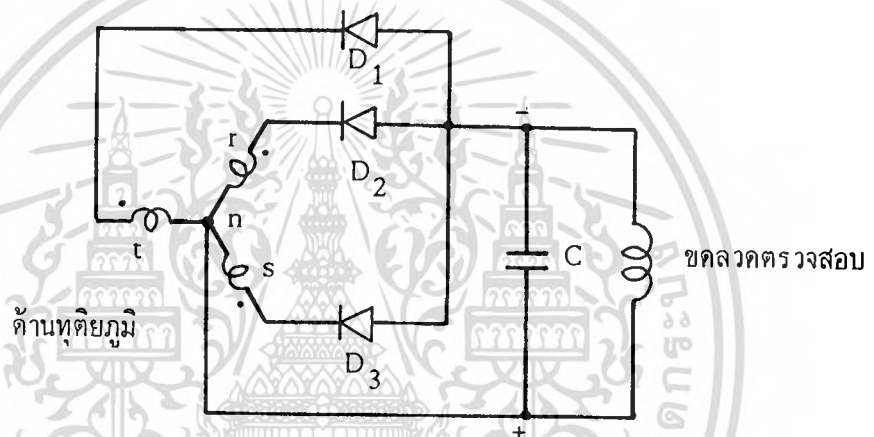
จากรูปที่ 6.19 แสดงแรงดันไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด R_1 ชนิดของโหลด จะไม่มีผลต่อช่วงการนำกระแสเหล่านี้ ขณะที่ไดโอดนำกระแสแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด จะมีค่าประมาณ 1 โวลต์ ไดโอดจะไม่นำกระแสเป็นมุม 240° เมื่อ R_1 กำลังนำกระแส คือ ช่วงมุม 60° ถึง 180° แต่ในช่วงระหว่าง 180° ถึง 300° ไดโอด S_1 กำลังนำกระแสชั่วคาบของ R_1 จึงต่อกับเฟส S และชั่วคาบของ R_1 ต่อกับเฟส R V_{RS} เป็นลบ ไดโอด R_1 จะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและช่วงระหว่างมุม 300° ถึง 360° แรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด R_1 คือ V_{TR} จะเป็นลบ ทำให้ไดโอด R_1 ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพราะว่า ไดโอด T_1 กำลังนำกระแส



รูปที่ 6.19 แรงดันไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด R_1

6.4.2 การออกแบบ

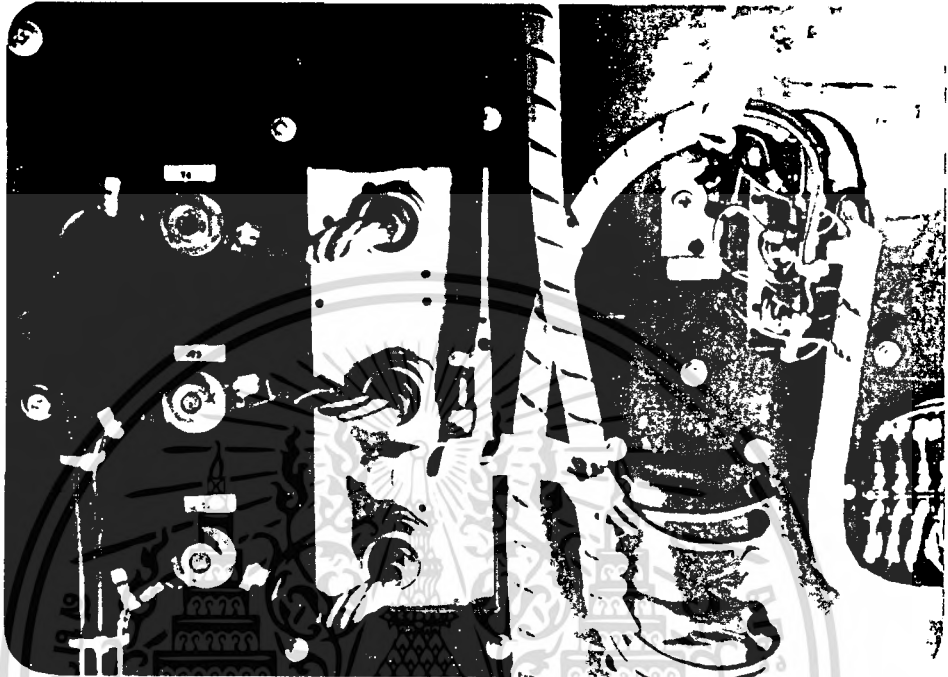
ในวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น จะใช้ไดโอด 3 ตัว ต่ออนุกรมกับขดลวดด้านหุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ดังแสดงในรูปที่ 6.20 จากลักษณะของไดโอด ในทางปฏิบัติ เพื่อสะดวกในการติดตั้ง จะต่อขั้ววาโนคของไดโอดทุกตัวเข้าด้วยกันแทนขั้วคาโทด ซึ่งช่วงการทำงานของไดโอดแต่ละตัวก็จะเปลี่ยนไป 180° เท่านั้น



รูปที่ 6.20 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่น

D_1, D_2, D_3 : ไดโอด SIL 0.1.06

C : ฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์ 40,000 μF 50V 85°C



รูปที่ 6. 21 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบครึ่งช่วงคลื่นต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดสอบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก

7.1 บทนำ

การทดสอบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็ก เป็นการทดสอบการทำงานทั้งหมดของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เริ่มตั้งแต่การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก โดยพิจารณาถึงการปรับค่าแอมป์-รอบของขดลวดตรวจสอบ , พิกัดของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ต่อจากนั้นเป็นการนำชิ้นงานที่เป็นแม่เหล็กไปตรวจสอบหารอยร้าว โดยใช้สารละลายที่มีผงสารแม่เหล็กชนิดเรืองแสงผสมอยู่ ชั้นตอนสุดท้าย คือ การล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน โดยพิจารณาถึงการลดค่าสนามแม่เหล็กสลับของขดลวดตรวจสอบลงจนเป็นศูนย์

7.2 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมกำลัง

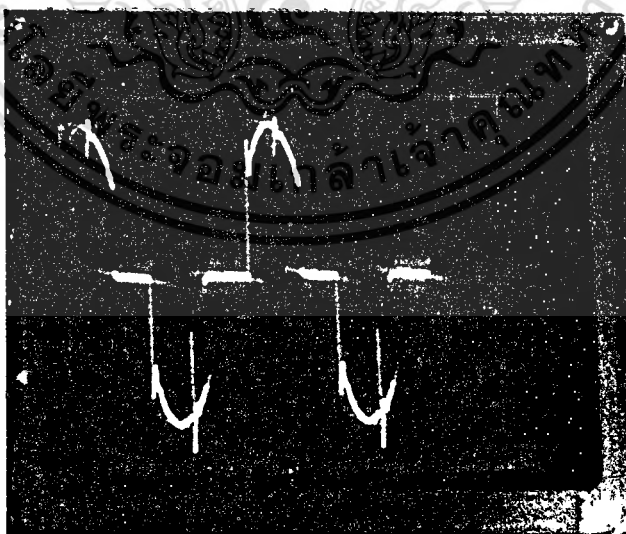
จากรูปที่ 6.2 ส่วนต่าง ๆ บนหน้าปัดของเครื่องต้นแบบมีหน้าที่ดังนี้	
SELECTOR	มีหน้าที่ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กับเครื่อง
CONTROL	มีหน้าที่ปรับค่าแอมป์-รอบ ที่จ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์
MAGNETIZATION	มีหน้าที่ทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก โดยปรับค่าแอมป์-รอบจากชุด CONTROL และมีชุดหน่วงเวลาที่สามารถกำหนดเวลาการทำงานได้ ตั้งแต่ 0-30 วินาที
DEMAGNETIZATION	มีหน้าที่ล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน โดยปรับค่าสนามแม่เหล็กสลับ จากชุด CONTROL ตั้งแต่ 100 เปอร์เซ็นต์ ลดลงจนถึง 0

ระบบป้องกันวงจรภาคกำลังประกอบด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์และโอเวอร์โวลทจรีเลย์ที่สวิทช์แม่เหล็กทุกตัว ขณะที่ส่วนวงจรการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กกำลังทำงาน วงจรการล้างอำนาจแม่เหล็กจะถูกตัด

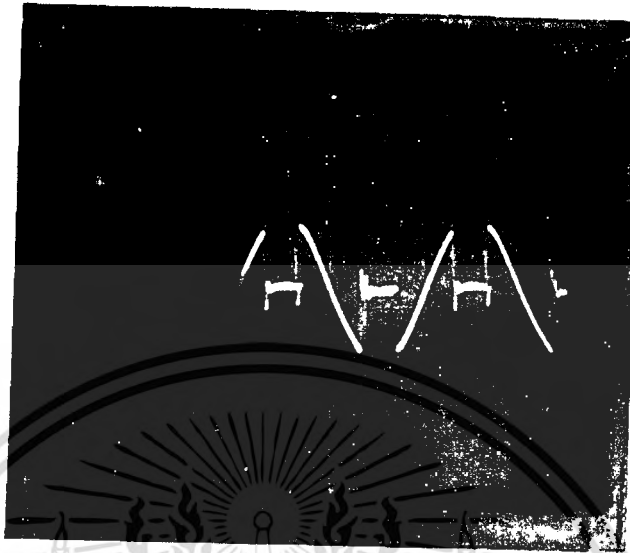
ออกจากวงจรภาคกำลัง (interlocked) ซึ่งเป็นการป้องกันการลัดวงจรของวงจรภาคกำลัง จากการทดสอบวงจรควบคุมภาคกำลังทั้งหมด พบว่าทำงานได้ดีตามที่ออกแบบไว้ทุกประการ

7.3 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.11 เมื่อนำไทรแอกมาต่อร่วมกันแบบสตาร์ โดยให้ MT2 ต่อร่วมกันที่จุดร่วมและวงจรที่จ่ายกระแสจุกชนวนให้กับเกทของไทรแอกจะแยกกันเป็นสามชุด ซึ่งแต่ละชุดจะมีเฟสต่างกัน 120° ทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งสามเฟส เนื่องจากการทำงานของเครื่องต้นแบบ มี 2 ลักษณะ คือ การทำขึ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก โดยผ่านวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟส และการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากขึ้นงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้าสาย ดังนั้นการออกแบบวงจรจุกชนวนไทรแอกที่ทำให้มุมนำกระแสของไทรแอกมีค่าไม่เกิน 180° จึงจำเป็นต้องมีสวิทช์ S เป็นตัวเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับทั้ง 2 กรณี จากการทดสอบวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมไทรแอกและคร่อมขดลวดตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 7.1 จะเห็นได้ว่ามุมนำกระแสของไทรแอกจะไม่เกิน 180°

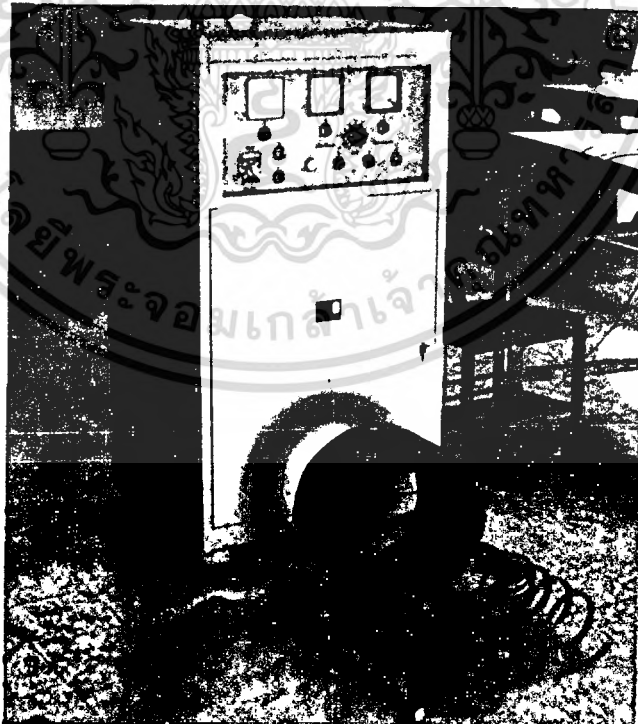


รูปที่ 7.1 ก) แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคร่อมไทรแอก



รูปที่ 7.1 ข) แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดตรวจสอบ

7.4 การทดสอบการทำงานให้เป็นแม่เหล็ก



รูปที่ 7.2 เครื่องต้นแบบและชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

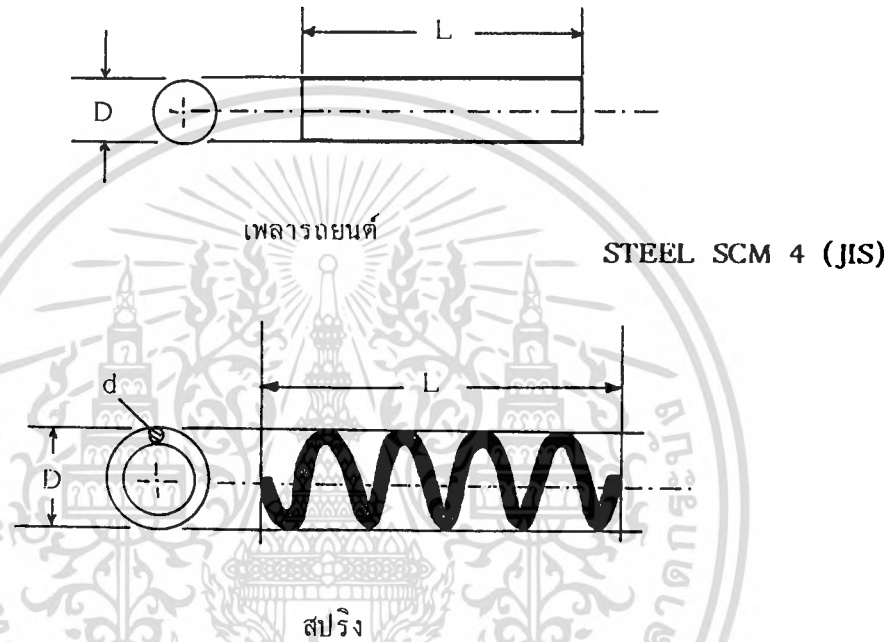
ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ เช่น เพลลา,สปริง ดังแสดงในรูปที่ 7.2 ขั้นตอนการตรวจสอบ รอยร้าวของชิ้นงาน มีดังต่อไปนี้

- 1) ทำความสะอาดผิวของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ทรายฝุ่นละออง,จารบี,น้ำมันหรือสนิม
- 2) นำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบวางให้แนวแกนของชิ้นงานขนานกับแนวแกนของชดลวดตรวจสอบ โดยวางให้ชิดกับผนังด้านใน (คูภาคผนวกที่ 8)
- 3) ปรับค่าแอมป์-รอบ ให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน โดยกำหนดตามตารางที่ 3.1
- 4) จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชดลวดตรวจสอบ กำหนดเวลาในการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานและลักษณะของชิ้นงาน
- 5) นำชิ้นงานที่เป็นแม่เหล็กออกจากชดลวดตรวจสอบ จากนั้นรดด้วยสารละลายที่ผสมผงสารแม่เหล็ก ส่องด้วยแสงที่ทำให้เรืองแสง ตรวจสอบหารอยร้าวต่าง ๆ ซึ่งถ้ามีรอยร้าวเกิดขึ้นจะปรากฏเป็นเส้นขยุกขยิก ตามลักษณะรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 7.4 การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กได้ผลการทดสอบตารางที่ 7.1

กระแสไฟฟ้าค่านปรุมภูมิ			กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เป็นแม่เหล็ก	แอมป์-รอบ
I_R	I_S	I_T	I_{DC}	A.T
1.6	1.2	1	40	4600
2.0	1.6	1.4	50	5750
2.6	1.8	1.6	60	6900
3	2.3	1.8	70	8050
3.4	3.2	2	80	9200
3.8	3.7	2.3	90	10350
4.2	4.0	2.6	100	11500

ตารางที่ 7.1

ขนาดพิกัดแอมป์-รอบของชดลวดตรวจสอบ สำหรับการทำให้เป็นแม่เหล็ก จากการทดสอบชิ้นงานลักษณะต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7.3 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 7.2 และ 7.3



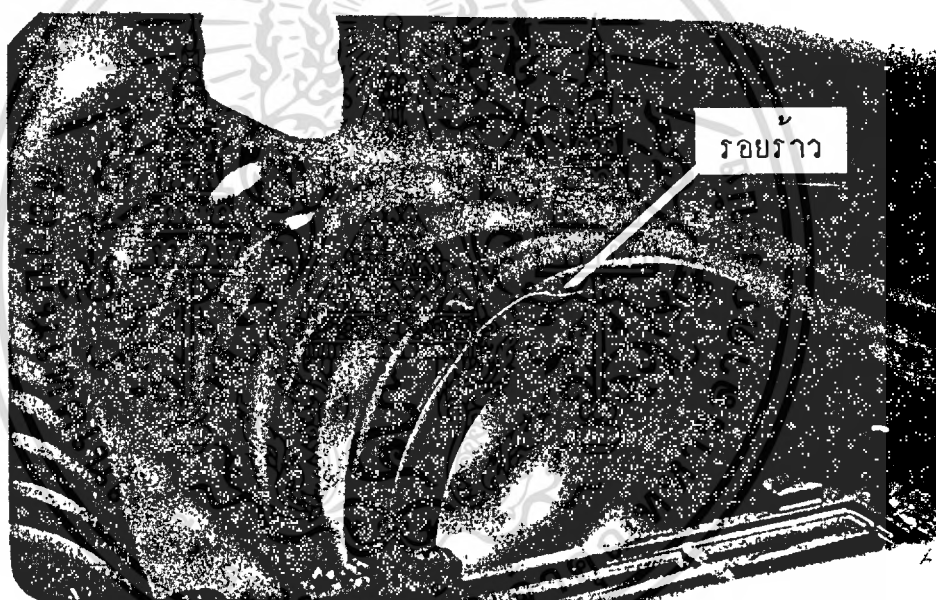
รูปที่ 7.3 แสดงขนาดของชิ้นงานลักษณะต่าง ๆ

เฟลารยนต์		แอมป์-รอบ (A.T)	เวลา (วินาที)
เส้นผ่าศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ความยาว (เซนติเมตร)		
2	45	6000	5
3	30	8000	8

ตารางที่ 7.2

สปริง			แอมป์-รอบ (A.T)	เวลา (วินาที)
d (เซนติเมตร)	D (เซนติเมตร)	ความยาว (เซนติเมตร)		
1	10	30	8000	10
1	15	30	10000	10

ตารางที่ 7.3



รูปที่ 7.4 แสดงลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้น

7.5 การทดสอบการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน

หลังจากชิ้นงานที่เป็นแม่เหล็กถูกตรวจสอบรอยร้าวแล้ว จำเป็นต้องมีการล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงานโดยนำชิ้นงานมาวางในลักษณะเดียวกันกับการทำให้เป็นแม่เหล็ก กำหนดค่าของสนามแม่เหล็กสลับที่ค่ามากที่สุด จากนั้นทำการลดค่าสนามแม่เหล็กสลับลงเรื่อย ๆ โดยการลดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดตรวจสอบ โดยวิธีปรับที่ชุด CONTROL ชิ้นงานที่ผ่านการล้างอำนาจแม่เหล็กนี้ จะมีค่าสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มีผลต่อการนำชิ้นงานไปใช้งานต่าง ๆ ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 7.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ			กระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กสลับ	แอมป์-รอบ
I_R	I_S	I_T	I_{AC}	A.T
3.5	1.0	0.8	15	1725
5.8	1.8	1.4	25	2875
9.8	6.8	2.2	35	4025
13.5	10	4.8	45	5175

ตารางที่ 7.4

จากตารางที่ 7.2 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสด้านปฐมภูมิ จะเกิดการไม่สมดุล เนื่องจาก การล้าอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงานนั้นใช้แรงดันไฟฟ้าสาย ทางด้านทุติยภูมิ ทำให้เกิดลักษณะไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบซิกแซก/สตาร์นี้ สามารถช่วยทำให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีลักษณะสมดุลขึ้นกว่าการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าลักษณะอื่น ขนาดฟลักซ์แอมป์-รอบของการล้าอำนาจแม่เหล็กโดยกำหนดให้มีค่าประมาณ $\frac{1}{\sqrt{2}}$ เท่าของฟลักซ์แอมป์-รอบของการทำให้เป็นแม่เหล็ก(ดูภาคผนวกที่ 7)

เพลารถยนต์	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ความยาว (เซนติเมตร)	แอมป์-รอบ (A.T)	เวลา (วินาที)
	2	45	4000	10
3	30	5000	10	

สปริง	d (เซนติเมตร)	D (เซนติเมตร)	ความยาว (เซนติเมตร)	แอมป์-รอบ (A.T)	เวลา (วินาที)
	1	10	30	5000	10
1	15	30	6000	10	

ตารางที่ 7.5

บทที่ 8

บทสรุป

โรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร และยานพาหนะที่ทำด้วยเหล็ก เช่น สปริง, แหนบรดยนต์ และ เฟลาต่าง ๆ จะเกิดปัญหาในด้านการควบคุมคุณภาพ เมื่อนำชิ้นงานที่ผลิตไปใช้งาน เช่น เกิดการแตกหักก่อนกำหนด ทำให้ความเชื่อถือในผลิตภัณฑ์นั้นลดลง โดยที่ทางโรงงานผู้ผลิตมีกรรมวิธีต่าง ๆ ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน ทั้งด้านการรับแรงบิด, แรงอัด ซึ่งน่าจะเป็นการตรวจสอบคุณภาพที่พอเพียงแล้ว แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งานมีผลเนื่องมาจากชิ้นงานนั้นมีรอยร้าวอยู่ภายใน ซึ่งอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตเหล็กที่เป็นวัตถุดิบ รอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถตรวจสอบได้จากกรรมวิธีที่กล่าวมาแล้ว จึงจำเป็นต้องมีเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็ก สำหรับตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ในขบวนการผลิตเครื่องตรวจสอบรอยร้าวนี้ สามารถบอกได้ถึงลักษณะของรอยร้าว ทั้งขนาดและตำแหน่ง ซึ่งอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานใดมีรอยร้าวเกิดขึ้น ไม่ว่าจะขนาดเล็กหรือใหญ่ อยู่ลึกลงไปชิ้นงานหรืออยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ชิ้นงานนั้นก็ขาดคุณสมบัติในการรับแรงลักษณะต่าง ๆ ไม่สมควรที่จะนำออกไปใช้งาน ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายต่อผู้ใช้ได้

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็ก โดยทั่วไปใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กผ่านบริเวณที่มีรอยร้าวอยู่บริเวณนั้นจะมีค่าความต้านทานแม่เหล็กมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดการเบี่ยงเบนออกจากแนวปกติ ทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนเบี่ยงเบนออกมาที่ผิวของชิ้นงาน เมื่อนำผงสารแม่เหล็กมาโรยบนผิวของสารแม่เหล็ก ผงสารแม่เหล็กจะถูกดูดโดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เบี่ยงเบนนี้ ทำให้ผงสารแม่เหล็กติดอยู่บนบริเวณที่มีรอยร้าว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตำแหน่ง, ขนาด และ ลักษณะของรอยร้าวได้ การตรวจสอบลักษณะนี้ สามารถตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานได้ก็ มีความเชื่อถือได้พอสมควร กรณีที่ชิ้นงานบางลักษณะไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีนี้ เช่น ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มาก ชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงตรงกลาง ซึ่งไม่สามารถมองเห็นตำแหน่งรอยร้าวที่ผนังด้านในได้ จะมีวิธีการตรวจสอบอีกลักษณะหนึ่ง คือ การเอ็กซ์-เรย์ชิ้นงาน โดยใช้รังสีซึ่งสามารถมองเห็นรอยร้าวที่อยู่ภายในชิ้นงานได้อย่างชัดเจน แต่มีราคาสูงมาก วิธีการนี้เหมาะสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่มีหน้าที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก เช่น ปีกเครื่องบิน, ลากลับปืนใหญ่

การออกแบบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็ก โดยใช้ผงสารแม่เหล็กที่พัฒนาสร้างขึ้นนี้ จะเน้นถึงหลักการในการผลิตอุปกรณ์ขึ้นมาใช้เองภายในประเทศ โดยมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่ดีพอสมควร เสียค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำกว่าเครื่องตรวจสอบรอยร้าวที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศมาก โดยสามารถที่จะออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานจริงในประเทศ และที่สำคัญที่สุดเป็นการพัฒนาทางด้านการวิจัยของประเทศ ให้มีความก้าวหน้า ผลิตอุปกรณ์ขึ้นมาใช้เองภายในประเทศอันเป็นการลดการขาดดุลการค้ากับต่างประเทศอีกด้วย

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็กต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ ทำการทดสอบกับชิ้นงานจริงที่ผลิตออกจากโรงงานผลิตสปริง, แท่น และ เพลารถยนต์ ซึ่งเป็นโรงงานที่ผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้ให้กับโรงงานรถยนต์หลายบริษัท ดังนั้นการทดสอบจึงสามารถกระทำได้อย่างเต็มที่ และใช้งานจริงตามที่ต้องการ และนำไปติดตั้งในโรงงานใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่จะนำออกไปใช้งาน จากการทดสอบเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ พบว่ามีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

- 1) สามารถขยายขนาดพิกัดของเครื่องได้ง่าย ทั้งนี้ เพราะว่าอุปกรณ์ส่วนประกอบของเครื่องมีขนาดพิกัดการทำงานสูง และหาได้ง่ายโดยทั่วไป
- 2) มีความแน่นอนในการทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนวงจรภาคกำลังใช้สวิทซ์แม่เหล็กเป็นส่วนทำงาน ซึ่งมีความแน่นอน
- 3) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบชุกแซก/สตาร์ออกแบบไว้สำหรับกรณีที่มีโหลดไม่สมดุลย์ ซึ่งเป็นการออกแบบที่ประหยัด สามารถใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตัวเดียว สำหรับการทำงาน 2 ลักษณะ ดังที่ได้อธิบายมาแล้ว
- 4) การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าใช้หลักการควบคุมเฟส (AC phase control) ซึ่งเป็นวงจรที่เชื่อถือได้ และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ การระบายความร้อนของไทรแอก ทำได้โดยใช้แผ่นระบายความร้อน (heat sink) ที่มีขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ค่าบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากส่วนที่ต้องทำการบำรุงรักษาส่วนใหญ่ คือ การตรวจสอบหน้าคอนแทคของสวิตช์แม่เหล็ก และสามารถซ่อมได้ง่าย หรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เมื่อเกิดการชำรุดเสียหาย
- 6) มีความคงทนในการใช้งาน เพราะส่วนต้นกำลัง คือ หม้อแปลงไฟฟ้า และส่วนตัดต่อวงจรภาคกำลัง คือ สวิตช์แม่เหล็ก สามารถทนต่อการกระชาก และการเกินพิกัดของกระแสได้นาน
- 7) มีราคาถูกกว่าเครื่องตรวจสอบรอยรั่วลักษณะเดียวกัน ที่มีอยู่ทั่วไป เนื่องจากสามารถออกแบบส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยใช้สารกึ่งตัวนำ และส่วนต้นกำลังใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตัวเดียว สำหรับการทำงาน 2 ลักษณะ และประหยัดค่าใช้จ่ายเพราะใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ
- 8) ประสิทธิภาพของระบบจะสูง ทั้งนี้เพราะส่วนสูญเสียในระบบส่วนใหญ่อยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าต่ำ และในขดลวดตรวจสอบ ซึ่งออกแบบให้ใช้กระแสไฟฟ้าไม่สูงมากนัก

ข้อเสีย

- 1) ต้องมันตรวจสอบ และทำความสะอาดหน้าคอนแทคของสวิตช์แม่เหล็ก และที่หน้าสัมผัสของความต้านทานที่ปรับค่าได้
- 2) ไม่สามารถตรวจสอบชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มาก และชิ้นงานที่มีลักษณะกลวง
- 3) ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า มีลักษณะผิดเพี้ยน เพราะใช้วิธีควบคุมเฟส

คุณสมบัติของเครื่องตรวจสอบรอยร้าวเหล็กโดยใช้ผงสารแม่เหล็กค้นแบบ

- ขนาดพิกัดของเครื่อง - 3 เฟส 380 โวลต์ 6KVA 10A
- ระบบไฟเข้า - 3 เฟส 380 โวลต์ 4 สาย 50 เฮิพส์
- ระบบไฟออก - ปรับได้ตั้งแต่ 0-30 โวลต์ และ 0-50 โวลต์
- ระบบป้องกัน - มีโอเวอร์โวลครีเลย์ป้องกันที่สวิตช์แม่เหล็กทุกตัว และมีเซอร์กิตเบรกเกอร์
- ลักษณะชิ้นงาน - สปริง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสปริงไม่เกิน 15 เซนติเมตร
- เพลลา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 5 เซนติเมตร

เอกสารอ้างอิง

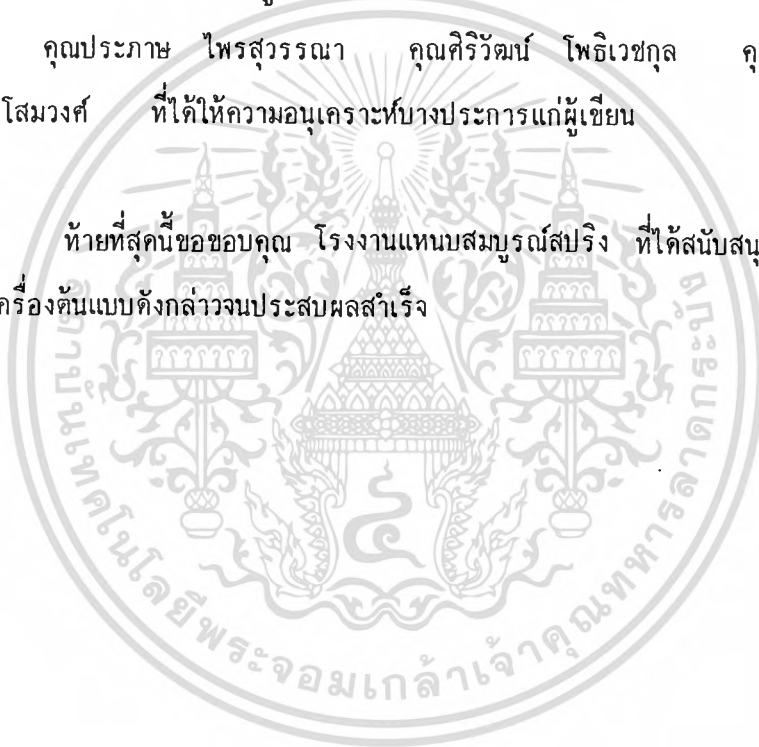
- 1) H.J.Zeiger and G.W.Pratt, "Magnetic Interactions in Solids" Oxford, Clarendon Press, 1973.
- 2) J.E.Gould, "Premanent Magnets" Proc.IEE, Vol.125, No.11R, Nov. 1978, IEE Reviews, PP.1137-1150.
- 3) J.J.Becker, "Magnetism and Magnetic Materials" New York, American Institute of Physics, 1976.
- 4) Denshijiki Industry CO.LTD. "Magnedenshi Flaw Detector Model ER-96"
- 5) J.B.Gibbs, "Transformer Principles and Practice" New York, Toronto, London, 1950.
- 6) Nippon Steet Corporation, "Orientcore Orientcore-Hi-B" Cat. No. EXE 320, Sep. 1975.
- 7) General Electric Company, "SCR Manual Sixth Edition" 1979.
- 8) D.Finney, "The Power Thyristor and its Applications" Mc. Graw-Hill Book Company, 1980.

กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ

รองศาสตราจารย์ ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ทัศน ฤกษ์จินดา
 ที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการรู้ตลอดจนกำลังใจตั้งแต่เริ่มต้น และขอขอบคุณ คุณวีระศักดิ์
 วงศ์วิวัติ คุณประภาส ไพรสวรรณา คุณศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล คุณพิชิต ล้ายอง
 คุณสุงษ์ โสมวงศ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์บางประการแก่ผู้เขียน

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ โรงงานแหวนสมบุรณ์สปริง ที่ได้สนับสนุนด้านทุนการวิจัย
 และพัฒนาเครื่องต้นแบบดังกล่าวจนประสบความสำเร็จ





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.1

ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง

ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับลวดตัวนำกลม
หาได้จากสมการ (ITT, 1968)

$$R_{ac} = (0.096 d\sqrt{f} + 0.26) R_{dc}$$

d : ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ หน่วย นิ้ว

f : ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ หน่วย เฮิรตซ์

สำหรับ $d\sqrt{f}$ มีค่ามากกว่า 10 สมการนี้จะผิดพลาดไม่เกิน 2-3 %

$d\sqrt{f}$ มีค่าน้อยกว่า 10 ค่าความต้านทาน ac ที่แท้จริงจะมากกว่า
ค่าที่ได้จากสมการ

ถ้าสารที่ทำเป็นตัวนำไม่ใช่ทองแดง เหมแรกของสมการจะคูณด้วยค่า

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\rho_r}}$$

ซึ่งค่า μ_r คือค่าซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสาร

ρ_r คือค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์ของสารเทียบกับทองแดง

ผ.2

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

ลักษณะการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส สามารถทำได้โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวสามตัวมาต่อกันเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส หรือใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสในตัวเดียวกันเลย ถ้าพิจารณาค่าใช้จ่ายในการสร้างหม้อแปลงทั้ง 2 แบบ จะเห็นได้ว่าที่พิกัดเดียวกัน หม้อแปลงสามเฟสแบบใช้หม้อแปลงสามตัวมาต่อกันจะเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าแบบสามเฟสในตัวเดียวกันประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าด้วย โดยทั่ว ๆ ไปการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสจะพิจารณาถึงลักษณะการนำไปใช้งานที่เหมาะสม การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสมีอยู่หลายลักษณะดังนี้

1) การต่อแบบสตาร์/สตาร์ (Star/star)

การต่อหม้อแปลงสามเฟสแบบสตาร์/สตาร์ เป็นแบบที่ง่าย ๆ และประหยัดที่สุด เหมาะสำหรับหม้อแปลงสามเฟสขนาดเล็กที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังมีจำนวนรอบต่อเฟสและขนาดฉนวนน้อยที่สุดด้วย นอกจากนี้ยังอาจใช้เป็นไฟฟ้าสามเฟส 4 สาย ที่จุดรวม (neutral) ของทั้งสองด้านได้

2) การต่อแบบเดลต้า/เดลต้า (Delta/delta)

การต่อหม้อแปลงสามเฟสแบบเดลต้า/เดลต้า เป็นแบบที่ประหยัด เหมาะสำหรับหม้อแปลงสามเฟสขนาดใหญ่ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ โดยไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องฉนวนที่ใช้มากนัก ทั้งนี้ เพราะจำนวนรอบต่อเฟสเพิ่มขึ้น การต่อแบบนี้ทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างเฟสได้ง่าย แต่เนื่องจากทั้งสามเฟสต่อครบรอบกันหมดเป็นวงจร มีผลทำให้ฮาร์มอนิกที่ 3 ที่เกิดขึ้นหมดไป

3) การต่อแบบสตาร์/เดลต้า และ เดลต้า/สตาร์ (Star/delta, Delta/star)

การต่อหม้อแปลงสามเฟสแบบสตาร์/เดลต้า และ เดลต้า/สตาร์ เป็นการต่อแบบทั่ว ๆ ไปใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า การที่มีจุดรวมของการต่อแบบสตาร์ทำให้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ทั้งเฟสเดียวและสามเฟส รวมทั้งการต่อแบบเดลตานั้นช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ที่เกิดขึ้นได้ การต่อแบบสตาร์/เดลตานิยมใช้ในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อส่งไปตามสายส่ง เพื่อเป็นการประหยัดสายส่งจาก 4 สายเหลือเพียง 3 สายเท่านั้น ส่วนการต่อแบบเดลต้า/สตาร์นิยมใช้ในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งมาจ่ายกำลังให้กับโหลดทั้งเฟสเดียวและสามเฟสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การต่อแบบซิกแซก/สตาร์ (Zigzag/star)

การต่อเหล่านี้จะมีการต่อแบบซิกแซกร่วมอยู่ด้วย จากการที่มีการต่อภายในระหว่างเฟสด้วยกัน ทำให้ลดแรงดันไฟฟ้าของฮาร์โมนิกที่ 3 ลงไป ดังนั้นจึงสามารถใช้กับโหลดที่ไม่สมดุลได้ดี การต่อแบบซิกแซกนี้ จะใช้ต่อสำหรับหม้อแปลงสามเฟสชนิดแรงเคลื่อนต่ำ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสของการต่อแบบซิกแซกนี้ประกอบด้วยครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเฟส (phase voltage) สองส่วนรวมกันตามเวกเตอร์ โดยที่แต่ละเฟสที่นำมาต่อกันนั้นมีเฟสต่างกันอยู่ 60° ดังนั้นจึงต้องเพิ่มจำนวนรอบขึ้นไปอีก 15 % เพื่อให้มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับการต่อแบบสตาร์ จึงทำให้หม้อแปลงสามเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าปกติ การต่อแบบซิกแซก/สตาร์ จะใช้ก็ต่อเมื่อเห็นว่าการแต่แบบเคลตันนั้นไม่มีความแข็งแรงต่อแรงทางกลต่าง ๆ ได้ดีพอตามความต้องการของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นแบบแรงดันไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังเหมาะสำหรับงานที่ต้องการนำไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (rectifier)

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสเมื่อมีโหลดไม่สมดุล

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่ต้องการสำหรับการตรวจสอบรอยรั่วโลหะ เพื่อช่วยให้กับขั้วทดสอบทดสอบในกรณีที่ขดลวดทดสอบทำหน้าที่ล้างอำนาจแม่เหล็กออกจากชิ้นงาน โดยใช้ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ครบสามเฟส ซึ่งทำให้เกิดสภาพโหลดไม่สมดุลขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสในลักษณะต่าง ๆ เมื่อมีโหลดไม่สมดุลเกิดขึ้น ดังนี้

1) การต่อแบบสตาร์/สตาร์

กรณีที่โหลดทางด้านทุติยภูมิสมดุลกันทั้งสามเฟส กระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเท่ากันทั้งสามเฟส ในกรณีที่ด้านทุติยภูมิมีโหลดเพียงเฟสเดียวหรือสองเฟส จะมีผลทำให้เกิดกระแสไหลทางด้านปฐมภูมิเฉพาะในเฟสนั้น ๆ และจะทำให้เกิดกระแสไหลกลับไปในสายร่วม (neutral line) ด้วย ซึ่งเกิดความไม่สมดุลของกระแสทางปฐมภูมิขึ้น

2) การต่อแบบเคลตัน/สตาร์

กรณีที่โหลดทางด้านทุติยภูมิสมดุลกันทั้งสามเฟส กระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิของ

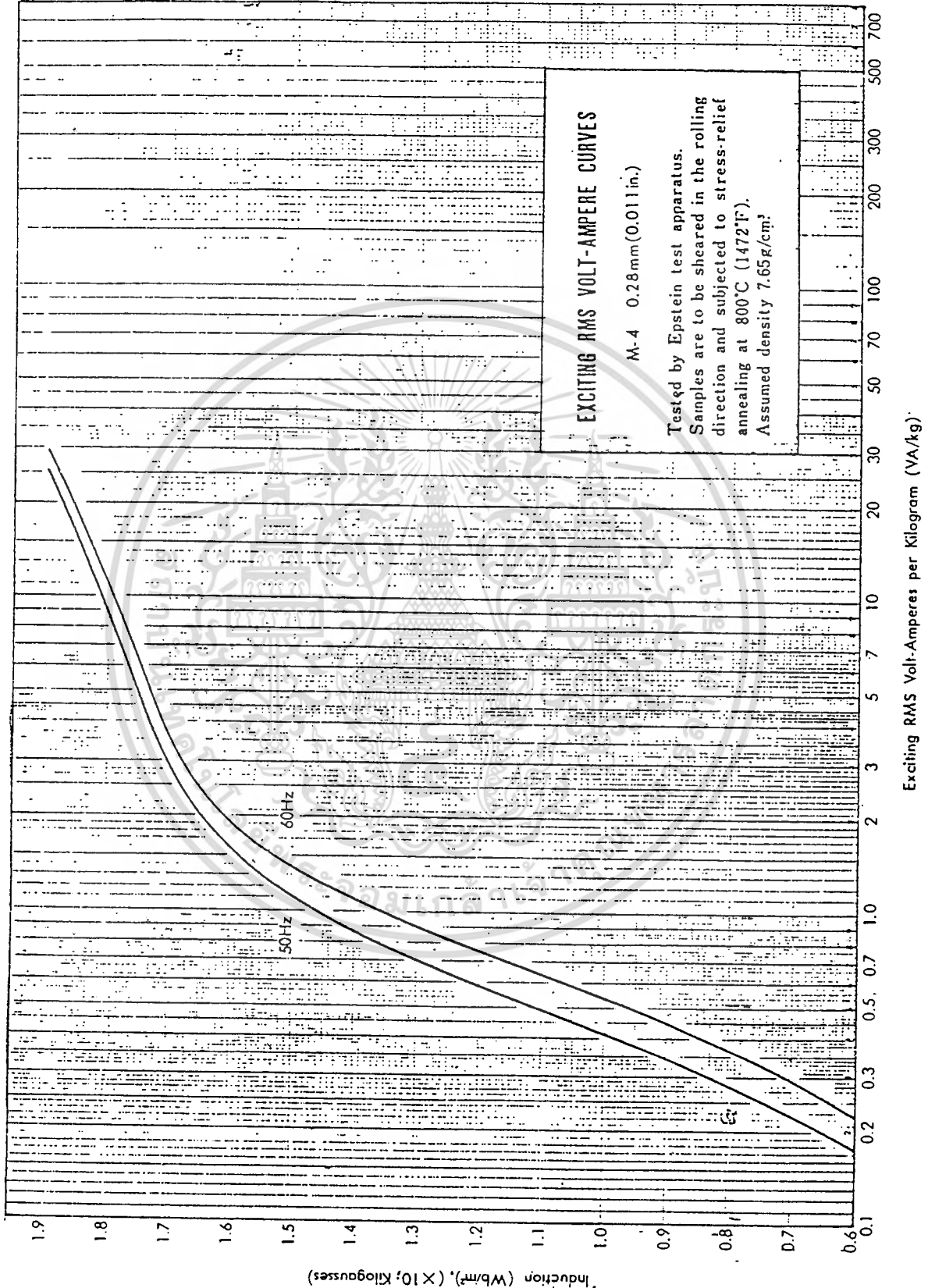
หม้อแปลงจะเท่ากันทั้งสามเฟส และกรณีที่ด้านทุติยภูมิมีโวลต์เพียงสองเฟสจะเกิดกระแสไหลทางด้านปฐมภูมิทุกเฟสโดยที่จะมีเฟสหนึ่งมีกระแสไหลมากขึ้น ทั้งนี้เพราะการต่อแบบเดลต้าไม่มีสายร่วมให้กระแสไหลผ่าน ลักษณะนี้จะมีความสมดุลย์ของกระแสดีพอสมควร

3) การต่อแบบซิกแซก/สตาร์

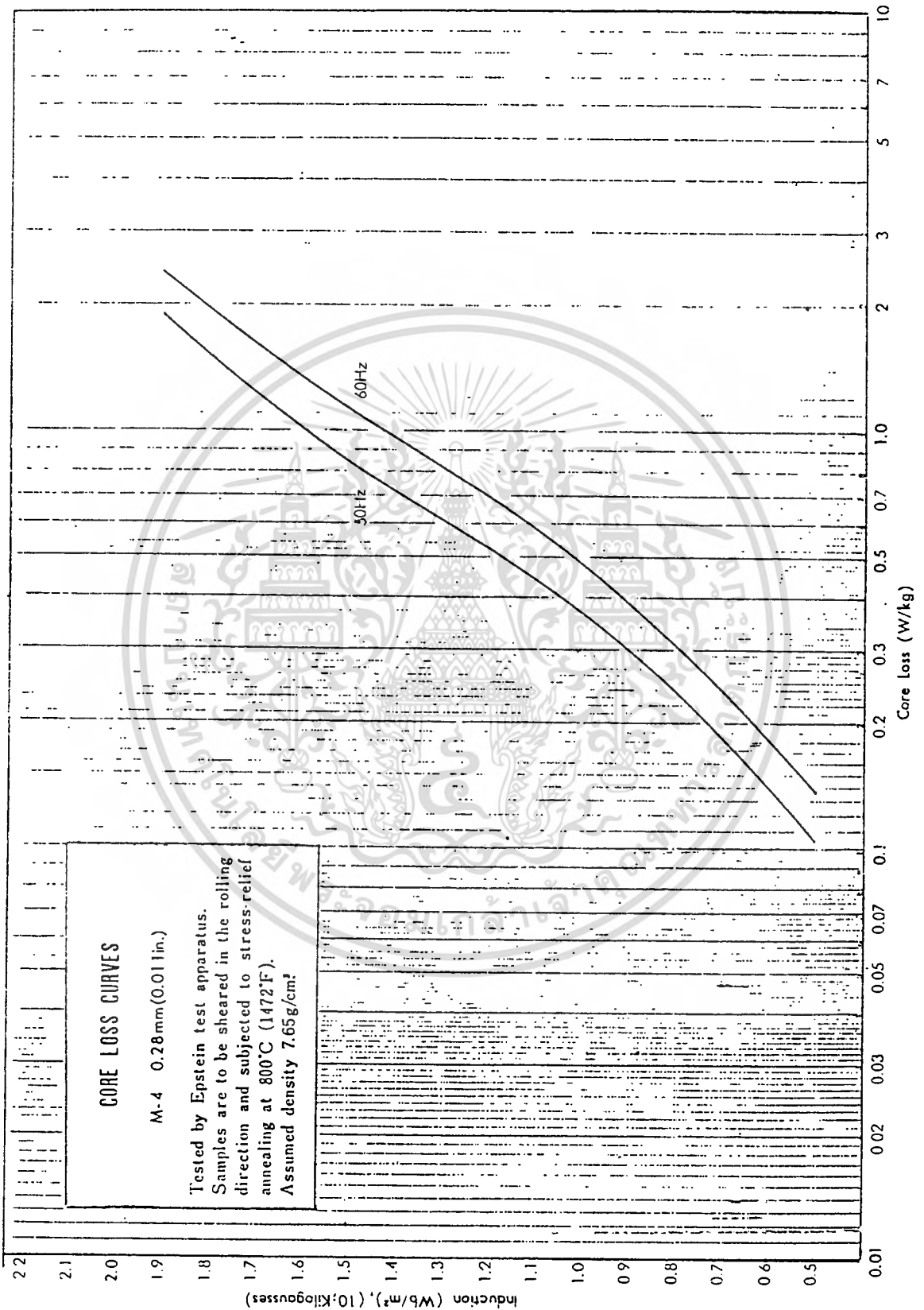
กรณีที่โวลต์ทางด้านทุติยภูมิสมดุลย์กันทั้งสามเฟส จะเกิดกระแสไหลทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่ากันทั้งสามเฟส และกรณีที่ทางด้านทุติยภูมิมีโวลต์เพียงสองเฟสจะเกิดกระแสไหลทางด้านปฐมภูมิทุกเฟสโดยที่กระแสที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก และไม่มีกระแสไหลกลับไปทางสายร่วมเลย ซึ่งลักษณะนี้จะมี ความสมดุลย์ของกระแสดีกว่าแบบเดลต้า/สตาร์



กราฟแสดงคุณสมบัติของแกนเหล็ก



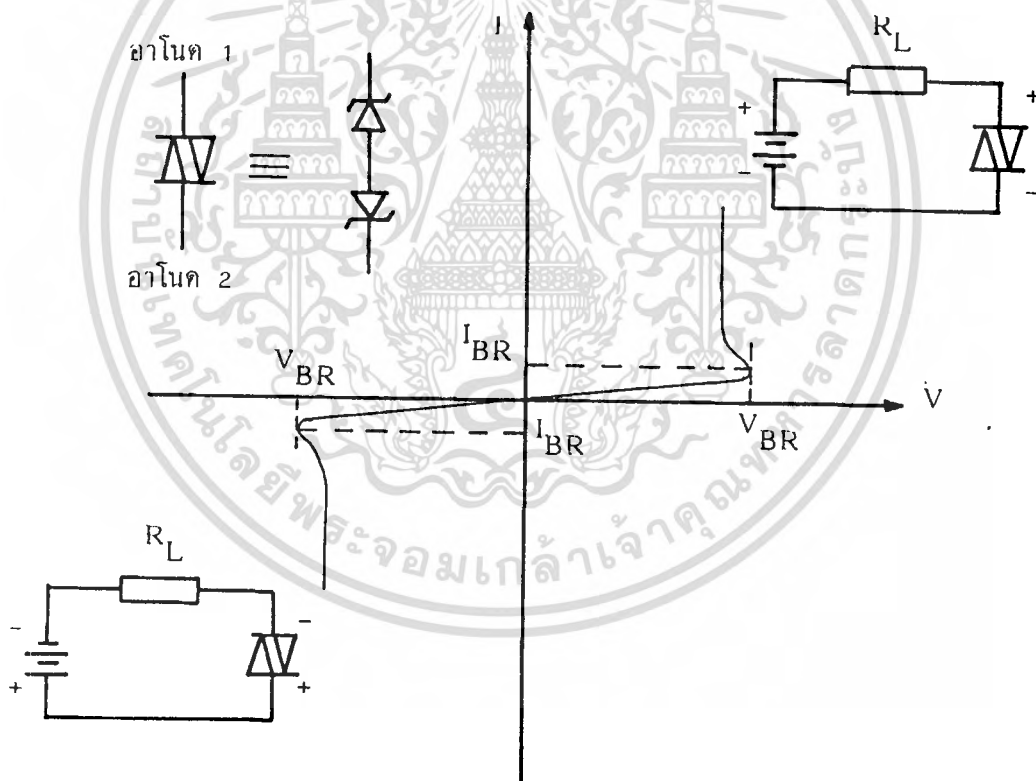
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผ.4

ไดแอค (diac)

สัญลักษณ์โดยทั่วไปของไดแอคแสดงดังในรูป ไดแอคมีคุณสมบัติเหมือนกับซีเนอร์ไดโอด 2 ตัว ต่อกลับด้านกัน แรงดันที่ชั้ววาโนด 1 เป็นบวกเมื่อเทียบกับชั้ววาโนด 2 หรือแรงดันที่ชั้ววาโนด 2 เป็นบวกเมื่อเทียบกับชั้ววาโนด 1 ถ้าแรงดันมากกว่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ไดแอคจะนำกระแส



opto coupler



OPTICALLY ISOLATED TRIAC DRIVERS

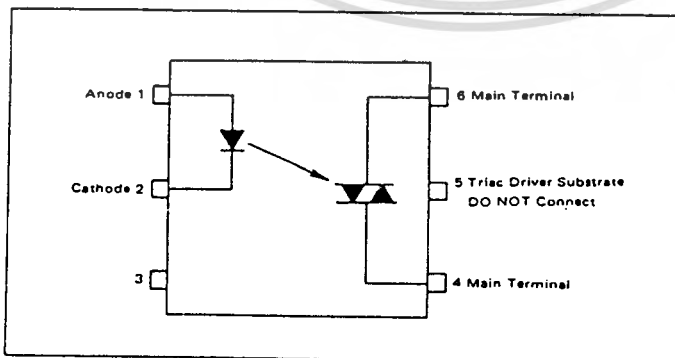
These devices consist of gallium-arsenide infrared-emitting diodes, optically coupled to silicon bilateral switches. They are designed for applications requiring isolated triac triggering.

- UL Recognized File Number E54915
- Output Driver Designed for 220 Vac Line
- V_{ISO} Isolation Voltage of 7500 V Peak
- Standard 6-Pin Plastic DIP

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
INFRARED EMITTING DIODE MAXIMUM RATINGS			
Reverse Voltage	V_R	3.0	Volts
Forward Current - Continuous	I_F	50	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Negligible Power in Triac Driver Derate above 25°C	P_D	100	mW
		1.33	mW/ $^\circ\text{C}$
OUTPUT DRIVER MAXIMUM RATINGS			
Off-State Output Terminal Voltage	V_{ORM}	400	Volts
On-State RMS Current $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Full Cycle, 50 to 60 Hz) $T_A = 70^\circ\text{C}$	$I_T(\text{RMS})$	100 50	mA
Peak Nonrepetitive Surge Current (PW = 10 ms, DC = 10%)	I_{TSM}	1.2	A
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	300	mW
		4.0	mW/ $^\circ\text{C}$
TOTAL DEVICE MAXIMUM RATINGS			
Isolation Surge Voltage (1) (Peak ac Voltage, 60 Hz, 5 Second Duration)	V_{ISO}	7500	Vac
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	330	mW
		4.4	mW/ $^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	T_J	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Ambient Operating Temperature Range	T_A	-40 to +70	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (10 s)	-	260	$^\circ\text{C}$

(1) Isolation Surge Voltage, V_{ISO} , is an internal device dielectric breakdown rating.

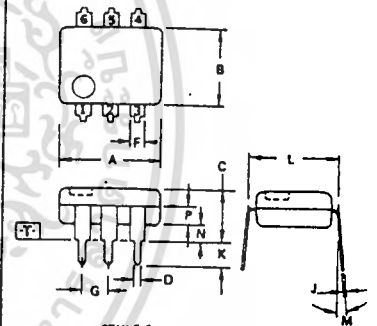
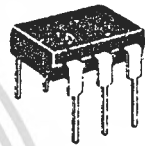


**MOC3020
MOC3021
MOC3022
MOC3023**

OPTO
COUPLER/ISOLATOR

PHOTO TRIAC DRIVER
OUTPUT

400 VOLTS



STYLE 6:
PIN 1. ANODE
2. CATHODE
3. NC
4. MAIN TERMINAL
5. SUBSTRATE
6. MAIN TERMINAL

NOTES:

- DIMENSIONS A AND B ARE DATUMS.
- \square IS SEATING PLANE.
- POSITIONAL TOLERANCES FOR LEADS:
 $\oplus \ominus 0.13 (0.005) \text{ T } | \text{ A } \oplus \ominus \text{ R } \oplus$
- DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
- DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5, 1973.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	8.13	8.89	0.320	0.350
B	6.10	6.60	0.240	0.260
C	2.92	3.08	0.115	0.200
D	0.41	0.51	0.016	0.020
F	1.02	1.78	0.040	0.070
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
J	0.20	0.30	0.008	0.012
K	2.54	3.81	0.100	0.150
L	2.62 BSC		0.300 BSC	
M	00	150	00	150
N	0.38	2.54	0.015	0.100
P	1.27	2.03	0.050	0.080

* CASE 730A-01

MOC3020, MOC3021, MOC3022, MOC3023

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
LED CHARACTERISTICS					
Reverse Leakage Current (V _R = 3.0 V)	I _R		0.05	100	μA
Forward Voltage (I _F = 10 mA)	V _F	-	1.2	1.5	Volts
DETECTOR CHARACTERISTICS (I_F = 0 unless otherwise noted)					
Peak Blocking Current, Either Direction (Rated V _{DRM} , Note 1)	I _{DRM}	-	10	100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction (I _{TM} = 100 mA Peak)	V _{TM}		2.5	3.0	Volts
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage, T _A = 85°C	dv/dt		12	-	V/μs
COUPLED CHARACTERISTICS					
LED Trigger Current, Current Required to Latch Output (Main Terminal Voltage = 3.0 V, Note 2)	I _{FT}		15	30	mA
	MOC3020	-	8.0	15	
	MOC3021	-	-	10	
	MOC3022	-	-	5.0	
	MOC3023	-	-	-	
Holding Current, Either Direction	I _H	-	100	-	μA

- Note 1. Test voltage must be applied within dv/dt rating.
- Note 2. All devices are guaranteed to trigger at an I_F value less than or equal to max I_{FT}.

TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS
T_A = 25°C

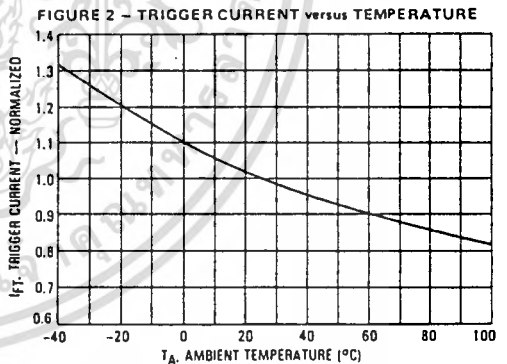
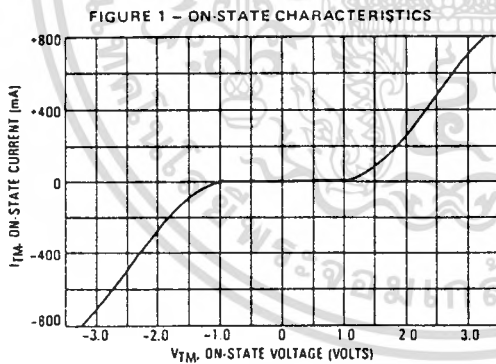
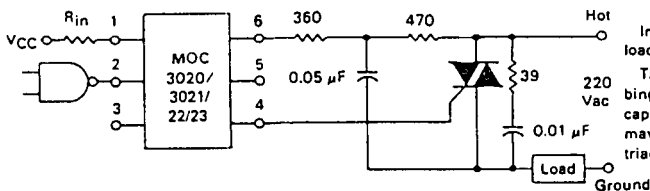


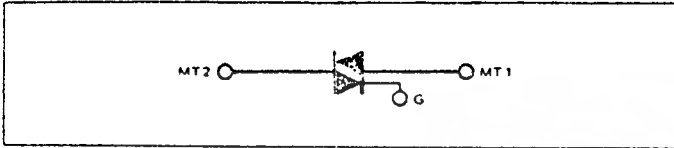
FIGURE 3 - TYPICAL APPLICATION CIRCUIT



In this circuit the "hot" side of the line is switched and the load connected to the cold or ground side.
The 39 ohm resistor and 0.01 μF capacitor are for snubbing of the triac, and the 470 ohm resistor and 0.05 μF capacitor are for snubbing the coupler. These components may or may not be necessary depending upon the particular triac and load used.

Additional information on the use of optically coupled triac drivers is available in Application Note AN-780A.

ไทรแอก
SC260
SC260()3
SC261



TRIACS

**25 AMPERES RMS
200-600 VOLTS**

BIDIRECTIONAL TRIODE THYRISTORS

... designed primarily for industrial and military applications for the control of ac loads in applications such as light dimmers, power supplies, heating controls, motor controls, welding equipment and power switching systems; or wherever full-wave, silicon gate controlled solid state devices are needed.

- All Diffused and Glass Passivated Junctions for Greater Stability
- Pressfit, Stud and Isolated Stud Packages
- Gate Triggering Guaranteed In All 3 Quadrants

SC261

CASE 31041

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Repetitive Peak Off-State Voltage $T_C = -40^{\circ}\text{C to } +115^{\circ}\text{C}$ SC260B, SC260B3, SC261B SC260D, SC260D3, SC261D SC260E, SC260E3, SC261E SC260M, SC260M3, SC261M	V_{ORM}	200 400 500 600	Volts
RMS On-State Current	$I_T(RMS)$	25	Amp
Peak Non-Repetitive Surge Current (One Cycle, 60 Hz)	I_{TSM}	250	Amp
Circuit Fusing Considerations	I^2t	150 260	A^2s
Peak Gate Power (Pulse Width = 10 μs)	P_{GM}	10	Watts
Average Gate Power	$P_{G(AV)}$	0.5	Watt
Peak Gate Current	I_{GM}	2	Amp
Operating Junction Temperature Range	T_J	-40 to +115	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +125	$^{\circ}\text{C}$
Stud Torque	-	30	in. lb.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case SC260, SC261 SC260()3	$R_{\theta JC}$	1.8 1.95	$^{\circ}\text{C/W}$

SC260

CASE 26322

SC260()3

CASE 31101

This is advance information and specifications are subject to change without notice.

SC260, SC260()3, SC261

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

($T_C = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted. Values apply for either polarity of Main Terminal 2 characteristics referenced to Main Terminal 1.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Peak Off-State Current $V_D = \text{Rated } V_{DRM} = \text{Peak Off-State Voltage,}$ Gate Open-Circuited $T_C = +25^\circ\text{C}$ $T_C = +115^\circ\text{C}$	I_{DRM}	-	-	0.2 1	mA
Peak On-State Voltage $I_{TM} = 35 \text{ A Peak, Pulse Width} = 1 \text{ ms, Duty Cycle} < 2\%.$	V_{TM}	-	-	1.58	Volts
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage Rated V_{DRM} , Gate Open-Circuited, Exponential Waveform $T_C = +115^\circ\text{C}$	dv/dt	50	-	-	Volts/ μs
Critical Rate of Rise of Commutating Off-State Voltage $I_T(\text{RMS}) = \text{Rated RMS On State Current}$ $V_{DRM} = \text{Rated Peak Off-State Voltage,}$ Gate Open-Circuited, Commutating $di/dt = 13.5 \text{ A/ms,}$ $T_C = +80^\circ\text{C}$	$dv/dt(c)$	5	-	-	Volts/ μs
DC Gate Trigger Current $V_D = 12 \text{ Vdc}$ MT2 (+), Gate (-); MT2 (-), Gate (+) $R_L = 100 \text{ Ohms}$ MT2 (+), Gate (-); $R_L = 50 \text{ Ohms}$	I_{GT}	-	-	50 50	mA _{dc}
DC Gate Trigger Current $V_D = 12 \text{ Vdc,}$ $T_C = -40^\circ\text{C}$ MT2 (-), Gate (+); MT2 (-), Gate (-), $R_L = 50 \text{ Ohms}$ MT2 (+), Gate (-); $R_L = 25 \text{ Ohms}$	I_{GT}	-	-	80 80	mA _{dc}
DC Gate Trigger Voltage $V_D = 12 \text{ Vdc}$ MT2 (+), Gate (+); MT2 (-), Gate (-), $R_L = 100 \text{ Ohms}$ MT2 (+), Gate (-); $R_L = 50 \text{ Ohms}$	V_{GT}	-	-	2.5 2.5	V _{dc}
DC Gate Trigger Voltage $V_D = 12 \text{ Vdc,}$ $T_C = -40^\circ\text{C}$ MT2 (+), Gate (+); MT2 (-), Gate (-); $R_L = 50 \text{ Ohms}$ MT2 (+), Gate (-); $R_L = 25 \text{ Ohms}$	V_{GT}	-	-	3.5 3.5	V _{dc}
DC Gate Non-Trigger Voltage $V_D = \text{Rated } V_{DRM}, R_L = 1 \text{ K Ohms,}$ $T_C = 115^\circ\text{C}$ All Trigger Modes	V_{GD}	0.25	-	-	V _{dc}
Holding Current $V_D = 24 \text{ Vdc, Peak Initiating Current} = 0.5 \text{ A,}$ Pulse Width = 0.1 to 10 ms, Gate Trigger Source = 7 V, 20 Ohms $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = -40^\circ\text{C}$	I_H	-	-	75 100	mA _{dc}
Latching Current $V_D = 24 \text{ Vdc, Gate Trigger Source} = 15 \text{ V, } 100 \text{ Ohms,}$ Pulse Width = 50 $\mu\text{s, } 5 \mu\text{s}$ Maximum Rise and Fall Times MT2 (+), Gate (+) MT2 (-), Gate (-) $T_C = 25^\circ\text{C}$ MT2 (+), Gate (-) $T_C = 25^\circ\text{C}$ MT2 (+), Gate (+), MT2 (-), Gate (-); $T_C = -40^\circ\text{C}$ MT2 (+), Gate (-) $T_C = -40^\circ\text{C}$	I_L	-	-	100 200 200 400	mA _{dc}

FIGURE 1 - CURRENT DERATING

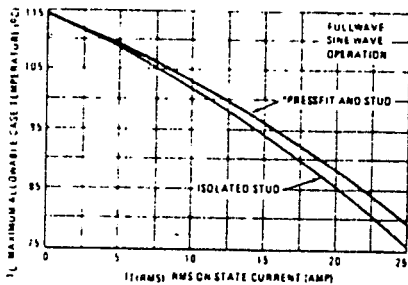
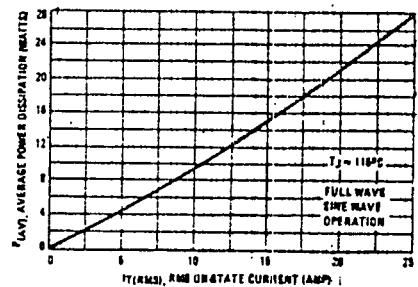


FIGURE 2 - MAXIMUM ON-STATE POWER DISSIPATION



การล้างอำนาจแม่เหล็ก (demagnetization)

แม่เหล็กถาวรจะถูกล้างอำนาจแม่เหล็กได้โดยใช้สนามแม่เหล็กสลับ (alternating magnetic field) ที่ค่อย ๆ ลดขนาดลงเรื่อย ๆ จนถึงศูนย์ ซึ่งเป็นการทำให้วงฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็กนั้นลดขนาดลงจนกระทั่งค่า H (magnetizing force) และค่า B (flux density) มีค่าเป็นศูนย์ ดังรูป (ก) ช่วงเวลาในการลดค่าสนามแม่เหล็กสลับนี้มีความสำคัญ คือ ถ้าขนาดของสนามแม่เหล็กถูกลดลงเร็วเกินไป จะทำให้เกิดมีค่าสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ ดังรูป (ข) ขนาดของค่า H ที่ใช้จะมีค่าประมาณอย่างน้อยที่สุดเท่ากับค่า H_{max} ที่ทำให้สารแม่เหล็กนั้นถึงจุดอิ่มตัว แล้วจึงลดขนาดลงมา ค่าความลึกของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านลงไปในตัวของสารแม่เหล็ก (depth of penetration) หาได้จากสมการ

$$D = K \sqrt{e/\mu f}$$

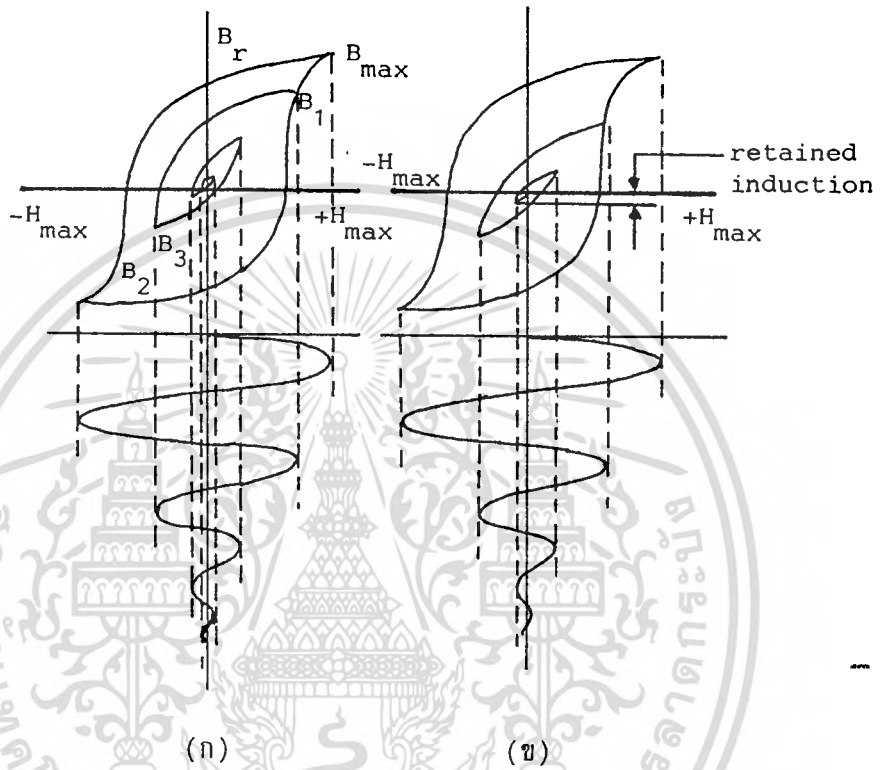
e = ค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity)

μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability)

f = ค่าความถี่ของระบบ

K = ค่าคงที่

จะเห็นได้ว่า สารแม่เหล็กชนิดที่มีค่าซึมซาบแม่เหล็กต่ำ และมีค่าความต้านทานจำเพาะสูง จะให้ผลในการเจาะลึกดี ในขณะที่สารแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความถี่ต่ำ ๆ เพื่อให้ผลในการเจาะลึกที่ดีขึ้น



รูปแสดงการล้างอำนาจแม่เหล็กโดยใช้สนามแม่เหล็กสลับ

SCL4066B

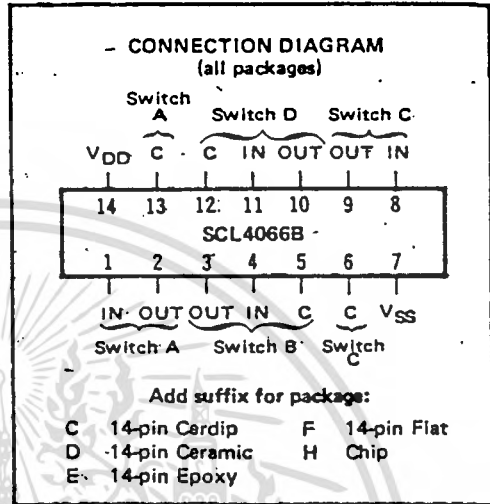
CMOS QUAD ANALOG SWITCH

FEATURES

- ◆ Transmission or Multiplexing of Analog or Digital Signals
- ◆ 80Ω Typical ON-Resistance for 15-Volt operation
- ◆ Switch ON-Resistance Matched to within 5Ω over 15-Volt Signal-Input Range
- ◆ ON-Resistance Flat over Full Peak-to-Peak Signal Range
- ◆ High Degree of Linearity:
 $\leq 0.5\%$ Distortion (typ) @ $f_{is} = 1\text{kHz}$,
 $V_{is} = 5V_{p-p}$, $V_{DD} - V_{SS} \geq 10V$, $R_L = 10k\Omega$
- ◆ Extremely Low OFF switch Leakage Resulting in very Low Offset Current and High Effective OFF Resistance:
 $10pA$ (typ) @ $V_{DD} - V_{SS} = 10V$, $T_A = 25^\circ C$
- ◆ Extremely High Control Input Impedance (Control Circuit Isolated from Signal Circuit):
 $10^{12}\Omega$ (typ)
- ◆ Low Crosstalk between Switches:
 $-60dB$ (typ) @ $f_{is} = 1.9MHz$, $R_L = 1k\Omega$
- ◆ Matched Control-Input to Signal-Output Capacitance Reduces Output Signal Transients
- ◆ Frequency Response, Switch ON = 40MHz (typ)

DESCRIPTION

The SCL4066B is a Quad Bilateral Switch intended for the transmission or multiplexing of analog or digital signals. It is pin-for-pin compatible with the SCL4016B, but exhibits a much lower ON-resistance. In addition, the ON-resistance is relatively constant over the full input signal range. The SCL4066 consists of four independent bilateral switches. A single control signal is required per switch. Both the P and the N device in a given switch are biased ON or OFF simultaneously by the control signal. As shown below, the well of the N-channel device on each switch is either tied to the input when the switch is ON or to V_{SS} when the switch is OFF. This configuration minimizes the variation of the switch-transistor threshold



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

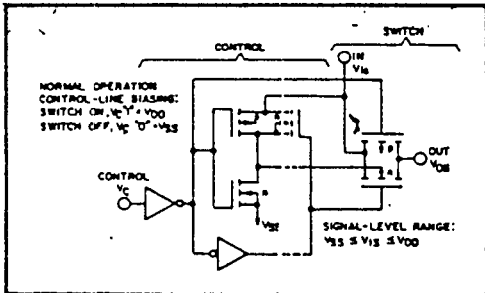
For maximum reliability:

DC Supply Voltage	$V_{DD} - V_{SS}$	3 to 15	Vdc
Operating Temperature	T_A	-55 to +125	°C
C, D, F, H Device		-40 to +85	°C
E Device			

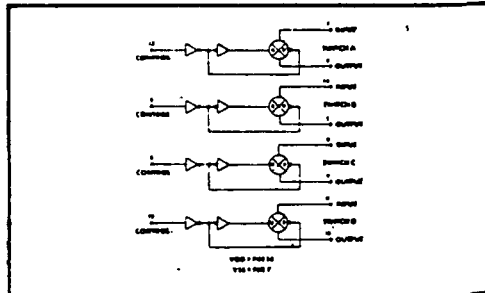
voltage with input-signal, and thus keeps the ON-resistance low over the full operating range.

The advantages over single-channel switches include peak input-signal voltage swings equal to the full supply voltage, and more constant ON-impedance over the input-signal range. For sample-and-hold applications, however, the SCL4016 is recommended.

SCHEMATIC DIAGRAM (one of four switches):



LOGIC DIAGRAM



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

STATIC CHARACTERISTICS^{1,2}

PARAMETER	CONDITIONS	V _{SS} (Vdc)	V _{DD} (Vdc)	T _{LOW} ¹		25°C			T _{HIGH} ¹		Units
				Min.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Max.	
QUIESCENT DEVICE CURRENT	I _{DD} V _{IN} = V _{SS} or V _{DD} All valid input combinations	0	5	-	0.05	-	0.0005	0.05	-	1.5	μA _{dc}
		0	10	-	0.1	-	0.001	0.1	-	3.0	
		0	15	-	0.2	-	0.002	0.2	-	6.0	
MINIMUM INPUT HIGH VOLTAGE (Control Input)	V _{IH} V _{IS} = V _{SS} V _{OS} = V _{DD} I _{OS} = 10μA	0	5	-	4.0	-	2.75	4.0	±	4.0	Vdc
		0	10	-	8.0	-	5.5	8.0	±	8.0	
		0	15	-	12.0	-	8.25	12.0	-	12.0	
MAXIMUM INPUT LOW VOLTAGE (Control Input)	V _{IL} V _{IS} = V _{SS} V _{OS} = V _{DD} I _{OS} = 10μA	0	5	1.0	-	1.0	2.25	-	1.0	-	Vdc
		0	10	2.0	-	2.0	4.5	-	2.0	-	
		0	15	3.0	-	3.0	6.75	-	3.0	-	
SWITCH INPUT/OUTPUT LEAKAGE	I _{OFF} V _C = V _{SS} V _{IS} = ±7.5Vdc	-7.5	+7.5	-	±100	-	±0.01	±100	-	±200	nA _{dc}
ON-RESISTANCE C,D,F,H device E device	R _{ON} V _C = V _{DD} V _{SS} < V _{IS} < V _{DD} R _L = 10kΩ	-7.5	+7.5	-	220	-	80	280	-	320	Ω
		0	+15	-	-	-	-	-	-	-	
		-5	+5	-	310	-	120	400	-	550	Ω
		0	+10	-	-	-	-	-	-	-	
		-2.5	+2.5	-	2000	-	270	2500	-	3500	Ω
		0	+5	-	-	-	-	-	-	-	
	R _{ON} V _C = V _{DD} V _{SS} < V _{IS} < V _{DD} R _L = 10kΩ	-7.5	+7.5	-	250	-	80	280	-	300	Ω
		0	+15	-	-	-	-	-	-	-	
		-5	+5	-	330	-	120	400	-	520	Ω
0	+10	-	-	-	-	-	-	-			
-2.5	+2.5	-	2100	-	270	2500	-	3200	Ω		
0	+5	-	-	-	-	-	-	-			
ON-RESISTANCE MATCH (Same package)	ΔR _{ON} V _C = V _{DD} V _{SS} < V _{IS} < V _{DD} R _L = 10kΩ	-7.5	+7.5	-	-	-	5	-	-	-	Ω
		0	+15	-	-	-	-	-	-	-	
		-5	+5	-	-	-	10	-	-	-	-
0	+10	-	-	-	-	-	-	-	-		
-2.5	+2.5	-	-	-	10	-	-	-	-	Ω	
0	+5	-	-	-	-	-	-	-	-		

NOTES: ¹ Remaining Static Electrical Characteristics are listed under "SCL4000B Series Family Specifications".

² T_{LOW} = -55°C for C, D, F, H device.

= -40°C for E device.

T_{HIGH} = +125°C for C, D, F, H device.

= + 85°C for E device.

³ This device has been designed for balanced output drive current specifications. Consult Family Specifications.

General characteristics of contactors

Control circuit
Auxiliary contacts

Control circuit

		LC1 contactors					CP1 contactors				
		D09	D12	D16	D25	D40	D63	CB	DB	EB	
Rated voltage at Vn		The contactor will function correctly at 85% of its nominal voltage and its coil will operate indefinitely at 110% nominal voltage without damage.									
Minimum/maximum rated values											
• AC	Frequency (1)	V	12 - 660			—			—		
		Hz	50/60			—			—		
	• DC without economy resistor	V	—			12 - 600			—		
• AC rectified/DC with economy resistor		V	—			—			—		
Average coil consumption											
• AC	Inrush	50Hz VA	73 - 80	100	220	—			—		
		60 Hz VA	73 - 80	100	220	—			—		
	Sealed	50Hz VA	8	9	22	—			—		
		60Hz VA	8	9	22	—			—		
• Heat dissipated	Watts	1.8 - 2.7	2.5 - 3.5	6 - 10	—			—			
• DC without economy resistor	Inrush and sealed	Watts	—			14	23		—		
• AC rectified	Inrush	VA	—			—			—		
• DC with economy resistor	Sealed	Watts	—			—			—		
	Inrush	Watts	—			—			—		
	Sealed	Watts	—			—			—		
	Inrush	Watts	—			—			—		
Cos θ or sealed time constant ($\frac{L}{R}$)											
• AC	Cos θ	0.3	0.4	0.3	—			—			
	L/R : ms	—			60	80		—			
	L/R : ms	—			—			—			
• DC without economy resistor	L/R : ms	—			—			—			
• AC rectified/DC with economy resistor	L/R : ms	—			—			—			
Average operating time at Vn (in milliseconds)		The operating time depends on the type of electromagnet fitted to the contactor and its method of control. The closing time is measured from the moment the control supply is switched on to the time that contact is just made by the main poles.									
• AC	Closing	ms	15-22	18-25	14-21	—			—		
	Opening	ms	5-15	7-19	6-16	—			—		
• DC without economy resistor	Closing	ms	—			72-102	40-55		—		
	Opening	ms	—			24-33	30/45 - 35/50		—		
• AC rectified/DC with economy resistor	Closing	ms	—			—			—		
	Opening	ms	—			—			—		
Note: The arcing time depends upon the circuit controlled by the poles. For 3 phase current, in all time of the contactor and the arcing time.											
Mechanical life (millions of operations)											
• AC	Millions	20			—			—		—	
	Millions	—			40	20		—		—	
	Millions	—			—			—		—	
• DC without economy resistor	Millions	—			—			—		—	
• AC rectified/DC with economy resistor	Millions	—			—			—		—	

Auxiliary contacts. Instantaneous and time delay

• AC (2)	Type	Instantaneous LA1-D, Time delay LA2, LA3-D for LC1						Instantaneous ZC1-GR			
		V	48	110/127	220	380	500	48	110/127	—	
Rated power	1 million operations	VA	300	500	600	520	430	450	900	—	
	3 million operations	VA	160	300	330	300	260	140	300	—	
	10 million operations	VA	70	100	110	100	80	55	100	—	
	Maximum making/breaking capacity	VA	13000	7000	12000	15000	13000	14000	8000	—	
• DC (3)	Type	V	24	48	110	220	440	24	48	110	
		Rated power	Watts	120	90	75	68	61	250	150	100
		1 million operations	Watts	70	50	38	33	28	60	40	30
		3 million operations	Watts	25	18	14	12	10	—	—	—
10 million operations	Watts	1000	700	400	260	220	2000	800	350		
Maximum making/breaking capacity	Watts	1000	700	400	260	220	2000	800	350		

- (1) For frequencies greater than those shown, up to approximately 400 Hz, use the rectified AC control.
- (2) Circuit such as the electromagnet of a contactor with: - inrush $\cos \theta \approx 0.7$, sealed $\cos \theta \approx 0.4$.
If occasional breaking of the inrush current is necessary, ensure that the inrush power does not exceed the maximum making/breaking capacity.
- (3) Circuit such as electromagnet coils without an economy resistor; time constant varying from 20ms for 5W to 200ms for 100W or more.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For information on LC1-B contactors not given on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

CN1 contactors						CN2 contactors			LC1-B contactors			CV3 contactors		
DB	EB	FC	GC	HC	JC	FC	GC	HC	BJ	BK	BL	MB	PB	RB

Conforming to UTE NFC 63110 these contactors make a clean closure when the voltage build-up is slow. This clean closure eliminates welding and contact damage.

24-600						24-660			24-660			50/60		
50/60						50/60			50/60			24-600		
20/440	22/600	DC 12-600V - AC rectified 48-440						DC 12-600V-AC rectified 48-440			DC 110-500 - AC rectified 110-380			
80	128	380	500	810	980	380	500	810	---					
100	180	455	600	996	1230	455	600	996	---					
3.5	12.5	36.5	46	60	75	36.5	46	60	---					
9	16.5	45	58	75	100	45	58	75	---					
2.5	4	13.5	16.5	24	36	13.5	16.5	24	---					
---									---			80-105	---	
---									---			300 - 1100		
---									---			5 - 40		
85	130	170/250	220/350	320/480	440/700	170/250	220/350	320/480	250 - 950					
5.5	4.7	10 / 25	10/30	11/23	16/24	10/25	10/30	11/23	5 - 40					
0.3 - 0.35						0.25 - 0.50			0.35 - 0.50			---		
---						---			---			180		
< 5						< 5			< 5			10 10 10		

The opening time is measured from the moment the coil supply is switched off to the separation of the main poles.

22 - 35	15 - 23	40 - 85	30 - 20	30 - 55	24 - 40	40 - 85	30 - 80	30 - 55	---						
3 - 15	5 - 18	10 - 20			5 - 12	10 - 20			---						
---									---			260			
---									---			160/100			
---									---			100/150			
15 - 20	30 - 50				40 - 60		30 - 50			Breaking: AC 50/100 DC/AC rectified 20/40					
8 - 12	10 - 20				10 - 20			---							

ases, arcing time is less than 10ms. The load is isolated from the supply after a time equal to the sum of opening

20	10	5	10	---										
---	---	---	---	10										
1.2	3	1	3	3										

ang ZC1-GP for CP1, CN1, CN2				Instantaneous ZC4-GM for CV1, CV3						Time delay ZC2-GG for CV1, CV3						
220	330	---	500	48	110/127	220	330	---	500	---	48	110/127	220	330	---	500
1200	1200	---	1200	900	2200	4000	4000	---	4000	---	500	1200	1300	1300	---	1300
300	300	---	300	800	1300	1500	1500	---	1500	---	450	700	750	750	---	750
110	110	---	110	450	500	500	500	---	500	---	120	175	200	200	---	200
8000	8000	---	9000	5000	14000	23000	35000	---	45000	---	4000	12000	17000	22000	---	25000
220	---	40	---	24	48	110	220	---	440	---	24	48	110	220	---	440
70	---	70	---	300	280	250	250	---	230	---	150	125	115	100	---	80
25	---	25	---	115	105	95	90	---	85	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	45	40	35	33	---	20	---	45	37	32	20	---	9
200	---	200	---	5000	6000	1600	200	---	100	---	300	240	200	190	---	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

General characteristics of contactors

Power circuit: poles

	LC1 contactors							CP1 and CN1 contactors			
	D09	D12	D16	D25	D40	D63		CB	DB	EB	
1. Current rating for open-type contactor used on AC3 duty											
Working conditions or certain standards may reduce these values	A	9	12	16	25	40	63	A	12	25	50
2. Maximum rated supply frequency											
• Normal use	Hz	25 - 400 Hz					Hz	25 - 400 Hz			
• Restricted use	Hz	< 1,000 Hz					Hz	< 1,000 Hz			
3. Rated voltage for 3 phase circuit such as that of a motor stator											
A contactor can be relied upon to break a circuit if the voltage is not greater than 110% of the rated voltage.	V	660					V	500			
• Our contactors can be used for higher voltages in certain cases, such as rotor circuits. (Please see relevant literature)											
Various limiting factors depending upon the application and, in some cases, the availability of spare parts are detailed in the selection guide and in spec											
4. Rated insulation voltage	IEC.158.1 BS.775	V	660				IEC.158.1 BS.775	500			
The rated insulation voltage is based on the insulation distance, measured according to standard specifications. Since these specifications are not the same for all standards a contactor may have several insulation voltages.	UTE NFC 20040 Category C	V	500				UTE NFC 20040 Category C	500			
	VDE.0110 group C	V	660				VDE.0110 group C	500			
	CSA C22.2 No.14	V	600				CSA C22.2 No. 14	600			
5. Making capacity r.m.s. current											
The making capacity is independent of the voltage. (1).	A	250	450		1000		A	250	480	650	
6. Breaking capacity r.m.s. current	380V	A	250	450		1000		380V	250	480	650
This depends upon the effectiveness of the arc shield in reducing the contactor's arcing current. It is expressed in amps and decreases as the voltage increases $1 \cos \theta = 0.35$.	500V	A	175	450		1000		500V	150	480	650
	660V	A	85	120	180	400	630	660V	-	-	-
7. Overload currents	t1 = 3min	A	35	55		105	125	t1 = 3 min	35	55	110
Permissible current through the poles for a time "t", provided no current was passing up to the time of overload for at least 4 x t1	t2 = 1min	A	56	80		160	180	t2 = 1 min	50	80	150
Occasionally currents 20% in excess of these values (or if the current is not zero prior to the overload) may be carried without damage (2).	t3 = 10s	A	105	156		320	350	t3 = 10s	80	150	280
	t4 = 5s	A	140	200		430	440	t4 = 5s	110	200	370
	t5 = 2s	A	195	300		610	620	t5 = 2s	152	280	500
	t6 = 1s	A	250	400		800	800	t6 = 1s	200	360	
8. Impedance of the poles	mΩ	2.5	2		1.5		mΩ	2.5	2	1.5	

(1) The making and breaking capacities are given for the constant r.m.s. current left after the decay of transients. The contacts can therefore sustain an asymmetric current with a peak twice as large.

(2) If, during operation, there is a risk of currents greater than the making and breaking capacity flowing through the poles, the contactors must be protected against short circuits by fuses or some other safety device. The safety co-ordination "S" (Standard UTE 63810) is assured if, for voltages < 500V, the contactor is associated with an overload relay (with entirely thermal action), < maximum AC3 duty current rating, and used with aM or gG fuses indicated on the relay.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For information on LC1-B contactors not given on pages 2/30 to 2/32 please consult your local sales office.

	CN1 contactors				CN2 contactors			A	LC1-B contactors			CV3 contactors		
	FC	GC	HC	JC	FC	GC	HC		BJ	BK	BL	MB	PB	RB
A	80	125	200	260	80	125	200	A				1000	1500	2000
Hz	25 - 400 Hz < 1,000 Hz				60 Hz AC < 250 Hz			Hz				60 Hz AC < 250 Hz		
V	500				660			V				1000		

brocnures dealing with lifting gear, induction heating etc.

IEC 158.1 BS 775	660				660			IEC 158.1 BS 775				1000		
UTE NFC 20040 Category C	750				750			UTE NFC 20040 Category C				1000		
VDE.0110 group C	750				750			VDE 0110 group C				1000		
CSA C22.2 No. 14	600				600			CSA C22.2 No. 14				600		
A	1200	1600	2200	2700	1400	1900	2500	A				12000	16000	20000
380 V	1400	1600	2000	3200	2000	2600	3200	380V				12000	16000	20000
500 V	800	1000	1400	3200	2000	2600	3200	500V				12000	16000	20000
660 V	—	—	—	—	500	500	800	660V	—	—	—	10000	12000	16000
t1 = 3 min	125	190	250	360	125	190	250	t1=15min				1500	2600	3500
t2 = 1 min	200	300	400	580	200	300	400	t2=5 min				2000	3200	4200
t3 = 10s	400	600	800	1000	400	600	800	t3=2 min				2600	4300	5500
t4 = 5s	530	800	1050	1400	530	800	1050	t4=30s				4800	8000	10000
t5 = 2s	750	1100	1500	2000	750	1100	1500	t5 = 10s				7200	12000	15000
t6 = 1s	900	1350	1800	2300	900	1350	1800	t6 = 5s				9600	16000	20000
mΩ	0.6	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	mΩ				0.18	0.13	0.09

GENERAL OPERATING CONDITIONS

• Ambient temperature

Operating characteristics and conditions given in the following pages are valid for an ambient temperature from -5° to +40°C without restrictions and -50° to +70°C with certain restrictions.

• Mounting

Normally the contactors are mounted vertically. They will function, however, at an angle of 22° 30' from vertical in any direction (for compliance with official marine regulations).

• Altitude

Our contactors can be used without derating up to a height of 2,000 metres, and up to 5,000 metres with certain restrictions.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LR1-D RA1

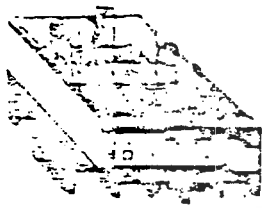
Thermal overload relays

AC and DC (AC only, for RA1-HA and RB1-HA relays)

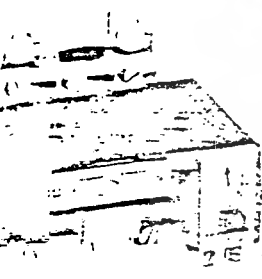
- LR1/RA1 — protection against overload, phase unbalance and phase failure.
- LR3/RB1 — overload protection only: for lighting, heating, etc.
- Ambient temperature compensation from -20°C to +60°C.
- Signal contact incorporated as standard on LR1 relays.

- Conforming to: IEC 293, UTE NF C53650, VDE 0660
- Approvals: (600V) (UL) (CSA)
- NOTE: The LR1-D09355 and LR1-D6335 are not CSA approved as standard. For their use the UL version. Please consult your local sales office.
- Approvals pending: ASE

DIFFERENTIAL RELAYS



LR1-D12316



NOTE: FA relays are also available in 14 other sizes from 1 to 59.9A. Please consult your local sales office.

Recom-mended current range AC or DC in amps.	Associated fuse rating in amps *Motor protection fuses	Power rating for AC3 duty 3-phase 50 or 60 Hz				Reference	Weight (kg)	
		220V kW	380/440V HP kW	500V HP kW	660V HP kW			
D09	0.1-0.16	2	Select the relay corresponding to the motor full load current				LR1-D09301	
	0.16-0.25	2					LR1-D09302	
	0.25-0.40	2					LR1-D09303	
	0.40-0.63	2					0.37 0.5	LR1-D09304
	0.63-1	4	0.37 0.5	0.75 1	LR1-D09305			
	1-1.6	6	0.37 0.5	0.75 1	1.1 1.5	LR1-D09306		
	1.6-2.5	10	0.37 0.5	0.75 1	1.1 1.5	1.5 2	LR1-D09307	
	2.5-4	15	0.75 1	1.5 2	2.2 3	3 4	LR1-D09308	
	4-6	15	1.1 1.5	2.2 3	3 4	4 5.5	LR1-D09310	
	5.5-8	20	1.8 2.5	3 4	4 5.5	5.5 7.5	LR1-D09312	
7-10	25*	2.2 3	4 5.5	5.5 7.5	7.5 10	LR1-D09314		
D12	10-13	30*	3 4	5.5 7.5	7.5 10	10 13.5	LR1-D12316	0.12
D16	13-18	40*	4 5.5	7.5 10	10 13.5	15 20	LR1-D16321	0.12
D25	18-25	50*	5.5 7.5	11 15	15 20	18.5 25	LR1-D25322	0.12
D40	23-32	60*	7.5 10	15 20	18.5 25	22 30	LR1-D40353	0.34
	30-40	80*	10 13.5	20 25	25 30	30 40	LR1-D40355	
D63	38-50	100*	11 15	22 30	30 40	37 50	LR1-D63357	0.34
	48-57	100*	15 20	25 35	37 50	45 60	LR1-D63359	
	57-66	125	18.5 25	30 40	45 60	55 75	LR1-D63361	
FA	60-80	150*	22 30	37 50	55 75	55 75	RA1-FA6080	1.16
GA	75-105	250*	30 40	55 75	75 100	90 125	RA1-GA75105	1.16
HA	95-125	250*	30 40	55 75	75 100	110 150	RA1-HA95125	1.35
	120-160	350*	45 60	75 100	90 127	132 175	RA1-HA120160	
	150-200	350*	55 75	90 125	132 175	160 220	RA1-HA150200	

ATTACHMENTS

- Remote tripping device LA7-D0903
- Electrical reset device LA7-D0953
- Baseplate for independent mounting LA7-D0954
- Lead sealing kit LA7-D0952
- Adaptor terminals for mounting on contactors D40 and D63 LA7-D4058
- Remote tripping device LA7-D4003
- Electrical reset device LA7-D4053
- Baseplate for independent mounting LA7-D4054
- Lead sealing kit LA7-D4052
- Trip signal contact N/O ZC1-RP1 N/C ZC1-RP2 RA1-FA6080
- Remote tripping device ER1-FA1
- Electrical reset device ER1-FA2
- Start button ZC1-RP5
- Lead sealing kit RA1-FZ01
- Connector for cable without tag FA DZ2-FB, GA DZ2-GA, HA DZ2-HA

NON-DIFFERENTIAL RELAYS

The sizes are similar to those quoted above for the LR1 and RA1 overload relays. The reference LR1 becomes LR3 and RA1 becomes RB1.

When ordering:

NOTE: Set the overload relay to the motor nameplate full-load current.

- An overload relay. Please state the exact reference as shown above.
- An electrical attachment. Complete the reference with the letter indicating the control circuit voltage and frequency as shown in the table: Example: LA7-D0953F.
- A mechanical attachment. State the exact reference.

Control circuit voltage (V)

50 Hz	60 Hz	Ref.
24V		B
42V	48V	D
48V		E
110V	120V	F
220V	220V/220V	L
240V		M
240V		U
380V	440V	Q

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

Thermal overload relays

LR1-D
RA1

CURRENT TRANSFORMER OPERATED THERMAL OVERLOAD RELAYS

Used when the current is greater than 200 A and/or when:

- with FUSES-CONTACTORS-OVERLOAD assembly, the breaking of high overcurrents must be ensured by fuses only (not by relays with magnetic tripping).
- with PLUG-IN CONTROL CENTRES and similar equipment, the CT's mounted on the fixed part are calibrated for each output current, while each tray has the same low-rated relay.
- with LONG STARTING TIMES (more than 7 seconds for an average current of 5 In) a relay would trip directly.

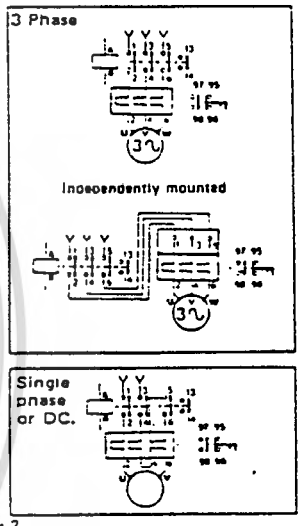
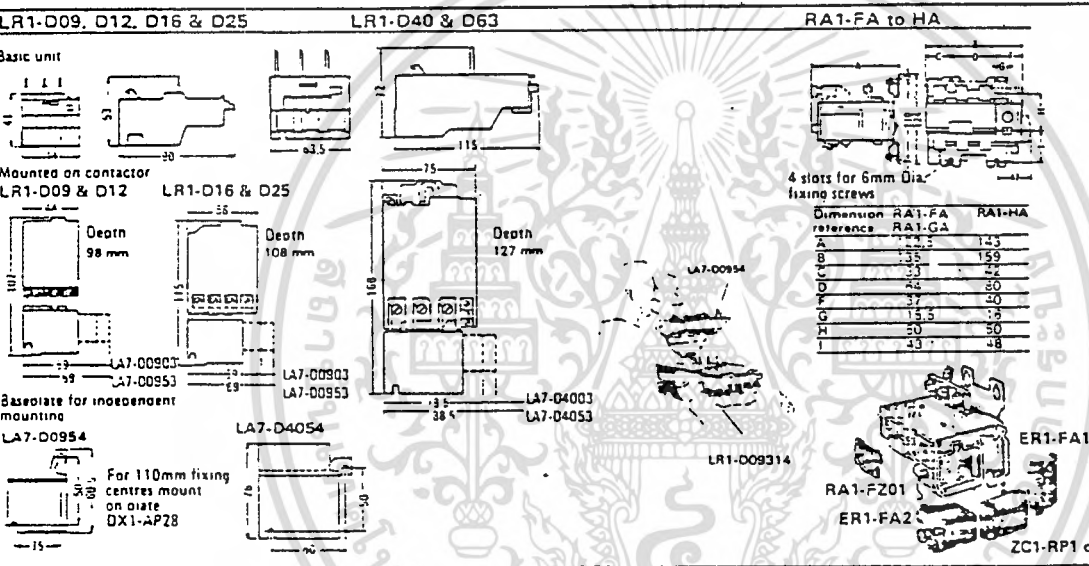
CT's with a low "saturation index" are used in order to increase the time up to about 30 seconds. Beyond this, normal CT's are used, the secondary being short-circuited for a time equal to the starting time less the tripping time of the relays.

When the sole function of the relay is to provide overload protection for a motor (or balanced circuit) with 3-phase supply without neutral, supply via 2 CT's is normal and conserves all the relay characteristics, including tripping in the event of phase failure (differential).

When LR1-D09305 (.63/1A) relays are used with CT's for PROTECTION, use 10% accuracy class (alternatively 5% if a small ratio error is required) with 1 Amp secondaries.

DIMENSIONS

SCHEMES

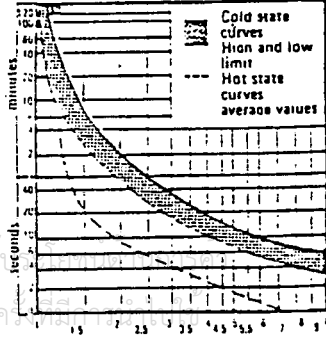
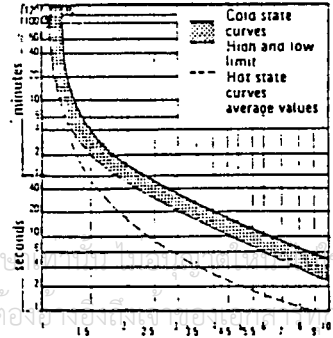
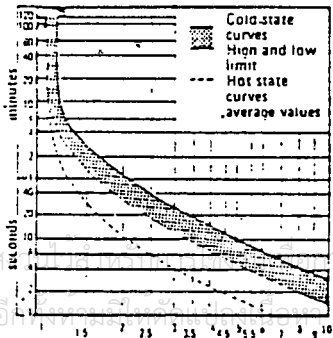


ELECTRICAL CHARACTERISTICS

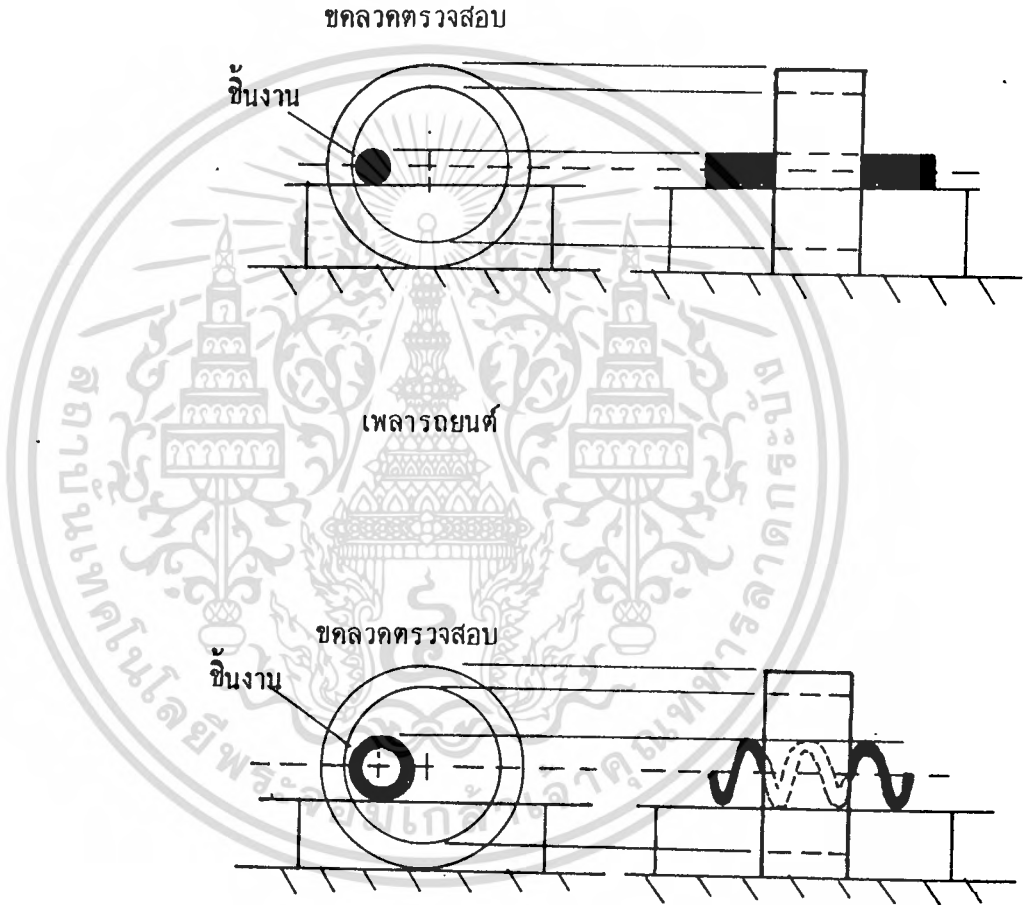
• Overload relay type	D09	D12	D16	D25	D40	D63	FA	GA	HA			
										95-125	120-160	150-200
• Rated voltage	All standards: 660V except CSA: 600V (common between N/O & N/C)							550V AC 500V DC		550V AC		
• Frequency	Up to 400 Hz							25 to 400 Hz		50 & 60 Hz		
• Power consumption per phase at max. current setting.	1.65 to 2.3 watts				3.65 to 4 watts		5.8 to 7.3W	7.6 W	6 VA	9 VA	12 VA	
• Power circuit wiring capacity with screw and clamp	Capacity flexible		1 or 2 x 6mm ²		1 or 2 x 10mm ²		1x25mm ²	2x16mm ²	2x25mm ²			
	Capacity solid											
• Control circuit wiring capacity with connector	Capacity flexible						25mm ²	50mm ²	95mm ²			
	Capacity solid						35mm ²	70mm ²	120mm ²			
• Control circuit wiring capacity	2 x 2.5mm ²											
• Auxiliary contacts	Occasional making and breaking capacities											
	AC						DC					
LR1-D09 to D63	48V	110V	220V	380V	500V	110V	220V	440V	600V			
	55A	55A	55A	45A	30A							
RA1-FA to HA	4 000VA	1 8 000 VA	14 000 VA	12 000 VA	11 000 VA	300 W	200 W	175 W	120 W			

• Tripping curves LR1-D09 to D63 RA1-FA & GA RA1-HA

All overloads have ambient temperature compensation between -20°C and +30°C
Storage temperature -60°C to +60°C



การวางชิ้นงานเพื่อตรวจสอบรอยร้าวในลักษณะต่าง ๆ



สปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.9

ตัวอย่างการคำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

จากรูป พิจารณาจุดที่ตำแหน่ง 19

$$B = \frac{\mu_0 N I r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 N I \sin^3 \theta}{2r}$$

μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี/เมตร

N = จำนวนรอบของขดลวดตรวจสอบ เท่ากับ 115 รอบ

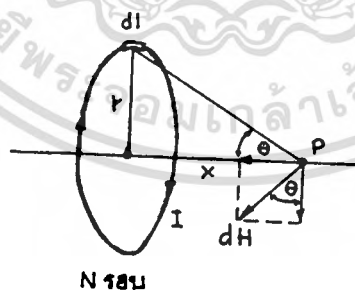
I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดตรวจสอบ เท่ากับ 45 แอมป์

x = ระยะห่างจากแนวแกนศูนย์กลางของขดลวดตรวจสอบ เท่ากับ 0.05 เมตร

r = รัศมีของขดลวดตรวจสอบ เท่ากับ 0.165 เมตร

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 115 \times 45 \times (0.165)^2}{2(0.165^2 + 0.05^2)^{3/2}}$$

$$= 0.0172 \text{ เทสลา}$$



รูปแสดงการหาค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่จุดห่างจากศูนย์กลาง x เมตร

จากการทดลองได้ค่า B ที่จุด 19 เท่ากับ 0.020 เทสลา ซึ่งผิดพลาดจากการคำนวณไป 14 %