

ปริญญาานิพนธ์

เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Magnetic Field Generator



ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Magnetic Field Generator

ชื่อนักศึกษา

1. นายปิยพงศ์
2. นายสมศิลป์
3. นายอนุสรณ์
4. นางสาวพัชรี

- อินทรต๋ม
อ้อมแก้ว
สุขสะอาด
เร้งแสง

- รหัสประจำตัว 43035422
รหัสประจำตัว 43035436
รหัสประจำตัว 43035441
รหัสประจำตัว 43035627

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี

คณะกรรมการสอบปริญญาโท		ลายมือชื่อ
1. ผศ.วิสุทธิ	อธิพรธรรม	
2. อาจารย์สุรพงษ์	สิริพงศ์ดี	
3. อาจารย์กิติพงศ์	มะโน	
4. อาจารย์พีระวุฒิ	สุวรรณจันทร์	
5. อาจารย์ปิยะ	จิตธรรมมาภิรมย์	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2544 เวลา 18.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.311 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.



ภาควิชารับรองแล้ว
ลงนาม.....

(ผศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น วันที่ 11 เดือน ม.ค. พ.ศ. 2545
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Magnetic Field Generator

วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาหลักของการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) เพื่อออกแบบเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 3) เพื่อสร้างเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 4) เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 5) เพื่อนำเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้งาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เข้าใจหลักการกำเนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) ได้วงจรและผังโครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 3) ได้เครื่องต้นแบบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 4) ได้ทดสอบการทำงานของเครื่องสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 5) ได้นำเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อ	เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	
นักศึกษา	นายปิยพงศ์	อินทรคุ้ม
	นายสมศิลป์	อ่อมแก้ว
	นายอนุสรณ์	สุขสะอาด
	นางสาวพัชรี	เร้งแสง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.วิสุทธิ	อชิพรธรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์สุรพงษ์	สิริพงศ์ดี
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต	
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2544	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะการทำงานของระบบประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนกำลัง เป็นส่วนขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและชุดเอสซีอาร์ ชุดนี้จะใช้กระแสขณะสร้างสนามแม่เหล็กสูงมาก และส่วนวงจรควบคุมจะมีทั้งแบบควบคุมด้วยมือใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กสูงๆ และแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล โดยจะรับอินพุตจากการสแกนคีย์และเชื่อมต่อกับหน่วยแสดงผล และส่งเอาต์พุตออกให้กับชุดทริกเอสซีอาร์ การทำงานของเครื่องแบ่งการทำงานเป็น 2 โหมดการทำงาน คือ เป็นเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งแต่ 0 – 1,200 เกาส์ และ โหมดสำหรับการสร้างวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งสร้างแท่งแม่เหล็กถาวรได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้

Thesis Title	Magnetic Field Generator	
Students	Mr.Piyapong	Intaratume
	Mr.Somsil	Oomkaeo
	Mr.Anusron	Suksaard
	Miss Padchare	Rangsavang
Advisor	Assist. Prof. Wisuit	Atipornatum
Co – Advisor	Mr.Surapong	Siripongdee
Education Level	Bachelor of Science in Industrial Education	
Program in	Industrial Instrument Technology	
Academic Year	2001	

ABSTRACT

This thesis presents the Magnetic Field Generator that the function characteristic of system consists of two main part are power part and control circuit. Power part is a coil which generates magnetic field and SCR uses current while generate very high magnetic field. Control circuit is controller by handing which uses for generating very high magnetic and by automatic which uses microcontroller as central processing unit and send output to SCR trig. There are two modes of function first function is a mode that generates magnetic field between 0-1,200 gauss and other will be generated magnetic material as permanent magnetic field which can be applied to another industry.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะความร่วมมือ ร่วมใจของสมาชิกภายในกลุ่มซึ่งทุ่มเททั้งกำลังกายกำลังใจ กำลังสมองและกำลังทรัพย์เป็นเวลานานกว่าจะถึงวันนี้ รวมทั้งได้รับความช่วยเหลือจากท่าน ศศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม ในการให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการให้ใช้เครื่องวัดเกาส์มิเตอร์ และอาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้คำปรึกษาแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทำปริญญาบัตรอย่างเต็มที่ และที่สำคัญหาที่เปรียบมิได้คือ บุพการีที่ให้กำเนิดอบรมเลี้ยงดูให้โอกาสทางการศึกษา อีกทั้งยังสนับสนุนในเรื่องเงินทุนในการครั้งนี้ รวมถึงเพื่อนๆ ทุกท่านตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำปริญญาบัตรจนเสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 จิตความสามารถของโครงการ	1
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 หน้าที่และการทำงานของแท่งแม่เหล็ก	3
2.2.1 คุณสมบัติแท่งแม่เหล็ก	4
2.2.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	5
2.2.3 กระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก	7
2.2.4 ขดลวดกับแท่งแม่เหล็ก	10
2.2.5 ฟลักซ์แม่เหล็กและวงจรแม่เหล็ก	11
2.2.6 สารแม่เหล็ก	12
2.3 ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็ก	15
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟค	19
2.5 ไทริสเตอร์และการเรียงกระแสที่มีการควบคุม	21
2.5.1 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของ เอสซีอาร์	23
2.5.2 การเปิดกระแสของ เอสซีอาร์	27
2.5.3 วงจรจุดชนวนด้วยพัลส์	30
2.6 ชุดวงจรกำเนิดพัลส์ทริกเกอร์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6.1 วงจรไอโซเลตสัจญาณ	34
2.6.2 การทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์	34
2.6.3 การใช้งานไอซี TCA785	35
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	37
3.1 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	38
3.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก	40
3.3 วงจรจุดชนวนเกิดด้วย TCA785	40
3.4 วงจรเอสซีอาร์	42
3.5 หม้อแปลงพัลส์	44
3.6 ชุดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	47
4.1 การทดลองในย่านของ Manual	47
4.2 การทดลองในย่านของ Auto	49
4.3 การทดลองทั้งระบบ	51
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา	53
5.1 บทสรุป	53
5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข	54
5.3 แนวทางในการพัฒนา	54
ภาคผนวก ก รูปต้นแบบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	56
ภาคผนวก ข ชุดวงจรและ โครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	59
ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในโครงงาน	66
ภาคผนวก ง โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน	90
ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งานเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	99
บรรณานุกรม	106
ประวัติผู้แต่ง	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ความกว้างของพัลส์ด้านออกกับค่า C_{12}	41
ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ Manual	48
ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ Auto	49
ตารางที่ ค.3 การเปรียบเทียบขนาดของขดลวดทองแดง	67
ตารางที่ จ.1 ค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากการปรับ Volt Volume ค่าต่างๆ	105



สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แท่งแม่เหล็กในลักษณะต่างๆ	3
รูปที่ 2.2 ขั้วแม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.3 คุณสมบัติของแท่งแม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.4 แท่งแม่เหล็กรูปเกือกม้า	5
รูปที่ 2.5 เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N ไปขั้ว S	5
รูปที่ 2.6 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	6
รูปที่ 2.7 โดเมนของวัสดุสารแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็ก	8
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลของกระแสกับเส้นแรงแม่เหล็ก	9
รูปที่ 2.11 ขดลวดและสนามแม่เหล็ก	9
รูปที่ 2.12 แรงดึงดูดแม่เหล็ก	10
รูปที่ 2.13 วงจรแม่เหล็ก	11
รูปที่ 2.14 การทดลองเพื่อวัดเส้นแรงแม่เหล็ก	14
รูปที่ 2.15 ฟลักซ์จากสองประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน	16
รูปที่ 2.16 ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็ก	17
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กกับเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า	18
รูปที่ 2.18 ปฏิกิริยาการเหนี่ยวนำของฮอลล์เอฟเฟกต์	19
รูปที่ 2.19 หลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์	21
รูปที่ 2.20 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์	22
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์	23
รูปที่ 2.22 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ เอสซีอาร์	24
รูปที่ 2.23 ลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	25
รูปที่ 2.24 รูปแบบจำลองของเอสซีอาร์แบบวงจรถานซิสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกับค่าบวก	27
รูปที่ 2.25 การทำให้กระแสหยุดไหลตามธรรมชาติ	28
รูปที่ 2.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์ ในช่วงเวลาปิดกระแส	29

VIII

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.27 วงจรจุดชนวนครั้งคลิ่นที่ใช้หม้อแปลง ที่มีแกนสามารถอิมตัว	31
รูปที่ 2.28 แผนผังการใช้เครื่องกำเนิดพัลส์เข้าจุดชนวน เอสซีอาร์	33
รูปที่ 2.29 วงจรชนวนที่ใช้ เอสซีอาร์ขนาดเล็กเข้าจุดชนวน เอสซีอาร์ ขนาดใหญ่	33
รูปที่ 2.30 วงจรแยกกราวด์ระหว่างชุดควบคุมกับชุดกำลัง	34
รูปที่ 2.31 โครงสร้างภายในของ ไอซี TAC785	35
รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของโครงงาน	37
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงส่วนของฮาร์ดแวร์	37
รูปที่ 3.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	38
รูปที่ 3.4 การต่อสวิทช์แบบเมทริกซ์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์	38
รูปที่ 3.5 คีย์เมทริกสวิทช์	39
รูปที่ 3.6 LED 7 ส่วน	39
รูปที่ 3.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกโดย DAC0800	40
รูปที่ 3.8 วงจรจุดชนวน เอสซีอาร์	41
รูปที่ 3.9 วงจรการทำงานของ เอสซีอาร์	42
รูปที่ 3.10 วงจรควบคุม เอสซีอาร์ ต่อ แบบ Bridge	43
รูปที่ 3.11 วงจรควบคุมระบบเอสซีอาร์	43
รูปที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง -15 V และ $+15\text{ V}$	45
รูปที่ 3.13 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง -12 V , $+12\text{ V}$ และ $+10\text{ V}$	46
รูปที่ 3.14 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง $+5\text{ V}$	46
รูปที่ 4.1 การปรับเลือกย่านต่างๆ ก่อนทดลองแบบ Manual	47
รูปที่ 4.2 การปรับเลือกย่านต่างๆ ก่อนทดลองแบบ Auto	49
รูปที่ 4.3 การทดสอบวัดค่าเกาส์มิเตอร์จากแท่งแม่เหล็กที่ได้จากการสร้าง	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.4 แม่เหล็กถาวรที่ได้จากเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	52
รูปที่ ก.1 รูปสำเร็จเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	57
รูปที่ ก.2 แผงชุดควบคุมเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	57
รูปที่ ก.3 ชุดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	58
รูปที่ ข.1 ชุดวงจร เอสซีอาร์ ต่อใช้งานแบบบริดจ์	60
รูปที่ ข.2 ชุดวงจรแมกเนติก	60
รูปที่ ข.3 โครงสร้างของชุดขดลวด	61
รูปที่ ข.4 โครงสร้างของชุดขดลวดมองจากด้านบน	61
รูปที่ ข.5 ชุดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	62
รูปที่ ข.6 ชุดสำเร็จรูปของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	62
รูปที่ ข.7 โครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	63
รูปที่ ข.8 โครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามองจากด้านหน้า	63
รูปที่ ข.9 ชุดวงจรเรกติไฟร์	64
รูปที่ ข.10 ชุดวงจรของ TCA785	64
รูปที่ ข.11 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และหน่วยแสดงผล	65
รูปที่ ข.12 ชุดวงจรรวมของไมโครคอนโทรลเลอร์	65
รูปที่ จ.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	100
รูปที่ จ.2 กล่องคีย์สำหรับป้องกันค่าเกินตามต้องการ	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญญานิพนธ์

เครื่องวัดเกาส์มิเตอร์จัดเป็นเครื่องมือวัดที่สำคัญอย่างหนึ่งในห้องทดลองเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก แต่ปัจจุบันเมื่อเกิดปัญหาเรื่องความละเอียดและความถูกต้องแม่นยำจากเครื่องวัดแล้วไม่ค่อยมีอุปกรณ์สำหรับปรับเทียบมาตรฐานให้สามารถอ่านค่าที่แน่นอนได้เช่นเดิม การจะปรับเทียบแต่ละครั้งต้องหาเครื่องมือสำหรับปรับเทียบซึ่งปัจจุบันมีน้อยและราคาแพง จึงได้มีแนวความคิดที่จะสร้างเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กที่เป็นตัวปรับเทียบมาตรฐานให้แก่เครื่องวัดเกาส์มิเตอร์ขึ้น โดยเครื่องนี้สามารถปรับเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้ ตั้งแต่ 0-1,200 เกาส์ และยังสามารถสร้างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้สูงถึง 10,000 เกาส์ ให้สามารถสร้างแท่งแม่เหล็กจากวัสดุสารแม่เหล็กขึ้นได้ ซึ่งอาจนำไปใช้กับอุตสาหกรรมบางประเภทได้ เช่น การทำลำโพง อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อำนาจแม่เหล็ก รวมไปถึง รีเลย์ มอเตอร์ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีแม่เหล็กเป็นส่วนประกอบเป็นต้น วัตถุประสงค์ของการทำโครงการนี้เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไว้ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

โครงการเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีขีดความสามารถดังนี้

- 1) เป็นเครื่องปรับเทียบให้กับเครื่องวัดเกาส์มิเตอร์ได้
- 2) กำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กได้ตั้งแต่ 0 – 1,200 เกาส์
- 3) ค่าความผิดพลาดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $\pm 5\%$
- 4) สามารถสร้างแท่งแม่เหล็กถาวรได้ โดยใช้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงถึง 10,000 เกาส์
- 5) แสดงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กโดย LED 4 หลัก

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาในปฏิญญาฉบับนี้ แบ่งออกเป็นบทต่างๆ เพื่อความสะดวกต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ ในแต่ละบทประกอบไปด้วยเนื้อหาสำคัญดังนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ ประกอบด้วยเรื่องหน้าที่และการทำงานของแท่งแม่เหล็ก ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็ก ปฏิกิริยาการเหนี่ยวนำของฟลักซ์ไฟฟ้า ไทริสเตอร์ และชุด TCA785

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยเรื่องโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ การออกแบบฮาร์ดแวร์ รวมถึงหลักการทำงานในส่วนต่างๆ ของฮาร์ดแวร์

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทดลอง และการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของโครงการนี้ เพื่อตรวจสอบว่าโครงการนี้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา เป็นการสรุปผลการทำงานและได้เสนอแนวทางการแก้ไขให้มีประสิทธิภาพและการใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

ในภาคผนวกแสดงรายละเอียดวงจร และรายการอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้จัดทำในโครงการนี้ ประกอบด้วย

- ภาคผนวก ก รูปต้นแบบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- ภาคผนวก ข ชุดวงจรและโครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในโครงการ
- ภาคผนวก ง โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน
- ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งานเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กล่าวนำ

เนื้อหาของปริญญาบัตรในบทนี้จะเป็นทฤษฎีและหลักการที่นำมาประกอบการสร้างโครงการ โดยประกอบด้วยเรื่องหน้าที่และการทำงานของแท่งแม่เหล็ก ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็กปรากฏการฮอลล์เอฟเฟค ไทริสเตอร์ และวงจรถ่ายผันสัญญาณ

2.2 หน้าที่และการทำงานของแท่งแม่เหล็ก

สินแร่แม่เหล็กเป็นแม่เหล็กธรรมชาติมีคุณสมบัติสามารถดูดเหล็กและนิกเกิลได้ คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า “คุณสมบัติแม่เหล็กแท่งแม่เหล็ก”

แท่งแม่เหล็กนั้น นอกจากจะเป็นสินแร่แม่เหล็กแล้ว อาจเป็นแม่เหล็กถาวรที่ทำเองในห้องทดลองหรือเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กก็ได้



(ก) แท่งแม่เหล็กแบบเข็มทิศ

(ข) แท่งแม่เหล็กรูปตัว U

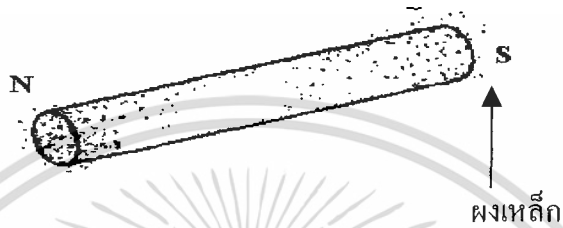
(ค) แท่งแม่เหล็กรูปตัว I

รูปที่ 2.1 แท่งแม่เหล็กในลักษณะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 คุณสมบัติแท่งแม่เหล็ก

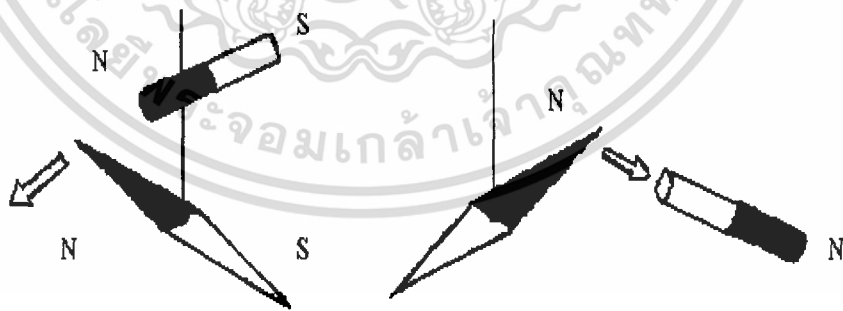
1) แท่งแม่เหล็กมีขั้วแม่เหล็ก เมื่อเอาผงเหล็กเทใส่แท่งแม่เหล็ก ผงเหล็กจะถูกดูดติดมากที่สุดที่ปลายทั้งสองข้างของแท่งแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.2 ทำให้ทราบว่าอำนาจแม่เหล็กจะแรงมากที่สุดบริเวณปลายทั้งสองข้างของแท่งแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่า “ขั้วแม่เหล็ก”



รูปที่ 2.2 ขั้วแม่เหล็ก

2) แท่งแม่เหล็กชี้ไปทางทิศเหนือได้ ถ้านำเข็มทิศแม่เหล็กหรือแท่งแม่เหล็กมาแขวนห้อยด้วยเส้นด้ายในแนวนอน แท่งแม่เหล็กจะชี้ไปในทิศทางเหนือได้ ขั้วที่ชี้ไปทางทิศเหนือ เรียกว่า “ขั้วเหนือ” N เป็นขั้วบวก และขั้วที่ชี้ไปทางทิศใต้ เรียกว่า “ขั้วใต้” S เป็นขั้วลบ

3) ขั้วเหมือนกันผลักกัน ขั้วต่างกันดูดกัน ถ้านำเข็มทิศแม่เหล็กมาแขวนในแนวนอน ดังรูปที่ 2.3 และถ้านำแท่งแม่เหล็กขั้ว N ของเข็มทิศจะเกิดแรงผลักกันขึ้น ดังรูปที่ 2.3 (ก) และถ้าวางแท่งแม่เหล็กขั้ว S เข้าใกล้ขั้ว N ของเข็มทิศ จะเกิดแรงดูดกันขึ้นดังรูปที่ 2.3 (ข)



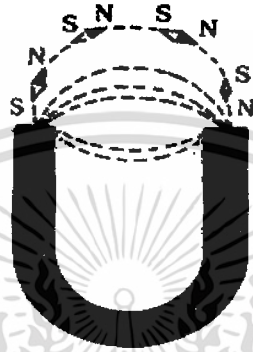
(ก) คุณสมบัติของแท่งแม่เหล็กที่ผลักกัน

(ข) คุณสมบัติของแท่งแม่เหล็กที่ดูดกัน

รูปที่ 2.3 คุณสมบัติของแท่งแม่เหล็ก

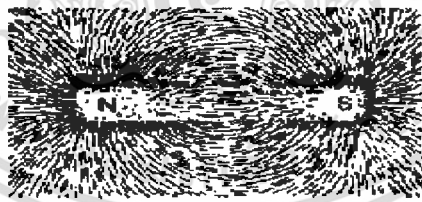
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเข็มทิศแม่เหล็กเล็กๆ เข้าใกล้แท่งแม่เหล็กรูปเกือกม้า แล้วตรวจดูทิศทางของเข็มทิศในตำแหน่งต่างๆ จะพบว่าทิศทางของเข็มทิศมีทิศทางต่อเนื่องที่แน่นอน ดังรูปที่ 2.4 และสามารถเขียนทิศทางต่อเนื่องนี้จากขั้ว N ไปขั้ว S ได้เป็นเส้นโค้ง ดังนั้น จึงมีแรงแม่เหล็กตามเส้นโค้งนี้จากขั้ว N ไปขั้ว S เรียกเส้นแรงนี้ว่า “เส้นแรงแม่เหล็ก” และบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่จะมีสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 แท่งแม่เหล็กรูปเกือกม้า

เมื่อนำกระดาษวางบนแท่งแม่เหล็ก โรยเศษผงเหล็กละเอียดบนกระดาษ แล้วเคาะด้วยนิ้วเบาๆ ผงเหล็กจะเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N ไป S อย่างสวยงาม ดังรูปที่ 2.5 จากภาพนี้จะทำให้สามารถมองเห็นลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน



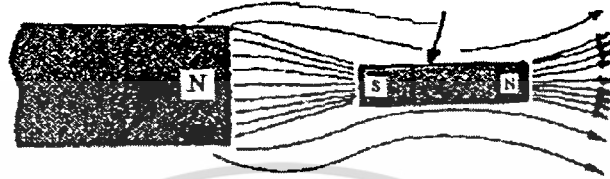
รูปที่ 2.5 เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N ไปขั้ว S

2.2.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

เหล็กหรือนิกเกิลซึ่งไม่มีความเป็นแม่เหล็ก แต่เมื่อนำเข้าใกล้แม่เหล็กจะถูกดูดได้ ทั้งนี้เพราะเหล็กและนิกเกิลจะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก โดยผลของสนามแม่เหล็กของก้อนแม่เหล็กที่นำมาดูด กล่าวคือ เมื่อนำขั้ว N ของแม่เหล็กเข้าใกล้แท่งแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.6 เส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจาก

แม่เหล็กจะผ่านเข้าไปในเนื้อของสารแท่งแม่เหล็กเหนียวทำให้เกิดขั้ว S ทางด้านใกล้กับแม่เหล็ก และขั้ว N ขึ้นทางด้านไกลแท่งแม่เหล็กปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า “การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก”

แท่งเหล็กกลายเป็นแม่เหล็ก



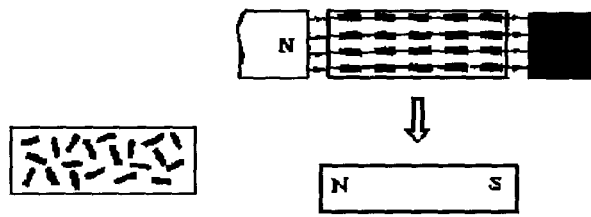
รูปที่ 2.6 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

ด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กนี้ แท่งเหล็กจึงกลายเป็นแม่เหล็กอันใหม่ขึ้น ขั้ว S ที่เกิดใหม่จึงคู่กับขั้ว N ของแม่เหล็กเดิม จึงดูเหมือนว่าแท่งเหล็กนั้นถูกแม่เหล็กดูดได้

ภายในเนื้อเหล็กหรือนิเกิลมีองค์ประกอบแม่เหล็กเหมือนกันแม่เหล็กเล็กๆ อยู่เต็มไปหมด เรียกว่า “โดเมนแม่เหล็ก” (Magnetic Domain) โดเมนแม่เหล็กนี้มีขนาดเล็กมาก ดังนั้น ในเนื้อเหล็กถึงแม้จะมีโดเมนแม่เหล็กจำนวนมากก็ตาม แต่ระยะทางระหว่างโดเมนแม่เหล็กเหล่านี้ยาวกว่าขนาดของโดเมนแม่เหล็กมาก ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากโดเมนแม่เหล็กแต่ละอันจะไม่มีอิทธิพลต่อกัน โดเมนแม่เหล็กจะมีอิทธิพลที่จะหันไปทางใดก็ได้ ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กจึงหักล้างกันเอง โดยรวมแล้วเป็นศูนย์จึงไม่แสดงอำนาจแม่เหล็กออกมาจากภายนอก

เมื่อมีการใส่สนามแม่เหล็กจากภายนอกเส้นแรงแม่เหล็กผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็ก โดเมนแม่เหล็กภายในจะเรียงตัวกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากโดเมนแม่เหล็กจึงมีทิศทางเดียวกันหมด และมีความแรงสูง จึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนก้อนแม่เหล็กได้

แต่ถ้านำทองแดงและอลูมิเนียมไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กจะไม่กลายเป็นแม่เหล็ก เพราะทองแดงและอลูมิเนียมไม่มีโดเมนแม่เหล็กนั่นเอง

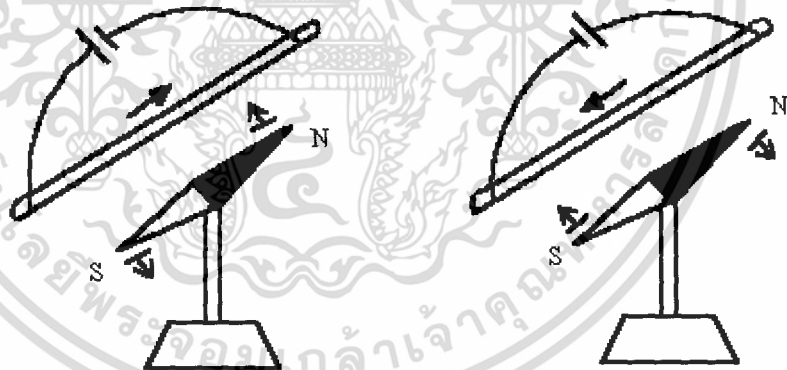


(ก) โดเมนแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก (ข) โดเมนแม่เหล็กเมื่อมีสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.7 โดเมนของวัสดุสารแม่เหล็ก

2.2.3 กระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำเข็มทิศแม่เหล็กเข้าใกล้เส้นลวดไฟฟ้าที่มีกระแสไหลผ่าน เข็มทิศจะหมุนตามทิศทางกระแสไหลของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8 จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่ากระแสไฟฟ้าสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกับก้อนแม่เหล็กนั่นเอง



(ก) สนามแม่เหล็กจากขดไปลบ

(ข) สนามแม่เหล็กจากลบไปบวก

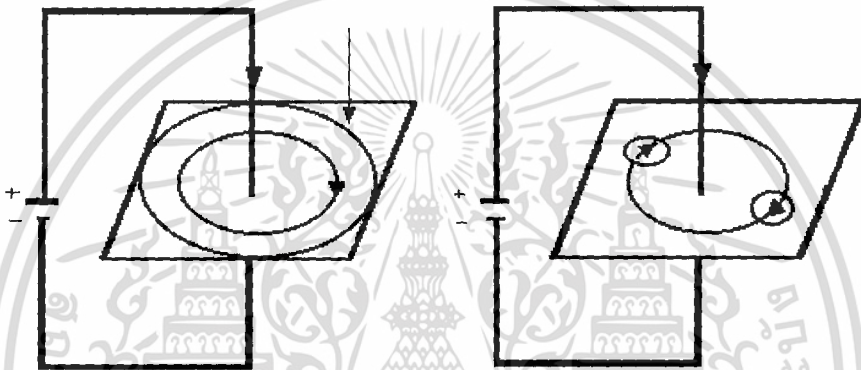
รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาสายไฟฟ้าร้อยผ่านรูกระดาษแข็ง ดังรูปที่ 2.9 (ก) แล้ว โยงผงเหล็กบนกระดาษแข็งนั้น เมื่อผ่านกระแสเข้าไปในเส้นลวด แล้วเคาะกระดาษแข็งนั้นเบาๆ ผงเหล็กจะเรียงตัวกันเป็นวงกลม โดยมีเส้นลวดไฟฟ้าเป็นศูนย์กลางและจะกระจายตัวกันอย่างหนาแน่น ถ้ายังใกล้เส้นลวดไฟฟ้านั้น จึงจะทราบว่ารอบๆ กระแสไฟฟ้านั้นมีเส้นแรงแม่เหล็กเป็นรูปวงกลม โดยกระแสไฟฟ้านั้นเป็นจุดศูนย์กลาง และยังใกล้เส้นลวดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กยิ่งหนาแน่นขึ้น

ผงเหล็กเรียงตัว

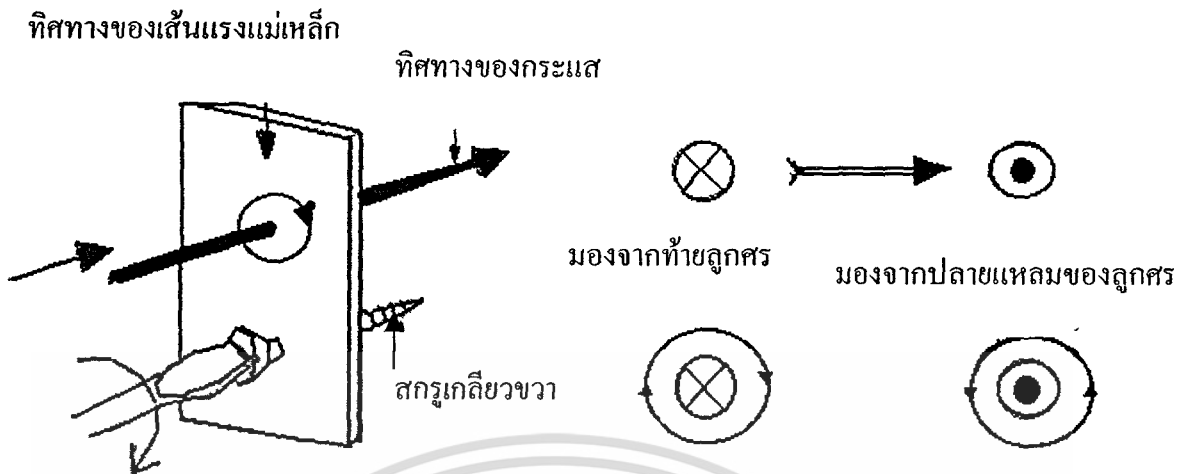
เป็นวงกลม



(ก) กระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็ก (ข) กระแสไฟฟ้าและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.9 (ข) เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในเส้นลวดไฟฟ้าที่ร้อยผ่านกระดาษ โดยมี เข็มทิศแม่เหล็กวางไว้บนกระดาษแข็งนั้นแทนที่ผงเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากเข็มทิศแม่เหล็กจะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เข็มทิศแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าและมีทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแส ไฟฟ้านั้นจึงได้กฎเกณฑ์ที่ว่า “เมื่อกระแสไฟฟ้าไปในทิศทางการชันสกรูเกลียวขวา ทิศทางของเกลียวขวาจะแสดงถึงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น” กฎข้อนี้เรียกว่า “กฎสกรูเกลียวขวา” ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนแสดงในรูปที่ 2.10 โดยที่เครื่องหมาย \otimes และ \odot แสดงถึง การไหลของกระแสไฟฟ้า \otimes หมายถึงปลายส่วนหาง และ \odot หมายถึง ปลายส่วนหัวของลูกศร ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็ก



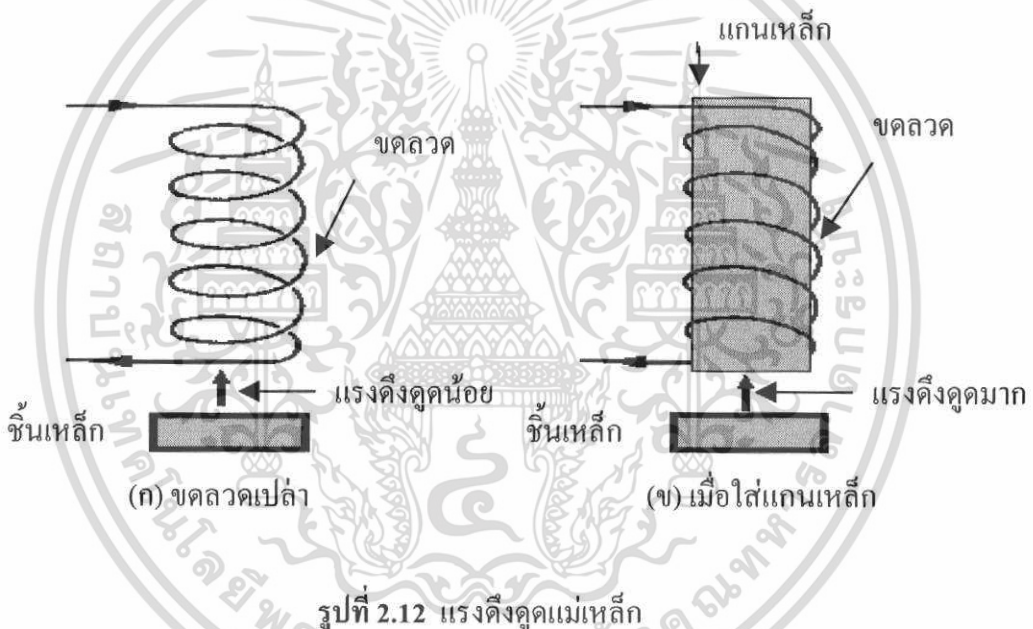
รูปที่ 2.11 ขดลวดและสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำเข็มทิศแม่เหล็กไปวางไว้ในขดลวดที่ขดไว้เพียงรอบเดียวดังรูปที่ 2.11 แล้วผ่านกระแสไฟฟ้า เข็มทิศจะเบนไปตามทิศทางที่เขียนแสดงไว้ในรูป โดยที่เครื่องหมายลูกศรแสดงถึง ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เมื่อตรวจสอบดูความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของกระแสและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก จะพบว่า เป็นไปตามกฎมือขวา เพียงแต่ในกรณีนี้ทิศทางกระแสเป็นทิศทางการหมุนของขดลวดและทิศทางขดลวดเลื่อนไปเป็นทิศทางของแม่เหล็ก

ถ้าขดเส้นลวดไว้หลายๆ รอบ แล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อตรวจสอบดูเส้นแรงแม่เหล็กด้วยเข็มทิศแม่เหล็ก จะพบว่าทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กจะขนานกับขดลวดนั้น ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กจึงทำหน้าที่คล้ายคลึงกับแท่งแม่เหล็ก แต่ไม่มีขั้วแม่เหล็ก

2.2.4 ขดลวดกับแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไหลผ่านเข้าใกล้ชิ้นเหล็กจะขยับเขยื้อนบ้าง แต่ไม่สามารถดูดติดขึ้นมาได้ ดังรูปที่ 2.12 (ก) เมื่อนำเอาแท่งเหล็ก (เรียกว่าแกนเหล็ก) สอดเข้าไปในขดลวด ชิ้นเหล็กจะถูกดูดอย่างแรง ดังรูปที่ 2.12 (ข) เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อขดลวดยังไม่มีแกนเหล็ก สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย และไม่มีขั้วแม่เหล็ก แต่เมื่อเอาแกนเหล็กใส่เข้าไปเหล็กมีคุณสมบัติเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กได้ดี เส้นแรงแม่เหล็กจึงรวมตัวกันหนาแน่นในแกนเหล็กนั้น โดเมนแม่เหล็กที่อยู่ในเนื้อเหล็กจะเรียงตัวในทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กนั้น แกนเหล็กจึงกลายเป็นแท่ง แม่เหล็กและให้เส้นแรงแม่เหล็กที่มีกำลังสูง แท่งแม่เหล็กที่ทำขึ้นเช่นนี้ เรียกว่า “แท่งแม่เหล็กไฟฟ้า”

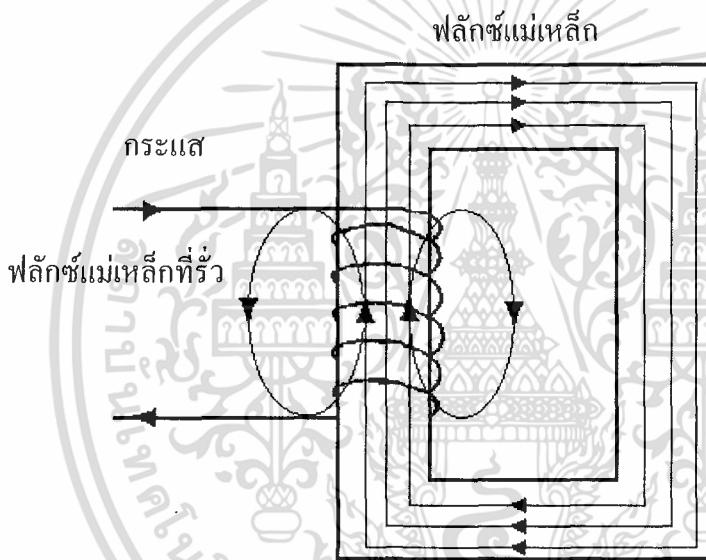


รูปที่ 2.12 แรงดึงดูดแม่เหล็ก

เมื่อหยุดกระแสที่ไหลผ่านขดลวด โดเมนแม่เหล็กในแกนเหล็กจะมีทิศทางกระจัดกระจายตามเดิมทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหายไป แกนเหล็กจึงไม่เป็นแม่เหล็กอีกต่อไป แต่มีเหล็กบางชนิดที่เมื่อตัดกระแสของขดลวดแล้วก็ยังเป็นแม่เหล็กอยู่ได้ เพราะโดเมนแม่เหล็กยังคงรักษาทิศทางเดิมไว้ได้ ดังเช่น แม่เหล็กรูปเกือกม้า หรือแท่งแม่เหล็กที่พุดถึงในตอนต้นนั่นเอง แม่เหล็กประเภทนี้เรียกว่า “แม่เหล็กถาวร”

2.2.5 ฟลักซ์แม่เหล็กและวงจรแม่เหล็ก

เมื่อผ่านกระแสในทิศทางเดียวกันเข้าไปในขดลวดแบบเดียวกัน การเป็นแม่เหล็กจะเหมือนกัน แต่ถ้าใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดนั้น การเป็นแม่เหล็กจะแรงขึ้นกว่าขดลวดเปล่าๆ เพราะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นด้วยอิทธิพลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า และที่เกิดจากเหล็กที่กลายเป็นแม่เหล็ก จึงทำให้ภายในเนื้อเหล็กมีเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น μ_r เท่ากับว่าเกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น (ใช้สัญลักษณ์ Φ) และค่า μ_r นี้เรียกว่า ค่าเพอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ทางแม่เหล็ก (Relative magnetic Permeability) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างแม่เหล็กของขดลวดเปล่าๆ กับขดลวดที่มีแกนเหล็ก



รูปที่ 2.13 วงจรแม่เหล็ก

เหล็กมีคุณสมบัติยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านได้สะดวกมาก ดังนั้นถ้าสร้างแกนเหล็กให้มีรูปร่าง ดังรูปที่ 2.13 แล้วนำไปพันด้วยขดลวดเพื่อทำแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะผ่านอยู่ในเนื้อแกนเหล็กเท่านั้น และจะมีฟลักซ์แม่เหล็กที่รั่วออกมาภายนอกก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แกนเหล็กนี้จึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก เช่นเดียวกับวงจรไฟฟ้าที่เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า ทางเดินที่ยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านได้นี้ เรียกว่า “วงจรแม่เหล็ก”

ฟลักซ์แม่เหล็กที่รั่วออกมาภายนอก เรียกว่า “ฟลักซ์แม่เหล็กรั่ว” ในกรณีของวงจรไฟฟ้านั้น เพื่อป้องกันกระแสรั่วจากเส้นลวดตัวนำ จะใช้ฉนวนมาห่อหุ้มเส้นลวดตัวนำนั้น ปริมาณกระแสรั่วจะ

ลดลงได้มาก แต่ในกรณีของวงจรมแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถผ่านในอากาศได้ ดังนั้น ฉนวนทางแม่เหล็กจึงกระทำได้น้อย ฟลักซ์แม่เหล็กจึงมีค่อนข้างมากในการใช้งานวงจร แม่เหล็กจะต้องคำนึงถึงฟลักซ์แม่เหล็กนี้ด้วย

2.2.6 สารแม่เหล็ก

สมมติว่ามีนิวเคลียสที่จุดศูนย์กลางเป็นศูนย์กลางล้อมรอบโดยอิเล็กตรอนที่โคจรใน วงโคจรต่างๆ รูปแบบนี้ปรากฏว่าให้ผลน่าพอใจทั้งในด้านผลลัพธ์และความเหมาะสมทางทฤษฎี อิเล็กตรอนในวงโคจรหนึ่งเปรียบได้กับวงรอบกระแสเล็กๆ ซึ่งจะปรากฏแรงบิดกระทำเมื่อมันอยู่ในสนามแม่เหล็กแรงบิดนี้จะพยายามทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากอิเล็กตรอนเบนเข้าหา สนามแม่เหล็กภายนอก ถ้าไม่คิดโมเมนต์แม่เหล็กอื่นจะสรุปได้ว่าวงโคจรของอิเล็กตรอนทุกตัวในเนื้อสารจะเบนในทิศทางซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากอิเล็กตรอนรวมเข้ากับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้น สนามแม่เหล็กลัพธ์ที่ใดๆ ในเนื้อสารจะมีค่าสูงกว่าขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอก

จากทฤษฎีควอนตัมสัมพัทธ์ (Relativistic Quantum Theory) อิเล็กตรอนตัวหนึ่งๆ มีโมเมนต์แม่เหล็กหมุน (spin magnetic moment) เท่ากับ $\pm 9.27 \times 10^{-24}$ แอมแปร์ / ตร.เมตร เครื่องหมายบวกและลบ หมายความว่า อาจมีทิศเดียวกันหรือตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกก็ได้ ในอะตอมซึ่งมีอิเล็กตรอนจำนวนมากเฉพาะในชั้นที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบเท่านั้นที่จะให้ค่าโมเมนต์แม่เหล็กหมุนได้

โมเมนต์ที่สามเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของนิวเคลียส (nuclear spin) แต่โมเมนต์นี้มีค่าเล็กน้อยมาก และไม่มีผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็กของสาร และจะไม่พิจารณาโมเมนต์นี้

สารแม่เหล็กที่จะกล่าวถึงเป็นชนิดแรก ได้แก่สารซึ่งอะตอมมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอิเล็กตรอนในวงโคจรรวมเข้ากับสนามแม่เหล็กที่เป็นผลจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน สนามแม่เหล็กลัพธ์นี้มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือโมเมนต์แม่เหล็กถาวร m_0 ของอะตอมหนึ่งๆ มีค่าเป็นศูนย์สารประเภทนี้เรียกว่าสารไดอะแมกเนติก (diamagnetic) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำถ้าอิเล็กตรอนในวงโคจรมีโมเมนต์อยู่ในทิศเดียวกันกับสนามภายนอกแล้วจะเป็นผลให้แรงหนีศูนย์กลางของอิเล็กตรอนสูงขึ้น โดยที่แรงดึงดูดมีค่าคงที่และถ้าสมมติว่ารัศมีของวงโคจรคงที่ ก็หมายความว่าความเร็วจะต้องลดลง ความเร็วที่ลดลงนี้ หมายความว่า ไดโพลโมเมนต์ลดลง ผลลัพธ์ คือสนามภายในเนื้อสารจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กภายนอก สารประเภทนี้ ได้แก่ บิสมีท ไฮโดรเจน ฮีเลียม โซเดียมคลอไรด์ ทองแดง ทอง ซิลิกอน เยอรมันเนียม กราไฟต์ กำมะถัน เป็นต้น

ในอะตอมของสารประเภทที่ผลจากการหมุนรอบตัวเอง และผลจากการโคจรของอิเล็กตรอนไม่หักล้างกันพอดี อะตอมหนึ่งๆ จึงมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กลัพธ์ไม่เป็นศูนย์ แต่เนื่องจากการเรียงตัวของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบในสารนั้นทำให้โมเมนต์แม่เหล็กมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ สารนี้จะไม่แสดง

คุณสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกปรากฏ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่ออะตอม ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในจะสูงกว่าสนามแม่เหล็กภายนอก ได้แก่ โบตัสเซียม ออกซิเจน ทั้งสเดน เป็นต้น และสารประเภทนี้เรียกว่า พาราแมกเนติก (Paramagnetic)

สารประเภทที่สาม คือ เฟอร์โรแมกเนติก แต่ละอะตอมของสารนี้มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กสูง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากโมเมนต์การหมุนของอิเล็กตรอนที่ไม่มีการชดเชย แรงแระหว่างอะตอมทำให้โมเมนต์เหล่านี้เรียงตัวขนานกันในบริเวณหนึ่งๆ ซึ่งมีอะตอมเป็นจำนวนมาก บริเวณเหล่านี้เรียกว่าโดเมน (domain) ซึ่งมีรูปร่างและขนาดต่างๆ กัน ตั้งแต่ขนาด 1 ไมครอนถึงหลายเซนติเมตร ขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่าง ชนิดของสาร และประวัติของสาร สารเฟอร์โรแมกเนติกที่ไม่เคยผ่าน สนามแม่เหล็กมาก่อนเลย จะมีโดเมนที่มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กแรงมาก แต่โดเมนเหล่านี้มีทิศทางแตกต่างกัน ผลลัพธ์คือ การหักล้างกันพอดี เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ โดเมนที่มีโมเมนต์ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีขนาดขยายแผ่ไปในบริเวณใกล้เคียงโดยรอบ และสนามแม่เหล็กภายในจะมีค่าสูงชันมากกว่าสนามภายนอกมากๆ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกเอาออกไป ส่วนมากโมเมนต์เหล่านี้จะไม่กลับเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเหมือนเดิม แต่จะมีสนามคงค้าง (residual field) ในโครงสร้างภาพ การที่โมเมนต์แม่เหล็กของสารเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำแตกต่างไปจากเมื่อเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกหรือกล่าวได้ว่า คุณสมบัติแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของประวัติทางแม่เหล็กนี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ตัวอย่างของสารแม่เหล็กประเภทนี้ได้แก่ เหล็กนิเกิล โคบอลต์ โลหะผสมอัลนิโก เป็นต้น

สารซึ่งแรงกระทำระหว่างอะตอมที่อยู่ติดกันทำให้เกิดโมเมนต์ของอะตอมและเมื่อ โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิเป็นศูนย์ เรียกว่า สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic) เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สารนี้ไม่มีความสำคัญทางวิศวกรรมแต่อย่างใด

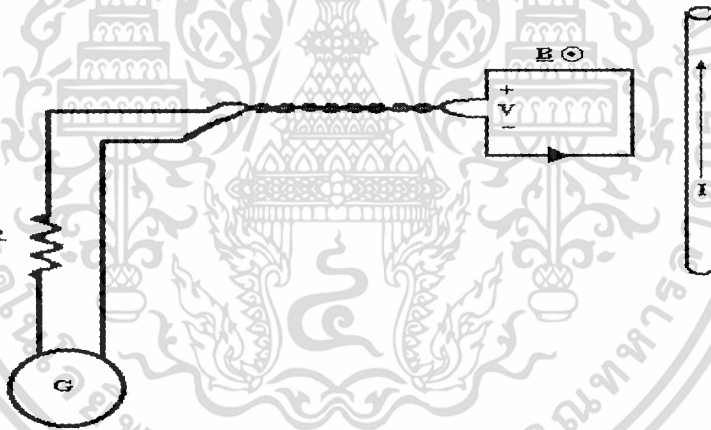
สารแม่เหล็กอีกประเภทหนึ่ง คือ สารเฟอร์ริแมกเนติก (Ferromagnetic) แสดงถึง ลักษณะด้านการเรียงตัวขนานกันของอะตอมประชิดกันเช่นกัน แต่โมเมนต์มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงมีผล ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกเกิดขึ้นแต่ไม่ทัดเทียมกับสารเฟอร์โรแมกเนติก กลุ่มโลหะที่สำคัญของสารนี้คือ เฟอร์ไรต์ ซึ่งมีค่าความนำต่ำ ค่าความนำของมันต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำหลายเท่าสารประเภทนี้จึงมีค่าความต้านทานสูงมากกว่าสารเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้น เมื่อสนามจากกระแสสลับปรากฏอยู่จึงเกิดกระแสเหนี่ยวนำในสารน้อยกว่า เช่น แกนของหม้อแปลงความถี่สูง กระแสไหลวนขนาดที่เล็กกว่านี้ให้ความสูญเสียในแกนหม้อแปลงน้อยลง ตัวอย่างของสารประเภทนี้ได้แก่ NiFe_2O_4

สารแม่เหล็กประเภทสุดท้าย คือ สารซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic) ประกอบด้วอนุภาคของสารเฟอร์โรแมกเนติกฝังอยู่ในเนื้อสารที่ไม่เป็นแบบเฟอร์โรแมกเนติก อนุภาคของสารเฟอร์โรแมกเนติก จะทำให้สารซูเปอร์พาราแมกเนติกมีคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวร ซึ่งอาจจะเปลี่ยน

แปลงได้โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ เทปแม่เหล็กที่ใส่ในเครื่องเล่นบันทึกเสียง และเทปบันทึกสัญญาณภาพ ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก เช่น ในบริเวณใกล้ตัวนำยาวอนันต์นำกระแส I ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก Φ อาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Phi = \pm \int_0^t v dt \quad (2.1)$$

โดย t ระยะเวลานับจากเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าศูนย์แล้วเพิ่มเป็นค่าสูงสุด หรือระยะเวลาเส้นแรงแม่เหล็กค่าสูงสุดแล้วนับลงมาเป็นศูนย์ ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองกรณีจะมีขนาดเท่ากัน แต่เครื่องหมายต่างกัน หน่วยของเส้นแรงแม่เหล็กคือ “เวเบอร์” ซึ่งสมมูลกับหน่วยใน สมการคือ “โวลต์-วินาที”



รูปที่ 2.14 การทดลองเพื่อวัดเส้นแรงแม่เหล็ก

สำหรับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) นั้น ในมิติว่างมีนิยามว่า

$$B = \mu_0 H \quad (2.2)$$

โดย B มีหน่วยวัดเป็นเกาส์ หรือ เวเบอร์ / ตร.เมตร หรือ หน่วยใหม่ที่ใช้ในระบบเอสไอ คือ เทสลา ซึ่งหน่วยทั้งสามมีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ 1 เวเบอร์ / ตารางเมตร = 1 เทสลา = 10^4 เกาส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_0 เรียกว่าเพอร์มิบิลิตีของมิดิวว่าง หรือความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของมิดิวว่างซึ่งมีค่าคงที่ ดังนี้

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ เฮนรี / เมตร} \quad (2.3)$$

เนื่องจาก H มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร ดังนั้น เวเบอร์จึงมีมิติเท่ากับผลคูณของเฮนรีกับแอมแปร์ เฮนรีเป็นหน่วยในระบบใหม่ แต่เวเบอร์เป็นชื่อย่อที่สะดวกในการแทนผลคูณของเฮนรีกับแอมแปร์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B นับเป็นสมาชิกของประเภทความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในสนามเวกเตอร์ คุณสมบัติเปรียบเทียบแทนกันได้ (analogy) ระหว่างสนามไฟฟ้าสถิตย์กับสนามแม่เหล็ก ในขั้นนี้จะขยี้มากล่าวถึงได้ 3 คู่ คือ ระหว่าง H กับ E, $B = \mu_0 H$ กับ $D = \epsilon_0 E$ และ Φ กับ ψ สำหรับ Φ นั้นมีความแตกต่างจากเส้นแรงแม่เหล็กเล็กน้อย คือ

$$\psi = \oint_s D \cdot ds \quad (2.4)$$

ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นคูลอมบ์ โดย ψ มีกำเนิดมาจากประจุ Q และเส้นแรงแม่เหล็กที่มีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ประจุเสมอ

2.3 ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็ก

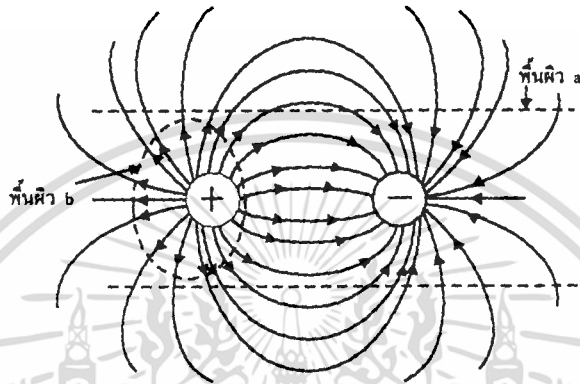
2.3.1 สมการของแมกซ์เวลล์

กฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งอธิบายสนามไฟฟ้าได้โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้านั้น

กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า กล่าวว่าฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดหรือผลรวมขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ซึ่งอยู่ตามแนวตั้งฉาก และผ่านออกมาจากผิวที่ปิดสนิทจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลรวมของประจุที่อยู่ในผิวนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\psi = \sum (En \Delta S) = \frac{1}{\epsilon_0} Q \quad (2.5)$$

โดยที่จะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายประจุด้วย ทั้งนี้ เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเริ่มจากประจุไฟฟ้าบวกไปสิ้นสุดที่ประจุไฟฟ้าลบ กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้านี้เริ่มใช้กับปรากฏไฟฟ้าสถิตย์อันเป็นกรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าที่ไม่แปรเปลี่ยนกับเวลา และกฎนี้สามารถใช้ได้กับกรณีเมื่อสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา คือ เป็นฟังก์ชันของเวลาด้วย



รูปที่ 2.15 ฟลักซ์จากสองประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน

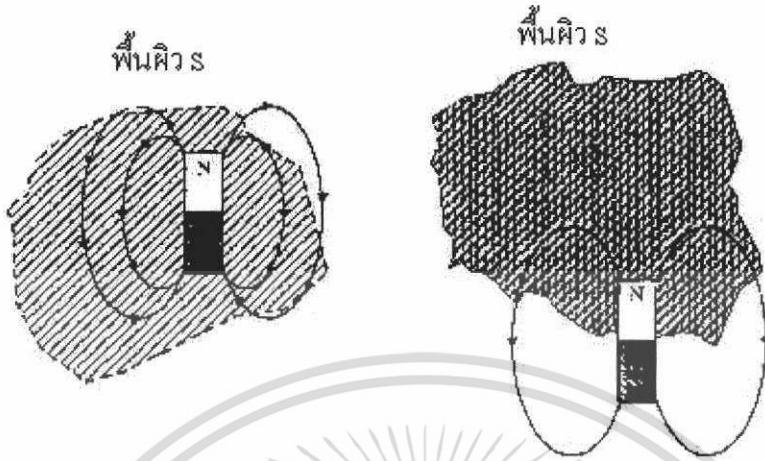
กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก (Gauss's law for magnetism) กฎนี้ใช้อธิบายสนามแม่เหล็ก มีความคล้ายคลึงกับกฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้าสถิตย์

กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ กล่าวว่า ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวที่ปิดสนิท ซึ่งภายในอาจมีหรือ ไม่มีแท่งแม่เหล็กเลยก็ตาม จะเป็นศูนย์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Phi = \sum (B_n \Delta s) = 0 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) มีความคล้ายคลึงกันซึ่งสมการที่ (2.6) นี้ อาจเขียนแทนได้จากสมการที่ (2.5) โดยแทน Ψ และ E และ Φ และ E ตามลำดับ ส่วนทางขวามือสมการเป็นศูนย์เนื่องมาจากในการทดลองยังไม่เคยพบว่ามีขั้วแม่เหล็กเดี่ยว ไม่เหมือนประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ ซึ่งอยู่เป็นอิสระได้โดยลำพัง หมายถึงว่า ในผิวที่ปิดใดๆ เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านการออกไปจากผิวต้องสวนกลับเข้าในผิวด้วย ผลลัพธ์สุทธิจึงเป็นศูนย์เสมอ ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเป็นปริมาณโดยตรงกับเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์ไปด้วย กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ใช้ได้ทั้งกรณีที่สนามแม่เหล็กคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็กที่อยู่ภายในผิว เป็นศูนย์ (ข) ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็กอยู่ภายในผิว ปิดที่ขั้วเดียวจะเป็นศูนย์

รูปที่ 2.16 ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็ก

จากผลสรุปที่กล่าวไว้ว่า “จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปจากเดิม” หรือ มีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น

กฎของฟาราเดย์และเฮนรี่สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Faraday Henry’s law of induce electromotive force) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และฟลักซ์ ไฟฟ้าที่ เปลี่ยนไป $\Delta\Phi$ กับเวลา Δt คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เท่ากับค่าลบของอัตราการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.7)$$

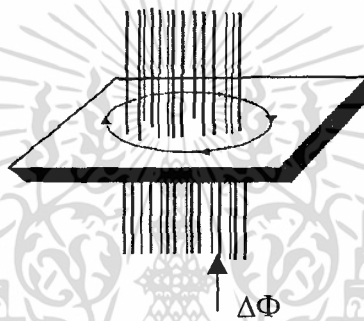
เครื่องหมายลบปรากฏในสมการเป็นการแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทิศทางที่ต่อต้านการเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามกฎเกณฑ์ทั่วไปในธรรมชาติที่ว่าหากมีการ เปลี่ยนแปลงก็จะมีควมพยายามที่จะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงนั้น ทั้งนี้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ งานที่ต้องกระทำต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้า ในการที่จะทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามเส้นล้อมรอบ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณาไว้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจเขียนให้อยู่ในรูปเป็นผลบวกของผลคูณของแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าหนึ่งหน่วย คือ $E\ell$ หรือ องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า E เมื่อคิดในแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนานกับระยะทางคิดเป็นช่วงสั้นๆ ΔL ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นซึ่งล้อมฟลักซ์ แม่เหล็กนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} \quad \Sigma(E_T \Delta L) = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.8)$$

หรือเรียกอีกนัยหนึ่ง การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบเส้นที่ล้อมรอบปิดพื้นที่บริเวณหนึ่งไว้เป็นค่าลบของอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งผ่านและตั้งฉากกับพื้นที่ล้อมปิดดังกล่าว



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กกับเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นรอบฟลักซ์แม่เหล็กนั้น

ความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้านี้ระบุว่าการหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กรอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่หนึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและตั้งฉากกับพื้นที่ล้อมปิดนั้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

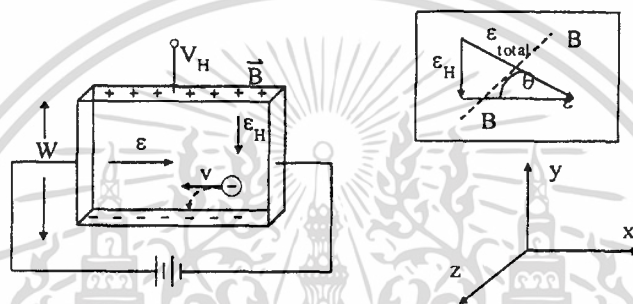
$$\Sigma(B_T \Delta L) = \mu \quad (2.9)$$

เมื่อ B_T เป็นองค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก B ที่ขนานกับระยะเส้นทาง ΔL ที่ล้อมปิดบริเวณสนามแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นไม่เพียงเฉพาะบริเวณใกล้กับที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นด้วยหากสนามไฟฟ้าแปรไปกับเวลา ซึ่งเขียนเป็นสมการที่ 2.10 ได้ดังนี้

$$\Sigma(B_r \Delta L) = \mu_0 (I + \epsilon_0 - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}) \tag{2.10}$$

หรืออีกนัยหนึ่ง การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กที่เส้นที่ล้อมปิดพื้นที่บริเวณหนึ่งไว้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงไฟฟ้าในบริเวณนั้น

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟค



(ก) ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟคในสารกึ่งตัวนำ (ข) ปรากฏการณ์มุมของฮอลล์

รูปที่ 2.18 ปรากฏการณ์ของฮอลล์เอฟเฟค

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.18 เมื่อมีสนามแม่เหล็ก (ทิศทางตั้งฉากกับ J และพุ่งออกจากกระดาษ) อิเล็กตรอนจะได้รับแรงลอเรนซ์ และเคลื่อนที่โค้งลงด้านล่าง ทำให้ฟิวด้านล่างลดลงเป็นลบเมื่อเทียบกับฟิวด้านบน และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในทิศทาง -Y เรียกว่า สนามของฮอลล์ (Hall Field) สนามไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทาง +Y ในสภาวะคงที่ แรงจากสนามแม่เหล็กและจากสนามของฮอลล์จะเท่ากัน

$$e\mathcal{E}_H = eBV \tag{2.11}$$

ในกรณีของอิเล็กตรอนเนื่องมาจาก $J = -env$

$$-\frac{1}{n_e} = \frac{\mathcal{E}_H}{B_j} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า \mathcal{E}_H / B_y เป็นค่าคงที่ ซึ่งเรียกกันว่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient) หรือค่าคงตัวของฮอลล์ (Hall constant) แทนด้วย R ดังนี้

$$R_c = -\frac{1}{n_e} = \frac{\mathcal{E}_H}{B_y} \quad (2.13)$$

และในกรณีของโฮลก็เช่นเดียวกันยกเว้นประจุของโฮลซึ่งเป็นบวกและทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เป็นบวกไปด้วย

$$R_h = \frac{1}{p_e} = \frac{\mathcal{E}_H}{B_y} \quad (2.14)$$

ในกรณีที่พาหะนำประจุชนิดเดียว จาก $eEH = eVB$ หรือ $V = \mathcal{E}_H / B$ และจากนิยามของความคล่องตัว (v ในที่นี้ คือ Drift velocity) ดังนั้น \mathcal{E} คือ สนามไฟฟ้าในแนว X หรือ คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแบตเตอรี่หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านนอกนั่นเอง ดังรูปที่ 2.18

เนื่องจากผิวของสักร์ไฟฟ้าคงที่ (Constant potential) จะตั้งฉากกับเส้นของสนามไฟฟ้า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจะมีบางจุด เช่น B และ B' ซึ่งมีความต่างศักย์เป็นศูนย์ จากรูปที่ 2.18 $\mathcal{E}_H / \mathcal{E}$ มีค่าเท่ากับ $\tan \theta$ ดังนั้น μ นี้เรียกว่า มุมของฮอลล์ดังนี้

$$\mu = \frac{\tan \theta}{B} \quad (2.15)$$

ความคล่องตัวนี้ยังอาจวัดได้อีกวิธีหนึ่งจากการทดลองของฮอลล์ คือ ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิด N แทนค่า n_e จากสมการที่ 2.16 จะได้

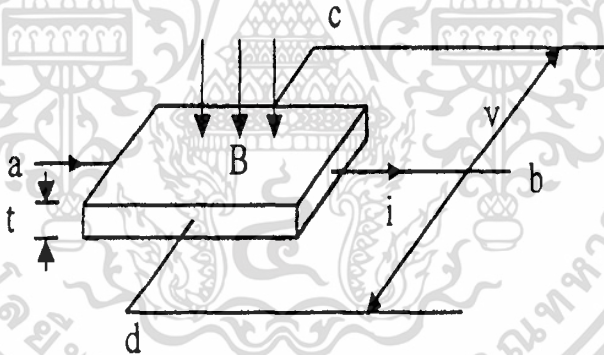
$$\sigma_c = n_e \mu_e \quad (2.16)$$

สำหรับกรณีของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด P จะได้สมการคล้ายๆ กัน ดังนั้น ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถวัดได้จากการนำไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากสารกึ่งตัวนำ

เอกซ์ทรินซิก (Extrinsic semiconductor) ค่า σ_r นี้เรียกว่าความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility) และเขียนย่อๆว่า μ_H จะเห็นว่าวิธีการของฮอลล์เอฟเฟกต์ทำให้สามารถวัดความหนาแน่นของพาหะนำประจุและความคล่องตัวของพาหะนำประจุของสารกึ่งตัวนำนั้นได้

ในกรณีที่ต้องพิจารณาทั้งอิเล็กตรอนและโฮลพร้อมๆ กันจะต้องมีการแก้สมการใหม่ให้ถูกต้อง จากรูปที่ 2.18 (ก) สนามไฟฟ้า E อยู่ในทิศทาง X และขณะเดียวกันสนามแม่เหล็ก B ในทิศทาง Z เนื่องจากสนาม E จะเกิดกระแส โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายไปทางซ้ายและโฮลไปทางขวาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลในสนามแม่เหล็กนี้ทำให้มันได้รับแรงลอเรนซ์ และทิศทางเปลี่ยนแปลงไปคือทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่ลงไปสู่ผิวด้านล่าง ดังรูปที่ 2.18 (ก) และเกิดการหักล้างกันเกิดขึ้น การหักล้างนี้จะไม่หมดไปอย่างสิ้นเชิงและทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวด้านล่าง เนื่องจากสารจะต้องเป็นกัลทางไฟฟ้า ดังนั้น จะเกิดประจุตรงกันข้ามขึ้นที่ผิวดอนบน และเกิดสนามไฟฟ้าที่แกน Y ขึ้นซึ่งเรียกว่า “สนามของฮอลล์”

2.4.1 ฮอลล์เอฟเฟกต์



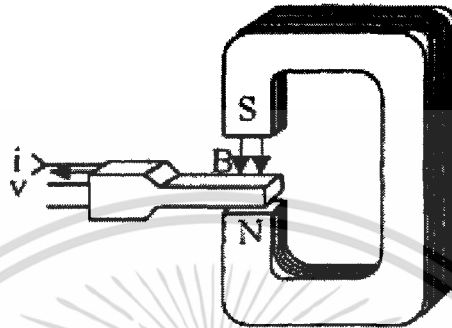
รูปที่ 2.19 หลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์

ในรูปที่ 2.19 ให้กระแส i ไหลผ่านในสารกึ่งตัวนำ เช่นเจอร์มาเนียมที่มีความหนา t (m) ซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นของฟลักซ์ B (Wb/m^2) ในแนวตั้งฉากกับระนาบ (plane) ของสารกึ่งตัวนำนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า V (v)ในแนวตั้งฉากกันทั้ง B และ i ดังนี้

$$V = \frac{\eta_i B}{t} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ของฮอลล์” (Hall effect) และ $\eta(\text{m}^2/\text{C})$ เรียกว่า “สัมประสิทธิ์ของฮอลล์” (Hall coefficient) ถ้าทราบค่า η t และ i เราจะหา B ได้โดยการวัด V



รูปที่ 2.20 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจเนอเรเตอร์

ฮอลล์เจเนอเรเตอร์มีขนาดเล็กมาก จนไม่สามารถนำไปใช้วัด ความหนาแน่นฟลักซ์ในทีแคบๆ เช่นแสดงในรูปที่ 2.20 การปรับเทียบทำได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าของเจเนอเรเตอร์ โดยทั่วไปจะมี แม่เหล็กถาวรชิ้นเล็กๆ ซึ่งให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ทราบค่าติดอยู่ด้วยเพื่อใช้ในการปรับเทียบ

2.5 ไทริสเตอร์และการเรียงกระแสที่มีการควบคุม

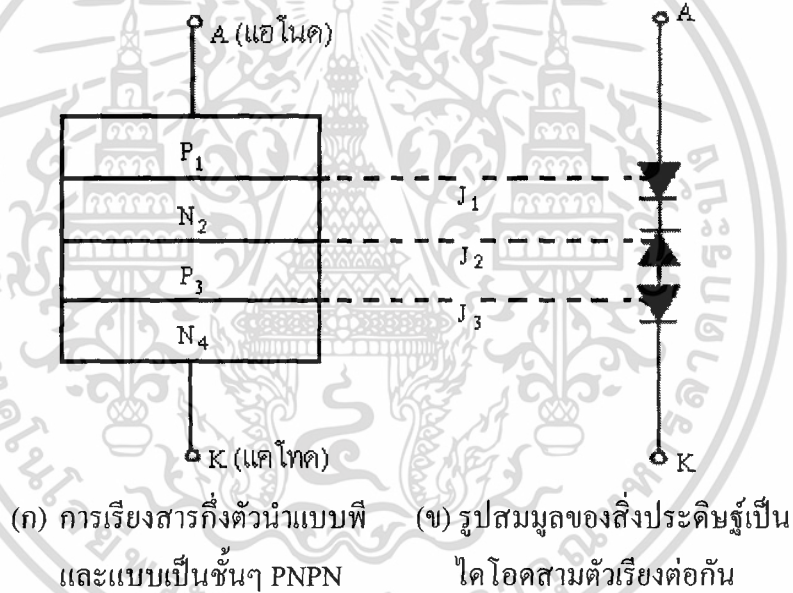
ไทริสเตอร์เป็นชื่อรวมหรือชื่อตระกูล (Family Name) ของสิ่งประดิษฐ์ทางสถานะของแข็ง (Solid-state) ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเอ็นเรียงสลับกันเป็นชั้นๆ ตั้งแต่สี่ชั้นขึ้นไปซึ่งจะทำให้เกิดมีรอยต่อพีเอ็นสามรอยต่อขึ้นไปเรียงกันเป็นอนุกรม (รูปที่ 2.21) สามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดวงจร สามารถควบคุมจังหวะการเปิดให้นำกระแสได้ สามารถนำไปควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ และถูกแบ่งให้เป็นสวิตช์แบบที่ 2 ผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2500 โดยบริษัทเจเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric Company)

ไทริสเตอร์มีสมาชิกหลายชนิด ซึ่งอาจมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทางเดียว หรือให้กระแสไหลได้สองทางและอาจมีขั้ว สองขั้ว สามขั้วหรือสี่ขั้ว ดังเช่น

เอสซีอาร์ (Silicon Controlled Rectifier) เป็นไทรสเตอร์ชนิดที่มีสามขั้ว คือ แอนโอด แคโทด และเกต มีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียวจากแอนโอดไปยังแคโทด และอาจเรียกชื่อว่า “ไดรโอดไทรสเตอร์” ที่กั้นไม่ให้กระแสไหลกลับ

ไทรแอก (Triode Ac Switch: Triac) เป็นไทรสเตอร์ชนิดที่มีสามขั้ว คือ เกต และอีกสองขั้วเป็นได้ทั้ง แอนโอด และแคโทด เพราะว่ามีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้สองทิศทาง และอาจเรียกชื่อว่า “ไดรโอดไทรสเตอร์” ที่ทำให้กระแสไหลได้สองทิศทาง (Bidirection Triode Thyristor)

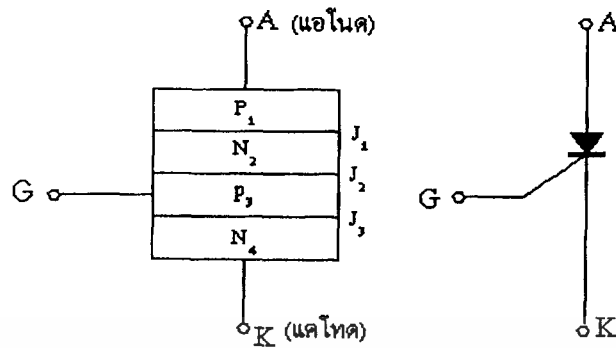
เอสยูเอสหรือช็อคเลย์ไดโอด (Silicon Unilateral Switch: SUS หรือ Shockley Diode) เป็นไทรสเตอร์ชนิดที่มีสองขั้ว คือ แอนโอดกับแคโทด และมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว เป็นต้น



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของไทรสเตอร์

2.5.1 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นไทรสเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วเรียกว่า แอนโอด (A) แคโทด (K) และเกต (G) ซึ่งมีโครงสร้างรูปที่ 2.22 (ซึ่งเป็นรูปโครงสร้างของ เอสยูเอส) ยกเว้นแต่ว่าที่ชั้นของสารพี (P) มีขั้วเกต (G) เข้าต่อดังรูปที่ 2.22 (ก) และเขียนสัญลักษณ์แทนดังรูปที่ 2.22 (ข)



(ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์

(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

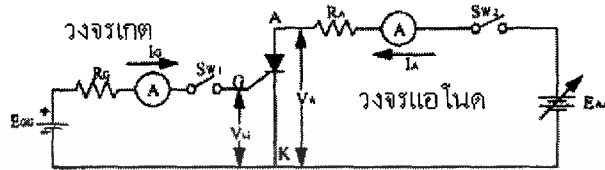
รูปที่ 2.22 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เมื่อต่อเอสซีอาร์เข้ากันกับวงจรไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.23 (ก) ถ้าปิดสวิตช์ Sw_1 และ Sw_2 ลงแล้ว ปรับค่าแรงดันเลี้ยงวงจรแอโนด E_{AA} และวงจรเกต E_{GG} ให้เหมาะสม จะได้เส้นโค้งลักษณะสมบัติดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ข) โดยให้ยึดถือหลักที่ว่ากระแสแอโนด I_A และกระแสเกต I_G มีค่าบวกถ้ากระแสไหลเข้าสู่ขั้วเอสซีอาร์ และแรงดันแอโนด V_A และแรงดันเกต V_G มีค่าบวกถ้าแอโนดและเกตมีศักย์สูงกว่าแคโทด ดังรูปที่ 2.23 (ก)

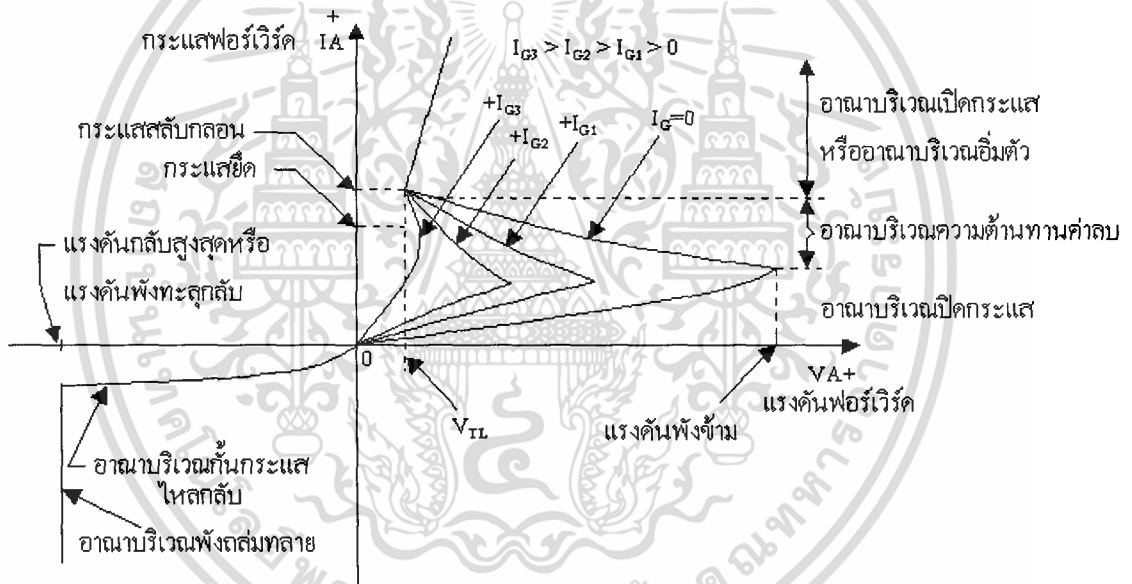
ในการเริ่มต้นการทดลองให้เปิดสวิตช์ Sw_1 ไว้ ปิดสวิตช์ Sw_2 ลง และให้แรงดันแอโนด V_A มีค่าเริ่มต้นจากน้อยไปหามาก โดยให้ $I_G = 0$ แล้วเพิ่มค่าแรงดันแอโนดจากศูนย์ให้สูงขึ้นทางบวกหรือในทิศทางลบ เราจะเห็นกระแส I_A เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเรียกว่า “เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแส” แต่เมื่อแรงดัน V_A เพิ่มขึ้นถึงค่า $V_{(BO)}$ ซึ่งเรียกว่า “แรงดันพังข้าม” (Breakover Voltage) แล้ว เอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้เองโดยต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง ซึ่งจะเรียกว่า “เวลาเปิดกระแส” (Turn-on Time) เรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณปิดกระแสหรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิศทางลบ” (Cut-off Region or Forward Blocking Region)

ถ้าควบคุมกระแส I_A ให้เพิ่มค่าสูงขึ้นทีละน้อยด้วยการเพิ่มค่าแรงดันแอโนด E_{AA} จะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ V_A ดังรูปที่ 2.23 (ข) ซึ่งเมื่อภายหลังที่ค่าแรงดัน V_A นี้ได้ผ่านค่าแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ แล้วสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้ออกได้เป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงที่แรงดันแอโนด V_A ลดค่าลงจากแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$ ไปสู่ค่า V_H และกระแส I_A เพิ่มขึ้นจากค่า I (อยู่ตรงจุดเกินแรงดันพังข้าม $V_{(BO)}$) ไปสู่ค่า I_H (อยู่ตรงจุดเกิด V_H) โดยกระแส I_H นี้เป็นค่ากระแสที่น้อย

ที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแส เรียกกระแสนี้ว่า “กระแสยึดหรือกระแสโฮลดิ้ง” (Holding Current)



(ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงและแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก



(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

รูปที่ 2.23 ลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

ในช่วงนี้เป็นช่วงของการที่เอสซีอาร์กำลังเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณของการต้านทานค่าลบ” (Negative Resistance Region) ช่วงที่สองเป็นช่วงที่กระแส I_A มีค่าใหญ่กว่ากระแสยึด I_H เล็กน้อยไปจนถึงค่าที่ใหญ่มากมาย โดยแรงดัน

แอนโตนเพิ่มค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งจะเรียกช่วงที่สองนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแสหรืออาณาบริเวณอิ่มตัว” (High Conduction Region หรือ Saturation Region) กระแส I_A ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้มีค่าใหญ่มาก จะสามารถทำอันตรายต่อเอสซีอาร์ ทำให้ชำรุดเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทาน R_A ที่มีค่าใหญ่ เข้าต่ออนุกรมในวงจรแอนโตนเพื่อจำกัดกระแส I_A ไม่ให้ใหญ่มากเกินไป ถ้าต้องการให้เอสซีอาร์ที่อยู่ในสถานะเปิดกระแสเปลี่ยนกลับไปสู่สถานะปิดกระแสให้เรลลกระแสแอนโตน I_A ให้มีค่าต่ำกว่า กระแสยึด I_H ในขณะที่ $I_G = 0$ ยังมีกระแสอีกชื่อหนึ่งคือ “กระแสสลักกลอน” (Latching Current) I_L ซึ่งนิยามว่าเป็นกระแสที่เล็กที่สุดที่สามารถรักษาเอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแสโดยปลดเอา สัญญาณป้อนเข้าเกตออก ซึ่งเมื่อได้ ลดกระแส I_H ให้ต่ำกว่ากระแส I_L ได้แล้วเอสซีอาร์จะหยุดเปิด กระแส เรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแสหรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิสฟอว์เวิร์ด” การเปลี่ยน สถานะนี้ต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “เวลาปิดกระแส” (Turn-off Time) t_q การลดกระแสแอนโตน ให้ต่ำกว่ากระแสสลักกลอน I_L แล้วเปลี่ยนกลับเพิ่มกระแสสูงขึ้นไปในระยะเวลาที่สั้นกว่าเวลาปิด กระแสเอสซีอาร์ แล้วเอสซีอาร์จะเข้าสู่สถานะเปิดกระแสต่อไปตามเดิม กระแสเกต I_G มีอิทธิพลมากใน การช่วยเอสซีอาร์จากสถานะปิดกระแสเข้าสู่สถานะเปิดกระแสได้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องใช้แรงดันแอนโตน V_A สูงมาก ซึ่งเมื่อจัดให้ I_G มีค่าใหญ่มากขึ้นจะยิ่งทำให้แรงดันพังข้ามของเอสซีอาร์ต่ำลง

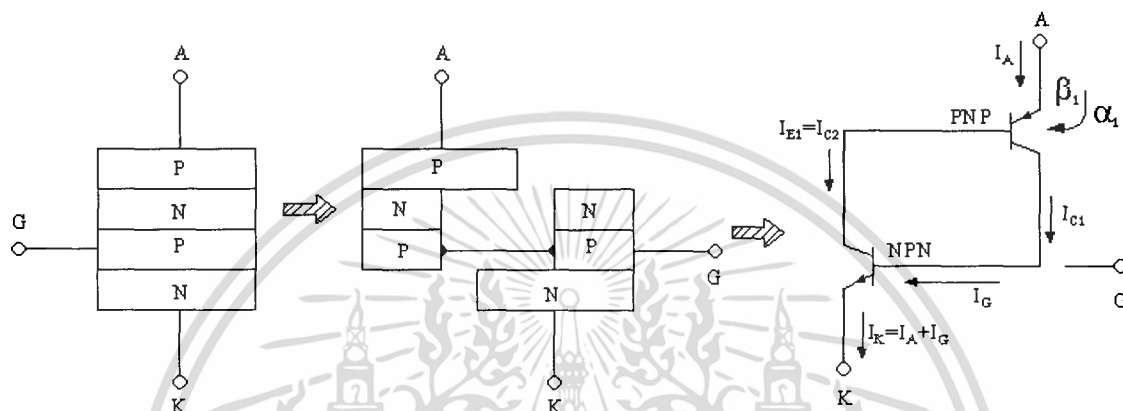
เมื่อจัดให้แรงดันแอนโตน V_A มีค่าลบ หรือมีแรงดันกลับ (Reverse Voltage) กระแสแอนโตนจะ ไหลกลับทางและมีค่าน้อยมาก ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณกั้นกระแสไหลกลับ” (Reverse Blocking Region) ต่อเมื่อเพิ่มค่าแรงดันแอนโตนค่าลบไปจนถึงค่าที่เรียกว่า “แรงดันพังทะลุกลับ” (Reverse Breakdown Voltage) กระแสแอนโตนจะไหลเพิ่มค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไป ผู้ผลิตเอสซีอาร์จะ ออกแบบให้เอสซีอาร์มีค่าแรงดันพังทะลุกลับมีค่าเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่าแรงดันพังข้ามทิสฟอว์เวิร์ดใน ขณะ $I_G = 0$

สามารถอธิบายกลไกการทำงานของเอสซีอาร์ได้ โดยอาศัยทฤษฎีของรอยต่อ PN หรือโดย อาศัยวงจรสมมูลแบบทรานซิสเตอร์ ซึ่งในที่นี้ขออธิบายด้วยวิธีหลังวิธีเดียว คือ คิดให้เอสซีอาร์มีโมเดล เป็นทรานซิสเตอร์ โดยการให้ชั้น PNPN ของเอสซีอาร์ถูกแบ่งออกเป็นตัวทรานซิสเตอร์ NPN และ PNP สองตัวเข้าต่อกันด้วยวิธีการป้อนกลับค่าบวกดังรูปที่ 2.24

เมื่อป้อนแรงดันแอนโตนในทิสฟอว์เวิร์ดให้กับเอสซีอาร์ ซึ่งทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวจะมีแรงดัน เข้าไปเลี้ยงอิมิตเตอร์ (Emitter) และคอลเล็กเตอร์ (Collector) ในทิสฟอว์เวิร์ดหากแต่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองยังอยู่ในสถานะปิดกระแส ต่อมาเพิ่มแรงดันแอนโตนถึงค่าแรงดันพังข้าม $V_{(Bo)}$ คอลเล็กเตอร์ของ ทรานซิสเตอร์ของเอ็นพีเอ็นซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ตัวล่าง จะมีศักย์ลบปรากฏอยู่จะเข้าไปกระตุ้นเบส ของทรานซิสเตอร์ PNP ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดการนำกระแสคอลเล็กเตอร์ของ ทรานซิสเตอร์ตัวบนจึงมีศักย์บวกปรากฏว่าสูงขึ้น และส่งเข้ากระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปิดการนำกระแสให้มากขึ้น ซึ่งผลอันนี้จะวนกลับมากระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ของตัวล่างอีก กระบวนการนี้จะเป็นการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งผลสุดท้ายจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวนำกระแสอยู่ในสถานะอิ่มตัว ทำให้มีกระแสแอมโตนของเอสซีอาร์ไหลได้สูงมากและเอสซีอาร์เข้าอยู่ในสถานะเปิดกระแส



รูปที่ 2.24 รูปแบบจำลองของเอสซีอาร์แบบวงจรทรานซิสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก

ถ้าต้องการให้เอสซีอาร์เปลี่ยนจากสถานะเปิดกระแสกลับเข้าสู่สถานะปิดกระแส ก็ต้องลดขนาดของกระแสแอมโตน I ลงให้ต่ำกว่ากระแสยึด I (ถ้า $I > 0$) กระแสคอลเล็กเตอร์ตัวบนจะลดต่ำลงมากไม่พอที่จะกระตุ้นให้เบสของทรานซิสเตอร์ตัวล่างเปิดให้กระแสได้ต่อไป ดังนั้น สักยที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวล่างก็จะลดน้อยลงและไม่พอที่จะไปกระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดนำกระแสต่อไปอีก ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ดังนั้น เอสซีอาร์จึงกลับเข้าสู่สถานะปิดกระแส

2.5.2 การเปิดกระแสของเอสซีอาร์

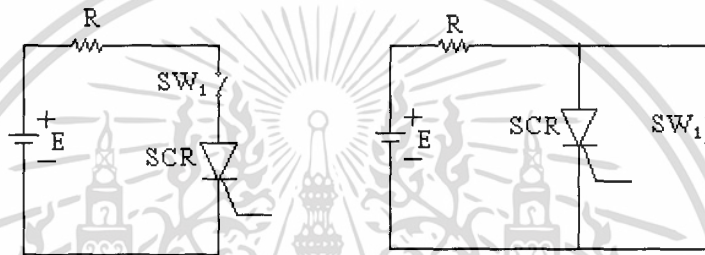
การเปิดกระแสของเอสซีอาร์มีความถึงการหยุดนำกระแสในทิสฟอ์เวิร์ดทั้งหมดของเอสซีอาร์ทำได้โดยที่ป้อนแรงดันกลับคืนเข้ากับแอมโตนใหม่ และไม่ป้อนสัญญาณเกตอีก รวมถึงการไม่มีเปิดกระแสขึ้นอีก ในการเปิดกระแสของเอสซีอาร์เป็นกระบวนการที่ยุงยากซึ่งได้อธิบายไว้ข้างล่างนี้ โดยแบ่งเป็นวิธีการใหญ่ๆ 2 วิธี

1) การทำให้กระแสหยุดไหลตามธรรมชาติ

ถ้าต้องการให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส สามารถทำได้โดยการลดกระแสแอโนดลงให้ต่ำกว่าค่ากระชืดของเอสซีอาร์ (อัตรากระแสแอโนดปกติ (Rated Anode Current) มีค่ากว่ากระแสชืดประมาณ 1,000 เท่า) ซึ่งอาจทำได้ 2 วิธี คือ

1.1) ยกสวิตช์ SW_1 ที่ต่ออนุกรมกับเอสซีอาร์ ให้เปิดออก ดังแสดงใน 2.25 (ก)

1.2) สับสวิตช์ SW_2 ที่ต่อขนานกับเอสซีอาร์ให้ปิดลง เพื่อตัดวงจรให้กระแสไม่ไหลเข้าไปในเอสซีอาร์ และเอสซีอาร์จะทำการปิดกระแสดังรูปที่ 2.25 (ข)



(ก) การต่อแบบอนุกรม

(ข) การต่อแบบขนาน

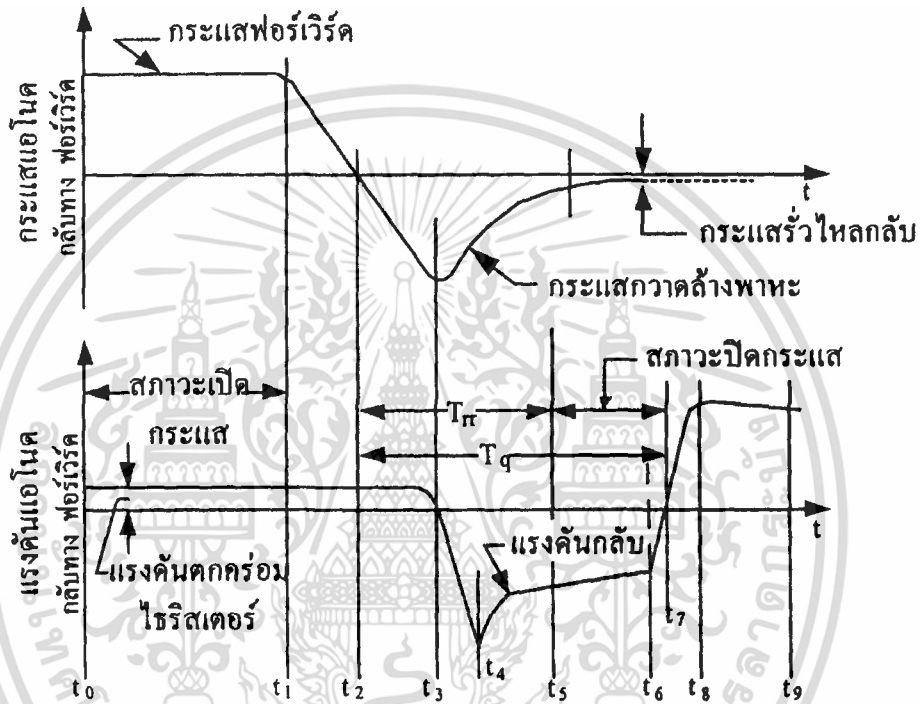
รูปที่ 2.25 การทำให้กระแสหยุดไหลตามธรรมชาติ

2) การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันป้อนกลับ

โดยการป้อนแรงดันกลับเข้าระหว่างแอโนดและแคโทด (คือป้อนแรงดันให้แคโทดมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับแอโนด) ของเอสซีอาร์จะทำรอยต่อถูกไบแอสกลับกับของกรณีที่เอสซีอาร์เปิดกระแสโดยรอยต่อ J_1 กับ J_3 จะถูกไบแอสกลับ แต่รอยต่อ J_2 จะถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสพาหะต่างๆ จะไหลสวนทางกับเอสซีอาร์เปิดกระแสทำให้กระแสไหลกลับจากแคโทดสู่แอโนด กระแสนี้จะไหลกระชอกและถูกจำกัดค่า di/dt ด้วยค่าความต้านทานของวงจรรายนอกซึ่งจะไหลอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งส่วนใหญ่ของพาหะที่รอยต่อ J_1 กับ J_3 ได้เคลื่อนที่ออกไปหมดเป็นผลให้รอยต่อ J_1 กับ J_3 อยู่ในสภาวะกั้นกระแส ทำให้กระแสที่รอยต่อทั้งสองนี้ลดค่าลงเป็นศูนย์ ขณะเดียวกันรอยต่อ J_2 ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสและมีประจุจำนวนมากตกค้างอยู่ที่รอยต่อนี้ พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลจะกลับเข้าร่วมกันเป็นผลทำให้การป้อนกลับค่าบวกลดค่าลงต่ำเป็นศูนย์ในเวลาชั่วครู่หนึ่ง แล้วไทรสเตอร์ก็เข้าสู่สภาวะปิดกระแส ถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงหรือสาเหตุอื่นดังจะกล่าวต่อไป การกลับเข้าร่วมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลจะกินเวลานานออกไป ทำให้เอสซีอาร์ใช้เวลาปิดกระแสเนิ่นนานออกไปด้วยวิธีการนี้แบ่งย่อยออกเป็น 2 วิธี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) การที่จะทำให้กระแสหยุดไหลด้วยเฟส หรือหยุดไหลด้วยไฟ AC (Phase Commutation or AC. Line Commutation) โดยอาศัยแรงดันค่าลบทุกๆ ครึ่งลบของวัฏจักรของแรงดัน AC เลี้ยววงจรทำหน้าที่ไบแอสกลับให้กับเอสซีอาร์แล้วเอสซีอาร์ก็เข้าสู่สภาวะปิดกระแส วิธีนี้เป็นที่นิยมในทางปฏิบัติมากสำหรับกรณีไฟเลี้ยงวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์ ในช่วงเวลาปิดกระแส

2.2) การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยวิธีบังคับ (Forced Commutation) โดยอาศัยการเก็บประจุจำนวนมากไว้ในตัวเก็บประจุ เมื่อถึงเวลาที่ต้องการจะปิดเอสซีอาร์ให้หยุดนำกระแส ใช้วิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์เข้าบังคับให้ตัวเก็บประจุถ่ายเทประจุผ่านเอสซีอาร์ในทิศทางไบแอสกลับอย่างรวดเร็วเป็นกระแสอิมพัลส์ (Impulse) เมื่อกระแสอิมพัลส์นี้มีกระแสไหลมากกว่ากระแสแอนโอดในทิศทางฟอ์เวิร์ดและเอสซีอาร์จะปิดกระแสลงวิธีนี้ให้เวลาปิดกระแสสั้นมาก เป็นวิธีที่นิยมให้กับกรณีไฟเลี้ยงวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ในเมื่อเอสซีอาร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแสแล้วทำให้ปิดกระแสด้วยวิธี ดังกล่าวข้างต้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีปิดกระแสด้วยแรงดันกลับ) จะได้รูปคลื่นแรงดันรูปคลื่นกระแส ดังรูปที่ 2.26 จะเห็นว่ามิกระแสไหลกลับค่าใหญ่ชั่วครู่แล้วค่อยๆ ลดค่าเล็กลงเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยมีพฤติกรรมเหมือนกระแสควาดล้างพาหะในไดโอด ซึ่งทำให้สามารถนิยามค่าเกี่ยว

ข้องกับเวลาปิดกระแส คือเวลาปิดกระแส t_2 เป็นช่วงเวลาสั้นที่สุดอยู่ระหว่างเวลาที่กระแสทิสฟอว์เวิร์ดมีค่าเป็นศูนย์ (t_2) ถึงเวลาที่เอสซีอาร์สามารถกั้นแรงดันทิสฟอว์เวิร์ดที่ป้อนเข้าไปใหม่ไม่ให้เอสซีอาร์กลับเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสอีก (t_2)

เวลาเปิดกระแส t_1 นี้มีค่าไม่แน่นอนอาจมีค่าประมาณ 10 ไมโครวินาที สำหรับเอสซีอาร์ที่มีอัตราแรงดันต่ำ และอัตราแรงดันต่ำจะมีค่าใหญ่กว่า 20, 35, หรือ 50 ไมโครวินาที สำหรับ เอสซีอาร์ที่มีอัตราแรงดันสูงและมีเวลาปิดกระแสอยู่ระหว่าง 100 ถึง 200 ไมโครวินาที

2.5.3 วงจรจุดชนวนด้วยพัลส์

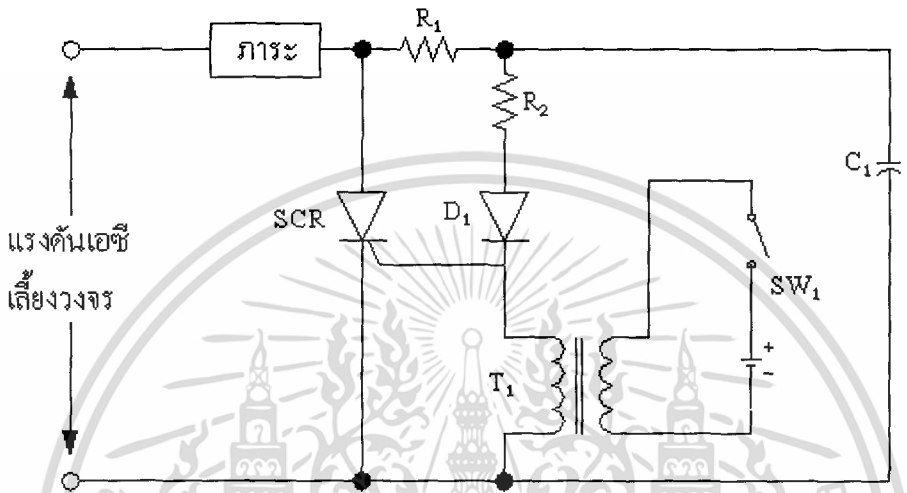
สัญญาณที่ใช้จุดชนวนที่ควรเป็นพัลส์ที่มีช่วงสั้นๆ มีความสูงมากและส่วนหน้าจะต้องมีความชันของสัญญาณนี้จะทำให้กำลังสูญเสียกระจายของเกตมีค่าลดลงกว่าสองวิธีกล่าวข้างบน และยังมีข้อดีกว่าวิธีจุดชนวนด้วยไฟฟ้า DC อยู่ที่สามารให้หม้อแปลงเข้าต่อในวงจรเกตทำให้สามารถแยกวงจรเกตออกจากวงจรของแหล่งสัญญาณที่ใช้ควบคุมเกต เป็นผลให้สามารถควบคุมเกตได้อย่างอิสระสามารถแบ่งวงจรออกเป็น 2 แบบ คือ

1) วิธีจุดชนวนด้วยพัลส์เดียว โดยการใช้หม้อแปลงที่มีแกนสามารถอิ่มตัวได้ (Saturable Core Transformer) เข้ามาช่วยดังแสดงในรูปที่ 2.27 สวิตช์ SW ที่เห็นอยู่ในรูปเป็นวงจรมัลติไวเบเรเตอร์แบบเสถียรหนึ่งสถานะ (Monostable Multivibrator) ซึ่งสร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ยูเจที (Uni-Junction Transistor : UJT) หรืออาจเป็นวงจรไทมเมอร์ 555 ก็ได้

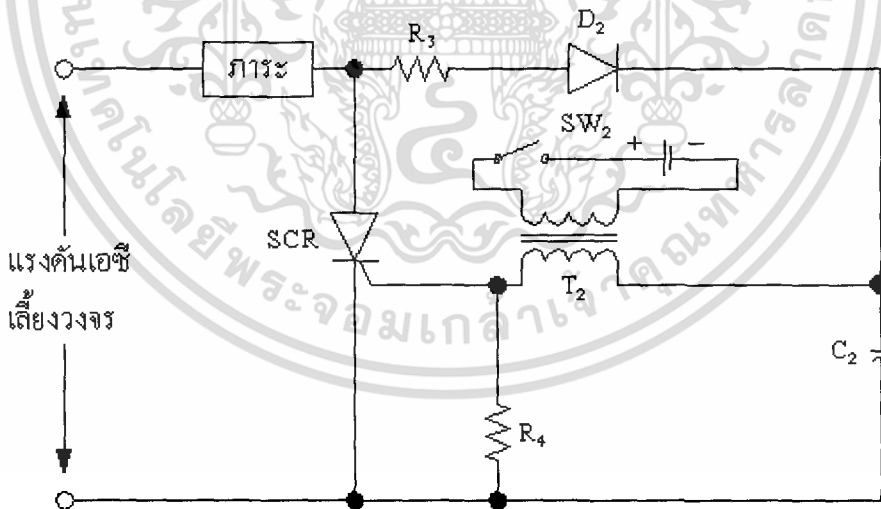
ในรูปที่ 2.27 (ก) ใช้ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่สามารถอิ่มตัว T_1 ที่ต่อขนานกับเกตของเอสซีอาร์เริ่มต้นหม้อแปลง T_1 ไม่อิ่มตัว กระแสไหลผ่าน R_1 , R_2 และ D_1 เข้าสู่เกตของเอสซีอาร์ในช่วงแรกของครึ่งวัฏจักรบวกเป็นผลทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแส ถ้าหม้อแปลง T_1 อิ่มตัวขดลวดของหม้อแปลง T_1 นี้ มีอิมพีแดนซ์ต่ำ กระแสที่เคยไหลผ่านเกตจะเปลี่ยนทางเดินมาไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลง T_1 ซึ่งเท่ากับปลดเอาสัญญาณจุดชนวนออกจากเกตทำให้สามารถตั้งต้นเตรียมการเปิดกระแสเอสซีอาร์ได้ใหม่เมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึงแล้ว สามารถจุดชนวนได้ด้วยวิธีการป้อนแรงดันบวกเข้าทางขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงหรือปิดสวิตช์ Sw_1 ลงตัวเก็บประจุ C ใช้เป็นเครื่องกรองคลื่นที่จะมารบกวนสัญญาณเกตซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวที่รวดเร็วมาก (Fast Transient) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า AC

รูปที่ 2.27 (ข) ใช้ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่สามารถอิ่มตัวได้ T_2 ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ C_2 และเกตของเอสซีอาร์ ในตอนเริ่มแรกของครึ่งวัฏจักรบวก T_2 ยังไม่อิ่มตัวกระแสจะไหลผ่าน R_2 และ D_2 และประจุเข้า C_2 เมื่อครึ่งวัฏจักรบวกผ่านไปสองสามองศา T_2 จะเข้าอยู่ในสภาวะอิ่มตัวเป็นผลให้ C_2 ถ่ายประจุเข้าเกตของเอสซีอาร์อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้ทรินสเตอร์นำกระแส ถ้าตอนเริ่มต้นของครึ่งวัฏจักรบวก T_2 อิ่มตัว กระแสจะไม่ไหลเข้าประจุ C_2 แต่จะไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิของ T_2 ผ่าน

เข้าเกิดและความต้านทาน T_4 โดย R_4 นี้จะป้องกันไม่ให้แรงดันเกิดมีค่าสูงเกินกว่าค่าสูงสุดของแรงดันคร่อมเกิด ดังนั้น เอสซีอาร์จะไม่เปิดกระแส เมื่อ T_2 อิ่มตัวแล้วเป็นการตั้งต้นใหม่เตรียมพร้อมสำหรับการจุดชนวนต่อไปด้วยการป้อนแรงดันบวกเข้าทางขั้วอินพุตหรือเปิด SW_2 ลง



(ก) วงจรอนุกรม



(ข) วงจรขนาน

รูปที่ 2.27 วงจรจุดชนวนครั้งคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแกนสามารถอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

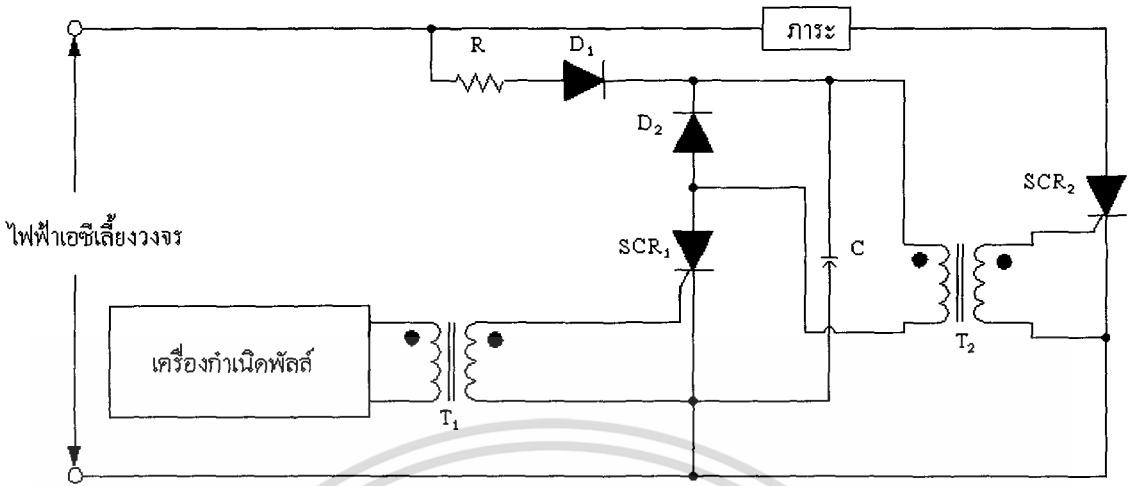
2) วิธีจูนชนวนด้วยขบวนพัลส์ โดยการใช้เครื่องกำเนิดพัลส์ซึ่งอาจเป็นวงจรกวัดแกว่งรีเล็กเซชัน (Relaxation Oscillator) วงจรฟลิป-ฟลอป (Flip-Flop) วงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบเสถียร (Astable Multivibrator) เป็นต้น

จากวงจรในรูปที่ 2.28 (ก) ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้หม้อแปลงพัลส์ที่มีขดลวดสองขดอัตราส่วน 1:1 ต่อเข้าระหว่างเกตกับแคโทดของเอสซีอาร์หรืออาจมีความต้านทาน R ต่ออนุกรมเพื่อลดกระแสเกตให้อยู่ในค่าปลอดภัยหรือใช้แบบกระแสให้เท่ากันเมื่อใช้หม้อแปลงสามขดลวด 1:1:1 ต่อเข้ากับเกตของไทรสเตอร์สองตัว หรืออาจใช้ไดโอด D เข้าต่ออนุกรมเพื่อป้องกันการไหลกลับของกระแสเกตในกรณีที่มีการเกิดกวัดแกว่งเล็กๆ หรือริงกิง (Ringing) เข้าแทรกหรือพัลส์กับทางเกิดขึ้นที่อินพุตของหม้อแปลงในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนสูง อาจจำเป็นต้องต่อความต้านทานเป็นภาระของขดลวดทุติยภูมิป้องกันการจูนชนวนผิดพลาด รูปที่ 2.28 (ข) เป็นวงจรที่ใช้ในการจูนชนวน เอสซีอาร์สองตัวแบบต่างๆ ขอให้สังเกตว่าวงจรข้างต้นนี้ใช้วงจรพัลส์ที่มีคุณสมบัติข้างต้นดังนี้

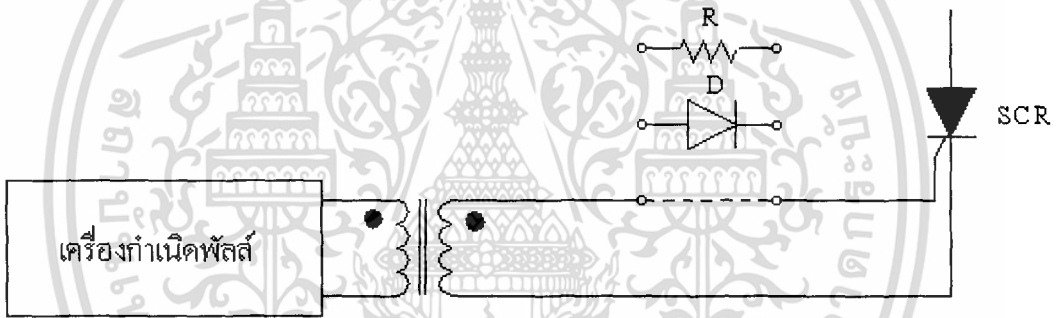
2.1) ต้องพันขดลวดให้มีจำนวนขดลวดมารอบเพื่อให้ค่าเหนี่ยวนำสูง ซึ่งจะทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสพัลส์ ในระหว่างที่มีพัลส์เข้ามา

2.2) เนื่องจากพัลส์ที่มีทางเดียวทำให้แกนหม้อแปลงอิ่มตัว จำเป็นต้องทำให้แกนหม้อแปลงมีอากาศ (Air gap) เพื่อป้องกันไม่ให้แกนหม้อแปลงอิ่มตัว

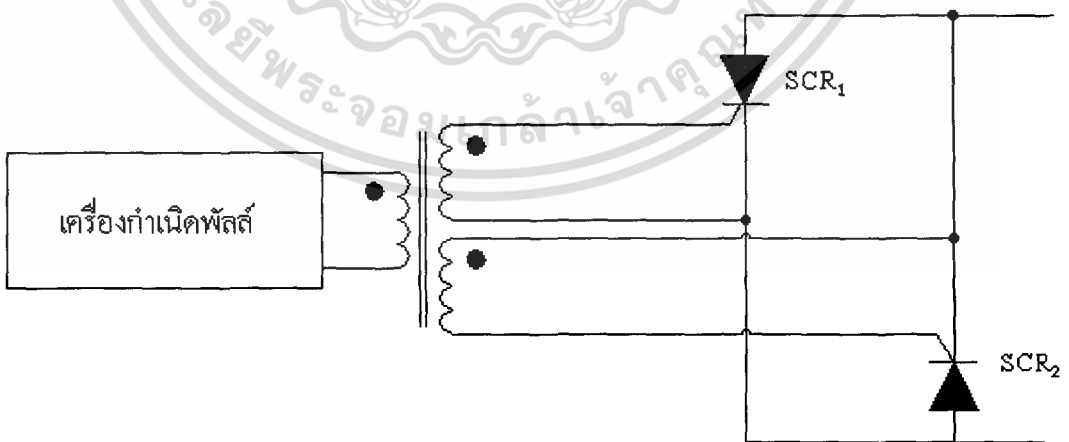
สำหรับหม้อแปลงที่ใช้จูนชนวนเอสซีอาร์ตัวเดียวควรมีคัปปลิงแน่นระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ สำหรับหม้อแปลงที่ใช้จูนชนวนเอสซีอาร์หลายตัวควรมีรีแอกแตนซ์รั่ว (Leakage Reactance) ตามมาตรฐานที่ระบุไว้เพื่อที่จะแบ่งกระแสให้เท่ากันตามปกติค่าเก็บประจุระหว่างขดลวดต่างๆ ไม่มีความสำคัญ แต่อาจเป็นทางเดินของสัญญาณความถี่สูงที่ต้องการ การทดสอบหม้อแปลงพัลส์จะทำได้ด้วยการป้องกันสัญญาณพัลส์เข้าที่ความต้านทานที่มีขนาด 20 โอห์ม แล้วนำความต้านทานนี้ต่อเข้ากับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงพัลส์ ซึ่งเมื่อป้อนสัญญาณพัลส์อย่างเดียวกันผ่านทางขดลวดปฐมภูมิ ให้ตรวจรูปคลื่นของพัลส์คร่อมที่ตัวต้านทานทั้งสองกรณี ถ้าหากพบว่ามีรูปคลื่นอย่างเดียวกัน แสดงว่าหม้อแปลงพัลส์มี คุณสมบัติดีมาก สามารถนำมาใช้ได้ การสูญหายของสัญญาณอาจมีบ้างให้ชดเชยด้วยการเพิ่มขนาดพัลส์จากเครื่องกำเนิดพัลส์



รูปที่ 2.28 แผนผังการใช้เครื่องกำเนิดพัลส์เข้าจุดชนวนเอสซีอาร์



(ก) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์หนึ่งตัวผ่านหม้อแปลงสองขนาด



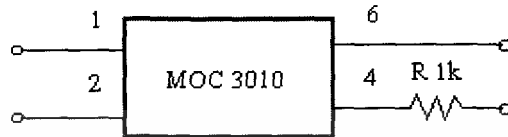
(ข) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์สองตัวผ่านหม้อแปลงสามขนาด

รูปที่ 2.29 วงจรชนวนที่ใช้เอสซีอาร์ขนาดเล็กเข้าจุดชนวนเอสซีอาร์ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6. ชุดวงจรกำเนิดพัลส์ทริกเกอร์

2.6.1 วงจรไอโซเลตสัญญาณ



รูปที่ 2.30 วงจรแยกกราวด์ระหว่างชุดควบคุมกับชุดกำลัง

การนำสัญญาณทริกเกอร์ที่ได้จากวงจรไปทริกเอสซีอาร์โดยตรงนั้น อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อวงจรทริกเกอร์ได้เพราะในส่วนของโหลดมีโวลต์เตจและกระแสสูง ดังนั้น จึงต้องมีการไอโซเลตระหว่างเอสซีอาร์กับวงจรทริกเกอร์ โดยการนำเอาสัญญาณทริกเกอร์ผ่าน IC Optocoupler เพื่อทำหน้าที่แยกแรงดันไฟฟ้าของชุดกำลังออกจากวงจรของชุดควบคุมก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ขาเกตของเอสซีอาร์ มีผลดี คือ ทำให้กราวด์ (Ground) ของวงจรควบคุมกับกราวด์ของชุดกำลังแยกเป็นอิสระจากกันและกันทำให้ป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับวงจรชุดควบคุมได้ ในกรณีที่วงจรชุดกำลังทำงานผิดพลาดอุปกรณ์หลักในส่วนนี้ คือ ตัวเชื่อมโยงทางแสง (Opto – isolation) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยกระบบไฟฟ้าของวงจรในส่วนของการควบคุมที่ใช้ไฟฟ้าระดับต่ำออกจากชุดกำลังที่ใช้ไฟฟ้าระดับแรงสูง ทั้งนี้ เนื่องจากวงจรชุดควบคุมไม่สามารถที่จะส่งเอาต์พุตออกเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อจ่ายแก่โหลดได้ ดังนั้นจึงต้องแยกแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดอีกชุดหนึ่ง

สำหรับการส่งผ่านสัญญาณของตัวเชื่อมโยงทางแสงนี้ จะถูกส่งระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นที่แยกออกจากไฟฟ้าโดยจะอยู่ในรูปของสัญญาณแสง ชิ้นส่วนทั้งสองนี้ไม่สามารถสลับหน้าที่กันได้และไม่มีการเชื่อมโยงทางไฟฟ้า สัญญาณที่ส่งผ่านจึงมีเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

2.6.2 การทำงานของวงจรทริกเกอร์

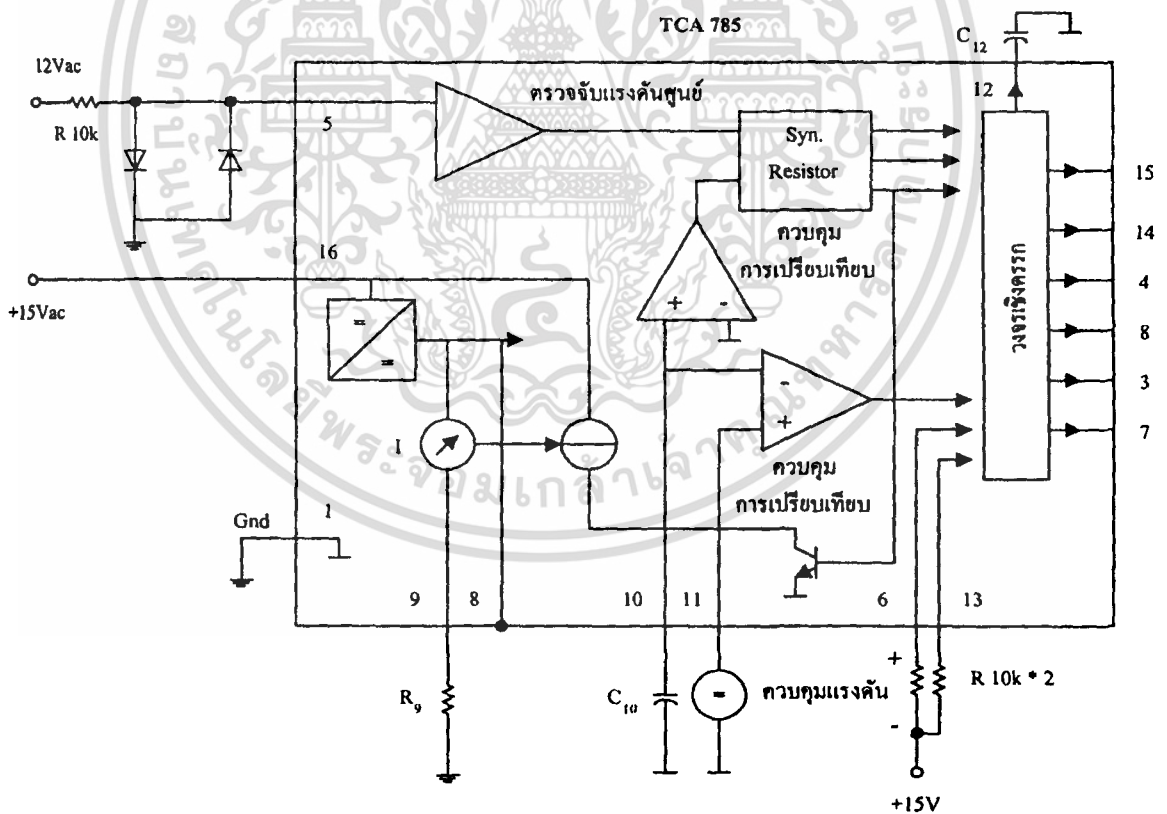
วงจรสร้างสัญญาณทริกเกอร์ หรือวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นจะเป็นส่วนทำหน้าที่ให้ตัวเอสซีอาร์เริ่มและหยุดการทำงาน เป็นส่วนที่ควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับเอสซีอาร์ เพื่อให้เอสซีอาร์ควบคุมการทำงานของโหลดได้ วงจรควบคุมจะทำได้โดยนำสัญญาณ Sync จากแหล่งจ่ายเดียวกันมาผ่านการจำกัดกระแสให้พอเหมาะ จากนั้นจะผ่านสัญญาณไปยังวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Detector) แล้วส่งไปยังส่วนของวงจรซิงโครไนซ์รีจิสเตอร์ (Syn Register) ซึ่งควบคุมสัญญาณแรมป์ที่

เกิดจากการเก็บประจุของ D_{10} จ่ายกระแสที่คงที่ ซึ่งได้กำหนดความลาดชันของสัญญาณแรมป์ด้วย R_9 ถ้าหากสัญญาณที่ขาแรมป์ 10 มีระดับแรงดันต่างไปจากขาแรมป์ 11 ตัวควบคุมการเปรียบเทียบ (Control Comparator) จะผลิตสัญญาณเชิงตรรกะไปยังส่วนของวงจรถอดจิกต่อไป ซึ่งสัญญาณลอจิกนี้สามารถควบคุมให้เลื่อนไปจาก 0 ถึง 180 องศา ได้ โดยการปรับแรงดันทางอินพุตของวงจรถวนควบคุมการเปรียบเทียบ

สำหรับขาที่ 6 จะเป็นตัวปิดเปิดพัลส์ทั้งหมด หากขาที่ 6 มีลอจิกเป็นหนึ่ง จะมีพัลส์ออกตามปกติ แต่ถ้าขาที่ 6 มีลอจิกเป็นศูนย์จะไม่มีพัลส์ใดๆ ออกมาพัลส์ต่างๆ จะมีความกว้างประมาณ 30 ไมโครวินาที สามารถขยายความกว้างของพัลส์ต่างๆ ออกไปได้อีก 180 องศา โดยการเปลี่ยนค่า C_{12} หรือจะลัดวงจร C_{12} ที่ขา 12 ลงกราวด์ก็จะได้ความกว้างพัลส์ตั้งแต่มุมทริกที่ 0 องศาไปจนถึง 180 องศา

สำหรับเอาต์พุตที่นำมาใช้สัญญาณกระตุ้นจากขาที่ 14 และขาที่ 15 ของไอซี โดยทำงานแต่ละครึ่งไซเคิล คือ ระหว่างช่วงคลื่นลูกบวกและระหว่างช่วงคลื่นลูกลบ

2.6.3 การใช้งานไอซี TCA 785



รูปที่ 2.31 โครงสร้างภายในของ IC TCA785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขาคี 1 เป็นจุดต่อลบบวกไฟเลี้ยงวงจร (จุดกราวด์ของวงจร)
- ขาคี 2 เป็นอินเวิร์ตเอาต์พุตขาคี 15
- ขาคี 3 เป็นจุดต่อสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงเพื่อใช้งานบางอย่าง
- ขาคี 4 เป็นอินเวิร์ตเอาต์พุตขาคี 14
- ขาคี 5 เป็นจุดต่อรับสัญญาณ Syn จากไปเลี้ยงวงจรเอซี
- ขาคี 6 เป็นจุดเปิดปิดพัลส์ทางด้านเอาต์พุตของวงจร
- ขาคี 7 เป็นจุดต่อสัญญาณพัลส์สำหรับไปควบคุมโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงมาก ๆ
- ขาคี 8 เป็นจุดสร้างแรงดันอ้างอิงของวงจร
- ขาคี 9 เป็นจุดต่อความต้านทานที่ใช้ควบคุมความลาดชันของสัญญาณแรมป์



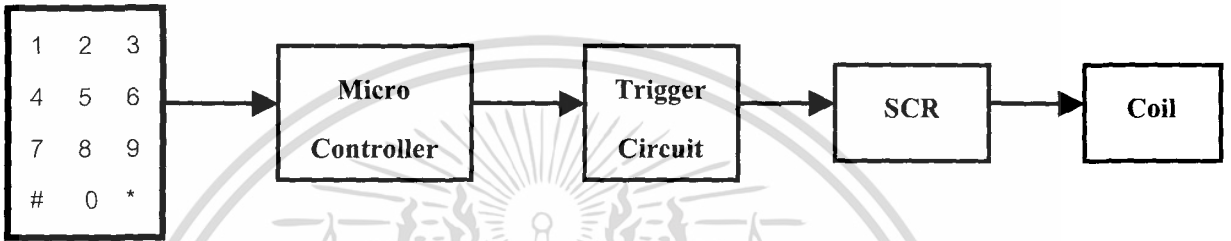
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ การสร้างและการทำงาน

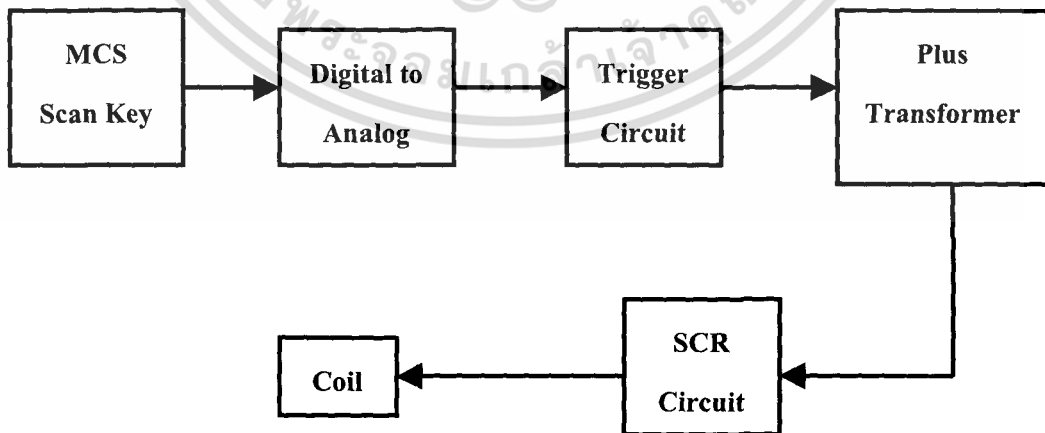
ในส่วนของการออกแบบและการสร้างเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field generator) นี้ได้แบ่งออกเป็น 6 ส่วนด้วยกัน

Key INPUT



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของโครงการ

ประกอบไปด้วย ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ชุดวงจรทริกเกอร์โดยใช้ไอซี TCA785 ชุดหม้อแปลงพัลส์ ชุดวงจรเอสซีอาร์ และ ชุดขดลวด โดยจะเริ่มที่ชุดของ CPU จะรับค่าจากการสแกนคีย์เข้ามาแล้วประมวลผลส่งออกมาเข้าวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก แล้วแปลงสัญญาณดิจิตอลให้อยู่ในรูปของแรงดัน เพื่อจะส่งเข้าขา 11 ของไอซี TCA785 ในชุดวงจรทริกเกอร์

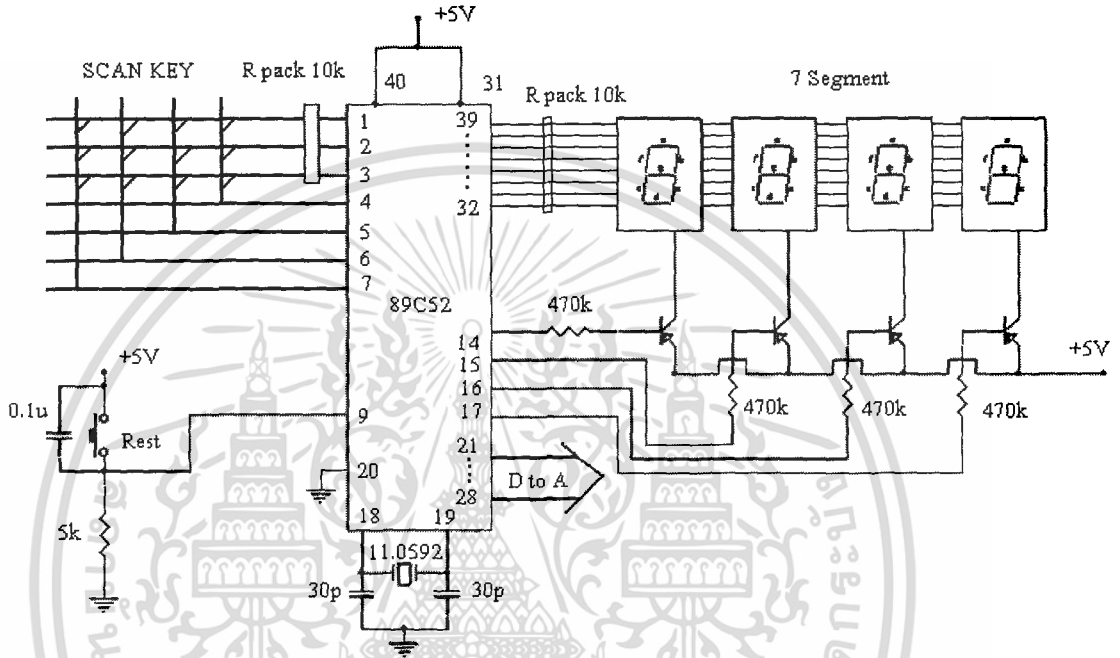


รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงส่วนของฮาร์ดแวร์

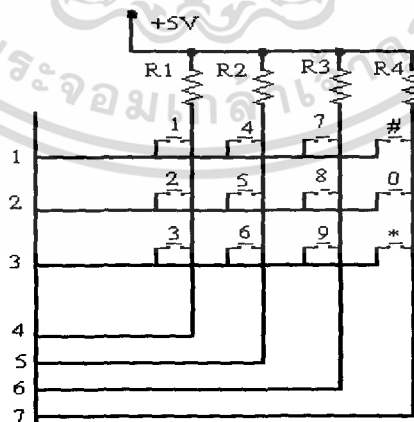
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงงานนี้ใช้ CPU เบอร์ AT89C52 ในการประมวลผลโดยที่ชุดวงจรของ CPU จะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ คือ ส่วนอินพุต (Scan Key) ส่วนแสดงผลและส่วนเอาต์พุต (D to A)

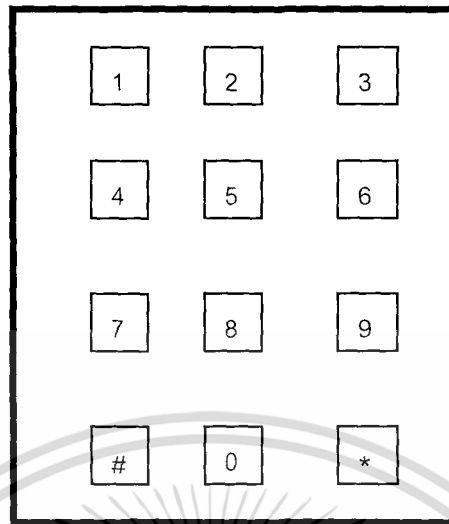


รูปที่ 3.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

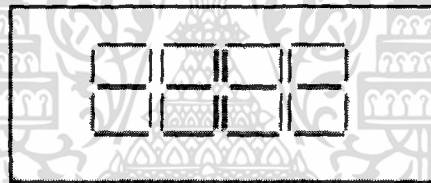


รูปที่ 3.4 การต่อสวิตช์แบบเมทริกซ์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 คีย์เมทริกซ์สวิตช์

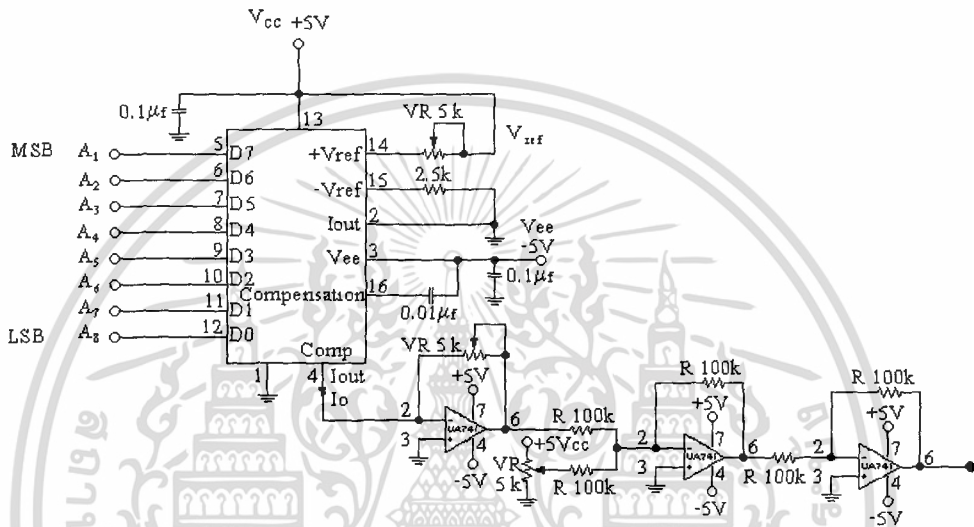


รูปที่ 3.6 LED 7 ส่วน

วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นเหมือนส่วนอินพุตของโครงการ โดยในส่วนของวงจรนี้มีการทำงาน คือ ส่วนของการสแกนคีย์จะตรวจสอบว่ามีการกดคีย์ใดหรือไม่ หากมีการกดคีย์จะส่งสัญญาณออกมาที่ส่วนแสดงผลเพื่อแสดงค่าที่กดคีย์ โดยที่ส่วนแสดงผลจะใช้ ตัว LED 7 ส่วนเป็นตัวแสดงผล และจะใช้พอร์ต 3 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณดิจิตอลออกไป เพื่อที่จะนำไปเข้าใน ส่วนของวงจร แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกอีกที

3.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก จะใช้ไอซีเบอร์ DAC0800 เป็นตัวกลางในการแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยที่รับอินพุตของวงจรมาจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของวงจรมี OpAmp เบอร์ LM741 เป็นตัวขยายสัญญาณเอาต์พุตก่อนที่จะไปเข้าขา 11 ของตัวทริกเกอร์ TCA785



รูปที่ 3.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก โดย DAC0800

3.3 วงจรจุดชนวนเกิดด้วย TCA 785

การทำงานของวงจรรวม TCA785 พิจารณาจากรูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างภายในของ TCA 785 ซึ่งเป็นวงจรรวมแบบ LSI มี 16 ขา บรรจบจนตัวถังพลาสติกดังรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าขา 16 คือ +Vs รับแรงดันไบแอสในย่าน +8 Vdc ถึง +18 Vdc โดยขา 1 เป็นจุดดิน แรงดันควบคุมภายในเป็นแรงดันอ้างอิงคือ $V_{ref} \approx 3.1$ V วัดได้ที่ขา 8 โดยตัว C_9 ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน ขา 5 คือ ขาที่รับแรงดันซิงโครไนซ์ (V_{syn}) ซึ่งเป็นแรงดันไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟสลับที่ต่อกับวงจรภาคกำลัง โดยต่อกับตัวต้านทานกับขา 1 R_9 คือ ความต้านทานสร้างสัญญาณลาดเอียงและ C_{10} คือ ตัวเก็บประจุสร้างสัญญาณลาดเอียงต่อกับขา 9 และขา 10 ตามลำดับค่าของ C_{10} มีค่าในย่าน 500 pF ถึง 1 μ F และ R_9 มีค่าเหมาะสมในย่าน 3k Ω - 3000k Ω

ค่า R_9 และ C_{10} จะเป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณลาดเอียง (V_{10}) ถ้า R_9 และ C_{10} มีค่ามาก ความลาดเอียงของ V_{10} จะมีค่ามากตามไปด้วย ขา 11 ของ TCA 785 คือขาที่ต่อแรงดันควบคุมเป็นแรงดันไฟตรงปรับค่าได้ แรงดันควบคุม (V_{11}) นี้จะป้อนเข้าขาบวกของออปแอมป์เปรียบเทียบ

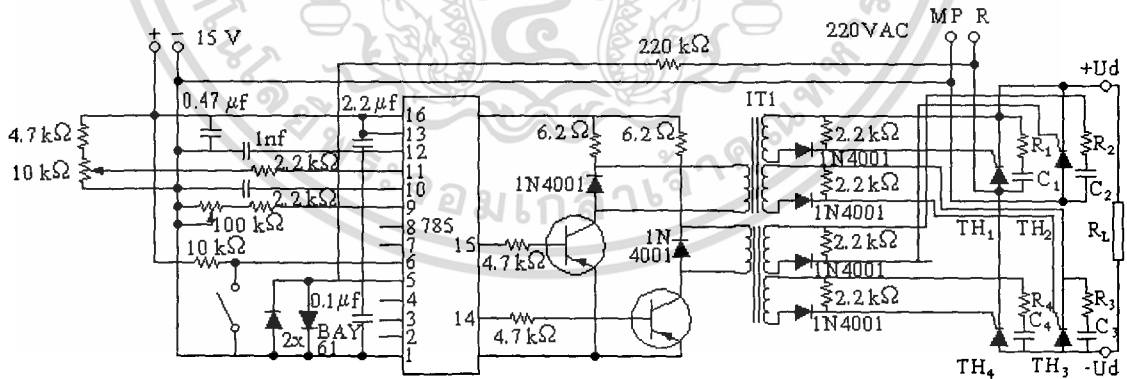
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.8 โดยเปรียบเทียบกับแรงดัน (V_{i0}) เพื่อกำหนดขนาดของมุมที่ด้านออกของวงจร จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าสัญญาณทางด้านออกของวงจรถ้าขา 14 และ 15 โดยพัลส์ที่ขา 15 จะทำงานช่วงเวลา $\omega t = 180^\circ - 360^\circ$ ขนาดความกว้างของพัลส์ด้านออกคือ β ปกติถ้าไม่ต่อ C_{12} จะมีค่า $\beta = 30 \mu s$ แต่สามารถเปลี่ยนค่า β ได้โดยใช้ค่า C_{12} ต่อเข้าที่ขา 12 ดังแสดงความสัมพันธ์ของค่า C_{12} กับค่า β ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของพัลส์ด้านออกกับค่า C_{12}

C_{12} (pF)	0	150	220	330	680	1000
Pulse width (μs)	30	93	137	205	422	620

สำหรับขา 2 และขา 4 คือ สัญญาณกลับของขา V_{15} และ V_{14} สัญญาณลักษณะพัลส์เดี่ยวที่มี $\beta = 30 \mu s$ นั้นจะเกิดได้เมื่อไม่มีการต่อ C_{12} เข้าที่ขา 12 แต่ต้องการให้พัลส์ด้านนอกเป็นพัลส์ยาวทำได้โดยการต่อขา 12 กับจุดดินและถ้าต้องการให้สัญญาณด้านออกที่ขา 2 และ 4 เป็นพัลส์ยาวด้วยจะต้องต่อขา 13 เข้ากับจุดดินด้วย



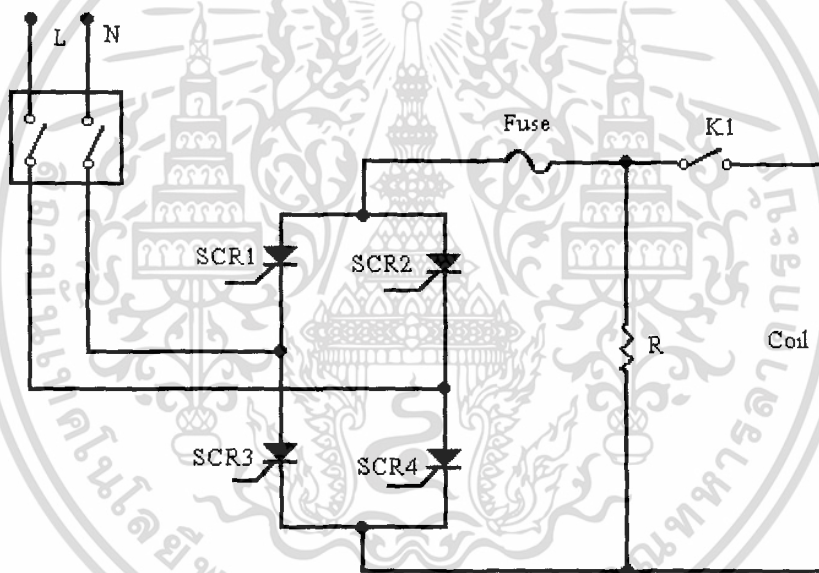
รูปที่ 3.8 วงจรจุดชนวน SCR

การจุดชนวนวงจรรีเลย์กระแส 1 เฟส ที่ควบคุมเต็มบริดจ์ ต้องใช้วงจรถูกชนวนที่จ่ายพัลส์ได้ 2 ชุด ที่แยกจุดแคโทดของไทรสเตอร์ Th_1 และ Th_3 ต้องทำงานพร้อมกันที่เวลา $\omega t = 0^\circ$ ถึง

180° และไทรสเตอร์ Th2 และ Th4 ต้องทำงานพร้อมกันที่เวลา $\omega t = 180^\circ - 360^\circ$ ดังนั้น การแยกพัลส์จุดชนวนเป็นสองชุด ทำได้โดยการใช้หม้อแปลงพัลส์ที่มีขดทุติยภูมิ 2 ขด จึงจะทำงานพร้อมกันได้อย่างปลอดภัย

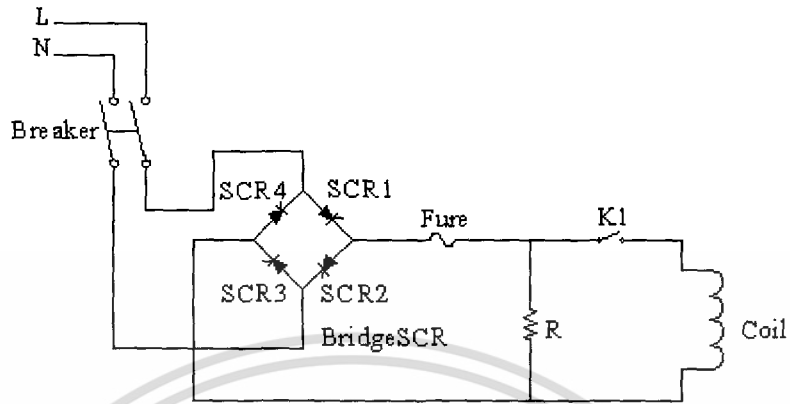
3.4 วงจรเอสซีอาร์

การต่อเอสซีอาร์จะต่อแบบบริดจ์โดยที่เอสซีอาร์ 1 และเอสซีอาร์ 3 จะทำงานในช่วงที่สัญญาณอยู่ในซีกสัญญาณบวก รับสัญญาณทริกเกิดจากหม้อแปลงพัลส์ Th1 และ Th3 ส่วนเอสซีอาร์ 2 และเอสซีอาร์ 4 จะทำงานในช่วงซีกสัญญาณเป็นลบ รับสัญญาณทริกเกิดจากหม้อแปลงพัลส์ Th2 และ Th4

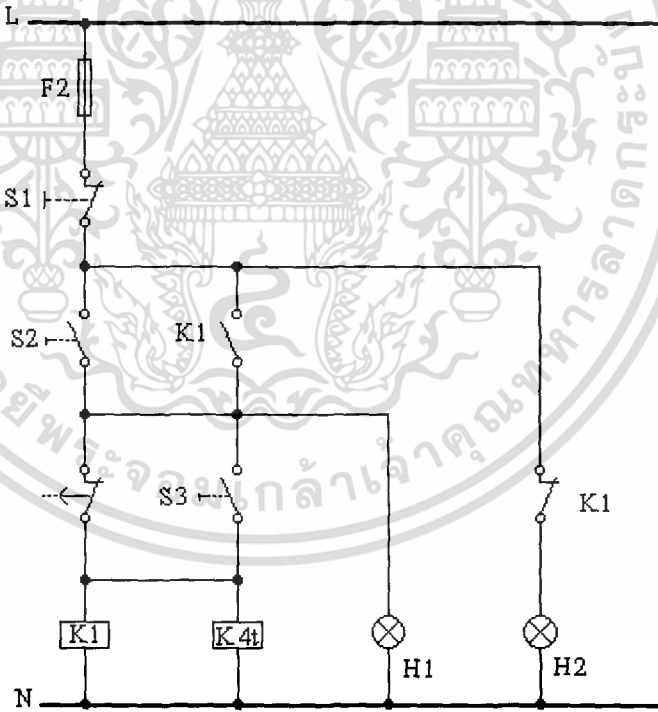


รูปที่ 3.9 วงจรการทำงานของเอสซีอาร์

จากวงจรในรูปที่ 3.9 เมื่อเปิดเบรกเกอร์จะมีไฟฟ้ามารอที่เอสซีอาร์ โดยที่เอสซีอาร์จะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเอสซีอาร์จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะผ่านฟิวส์ไปรออยู่ที่หน้าคอนแทคเตอร์ K1 ซึ่งคอนแทคเตอร์ K1 จะทำหน้าที่ในการต่อและตัดวงจรจ่ายไฟให้กับขดลวด



รูปที่ 3.10 วงจรควบคุมเอสซีอาร์ต่อแบบ Bridge



รูปที่ 3.11 วงจรควบคุมระบบเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 หม้อแปลงพลัง

ในโครงการนี้ใช้แกนเหล็กเป็นแบบ Shell ซึ่งเหมาะกับหม้อแปลงตั้งแต่ขนาดต่ำสุดจนถึงกำลัง 4,000 วัตต์ ในการออกแบบการสร้างเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ใช้หม้อแปลงพลัง 2 ตัว มีข้อมูลต่างๆ ดังนี้

อัตราส่วน 1 : 2

แรงดันอินพุต 15 V

แรงดันเอาต์พุต 7.5 V

ปฐมภูมิ 1 ชุด

ทุติยภูมิ 2 ชุด

กระแส I_o 300 mA

กระแส I_n 600 mA

3.5.1 คำนวณหาข้อมูลของขดลวดด้านทุติยภูมิ

$$AN = \frac{E \times 10^8}{4.44 f B_m}$$

$$B_m = 85000$$

$$AN_2 = \frac{75 \times 10^8}{4.44 \times 8500 \times 50}$$

$$= 400$$

เลือกใช้ขดลวดทองแดง 400 เซอร์คูลาร์บิลต่อ 1 แอมแปร์

$$\begin{aligned} \therefore \text{ความโตของขดลวด} &= I \times 400 \\ &= 300 \text{ mA} \times 400 \\ &= 120 \text{ เซอร์คูลาร์บิล} \end{aligned}$$

เมื่อนำไปเทียบตาราง (ภาคผนวก ค) หาค่าขนาดของขดลวด จะได้ขดลวดเบอร์ 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 กำหนดหาขนาดขดลวดด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} \therefore \text{ความโตของขดลวด} &= I \times 400 \\ &= 600 \text{ mA} \times 400 \\ &= 240 \text{ เซอร์คูลาร์บิล} \end{aligned}$$

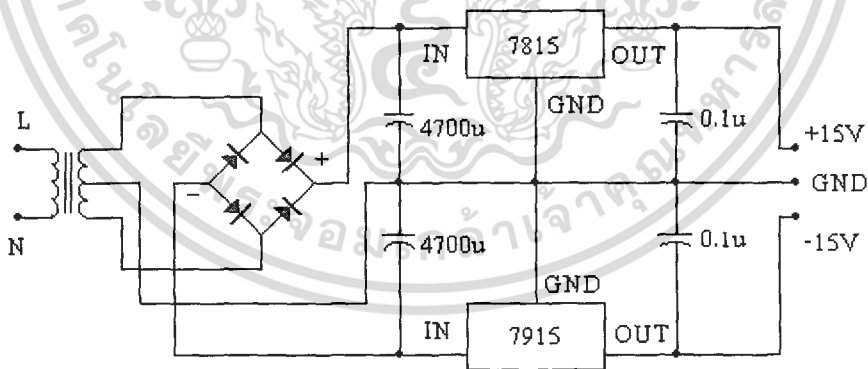
เมื่อนำไปเทียบตารางหาค่าขนาดของขดลวดจะได้ขดลวดเบอร์ 26

5.3.3 กำหนดหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} \text{จะได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก} &= 1.2 \times 1.2 \\ &= 1.44 \text{ ตารางนิ้ว} \end{aligned}$$

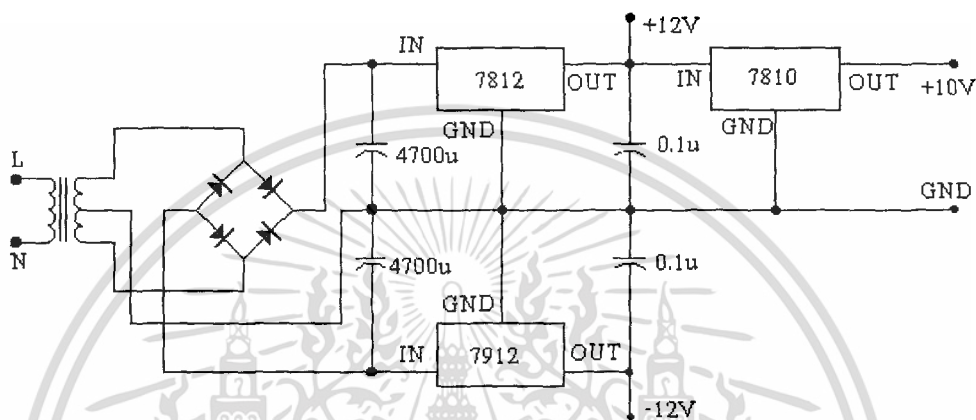
3.6 ชุดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในโครงงานนี้ ใช้ IC ตระกูล 78XX และ 79XX ซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน ในโครงงานนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 3 ชุด ชุดแรกใช้รักษาระดับแรงดัน -15 V และ $+15 \text{ V}$ ใช้ IC เบอร์ 7815 และ เบอร์ 7915 ดังรูปที่ 3.12



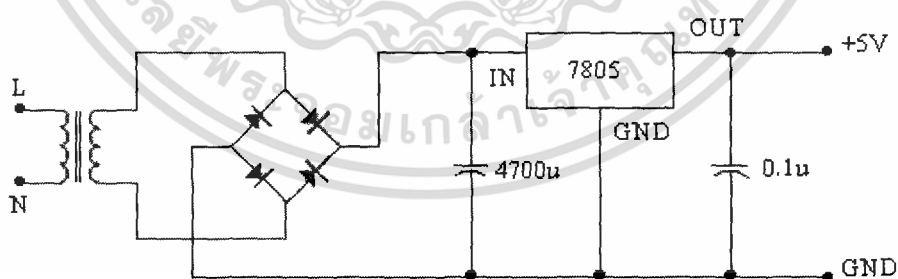
รูปที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง -15 V และ $+15 \text{ V}$

ชุดที่สองใช้รักษาระดับแรงดัน -12 V , $+12\text{ V}$ และ $+10\text{ V}$ ใช้ IC เบอร์ 7812 และ เบอร์ 7912 เพื่อทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน $+12\text{ V}$ และ -12 V ส่วนระดับแรงดันที่ $+10\text{ V}$ ใช้ IC เบอร์ 7810 ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง -12 V , $+12\text{ V}$ และ $+10\text{ V}$

ชุดที่สามใช้รักษาระดับแรงดัน $+5\text{ V}$ ใช้ IC เบอร์ 7805 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง $+5\text{ V}$

บทที่ 4

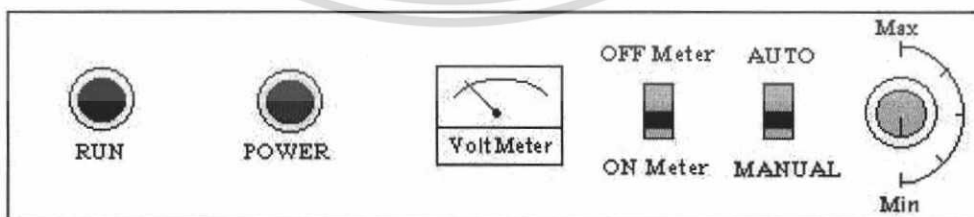
การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากที่ได้สร้างเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถกำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กได้และสามารถสร้างแท่งแม่เหล็กถาวร ตามการออกแบบในบทที่ 3 ไปแล้ว เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและทดสอบเครื่องต้นแบบโดยการทดสอบทั้งระบบ เป็นการทดลองเพื่อทดสอบการสร้างค่าสนามแม่เหล็กตามที่ต้องการ โดยแบ่งเป็นการทดลองในย่านของ Manual การทดลองในย่าน Auto และการทดลองทั้งระบบ

4.1 การทดลองในย่านของ Manual

การทดสอบนี้จะทดสอบเพื่อดูว่าค่าแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดที่ค่าเท่าใดบ้างจึงจะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ตั้งแต่ 0-5,000 เกาส์ โดยค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ต้องการในการทดลองสูงสุด คือ 5,000 เกาส์ มีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้

- 1) ปรับเลือกโหมดการทำงานเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปที่ Calibration
- 2) เลือกตั้งที่ย่าน Manual
- 3) นำสายวัดเกาส์มิเตอร์ไปวางในจุดที่ทำการวัด (จุดที่ดีที่สุดและสนามแม่เหล็กสูงสุด คือ จุดระหว่างแกนเหล็กกับขดลวด)
- 4) เปิด Breaker แล้วปรับ Volts Volume ไปต่ำสุด (0 โวลต์) กด SW. Start
- 5) ปรับค่าแรงดันตามตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดโดยปรับที่ Volt Volume แล้วบันทึกผลลงตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การปรับเลือกย่านต่างๆ ก่อนทดลองแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ Manual

แรงดันที่จ่าย (V)	ค่าที่อ่านได้ (Gauss)	แรงดันที่จ่าย (V)	ค่าที่อ่านได้ (Gauss)
0	0	16	2,850
1	80	17	3,000
2	220	18	3,150
3	400	19	3,300
4	550	20	3,450
5	700	21	3,600
6	900	22	3,750
7	1,150	23	3,900
8	1,400	24	4,050
9	1,600	25	4,200
10	1,800	26	4,350
11	2,000	27	4,500
12	2,200	28	4,650
13	2,400	29	4,800
14	2,550	30	4,950
15	2,700	31	5,100

ผลการทดลอง

จะเห็นว่าค่าแรงดันเพียง 1 โวลต์ สามารถเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กได้เป็น 100 เกาส์ จากตารางการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ทำให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสร้างค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ 5,000 เกาส์ คือ ค่าแรงดันที่ ประมาณ 30 โวลต์ ในการใช้งานเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการ Calibration จึงควรปรับค่าแรงดันให้ไม่เกินค่าแรงดัน 30 โวลต์

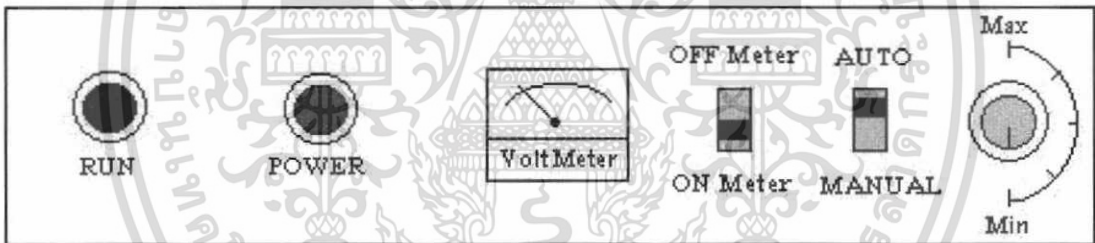
4.2 การทดลองในย่านของ Auto

เป็นการทดลองโดยการคีย์ค่าเข้าไป แล้วตรวจสอบว่าแรงดันที่ออกจากชุด เปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก เป็นอย่างไร ซึ่งชุดเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ได้ทำการปรับตั้งให้เริ่มที่ค่า 5.4 โวลต์ ถึง 7.2 โวลต์ ในการคีย์ค่าทดลองจะให้ช่วง Step ละ 100 ตามตารางไปจนครบ 5,000 เกาส์ (ค่าแรงดันที่วัดได้ ไม่ใช่แรงดันที่จ่ายให้กับขดลวด เป็นแรงดันที่ออกจากชุดเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกเท่านั้น) มีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

- 1) ปรับเลือกโหมดการทำงานไปที่ Calibration
- 2) เลือกตั้งที่ย่าน Auto เพื่อเป็นการรับค่าจากการกดคีย์
- 3) นำมิเตอร์วัดที่จุดไฟออกจากชุด เปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกหรือจุดที่ไฟเข้าขา

11 ของ TCA785

- 4) เปิด Breaker กด SW. Start
- 5) คีย์ค่าตามที่กำหนด บันทึกผลลงตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การปรับเลือกย่านต่างๆ ก่อนทดลองแบบ Auto

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ Auto

คีย์ค่า (Gauss)	แรงดันที่วัดได้ (V)	คีย์ค่า (Gauss)	แรงดันที่วัดได้ (V)
0	7.2	1,000	6.88
100	7.15	1,100	6.85
200	7.12	1,200	6.81
300	7.10	1,300	6.78
400	7.07	1,400	6.75
500	7.05	1,500	6.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการทดลองแบบ Auto (ต่อ)

คี่ค่า (Gauss)	แรงดันที่วัดได้ (V)	คี่ค่า (Gauss)	แรงดันที่วัดได้ (V)
600	7.00	1,600	6.68
700	6.97	1,700	6.65
800	6.94	1,800	6.62
900	6.90	1,900	6.60
2,000	6.56	3,600	6.05
2,100	6.53	3,700	6.02
2,200	6.50	3,800	5.95
2,300	6.46	3,900	5.82
2,400	6.43	4,000	5.85
2,500	6.40	4,100	5.81
2,600	6.37	4,200	5.78
2,700	6.33	4,300	5.75
2,800	6.30	4,400	5.70
2,900	6.27	4,500	5.68
3,000	6.24	4,600	5.62
3,100	6.20	4,700	5.57
3,200	6.18	4,800	5.54
3,300	6.15	4,900	5.50
3,400	6.10	5,000	5.45
3,500	6.08	5,100	5.40

ผลการทดลอง

ถ้าแรงดันออกที่ชุดเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก สูงจะส่งผลให้ได้ค่าเกาส์ต่ำ จะเห็นว่าค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 7.2 โวลต์ แต่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กป้อนเข้าไปคือ 0 เกาส์เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากชุดเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกจะถูกส่งไปเข้าชุดทริกเกอร์

เอสซีอาร์อีกครั้ง โดยแรงดันที่เข้าไปจะเป็นค่าตัวแปรที่ปรับมุมทริกให้กับชุดเอสซีอาร์ ค่าแรงดันที่ได้จึงนำไปกำหนดเป็นย่านการทำงานของชุดเอสซีอาร์

4.3 การทดสอบทั้งระบบ

การทดลองทั้งระบบเป็นการทดลองสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อสร้างแท่งแม่เหล็กเป็นการทดลองที่ใช้โหมด Magnetic เพื่อทดสอบว่าเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้สามารถสร้างแท่งแม่เหล็กได้จริง มีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

- 1) ตรวจสอบวงจรควบคุมและการต่อสายต่างๆ ให้เรียบร้อย
- 2) นำวัสดุสารแม่เหล็กวางลงในพื้นที่สร้างสนามแม่เหล็ก
- 3) ปรับเลือกโหมดการทำงานของเครื่อง ไปที่ Magnetic แล้วตั้ง Timer ที่ 0.1 วินาที
- 4) เปิด Breaker แล้วปรับแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวด ที่ประมาณ 100 โวลต์ (DC)
- 5) กด สวิตช์ Start เพื่อทำงาน (เครื่องจะทำงานในระยะเวลาที่สั้นมาก)
- 6) ปิดเครื่อง แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบความเป็นแม่เหล็ก



รูปที่ 4.3 การทดสอบวัดค่าเกาส์มิเตอร์จากแท่งแม่เหล็กที่ได้จากการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่าวัสดุสารแม่เหล็กที่นำมาวางไว้ในพื้นที่สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อทำการทดลองคุณสมบัติของวัสดุสารแม่เหล็กเปลี่ยนไปกลายเป็นแท่งแม่เหล็กถาวรไป ซึ่งสามารถ นำเกาส์มิเตอร์มาจับวัดค่าที่ได้จากชิ้นงานได้เลย



รูปที่ 4.4 แม่เหล็กถาวรที่ได้จากเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา

5.1 บทสรุป

การจัดทำเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสามารถกำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กได้ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการของสนามแม่เหล็ก เพื่อที่จะนำสนามแม่เหล็กมาใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้สามารถเป็นเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กที่ได้ค่ามาตรฐาน และสร้างแท่งแม่เหล็กมาใช้งานเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กนี้ แบ่งโหมดการทำงานของเครื่องออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการสร้างสนามแม่เหล็ก กับโหมดการสร้างแท่งแม่เหล็ก ซึ่งในโหมดการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อวัตถุประสงค์ในการเป็นตัวปรับเทียบให้กับเกาส์มิเตอร์ สามารถกำหนดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กได้ สูงถึง 1,200 เกาส์ โดยการตั้งค่าที่ต้องการ ในส่วนนี้เครื่องจะทำงานเป็นเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเป็นเวลานานได้ เนื่องจากกระแสที่นำมาใช้ยังไม่มากนัก ซึ่งส่วนตรงนี้จะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-52 เข้ามาช่วยในการแสดงผลและแปลงค่าจากการกคคคคค เพื่อส่งสัญญาณออกเพื่อให้อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก แล้วเข้าวงจรจุดชนวนเกตของเอสซีอาร์เพื่อให้เอสซีอาร์นำกระแสให้กับขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมา การสร้างสนามแม่เหล็กที่ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กต่างๆกันจะใช้การปรับมุมทริกของเอสซีอาร์ เมื่อมุมในการทริกของเอสซีอาร์เปลี่ยนไปจะทำให้ขดลวดได้รับค่ากระแสที่ต่างกันจึงสร้างสนามแม่เหล็กออกมาที่ค่าความหนาแน่นต่างๆ ได้ ส่วนในโหมดของการสร้างแท่งแม่เหล็กนั้นจะมีค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กอยู่ค่าเดียวเป็นค่าที่สูงมากๆ และเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กจะทำงานในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อที่จะให้โมเมนต์ในวัสดุสารแม่เหล็กเกิดการเรียงตัวและแสดงอำนาจแม่เหล็กออกมา เราจึงใช้ Timer Relay เข้ามาช่วยในการตัดต่อวงจร ซึ่งจากการทดลองทำให้เครื่องมีความเชื่อถือได้และเป็นไปตามหลักการที่ได้เสนอไว้ แต่ก็ยังพบว่าโครงงานที่ได้พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดอยู่ และเพื่อให้เห็นคุณลักษณะดังกล่าวของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กข้างต้น จึงขอสรุปลักษณะที่สำคัญไว้ดังนี้

- 1) สามารถสร้างสนามแม่เหล็กโดยกำหนดค่าได้สูงถึง 1,200 เกาส์
- 2) สามารถสร้างแท่งแม่เหล็กถาวรขึ้นมาได้จากวัสดุสารแม่เหล็ก
- 3) สามารถนำมาเป็นเครื่องปรับเทียบให้กับเครื่องวัดเกาส์มิเตอร์ได้
- 4) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กในงานอื่นๆ ได้

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

1) ปัญหา ด้านฮาร์ดแวร์ ไม่สามารถที่จะหาข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างสนามแม่เหล็ก ได้ละเอียดมากพอเนื่องจากอุปกรณ์ไม่สามารถทนกระแสที่สูงมากๆ ได้

แนวทางแก้ไข ทำการหาข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรส่วนประกอบต่างๆ ที่นำมาใช้ จาก Internet และค้นคว้าจากห้องสมุด

2) ปัญหา การสร้างสนามแม่เหล็กก็ยังไม่สามารถที่จะกำหนดค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมากๆ ได้

แนวทางแก้ไข หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขดลวดและค่าต่างๆที่เกิดจากโหลด L และวงจรที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายไฟให้กับขดลวด และหาอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าย้อนกลับในวงจรขดลวด

3) ปัญหา เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานได้

แนวทางแก้ไข เลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงๆ ได้และเลือกขนาดของขดลวดที่สามารถทนขนาดของกระแสสูงๆ ได้

4) ปัญหา ไม่มีความรู้พื้นฐานในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี และการใช้งานโปรแกรมต่างๆ เช่น Protel 99 se

แนวทางแก้ไข ศึกษาการเขียนโปรแกรมโดยปรึกษาจากอาจารย์ผู้สอนวิชาไมโครคอนโทรลเลอร์และการใช้งาน โปรแกรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจากหนังสือและเพื่อนที่มีความรู้ช่วยสอนให้

5) ปัญหา ข้อมูลที่จะใช้ในการจัดทำปริญญาณิพนธ์หาได้ยากเพราะหนังสือส่วนมากที่ใช้เป็นภาษาอังกฤษ และการจัดทำรูปภาพต่างๆ ยังไม่คมชัดพอ

แนวทางแก้ไข ศึกษาวิชาภาษาอังกฤษเพิ่มเติม และศึกษาการใช้งานโปรแกรมช่วยในการวาดภาพต่างๆ

5.3 แนวทางในการพัฒนา

ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้พยายามทำให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ด้วยระยะเวลาและงบประมาณที่มีอยู่จำกัด ประกอบกับความรู้และประสบการณ์ของผู้จัดทำในการทำงานยังไม่มากพอ จึงทำให้เครื่องมีข้อจำกัดและสมควรที่จะได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นได้อีกดังต่อไปนี้

- 1) ควรเพิ่มการ Calibrate ให้มีความละเอียดมากขึ้น
- 2) ควรปรับปรุงให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบค่าให้ได้มากขึ้นกว่า 1,200 เกาส์
- 3) ควรปรับปรุงให้เครื่องสามารถสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อประโยชน์อย่างอื่น เช่น ลบข้อมูลจากแผ่นดิส หรือเทป เป็นต้น
- 4) สามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องสร้างแม่เหล็กในงานอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

วิชัย สังข์จันทรานนท์. **ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. บริษัทเอเชียเพรส จำกัด : กรุงเทพมหานคร, 2537.

วิสุทธิ อธิพรธรรม. **วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : กรุงเทพมหานคร, 2540

สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. **ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น**. บริษัทเอเชียเพรส จำกัด : กรุงเทพมหานคร, 2534.

อุดมศักดิ์ ชัยยีน. **Power Electronics I**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตธนบุรี : กรุงเทพมหานคร, 2528.

Hayt, William H. **Engineering Electromagnetics** singapore : McGraw-Hill, 1989.

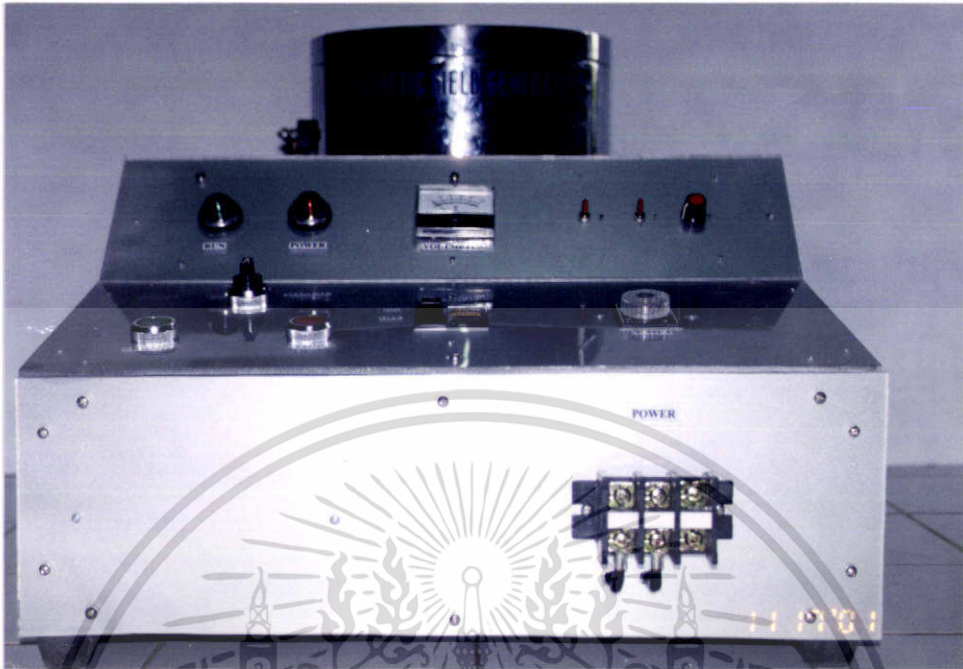
John D. Kraus **ANTENNAS** Megraw. **Hill Interantional Electrical Engineering Series**, 1987.



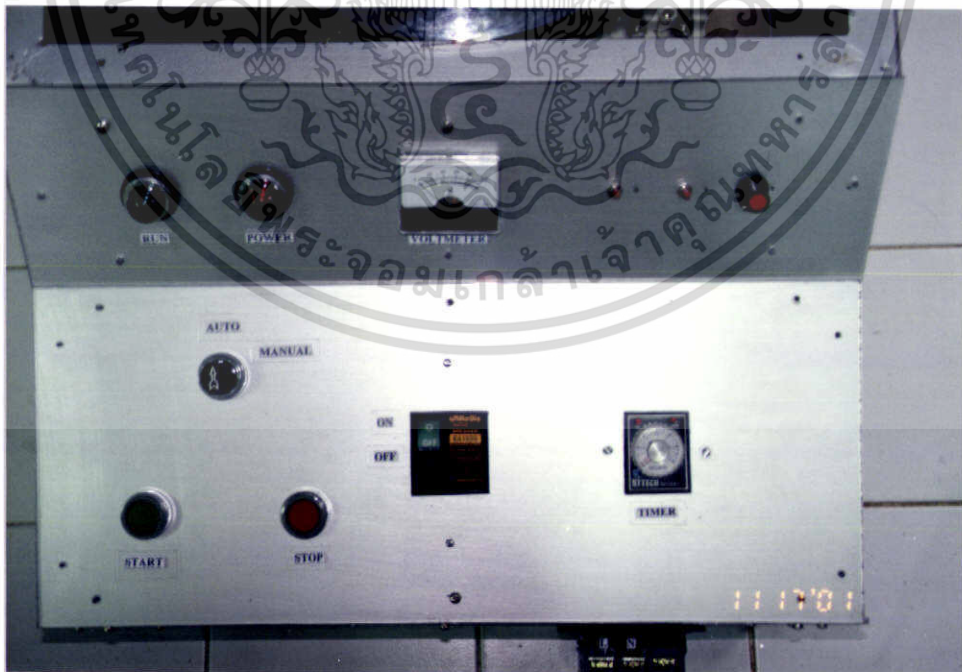
The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a central tiered structure, possibly a stupa or a decorative element. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top reads 'มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์' (Mahavithayalai Rajabhat Buriram) and the text at the bottom reads 'พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (Phra Chomklao Chao Khan Thara Ladkrabang).

ภาคผนวก ก
รูปต้นแบบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 รูปสำเร็จเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ ก.2 แผงชุดควบคุมเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



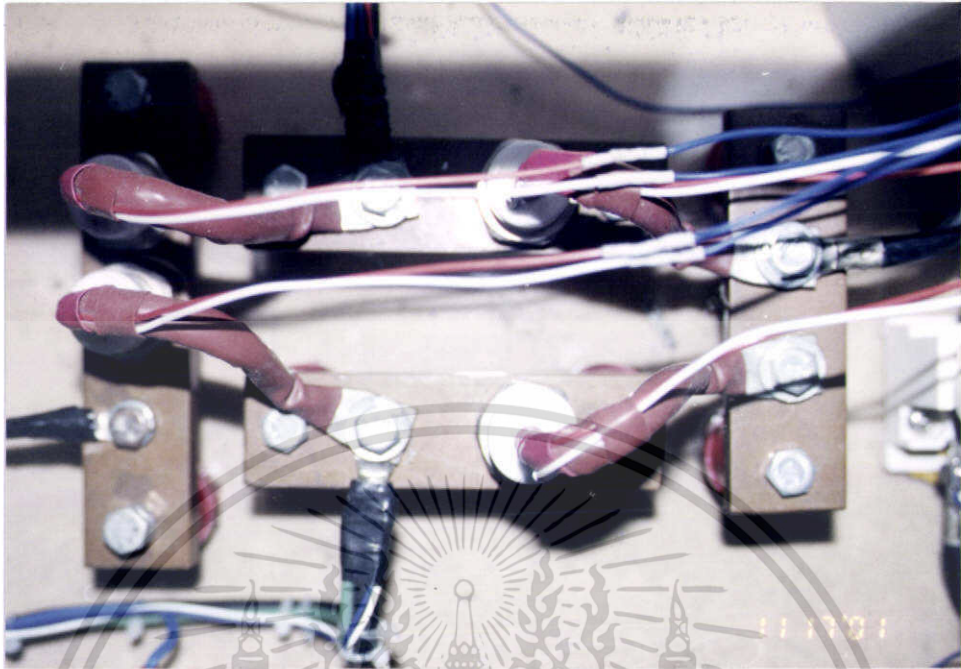
รูปที่ ก.3 ชุดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

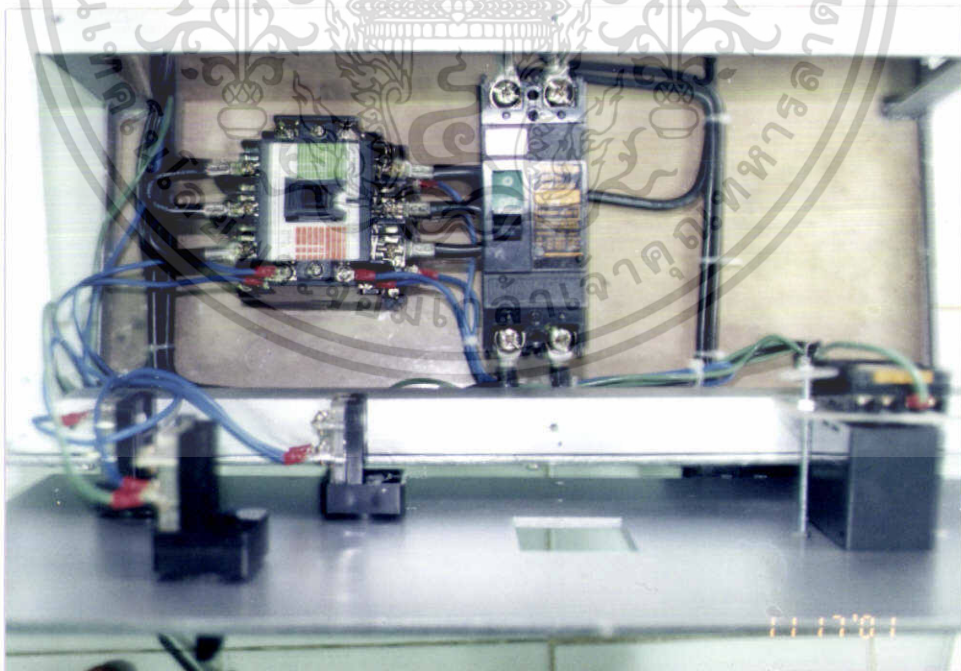


ภาคผนวก ข
ชุดวงจรและโครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

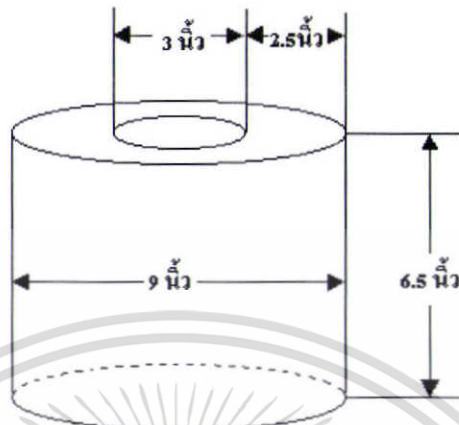


รูปที่ ข.1 ชุดวงจร เอสซีอาร์ ต่อใช้งานแบบบริดจ์

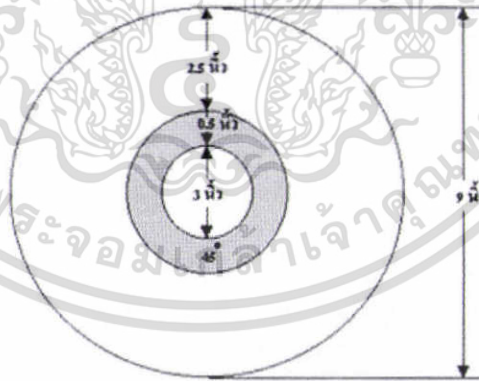


รูปที่ ข.2 ชุดวงจรแมกเนติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

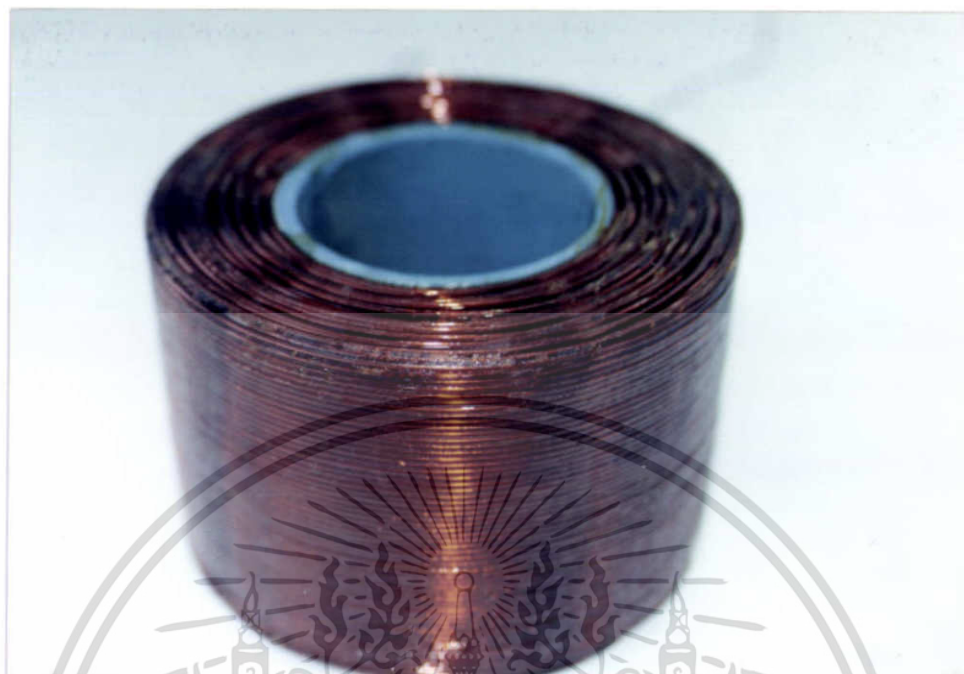


รูปที่ ข.3 โครงสร้างของชุดขวดลวด



รูปที่ ข.4 โครงสร้างของชุดขวดลวดด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

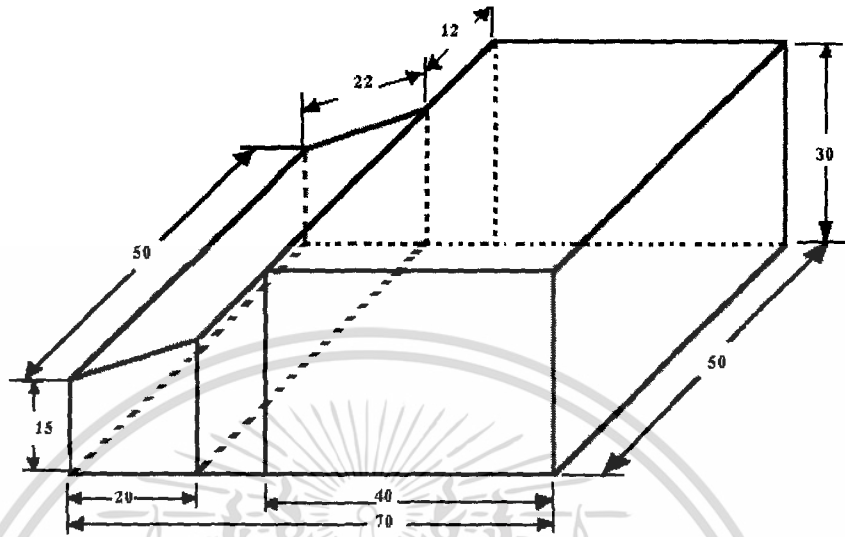


รูปที่ ข.5 ชุดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

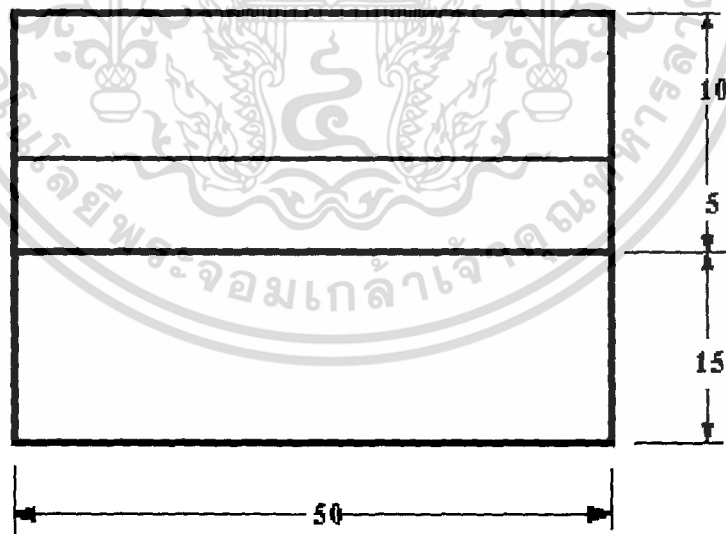


รูปที่ ข.6 ชุดสำเร็จรูปของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

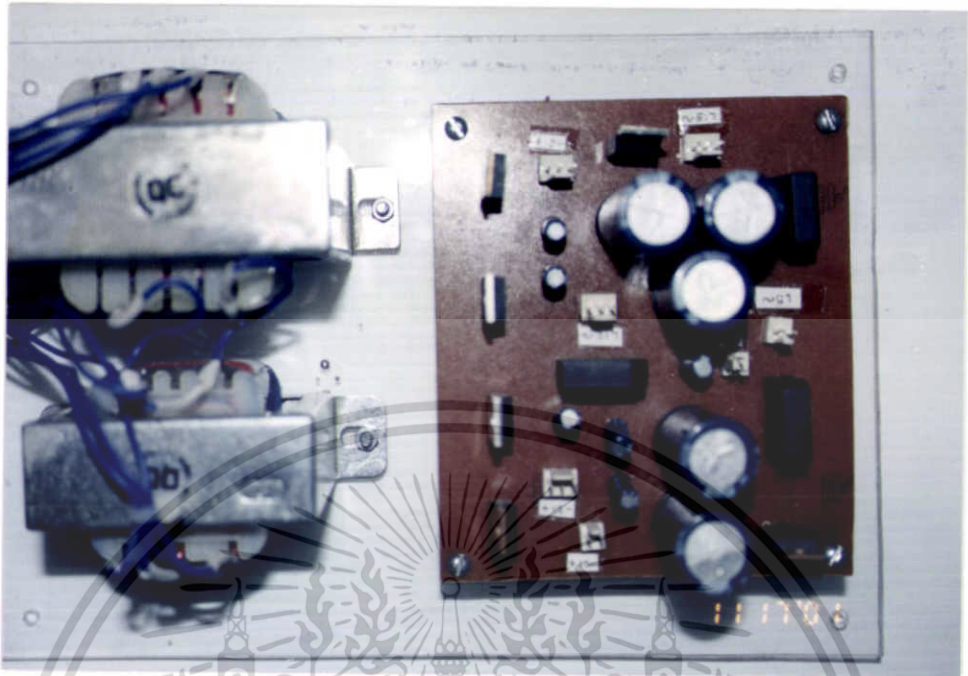


รูปที่ ข.7 โครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

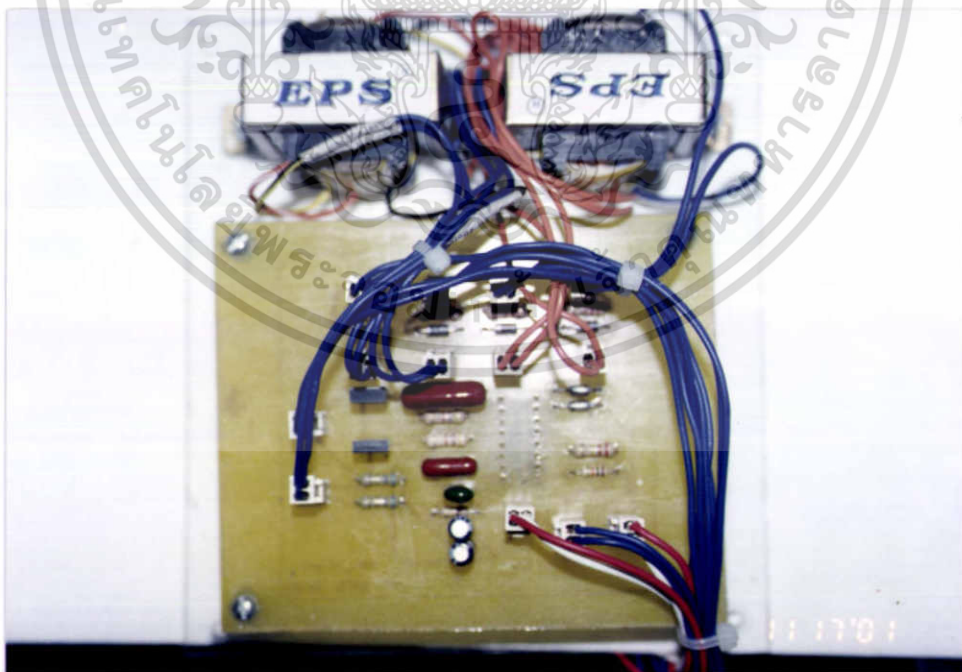


รูปที่ ข.8 โครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

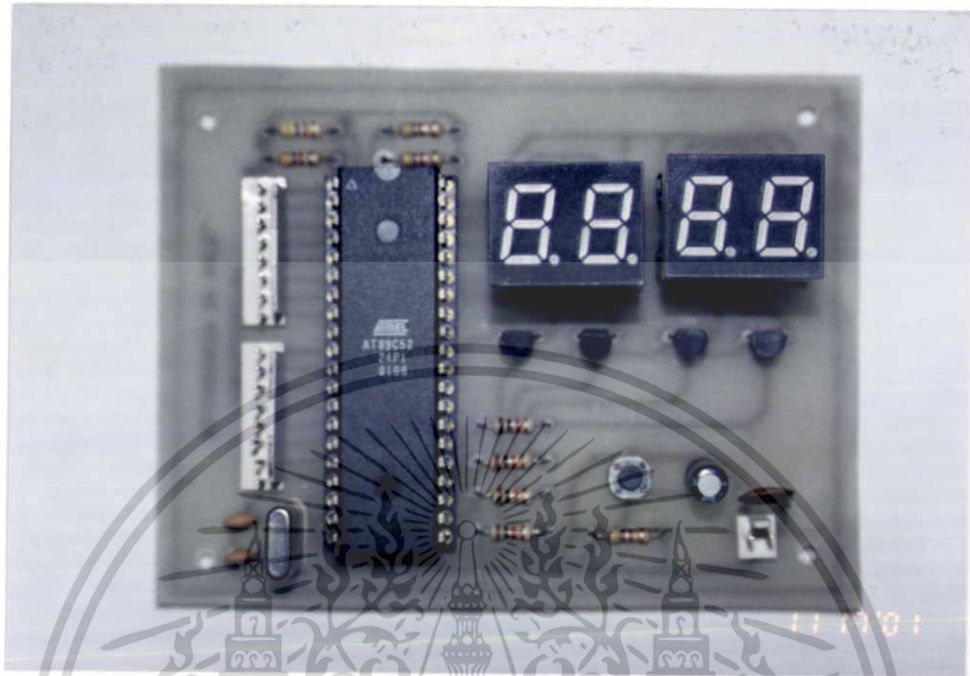


รูปที่ ข.9 ชุดวงจรเรกติไฟร์

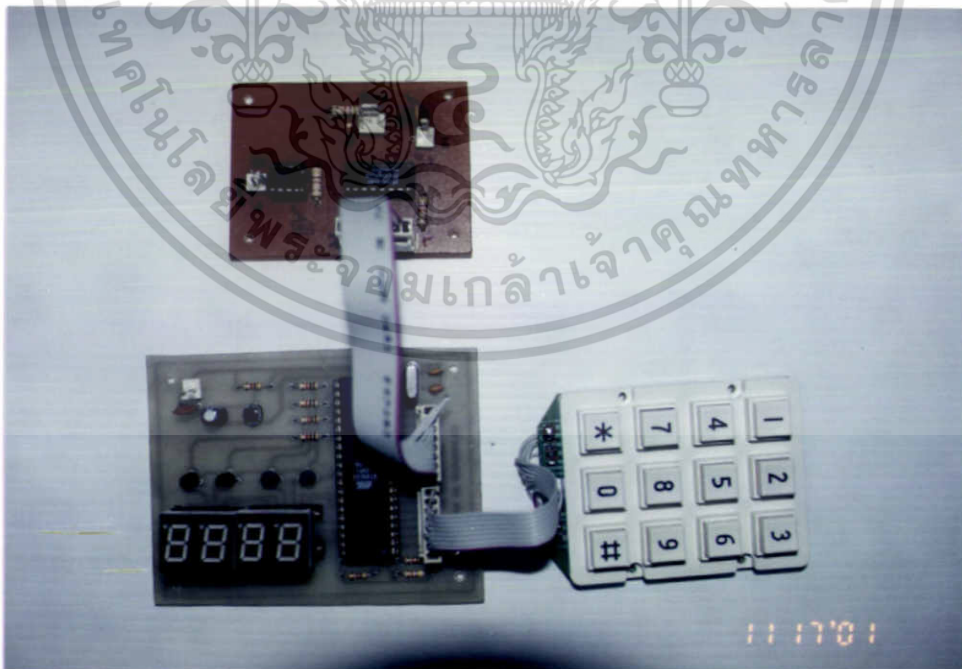


รูปที่ ข.10 ชุดวงจรของ TCA785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และหน่วยแสดงผล



รูปที่ ข.12 ชุดวงจรรวมของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 การเปรียบเทียบขนาดของขดลวดทองแดง

Gage No.	Area Circular Mils	Gage No.	Area Circular Mils
0000	212,000.0	19	1,290.0
000	168,000.0	20	1,020.0
00	133,000.0	21	810.0
0	106,000.0	22	642.0
1	83,700.0	23	509.0
2	66,400.0	24	404.0
3	52,600.0	25	320.0
4	41,700.0	26	254.0
5	33,100.0	27	202.0
6	26,300.0	28	160.0
7	20,800.0	29	127.0
8	16,500.0	30	101.0
9	13,100.0	31	79.7
10	10,400.0	32	63.2
11	8,230.0	33	50.1
12	6,530.0	34	39.8
13	5,180.0	35	31.5
14	4,110.0	36	25.0
15	3,260.0	37	19.8
16	2,580.0	38	15.7
17	2,050.0	39	12.5
18	1,620.0	40	9.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International IOR Rectifier

111RKI SERIES

PHASE CONTROL THYRISTORS

Stud Version

Features

- High current and high surge ratings
- $dv/dt = 1000V/\mu s$ option
- Ceramic housing
- Threaded studs UNF 1/2 - 20UNF2A
- Types up to $1200V V_{RRM}/V_{DRM}$
- $di/dt = 300A/\mu s$

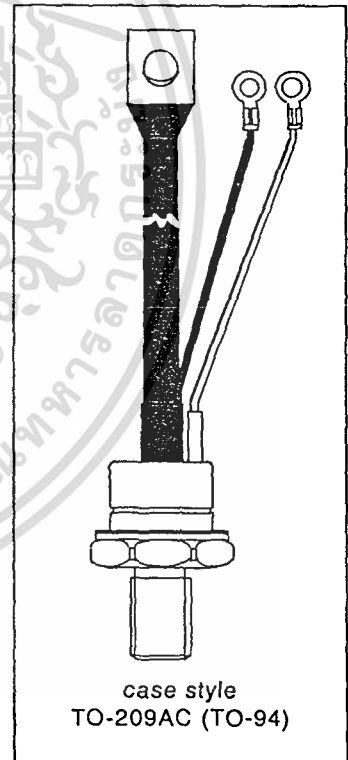
Typical Applications

- DC motor controls
- Controlled DC power supplies
- AC controllers

Major Ratings and Characteristics

Parameters	111RKI	Units
$I_{T(AV)}$	110	A
@ T_c	90	$^{\circ}C$
$I_{T(RMS)}$	172	A
I_{TSM}		A
@ 50Hz	2080	A
@ 60Hz	2180	A
I^2t		KA^2s
@ 50Hz	21.7	KA^2s
@ 60Hz	19.8	KA^2s
V_{DRM}/V_{RRM}	400 to 1200	V
t_q	typical 110	μs
T_J	- 40 to 140	$^{\circ}C$

110A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

111RKI Series

Bulletin I25152 rev. C 05/97

International
IGR Rectifier

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Voltage Ratings

Type number	Voltage Code	V_{DRM}/V_{RRM} , max. repetitive peak and off-state voltage V	V_{RSM} , maximum non-repetitive peak voltage V	I_{DRM}/I_{RRM} max. @ $T_J = T_J$ max. mA
111RKI	40	400	500	20
	80	800	900	
	120	1200	1300	

On-state Conduction

Parameter	111RKI	Units	Conditions
$I_{T(AV)}$ Max. average on-state current @ Case temperature	110	A	180° conduction, half sine wave
	90	°C	
$I_{T(RMS)}$ Max. RMS on-state current	172		DC @ 83°C case temperature
I_{TSM} Max. peak, one-cycle non-repetitive surge current	2080	A	t = 10ms No voltage
	2180		t = 8.3ms reapplied
	1750		t = 10ms 100% V_{RRM}
	1830		t = 8.3ms reapplied
I^2t Maximum I^2t for fusing	21.7	KA ² s	t = 10ms No voltage
	19.8		t = 8.3ms reapplied
	15.3		t = 10ms 100% V_{RRM}
	14.0		t = 8.3ms reapplied
I^2vt Maximum I^2vt for fusing	217	KA ² vs	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied
$V_{T(TO)1}$ Low level value of threshold voltage	0.82	V	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
$V_{T(TO)2}$ High level value of threshold voltage	1.02	V	$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
r_{11} Low level value of on-state slope resistance	2.16	mΩ	$(16.7\% \times \pi \times I_{T(AV)} < I < \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
r_{12} High level value of on-state slope resistance	1.70	mΩ	$(I > \pi \times I_{T(AV)})$, $T_J = T_J$ max.
V_{TM} Max. on-state voltage	1.57	V	$I_{pk} = 350A$, $T_J = T_J$ max., $t_p = 10ms$ sine pulse
I_H Maximum holding current	200	mA	$T_J = 25^\circ C$, anode supply 6V resistive load
I_L Typical latching current	400	mA	

Switching

Parameter	111RKI	Units	Conditions
di/dt Max. non-repetitive rate of rise of turned-on current	300	A/μs	Gate drive 20V, 20Ω, $t_r \leq 1\mu s$ $T_J = T_J$ max, anode voltage $\leq 80\% V_{DRM}$
t_d Typical delay time	1	μs	Gate current 1A, $di/dt = 1A/\mu s$ $V_g = 0.67\% V_{DRM}$, $T_J = 25^\circ C$
t_q Typical turn-off time	110	μs	$I_{TM} = 50A$, $T_J = T_J$ max., $dv/dt = -5A/\mu s$, $V_R = 50V$ $dv/dt = 20V/\mu s$, Gate 0V 25Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Blocking

Parameter	111RKI	Units	Conditions
dv/dt Maximum critical rate of rise of off-state voltage	500	V/ μ s	$T_J = T_J \text{ max. linear to } 80\% \text{ rated } V_{\text{DRM}}$
$I_{\text{RRM}}/I_{\text{DRM}}$ Max. peak reverse and off-state leakage current	20	mA	$T_J = T_J \text{ max. rated } V_{\text{DRM}}/V_{\text{RRM}}$ applied

Triggering

Parameter	111RKI		Units	Conditions	
P_{GM} Maximum peak gate power	12		W	$T_J = T_J \text{ max. } t_p \leq 5\text{ms}$	
$P_{\text{G(AV)}}$ Maximum average gate power	3.0			$T_J = T_J \text{ max. } f = 50\text{Hz, } d\% = 50$	
I_{GM} Max. peak positive gate current	3.0		A	$T_J = T_J \text{ max. } t_p \leq 5\text{ms}$	
$+V_{\text{GM}}$ Maximum peak positive gate voltage	20				
$-V_{\text{GM}}$ Maximum peak negative gate voltage	10		V	$T_J = T_J \text{ max. } t_p \leq 5\text{ms}$	
I_{GT} DC gate current required to trigger	TYP.	MAX.	mA	$T_J = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 140^\circ\text{C}$ Max. required gate trigger/ current/ voltage are the lowest value which will trigger all units 12V anode-to-cathode applied	
		180			-
		80			120
V_{GT} DC gate voltage required to trigger			V	$T_J = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 140^\circ\text{C}$	
		2.5			-
		1.6			2
I_{GD} DC gate current not to trigger	6.0		mA	Max. gate current/ voltage not to trigger is the max. value which will not trigger any unit with rated V_{DRM} anode-to-cathode applied	
V_{GD} DC gate voltage not to trigger	0.25		V	$T_J = T_J \text{ max}$	

Thermal and Mechanical Specification

Parameter	111RKI	Units	Conditions
T_J Max. operating temperature range	-40 to 140	°C	
T_{stg} Max. storage temperature range	-40 to 150		
R_{thJC} Max. thermal resistance, junction to case	0.27	K/W	DC operation
R_{thCS} Max. thermal resistance, case to heatsink	0.1		Mounting surface, smooth, flat and greased
T Mounting torque, $\pm 10\%$	15.5	Nm (lb-in)	Non lubricated threads
	(137)		Lubricated threads
	14 (120)		
wt Approximate weight	130	g	
Case style	TO-209AC (TO-94)		See Outline Table

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

111RKI Series

Bulletin I25152 rev. C 05/97

International
IGR Rectifier

ΔR_{thJC} Conduction

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

Conduction angle	Sinusoidal conduction	Rectangular conduction	Units	Conditions
180°	0.043	0.031	K/W	$T_J = T_J \text{ max.}$
120°	0.052	0.053		
90°	0.066	0.071		
60°	0.096	0.101		
30°	0.167	0.169		

Ordering Information Table

Device Code

11

1

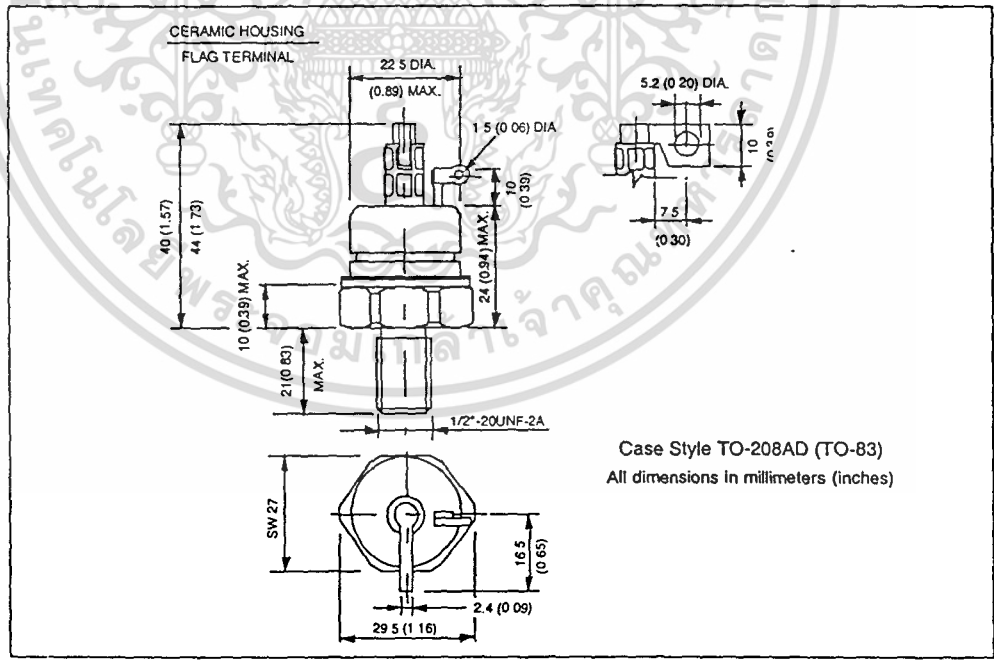
RKI

120

①
②
③
④
⑤

- 1** - $I_{T(AV)}$ rated average output current (rounded/10)
- 2** - 0 = Eyelet terminals (Gate and Auxiliary Cathode Leads)
1 = Fast - on terminals (Gate and Auxiliary Cathode Leads)
2 = Flag terminals (For Cathode and Gate Terminals)
- 3** - Thyristor
- 4** - Voltage code: Code x 10 = V_{RRM} (See Voltage Rating Table)
- 5** - Critical dv/dt: None = 500V/ μ sec
S90 = 1000V/ μ sec

Outline Table



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Outline Table

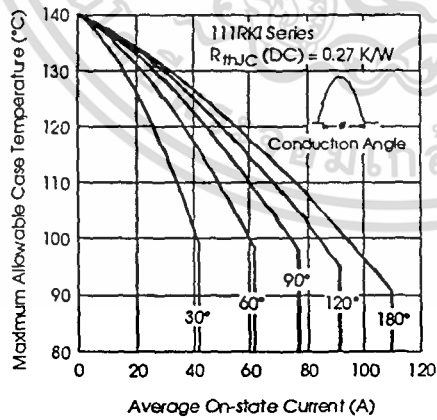
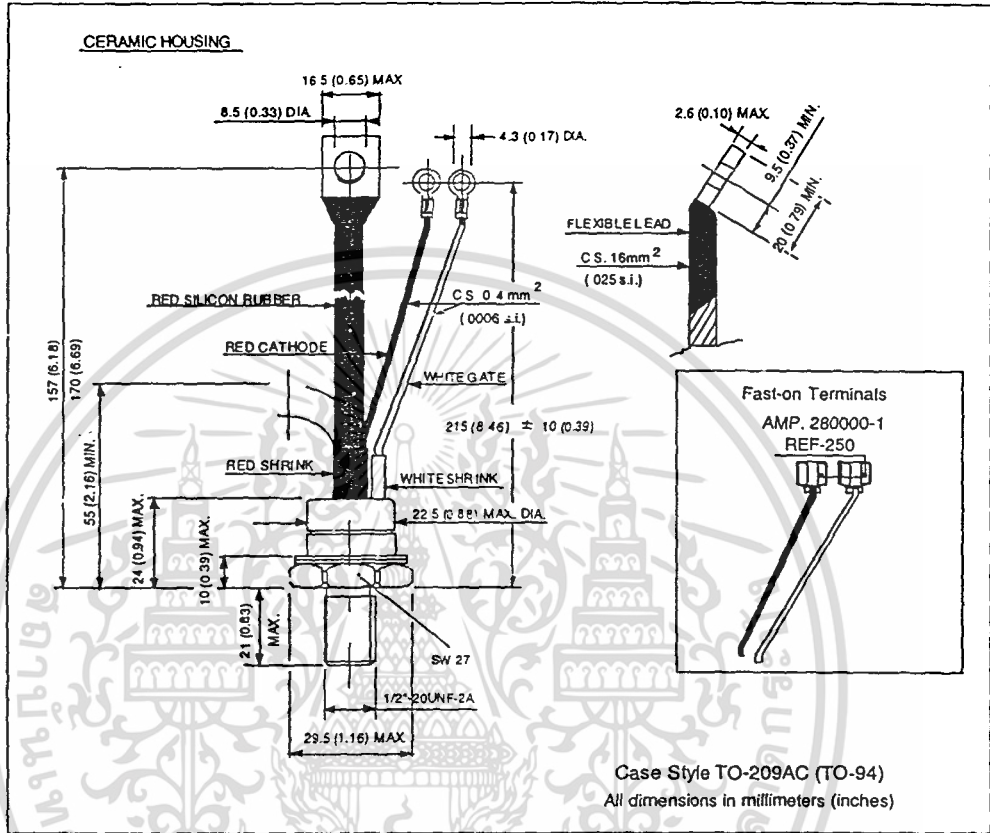


Fig. 1 - Current Ratings Characteristics

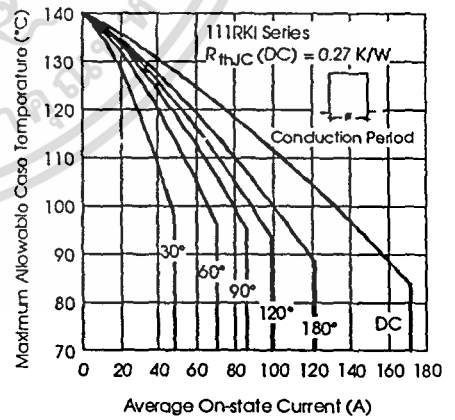


Fig. 2 - Current Ratings Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

111RKI Series

Bulletin I25152 rev. C 05/97

International
TOR Rectifier

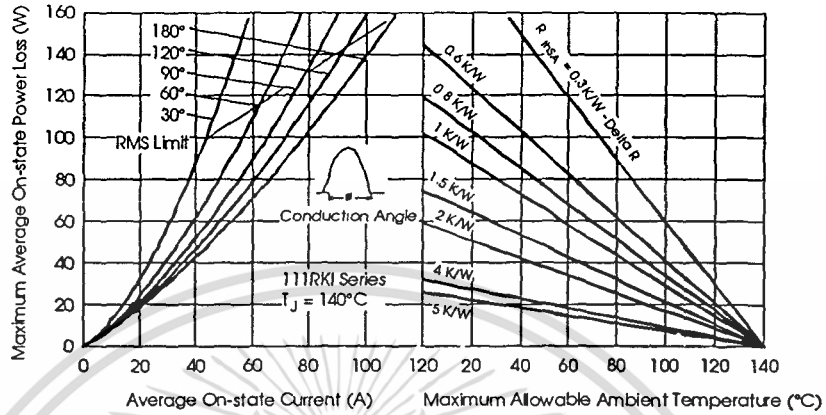


Fig. 3 - On-state Power Loss Characteristics

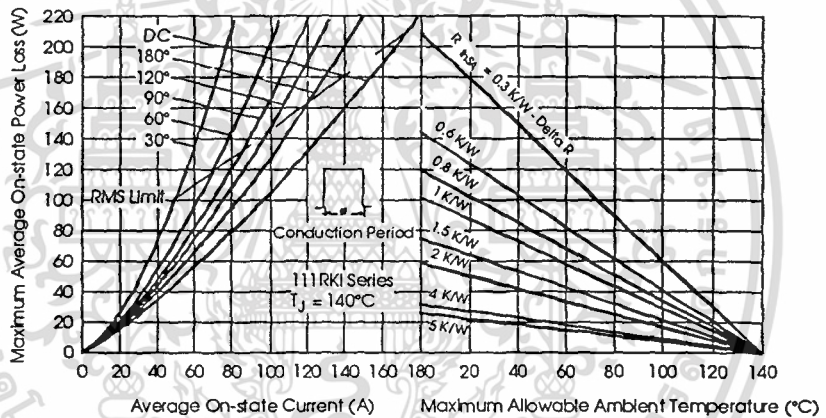


Fig. 4 - On-state Power Loss Characteristics

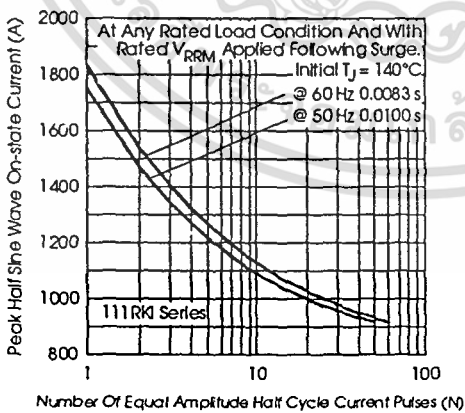


Fig. 5 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

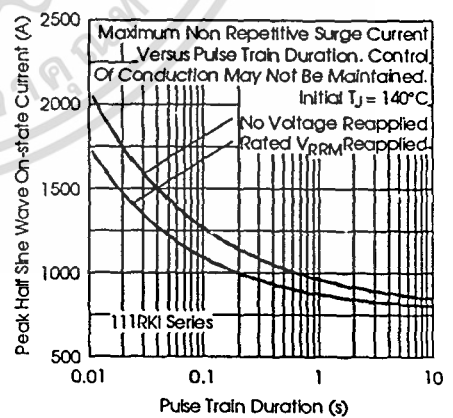


Fig. 6 - Maximum Non-Repetitive Surge Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

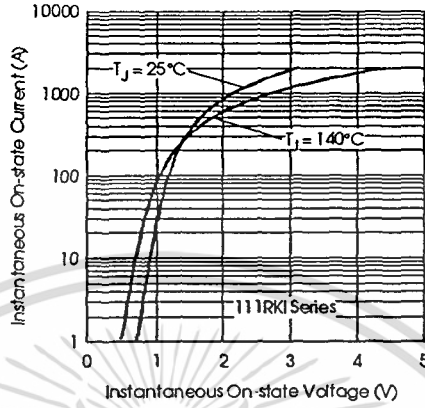


Fig. 7 - On-state Voltage Drop Characteristics

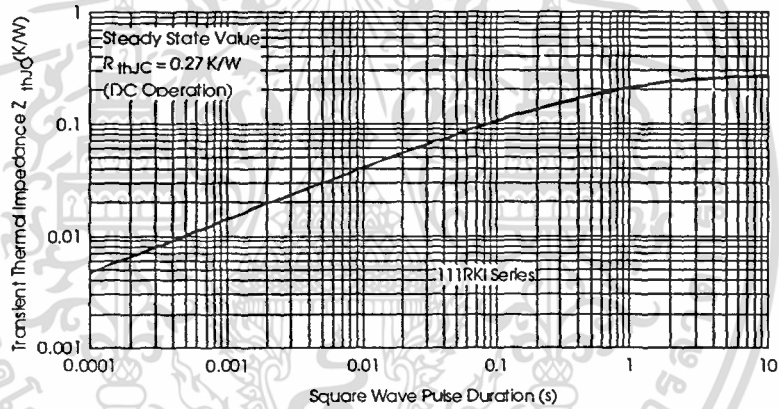


Fig. 8 - Thermal Impedance $Z_{th(jc)}$ Characteristic

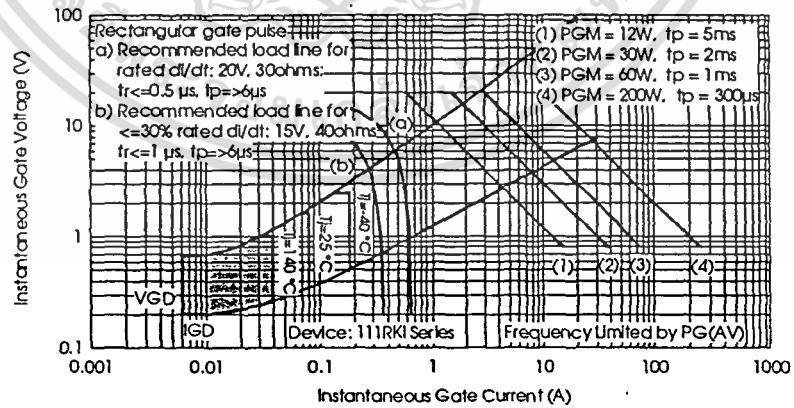


Fig. 9 - Gate Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS

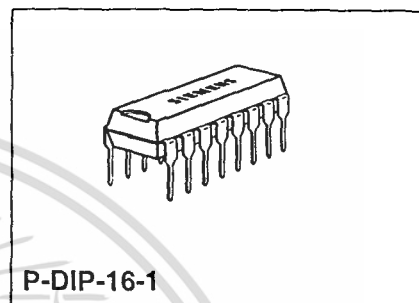
Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range

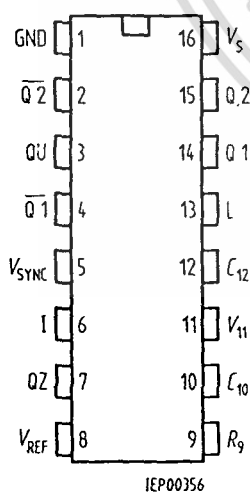


Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0° and 180° . Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.

Pin Definitions and Functions



Pin Configuration

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	Q2	Output 2 inverted
3	Q U	Output U
4	Q2	Output 1 inverted
5	V _{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	Q Z	Output Z
8	V _{REF}	Stabilized voltage
9	R ₉	Ramp resistance
10	C ₁₀	Ramp capacitance
11	V ₁₁	Control voltage
12	C ₁₂	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Functional Description

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage V_S). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor C_{10} of which is charged by a constant current (determined by R_9). If the ramp voltage V_{10} exceeds the control voltage V_{11} (triggering angle φ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage V_{11} , the triggering angle φ can be shifted within a phase angle of 0° to 180° .

For every half wave, a positive pulse of approx. $30 \mu\text{s}$ duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to 180° via a capacitor C_{12} . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between φ and 180° will result.

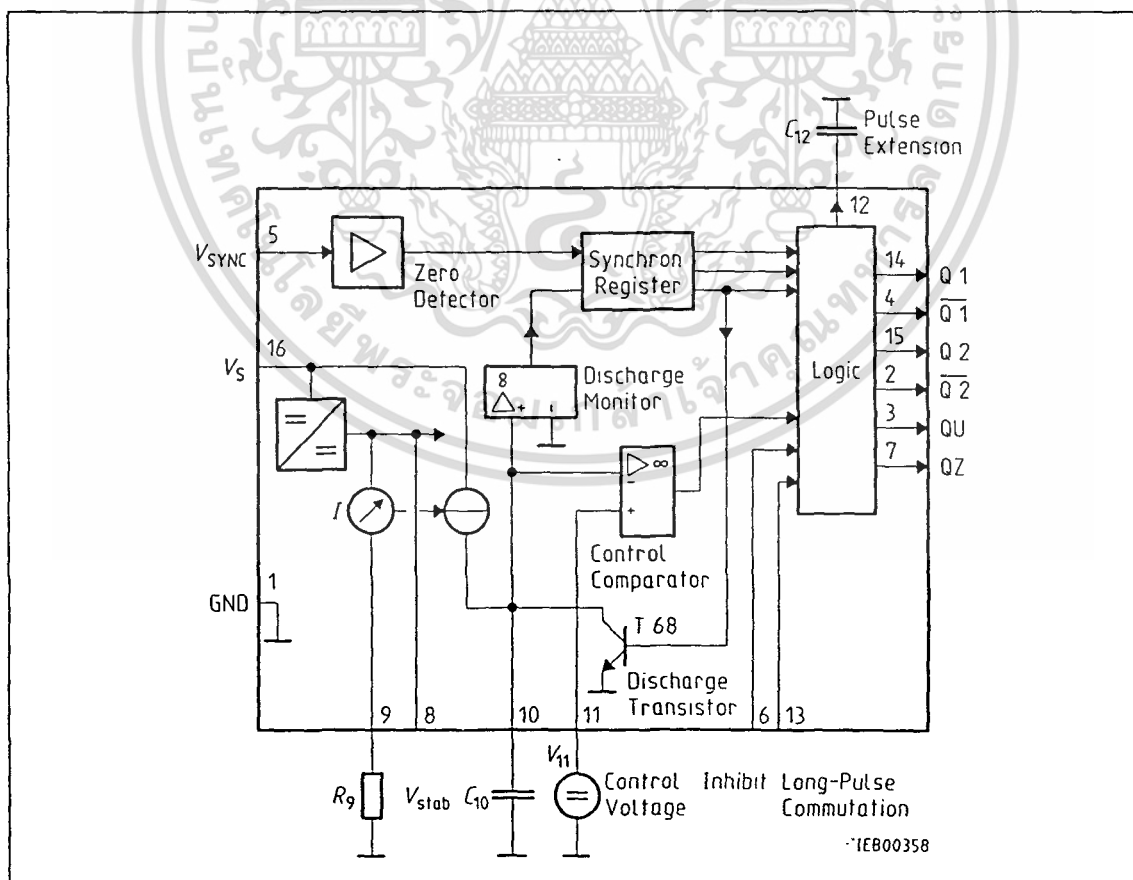
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of $\varphi + 180^\circ$ which can be used for controlling an external logic, is available at pin 3.

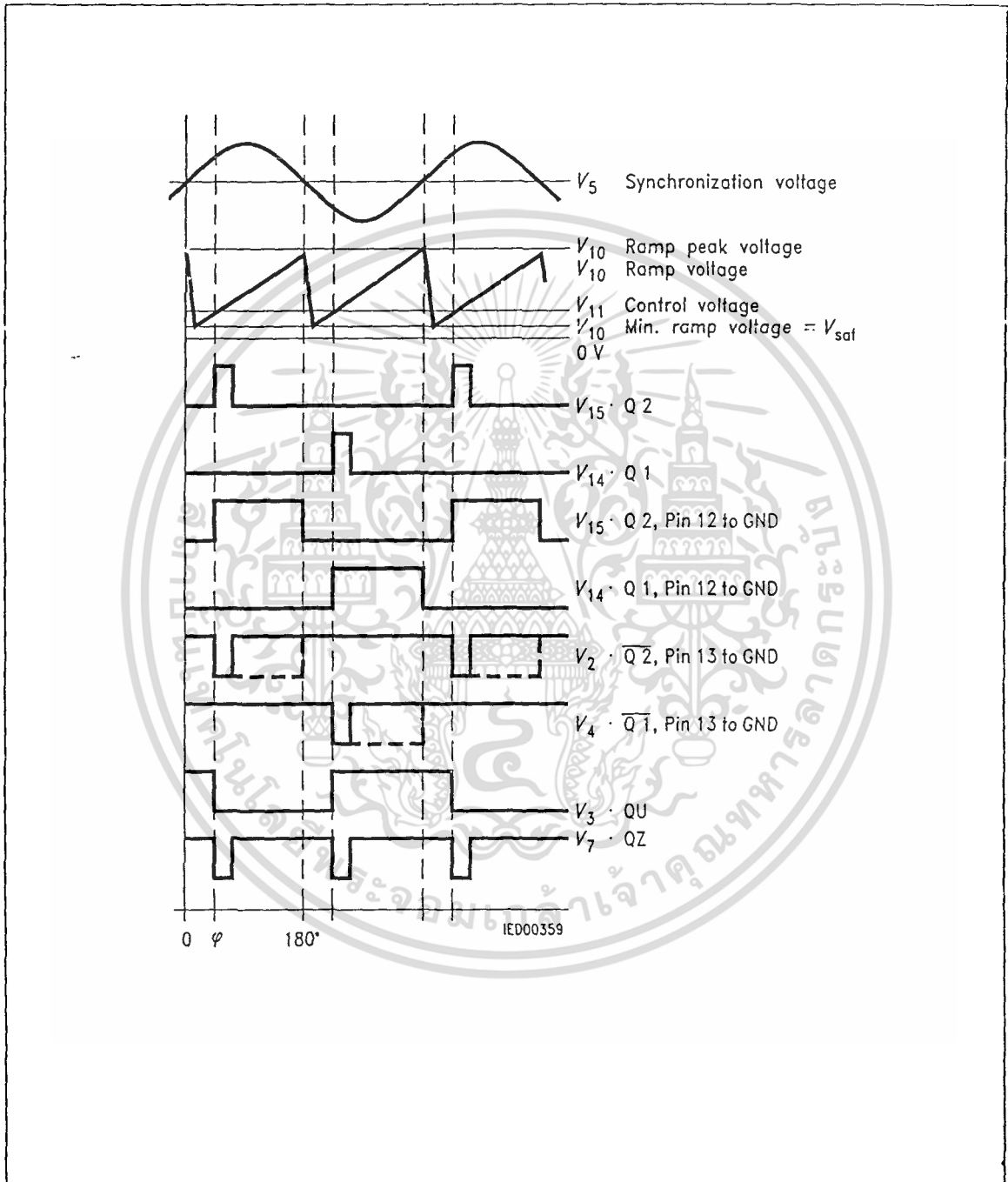
A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

The inhibit input can be used to disable outputs Q 1, Q 2 and $\overline{Q1}$, $\overline{Q2}$.

Pin 13 can be used to extend the outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ to full pulse length ($180^\circ - \varphi$).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pulse Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	V_s	- 0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	I_o	- 10	400	mA
Inhibit voltage	V_6	- 0.5	V_s	V
Control voltage	V_{11}	- 0.5	V_s	V
Voltage short-pulse circuit	V_{13}	- 0.5	V_s	V
Synchronization input current	V_5	- 200	± 200	μA
Output voltage at pin 14, 15	V_O		V_s	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	I_o		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	V_O		V_s	V
Junction temperature	T_j		150	$^{\circ}C$
Storage temperature	T_{stg}	- 55	125	$^{\circ}C$
Thermal resistance system - air	$R_{th SA}$		80	K/W

Operating Range

Supply voltage	V_s	8	18	V
Operating frequency	f	10	500	Hz
Ambient temperature	T_A	- 25	85	$^{\circ}C$

Characteristics

$8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}$; $- 25 \text{ }^{\circ}C \leq T_A \leq 85 \text{ }^{\circ}C$; $f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 \text{ V}$ $C_{10} = 47 \text{ nF}$; $R_9 = 100 \text{ k}\Omega$	I_s	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current	$I_{5 rms}$	30		200	μA	1
Offset voltage	ΔV_s		30	75	mV	4
Control input pin 11 Control voltage range	V_{11}	0.2		$V_{10 peak}$	V	1
Input resistance	$R_{..}$		15		$k\Omega$	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristics (cont'd)

 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Ramp generator:						
Charge current	I_{10}	10		1000	μA	
Max. ramp voltage	V_{10}			$V_2 - 2$	V	1
Saturation voltage at capacitor	V_{10}	100	225	350	mV	1.6
Ramp resistance	R_9	3		300	$\text{k}\Omega$	1
Sawtooth return time	t_r		80		μs	1
Inhibit pin 6						
switch-over of pin 7						
Outputs disabled	V_{6L}		3.3	2.5	V	1
Outputs enabled	V_{6H}	4	3.3		V	1
Signal transition time	t_r	1		5	μs	1
Input current	I_{6H}		500	800	μA	1
$V_6 = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{6L}$	80	150	200	μA	1
$V_6 = 1.7 \text{ V}$						
Deviation of I_{10}	I_{10}	-5		5	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 12 \text{ V}; C_{10} = 47 \text{ nF}$						
Deviation of I_{10}	I_{10}	-20		20	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 8 \text{ V to } 18 \text{ V}$						
Deviation of the ramp voltage						
between 2 following						
half-waves, $V_s = \text{const.}$	$\Delta V_{10 \text{ max}}$		± 1		%	
Long pulse switch-over						
pin 13						
switch-over of S8						
Short pulse at output	V_{13H}	3.5	2.5		V	1
Long pulse at output	V_{13L}		2.5	2	V	1
Input current	I_{13H}			10	μA	1
$V_{13} = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{13L}$	45	65	100	μA	1
$V_{13} = 1.7 \text{ V}$						
Outputs pin 2, 3, 4, 7						
Reverse current	I_{CEO}			10	μA	2.6
$V_o = V_s$						
Saturation voltage	V_{sat}	0.1	0.4	2	V	2.6
$I_o = 2 \text{ mA}$						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristics (cont'd)
 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Outputs pin 14, 15 H-output voltage $-I_O = 250 \text{ mA}$	$V_{14/15 H}$	$V_s - 3$	$V_s - 2.5$	$V_s - 1.0$	V	3.6
L-output voltage $I_O = 2 \text{ mA}$	$V_{14/15 L}$	0.3	0.8	2	V	2.6
Pulse width (short pulse) S9 open	t_p	20	30	40	μs	1
Pulse width (short pulse) with C_{12}	t_p	530	620	760	$\mu\text{s}/\text{nF}$	1
Internal voltage control Reference voltage	V_{REF}	2.8	3.1	3.4	V	1
Parallel connection of 10 ICs possible TC of reference voltage	α_{REF}		2×10^{-4}	5×10^{-4}	1/K	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

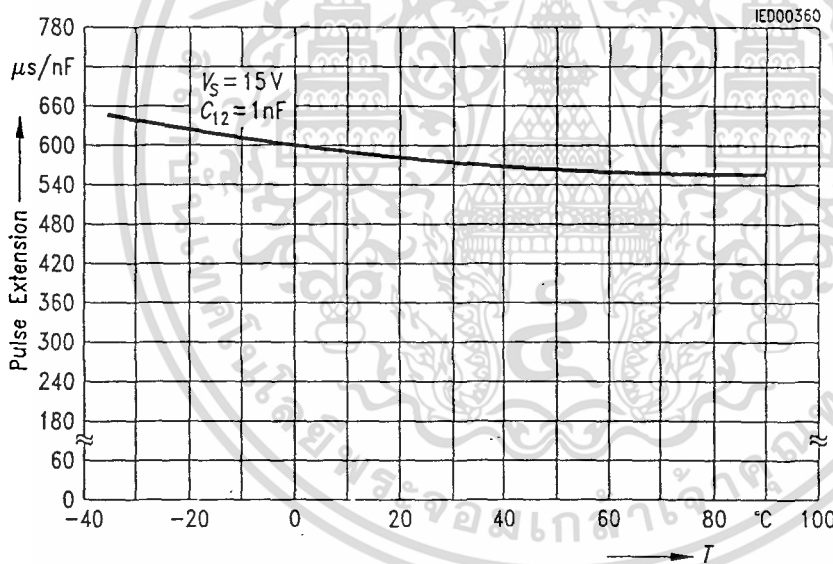
Application Hints for External Components

Ramp capacitance C_{10} min max
 500 pF 1 μ F¹⁾ The minimum and maximum values of I_{10} are to be observed

Triggering point $t_{tr} = \frac{V_{11} \times R_9 \times C_{10}}{V_{REF} \times K}$ 2)

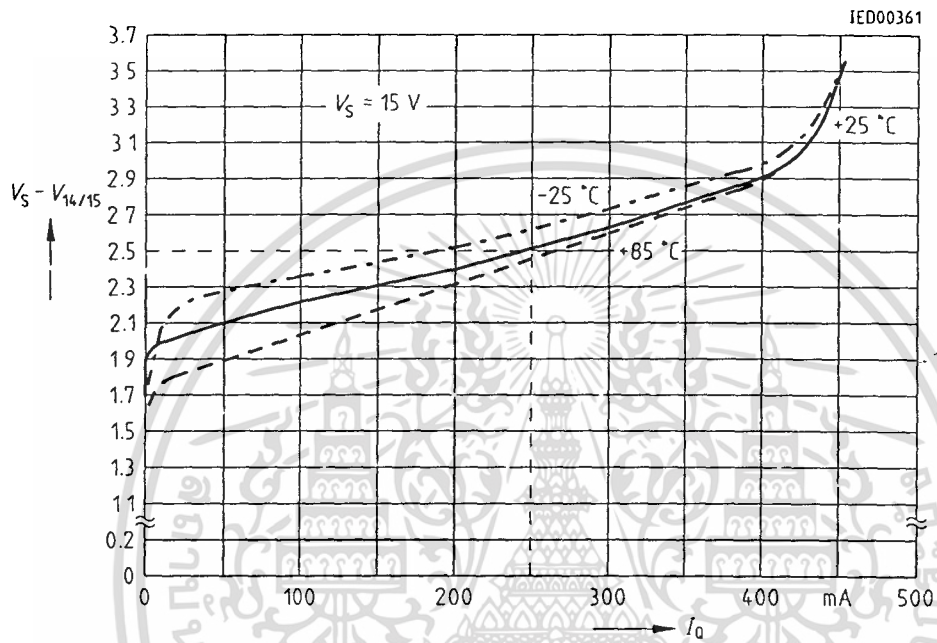
Charge current $I_{10} = \frac{V_{REF} \times K}{R_9}$ 2) Ramp voltage
 $V_{10 \max} = V_S - 2 \text{ V}$ $V_{10} = \frac{V_{REF} \times K \times t}{R_9 \times C_{10}}$ 2)

Pulse Extension versus Temperature

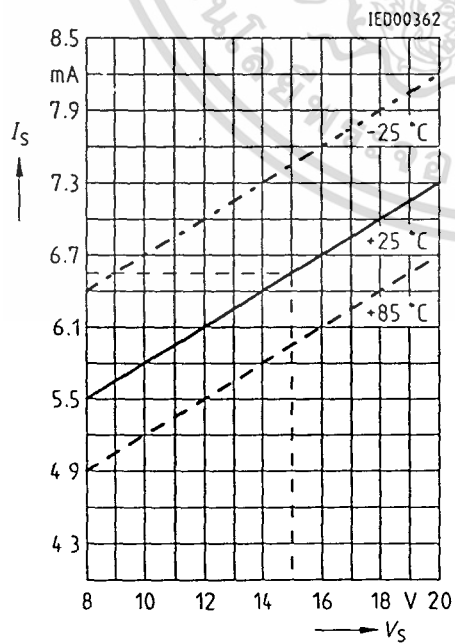


1) Attention to flyback times

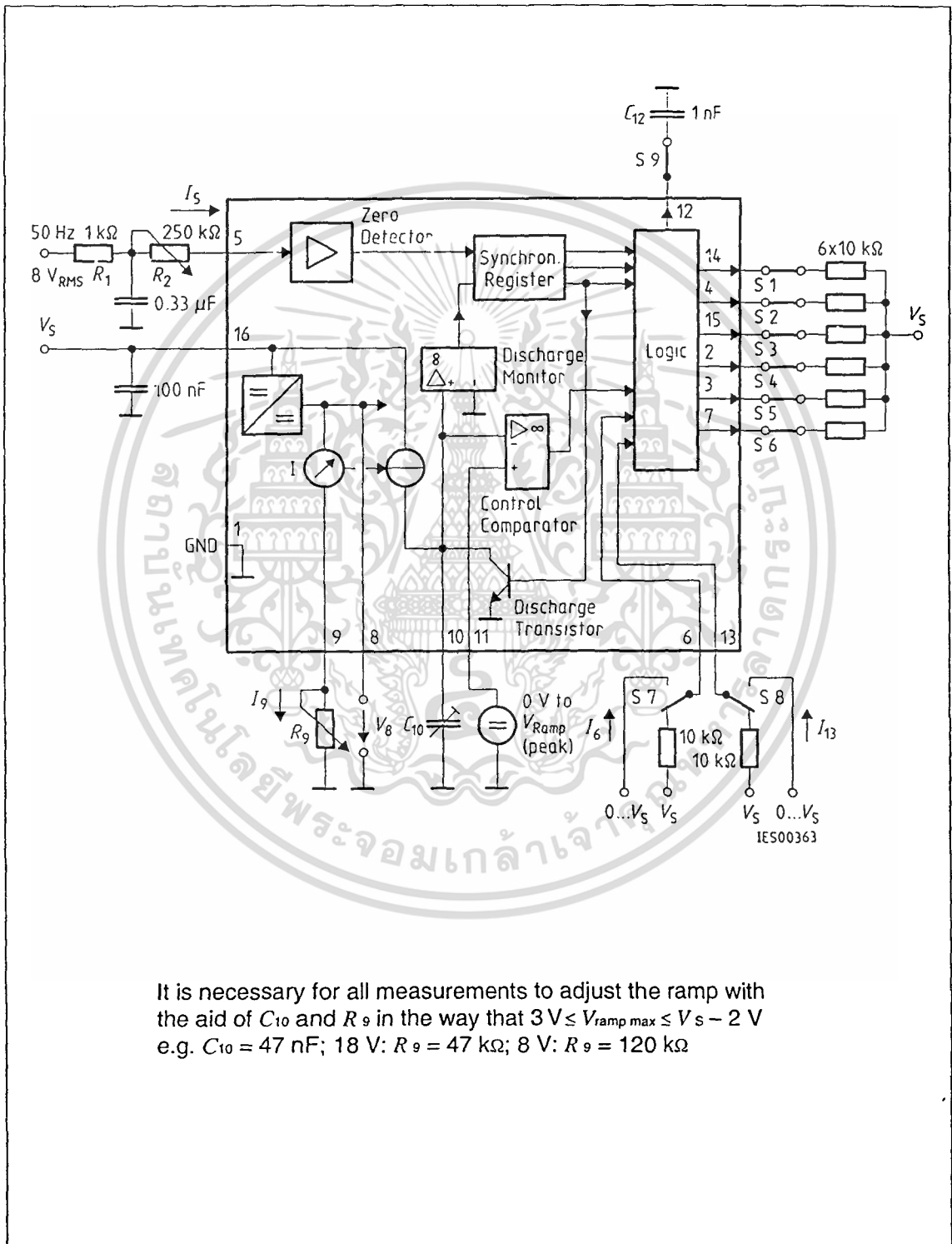
2) $K = 1.10 \pm 20 \%$

Output Voltage measured to + V_S 

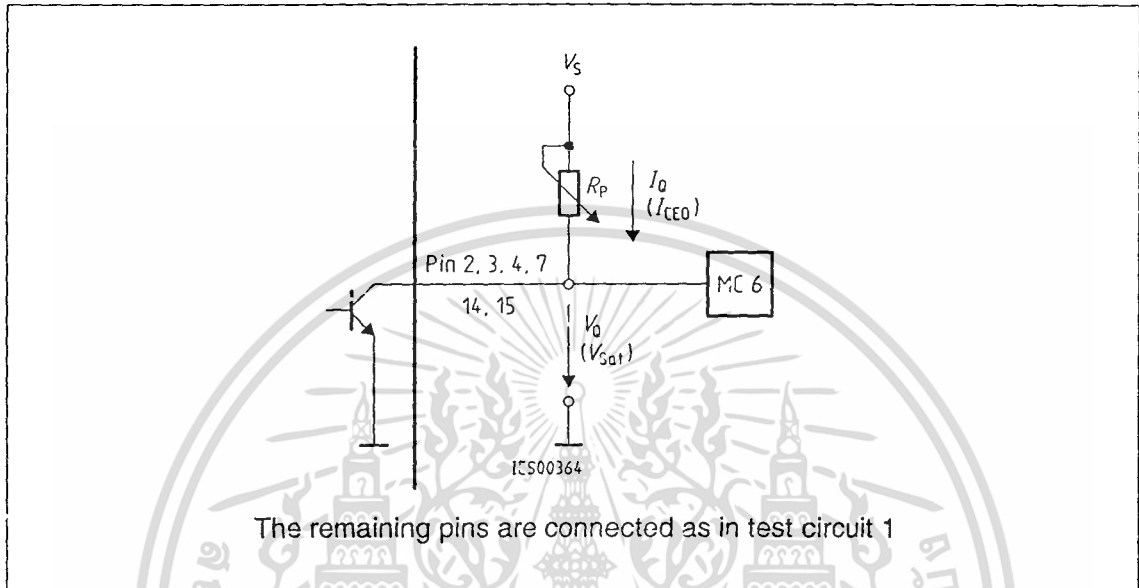
Supply Current versus Supply Voltage



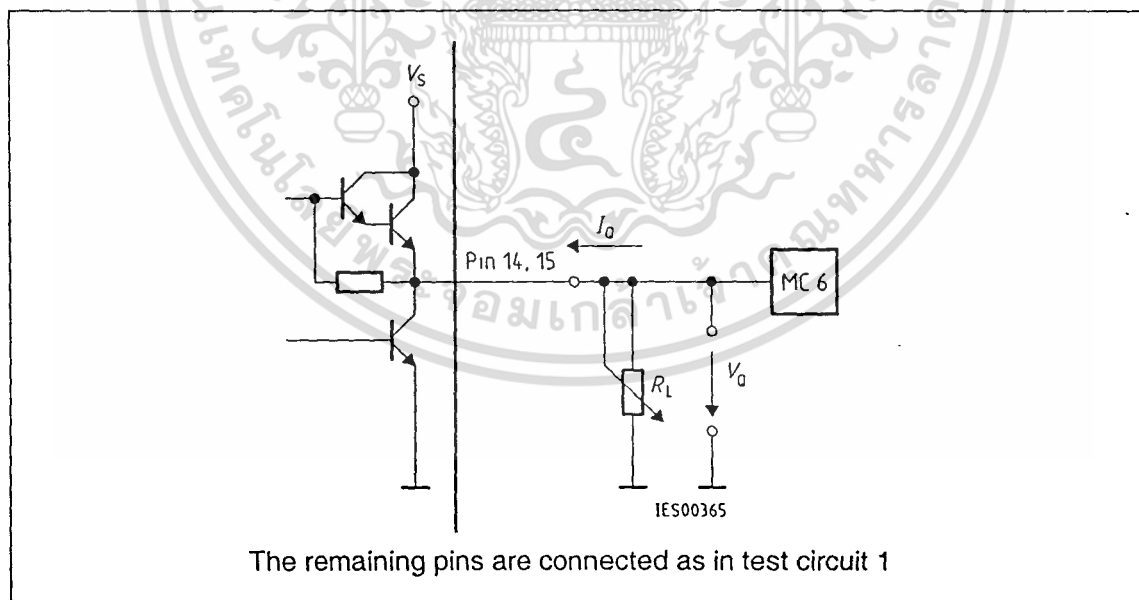
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

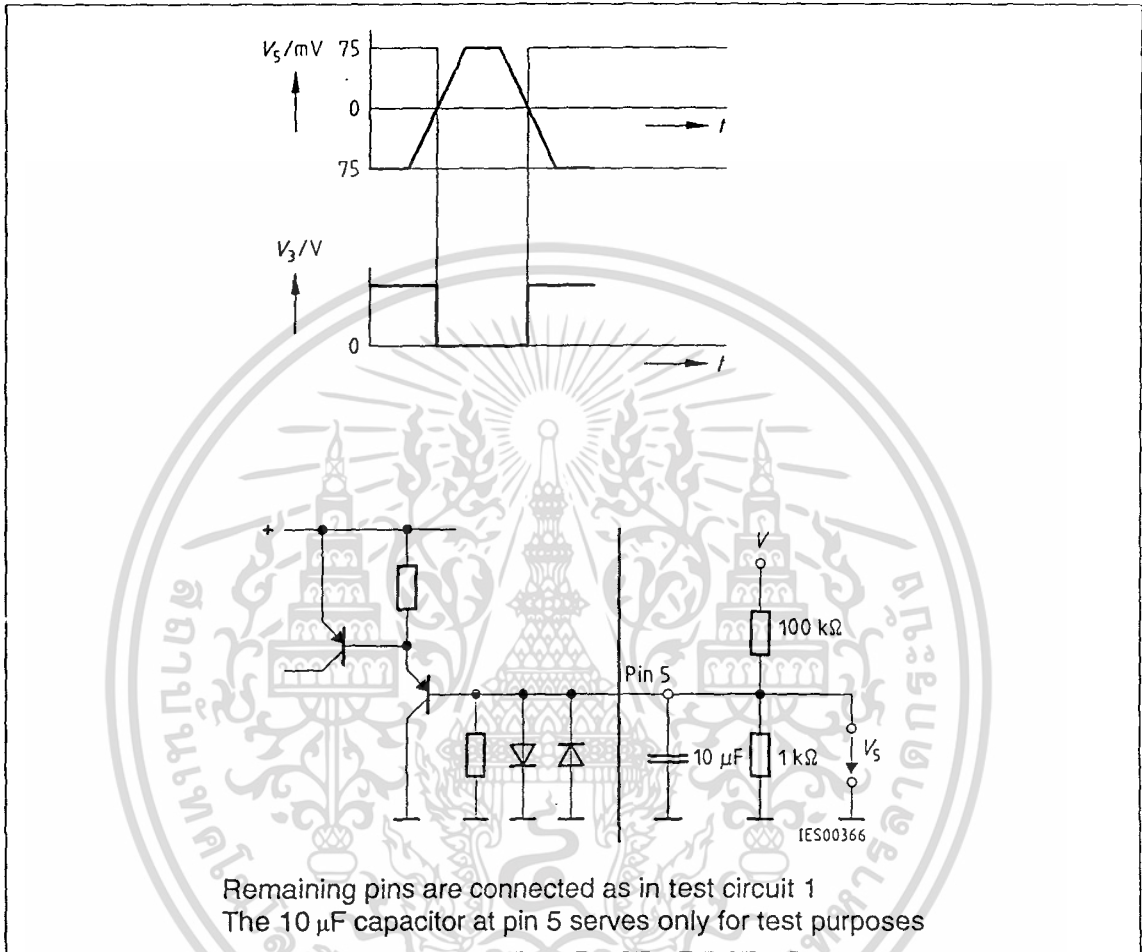


Test Circuit 2

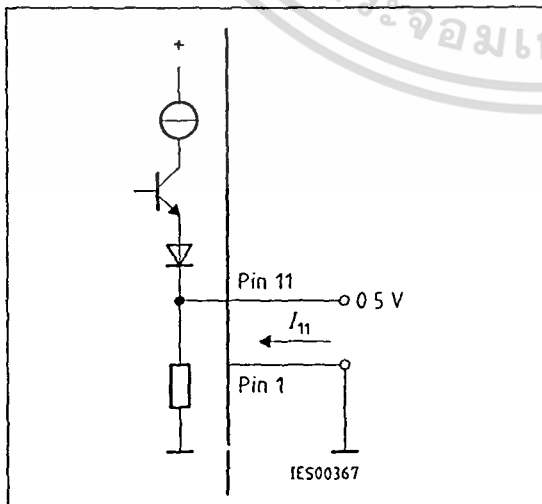


Test Circuit 3

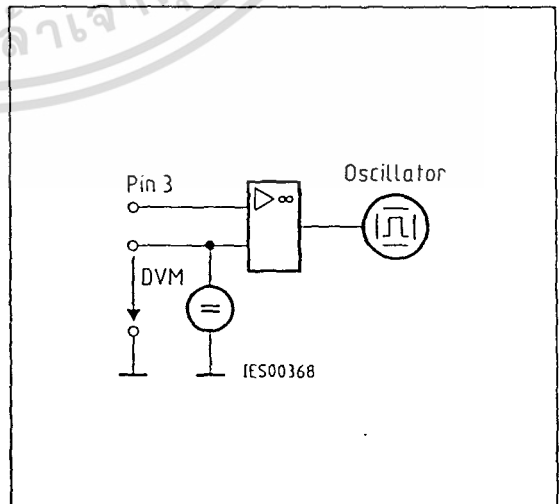
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Test Circuit 4

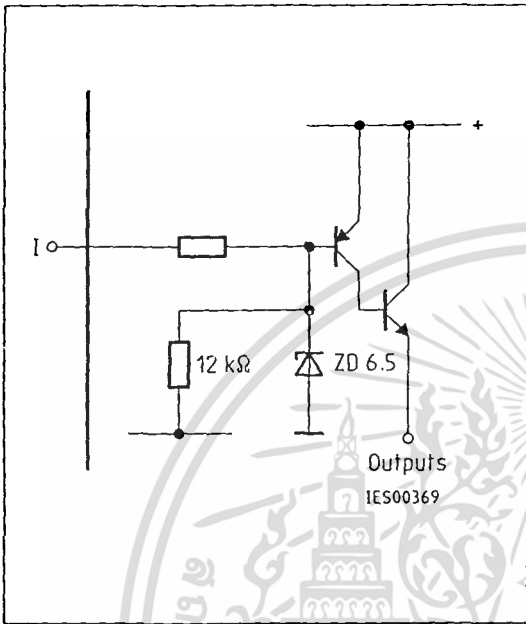


Test Circuit 5

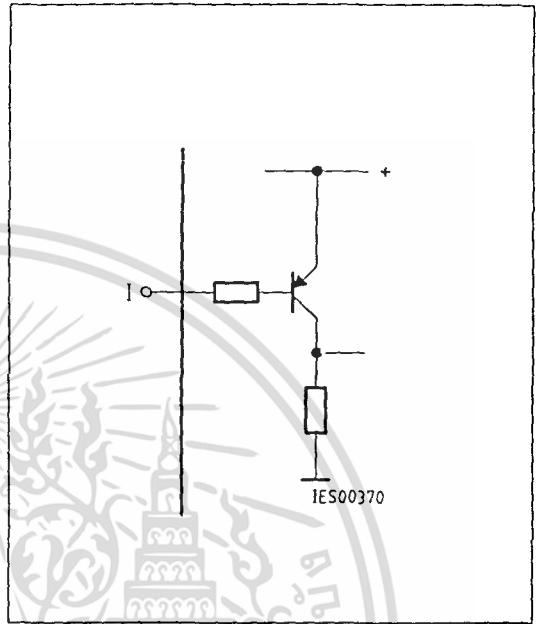


Test Circuit 6

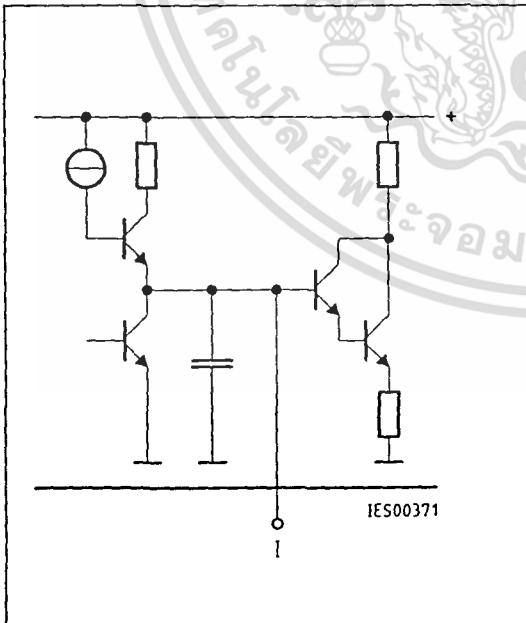
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



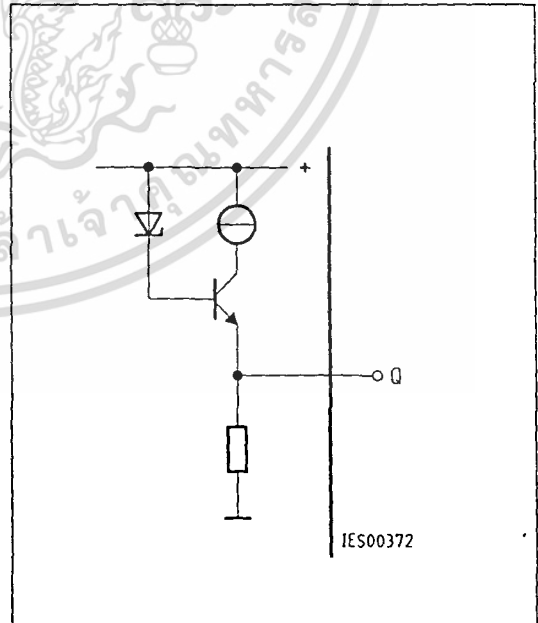
Inhibit 6



Long Pulse 13

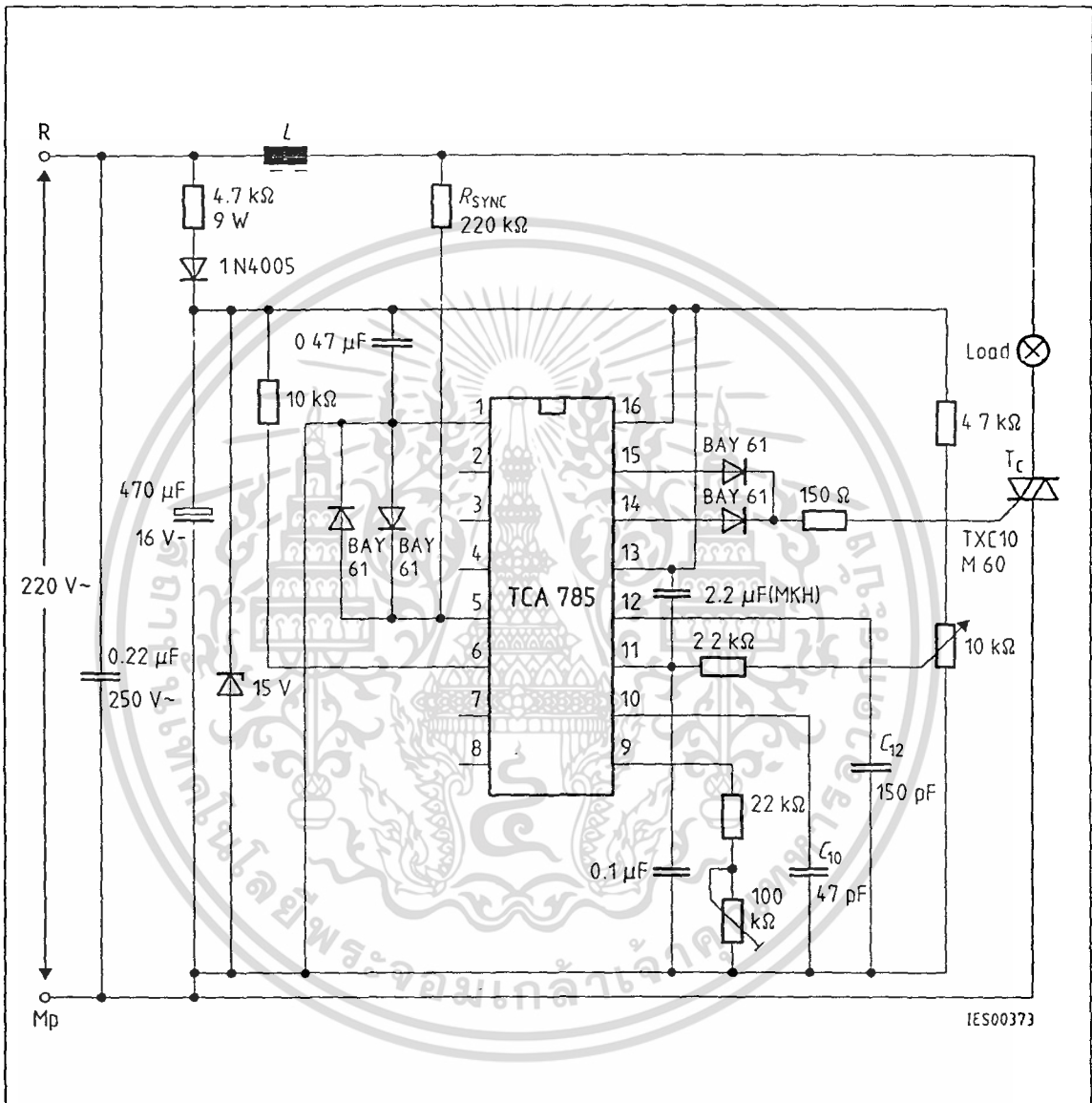


Pulse Extension 12



Reference Voltage 8

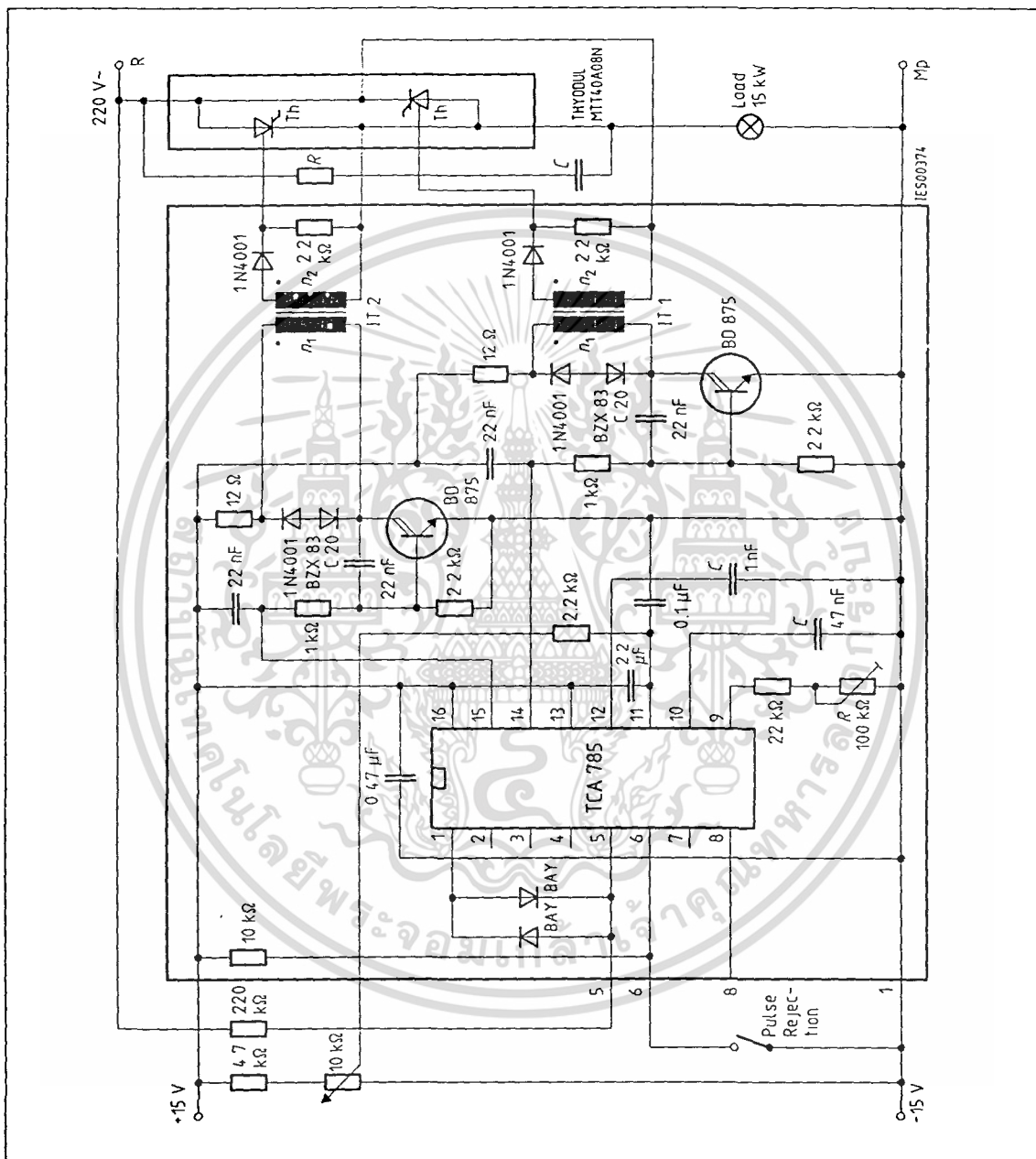
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Application Examples
Triac Control for up to 50 mA Gate Trigger Current

A phase control with a directly controlled triac is shown in the figure. The triggering angle of the triac can be adjusted continuously between 0° and 180° with the aid of an external potentiometer. During the positive half-wave of the line voltage, the triac receives a positive gate pulse from the IC output pin 15. During the negative half-wave, it also receives a positive trigger pulse from pin 14. The trigger pulse width is approx. 100 μ s.

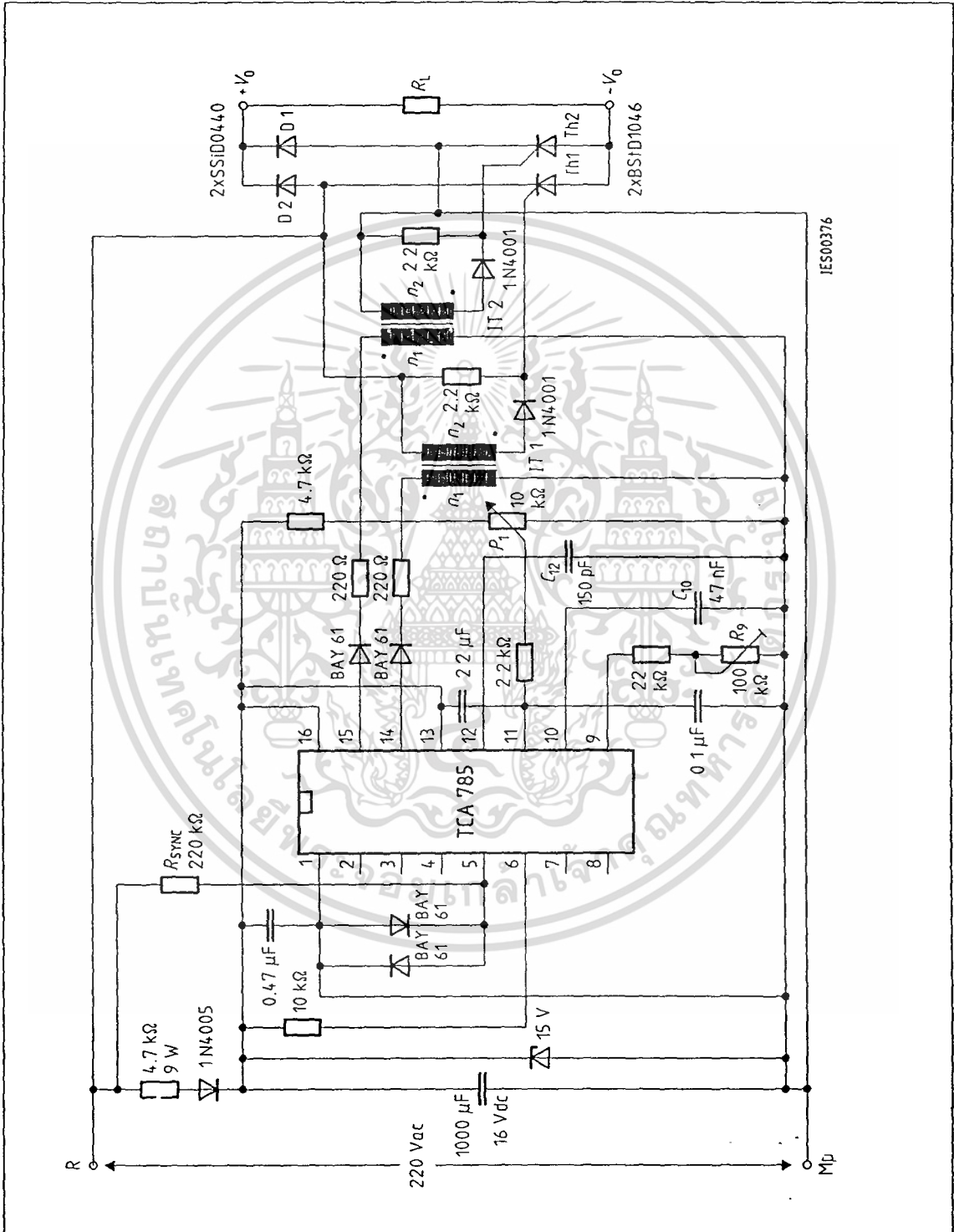
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Fully Controlled AC Power Controller
Circuit for Two High-Power Thyristors**

Shown is the possibility to trigger two antiparalleled thyristors with one IC TCA 785. The trigger pulse can be shifted continuously within a phase angle between 0° and 180° by means of a potentiometer. During the negative line half-wave the trigger pulse of pin 14 is fed to the relevant thyristor via a trigger pulse transformer. During the positive line half-wave, the gate of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Two Trigger Pulse Transformers for Low Power Thyristors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมควบคุมการทำงาน

```

;Port3= Into DA
;Key matrix Port1
;Display =Port0 scan display =P2.0-2.3
;PROGRAM FOR DAC0804
*****
ORG      0000H
MOV     P3,#0FFH
MOV     R0,#00H
MOV     R1,#00H
MOV     R2,#00H
MOV     R3,#00H
MOV     R4,#00H
MAIN:   ACALL  KEY
        ACALL  DIS
        SJMP  MAIN
KEY:    MOV     P1,#0FEH
        ACALL  DELAY
        MOV     A,P1
        CJNE  A,#0F6H,KEY1      ;KEY1
KK1:    MOV     A,P1
        PUSH  ACC
        ACALL DIS
        POP   ACC
        CJNE  A,#0FEH,KK1
        MOV   A,#01H
        LJMP GH

```

```

KEY1:    MOV     A,P1
          CJNE   A,#0EEH,KEY2      ;KEY4
KK2:     MOV     A,P1
          PUSH   ACC
          ACALL  DIS
          POP    ACC
          CJNE   A,#0FEH          ;KK2
          MOV    A,#04H
          LJMP   GH
KEY2:    MOV     A,P1
          CJNE   A,#0DEH,KEY3      ;KEY7
KK3:     MOV     A,P1
          PUSH   ACC
          ACALL  DIS
          POP    ACC
          CJNE   A,#0FEH          ;KK3
          MOV    A,#07H
          LJMP   GH
KEY3:    MOV     A,P1
          CJNE   A,#0BEH,KEY4      ;RES
          MOV    A,#00H
          MOV    R0,#00H
          MOV    R1,#00H
          MOV    R2,#00H
          MOV    R3,#00H
          MOV    R4,#00H
          LJMP   GH                ;*****
KEY4:    MOV     P1,#0FDH
          ACALL  DELAY
          MOV    A,P1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	CJNE	A,#0F5H,KEY5	;KEY2
KK4:	MOV	A,P1	
	PUSH	ACC	
	ACALL	DIS	
	POP	ACC	
	CJNE	A,#0FDH,KK4	
	MOV	A,#02H	
	LJMP	GH	
KEY5:	MOV	A,P1	
	CJNE	A,#0EDH,KEY6	;KEY5
KK5:	MOV	A,P1	
	PUSH	ACC	
	ACALL	DIS	
	POP	ACC	
	CJNE	A,#0FDH,KK5	
	MOV	A,#05H	
	SJMP	GH	
KEY6:	MOV	A,P1	
	CJNE	A,#0DDH,KEY7	;KEY8
KK6:	MOV	A,P1	
	PUSH	ACC	
	ACALL	DIS	
	POP	ACC	
	CJNE	A,#0FDH,KK6	
	MOV	A,#08H	
	SJMP	GH	
KEY7:	MOV	A,P1	
	CJNE	A,#0BDH,KEY8	;KEY0
KK7:	MOV	A,P1	
	PUSH	ACC	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ACALL	DIS
	POP	ACC
	CJNE	A,#0FDH, KK7
	MOV	A,#00H
	SJMP	GH
KEY8:	MOV	P1,#0FBH
	ACALL	DELAY
	MOV	A,P1
	CJNE	A,#0F3H, KEY9 ;KEY3
KK8:	MOV	A,P1
	PUSH	ACC
	ACALL	DIS
	POP	ACC
	CJNE	A,#0FBH, KK8
	MOV	A,#03H
	SJMP	GH
KEY9:	MOV	A,P1
	CJNE	A,#0EBH, KEY10 ;KEY6
KK9:	MOV	A,P1
	PUSH	ACC
	ACALL	DIS
	POP	ACC
	CJNE	A,#0FBH, KK9
	MOV	A,#06H
	SJMP	GH
KEY10:	MOV	A,P1
	CJNE	A,#0DBH, KEY11 ;KEY9
KK10:	MOV	A,P1
	PUSH	ACC
	ACALL	DIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

POP          ACC
CJNE        A,#0FBH,KK10
MOV         A,#09H
SJMP        GH
KEY11:      CJNE        A,#0BBH,KEY12      ;KEYST
LJMP        RUN      ;*****
KEY12:      RET
DELAY:      MOV         R6,#10H
DEL:        MOV         R7,#0FH
            DJNZ        R7,$
            DJNZ        R6,DEL
            RET
GH:         CJNE        R0,#00H,LO1
            INC         R0
            MOV         1H,A
            SJMP        DIS
LO1:        CJNE        R0,#01H,LO2
            INC         R0
            MOV         2H,A
            SJMP        DIS
LO2:        CJNE        R0,#02H,LO3
            INC         R0
            MOV         3H,A
            SJMP        DIS
LO3:        CJNE        R0,#03H,LO4
            INC         R0
            MOV         4H,A
            MOV         R0,#00H
LO4:        SJMP        DIS
DIS:        MOV         A,R1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV      P2,#0F7H
ACALL   DISPLAY
ACALL   DELAY
MOV      A,R2
MOV      P2,#0FBH
ACALL   DISPLAY
ACALL   DELAY
MOV      A,R3
MOV      P2,#0FDH
ACALL   DISPLAY
ACALL   DELAY
MOV      A,R4
MOV      P2,#0FEH
ACALL   DISPLAY
RET
DISPLAY: CJNE   A,#00H,E1
MOV      P0,#0C0H
ACALL   DELAY1
E1:      CJNE   A,#01H,E2
MOV      P0,#0F9H
ACALL   DELAY1
E2:      CJNE   A,#02H,E3
MOV      P0,#0A4H
ACALL   DELAY1
E3:      CJNE   A,#03H,E4
MOV      P0,#0B0H
ACALL   DELAY1
E4:      CJNE   A,#04H,E5
MOV      P0,#099H
ACALL   DELAY1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

E5:      CJNE      A,#05H,E6
          MOV       P0,#092H
          ACALL    DELAY1
E6:      CJNE      A,#06H,E7
          MOV       P0,#082H
          ACALL    DELAY1
E7:      CJNE      A,#07H,E8
          MOV       P0,#0F8H
          ACALL    DELAY1
E8:      CJNE      A,#08H,E9
          MOV       P0,#080H
          ACALL    DELAY1
E9:      CJNE      A,#09H,E10
          MOV       P0,#090H
          ACALL    DELAY1
E10:     RET
DELAY1:  MOV       R6,#0FH
DEL1:    MOV       R7,#0FH
          DJNZ     R7,$
          DJNZ     R6,DEL1
          RET
RUN:     CLR      C
          MOV      B,#0AH
          MOV      A,R2      ;หลัก10
          MUL     AB
          MOV     R5,A      ;เก็บหลัก10
          MOV     B,#64H    ;หลัก100
          MOV     A,R3
          MUL     AB
          MOV     R6,A      ;เก็บหลัก100

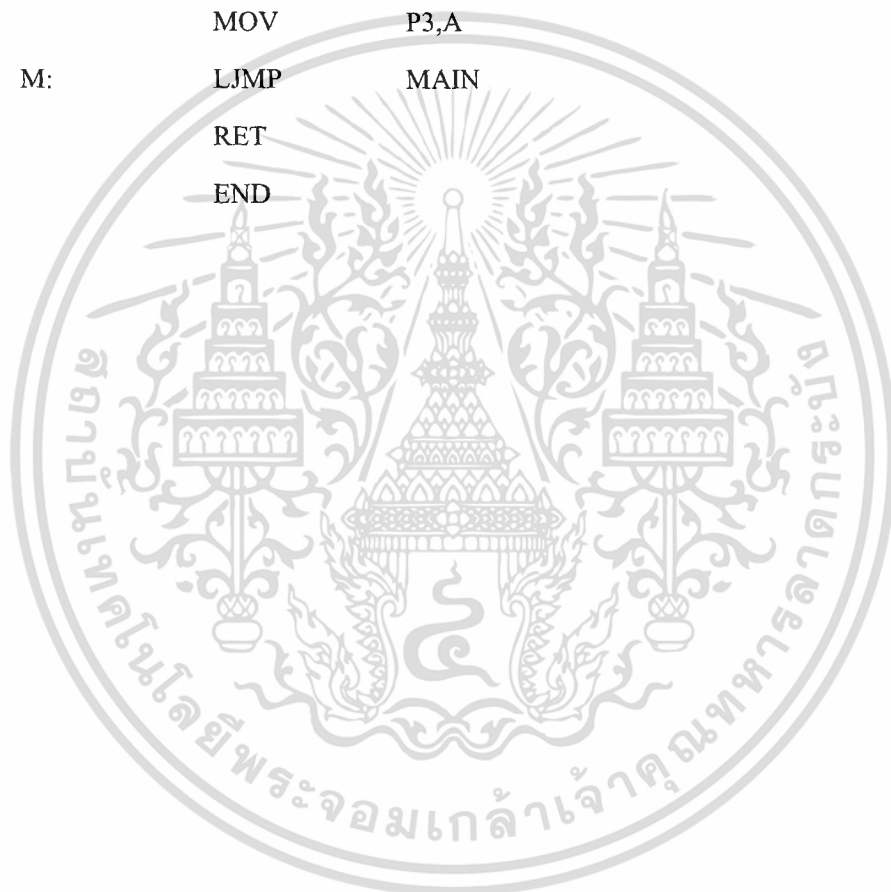
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV      A,R1
ADD      A,R5
ADDC     A,R6
JC M
MOV      R7,A
MOV      A,#0FFH
SUBB    A,R7
MOV      P3,A
M:      LJMP   MAIN
RET
END

```



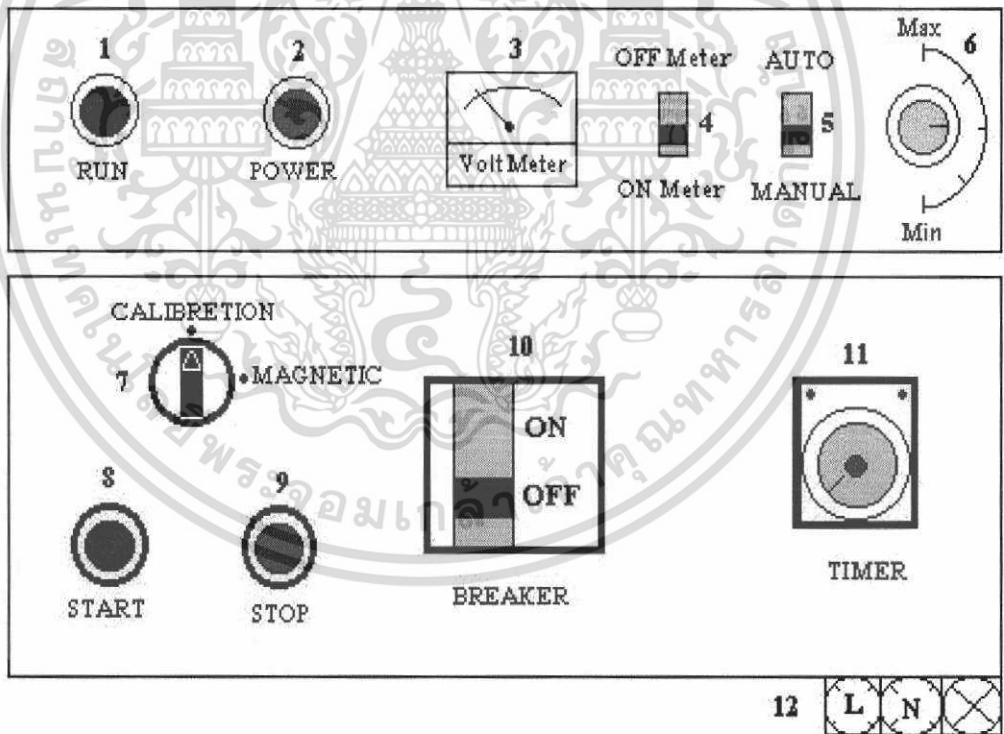
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คำแนะนำในการติดตั้งเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

- 1) ตรวจสอบเช็คอุปกรณ์ให้ครบถ้วน
- 2) ตรวจสอบเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าว่าอยู่ในสภาพเรียบร้อยหรือไม่ เช่น สายไฟตามจุดต่อต่างๆ หลุด หลวมหรือไม่
- 3) การต่อไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องทำตามที่กำหนดให้เท่านั้น คือ สาย Line ต่อเข้าขั้วต่อไฟ L ส่วนสาย Neutral ต่อเข้าขั้วต่อไฟ N ซึ่งจะต้องทำการตรวจสอบทุกครั้งก่อนใช้งาน หากต่อสายไม่ถูกต้องตามที่กำหนด แล้วใช้งานเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเสียหายทันที
- 4) ควรวางเครื่องให้ห่างอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น หรือเครื่องมือในการสื่อสารต่างๆ



รูปที่ จ.1 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนประกอบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

- 1) ไฟ RUN แสดงสถานะของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กว่าเครื่องทำงานอยู่
- 2) ไฟ POWER แสดงสถานะของเครื่องว่าพร้อมที่จะ Start ได้
- 3) Volt Meter โชว์ค่าแรงดันที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กแสดงเป็นค่าแรงดันไฟ DC
- 4) Switch Volt Meter สำหรับ เปิด-ปิด Volt Meter (จะปิด Volt Meter เมื่อทำการสร้างแท่งแม่เหล็ก หรือทำงาน โหมด MAGNETIC)
- 5) Switch Auto-Manual เมื่อทำงานในโหมด CALIBRETION สามารถเลือกที่จะทำงานในโหมด Auto หรือ Manual ได้
- 6) Volt Volume สำหรับปรับเลือกค่าแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (เมื่อเลือกการทำงานในโหมด CALIBRETION แบบ Manual)
- 7) Switch Mode เลือกโหมดการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 8) SW. Start เมื่อต้องการ Run เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 9) SW. Stop เมื่อต้องการหยุดการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- 10) BREAKER สำหรับ ON-OFF ไฟเข้าสู่ระบบ และป้องกันการช็อตลงกราวด์ หรือ Over lode
- 11) Timer ปรับตั้งเวลาที่ใช้ในการสร้างแท่งแม่เหล็กหน่วยเป็นวินาที (Second)
- 12) Plug In จุดต่อไฟเข้าสู่เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (L ต่อเข้าเส้นไฟ และ N ต่อเข้าเส้น นิวตรอน)

3. การทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งการทำงานเป็น 2 แบบคือ

3.1 การสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อการ Calibration

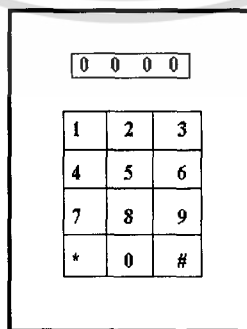
ในโหมดของการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อการ Calibration สามารถเลือกการทำงานได้ 2 ลักษณะคือ แบบ Auto และแบบ Manual โดยการปรับเลือกที่ SW. Auto - Manual

3.1.1 โหมด Manual เมื่อต้องการใช้โหมด Manual ให้ปรับ SW. Auto - Manual ไปที่ Manual แล้วทำการปรับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับขดลวดโดยการปรับ VR แล้วสังเกตแรงดันที่เปลี่ยนแปลงที่โวลต์มิเตอร์ ซึ่งค่าแรงดันสามารถจ่ายได้ตั้ง 0-30 โวลต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการปฏิบัติ

- 1) เลือก Switch Mode ไปที่ CALIBRETION
- 2) ปรับเลือก SW. Auto – Manual ไปที่ Manual
- 3) ดูค่าสนามแม่เหล็กที่ต้องการจากตารางที่ ว่าต้องใช้ค่าแรงดันเท่าใด
- 4) เปิด SW. ON Meter
- 5) ปรับเลือกค่าแรงดันที่ต้องการ ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กโดยปรับที่ Volt Volume
- 6) กด SW. Start เพื่อให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำงาน
- 7) กด SW. Stop เมื่อต้องการหยุดการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1.2 โหมด Auto เป็น โหมดที่เชื่อมต่อการทำงานเข้ากับ MCS-51 ซึ่งค่าของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่สามารถปรับเทียบได้ตั้งแต่ 0-5,000 เกาส์การใช้งานของโหมดนี้สามารถป้อนค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ต้องการที่ keyboard ค่าของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะปรากฏที่ LED ตามที่กำหนด แล้วกด Enter (#) เพื่อให้เครื่องรับค่าที่ป้อน โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ ๑.2 กล่องคีย์สำหรับป้อนค่าเกาส์ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการปฏิบัติ

- 1) เลือกโหมดการทำงานของเครื่องโดยปรับ Switch Mode ไปที่ CALIBRETION
- 2) ปรับเลือก SW. Auto – Manual ไปที่ Auto
- 3) เปิด SW. On Meter
- 4) คีย์ค่าเกาส์ที่ต้องการสร้างโดยการป้อนที่กล่องคีย์ (ได้ตั้งแต่ 0 – 5,000 เกาส์)
- 5) กดคีย์ Enter (#) เพื่อยืนยันค่าเกาส์ที่ต้องการสร้าง
- 6) หากต้องการเปลี่ยนค่าเกาส์ที่ต้องการสร้างให้กดคีย์ Reset (*) ก่อน LED จะแสดงค่า0000 แล้วจึงคีย์ค่าเกาส์ที่ต้องการเข้าไปใหม่ (0 – 5,000 เกาส์)
- 7) กด SW. Start เพื่อให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำงาน
- 8) กด SW. Stop เมื่อต้องการหยุดการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2 การสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อการสร้างแท่งแม่เหล็ก

เมื่อต้องการให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องสร้างแม่เหล็กหรือการเปลี่ยนสภาพของวัสดุสารแม่เหล็กให้แสดงคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กออกมา ก็สามารถทำได้ ในย่านการทำงานนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงถึง 10,000 เกาส์ โดยการปรับเลือกที่ Volt Volume โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการปฏิบัติ

- 1) เลือกโหมดการทำงานของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยปรับ SW. Mode ไปที่ MAGNETIC
- 2) ปรับ SW. ON Meter เพื่อดูค่าแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก หากค่าสนามแม่เหล็กที่ต้องการสร้างสูงมาก ๆ ให้ปรับที่ OFF Meter
- 3) ปรับตั้งค่าสนามแม่เหล็กที่ต้องการสร้างโดยการปรับที่ Volt Volume เทียบค่าสนามแม่เหล็กที่ต้องการกับค่าแรงดันที่ปรับตั้งจากตารางที่ จ.1
- 4) ตั้งเวลาในการทำงานของเครื่องประมาณ 0.1 วินาที (Second) โดยปรับที่ Timer
- 5) นำวัสดุสารแม่เหล็กที่ต้องการเปลี่ยนให้เป็นแม่เหล็กวางในช่องขดลวด
- 6) ตรวจสอบความถูกต้องของทุกส่วนอีกครั้ง
- 7) กด SW. Start เพื่อให้เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำงาน โดยเครื่องจะทำงานเพียง 0.1 Second แล้ว Timer จะตัดการทำงานของระบบทั้งหมด เป็นการ Stop เครื่องโดยอัตโนมัติ

ตารางที่ จ.1 ค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากการปรับ Volt Volume ค่าต่างๆ

แรงดันที่จ่าย (V)	ค่าที่อ่านได้ (Gauss)	แรงดันที่จ่าย (V)	ค่าที่อ่านได้ (Gauss)
0	0	24	4,050
1	80	25	4,200
2	220	26	4,350
3	400	27	4,500
4	550	28	4,650
5	700	29	4,800
6	900	30	4,950
7	1,150	31	5,100
8	1,400	32	5,250
9	1,600	33	5,450
10	1,800	34	5,600
11	2,000	35	5,900
12	2,200	36	6,000
13	2,400	37	6,050
14	2,550	38	6,200
15	2,700	39	6,400
16	2,850	40	6,500
17	3,000	41	6,600
18	3,150	42	6,800
19	3,300	43	6,900
20	3,450	44	7,050
21	3,600	45	7,100
22	3,750	46	7,200
23	3,900	47	7,400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากการปรับ Volt Volume ค่าต่างๆ

แรงดันที่จ่าย (V)	ค่าที่อ่านได้ (Gauss)	แรงดันที่จ่าย (V)	ค่าที่อ่านได้ (Gauss)
48	7,500	62	8,800
49	7,600	63	8,950
50	7,800	64	9,000
51	7,900	65	9,100
52	8,000	66	9,200
53	8,050	67	9,350
54	8,100	68	9,400
55	8,200	69	9,500
56	8,300	70	9,600
57	8,400	71	9,750
58	8,500	72	9,800
59	8,050	73	9,900
60	8,600	74	10,050
61	8,700	75	10,100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญยานิพนธ์	นายปิยพงศ์ อินทรคุ้ม
วันเดือนปีเกิด	23 มกราคม 2523
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลราชบุรี
ภูมิลำเนาเดิม	จังหวัดกำแพงเพชร
ที่อยู่ปัจจุบัน	135/8 หมู่3 ตำบลคลองแม่ลาย อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000
โทรศัพท์	0-1674-2853
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนเจริญสุขอุดมวิทยา
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงจันทิไทยอนุสรณ์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
คติพจน์	ทำดีได้ดี ทำชั่วได้ชั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานิพนธ์	นายสมศิลป์ อ่อมแก้ว
วันเดือนปีเกิด	1 ธันวาคม 2522
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศรีสะเกษ
ภูมิลำเนาเดิม	จังหวัดศรีสะเกษ
ที่อยู่ปัจจุบัน	106/1 หมู่ 3 ตำบล โนนเพ็ก อำเภอพยุห์ จังหวัดศรีสะเกษ 33230
โทรศัพท์	0-1790-2288
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านค้อยางปอ
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนโนนเพ็กวิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงซิเมนต์ไทยอนุสรณ์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการควบคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
คติพจน์	ความฝันคือจุดเริ่มต้นของความสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานិพนธ์	นายอนุสรณ์ สุขสะอาด
วันเดือนปีเกิด	2 มีนาคม 2523
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพิจิตร
ภูมิลำเนาเดิม	จังหวัดพิจิตร
ที่อยู่ปัจจุบัน	60 หมู่ 6 ตำบลป่ามะคาบ อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร 66000
โทรศัพท์	0-5667-1337
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดป่ามะคาบ
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคพิจิตร
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงจิมเมนต์ไทยอนุสรณ์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
คติพจน์	อย่าลืมนคน เหมือนคนลืมนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานพนธ์	นางสาวพัชรี เร่งแสวง
วันเดือนปีเกิด	14 ตุลาคม 2523
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสวรรค์ประชารักษ์
ภูมิลำเนาเดิม	จังหวัดนครสวรรค์
ที่อยู่ปัจจุบัน	5 หมู่ 1 ตำบลเนินศาลา อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ 60170
โทรศัพท์	0-5629-7019
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวันทามารีย์
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวันทามารีย์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
คติพจน์	อย่าขี้คิดดึกกับอดีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้