



แหล่งจ่ายกำลังสำหรับเครื่องชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า  
ELECTRO-PLATING POWER SUPPLY

เรียน ศ.ดร. น. ส.  
เรื่อง ๑๑๓๕-๑  
ปี ๒๕๓๓



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2534

009633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัณฑิตปีการศึกษา 2534

เรื่อง แห่ส่งจ่ายกำลังสำหรับเครื่องชูละหะด้วยไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายนพรัตน์ สุวรรณกุล 33-161212
2. นายสมพงศ์ รัตนคช 33-161229



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แหล่งจ่ายกำลังสำหรับเครื่องชুবด้วยไฟฟ้า

นายสมพงศ์ รัตน์คช  
นายนพรัตน์ สุวรรณกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา  
อ.ภากร หุตะสังภาค

### บทคัดย่อ

เป็นการสร้างแหล่งจ่ายกำลังชนิดแรงดันต่ำ แต่กระแสสูง ขนาด 5V/100A สำหรับการชুবด้วยไฟฟ้า โดยสามารถปรับค่าแรงดันได้ต่อเนื่อง การปรับแรงดัน เป็นการปรับทางด้านขดปฐมภูมิ โดยใช้การควบคุมเฟสของไตรแอด เมื่อปรับมุมการนำกระแสทำให้แรงดันทางด้านขดทุติยภูมิเปลี่ยนแปลง และทางด้านภาคแสดงผลได้นำเอาระบบดิจิตอลเข้ามาใช้ในการแสดงผล และมีวงจรตั้งเวลาสำหรับตั้งเวลาในการชুব

## Electro-Plating Power Supply

Mr. Nopparat Suwankul

Mr. Sompong Rattanakot

Advisor Phakorn Hutasangkas

### Abstract

A low Voltage/high current Power Supply (5V/100A) for electro-plating is constructed. Voltage can be continuous by adjusted in primary coil of transformer. Voltage at secondary coil proportionally to conducted current angle by phase controlled of triac and the sults are shown on the display board in digital mode and there is a timer for setting coating period.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

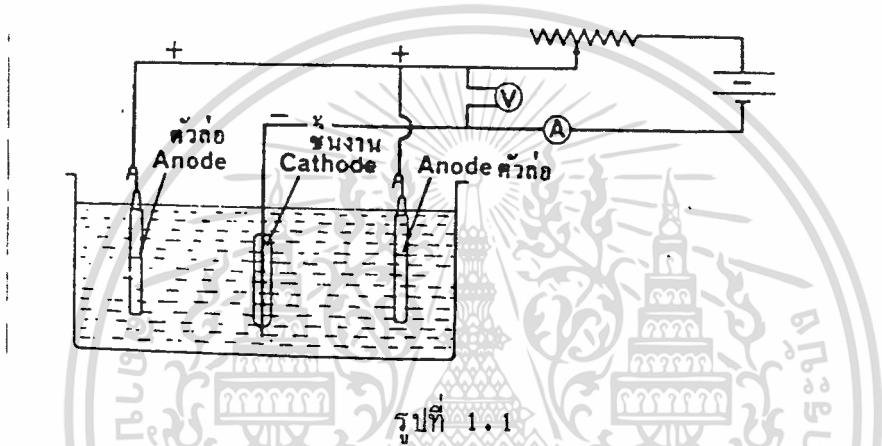
	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	11
บทที่ 1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	1
บทที่ 2 เครื่องมือและอุปกรณ์การชุบ	8
บทที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้า	19
บทที่ 4 ภาคควบคุมกำลังไฟฟ้า	39
บทที่ 5 วงจรจ่ายไฟตรง	55
บทที่ 6 ภาคแสดงผล	74
บทที่ 7 บทสรุป และผลการทดลอง	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือการทำให้โลหะไปเคลือบเกาะบนโลหะอีกชนิดหนึ่งโดยกรรมวิธีเคมี-ไฟฟ้าโดยจุ่มชิ้นงานที่ทำการชุบลงในน้ำยาชุบ แล้วต่อเข้ากับขั้วลบของกระแสไฟฟ้าตรง (D.C. Current) คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ซึ่งเรียกว่าขั้วลบ (Cathode) และมีตัวลวดหรือขั้วบวก (Anode) ต่อเข้ากับขั้วบวกของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า เมื่อไฟฟ้าครบวงจรก็จะเกิดการเกาะจับของโลหะที่ขั้วลบ (ชิ้นงาน)



รูปที่ 1.1

### 1.1 น้ำยาชุบโลหะ (Electrolytes)

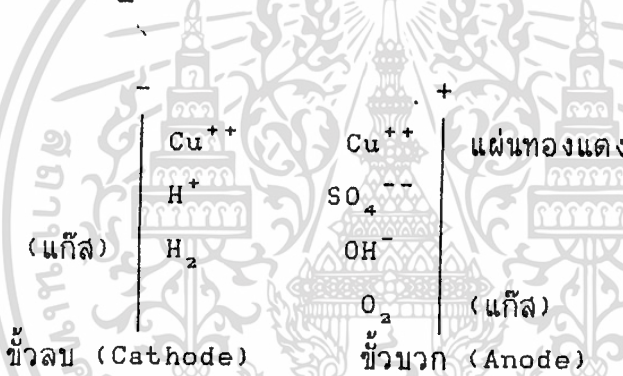
จากการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ ได้พบว่าตัวนำไฟฟ้าแบ่งได้เป็นสองพวก คือ พวกที่หนึ่ง เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นแต่เพียงสะพานเพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้เท่านั้น เช่นโลหะต่าง ๆ และแกรไฟต์ ผงบรอนซ์ เป็นต้น

พวกที่สอง เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็ก ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวของมัน เช่น น้ำเจือกรด และสารละลายของเกลือต่างๆ เป็นต้น ตัวนำไฟฟ้าพวกหลังนี้ในทางวิทยาศาสตร์ใช้ชื่อว่า อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) ไมเคิล ฟาราเดย์ นักวิทยาศาสตร์คนสำคัญของโลกได้ตั้งชื่อนี้ ตั้งแต่ปีค.ศ. 1832-1833 ตัวนำไฟฟ้าพวกที่สองนี้เองที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าโดยตรงเมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แผ่นปลาทินัมเป็นขั้วอิเล็กโทรด อนุภาคเล็กๆ พวกหนึ่งของอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปยังแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก อนุภาคเล็กๆ อีกพวกหนึ่งของอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปยังแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ อนุภาคเล็กๆ ของอิเล็กโทรไลต์ที่วิ่งไปยังขั้วบวก หรือขั้วลบดังกล่าวแล้วนั้นเรียกว่า ไอออน (Ions) แต่ละ

ไอออนจะมีประจุไฟฟ้าประจำตัวทุกตัว ไอออนที่วิ่งไปยังขั้วบวกเรียกว่า แอนไอออน (Anions) จะมีประจุไฟฟ้าลบ (-) ประจำตัว ไอออนที่วิ่งไปยังขั้วลบเรียกว่า แคทไอออน (Cathions) จะมีประจุไฟฟ้าบวก (+) ประจำตัว ขณะที่เกิดการแยกสลายดังกล่าวในสารละลายนั้นเรามองไม่เห็นปฏิกิริยาใดๆเกิดขึ้นในสารละลายนั้นเลยแต่จะไปเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือขั้วบวกตัวอย่างเช่นในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์บางชนิด ที่ใช้แผ่นแพลตินัมเป็นขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อต่อแผ่นขั้วทั้งสองเข้ากับแบตเตอรี่ให้ครบวงจรจะปรากฏว่ามีฟองแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วลบเป็นต้น

## 1.2 ตัวอย่างการแยกสลายของน้ำยาสารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟต

เมื่อเอาสารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟตมาทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ใช้แผ่นแพลตินัมเป็นขั้วลบ โดยต่อเข้ากับขั้วลบแบตเตอรี่ใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นขั้วบวก โดยต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



คอปเปอร์ซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำยาจะแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็กๆ 2 ส่วนคืออนุภาคคอปเปอร์ ( $\text{Cu}^{++}$ ) มีประจุไฟฟ้า (+) ประจำตัว และซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{--}$ ) มีประจุไฟฟ้าลบ (-) ประจำตัว เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าให้ครบวงจรอนุภาคเล็กๆ ทองแดงจะวิ่งไปหาแพลตินัม (ขั้วลบ) เกาะติดเป็นผงสีแดงอยู่บนแผ่นแพลตินัม ส่วนอนุภาคเล็กๆ ซัลเฟตจะวิ่งไปหาแผ่นทองแดง (ขั้วบวก) ทำปฏิกิริยากับทองแดงเป็นเหตุให้ทองแดงละลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟต แทนที่คอปเปอร์ซัลเฟตตัวก่อนทั้งหมดไป คอปเปอร์ซัลเฟตตัวหลังนี้จะแยกสลายออกเป็น 2 ส่วนอีกคืออนุภาคคอปเปอร์ ( $\text{Cu}^{++}$ ) และอนุภาคซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{--}$ ) อนุภาคคอปเปอร์จะวิ่งไปขั้วลบเกาะติดอยู่ที่ขั้วลบ อนุภาคซัลเฟตวิ่งไปที่ขั้วบวกทำปฏิกิริยากับขั้วบวก กลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตขึ้นมาแทนที่อีก ปฏิกิริยาจะเกิดหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไปตราบที่ยังคงต่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากการค้นพบกฎเกณฑ์อันนี้เราจึงนำเอามาใช้ให้เป็นประโยชน์ในทางชุบเคลือบผิวโลหะ (Electro Plating) และการแยกโลหะให้บริสุทธิ์ (Refinery) เช่นถ้าเรามีทองแดงไม่บริสุทธิ์อยู่เราก็เอาทองแดงนี้ไปทำเป็นแผ่นขั้วบวกแล้วจุ่มในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านครบวงจรทองแดงบริสุทธิ์จะไปเกาะติดบนแผ่นขั้วลบ ซึ่งเราก็จะได้ทองแดงบริสุทธิ์ตามต้องการ

### 1.3 กฎของฟาราเดย์

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยทางแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนด และจะได้โลหะเกาะจับที่แคโทด หรือมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสผ่าน ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง, ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาที่ให้กระแสไหลผ่านไว้ดังนี้

**กฎข้อที่หนึ่ง** น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้ เป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

**กฎข้อที่สอง** น้ำหนักของไอออนชนิดต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยให้ เป็นอิสระโดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆ กันย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลย์เคมีของไอออนเหล่านั้น

จากกฎข้อที่ 1 เราสามารถนำมาใช้ในการชุบโลหะได้ คือถ้าเราต้องการให้โลหะมาเกาะจับมีความหนาจำนวนหนึ่ง เราอาจจะทำได้ 2 วิธีคือ ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย ๆ แล้วใช้เวลานานๆ หรือเราอาจจะใช้กระแสไฟฟ้ามากๆ แต่ใช้เวลาสั้นๆ ก็จะได้โลหะไปเกาะจับที่แคโทดมีปริมาณเท่ากัน

จากกฎข้อที่สอง เราทราบได้ว่า โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกัน กล่าวคือในปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่าๆ กันโลหะแต่ละชนิดจะแยกสลายออกมาปริมาณไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมาน้อย โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวของโลหะนั้น ๆ

### 1.4 ประสิทธิภาพของขั้วลบและขั้วบวก

ตามกฎของฟาราเดย์ข้อที่หนึ่ง ในน้ำยาชุบโลหะนิกเกิลถ้ากระแสไฟฟ้าจำนวน 1 ฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 26.8 แอมแปร์ ไหลผ่านสารละลายนิกเกิลเป็นเวลา 1 ชั่วโมงตามทฤษฎีควรจะได้โลหะนิกเกิลเกาะที่แคโทดมีน้ำหนัก 29.35 กรัม

แต่จากการทดลองจริง ๆ ผลปรากฏว่าได้โลหะนิกเกิลเกาะที่แคโทดเพียง 27.9 กรัม เท่านั้น จากการทดสอบจึงพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปน้ำยาชุบนิกเกิลไม่ได้ใช้สิ้นเปลืองไปในการแยกสลายให้นิกเกิลไปเกาะที่แคโทดแต่อย่างเดียว หากแต่ยังต้องสิ้นเปลืองไปกับการสลายสิ่งอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาอีก เช่น แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ถ้าเรานำเอาน้ำหนักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของนิเกิลที่ไปเกาะที่ขั้วลบอย่างแท้จริง มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของนิเกิลที่ควรจะไปเกาะที่ขั้วลบตามทฤษฎี ก็จะสามารถทราบ "ประสิทธิภาพของขั้วลบ" ได้

ตัวอย่าง

น้ำหนักของนิเกิลที่ไปเกาะที่ขั้วลบอย่างแท้จริง	27.9	กรัม
น้ำหนักของนิเกิลที่ควรจะไปเกาะที่ขั้วลบ	29.35	กรัม
ประสิทธิภาพของขั้วลบ	$27.9 \times 100 = 95\%$	
	29.35	

นั่นคือปริมาณของกระแสไฟฟ้า 26.8 แอมแปร์ที่ไหลผ่านน้ำยาชุบโลหะนิเกิลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีกระแสเพียง 95% เท่านั้นที่ใช้สิ้นเปลืองไปในการแยกสลายให้โลหะไปเกาะที่ขั้วลบ ส่วนอีก 5% จะเป็นปริมาณกระแสที่สูญเสียไปกับการแยกสลายของก๊าซไฮโดรเจน เราจึงเรียกว่านิเกิลมีประสิทธิภาพของขั้วลบ 95%

ประสิทธิภาพของขั้วลบของน้ำยาชนิดต่างๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น น้ำยาชุบโครเมียมจะมีประสิทธิภาพต่ำมาก คือประมาณ 10-25% เท่านั้นเอง น้ำยาชุบเงินมีประสิทธิภาพขั้วลบสูงมากคือเกือบ 100% เต็ม และในน้ำยาชุบดีบุก (Tin Plating) ประสิทธิภาพของขั้วลบจะประมาณ 50 ถึง 75% ดังนี้ เป็นต้น

ที่แอนโอดกระแสไฟฟ้าที่ไปช่วยให้แอนโอดละลายก็ไม่ได้ใช้ให้หมดไปในการละลาย แอนโอดแต่อย่างเดียว กระแสไฟฟ้าต้องสูญเสียไปกับสิ่งอื่นๆ อีก เช่น ต้องเอาชนะความต้านทานที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมี มีลักษณะเป็นเยื่อบาง ๆ รอบ ๆ แท่งแอนโอดต้องสูญเสียไปกับการละลายสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่มีผลอยู่ในแอนโอด ฯลฯ เป็นต้น จากการสูญเสียดังกล่าวจึงต้องคำนวณหาประสิทธิภาพของแอนโอดด้วย แต่วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพของแอนโอดเขามักจะคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของแคโทดหรือคำนวณโดยวิธีเดียวกันกับการหาประสิทธิภาพของขั้วลบ

ในการประกอบการชุบโลหะโดยทั่ว ๆ ไป ถ้าประสิทธิภาพของแคโทดและแอนโอดต่างก็มีประสิทธิภาพดีเลิศคือ 100 % เท่ากัน นั่นคือมีโลหะไปเกาะที่แคโทดเท่าใด ที่แอนโอดก็จะต้องมีโลหะละลายลงไปใต้น้ำยามีจำนวนเท่ากัน ถ้าน้ำยาชุบใด ๆ เป็นเช่นนี้ ก็จะมีลักษณะดีเลิศ ไม่มีปัญหายุ่งยากใด ๆ จะต้องแก้ไขเลย แต่น้ำยาชุบโลหะทุกชนิดไม่มีลักษณะเช่นนั้น น้ำยาทุกชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมาก ประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบหรือกล่าวโดยง่าย การละลายของขั้วบวกและการเกาะจับของโลหะที่ขั้วลบ จะแตกต่างกันอยู่ตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้เองน้ำยาชุบโลหะแต่ละชนิดจึงจำเป็นต้องประกอบด้วยตัวยาหลาย ๆ อย่าง เพื่อให้ตัวยาเหล่านั้นทำหน้าที่ต่าง ๆ กัน เช่น ตัวที่ 1 มีหน้าที่ปล่อยโลหะออกมา, ตัวที่ 2 มีหน้าที่ช่วยให้แอนโอดละลายสม่ำเสมอ ช่วยเป็นสื่อไฟฟ้า, ตัวที่ 3 มีหน้าที่ช่วยควบคุมไม่ให้ตัวยาน้ำยาเป็นกรดมากเกินไปหรือเป็นด่างมากเกินไป ฯลฯ ดังนี้ เป็นต้น ทั้งนี้โดยมีจุดมุ่งหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ขั้วบวกและขั้วลบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้นั่นเอง

น้ำยาแต่ละชนิด ประกอบด้วยตัวยาคัดต่างกันไป ตัวยาคัดใดมีหน้าที่อย่างไร เป็นเรื่องที่คุณประกอบการชุบโลหะควรศึกษาเอาไว้

### ค่าของ พีเอช (pH values)

หนึ่งโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม สูตรโมเลกุลของน้ำคือ  $H_2O$  น้ำบริสุทธิ์เมื่อมีการแตกแยกจะได้ไฮโดรเจน อีออนและไฮดรอกซิล อีออนดังสมการ  $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$

ในน้ำบริสุทธิ์ค่าของไฮโดรเจนอีออนและค่าของไฮดรอกซิลอีออน จะมีค่าเท่ากันในสภาพเช่นนี้น้ำจะมีสภาพเป็นกลาง คือไม่เป็นกรดหรือด่าง แต่ถ้าในน้ำใดมีไฮโดรเจนอีออนมากไฮดรอกซิลอีออน น้ำนั้นจะมีสภาพเป็นกรด และในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำใดมีไฮดรอกซิลอีออนมากกว่าไฮโดรเจนอีออน น้ำนั้นก็จะมีสภาพเป็นด่าง ในการวัดค่า พีเอชของน้ำชุบ ถือค่าพีเอช 7 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นกลาง ค่าพีเอชตั้งแต่ 7 ลงมาถึง 1 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นกรด ตั้งแต่ 7 ถึง 13 เป็นค่าที่น้ำยามีสภาพเป็นด่างค่า พีเอช. วัดได้ด้วยกระดาษวัด พีเอช. หรือพีเอช. มิเตอร์

ค่าของพีเอช มีอิทธิพลต่อน้ำยาชุบโลหะมาก กล่าวคือถ้าค่าของพีเอชน้อย แสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นกรดมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดต่ำลง ถ้าค่าของพีเอชมาก แสดงว่าน้ำยานั้นมีสภาพเป็นด่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวล่อลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้การควบคุมค่าของพีเอชจึงสำคัญมาก น้ำยาทุกชนิดจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่โดยเฉพาะที่ค่าหนึ่ง ฉะนั้นจึงควรพยายามควบคุมให้ค่าพีเอชอยู่ในขอบเขตตามที่กำหนดให้ได้ น้ำยาชุบชนิดใดควรมีค่าพีเอชเท่าใด จะทราบได้จากคู่มือการใช้ น้ำยาชนิดนั้น ๆ

### 1.5 ความหนาแน่นของกระแสไฟ (Current Density)

ความหนาแน่นของกระแสของขั้วลบ คือกระแสที่ช่วยให้เกิดการเคลือบผิวที่ขั้วลบปกติมักจะใช้แอมแปร์ต่อตารางฟุต หรือแอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของชิ้นงานเป็นสิ่งจำเป็นมาก เพื่อจะได้ทราบว่าชิ้นงานมีเนื้อที่เท่าใด จะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปเท่าใด เพราะน้ำยาชุบโลหะแต่ละชนิดใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไม่เหมือนกัน และชิ้นงานที่ใช้ชุบก็มีขนาดเนื้อที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้กระแสและเนื้อที่จึงควรพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอ ก่อนที่จะจุ่มชิ้นงานลงในถังเพื่อทำการชุบ

ในการชุบโลหะถ้ากวนน้ำยาโดยใช้เครื่องกวนหรือใช้ลมเป่าและเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

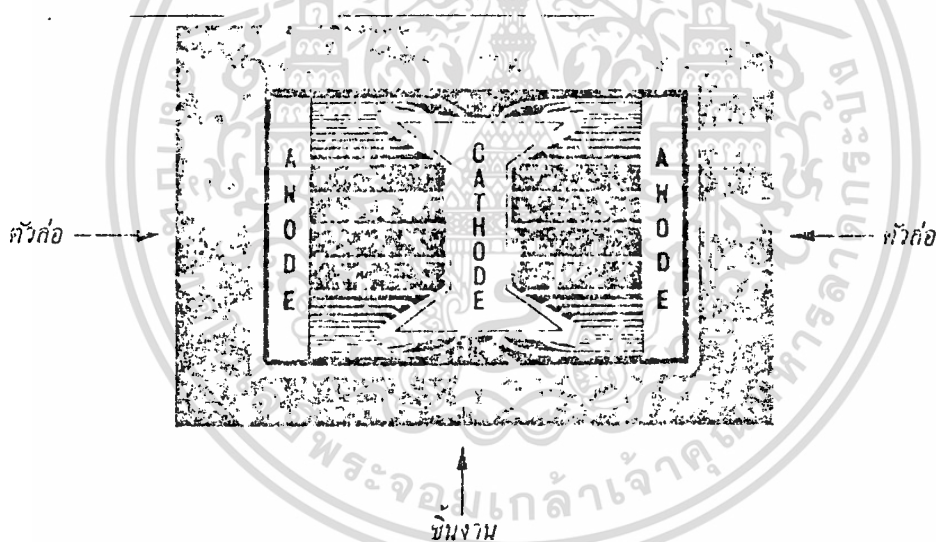
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาขึ้นตามคู่มือกำหนด จะช่วยให้สามารถใช้ความหนาแน่นของกระแสได้มากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ระยะเวลาของการชุบลดลงได้โดยได้ความหนาของผิวชุบที่เท่ากัน

### 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของชิ้นงานและกำลังการเคลือบผิว

รูปร่างของชิ้นงานที่จะต้องทำการชุบเคลือบผิวนั้นมักมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป เช่น กลม แบน โค้งงอ กลวง ฯลฯ รูปร่างต่างๆ เหล่านี้จะชุบให้มีการเกาะจับหนาเท่ากันโดยตลอดทั่วชิ้นงานย่อมยากมาก

จากการศึกษาถึงธรรมชาติการเดินทางของกระแสในการชุบโลหะพบว่า กระแสเดินทางไปยังจุดที่ใกล้เคียงที่สุดอย่างหนาแน่น จุดที่ห่างออกไปจะมีกระแสเบาบางลงไปด้วย เหตุที่การเดินทางของกระแสก็คือการเดินทางของแคทอออนไปยังขั้วลบนั่นเอง ดังนั้น ส่วนใดที่มีกระแสเดินไปหาอย่างหนาแน่น ย่อมมีการเกาะจับหนามาก ส่วนที่มีกระแสเดินไปหาเบาบาง ก็จะมีการเกาะจับบาง ดังในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงการเกาะจับเวลาชุบบนชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน

สาเหตุของการเกาะจับของเนื้อโลหะหนาบางบางบ้างนี้มีหลายประการ แต่ที่สำคัญได้แก่

1. เนื่องมาจากระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (Cathode) กับขั้วลบ (Anode) และความต้านทานของน้ำยา

2. เนื่องมาจากกำลังการเคลือบ (Throwing Power) ของน้ำยาไม่ดีพอ เช่น ชิ้นงานชุบที่มีลักษณะโค้ง งอ หรือ กลวง ถ้าน้ำยาชุบมีกำลังการเคลือบไม่ดีพอ ส่วนโค้งหรือลึกลงไปจะไม่มีการเกาะจับหรือจับบาง ๆ แต่ถ้าน้ำยาชุบที่มีกำลังการเคลือบดี จะเกาะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จับได้อย่างทั่วถึงตลอดชิ้นงาน

การแก้ไขข้อบกพร่องของน้ำยาชุบดังกล่าวอาจทำได้ดังนี้

1. ถ้าหากชิ้นงานอยู่ใกล้กับตัวล่อมากเกินไป จะทำให้ส่วนที่ใกล้มากที่สุดจะชุบพอกหนาหรืออาจเกิดรอยไหม้ขึ้นได้ การแก้ไขเอาสิ่งที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ามากั้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าส่วนที่ใกล้ที่สุด จะช่วยให้ได้ความหนาเท่ากันดีขึ้น
2. ถ้าการเคลือบไม่ทั่วถึงเนื่องจากกำลังการเคลือบของน้ำยาไม่ดี พอกการใช้ตัวล่อช่วยอีกอันหนึ่งจะช่วยให้การเคลือบดีขึ้น เช่นในการชุบโครเมียม ส่วนโค้งที่โครเมียมเข้าไม่ถึง ถ้าเราใช้ตัวล่อเข้าไปช่วยจะทำให้โครเมียมเข้าถึง

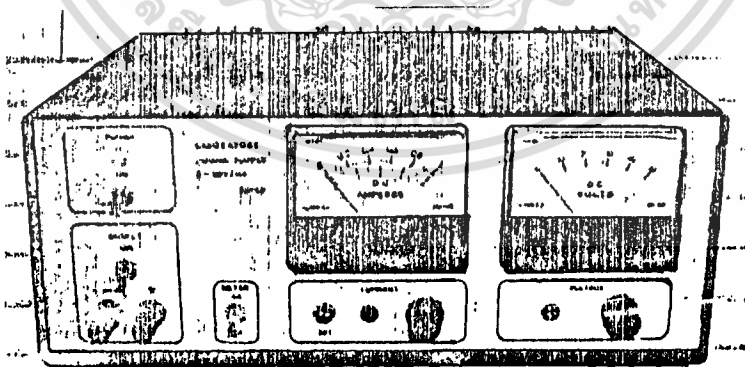


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์การชุป

2.1 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier)

เป็นเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า จากไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง ๆ ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงเคลื่อนต่ำ โดยปกติแล้ว งานชุปโดยทั่วไปจะใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 0-15 โวลท์ ในการกำหนดขนาดของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า มักจะกำหนดเป็นจำนวนกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจะจ่ายออกมาได้ เช่น เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าขนาด 10 แอมแปร์ 100 แอมแปร์ 1,000 แอมแปร์ เป็นต้น สำหรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าจะมีปุ่มปรับให้มีค่าต่างๆ ได้ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 1 เครื่อง อาจจะใช้กับถังชุปได้หลายถังถ้ามีกำลังสูงพอ แต่ทางที่ดีที่สุดแล้วควรจะใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 1 เครื่อง ต่อถังชุป 1 ถัง เพราะจะทำงานได้สะดวกและควบคุมปริมาณทางไฟฟ้าได้แน่นอนกว่า และควรอยู่ในตำแหน่งที่ติดกับถังชุปเพื่อป้องกันไม่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลงมากเกินไป ในการเลือกขนาดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงลักษณะและขนาดของชิ้นงานที่จะชุปเป็นสิ่งสำคัญ เพราะถ้าเลือกไม่เหมาะสม เช่น เลือกขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยใช้เหตุ และยังควบคุมปริมาณทางไฟฟ้าได้ไม่ละเอียดอีกด้วย แต่ถ้าเลือกเล็กเกินไป จะทำให้การชุปไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร



รูปที่ 2.1 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า



## 2.2 ทางเดินของกระแสไฟฟ้า (Busbar)

ทางเดินของกระแสไฟฟ้า หมายถึง โลหะที่ใช้เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกระแสไฟฟ้าไปยังถังชุป และพบว่าโลหะทองแดงและอลูมิเนียมเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้าสำหรับงานชุบมากที่สุด ลักษณะของทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ดีควรมีพื้นผิวหน้าตัดเป็นลักษณะของสี่เหลี่ยมผืนผ้าแคบๆ คือเป็นแผ่นแบน ๆ นั้นเองจะนำไฟฟ้าและระบายความร้อนดีกว่าทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นลักษณะของสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถ้าจำเป็นจะต้องมีการต่อทางเดินของกระแสไฟฟ้า ต้องทำให้หน้าสัมผัสสะอาดและเรียบแล้วจึงใช้แผ่นโลหะอัดประกบเข้าหากัน พร้อมทั้งเชื่อมติดกันให้เรียบร้อย สำหรับตารางข้างล่างนี้ จะแสดงถึงขนาดของทางเดินกระแสไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1

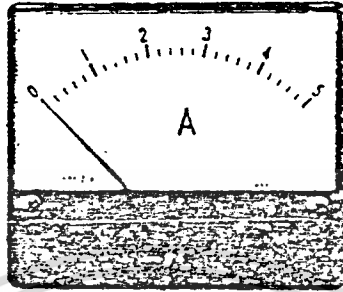
พื้นที่หน้าตัดของโลหะทองแดง		พื้นที่หน้าตัดของโลหะอลูมิเนียม		กระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน (แอมแปร์)
มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	
25 x 6	$1 \times \frac{1}{4}$	32 x 8	$1\frac{1}{4} \times \frac{1}{4}$	425
38 x 6	$1\frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$	38 x 8	$1\frac{1}{2} \times \frac{5}{16}$	690
51 x 6	$2 \times \frac{1}{4}$	51 x 8	$2 \times \frac{5}{16}$	775
76 x 6	$3 \times \frac{1}{4}$	76 x 8	$3 \times \frac{5}{16}$	1125
102 x 6	$4 \times \frac{1}{4}$	102 x 8	$4 \times \frac{5}{16}$	1500

009633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

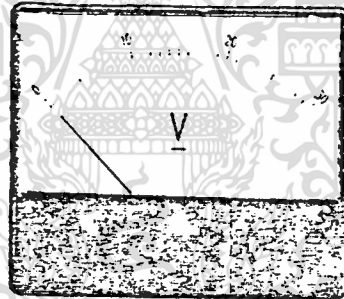
### 2.3 มิเตอร์ต่าง ๆ

แอมมิเตอร์ (Ammeter) เป็นเครื่องมือวัดอย่างหนึ่งซึ่งจะบอกถึงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรโดยจะต่ออนุกรมกับทางเดินของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 แอมมิเตอร์

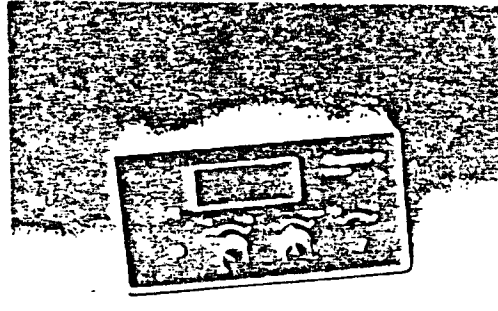
โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) เป็นเครื่องมือวัดแรงเคลื่อนหรือศักย์ไฟฟ้าโดยต่อขนานกับทางเดินของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 โวลต์มิเตอร์

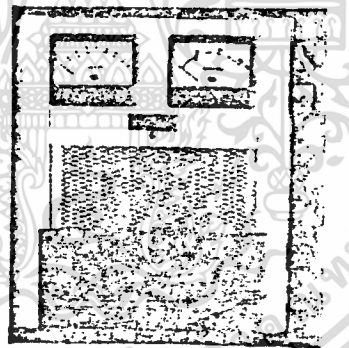
แอมแปร์-ชั่วโมงมิเตอร์ (Ampere-Hour Meter) เป็นเครื่องมือที่ใช้บอกถึงจำนวนของกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ไหลผ่านวงจร ตัวอย่างเช่น ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 10 แอมแปร์ ลงไปในน้ำยาชุบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เครื่องมือชนิดนี้จะอ่านออกมาเป็น 40 แอมแปร์-ชั่วโมง ในขบวนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า แอมแปร์-ชั่วโมงมิเตอร์มีประโยชน์มาก เพราะจะช่วยให้บอกได้ว่าน้ำยาชุบควรจะเติมอะไรลงไปปริมาณเท่าใดเพราะอายุการใช้งานของน้ำยาหรือสารเคมีต่าง ๆ ก็เติมลงไปลงในน้ำยาชุบจะกำหนดเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง เช่น น้ำยาเงาที่เติมลงไปลงในน้ำยา มีอายุการใช้งาน 100 แอมแปร์-ชั่วโมง ฉะนั้น เมื่อใช้ถึงหรือเกือบถึงขนาดนี้ ก็ควรจะเติมน้ำยาเงาลงไปได้แล้ว เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แอมแปร์-วัตต์มิเตอร์

แผงควบคุมกระแสไฟฟ้า (Resistance Board) ใช้ในกรณีที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 1 เครื่องใช้กับถึงชุดหลาย ๆ ถึง ซึ่งแต่ละถึงจะต้องติดตั้งแผงควบคุมกระแสไฟฟ้า เข้าไว้ เพื่อจะได้สามารถปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าของถึงนั้น ๆ ได้โดยแผงควบคุมกระแสไฟฟ้าจะมีแอมมิเตอร์และโวลท์มิเตอร์ติดไว้พร้อมกับตัวปรับค่าของมัน และบางที่ก็อาจจะมีแอมแปร์-วัตต์มิเตอร์ติดไว้ด้วย



รูปที่ 2.5 แผงควบคุมกระแสไฟฟ้า

2.4 ถึงชุด

ถึงชุด หมายถึง ถึงที่บรรจุน้ำยาที่เกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบผิววัสดุด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วถึงชุดมักจะออกแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดต่าง ๆ ตามลักษณะของชิ้นงานที่จะชุบ และที่สำคัญ คือ วัสดุที่นำมาทำเป็นถึงชุดจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำยาที่บรรจุอยู่ แต่ในบางครั้งก็มีความจำเป็นจะต้องใช้วัสดุที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำยาที่ใช้ ซึ่งก็แก้ไขได้โดยการบุภายในถึงด้วยสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยา เช่น ถึงที่บรรจุน้ำยาประเภทกรดจำนวนมาก ๆ ถ้าจะใช้ถึงพลาสติกซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับกรดก็จะไม่แข็งแรงพอจะรับแรงดันของน้ำยาได้ ครั้นจะใช้ถึงเหล็กก็จะทำปฏิกิริยากับกรด ฉะนั้น ถึงที่ใช้จึงควรจะเป็นถึงเหล็กบุภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็น ใบแจ้งประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยพลาสติก ในการแบ่งประเภทของถังชุนั้น จะแบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำถังดังนี้

- ถังเหล็ก เป็นถังที่ทำได้จากการนำเหล็กแผ่นธรรมดา มาเชื่อมต่อกัน โดยผิวหน้าภายในถังที่สัมผัสกับน้ำยาไม่ได้ทำการบุหรือทำอะไรทั้งสิ้น แต่ผิวหน้าที่อยู่ภายนอกถังอาจจะพ่นสีหรือทาสีกันสนิมเข้าไว้ ถังประเภทนี้จะใช้เป็นถังล้าง ถังทำความสะอาดด้วยต่าง ถังสำหรับน้ำยาชุนแบบต่าง

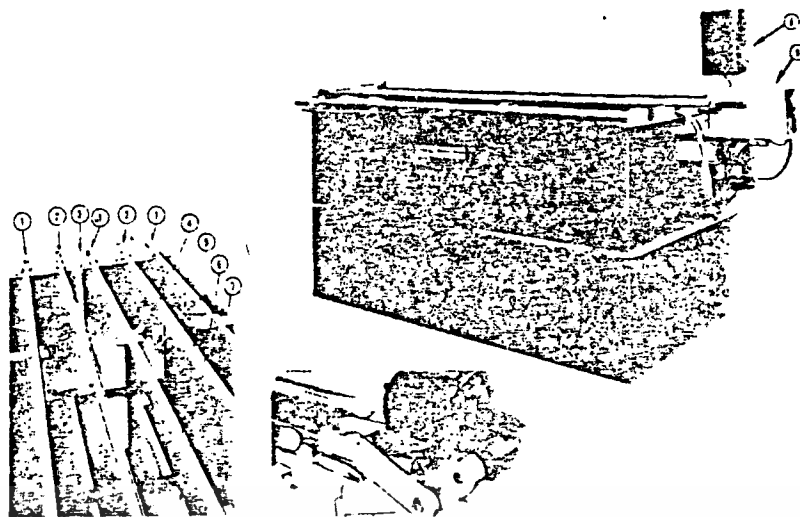
- ถังเหล็กบุภายในด้วยตะกั่ว ถังชนิดนี้เหมาะสำหรับใส่กรดซัลฟูริก น้ำยาชุนนิเกิลแบบต้านน้ำยาชุนทองแดงแบบกรด และน้ำยาชุนโครเมียม แต่ห้ามใช้กับกรดไนตริกและน้ำยาทำความสะอาดและชุนแบบต่าง

- ถังสแตนเลส ถังสแตนเลสที่จะกล่าวถึงนี้เป็นสแตนเลสที่มีส่วนผสมของนิเกิล 18 เปอร์เซ็นต์ และโครเมียม 8 เปอร์เซ็นต์ ถังชนิดนี้สามารถใช้บรรจุกรดไนตริกและกรดอื่นๆที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น สารละลายของน้ำยากัดสนิมที่มีกรดโครมิกผสมกับกรดซัลฟูริก แต่ถังชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะใช้กับสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เพราะจะทำให้สแตนเลสมีสภาพเป็นชั้นขรุขระเกิดขึ้น

- ถังพลาสติก ถังพลาสติกที่ทำจากโพลีเอทิลีนปัจจุบันมีการใช้กันแพร่หลายสามารถทำให้ใหญ่ได้จนมีความจุถึง 1,250 ลิตร สามารถใช้ได้กับน้ำยาชุนและน้ำยากัดสนิมได้ทุกชนิด และถ้าใช้โพลีเอทิลีนชนิด Rigid Grade จะสามารถทนความร้อนได้ถึงจุดเดือดของน้ำ แต่ถ้าเป็นโพลีเอทิลีนธรรมดา จะทนความร้อนได้เพียงประมาณ 70 องศาเซลเซียส ถังพลาสติกที่นิยมใช้อีกแบบหนึ่ง คือ ถังพลาสติกที่ทำจากโพลีโพรพิลีน ซึ่งทนต่อน้ำยาเคมีได้เช่นเดียวกับถังที่ทำจากโพลีเอทิลีน แต่สามารถจะทนอุณหภูมิได้สูงกว่าคือประมาณ 80 องศาเซลเซียส

- ถังพลาสติกเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส ถังชนิดนี้จะมีโครงสร้างเป็นพวก rigid PVC หรือโพลีเอทิลีน แล้วเคลือบทับด้วยไฟเบอร์กลาสเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ถังประเภทนี้สามารถทำให้จุได้ถึง 1,860 ลิตร ถ้าเป็นถังพริชท์หุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส จะทนอุณหภูมิได้ 70 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเป็นโพลีเอทิลีนหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส จะทนอุณหภูมิได้ถึง 100 องศาเซลเซียส

- ถังไฟเบอร์กลาส ถ้าเป็นชนิดที่ทำจากโพลีเอสเทอร์ จะนิยมใช้เป็นถังล้างทำความสะอาดหรือถังจุ่มเงาแบบกรด แต่ไม่ควรใช้เป็นถังชุน (อาจใช้ได้ถ้าชุนที่อุณหภูมิต่ำ) และห้ามใช้บรรจุกรดแก่ สารละลายต่าง หรือสารละลายไซยาไนด์ สำหรับความทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีของไฟเบอร์กลาส จะขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่นำมาทำ



รูปที่ 2.6 ถังชุปแบบธรรมดา

- |                        |  |
|------------------------|--|
| 1. ราวแขวนข้าวบวก      | 6. เครื่องทำความร้อนชนิดจุ่ม               |
| 2. ราวแขวนข้าวลบ       | 7. แขนรับข้าวบวก                           |
| 3. ท่อลมสำหรับกวนน้ำยา | 8. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเครื่องความร้อน |
| 5. ขายึดท่อลม          | 9. เครื่องแกว่งขึ้นงาน                     |

## 2.5 วัสดุที่ใช้ภายในถังชุป

### ก. ยาง (Rubber)

ยางที่ใช้ภายในถังมี 2 เกรดด้วยกันคือ อ่อน (Soft) กับแข็ง (Hard) ยางเกรดอ่อนมักจะใช้กับถังล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและถังบรรจุกรดไฮโดรคลอริก ส่วนยางเกรดแข็งจะใช้เป็นถังชุป ถังที่ภายในด้วยยางจะทนอุณหภูมิได้ประมาณ 70 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นยางสังเคราะห์ไม่ควรจะใช้น้ำสารละลายที่เป็นตัวออกซิไดซ์แรง ๆ เช่น กรดไนตริก กรดโครมิก เป็นต้น

ข้อที่ควรปฏิบัติก่อนใช้ถังที่ภายในด้วยยาง

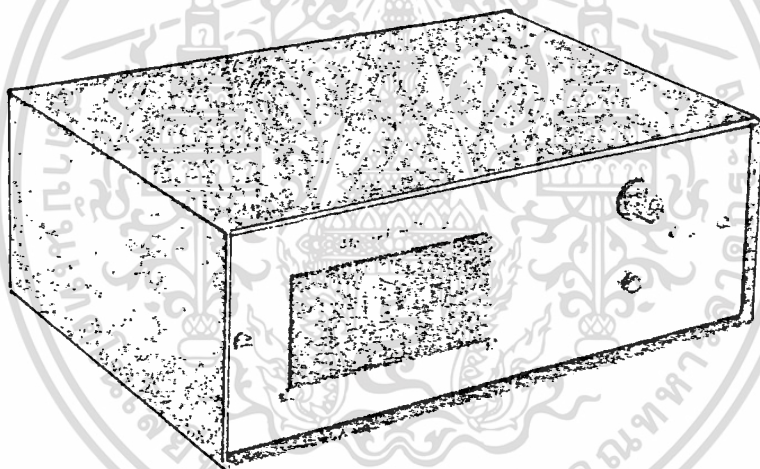
- สำหรับน้ำยาชุปนิเกิลเงาและทองแดงกรด ต้องใส่กรดเจือจางลงไปในถังแล้วอุ่นให้ร้อนเป็นเวลาอย่างน้อย 8 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะนำมาใช้ (ส่วนใหญ่ใช้กรดเกลือเข้มข้น 50 มล./ลิตร)

- สำหรับน้ำยาชุปไซยาไนต์ ต้องใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปให้เต็ม แล้วอุ่นให้ร้อนอย่างน้อย 8 ชั่วโมงในช่วงอุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและใช้แปรงขัดแล้วล้างอีกทีหนึ่ง สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จะเข้มข้นประมาณ 25-40 กรัมต่อลิตร

## ข. พีวีซี (Polyvinyl Chloride)

ถังที่บุภายในด้วยพีวีซีจะทนทานต่อปฏิกิริยาสำหรับน้ำยาชุบแทบทุกชนิด และจะใช้ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส พีวีซีชนิดอ่อนจะดีกว่าชนิดแข็ง เพราะสามารถยืดหยุ่นและยึดติดกับตัวถังดีกว่า และเมื่อได้รับความร้อนก็จะขยายตัวไปกับถังด้วย ตัวอย่างการใช้งานของถังบุภายในด้วยพีวีซี เช่น ถังชุบโครเมียมแบบหนาและแบบเงา ถังจุ่มเงาแบบกรดถึงกรดกัดสนิม ถังบรรจุสารละลายที่เป็นด่าง ถังเก็บสารเคมี เป็นต้น แต่มีข้อยกเว้นคือ ไม่ควรจะใช้เก็บกรดไนตริก

คุณสมบัติของความเงาในถังน้ำยาชุบนิเกิลเงา, แคดเมียม, สังกะสี, ทองแดง และน้ำยาชุบตีบุก ต้องทำการบำรุงรักษาด้วยการเติมน้ำยาเงาอย่างสม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับการทำงานของแอมแปร์-ชั่วโมงมิเตอร์นี้เป็นตัวควบคุมหรือแสดงการทำงานของน้ำยาชุบเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งสามารถทำให้เรารักษาค่าความเข้มข้นของน้ำยาเงาได้อย่างเต็มที่

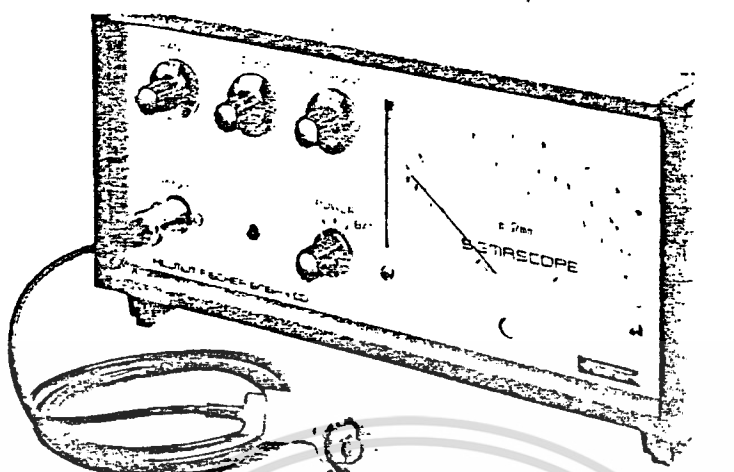


รูปที่ 2.7 แอมแปร์-ชั่วโมงมิเตอร์

## 2.6 เครื่องวัดความหนา (Thickness Tester)

ใช้วัดความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการชุบมาแล้ว      มีหน่วยความหนาเป็นไมครอน  
(Micron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องวัดความหนา

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความหนาไมครอน = นิ้ว

Microns ไมครอน	Precise Value ค่าแน่นอน (นิ้ว)	Nominal Value ค่าใกล้เคียง (นิ้ว)
0.3	0.000 012	
0.5	0.000 020	
0.8	0.000 032	
1	0.000 04	
2	0.000 08	
3	0.000 12	
4	0.000 16	0.000 15
5	0.000 20	0.000 20
6	0.000 24	0.000 25
8	0.000 32	0.000 30
10	0.000 39	0.000 4
12	0.000 47	0.000 5
16	0.000 63	0.000 6
20	0.000 79	0.000 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Microns ไมโครอน	Precise Value ค่าแน่นอน (นิ้ว)	Nominal Value ค่าใกล้เคียง (นิ้ว)
25	0.000 98	0.001 0
30	0.001 18	0.001 2
35	0.001 38	0.001 4
40	0.001 57	0.001 5

Microns to mm x 0.001      to inches x 0.004 04  
 mm      to microns x 1000      to inches x 0.03937  
 Inches to mm x 25.4      to microns x 25,400

## 2.7 น้ำยาล้างโลหะ

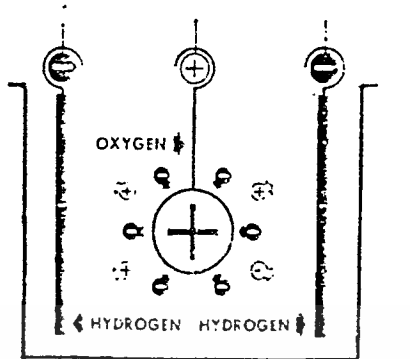
โซเดียมไฮดรอกไซด์	15 กรัม/ลิตร
ไตรโซเดียมฟอสเฟต	25 กรัม/ลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต	25 กรัม/ลิตร
โซเดียมเมตตาซิลิเกต	8 กรัม/ลิตร
อุณหภูมิ	60-70°C

### การล้างด้วยไฟฟ้า (Electro Clean)

น้ำด่างที่ร้อนทุกชนิดจะมีปฏิกิริยากระทำความสะอาดต่อโลหะทุกชนิด เวลาที่ใช้ทำความสะอาดนั้นประกอบด้วยส่วนผสมของตัวยา และชนิดของน้ำมันที่จะล้างออกด้วยการทำความสะอาดด้วยไฟฟ้าทำได้รวดเร็วกว่าการจุ่มล้างบางชนิด การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้าคือปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านลงไปใต้น้ำยาด่างที่ร้อนประมาณ 60-90°C พร้อมทั้งขึ้นงานนั้นล้างได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้านี้ไม่เหมาะต่อการทำความสะอาดงานครั้งละจำนวนมาก ๆ ส่วนผสมของน้ำยาใช้สูตรตามวิธีล้างด้วยด่างร้อนหรือใช้ตัวยาล้างสำเร็จรูปก็สะดวก การล้างด้วยไฟฟ้ายังมีแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

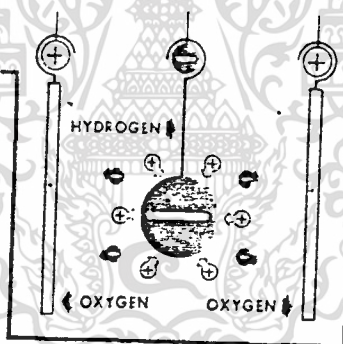
**การล้างโดยให้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก (Anodic Clean)** ถ้าใช้ถังเหล็กอาจมีสิทธิ์  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับขั้วติดไว้ด้วย ล้างโดยงานเป็นขั้วบวกใช้เฉพาะงานเป็นเหล็กเท่านั้น



รูปที่ 2.9 ล้างด้วยไฟฟ้างานเป็นขั้วบวก

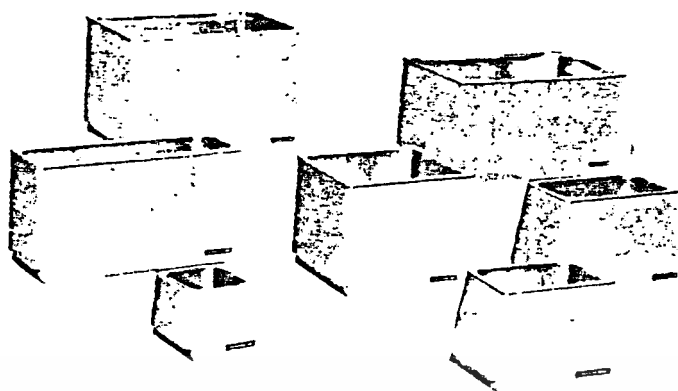
การล้างโดยใช้ขั้วลบ (Cathodic Clean) ใช้ถังเหล็กแผ่นขั้วเป็นเหล็กใช้กับงานที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น ทองเหลือง สังกะสีหล่อ ทองแดง เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ล้างด้วยไฟฟ้างานเป็นขั้วลบ (Cathodic Clean)

ความหนาแน่นที่ใช้ในการล้างด้วยไฟฟ้านี้ สำหรับงานทั่วไปใช้ประมาณ 5-10 แอมป์/ซม<sup>2</sup> เวลา 1-2 นาที ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 4-6 โวลท์ การทำความสะอาดด้วยงานที่เป็นขั้วบวก ถ้าใช้แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าสูงเกินกว่ากำหนด จะทำให้ผิวงานเกิดการรวมตัวกับอ็อกซิเจนหรือผิวจะเปลี่ยนสีไป ถ้าผิวเกิดการรวมตัวกับอ็อกซิเจนขอแนะนำให้ลดความหนาแน่นของกระแสไฟฟาลง

การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นการทำความสะอาดด้วยระบบความถี่สั้นแรงของคลื่นอย่างสูงประโยชน์ของการทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส่วนมากใช้กับงานที่เป็นผลิตภัณฑ์ชิ้นเล็ก ๆ เช่น ชิ้นส่วนของนาฬิกา เครื่องประดับรูปพรรณแว่นตา เพียงนำชิ้นงานแช่ในเครื่อง ชิ้นงานจะสะอาดดีมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เครื่องล้างชิ้นงานแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้นหรือลดต่ำลงตามที่ต้องการ ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 2 ขดหรือมากกว่าพันอยู่บนแกนเหล็กพลังงานไฟฟ้าจะถ่ายเทจากขดลวดหนึ่งไปสู่อีกขดลวดหนึ่งในทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กที่ขดลวดพันอยู่เป็นวงจรแม่เหล็ก ขดลวดที่ต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้า หรือต้นกำเนิดแรงดันเรียกว่า ขดปฐมภูมิ (Primary winding) ส่วนอีกขดต่อเข้ากับตัวใช้ไฟฟ้า (load) เรียกว่าขดทุติยภูมิ (Secondary winding) เพื่อป้อนพลังงานเข้าทางขดปฐมภูมิที่ความถี่และขนาดแรงดันที่กำหนด จะได้พลังงานของขดทุติยภูมิที่มีความถี่เท่ากันและจะมีแรงดันขนาดต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำ ความใกล้ชิดของขดลวดและตัวใช้ไฟฟ้า ถ้าแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิมีค่าสูงกว่าขดปฐมภูมิเรียกว่าเป็นหม้อแปลงแบบเพิ่มแรงดัน (Step-up transformer) แต่ถ้าแรงดันที่ขดทุติยภูมิต่ำกว่าขดปฐมภูมิ เรียกว่าเป็นหม้อแปลงแบบลดแรงดัน (Step-down transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางด้วยวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กันเช่นในระบบสื่อสารจะใช้หม้อแปลงสำหรับปรับค่า อิมพีแดนซ์ ของวงจรสำหรับทางเข้าและทางออกเพื่อให้ได้พลังงานถ่ายเทระหว่างวงจรรับและวงจรส่งมากที่สุด ส่วนในระบบสายส่งพลังงานไฟฟ้าใช้หม้อแปลงเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อลดพลังงานสูญเสียในสายส่งให้น้อยที่สุด แต่เมื่อถึงปลายทางแล้ว จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเพื่อลดแรงดันให้ต่ำลงเพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ไฟ สำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในเครื่อง เชื่อมเป็นการเพิ่ม ค่ากระแสไฟฟ้าให้สูง เพื่อให้เพียงพอที่จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่จะเชื่อมได้

#### 3.1 ชนิดของหม้อแปลง

ชนิดของหม้อแปลงแบ่งตามหน้าที่หรือวัตถุประสงค์การใช้งานได้ดังนี้

1. หม้อแปลงกำลัง (Power transformer) เป็นหม้อแปลงที่มีขนาดตั้งแต่ 200 เควีเอ ขึ้นไป
2. หม้อแปลงจ่ายไฟ (Distribution transformer) เป็นหม้อแปลงที่มีขนาดต่ำกว่า 200 เควีเอ ลงมา
3. หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument transformer) เช่น ซีที และพีที
4. หม้อแปลงความถี่ (High frequency transformer) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

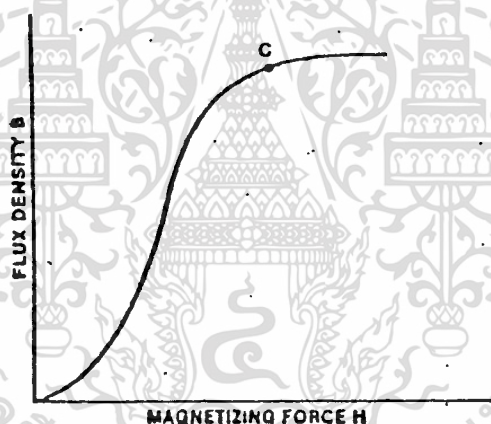
### 3.2 แกนเหล็กหม้อแปลง (Transformer core)

แกนเหล็กเป็นโครงสร้างหลักของหม้อแปลง ซึ่งใช้เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำวงจรรไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิ กับขดลวดทุติยภูมิ นอกจากนี้ แกนเหล็กยังเป็นที่ยึดขดลวดได้อีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณา คุณสมบัติของแกนเหล็ก ดังนี้

1. ความซึมได้ของสารแม่เหล็ก (Permeability) เป็นความสามารถของแกนเหล็กที่จะให้ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กซึมผ่านได้ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density,  $B$ ) กับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetizing force,  $H$ ) ดังนั้นแกนเหล็กที่ดีควรมีค่าซึมได้ของสารแม่เหล็กสูง เพราะจะให้เส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง

2. จุดอิ่มตัวของสารแม่เหล็ก (Saturation) โดยทั่วไปแล้วถ้าพิจารณา



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของ  $B$  กับ  $H$

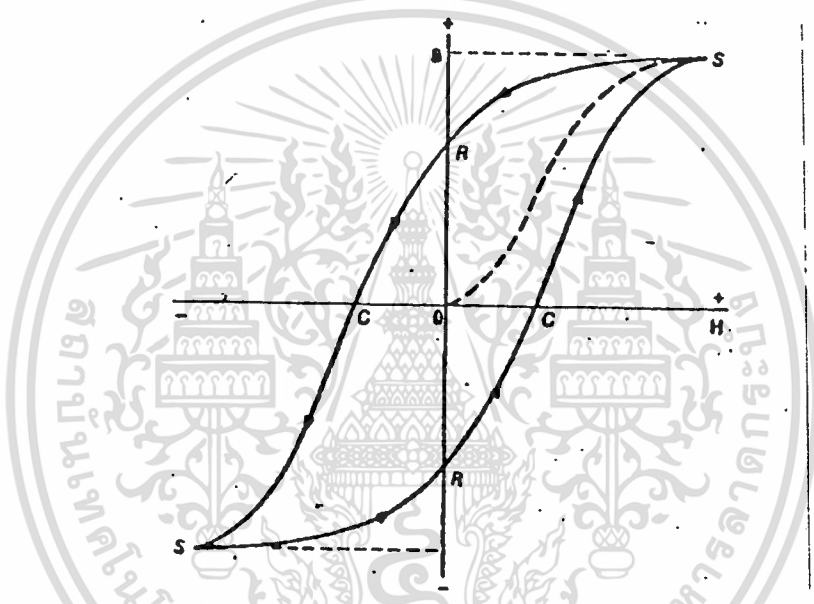
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ( $B - H$  curve) ดังตัวอย่างรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าตั้งแต่จุด C ขึ้นไป จะมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  น้อยมาก แต่การเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  $H$  จะมีค่าสูง แสดงว่าที่จุดนี้เป็นจุดที่แกนเหล็กเริ่มอิ่มตัว ซึ่งจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $B$  ต่อ  $H$  มีค่าน้อยลง ผลจะทำให้ความซึมของสารแม่เหล็ก มีค่าต่ำ ดังนั้น แกนเหล็กที่ดี ควรจะมีค่า  $B$  ที่ทำให้แกนเหล็ก อิ่มตัวมีค่าสูง ๆ

3. ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) การที่เส้นแรงแม่เหล็กจะไปคล้อง (Link) กับขดลวดที่พันบนแกนเหล็กได้นั้นจะต้องผ่านแกนเหล็กก่อนเมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปในแกนเหล็ก จะทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (Induce electrical current) ขึ้นในแกนเหล็ก เราเรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเซ็ปะเอ็งนี้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Eddy current) ซึ่งกระแสจะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียออกมาในรูป ของความร้อน ถ้าแกนเหล็กมีความต้านทาน (Electrical resistance) มากค่ากระแสไหลวนก็จะมีค่าต่ำ ซึ่งจะเป็นการลดค่ากำลังงานสูญเสียนี้ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติลดการสูญเสียนี้โดย ทำแกนเหล็กให้เป็นแผ่นบาง ๆ หลายแผ่น มาประกอบกันและแต่ละแผ่นจะอาบฉนวนเอาไว้เพื่อเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานของแกนเหล็ก

4. เส้นแรงแม่เหล็กค้าง (Hysteresis) เนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก H จะเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงบวกและลบตลอดเวลาตามความถี่ของไฟสลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็น Hysteresis curve ช่วง os เป็นค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตอนเริ่มต้น



รูปที่ 3.2 กราฟของเส้นแรงแม่เหล็กค้าง

เมื่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในช่วงบวก แต่พอค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีค่าลดเป็นศูนย์ แต่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กคงอยู่ (Remance, Br) เมื่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กอยู่ในช่วงลบค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นศูนย์นี้ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับช่วง OC เราเรียกช่วง OC นี้ว่า Coercivity (Hc) เมื่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีค่าสูงสุดทางด้านลบแล้วจะลดลงเป็นศูนย์แล้วเพิ่มขึ้นไปทางด้านบวกอีกครั้งหนึ่ง จะทำให้เกิดเป็น Hysteresis loop ดังรูป 3.2 โดยที่จุด s เป็นช่วงที่ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุด ทั้งช่วงบวกและช่วงลบซึ่ง Hysteresis loop นี้จะแทน Hysteresis loss ยิ่ง Loop กว้างค่าสูญเสียจะยิ่งมาก ดังนั้นคุณสมบัติแกนเหล็กที่ดีควรจะมีค่า Br และค่า Hc ต่ำ ๆ

จากคุณสมบัติของแกนเหล็กทั้ง 4 ข้อที่กล่าวมานั้นพอสรุปได้ว่า วัสดุที่จะนำมาทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นาไปจะเขียนดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแกนเหล็กหม้อแปลง ควรจะมีความเข้มได้ของเส้นแรงแม่เหล็ก และความต้านทานสูง กำลังสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างต่ำ โรงงานที่ทำหม้อแปลงส่วนมากจะใช้เหล็กประเภทเกรนโอเรียนเต็ลแบบ รีดเย็น (cold grain Oriented steel) ซึ่งเหล็กประเภทนี้ได้ผ่านการวิธีการผลิตทั้งทางเคมี และความร้อนมาแล้ว ก่อนที่จะนำมารีดเป็นแผ่นบาง ๆ

โดยทั่วไปแล้ว แผ่นเหล็กที่มาประกอบเป็นแกนหม้อแปลง จะมีส่วนผสมของซิลิกอนอยู่ 4-5% มีความหนา 0.55 มม. และ 0.5 มม. การผสมซิลิกอนเข้าไปนี้เพื่อเพิ่มความต้านทานให้แกนเหล็ก สำหรับแผ่นเหล็กที่หนา 0.35 มม. จะให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ 1.6 ถึง 2 เทสลา (Teslas or Weber) ส่วนแผ่นเหล็กที่หนา 0.5 มม. จะให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กระหว่าง 1.4 ถึง 1.5 เทสลา

แผ่นเหล็กบาง ๆ เหล่านี้จะถูกลบด้วยฉนวน เพื่อเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลวนเนื่องจากการลัดวงจรของแม่เหล็กได้ การลบบนนั้นอาจจะลบหลายครั้ง หรือลบครั้งเดียวก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าจะให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้มากน้อยแค่ไหนดังนั้นก็ทำให้พื้นที่หน้าตัดจริง ๆ ของแกนเหล็กเล็กลงขึ้นอยู่กับส่วนประกอบชนิดหนึ่งเรียกว่า Stacking factor, Ksf ซึ่งค่านี้จะเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ที่หน้าตัดของแกนเหล็ก กับพื้นที่ของ Stepped contour ของแกนเหล็ก และค่านี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก ชนิดของฉนวนที่ฉาบ และการอัดแกนเหล็กปกติค่านี้จะน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ซึ่งดูได้จากตารางที่ 3.1

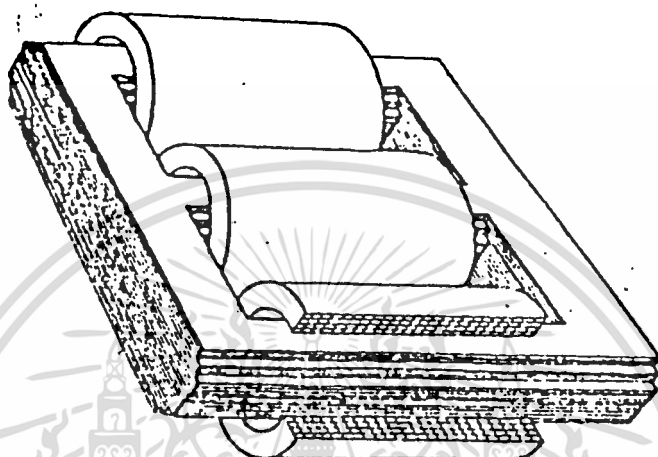
ตารางที่ 3.1

ชนิดของแผ่นเหล็ก	ฉนวนที่ใช้	ค่า Ksf ของเหล็กเมื่อความหนา	
		0.5 มม.	0.35 มม.
Sheets	ไม่อาบฉนวน	0.95 - 0.93	0.95 - 0.96
	ฉาบวานิชชั้นเดียว	0.95 - 0.96	0.93 - 0.94
	ฉาบวานิชสองชั้น	0.93 - 0.94	0.91 - 0.92
	ฉาบวานิชสามชั้น	0.91 - 0.92	0.89 - 0.90

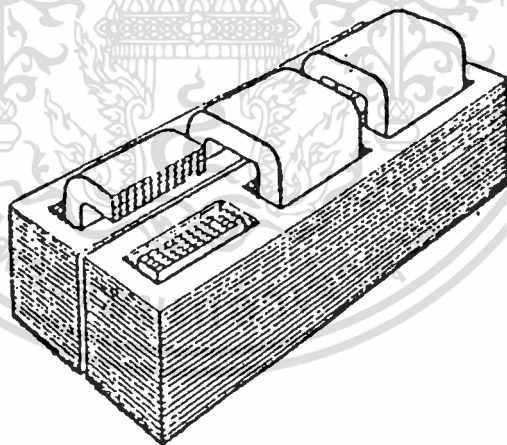
การจัดวางแกนเหล็กหม้อแปลงที่นิยมทำกัน พอจำแนกตามหลักของวงจรแผ่นเหล็กออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชนิดแกน (core type) แบบนี้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กรวมอยู่ที่แกนของหม้อแปลง ดังแสดงในรูป 3.3 เป็นแบบที่ง่ายในการประกอบ และแยกขดลวดออกจากกัน ดังนั้นจึงนิยมใช้กับหม้อแปลงที่มีแรงเคลื่อนสูง ๆ

2. ชนิดเปลือกกรอบ (shell type) แบบนี้จะมีขดลวดพันอยู่ที่แกนกลางดังแสดงในรูปที่ 3.4 แบบนี้จะใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดเควีเอน้อยกว่า แบบ core type



รูปที่ 3.3 หม้อแปลง 3 เฟสแบบแกน (core type)



รูปที่ 3.4 หม้อแปลง 3 เฟสแบบ shell type

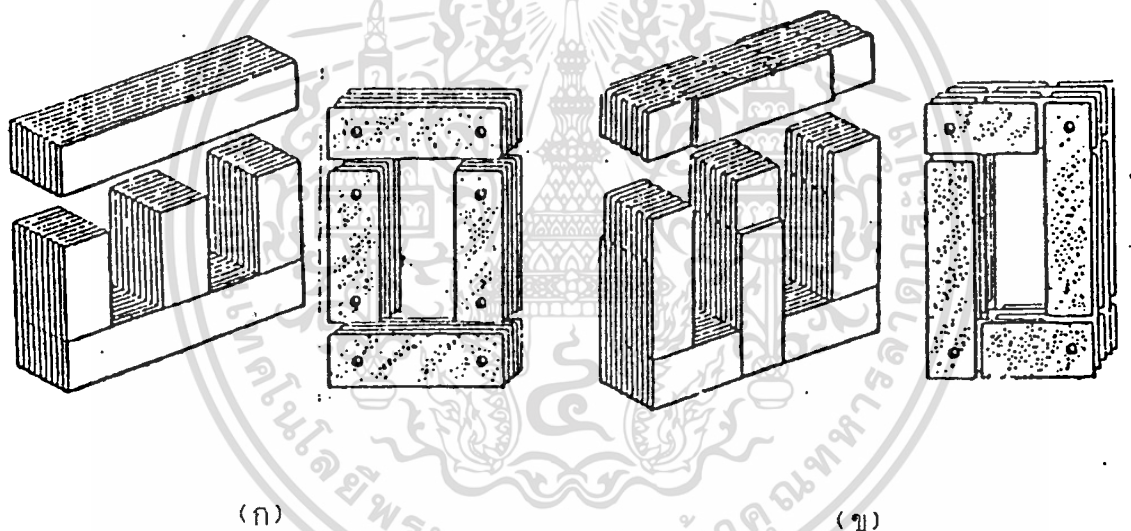
### 3.3 การประกอบแกนเหล็ก

เมื่อนำแผ่นเหล็กบางๆ มาเรียงรวมเป็นแกน จะทำให้เกิดแรงตรึงสภาพแม่เหล็ก (Magnetostriction) ขึ้นได้ แรงนี้จะเกิดจากการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetizing magnetomotive force) เพื่อจะทำให้เกิดการยึดและหดตัวของแผ่นเหล็ก ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยึดและหดตัวนี้จะเป็นได้ทั้งตามยาว และตามขวาง ผลก็คือมีพลังงานที่เกิดเนื่องจากธรรมชาติของสารกระจายออกมา ซึ่งพลังงานเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับความเค้นเชิงกล (Mechanical stress) จะก่อให้เกิดเสียงรบกวนออกจากตัวหม้อแปลง ซึ่งแรงดังกล่าวสามารถที่จะลดได้โดย

1. แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นต้องเรียบ เพื่อให้แรงดันผิว (surface pressure) บนแกนกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน

2. ช่องว่างของแต่ละแผ่นเหล็กต้องน้อย เพื่อหลีกเลี่ยงจับหวะสะท้อนเชิงกล (Mechanical resonance) ซึ่งจะลดการสั่นสะเทือน อันเป็นบ่อเกิดแห่งเสียงรบกวนได้ ดังนั้นในการยึดแผ่นเหล็กเข้าด้วยกัน จะต้องรัดให้แบบสนิทกันและให้แผ่น เพื่อลดการสั่น สำหรับวิธีวางแผ่นเหล็กจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบนำแผ่นเหล็กมาชนกัน (Butt joint) และแบบวางซ้อนทับกัน (inter leaved) ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.5 (ก) ประกอบแกนเหล็กแบบชนกัน (ข) ประกอบแกนเหล็กแบบซ้อนทับกัน

ปัจจุบันแบบวางซ้อนทับกันจะเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากแบบนี้จะลดกระแสที่ทำให้เป็นแม่เหล็ก (magnetizing current) ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กลงได้ และยังเป็น การเพิ่มความแข็งแรงทางกล (Mechanical strength) ให้แกนเหล็กอีกด้วย

### 3.4 ขดลวด (winding)

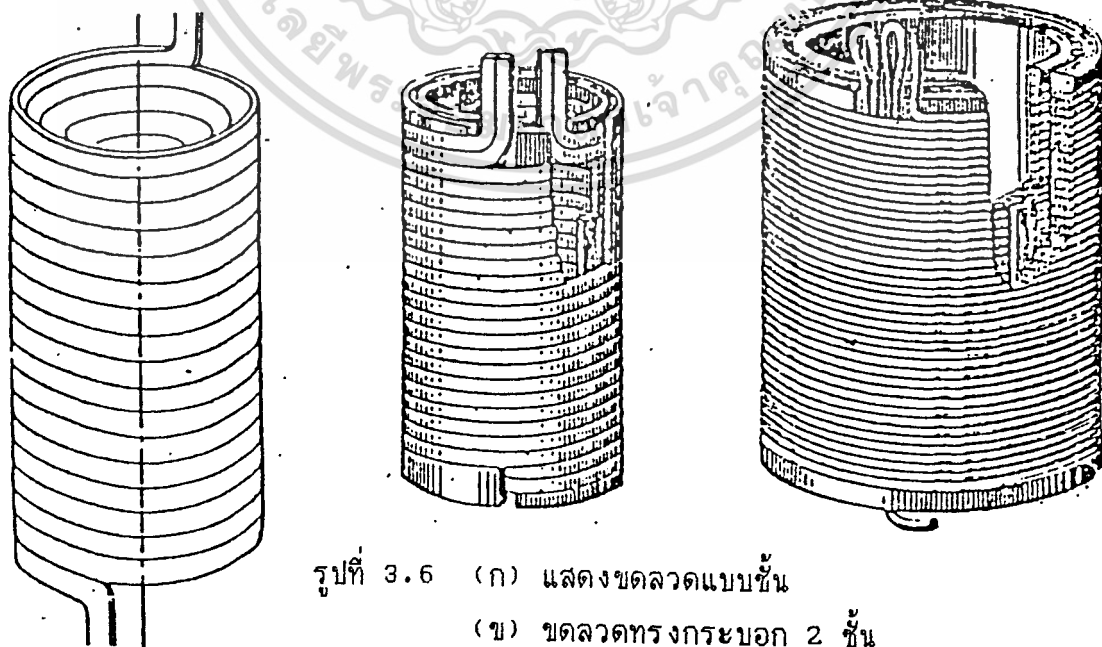
ขดลวดหม้อแปลง เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจรไฟฟ้าซึ่งจะประกอบด้วย ทองแดง หรืออลูมิเนียมและฉนวน การเลือกใช้ชนิดของขดลวดควรพิจารณาถึง

1. กำลังสูญเสียขณะรับภาระ (Load Loss) ต้องน้อยที่สุด ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวนำที่ใช้
2. มีความแข็งแรงทนทาน
3. เสถียรภาพที่มีต่อความร้อนสูง
4. ความทนทานของฉนวนมีคุณภาพสูง
5. มีโครงสร้างไม่ยุ่งยากเกินไปนัก

โดยทั่วไปแล้วตัวนำที่นำมาพันเป็นขดลวดหม้อแปลงนี้จะหุ้มด้วยฉนวนพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำจะมีทั้งแบบกลม และแบบสี่เหลี่ยม สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำแบบกลมที่เป็นทองแดง ตามมาตรฐาน จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 4.1 มม. และความกว้างอยู่ระหว่าง 4 มม. ถึง 14 มม. ขนาดและชนิดของลวดตัวนำที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าและอัตรากำลังของหม้อแปลง รวมทั้งกระแสไฟฟ้าของภาระที่ต้องการลวดตัวนำแบบกลมเหมาะสำหรับที่จะใช้กับหม้อแปลงขนาดเล็ก ส่วนลวดตัวนำแบบสี่เหลี่ยมเหมาะสำหรับที่จะใช้กับหม้อแปลงที่ต้องรับภาระสูง ๆ

การพันขดลวดของหม้อแปลงแบ่งตามลักษณะการวางขดลวดได้ดังนี้

1. ขดลวดแบบชั้น (Layer winding) แต่ละรอบของวงจรถดลวดจะวางชิดกันดังแสดงในรูป 3.6 (ก)



รูปที่ 3.6 (ก) แสดงขดลวดแบบชั้น

(ข) ขดลวดทรงกระบอก 2 ชั้น

(ค) ขดลวดทรงกระบอกหลายชั้น

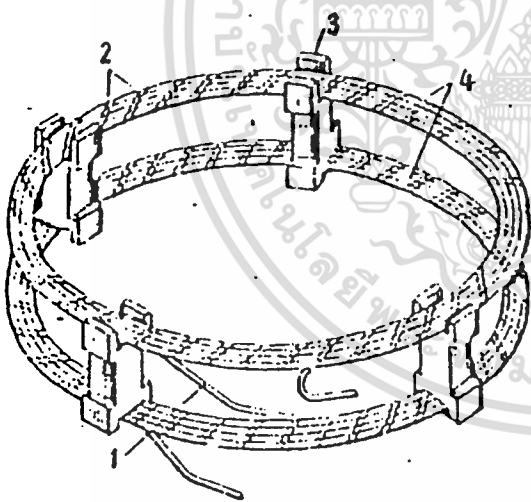
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวางขดลวดแบบชั้นนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1.1 ขดลวดชั้นทรงกระบอก (Cylindrical Layer sinding) แบบนี้ใช้ได้ทั้งลวดตัวนำแบบกลมและแบบสี่เหลี่ยม การพันจะมีลักษณะการพันเหมือนหลอดด้าย การพันอาจจะมีชั้นเดียวหรือหลายชั้น ดังแสดงในรูป 3.6 (ข) และ 3.6 (ค) การพันแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับหม้อแปลงที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่สูงมากนัก

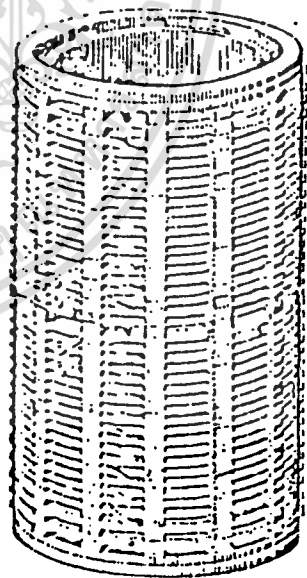
1.2 ขดลวดชั้นวงขด (Coil type layer winding) ขดลวดหลายชั้นชนิดทรงกระบอก ถ้าใช้กับแรงดันไฟฟ้าสูงๆ จะเกิดปัญหาที่ว่าแรงดันระหว่างชั้นจะสูงเกินไป ทำให้ยากแก่การเลือกฉนวนระหว่างชั้น ฉะนั้นในการลดแรงดันไฟฟ้าระหว่างชั้นดังกล่าว จะใช้การพันแบบนี้คือ แยกขดลวดออกตามแนวยาวของแกนเหล็ก ให้เป็นหลายๆ ขด ในแต่ละขดจะมีกี่ชั้นก็ได้

2. ขดลวดแบบจาน (Disc sinding) ขดลวดแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ประกอบด้วยวงขดพันเป็นชุดๆ ต่ออนุกรมกันดังรูป 3.7 (ก) ข้อดีของการพันแบบนี้คือ มีความแข็งแรงสูง แต่ยุ่งยากต่อการผลิตและมีค่าใช้จ่ายสูง ถ้าขดลวดมีการต่ออนุกรมเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูป 3.7 (ข) จะเรียกขดลวดจานต่อเนื่อง (continuous disc winding) การต่ออนุกรมของขดลวดแต่ละชุดนั้น จะไขว้ต่อเนื่องกันไป



- 1. จุดสับเปลี่ยนภายใน
- 2. ลายพัน
- 3. ตัวยึดชั่วคราว
- 4. วงขดลวดเดี่ยว

(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) ขดลวดแบบจาน (ข) ขดลวดแบบจานต่อเนื่อง

3. ขดลวดแบบกันหอย (Helical winding) แบบนี้จะพันด้วยลวดตัวนำหลายเส้นขนานกัน การพันจะคล้ายคลึงกับการพันขดลวดชนิดหลายชั้น เพียงแต่จะต่างกันตรงที่ว่าขดลวดชนิดหลายชั้นลวดตัวนำที่ขนานกันจะวางชิดกันแต่แบบกันหอย จะวางซ้อนทับกัน

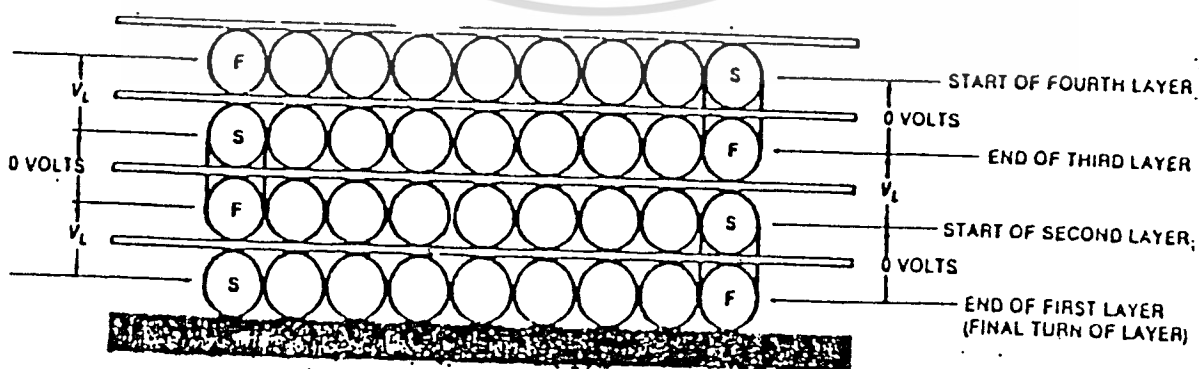
### 3.5 ฉนวน (Insulator)

ลวดตัวนำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มม. ถึง 1.3 มม. จะมีสารเคลือบเหมาะที่จะใช้กับแกนเหล็กขนาดเล็ก ถ้าต้องการให้ฉนวนดีขึ้นและทนทานความร้อนได้มากขึ้น ก็จะเคลือบด้วยไวนิเฟล็กซ์ (Viniplex) หรือพันทับด้วยไหมแคปรอน (Caprone) หรือคอตตอน (cotton) ส่วนลวดตัวนำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 มม. ถึง 4.1 มม. จะพันด้วยกระดาษเคลือบหลายชั้น สำหรับลวดตัวนำหน้าตัดสี่เหลี่ยมก็จะมีฉนวนไว้เช่นเดียวกัน ถ้าต้องการให้ทนความร้อนให้มากกว่านี้ ก็จะพันทับด้วยไฟเบอร์กลาส (Fiber glass)

สำหรับในแต่ละรอบของขดลวด จะคั่นด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการผ่าทะลุลงของแรงดันระหว่างชั้นไม่ให้ขดลวดลัดวงจรได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กระดาษเคลือบหนา 0.12 มม. ผ้าฝ้ายหรือแผ่นไมก้ากั้นระหว่างชั้นไว้ ในการกันนี้ก็จะเป็นการระบายความร้อนไปในตัวด้วยความหนาของฉนวนที่กันนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลง ว่าจะให้แรงดันระหว่างชั้นมากน้อยแค่ไหนเราสามารถหาแรงดันระหว่างชั้นได้ จากรูป 3.8

$$V_L = 2 * N_L * V_w / N_w$$

เมื่อ  $V_L$  = แรงดันระหว่างชั้น  
 $N_L$  = จำนวนรอบของขดลวดต่อชั้น  
 $N_w$  = จำนวนรอบของขดลวด  
 $V_w$  = แรงดันคร่อมขดลวดทั้งหมด



รูปที่ 3.8 แสดงการเกิดแรงดันระหว่างชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E.m.f. equation)

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปยังขดปฐมภูมิของหม้อแปลง จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหลัก (main flux,  $\phi$ ) ขึ้น ซึ่งจะกระจายไปตามแกนเหล็กและไปคล้อง (link) กับขดทุติยภูมิ ในขณะที่เดียวกันก็จะคล้องขดปฐมภูมิด้วย ทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้

$$e_1 = -T_1 * d\phi/dt \quad (1)$$

$$\phi = \phi_m * \cos wt$$

$$w = 2 * \pi * f$$

เมื่อ  $e_1$  = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นชั่วขณะที่ขดปฐมภูมิ

$T_1$  = จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

$\phi_m$  = ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กหลัก

$f$  = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

แทนค่า  $\phi$  ในสมการ (1) จะได้

$$\begin{aligned} e_1 &= -T_1 * d(\phi_m * \cos wt)/dt \\ &= T_1 * W * \phi_m * \sin wt \end{aligned} \quad (2)$$

จากสมการ (2) จะได้

$$e_1 (\max) = T_1 * W * \phi_m \quad (3)$$

สมมติว่า ค่า r.m.s. ของ  $e_1$  คือ  $E_1$

$$\begin{aligned} E_1 &= e_1 (\max) / \sqrt{2} = T_1 * W * \phi_m / \sqrt{2} \\ &= T_1 * 2 * \pi * f * \phi_m / \sqrt{2} \\ &= 4.44 * f * T_1 * \phi_m \end{aligned}$$

แต่  $\phi_m = B_m * A_i$

$$E_1 = 4.44 * f * T_1 * B_m * A_i \quad (4)$$

เมื่อ  $B_m$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (เวเบอร์/ตรม.)

$A_i$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตรม.)

ในทำนองเดียวกันแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดทุติยภูมิ  $E_2$  ซึ่งมีจำนวน  $T_2$  มีค่าเท่ากับ

$$E_2 = 4.44 * f * T_2 * B_m * A_i \quad (5)$$

ดังนั้นจากสมการ (4) และ (5) จะหาแรงดันไฟฟ้าต่อรอบ  $E_t$  (E.m.f. per turn) ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ต่าง (6) รค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$E_t = 4.44 * f * \phi_m \quad (7)$$

### 3.7 การหาแรงดันต่อรอบในเทอมของ KVA

$$\begin{aligned} \text{KVA} &= \text{Voltage} * \text{Current} * 10^{-3} \\ &= (4.44 * f * T * \phi_m) * I * 10^{-3} \end{aligned} \quad (8)$$

พิจารณาหม้อแปลงอุดมคติ จะมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ( $A_i$ ) ต่อพื้นที่หน้าตัดของขดลวด ( $a$ ) มีค่าคงที่นั่นคือ

$$A_i/a = \text{constant} = r \quad (9)$$

ดังนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีค่าเกือบคงที่ ค่า  $A_i$  จึงขึ้นอยู่กับค่าเส้นแรงแม่เหล็ก ค่าเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\phi_m$ ) ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสก็จะมีค่าเกือบคงที่ ดังนั้นค่า  $a$  จึงขึ้นอยู่กับ Ampere turns (I.T.) อย่างเดียวกันสมการ (9) จะกลายเป็น;  $\phi_m/I.T. = r$  และ  $I.T. = \phi_m/r$

แทนค่า I.T. ในสมการ (8) จะได้

$$\begin{aligned} \text{KVA} &= (4.44 * F * \phi_m) * (\phi_m/r) * 10^{-3} \\ \phi_m &= \sqrt{(r * 10^3) / (4.44 * f)} * \sqrt{\text{KVA}} \end{aligned} \quad (9.1)$$

แทนค่าสมการ (9) ลงใน (7) จะได้

$$E_t = \sqrt{(4.44 * f * r * 10^3)} * \sqrt{\text{KVA}}$$

แรงดันต่อรอบ ;  $E_t = K * \sqrt{\text{KVA}}$

เมื่อ  $K = 4.44 * f * r * 10^3 =$  ค่าคงที่

ค่า  $K$  จะขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อแปลงและแบบของแกนเหล็ก โดยจะมีค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า  $K$  ของหม้อแปลง

TYPE	K
Single phase shell type	1.0 - 1.2
Single phase corn type	0.75 - 0.85
Three phase shell type	1.3
Three phase corn type (distribution)	0.45
Three phase corn type (power)	0.6 - 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 การหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

สมการ (10) เท่ากับสมการ (6) จะได้

$$A_i = Et / (4.44 * f * B_m) \quad (11)$$

แต่เนื่องจากแผ่นเหล็กของหม้อแปลงฉาบด้วยฉนวน ดังนั้นจะมีค่า stacking factor ( $K_{sf}$ ) มาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นสมการ (11) จะกลายเป็น

$$A_i = Et / (4.44 * f * B_m * K_{sf}) \quad (12)$$

สำหรับการเลือกค่า  $B_m$  ให้พิจารณาค่าในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3

TYPE	$B_m$ (Wb/m <sup>2</sup> )
Distribution transformer	1.1 to 1.35
Power transformer	1.25 to 1.45

### 3.9 การหาช่องหน้าต่างของแกนเหล็ก

สำหรับหม้อแปลง 1 เฟสแบบ core type พื้นที่ของหน้าต่างของแกนเหล็กจะถูกแทนด้วย พื้นที่ของขดลวด (copper area) ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

$$= (a_1 * T_1) + (a_2 * T_2)$$

เมื่อ  $a_1, a_2$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

แต่เนื่องจากช่วงหน้าต่างนี้ไม่ได้มีเฉพาะขดลวดเพียงอย่างเดียวเท่านั้นยังประกอบด้วยฉนวน และช่องว่างเพื่อระบายอากาศพอสมควร ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้เรียกว่า space factor of winding ( $K_w$ )

$$\text{ช่วงหน้าต่าง} = K_w * A_w$$

เมื่อ  $A_w$  = พื้นที่ของช่องหน้าต่างทั้งหมด (ตรม.)

$$\text{ดังนั้นจะได้ } K_w * A_w = (a_1 * T_1) + (a_2 * T_2) \quad (13)$$

แต่ primary ampere turn  $I_1 * T_1 = \text{Secondary ampere turn } I_2 * T_2$

$$\text{หรือ } A_1 * J * T_1 = a_2 * J * T_2 \quad (14)$$

$$a_1 * T_1 = a_2 * T_2$$

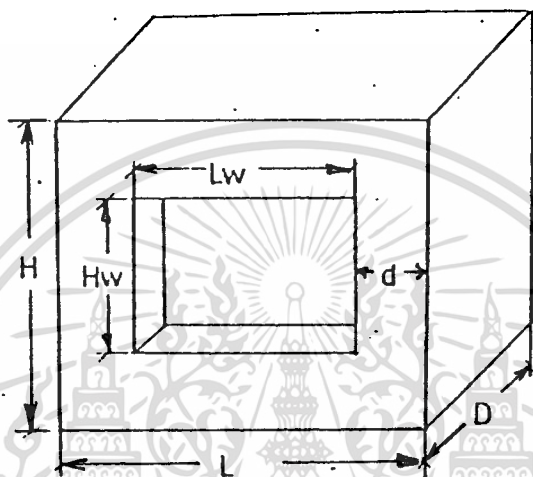
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $J$  = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) แทนค่า (14) ลงใน (13) จะได้

$$A_w = 2 * A_1 * T_1 / K_w \quad (15)$$

โดยทั่วไปจากการทดลองค่า  $K_w$  จะสัมพันธ์กับแรงดันด้านปฐมภูมิเป็นกิโลโวลต์ (KV1) ดังนี้

$$K_w = 10 / (30 + KV1) \quad (16)$$



รูปที่ 3.9 แสดงการกำหนดชื่อขนาดของแกนเหล็ก

จากรูป 3.9  $A_w = H_w * L_w$

$$A_i = d * D$$

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ เพื่อความสวยงามและเหมาะสมของแกนเหล็กจะกำหนดดังนี้

$$H_w / L_w = 2 \text{ to } 4 \quad (17.1)$$

$$D / d = 1 \text{ to } 3 \quad (17.2)$$

สำหรับการหาพื้นที่หน้าตัดนี้ อาจจะได้หาได้จาก พื้นที่ของขดลวดรวมกับฉนวนที่ใช้ พันจริง ๆ ก็ได้

### 3.10 การหาน้ำหนักของแกนเหล็ก $G_i$

$$\begin{aligned} G_i &= (\text{Weight of legs}) * (\text{Weight of yoke}) \\ &= (2 * S_i * A_i * H_w) + (2 * S_i * A_i * L) \\ &= 2 * S_i * A_i * (H_w + L) \end{aligned} \quad (18)$$

เมื่อ  $S_i$  = ความหนาแน่นของเหล็ก ( $7.65 * 10^3$  กก./ลบม.)

$A_i$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตรม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H_w$  = ความสูงของช่วงหน้าต่าง (ม.)

$L$  = ความยาวของ Yoke (ม.)

### 3.11 การหาจำนวนรอบและขนาดของลวดตัวนำ

#### 1. ด้านปฐมภูมิ

$$\text{จำนวนรอบ } T1 = V1/Et \text{ รอบ} \quad (19)$$

$$\text{กระแส } I1 = (V * A/V1) * \text{duty cycle factor} \quad (20)$$

พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ

$$a1 = I1/J1 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \quad (21)$$

เมื่อ  $J1$  = Primary current density ( $A/mm^2$ )

#### 2. ด้านทุติยภูมิ

$$\text{จำนวนรอบ } T2 = V2 * T1/V1 \text{ รอบ} \quad (22)$$

$$\text{กระแส } I2 = (V * A/V2) * \text{duty cycle factor} \quad (23)$$

พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ

$$a2 = I2/J2 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \quad (24)$$

เมื่อ  $J2$  = secondary current density ( $A/mm^2$ )

ตารางที่ 3.4 การเลือกค่า duty cycle factor

Percent duty cycle	100	90	80	70	60	50	40	30	20
Multiplier factor	1	0.95	0.89	0.84	0.78	0.71	0.63	0.55	0.45

### ตารางที่ 3.5 การเลือกค่า current density

TYPE	J (A/mm <sup>2</sup> )
Distribution transformer	1.5 to 2.6
Power transformer	2.4 to 3.3
Large transformer with circulation of oil	2.8 to 4.0

สำหรับการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของกระแส เพื่อที่จะหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด จะต้องคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก copper loss เพราะความร้อนจะทำให้ละลายคุณสมบัติของฉนวน ถ้ามีการระบายความร้อนของขดลวดได้ดีสามารถเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงได้ ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเล็กลง และน้ำหนักของขดลวดก็ย่อมน้อยลงด้วย

#### 3.12 การหาน้ำหนักของขดลวด Gc

$$\begin{aligned}
 G_c &= (\text{weight of primary winding}) + (\text{weight of secondary winding}) \\
 &= (T_1 * L_{m1} * a_1 * S_c) + (T_2 * L_{m2} * a_2 * S_c) \\
 &= (S_c * [(T_1 * L_{m1} * a_1 + T_2 * L_{m2} * a_2)]) \quad (25)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $S_c$  = ความหนาแน่นของทองแดง ( $8.9 * 10^3$  กก./ลบม.)

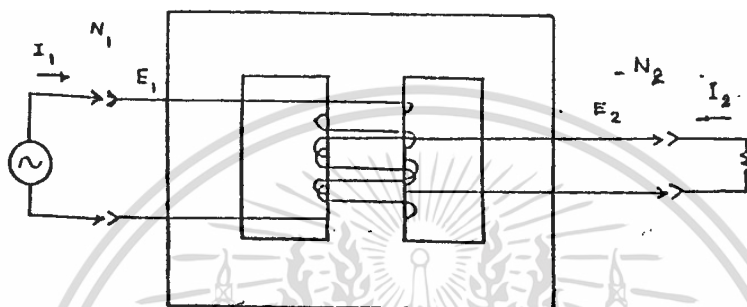
$T_1, T_2$  = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$L_{m1}, L_{m2}$  = ความยาวเฉลี่ยของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$a_1, a_2$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

### 3.13 หม้อแปลงที่ใช้ในวงจร Power Supply

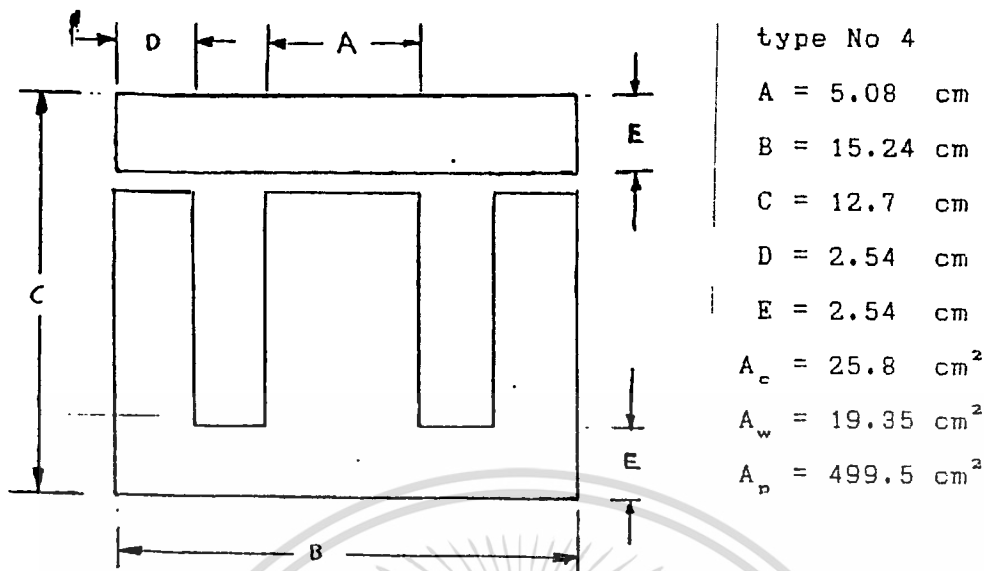
หม้อแปลงเป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เครื่องชုပ် เพื่อใช้ในการชုပ်พิวโลหะ ซึ่งเป็นแบบ  
 ที่ให้ output voltage ( $E_2$ ) ต่ำ แต่ output current ( $I_2$ ) สูง



รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลง

#### การออกแบบพันหม้อแปลงไฟฟ้า

ทำการเลือกแกนเหล็ก EI ซึ่งมีส่วนผลมของซิลิคอน Type No.4 จากภาคผนวก  
 ซึ่งให้  $P_o$  600 watt (โดยกำหนดให้ efficiency, = 75%) ซึ่งมีรูปร่างและสัดส่วน  
 ของแกนเหล็ก EI ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 แสดงรูปร่างและสัดส่วนของแกนเหล็ก EI

1) ด้าน Input (ขดปฐมภูมิ)

จาก

$$A_p = P_o (1 + 1/n)$$

$$4.44 B_m J K_w f$$

โดย  $A_p$  คือ area product

$P_o$  คือ output power

$n$  คือ efficiency =  $p_o/P_i$

$B_m$  คือ flux<sub>max</sub> (มีค่าระหว่าง 0.8-0.97T)

$J$  คือ current density ของลวดทองแดง (มีค่าระหว่าง

$$3.5-5 \text{ A/m}^2 \times$$

$K_w$  คือ window utilization factor (มีค่าประมาณ 0.3-

$$0.4)$$

$f$  คือ frequency ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ (50H<sub>x</sub>)

แทนค่าโดย  $A_p = 499.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,  $n = 75\%$ ,  $B_m = 0.85T$

$J = 500 \times 10^4 \text{ a/m}^2$ ,  $K_w = 0.3$  และ 50H<sub>x</sub> จะได้

$$P_o = 605 \text{ watt}$$

$$P_i = P_o/n = 808 \text{ watt}$$

$$I_i = P_o/E_i = 3.67A$$

จาก  $N_1 = E_i / (4.44 K_w f B_m A_c)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $N_1$  คือ จำนวนรอบของขดลวดจรรยาปฏิรูป

$E_1$  คือ input voltage

$K_m$  คือ stacking factor (มีค่าระหว่าง 0.8-0.95)

$A_c$  คือ area core

แทนค่าโดย  $K_m = 0.9$ ,  $f = 50\text{Hz}$ ,  $B_m = 0.85\text{T}$  และ  $A_c = 25.8 \times 10^{-4}\text{m}^2$  จะได้

$$N_1 = 502 \text{ รอบ}$$

จาก area wire = I/J

จะได้พื้นที่หน้าตัดของ  $N_1 = 3.67\text{m}^2$

$$5 \times 10^5$$

$$= 0.734 \text{ m.m}^2$$

ทำการเลือก SWG No ของทองแดงจากภาคผนวก โดยต้องคำนึงถึงขนาดของเส้นลวดที่ใช้ควรจะมีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณไว้เล็กน้อย ซึ่งในที่นี้ทำการเลือกใช้ SWG No 19

2) ด้าน Output (ขดทุติยภูมิ)

เลือกใช้ลวดทองแดงที่ใช้แบบ SWG No 10 จำนวน 6 เส้น ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดเท่ากับ  $8.3 \text{ m.m}^2$  พันทับขดปฐมภูมิลงไป โดยที่เราคั่นระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิด้วยฉนวน โดยตีขนานกันไปจำนวน 11 รอบ

$$N_2 = 11 \text{ รอบ}$$

$$E_2 = E_1 (N_2/N_1)$$

$$= 4.82 \text{ Volt}$$

จากพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดเท่ากับผลรวม การที่เราพันขดลวดทุติยภูมิจำนวน 6 เส้น ซึ่งตีขนานกันไปนั้นจะได้กระแสรวมทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 210 แอมแปร์

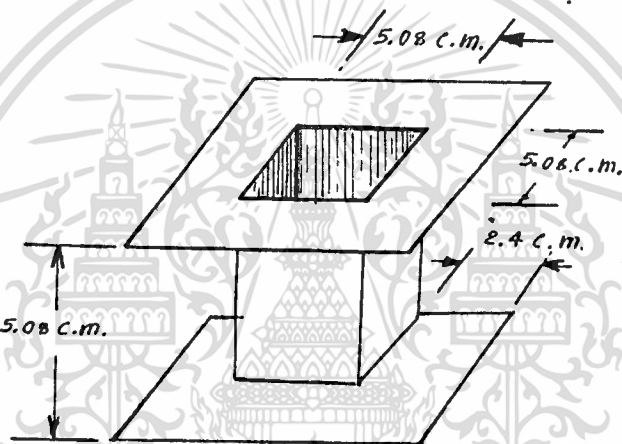
### ขั้นตอนการพันหม้อแปลง

- 1) นำขดปฐมภูมิ ซึ่งมีขนาดตั้งรูป 3.12 มารองพื้นด้วยฉนวนไมลาร์ก่อนจำนวน 1 รอบ
- 2) พันลวดทองแดง SWG No 19 ลงบนขดปฐมภูมิโดยพันเรียงเส้นกันไปเป็นชั้นๆ จำนวน 502 รอบ ซึ่งจะมีความหนาจำนวน 9 ชั้น
- 3) เคลือบขดลวดปฐมภูมิด้วยน้ำยาวานิชชนิดแห้งเร็ว จนกระทั่งขดลวดอิมตัว
- 4) ใช้ฉนวนไมลาร์พันทับลงไปจำนวน 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) พันลวดทองแดง SWG No 10 จำนวน 5 เส้น ตีขนานกันไปจำนวน 11 รอบ ประมาณ 3 ชั้น
- 6) เคลือบขดลวดด้วยน้ำยาวานิชชนิดแห้งเร็ว อีกครั้งหนึ่ง
- 7) ใช้กระดาษฉนวนพันทับลงไปจำนวน 2 รอบ
- 8) นำมาประกอบเข้ากับแกน EI โดยสอดแกน E และแกน I สลับกันไปมาจนกระทั่งเต็มบอบขึ้น
- 9) ใช้โอห์มมิเตอร์ตรวจว่าขดลวดมีการลัดวงจรกับแกน EI หรือขดลวดขดอื่น ๆ หรือไม่

ลักษณะของหม้อแปลงที่พันใช้งานได้แสดงไว้ดังรูปถ่ายในภาคผนวก



รูปที่ 3.12 แสดงขนาดของบอบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

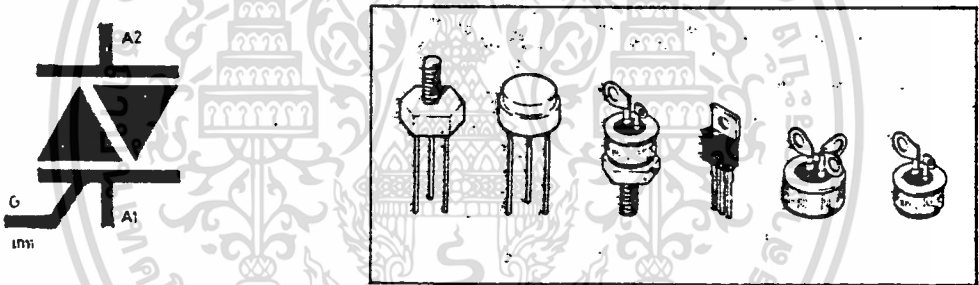
## บทที่ 4

### ภาคควบคุมกำลังไฟฟ้า (Phase Control)

#### 4.1 ลักษณะทั่วไปของไทรแอก

ไทรแอกเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันแพร่หลายและเรามักจะรู้จักกันว่าไทรแอกสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์รีไฟหรือใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าสลับได้

ไทรแอกเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีขั้วต่อ 3 ขั้ว เรียกแต่ละขั้วว่า  $A_2$ ,  $A_1$  และ เกท โดยมีสัญลักษณ์และรูปร่างของไทรแอกดังแสดงในรูปที่ 4.1 ไทรแอกจะเป็นตัวทำหน้าที่คล้าย ๆ กับสวิตช์ไฟฟ้าสำหรับกระแส



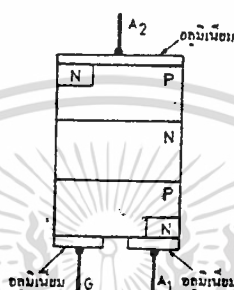
รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์และรูปร่างของไทรแอก

สลับแต่มีข้อดีกว่าสวิตช์ธรรมดาคือ

1. การเปิดปิดวงจรไฟฟ้าของไทรแอกควบคุมได้ง่ายโดยให้กำลังงานเพียงเล็กน้อยเข้าทางขั้วเกตเท่านั้น
2. ไม่มีการกระทบกระเทือนของหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะเหมือนสวิตช์ธรรมดาเพราะไทรแอกอาศัยหลักการนำกระแสของสารกึ่งตัวนำ
3. จังหวะการเปิดปิดวงจรของไทรแอกเร็วกว่าสวิตช์ธรรมดาหลายเท่าจึงทำให้สามารถควบคุมวงจรได้ด้วย หลักการของการสวิตช์ซึ่งที่สวิตช์ธรรมดาทำไม่ได้

## 4.2 โครงสร้างของไตรแอก

โครงสร้างของไตรแอกประกอบด้วยรอยต่อสามรอยต่อ เช่นเดียวกับเอสซีอาร์แต่มีลักษณะทางโครงสร้างบางอย่างที่แตกต่างกัน เอสซีอาร์คือส่วนของขาเกทจะเป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ต่ออยู่โดยมีบางส่วนของสารกึ่งตัวนำร่วมกับขา  $A_1$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2

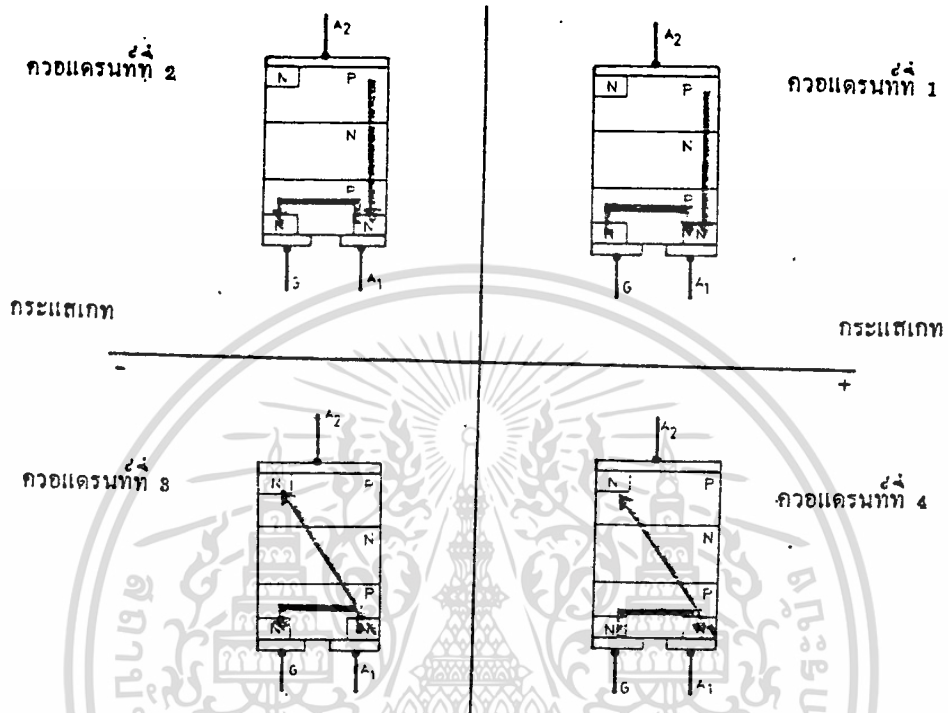


รูปที่ 4.2 โครงสร้างของไตรแอก

ถ้าพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของไตรแอกเมื่อเปรียบเทียบกับเอสซีอาร์แล้ว จะเห็นว่ามีส่วนที่แตกต่างกันอยู่โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของสารกึ่งตัวนำทางด้านปลายที่จะต่อกับขั้ว  $A_2$ ,  $A_1$  หรือเกท ดังตัวอย่างเช่นที่ขั้ว  $A_2$  ส่วนของขา  $A_2$  จะสัมผัสกับเนื้อสารทั้งส่วนของ P และ N โดยส่วนของ N จะยังแบ่งอยู่ในส่วนของ P เช่นเดียวกับกับขา  $A_1$  และขาเกทก็ต่อสัมผัสกับส่วนของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิด P และชนิด N ที่ฝังอยู่ในส่วนของเนื้อสาร P การที่เราต้องทำเช่นนี้ก็เพื่อให้ไตรแอกทำงานได้ทั้งทางด้านบวกและลบของไฟสลับ เพราะจะทำให้ลักษณะของไตรแอกเสมือนกับเป็นเอสซีอาร์สองตัวหันหัวขั้วขงละตัวและจะสามารถทริกการทำงานด้วยกระแสบวกหรือลบก็ได้

### 4.3 การทำงานของไทรแอก

แรงดันไฟที่ขั้ว  $A_2$  เทียบกับ  $A_1$



รูปที่ 4.3 แสดงการทำงานของไทรแอกในแต่ละควอดแดรนต์

การทำงานของไทรแอกพอธิบายกับเอลซีอาร์ได้ดังนี้ โดยปกติไทรแอกจะต่างจากเอลซีอาร์ตรงที่สามารถทริกได้ทั้งกระแสลบและกระแสบวก และนอกจากนี้แล้วแรงดันระหว่าง  $A_1 - A_2$  จะให้ลัษณ์อย่างไรมันก็ยังังคงทำงานได้ ดังนั้นจึงแบ่งการทำงานของไทรแอกออกเป็น 4 ควอดแดรนต์ คือ ในควอดแดรนต์ที่ 1 เราให้แรงดันที่ขา  $A_2$  เป็นบวกและกระแสก็จะเป็นบวก ส่วนในควอดแดรนต์ที่ 2 ให้แรงดันที่ขา  $A_2$  เป็นบวกและกระแสเป็นลบหรือไหลออกจากเกต ในควอดแดรนต์ที่ 3 จะใช้กระแสเป็นลบเช่นเคยแต่จะแรงดัน  $A_2$  เป็นลบแทน ส่วนในควอดแดรนต์ที่ 4 จะให้กระแสเป็นบวกและแรงดัน  $A_2$  เป็นลบ ซึ่งถ้าเขียนในลักษณะแกนของกระแสเกตเป็นแกน X และแรงดัน  $A_2$  เป็นแกน Y เราจะได้รูปการทำงานของไทรแอกในสี่ควอดแดรนต์ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ในควอดแดรนต์ที่ 1 ตัวไทรแอกจะให้การทริกทำงานเหมือนกับเอลซีอาร์ทุกอย่างการทริกไทรแอกเกิดขึ้นจากการป้อนกระแสเกตเข้าไปยังขั้วสารกึ่งตัวนำ P ทำให้เกิดการนำกระแสระหว่างรอยต่อ P-N ตรงส่วนของ  $T_1$  เป็นผลทำให้กระแสได้โดยตรงจากขั้ว  $A_2$  มาอยู่ที่  $A_1$  โดยผ่านเนื้อสาร PNP ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าส่วนของเนื้อสาร N ที่อยู่ทางเอกซาร์นี้เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

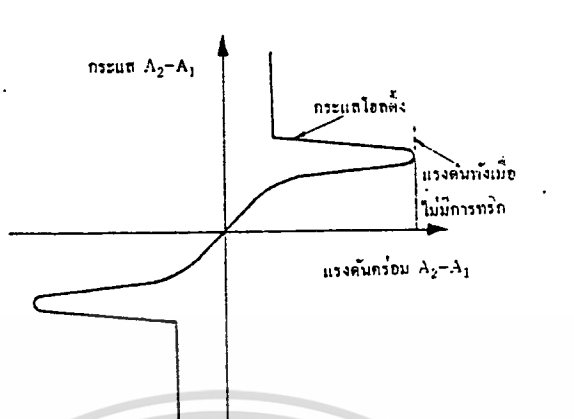
ด้าน  $A_2$  และเกตจะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อการทำงานใด ๆ ในควอดแดรนต์นี้ ดังนั้นถ้าคิดว่าไม่มีเนื้อสาร N ที่กล่าวถึงนี้แล้วไตรแอดก็คือเอสซีอาร์ตีๆ นี้เอง

ในควอดแดรนต์ที่ 2 เรายังคงให้แรงดันที่  $A_2$  เป็นบวกอยู่เช่นเคยแต่ให้กระแสเกตมีค่าเป็นลบ การไหลของกระแสเกตจะไหลจากขา  $A_1$  ผ่านเนื้อสาร P เข้าเนื้อสาร N กับมายังขาเกตซึ่งจะผ่านรอยต่อ PN หนึ่งรอยต่อ การผ่านรอยต่อนี้จะผ่านไปโดยง่ายเพราะเสมือนกับการไบแอสตรงให้กับหัวต่อนี้ การที่ทำให้มีกระแสไหลเนื่องจากกระแสเกตนี้จะทริกให้ไตรแอดทำงานโดยนำกระแสเกิดการไหลของกระแสจาก  $A_2$  มายัง  $A_1$  โดยผ่านเนื้อสาร PNPN ตามลำดับดังรูปบนซ้ายของรูปที่ 4.3 ซึ่งก็มีลักษณะการทำงานเสมือนเอสซีอาร์เช่นกัน

ในควอดแดรนต์ที่ 3 นี้ เป็นการให้กระแสเกตเป็นลบและแรงดันที่ขั้ว  $A_2$  เป็นลบเช่นกัน ส่วนของกระแสเกตจะไหลได้โดยผ่านหัวต่อ PN ซึ่งจะอยู่ในลักษณะไบแอสตรงและจะทริกการทำงานของไตรแอด ให้นำกระแสโดยกระแสจะไหลจากขา  $A_1$  ไปยัง  $A_2$  โดยผ่านเนื้อสาร PNPN ตามลำดับเช่นกัน จะเห็นได้ว่าการนำกระแสในควอดแดรนต์นี้ทำให้ไตรแอดนำกระแสได้อีกทางซึ่งเป็นผลให้ไตรแอดนำกระแสได้ทั้งสองทาง

ส่วนในควอดแดรนต์ที่ 4 จะเป็นการทริกด้วยกระแสเกตที่เป็นบวก คือกระแสเกตจะไหลจากขาเกตเข้ายังเนื้อสาร P ผ่านหัวต่อ PN ซึ่งต่อในลักษณะไบแอสตรงกับมายังขา  $A_1$  เมื่อทริกการทำงานของไตรแอด ไตรแอดก็จะนำกระแสโดยมีการไหลของกระแสผ่านสารกึ่งตัวนำ PNPN เช่นเคยโดยมีทิศทางลูกศรการไหลของกระแสดังรูปที่ 4.3 ทางมุมของด้านล่าง

#### 4.4 ลักษณะสมบัติของไทรแอก



รูปที่ 4.4 ลักษณะสมบัติของไทรแอก

จากหลักการการทำงานที่ได้กล่าวถึงไปแล้วจะเห็นได้ว่าไทรแอกนำกระแสระหว่าง  $A_2$  และ  $A_1$  ได้สองทางโดยทางการทริกให้ไทรแอกทำงานเป็นไปได้ทั้งกระแสที่เป็นบวกและกระแสที่ลบลักษณะสมบัติของไทรแอกแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4

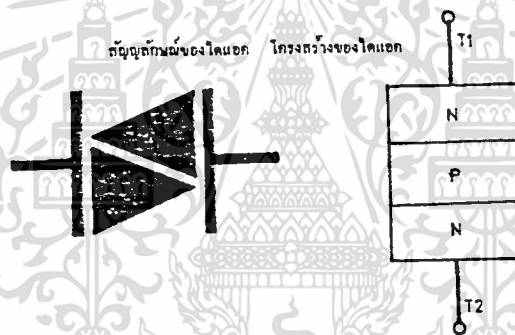
จากกราฟลักษณะสมบัติของไทรแอกที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลระหว่าง  $A_2-A_1$  ที่ให้ได้ทั้งบวกและลบกับแรงดันคร่อมตัวมัน ในขณะที่ให้แรงดันคร่อม  $A_2-A_1$  มีค่าเป็นบวกเทียบกับ  $A_1$  และถ้ายังไม่มีการทริกแล้ว จะมีค่าแรงดันระหว่าง  $A_2-A_1$  ค่าๆ หนึ่งที่ทำให้มันนำกระแสเองได้แรงดันนี้คือแรงดันพัง (breakover voltage) เช่นเดียวกับ SCR แต่ถ้าให้แรงดัน  $A_2-A_1$  นี้มีค่าน้อยกว่าแรงดันพัง แล้วการทำงานทริกกระแสเกตไม่ว่าจะเป็นกระแสเกตที่มีค่าเป็นบวกหรือลบก็ตามไทรแอกจะนำกระแสทันทีที่กราฟความสัมพันธ์และข้อจำกัดต่าง ๆ จะเหมือนกับของ SCR ในทำนองเดียวกันถ้าให้แรงดันที่  $A_1$  มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับ  $A_2$  ส่วนของกราฟคือแกน X ทางด้านลบถ้าเพิ่มแรงดันนี้มีค่ามากขึ้นจนถึงค่าแรงดันพังก็จะทำให้ไทรแอกนำกระแสเองได้ และถ้าหากว่าไม่มีการจำกัดกระแสในตัวไทรแอกแล้วไทรแอกก็จะเกิดการเสียหายได้ ครั้นถ้าแรงดัน  $A_2-A_1$  นี้มีค่าน้อยกว่าแรงดันพังแล้วทำการทริกด้วยกระแสเกตซึ่งอาจจะ เป็นกระแสบวกหรือลบก็ได้จะทำให้ไทรแอกนำกระแสทั้งที่ส่วนของกราฟลักษณะสมบัติจะแสดงได้ดังส่วนข้างล่างเพราะกระแสจะไหลจาก  $A_1$  ไปยัง  $A_2$  นั่นเอง

ในขณะที่ไทรแอกนำกระแสและเราลดค่ากระแสจนถึงภาวะสุดท้ายที่ยังคงทำให้ไทรแอกนำกระแสได้ค่ากระแสสุดท้ายนี้เรียกว่ากระแสโฮลดิ้ง (holding current) และทำนองเดียวกันถ้าไทรแอกยังไม่นำกระแสมันจะมีกระแสรั่วไหล (leakage current) เกิดขึ้นค่ากระแสนี้มีค่าน้อยมาก

เนื่องจากไดโอดสามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทั้งสองทาง และสำหรับกระแสไหลกลับ (เป็นคลื่นรูปซายน์) จะมีช่วงเวลาหนึ่งที่กระแสตกต่ำกว่ากระแสโวลติจ ดังนั้นจึงทำให้ไดโอดหยุดนำกระแสและจะรอการทริกใหม่อีกครั้งและถ้าหากเกิดการทริกในขณะที่ครึ่งลบของสัญญาณไหลกลับมันก็จะนำกระแสได้อีก เช่น เคาะและมันจะหยุดนำ เมื่อค่ากระแสลดลงต่ำกว่ากระแสโวลติจ

#### 4.5 ไดโอด

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่มีสองขั้วแต่ประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำสามชั้น จุดมุ่งหมายของการสร้างตัวไดโอดขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวทริกให้กับไดโอด หรือเป็นตัวป้องกันไม่ให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวไดโอดที่เกทมีค่าสูงจนถึงกับการเสียหาย

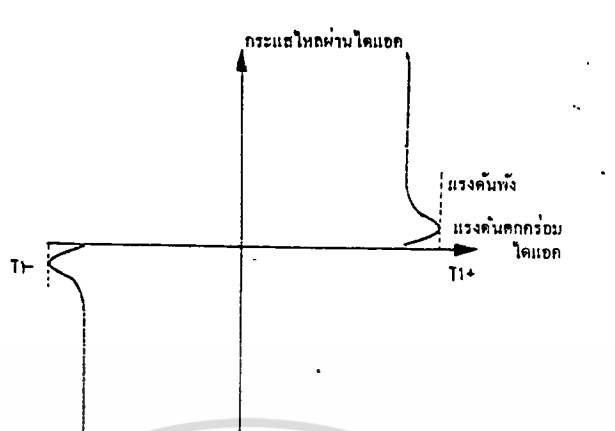


รูปที่ 4.5 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอด

ลักษณะโครงสร้างของไดโอดแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.5

ลักษณะการทำงานของไดโอดแตกต่างจากอุปกรณ์อย่างอื่นคือ อาศัยช่วงแรงดันพังเป็นส่วนของการทำงาน เมื่อป้อนแรงดันบวกเข้าที่ขั้ว  $T_1$  และลบเข้าที่ขั้ว  $T_2$  รอยต่อ N และ P ตรงบริเวณขั้ว  $T_1$  จะอยู่ในสถานะไบแอสกลับ ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลผ่านจาก  $T_1$  ไปยัง  $T_2$  ได้ แต่ครั้นเพิ่มแรงดันระหว่าง  $T_1$  และ  $T_2$  ขึ้นไปอีกจนถึงค่าแรงดันค่าหนึ่งจะทำให้กระแสไหลทะลุข้ามรอยต่อ N-P มาได้ ส่วนรอยต่อ P-N ตรง  $T_2$  นั้นอยู่ในสภาวะไบแอสตรงอยู่แล้ว กระแสที่ไหลผ่านไดโอดนี้เสมือนกับกระแสที่เกิดจากการพังโนตัวไดโอดนั่นเอง ถ้าหากว่าไม่มีการจำกัดกระแสแล้วไดโอดก็จะพังได้ ในทำนองเดียวกันถ้าให้แรงดันบวกเข้าที่ขั้ว  $T_2$  และแรงดันลบเข้าที่ขั้ว  $T_1$  ลักษณะการทำงานของไดโอดก็เช่นเดียวกันที่กล่าวมาแล้ว ถ้าหากว่าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะเขียนเป็นกราฟได้ดังรูป 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟลักษณะสมบัติของไดโอด

รูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อไดโอดนำกระแสแรงดันตกคร่อมตัวไดโอดจะลดค่าลงอีกเล็กน้อยโดยปกติจะลดลงจากค่าแรงดันคั่นประมาณ 5 โวลท์

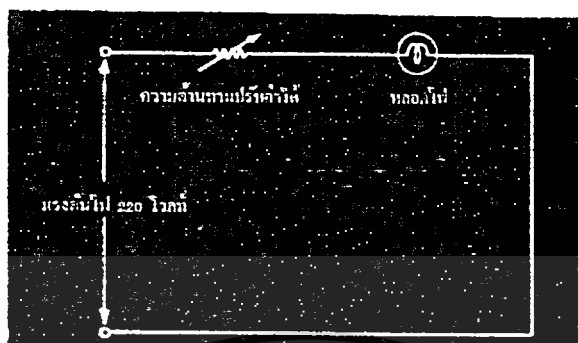
จากลักษณะสมบัติของไดโอดจึงเห็นได้ว่าไดโอดเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวป้องกันกระแสทริกให้กับอุปกรณ์ไทรแอด เพราะให้กระแสได้ทั้งสองด้านและให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวมันเองสูงพอควร

#### 4.6 การใช้ไทรแอดควบคุมเฟสของแรงดันไฟสลับ เพื่อใช้ในวงจรควบคุมกำลังงาน

แนวความคิดเริ่มต้น วงจรควบคุมกำลังงานหรือวงจรหรี่ไฟ มีกำเนิดมาจากความไม่พอของมนุษย์นี้เอง กล่าวคือเมื่อโทมัน เอลวา เอติลัน ประดิษฐ์หลอดไฟฟ้าขึ้นมาแล้วคนก็เลียนแบบกันไปทำออกมาเป็นแบบต่าง ๆ ขนาดกำลังความสว่างต่าง ๆ กัน 100 วัตต์บ้าง 300 วัตต์บ้าง หรือขนาด 1,000 วัตต์บ้าง เมื่อติดตั้งหลอดไฟแล้วก็ได้ความสว่างคงที่ ถ้าหากอยากให้ความสว่างน้อยลง เพราะแสงจ้าตาหรือเพราะอยากให้เกิด "บรรยากาศ" ก็ตาม เลยเกิดความอยากได้เครื่องมืออะไรก็ได้มาลดแสงสว่างนี้ลง ตามกฎของโอห์ม แรงดันไฟฟ้า = กระแสไฟฟ้า x ความต้านทาน ฉะนั้นถ้าเอาความต้านทานมาต่ออนุกรมกับหลอดไฟ กระแสในวงจรจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่เหลือก็จะไปจ่ายให้หลอดไฟ หลอดไฟก็จะสว่างน้อยลงยิ่งถ้าความต้านทานตัวนี้ปรับค่าได้ด้วยแล้ว หลอดไฟก็จะสว่างมาน้อย เปลี่ยนค่าความต้านทานดูผิวเผินวงจรเบื้องต้นแบบนี้ก็ทำได้ อยู่หรือ แต่พอเรามองให้ลึกลงไปอีกสักนิดจะเห็นว่าวงจรแบบนี้มีประสิทธิภาน้อยมาก สมมติว่าเราต้องการให้ความสว่างของหลอดไฟขนาด 1,000 วัตต์ ลดลงมาเหลือเพียง 250 วัตต์ เราจะต้องใช้ความต้านทานที่มีค่าความต้านทานเท่ากับหลอดไฟ 3 หลอดมาต่ออนุกรมเข้าไป และความร้อนที่สูญเสียในความต้านทานตัวนี้ก็จะมีค่า  $250 \times 3 = 750$  วัตต์

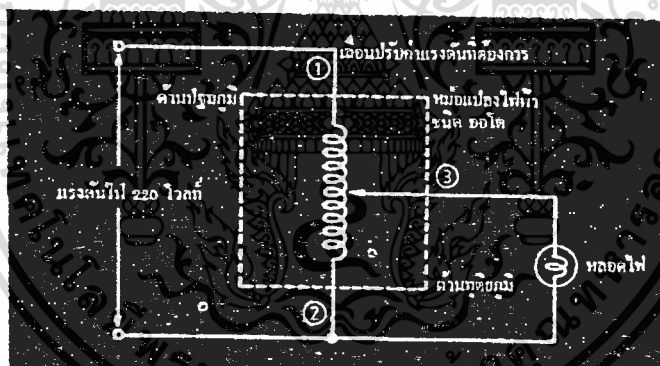
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบประกอบชิ้นงานด้านนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย (กรุณาเทียบระดับความร้อนสูญเสีย



รูปที่ 4.7 วงจรไฟฟ้าแบบเบื้องต้น ที่ใช้ตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้ต่ออนุกรมกับหลอดไฟ

เทียบเท่ากับหัวแร้งขนาด 40 วัตต์ แล้วจะรู้สึกกว่า 750 วัตต์นี้มากพอตุ๊กเดียวจะเห็นว่าวิธีการใช้ตัวต้านทานเป็นวิธีที่ใช้ไม่ได้ จึงหันมาใช้วงจรจำพวกหม้อแปลง



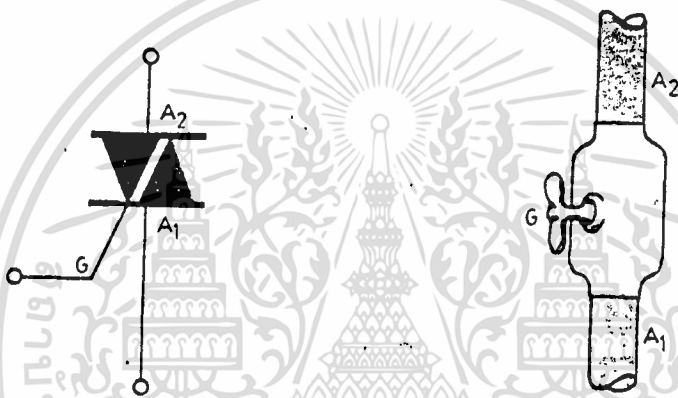
รูปที่ 4.8 วงจรไฟฟ้าแบบใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่เรียกว่าวาริแอด

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในจุดประสงค์นี้เป็น แบบวาริแอด (variac) ซึ่งก็คือออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Autotransformer) ที่สามารถเลื่อนแทปได้ สายทั้งหมดจะมีด้วยกัน 3 เส้น สายเส้นที่ 1 จะเป็นเส้นไฟเข้า เส้นที่ 2 จะเป็นเส้นร่วม เส้นที่ 3 จะเป็นเส้นไฟออก เส้นที่ 3 นี้เองที่จะเลือกเปลี่ยนค่าไปมาบนขดลวดของหม้อแปลง ทำให้แรงดันที่สาย 3 ขึ้นลงตามไปด้วยแม้ว่าวงจรแบบนี้จะดีกว่าแบบใช้ตัวต้านทานโดยมีกำลังงานสูญเสียน้อยกว่า (มีกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก) กินเนื้อที่น้อยกว่า แต่ก็ยังมีข้อเสียตรงที่ว่าฉนวนฉนวนระหว่างสาย 3 กับขดลวดที่เกิดจากสาย 1 และ 2 อาจสึกกร่อนเนื่องจากการเลื่อนไปมา และจากการอาร์ค ขนาดของวาริแอดก็ยังไม่กะทัดรัดเคลื่อนย้ายไม่สะดวกอยู่นั่นเอง ต่อมาถึงการใช้สาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งตัวนำ ซึ่งผลออกมาจะมีข้อเหนือกว่าหลายประการ แม้ว่าลักษณะรูปคลื่นที่ได้จะไม่ขายน้แท้ ๆ ก็ตาม

ทฤษฎีการทำงาน วงจรหรือไฟแบบใช้ไตรแอดนี้ เป็นแบบที่ง่ายที่สุดของวงจรที่ใช้สารกึ่งตัวนำ ก่อนที่จะไปถึงวงจรก็ต้องมาศึกษาการทำงานของไตรแอดและไดแอดเสียก่อน หน้าที่ของไตรแอดเปรียบเทียบกับแล้วก็เหมือนกับลิ้นปิดเปิดให้กับกระแสไฟฟ้าไปมา สำหรับลิ้นหรือวาล์วปิดเปิดน้ำจะให้ น้ำไหลจากด้าน  $A_2$  ไปยัง  $A_1$  เมื่อมีคนมาเปิดลิ้นปิดเปิด  $G$  และจะไม่ให้น้ำไหลเมื่อปิดลิ้น  $G$  ส่วนไตรแอดนั้นจะทำหน้าที่ให้กระแสจาก  $A_2$  ไปยัง  $A_1$  เมื่อมีแรงดันระหว่างเกต  $G$  และ  $A_1$  มากพอ และเราจะหยุดการทำงานของไตรแอดได้ก็ด้วยการลดกระแสที่ผ่านตัวไตรแอดให้น้อยลงกว่ากระแสโฮลดิ้ง (holding current)

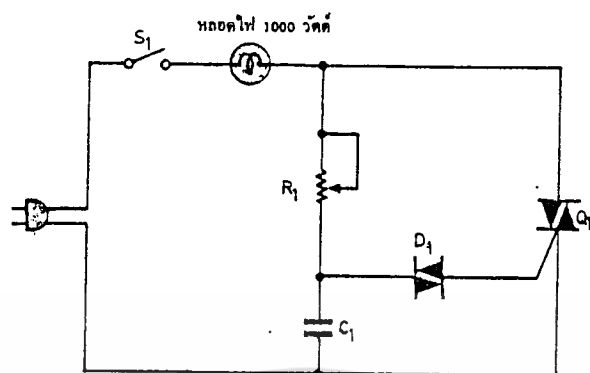


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการทำงานของไตรแอดกับวาล์วปิดเปิดน้ำ

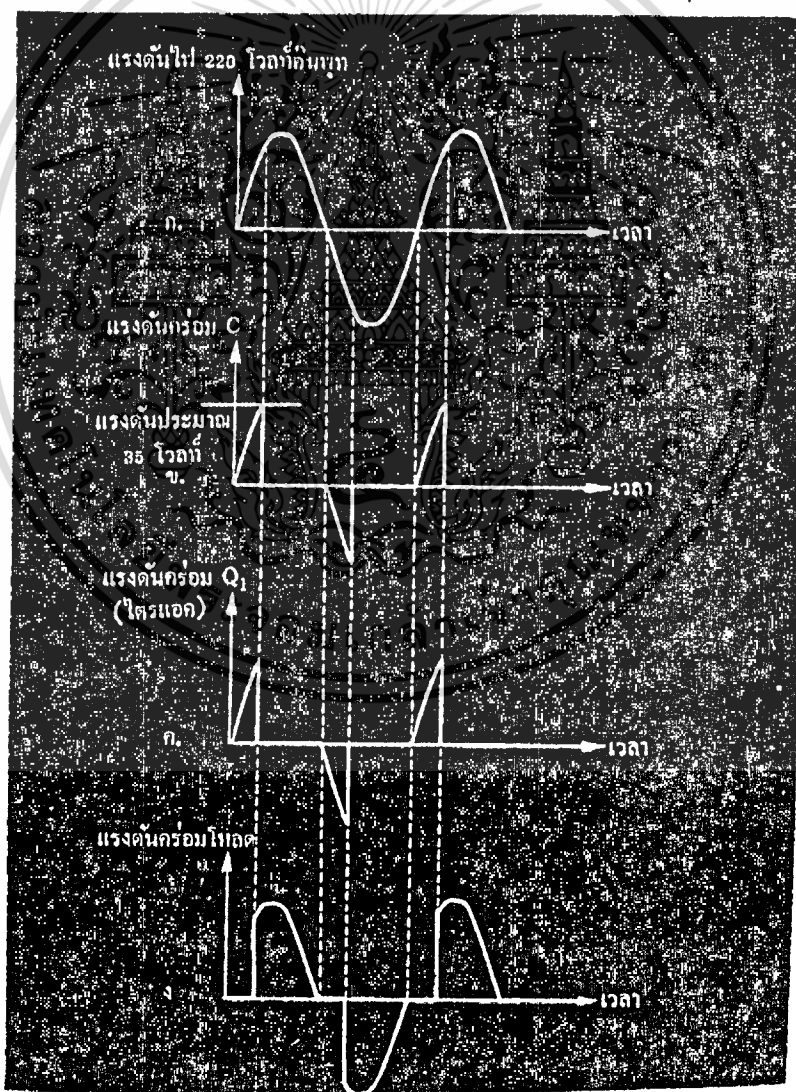
อุปกรณ์อีกตัวที่สำคัญคือ ไดแอดที่ต่ออนุกรมอยู่กับเกตของไตรแอด ถ้าแรงดันคร่อม ไดแอดมีค่าน้อยๆ ไดแอดจะทำหน้าที่เหมือนวงจรเปิด เมื่อแรงดันคร่อมสูงพอถึงแรงดันพัง (breakdown voltage) ของตัวมัน ไดแอดจะยอมให้กระแสวิ่งผ่านไปหรือกลับได้

เมื่อพอจะรู้จักการทำงานของอุปกรณ์ตัวสำคัญ ๆ แล้ว หันมาดูวงจรแบบง่ายที่สุด ดังรูปที่ 4.10  $C$  จะต่ออนุกรมกัน และมีไดแอดต่อเชื่อมเข้ากับไตรแอด แรงดันไฟจะเป็น ดังรูปที่ 4.11 คือรูปขายน้ธรรมดา แรงดันคร่อม จะเป็นดังรูปที่ 4.11 แรงดันจากปลั๊กไฟ จะไหลผ่านหลอดไฟเข้าไปประจุไฟให้กับ  $C_1$  แรงดันของ  $C_1$  นี้จะค่อยๆ สูงขึ้นๆ จนมีค่า ประมาณ 35 โวลท์ (เท่ากับแรงดันพังของไดแอด) ไดแอดจะเปลี่ยนสถานะโดยลดความต้านทานภายในตัวของมันลง ทำให้ประจุที่สะสมอยู่ใน  $C_1$  สามารถคายออกผ่าน  $D_1$  เข้า เกรทของไตรแอดลงมา  $A_1$  เป็นอันครบวงจร เวลาที่คายประจุนี้เร็วมากแรงดันคร่อม  $C_1$  จึงลดลงอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 วงจรหรือไฟที่ใช้ไดรแอคแบบง่ายที่สุด



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นที่จุดต่างๆ ของวงจรในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

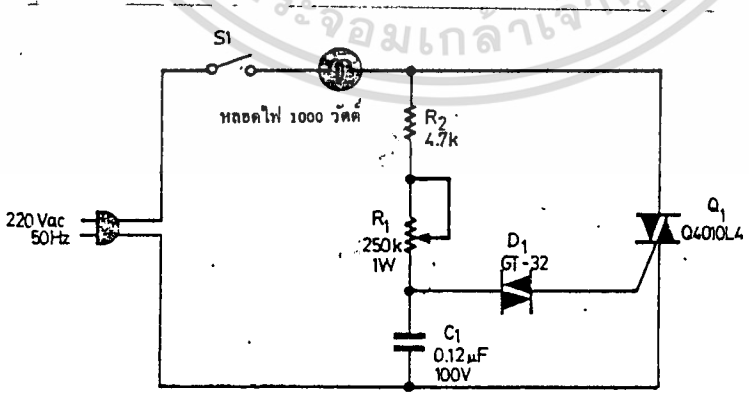
ในขณะที่  $C_1$  คายประจุนั่นเอง ไตรแอกจะถูกกระตุ้นให้เริ่มทำงาน แรงดันคร่อม ไตรแอกจาก  $A_2$  ถึง  $A_1$  จะตกลงเพราะไตรแอกทำหน้าที่เหมือนลัดวงจรให้กระแสไหลผ่าน รูปคลื่นที่คร่อมไตรแอกจะเป็นดังรูปที่ 4.11 ค รูปคลื่นที่ควรสนใจมากที่สุดคือรูปคลื่นคร่อม หลอดไฟหรือหลอดนั้นเอง ตามรูปที่ 4.11 ง เป็นรูปคลื่นที่ว่านี้ ซึ่งได้จากการเอาแรงดัน เข้าลบบด้วยแรงดันที่คร่อมไตรแอก

ตามตัวอย่างนี้สมมติให้ไตรแอกถูกจุดชนวนเมื่อต้น ๆ ช่วงของรูปคลื่น ถ้าเรา ต้องการให้ไตรแอกทำงานช้าลง เราทำได้โดยการเพิ่มค่า  $R_1$  เพื่อให้  $C_1$  ถูกประจุถึงแรง ดันพังช้าลง ฉะนั้นการปรับค่าความสว่างของหลอดก็ทำได้โดยการปรับ  $R_1$  วงจรแบบนี้มี ข้อเสียคือ

1. ไตรแอกทำงานในทันทีทันใด และผ่านกระแสจำนวนมากไปยังที่หลอดทันที ทำให้รูปคลื่นที่ได้ไม่เป็นรูปซายน์ ซึ่งจะก่อให้เกิดอาร์โมนิคความถี่สูง ๆ หรือกวนวิทยุเอเอ็ม ได้

2. เมื่อเราปรับค่า  $R_1$  ให้มากพอที่จะทำให้หลอดไฟหรือจนวนจะดับ พอไฟเข้า กระเพื่อมขึ้นๆ ลงๆ หลอดจะดับไปเลย และไม่สว่างขึ้นมาอีกแม้ไฟจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจน เท่าเดิมก็ตาม หรือปรากฏการณ์ที่เราเพิ่มค่า  $R_1$  มากจนหลอดไฟหรือดับไป แต่พอเราเริ่มลด ค่า  $R_1$  ลงหลอดจะติดต้องหมุนมาเป็นระยะพอสมควรหลอดจึงจะสว่าง และจะสว่างมากกว่า ที่ควรจะเป็นด้วย ผลอันนี้เรียกว่าเกิด ฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

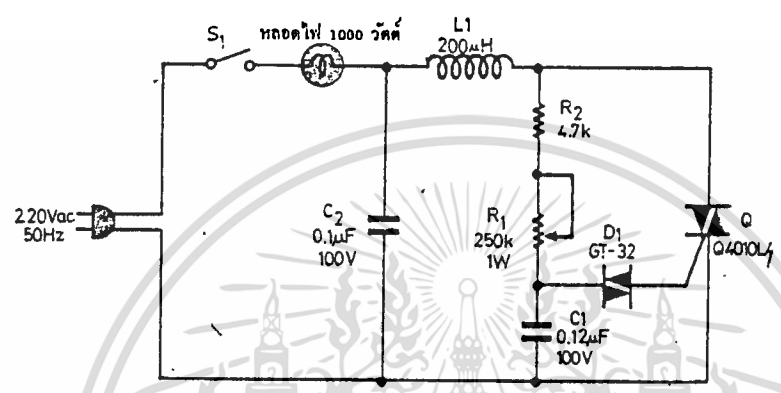
ฉะนั้นนักคิดจึงตัดแปลงวงจรพื้นฐานนี้ไปดังนี้ คือ รูปที่ 7 จะต่อเติมค่า  $R_2$  เข้า ไปอนุกรมกับ  $R_1$  เพื่อเป็นตัวจำกัดกระแส ค่า  $R_2$  ที่ใส่เข้ามาต้องมีค่าน้อยพอที่จะให้ความ สว่างได้สูงสุดในขณะที่ปรับ  $R_1$  มาต่ำสุด



รูปที่ 4.12 วงจรหรือไฟที่เพิ่มความต้านทาน  $R_2$  เข้ามาจำกัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 จะเพิ่มวงจร LC ประกอบด้วยไอ้ด  $L_1$  และคาปาซิเตอร์  $C_2$  ไอ้ด  $L_1$  มีค่าประมาณ  $200\mu\text{H}$  และต่ออนุกรมกับหลอดไฟ ตัว  $L_1$  นี้มีคุณสมบัติที่จะหน่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าให้ช้าลง เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการกระชากของกระแสในวงจรมากเกินไป ลวดที่ใช้พันเป็นไอ้ด ต้องสามารถทนกระแสที่ไหลผ่านหลอดได้ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะทำหน้าที่กันไม่ให้ความถี่ของอาร์โมนิคสูง ๆ ออกไปกวนระบบไฟภายนอก



รูปที่ 4.13 วงจรหรีไฟที่เพิ่มชุดป้องกันสัญญาณรบกวนเข้าไป

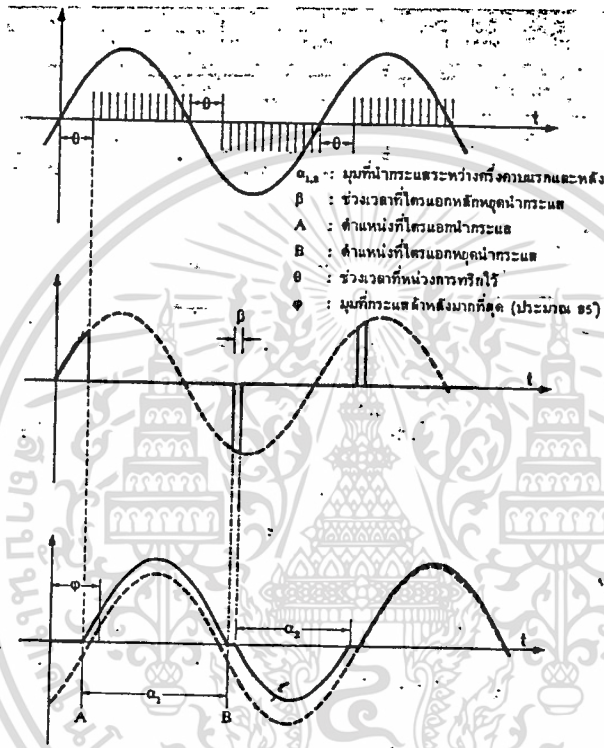
การติดตั้งไทรแอกต้องยึดหลักไว้ดังนี้คือ วัสดุที่ยึดไทรแอกต้องสามารถนำความร้อนได้ดีและพอเพียง แม้ขณะที่ไทรแอกทำงานเต็มกำลัง ถ้าเป็นไปได้ตัวไทรแอกและวัสดุสำหรับยึด (มักเป็นแผ่นระบายความร้อน) ควรจะแยกจากกันทางไฟฟ้า (isolate) การยึดต้องแน่นหนาแข็งแรง

การเลือกขนาดของไทรแอกจะต้องคำนึงถึง

1. แรงดันใช้งาน-แรงดันพ่วงของไทรแอก ต้องมากกว่าแรงดันสูงสุดของไฟที่ป้อนเข้ามาได้
2. กระแสใช้งาน-กระแสที่ไหลผ่านไทรแอกคิดแบบ RMS จะต้องสามารถผ่านตัวไทรแอกได้อย่างสบายถ้ามีแผ่นระบายความร้อนขนาดพอเพียง
3. กระแสสูงสุดที่ทนได้ - โหลดวงจรหรีไฟส่วนใหญ่จะเป็นหลอดไฟแบบไส้ซึ่งจะมีความต้านทานต่ำเมื่อหลอดยังไม่สว่าง ฉะนั้นขณะเริ่มเปิดวงจรหรีไฟกระแสที่กระชากในเวลาสั้น ๆ นี้จะมีค่ามากและอาจจะทำให้ไทรแอกเสียหายได้ ไทรแอกจึงต้องทนกระแสสูงสุดอันนี้ได้

#### 4.7 วงจรควบคุมกำลังไฟฟ้า (Phase Control)

เป็นวงจรทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ในวงจร Power Supply โดยการควบคุม มุมนำกระแสของไทรแอก ดังแสดงในรูปที่ 4.14



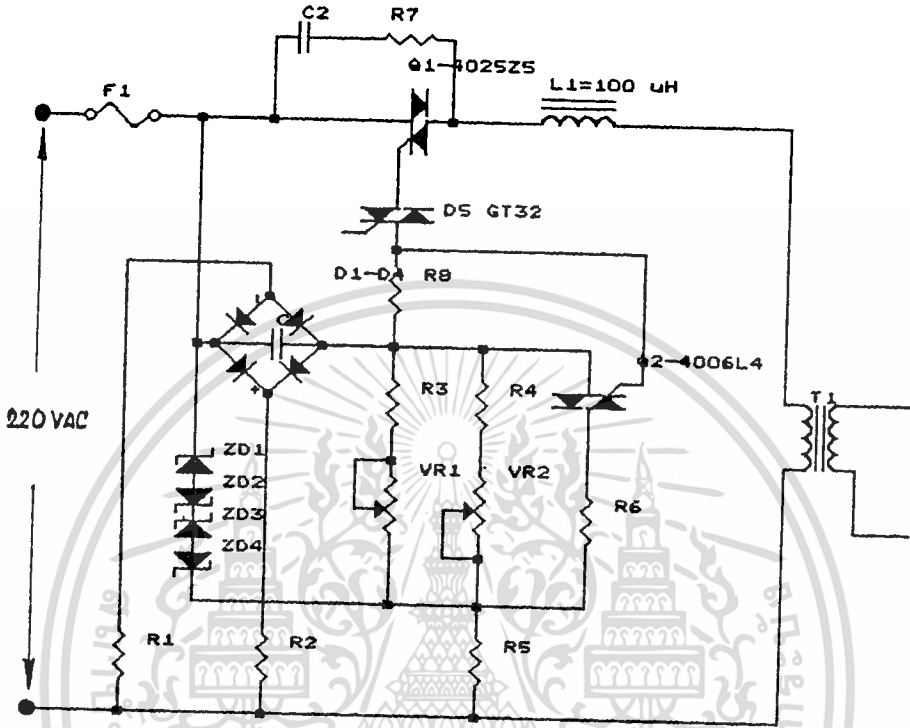
รูปที่ 4.14

รูปที่ 4.14 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสในไทรแอก รูป ก. เป็นแรงดันจากเมนไลน์ รูป ข เป็นแรงดันตกครอทไทรแอก จะเห็นว่ายอมให้กระแสไหลได้เฉพาะช่วงที่กระแสเริ่มจากศูนย์ในแต่ละครึ่งคาบ ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดจะไม่มีมุมแหลมเลย

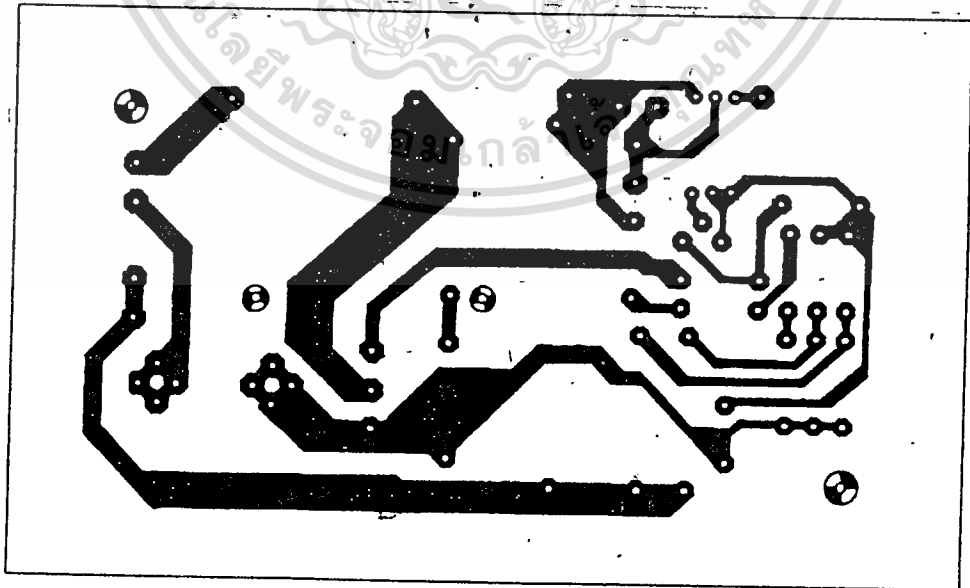
ไทรแอกจะทำงานตามช่วงเวลาที่ถูกกำหนดโดยมุมนำกระแส  $\alpha$  (conduction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle,  $\alpha$ ) โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ซึ่งกำลังไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมการนำกระแส =  $180^\circ$  และน้อยที่สุดเมื่อมุมการนำกระแส =  $0^\circ$  การที่มุม  $\alpha$  จะมีค่าเป็นเท่าใดนั้น โดยการปรับกระแสทริกเกตของไตรแอก ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงวงจรควบคุมกำลังไฟฟ้า (Phase control)



รูปที่ 4.16 แสดงลายทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทำงานของวงจร

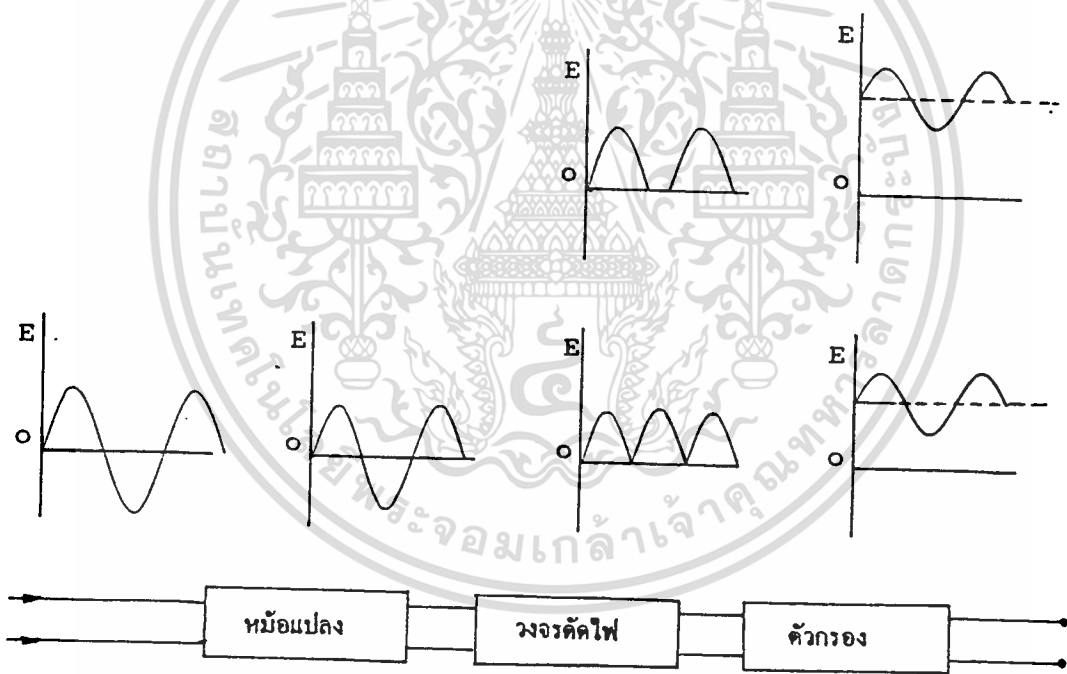
ไตรแอก  $Q_2$  เป็นชนิดความไวเกตสูง  $C_1$ ,  $R_5$  และ  $VR_2$  กำหนดมมทริกเกต และ  $VR_1$  ตั้งเอาไว้ที่มุมที่น้อยที่สุดที่ไตรแอก  $Q_1$  เริ่มนำกระแส  $VR_1$  ปรับไว้ที่ตำแหน่งที่โหลดทำงานได้น้อยที่สุดที่ต้องการ การปรับมุมที่เริ่มนำกระแสของไตรแอกนี้จะมีผลทั้งครั้งคาบของลูกคลื่น  $C_1$  ถูกประจุจาก 0 โวลต์ ขึ้นไปเรื่อย ๆ ไตรแอก  $D_5$  จะนำกระแสเมื่อ  $C_1$  ประจุถึงแรงดันพังทลายของ  $D_5$

พัลส์ลูกแรกถูกป้อนเข้าที่ขาเกตของไตรแอก  $Q_1$  และแรงดันกระชากใน  $R_5$  จะเป็นตัวทริก  $Q_1$  ให้นำกระแส เมื่อ  $Q_2$  นำกระแส ความต้านทานค่าหนึ่งซึ่งเกิดจาก  $R_4 + VR_2 // R_3 + VR_1$  จะประจักษ์กระแสให้  $C_1$  ในเวลาสั้น ๆ (เวลานี้เท่ากับ  $(R_5 + R_6)C_1$ ) หลังจากช่วงหน่วงนี้ไปแล้ว  $Q_2$  ก็จะนำกระแส เริ่มไซเคิลใหม่ พัลส์ที่ได้จาก  $Q_2$  นี้จะถูกนำไปทริกให้  $Q_1$  จนกระทั่งกระแสของ  $Q_1$  ลดลงจนถึงศูนย์  $Q_2$  ก็จะถูกทำให้หยุดนำกระแส จากนั้น  $C_1$  ก็จะถูกประจุโดยระหว่างนี้ครึ่งคาบหลังของลูกคลื่น  $C_1$  จะถูกประจุโดยผ่าน  $(R_4 + VR_2 // R_3 + VR_1)$

ซีเนอร์ไดโอด  $ZD_1 - Z_4$  ใช้ป้องกันแรงดันเกินในขณะเดียวกันใช้ทำให้แรงดันที่ใช้ทริกคองที่ด้วยไม่ว่าขณะนั้นจะเป็นคาบบวกหรือลบ ไดโอด  $D_1 - D_4$  และ  $R_1 R_2$  ใช้คาบประจุ  $C_1$  ในขณะคาบเวลาที่มุมเป็นศูนย์องศา หรือกระแสไหลดเป็นศูนย์  $R_7$  และ  $C_2$  เป็นแคมป์เบตเวีร์ค ป้องกันกระแสที่มียอดแหลม ๆ ที่จะหลุดเข้ามาในวงจร

วงจรจ่ายไฟตรง  
(DC. Power Supply)

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการทำงาน แม้ว่าเราอาจใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟได้ แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ วิธีการตัดไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับในการตัดไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับนั้น เรานิยมใช้ไดโอด (diode) และวงจรที่ทำหน้าที่ตัดไฟนี้เราเรียกว่า วงจรตัดไฟ (rectifier) ตามปกติไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงโดยหม้อแปลง (transformer) ให้มีแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ แล้วค่อยผ่านวงจรตัดไฟ จะได้กระแสไฟตรง กระแสไฟตรงที่ออกจากตัวตัดไฟจะอยู่ในรูปของพัลส์ (pulsating DC Current) จึงต้องผ่านวงจรกรอง (filter) เพื่อให้เรียบดังรูปที่ 5.1



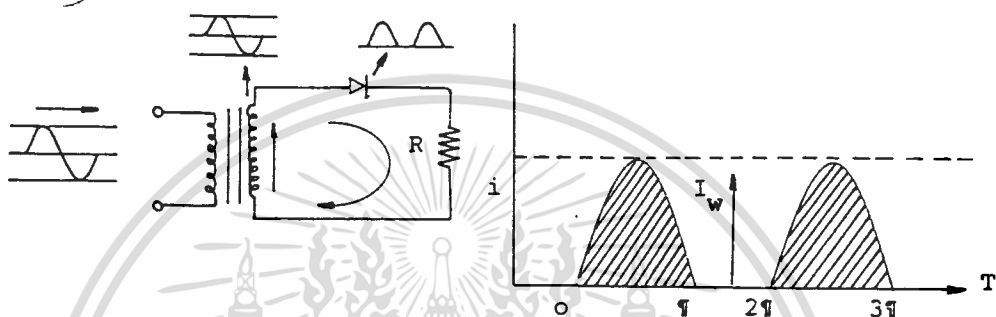
รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงการตัดไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขาออก

ในบทนี้ เราจะศึกษาการทำงานของไดโอดและคุณสมบัติของวงจรกรอง ซึ่งใช้ในการทำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการตัดไฟให้เรียบ

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ส่วนมากมักจะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส แต่หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรตัดไฟชนิดสามเฟส ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมก็เหมือนกับชนิดเฟสเดียว เพียงแต่ขยายจากหลักการทำงานของวงจรไฟชนิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟลเตี้ยเท่า่นั้น ส่วนวงจรกรองนั้นตามปกติไม่ค่อยนิยมใช้กับการตัดไฟที่มีกำลังสูงนักหรือถ้าใช้ก็เป็นวงจอย่างง่าย และไม่สลับซับซ้อนเท่าวงจรทำกระแสไฟตรงให้เรียบเพื่อจ่ายไฟให้แก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์

### 5.1 วงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น (Half-wave rectifier)



(a) วงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น

(b) พัลส์กระแสที่ไหลลัด R

รูปที่ 5.2

รูปที่ 5.2 เป็นวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่นอย่างง่าย แรงดันเข้าเป็นไฟสลับรูปไซน์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ (Secondary voltage) ของหม้อแปลงก็เป็นคลื่นรูปไซน์ด้วย แต่ไดโอดจะนำไฟเพียงครึ่งรอบของแรงดัน  $e$  ที่ทำให้อาโนดของไดโอดเป็นบวกเท่านั้น ในครึ่งรอบหลัง ไดโอดจะไม่นำไฟ ทำให้รูปคลื่นของกระแสเป็นครึ่งรูปไซน์ดังรูป 5.2(b)

สมมติว่าไดโอดที่ใช้ในวงจรนี้เป็นชนิดอุดมคติ (ideal) คือไม่มีความต้านทานไม่มีแรงดันตกคร่อมในขณะที่ถูกไบแอสตาม และให้ถือว่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) ของหม้อแปลงมีค่าต่ำมากจนไม่ต้องคำนึงถึงได้ถ้าแรงดันไฟฟ้าเข้าเป็น

$$e = E_m \sin \omega t$$

กระแสจะเป็น

$$i_b = \frac{E_m}{R} \sin \omega t \quad 0 < \omega t < \pi \quad (1)$$

$$i_b = 0 \quad \pi < \omega t < 2\pi \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลลัพธ์จะได้ผลลัพธ์กระแสไฟฟ้าครึ่งรูปไซน์ ดังรูป 5.2(b) จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นทั้งหมดอยู่เหนือแกนศูนย์ ดังนั้น จึงมีค่าเฉลี่ยไฟตรงอยู่ ส่วนที่กระแสไฟฟ้าแปรจากค่าเฉลี่ยนี้ก็คือ ส่วนที่เป็นไฟสลับนั่นเอง

เราใช้กระแสไฟตรง  $I_{dc}$  เป็นพารามิเตอร์ในการวัดความสามารถของวงจรตัดไฟ โดยคิดค่าเฉลี่ยของพื้นที่ใต้เส้นโค้งของกระแสไฟฟ้าใน 1 รอบ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_b d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{E_m \sin \omega t}{R} d(\omega t) + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} 0 d(\omega t) \\
 &= \frac{E_m}{\pi R} = \frac{I_m}{\pi} \quad (3)
 \end{aligned}$$

ค่าของกระแสไฟตรง  $I_{dc}$  นี้ สามารถอ่านได้จากแอมมิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับโหลด แรงดันไฟตกคร่อมโหลด คือ

$$\begin{aligned}
 E_{dc} &= I_{dc} R \\
 &= \frac{E_m}{\pi} \quad (4)
 \end{aligned}$$

ที่นี้เราอยากทราบว่า หม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่วงจรเท่าไร เพื่อนำไปคิดประสิทธิภาพของการตัดไฟ ก็จะสามารถคิดได้ดังนี้

$$P_{dc} = I_{rms}^2 R \quad (5)$$

เนื่องจากไดโอดเป็นชนิดอุดมคติ จึงไม่มีการสูญเสียกำลังค่าประสิทธิภาพ (Effective value) ของกระแส คือ  $I_{rms}$  ที่ผ่านโหลดหาได้จากค่านิยามต่อไปนี้

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_b^2 d(\omega t)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

จากรูปที่ 5.2 (ข) จะเห็นได้ว่า สัญญาณขาออกของวงจรตัดไฟเป็นรูปครึ่งไซน์ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์เป็นอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) จะมีทั้งแรงดันไฟตรงและฮาร์โมนิก ฮาร์โมนิกนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียในโหลดตัวต้านทาน และความถี่ต่ำสุดของฮาร์โมนิกจะเท่ากับความถี่ของแปลงจ่ายไฟสลับ จึงทำให้แยกฮาร์โมนิกออกจากแรงดันไฟตรงได้ยาก ฉะนั้นวงจรตัดไฟที่ดีจะต้องให้กระแสไฟตรงเรียบที่สุด และลดการสูญเสียที่เกิดจากฮาร์โมนิกในโหลดให้น้อยที่สุด

ประสิทธิภาพของการตัดไฟ คำนวณได้จาก

$$R = \frac{P_{dc \text{ output}}}{P_{ac \text{ input}}} \times 100\% \quad (7)$$

สำหรับวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น ประสิทธิภาพของการตัดไฟจะเท่ากับ

$$R = \frac{\left(\frac{I_m}{2}\right)^2 \cdot R \times 100\%}{\left(\frac{I_m}{2}\right)^2 \cdot R}$$

$$= \frac{4}{\pi^2} \times 100\% = 40.6\%$$

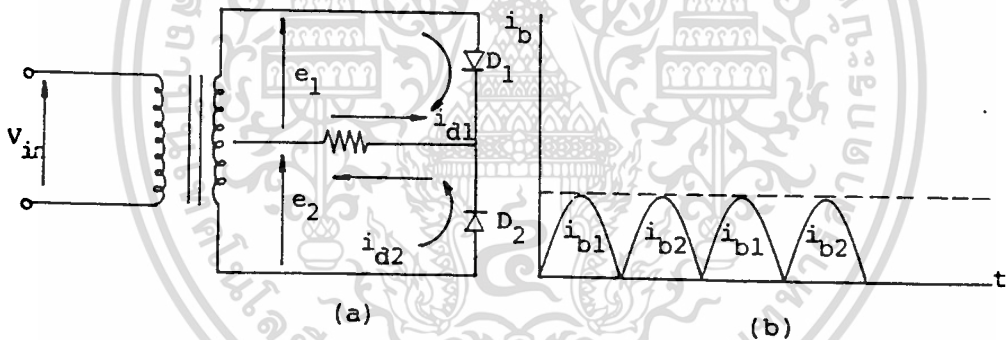
เราสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการตัดไฟนี้ให้ดีขึ้นได้โดยเพิ่มอิมพีแดนซ์ เพื่อกำจัดฮาร์โมนิก หรือเป็นทางผ่านของฮาร์โมนิกก่อนจะถึงโหลด ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกระแสไฟตรงที่เรียบ

ในการออกแบบวงจรตัดไฟ เราควรพิจารณาถึงเรื่องแรงดันกลับขั้วค่ายอด (peak inverse voltage = PIV) แรงดันกลับขั้วค่ายอดนี้คือแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเป็นลบมากที่สุดที่คร่อมไดโอดสำหรับวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น แรงดันกลับขั้วค่ายอด จะเกิดที่จุดยอดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรูปครึ่งไซน์ลบจะเท่ากับ  $E_m$  ฉะนั้นเวลาเลือกไดโอด จึงต้องเลือกไดโอดที่มีค่าพิกัดอัตรา (rating) มากกว่าแรงดันกลับขั้วค่ายอด  $E_m$  เพื่อป้องกันไม่ให้ไดโอดเกิดความเสียหายเนื่องจากการพังทลาย

## 5.2 วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่น (Full-wave rectifier)

เนื่องจากวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น จะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่โหลดเพียงครึ่งรอบของไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าเท่านั้น กำลังไฟตรงที่จ่ายให้แก่โหลดจึงต่ำ ถ้าเราสามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่โหลดทุก ๆ ครึ่งรอบของไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับก็จะเพิ่มมากขึ้น วงจรตัดไฟที่จ่ายไฟตรงให้โหลดได้ทุก ๆ ครึ่งรอบของไฟสลับนี้ เรียกว่า วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่น ซึ่งประกอบด้วยวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น 2 วงจรและโหลดรวม มีวงจรดังรูปที่ 5.3 (a)



รูปที่ 5.3 (a) วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีแท็ปกลาง  
(b) พัลส์กระแสในโหลด

วงจรนี้เรียกว่า วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีแท็ปกลาง (center-tapped) เพราะที่ใช้ขดลวดทุติยภูมิ 2 ขด ซึ่งมีจุดร่วมต่อกับโหลด ในครึ่งรอบแรกนั้น  $e_1$  เป็นบวก  $e_2$  ก็จะเป็นบวกด้วย และ  $e_2$  จะเป็นลบ  $D_1$  จะนำไฟฟ้าเพราะถูกไบแอสตาม ส่วน  $D_2$  จะไม่นำไฟฟ้าเพราะถูกไบแอสย้อน ในครึ่งรอบหลัง  $e_1$  จะเป็นลบ  $e_2$  เป็นบวก และ  $D_1$  ถูกไบแอสย้อนในขณะที่  $D_2$  ถูกไบแอสตาม กระแสจะไหลผ่านโหลดรวมในทิศทางเดียวกัน ดังรูป 5.3(b)

สมมติว่าไดโอดทั้งสองตัวเหมือนกัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{b1} = \frac{E_m}{R} \sin \omega t \quad (8)$$

$$i_{b2} = 0$$

$$i_{b1} = 0$$

$$i_{b2} = \frac{E_m}{R} \sin \omega t \quad (9)$$

แรงดันไฟฟ้า  $E_m$  นั้นเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นไซน์ที่คร่อมอยู่ครึ่งหนึ่งของขดลวด  
ทุกขดขมของหม้อแปลง เพราะ  $e = E_m \sin \omega t$  เหมือนเดิม

ไดโอดแต่ละตัวของวงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่น ทำงานเหมือนกับไดโอดของวงจรตัด  
ไฟแบบครึ่งคลื่นทุกประการจะแตกต่างกันบ้างก็เพียงแต่ กระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัวใน  
แต่ละครึ่งรอบจะไหลผ่านโหลดรวมเดียวกันเท่านั้น

วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่น มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ค่าเฉลี่ยหรือค่าไฟตรงของวงจรตัดไฟเต็มรูปคลื่นจึงมากกว่าค่าเฉลี่ยของ  
วงจรตัดไฟครึ่งคลื่น 2 เท่า กล่าวคือ

$$I_{dc} = \frac{2E_m}{\pi R} = \frac{2I_m}{\pi} \quad (10)$$

และแรงดันไฟตรงขาออกก็จะเท่ากับ  $E_{dc} = \frac{2E_m}{\pi}$  หรือ 2 เท่าของ

แรงดันไฟแบบครึ่งคลื่นด้วย

2. ค่า  $I_{rms}$  และกำลังไฟสลับขาเข้า (Input AC Power) ของไดโอด  
แต่ละตัวของวงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นนั้นจะเท่ากับของวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น ฉะนั้น กำลัง  
ไฟสลับทั้งหมดก็จะ เป็น 2 เท่าด้วย หรือ

$$P_{ac} = \frac{E_m^2}{2R} \quad (11)$$

3. ประสิทธิภาพของการตัดไฟ (efficiency of rectification) จะ  
เท่ากับ 81.2% หรือ 2 เท่าของวงจรตัดไฟครึ่งรูปคลื่น

4. ความถี่ต่ำสุดของอาร์โมนิกของวงจรมีเท่ากับ 2 เท่าของความถี่ของแหล่ง  
จ่ายไฟสลับ (AC source) จึงง่ายแก่การกรองอาร์โมนิกที่ไม่ต้องการออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ถ้าหากเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในวงนอกของรูป 5.3 (a) โดยให้  $D_1$  นำไฟฟ้า และ  $D_2$  ไม่นำไฟฟ้าจะได้

$$E_{b_1} - e - e = 0$$

$$\therefore e_{b_1} = 2e = 2E_m \sin \omega t \quad (12)$$

ฉะนั้น พึงสังเกตว่า ไดโอดตัวที่ไม่ทำงาน (off) ในวงจรรูป 5.3(a) จะต้องสามารถทนแรงดันกลับขั้ว เท่ากับแรงดันสูงสุดที่คร่อมขดลวดทุติยภูมิทั้ง 2 ครั้ง

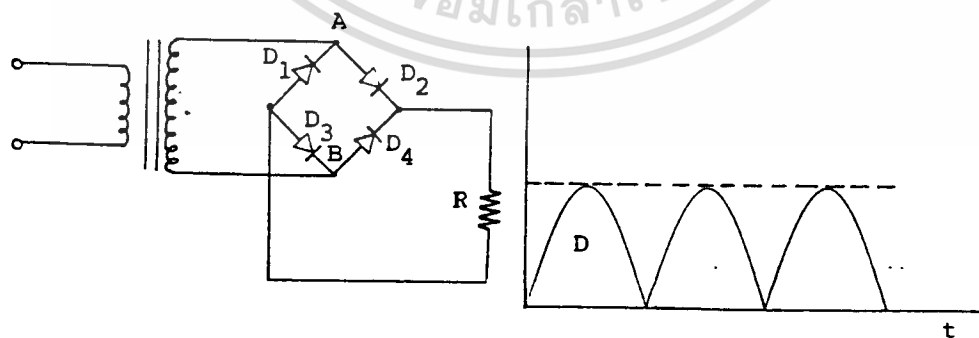
$$PIV = 2E_m$$

$$t = \frac{3\pi}{2} \quad (13)$$

นั่นคือในวงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่น ไดโอดที่ใช้แต่ละตัวจะต้องมีค่าพิคต์อัตราของแรงดันกลับขั้วไม่ต่ำกว่า  $2E_m$

เนื่องจากวงจรตัดไฟแบบเต็มรูปคลื่นให้แรงดันไฟฟ้าออกสูงกว่า และสามารถรองรับอาร์โมนิกได้ง่ายกว่าวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่นจึงนิยมใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

### 5.3 วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ (Bridge Full-wave Rectifier circuit)



รูปที่ 5.4 วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรตัดไฟตามรูป 5.4 (a) มักเรียกกันทั่วไปว่า วงจรตัดไฟชนิดบริดจ์ (bridge rectifier) วงจรนี้จะใช้ไดโอด 4 ตัว แต่ไม่ต้องใช้หม้อแปลงชนิดมีแท่งปกลาง ดังรูป 5.3 (a) และค่าแรงดันไฟฟ้ากลับขั้วสูงสุดที่ไดโอดแต่ละตัวจะต้องทนได้ก็เพียงแต่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเท่านั้น

ในการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรนี้ ให้พิจารณาครึ่งรอบที่ตรงจุด A เป็นบวกเมื่อเทียบกับ B กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน  $D_1$  โหลด และ  $D_3$  แล้วไหลย้อนกลับไปยังปลายล่างของขดลวดทุติยภูมิต่อมาอีกครั้งรอบ ในขณะที่ B เป็นบวก เมื่อเทียบกับ A กระแสจะไหลผ่าน  $D_4$  ผ่านโหลดจากบนไปยังล่าง ผ่าน  $D_2$  และผ่านปลาย A ของขดลวดทุติยภูมิในแต่ละครึ่งรอบ จะมีไดโอดที่นำไฟฟ้าต่ออนุกรมกัน 2 ตัว และไดโอดอีก 2 ตัวที่ไม่นำไฟฟ้า เพราะถูกไบอัสย้อน กระแสรูปพัลส์ที่ผ่านโหลดจะไหลในทิศทางเดียวกันเสมอ ซึ่งเป็นกระแสไฟตรงขาออกโดยมีรูปคลื่นดังในรูปที่ 5.4 (b)

มองในแง่ของแรงดันไฟตรง  $E_{dc}$  ที่คร่อมโหลดแล้ว หม้อแปลงในวงจรบริดจ์จะให้แรงดันไฟตรงถึง 2 เท่าของแรงดันไฟในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ในวงจรบริดจ์จะเกิดขึ้นในครึ่งรอบทั้งสองส่วนกระแสไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงในวงจรแบบมีแท่งปกลาง จะไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น ดังนั้นถ้าหากเรามาเทียบผลของการเกิดความร้อนของวงจรทั้งสองแบบให้เท่ากันแล้ว กระแสจากหม้อแปลงในวงจรบริดจ์จะมีค่าประมาณ  $2/3$  เท่าของกระแสในหม้อแปลงของวงจรแบบมีแท่งปกลาง เนื่องจากช่วงเวลาการไหลของกระแสของหม้อแปลงในวงจรบริดจ์มีมากกว่า จึงเห็นได้ชัดว่าหม้อแปลงในวงจรบริดจ์มีประสิทธิภาพสูงกว่า

5.4 ตัวประกอบระลอกคลื่น (Ripple factor)

ปริมาณริบเบิลที่เทียบกับส่วนประกอบไฟตรงของแรงดันไฟฟ้า จะเป็นตัววัดความเรียบของวงจรตัดไฟ ซึ่งเรียกริบเบิลแฟกเตอร์

$$r = \text{ริบเบิลแฟกเตอร์} = \frac{\text{ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์เอชซีทั้งหมด}}{\text{ค่าเฉลี่ยหรือค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์ดีซี}} \tag{14}$$

กระแสไฟในโหลดของวงจรตัดไฟจะประกอบด้วยส่วนประกอบของกระแสไฟตรง และค่าประสิทธิผลของส่วนประกอบของกระแสไฟสลับ  $I_{ac}$  ทั้งหมด

ค่า effective  $I_{rms}$  ของกระแสในโหลดทั้งหมด หาได้จากค่านิยาม ดังนี้

$$I_{rms} = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{ac}^2}$$

$$I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (15) คำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นจากคำนิยามของริปเปิ้ลแฟกเตอร์จะได้

$$r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2}}{I_{dc}} = \frac{\sqrt{(I_{rms}^2) - 1}}{(I_{dc})^2} \quad (16)$$

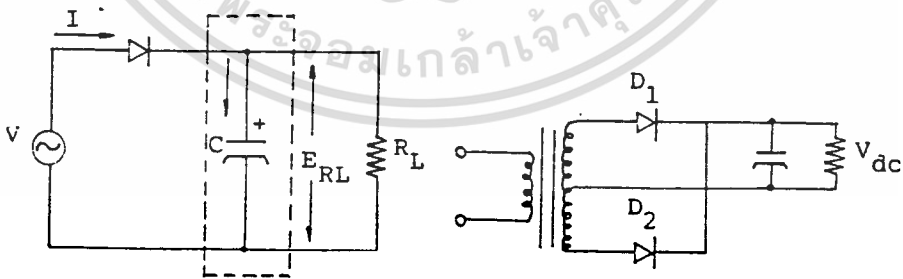
ค่าต่าง ๆ เหล่านี้สามารถวัดได้ทั้งเครื่องมือไฟตรงและไฟสลับ แล้วนำไปหาริปเปิ้ลแฟกเตอร์ได้ ถ้าหากริปเปิ้ลมีน้อย ก็ต้องวัดด้วยวิธีละเอียดละเอียดมากขึ้น

เราสามารถใช่  $I_{dc}$  และ  $I_{rms}$  ดังกล่าวข้างต้นในการหาตัวริปเปิ้ลแฟกเตอร์ของวงจรตัดไฟครึ่งรูปคลื่นและวงจรตัดไฟเต็มรูปคลื่นได้ ริปเปิ้ลแฟกเตอร์สำหรับวงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่นมีค่าเท่ากับ 1.21 และสำหรับวงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.48

การที่วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีริปเปิ้ลแฟกเตอร์ต่ำนี้ก็ เป็นคุณสมบัติที่ดีอีกข้อหนึ่งที่สนับสนุนให้วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นเป็นที่นิยมใช้กันมาก นอกเหนือจากข้อดีที่ว่าสามารถแยกอาร์โมนิคออกได้ง่าย

### 5.5 วงจรกรองแบบตัวเก็บประจุ

วงจรกรองแบบตัวเก็บประจุ เป็นวงจรกรองที่ทำงานได้ดีและสร้างง่าย ดังรูปที่ 5.5 ตัวเก็บประจุจะเป็นทางผ่านของอาร์โมนิค ก่อนจะถึงโหลด ประสิทธิภาพของตัวกรองนี้จึงขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ  $X_C$  ซึ่งควรมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของโหลด



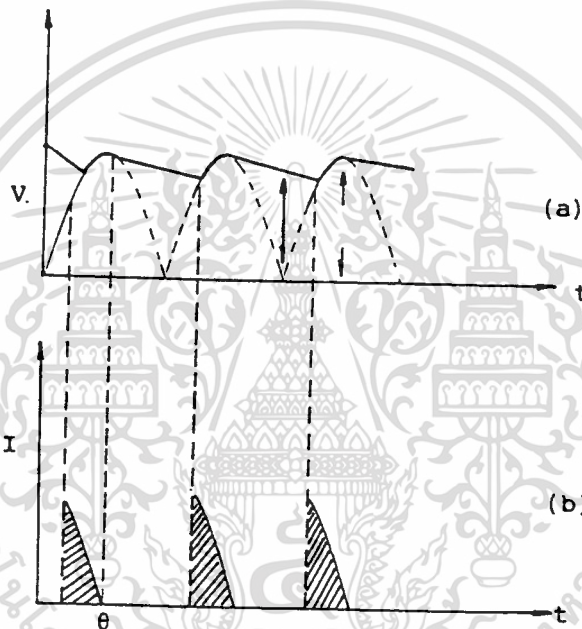
ก) วงจรตัดไฟแบบครึ่งคลื่น

ข) วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่น

### รูปที่ 5.5 ตัวกรองแบบตัวเก็บประจุ

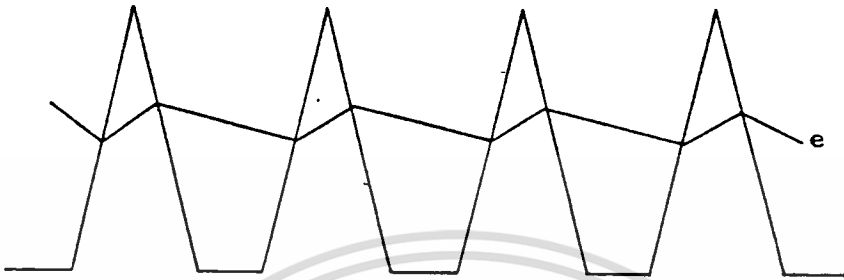
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวจุกไฟฟ้า ไดโอดจะนำกระแสหรือจะต่อแหล่งจ่ายไฟเข้ากับโหลดและตัวจุกไฟฟ้าจะรับประจุ เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวจุกไฟฟ้า เมื่อขั้วอานโนดของไดโอดเป็นลบ เทียบกับขั้วคาโทด ไดโอดจะไม่นำกระแสหรือจะตัดแหล่งจ่ายไฟออก และตัวจุกไฟฟ้าจะคายประจุไปยังโหลด พลังงานที่เก็บประจุจะรักษาแรงดันไฟฟ้าของโหลดที่ระดับสูงได้นานกว่าวงจรที่ไม่มีตัวเก็บประจุอยู่ ดังรูปที่ 5.6 (a) ไดโอดจะนำกระแสเฉพาะช่วงและมีค่าจุดยอดสูงมาก



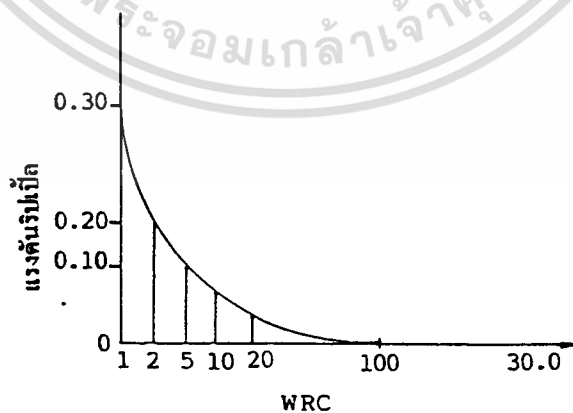
รูปที่ 5.6 a และ b แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

ถ้าเราไม่คำนึงถึงความต้านทานของไดโอด และสมมติว่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องคำนึงถึงได้ จะได้กระแส  $i_b$  เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงที่มุมนำกระแส  $0$ , ดังรูปที่ 5.7 แต่ในทางปฏิบัติ หม้อแปลงขนาดเล็กส่วนมากมักจะมียูนิคแกนรั่วไหล (leakage reactance) มากพอที่จะจำกัดไม่ให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะให้เห็นจากรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 รูปคลื่นพัลส์ของกระแสไดโอดและแรงดันระลอก  $e$  ในวงจรตัดไฟแบบ เต็มคลื่น โดยมี  $WRC = 30$

เนื่องจากกระแส  $i_b$  เป็นฟังก์ชันของ RC ถ้าเพิ่มค่าความต้านทานของโหลดมากขึ้น ตัวประกอบระลอกคลื่นจะลดลง ขณะเดียวกันขนาดของ  $i_b$  และ  $e$  จะลดลงเนื่องจาก  $X_c$  ควรจะมีค่าน้อยมาก เพื่อเป็นทางผ่านของอาร์โมนิกรายขึ้น  $C$  จึงควรจะมีค่ามาก ซึ่งหาค่า  $C$  มากได้โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์

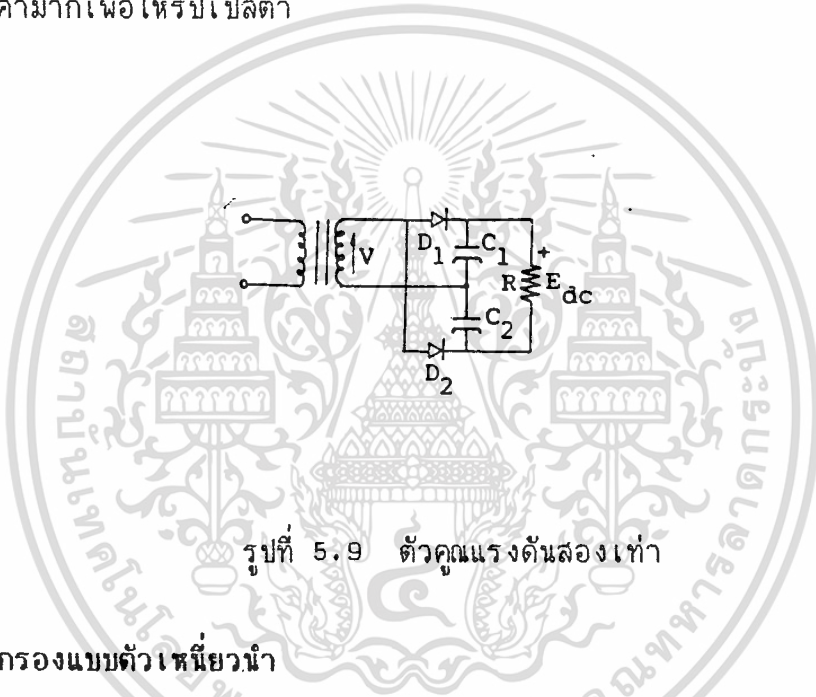


รูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าขณะที่  $WRC$  มีค่ามากขึ้นริบเปิ้ลแพกเตอร์จะลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 วงจรตัดไฟแบบทวีแรงดัน (Voltage-multiplying rectifier circuits)

วงจรที่ใช้เครื่องกรองแบบตัวเก็บประจุอีกชนิดหนึ่งคือ วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าเป็น 2 เท่า (Voltage doubler) ดังรูปที่ 5.9 ถ้าให้ขั้วบนของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเป็นขั้วบวก ไดโอด  $D_1$  จะนำกระแสและชาร์จตัวจุไฟฟ้า  $C_1$  จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของคลื่น ac อีกครึ่งรอบ ต่อมาไดโอด  $D_2$  จะนำกระแสและชาร์จ  $C_2$  จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของครึ่งรอบที่เป็นลบ ตัวจุไฟฟ้าทั้งสองจะจ่ายไฟให้โหลดอย่างอนุกรม ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าใกล้เคียงกับ 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของคลื่นขาเข้า ในที่นี้  $C_1$  และ  $C_2$  ควรจะมีค่ามากเพื่อให้รีปเปิ้ลต่ำ



รูปที่ 5.9 ตัวคูณแรงดันสองเท่า

## 5.7 วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ

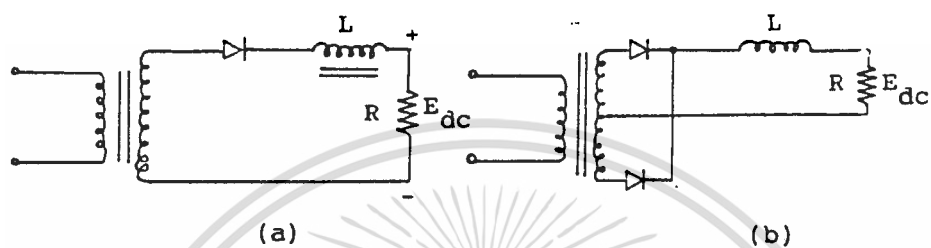
ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับโหลดทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์อนุกรมที่ต้านอาร์โมนิคตอนขาออกของวงจรตัดไฟ และทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ดังรูป 5.10 เราสามารถมองตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเก็บพลังงานแม่เหล็กเมื่อกระแสมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย และจะจ่ายพลังงานให้แก่โหลดกระแสลดลงจากค่าเฉลี่ยของมัน ดังนั้นจึงลดการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือลดรีปเปิ้ลนั่นเอง

เนื่องจาก  $i_b$  เป็นฟังก์ชันของ  $\frac{\omega L}{R}$  ถ้าค่า  $\frac{\omega L}{R}$  เพิ่มกระแสจะลดลง  $i_a$  และ

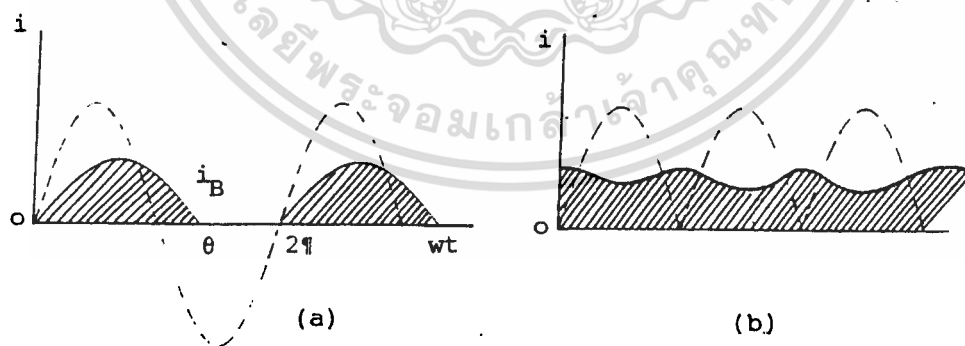
จะยังคงไหลต่อแม้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะเท่ากับศูนย์  $\omega t = \pi$  ก็ตาม ดังรูป 5.11(a) ฉะนั้น ถ้าเป็นวงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นโดยมีตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้วย มุมนำกระแสของไดโอดตัวแรกจะซ้อนกับมุมนำกระแสเริ่มต้นของไดโอดตัวที่ 2 ทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำ และ โหลดต่อเนื่องกันดังรูปที่ 5.11 (b) ระลอกคลื่นของวงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า  $R$  น้อยลง ทั้งนี้เพราะกระแสในโหลดจะเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานที่เก็บในตัวเหนี่ยวนำมากขึ้น



รูปที่ 5.10 ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.11 รูปคลื่นของกระแสในวงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.8 ตัวอย่างการออกแบบวงจรกรอง

ในที่นี้เราจะขอพิจารณาวงจรกรองแบบตัวเก็บประจุก่อน เนื่องจาก

1. น้ำหนักเบาและราคาถูก
2. วงจรเรกกูเลเตอร์ (regulator circuit) มักจะมีอยู่ในวงจรของแหล่งจ่ายไฟที่ช่วยลดหรือชดเชยข้อเสียของการจ่ายไฟตรงขาออกให้แก่โหลดของตัวกรองแบบตัวจุ่มไฟฟ้าได้

$$1) \quad C = \frac{I_L r}{2F \Delta V}$$

$$2) \quad L_c = \frac{R_L}{6\pi f}$$

การออกแบบวงจรกรอง เราจะต้องพิจารณาถึง

1. การเลือกตัวเก็บประจุ
2. การเลือกหม้อแปลงไฟฟ้า

การเลือกตัวเก็บประจุไฟฟ้า

สำหรับกระแสค่า ( $I_{out} = 1A$ ) การเลือกตัวเก็บประจุค่อนข้างจะตรงไปตรงมา ค่าความจุไฟฟ้าคิดได้จากสูตรง่าย ๆ

$$C = \frac{I_L}{2f \Delta V}$$

ในที่นี้  $I_L$  = กระแสไฟตรงในโหลด

$\Delta V$  = แร่งดันริบเบิลจากยอดถึงยอด ( $V_{pp}$  peak-to-peak ripple voltage)

ความถี่ระลอก  $F = 100$  เฮิรท์ เมื่อความถี่ของไฟสลับ 50 เฮิรท์

ถ้า  $= 2V_{pp}$  แล้วจะได้  $C = 2,500 \mu F/amp.$

ที่ค่ากระแสไฟตรงต่ำกว่า 1 แอมแปร์ ความร้อนในตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor heating) มักจะไม่เป็นปัญหาและค่าแรงดันริบเบิลยอดถึงยอดเป็นตัวกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุ

แต่ที่ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น อัตราส่วนของผิวนอกตัวเก็บประจุไฟฟ้ากับปริมาตรของตัวเก็บประจุจะลดน้อยลงอย่างมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุเริ่มก่อปัญหาขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

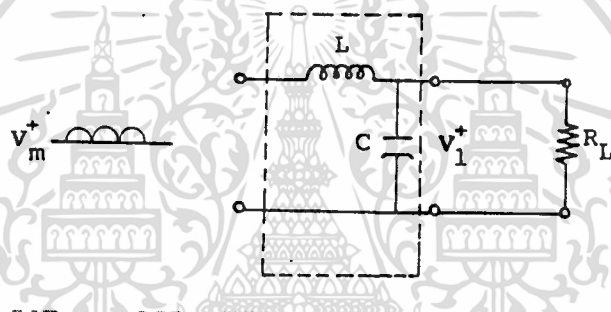
กระแสรีปเปิ้ลอาจจะเป็นตัวกำหนดในการเลือกตัวเก็บประจุไฟฟ้า มากกว่าแรงดันรีปเปิ้ล ในหลายกรณี ขนาดของตัวเก็บประจุจะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในมากเกินไป

### การเลือกค่าความเหนี่ยวนำ

ในการเลือกค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  ที่ใช้ในวงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ ค่า  $L$  จะต้องมากกว่าค่าความเหนี่ยวนำวิกฤติ (critical inductance)  $L_c$  โดย

$$L_c = \frac{R_L}{6\pi f}$$

ถ้าเป็นวงจรกรองชนิดที่ใช้  $L$  นำหน้า (L-Section) ดังรูป 5.12

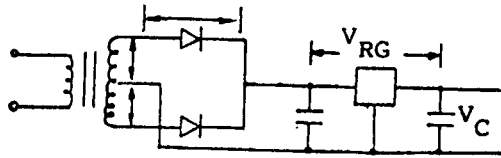


รูปที่ 5.12 ตัวกรองแบบ L

$$\begin{aligned} V_{ac} &= \frac{1}{4\omega^2 LC} \cdot \frac{4V_m}{3\pi\sqrt{2}} \\ r &= \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \\ &= \frac{4V_m}{4\omega^2 LC(3\pi\sqrt{2})} \cdot \frac{\pi}{2V_m} \\ &= \frac{2/3}{4\omega^2 LC} \\ &= \frac{0.47}{4\omega^2 LC} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเลือกหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.13 วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีแท็ปกลาง (Full Wave Center Tap)

สูตรที่ใช้ในการหาแรงดันทุติยภูมิ (Secondary voltage) ของหม้อแปลงที่ใช้กับวงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีแท็ปกลาง มีดังนี้

$$V_{ac} = \frac{(V_{out} + V_{REG} + V_{RECT} + V_{RIPPLE})}{0.92} \times \frac{V_{NOM}}{V_{Lowline}} \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$

ในที่นี้ 0.92 คือ ประสิทธิภาพของวงจรตัดไฟ (rectifier efficiency) = อัตราส่วนของ nominal AC line voltage กับ lowline conditions ที่ต้องการ เราสมมติได้ว่า

1.  $V_{REG}$  ต้องเท่ากับ 3 โวลต์ไฟตรงหรือมากกว่า
2.  $V_{RECT}$  มีค่าประมาณ 1.25 โวลต์ไฟตรง
3.  $V_{RIPPLE}$  มีค่าขอดีประมาณ 10% ของ  $V_{DC}$

ตัวอย่างเช่น ต้องการจ่ายไฟ 5 VDC 2A โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าอาจลดลงเหลือ 200 โวลต์ RMS

$$\begin{aligned} V_{out} &= 5V & V_{RECT} &= 1.25V \\ V_{REG} &= 3V & V_{RIPPLE} &= 0.5(1V_{pp}) \\ V_{AC} &= \frac{9.75}{0.92} \times \frac{220}{200} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 8.24V_{ac} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น แรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลง สามารถกำหนดได้ว่าเท่ากับประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17V<sub>CT</sub> สำหรับวงจรตัดไฟชนิดบริดจ์ ที่มีความต้องการอย่างเดียวกัน สิ่ง que เปลี่ยนแปลงไปบ้างคือ

$$V_{RECT} = 2 \times 1.25 = 2.5V$$

$$V_{AC} = \frac{11}{0.92} \times \frac{220}{200} \times \frac{1}{2} = 9.29V \text{ AC}$$

ดังนั้น แรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลงจึงเท่ากับประมาณ 10 โวลต์

**กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลง**

ขั้นตอนต่อไปนี้มีไว้เพื่อหากระแสทุติยภูมิของหม้อแปลง แม้จะต้องหาจากการวิเคราะห์ที่ยุ่งยากมาก แต่เพื่อจุดประสงค์ในทางปฏิบัติ อาจจะใช้ตารางต่อไปนี้

ชนิดของวงจรตัดไฟ	ชนิดของวงจรกรอง	ค่าพิคก้อัตรากระแสอาร์เอ็มเอสทางทุติยภูมิ
วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นที่มีแท็ปกลาง (Full Wave Center Tap)	ใช้โช้กทางด้านเข้า Choke input	0.7 เท่าของกระแสตรง
วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นมีแท็ปกลาง (Full Wave Center Tap)	ใช้ตัวเก็บประจุทางด้านเข้า Capacitor input	1.2 เท่าของกระแสตรง
วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ (Full Wave Bridge)	ใช้โช้กทางด้านเข้า Choke input	กระแสตรง
วงจรตัดไฟแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ (Full Wave Bridge)	ใช้ตัวเก็บประจุทางด้านเข้า Capacitor input	1.8 เท่าของกระแสตรง

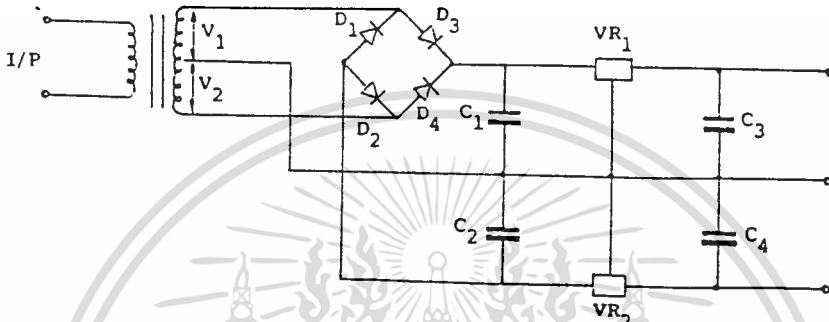
ตัวอย่างเช่น ในกรณีของเรา (5V, 2A DC Supply) กระแส RMS ของหม้อแปลงจะเป็น สำหรับวงจรแบบเต็มคลื่นมีแท็ปกลาง  $1.2 \times 2 = 2.4A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับแบบบริดจ์  $1.8 \times 2$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดทั้งหมดของหม้อแปลงก็จะเป็น

วงจร	พิกัดอัตราทางทุติยภูมิ
เต็มคลื่นมีแท่งกลาง	17 V CT ที่ 2.4 A RMS = 40.8 VA
บริดจ์	10 V ที่ 3.6 A RMS = 36 VA

สำหรับวงจรจ่ายไฟตรงแบบคู่ประกอบ



รูปที่ 5.14 วงจรจ่ายไฟตรงแบบคู่ประกอบ

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= \pm 15V & V_{RECT} &= 1.25V \\
 V_{REG} &= 3V & V_{RIPPLE} &= 0.75(1.5 V_{D-D})V \\
 V_{AC} &= \frac{(1.5 + 3 + 1.25 + 0.75)}{0.92} \times \frac{220}{200} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 16.9V
 \end{aligned}$$

$$I_{AC} = 1.8 \times 100 \text{ mA} = 180 \text{ mA RMS}$$

ดังนั้น พิกัดอัตราของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงคือ 34 V CT 180 mA RMS

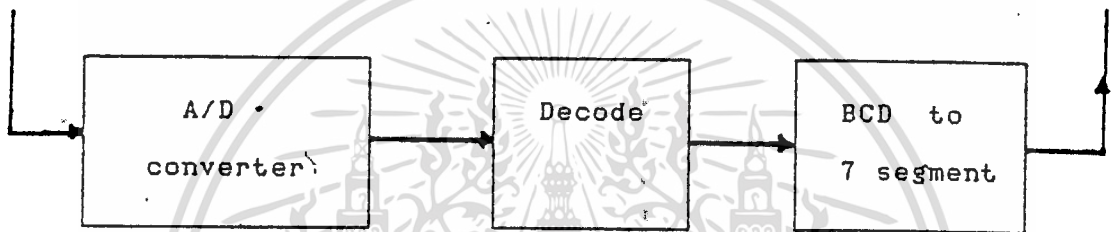
## บทที่ 6

### ภาคแสดงผล

ภาคแสดงผลที่นำมาใช้จะมีการแสดงผลเป็นตัวเลข เนื่องจากแบบตัวเลขสามารถอ่านค่าความละเอียดได้มากกว่าแบบเข็ม สามารถแสดงผลได้ 0-200 มิลลิโวลต์ ลักษณะ block diagram ของภาคแสดงผลจะเป็นดังรูป 6.1

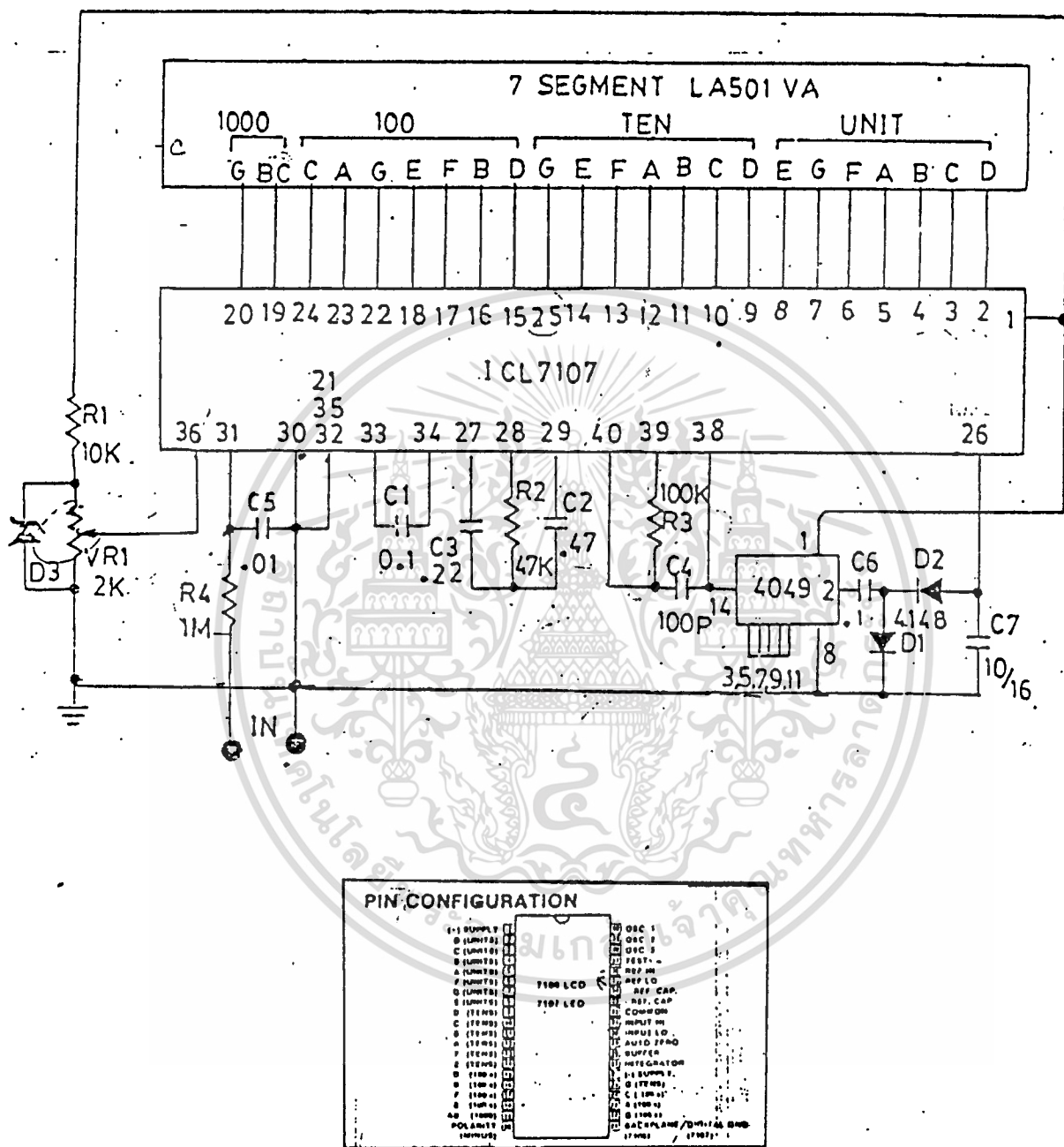
Analog voltage

display 7 segment



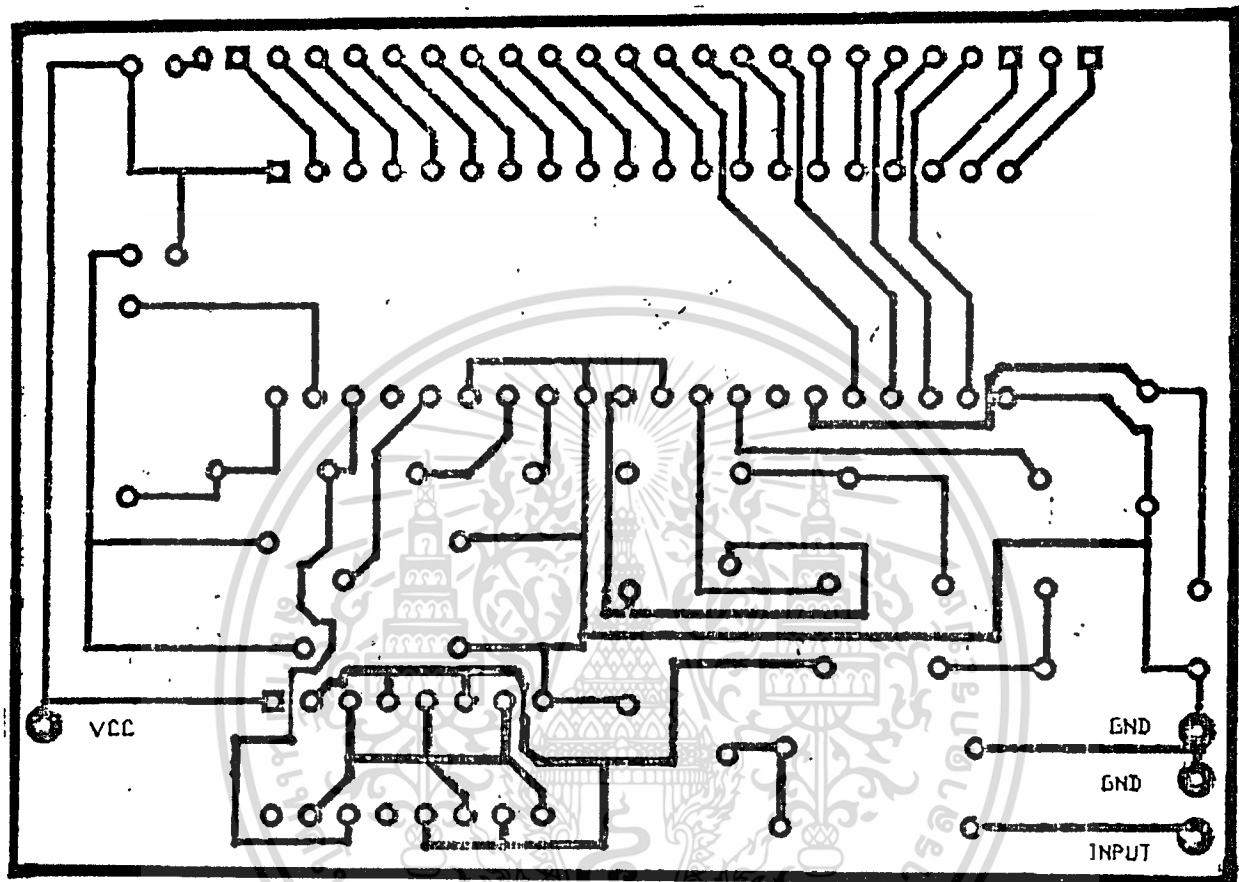
รูปที่ 6.1 แสดง block diagram ของการแสดงผล

ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้ใช้ ICL 7107 เป็นชิปเกิลชิพ (single chip A/D converter 3<sup>1/2</sup> digit) เป็นตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกให้แสดงผลเป็นแอลอีดี 7 ซีต (7 segment) โดยภายในไอซี ICL 7107 นั้นรวมส่วนต่าง ๆ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ทำให้สามารถต่อไอซีนี้เข้ากับแอลอีดี 7 ซีตได้เลย ดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดยมีอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อมีหน้าที่เป็นส่วน ๆ ดังนี้



รูปที่ 6.2 ก. วงจรแสดง display  
ข. แสดงขาของ ICL 7107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ภาคแสดงผล

จากรูปที่ 6.2 ในภาคแสดงผลโดยใช้ ICL 7107 มีส่วนประกอบสำคัญหลายส่วน  
คือ

- วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

หัวใจในการทำงานของวงจรภาคแสดงผลก็คือสัญญาณนาฬิกาสำหรับในโครง-  
งานพิเศษนี้ใช้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์เป็นสัญญาณนาฬิกา ซึ่งวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอาจ  
ทำได้หลายรูปแบบ แต่ในโครงงานพิเศษนี้ใช้วงจร R - C ต่อเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ขา  
39, 40 โดยคำนวณได้จาก

$$F = 0.45/RC$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดความถี่เท่ากับ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ และตัวเก็บประจุเท่ากับ 100 พิโคฟารัด เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ค่าความต้านทานกับ 112.5 กิโลโอห์ม

- Integrating Resistor

เป็นตัวต้านทานที่ต่อเข้าที่ขา 28 จะต้องใช้ค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมโดยขึ้นอยู่กับย่านวัดสูงสุดที่เราต้องการ ในที่นี้เรากำหนดย่านวัดสูงสุด 200 มิลลิโวลต์จะได้ค่าความต้านทานเท่ากับ 47 กิโลโอห์ม

- Integrating Capacitor

Integrating capacitor จะเป็นตัวกำหนดค่า maximum voltage swing ในที่นี้ใช้ค่า 0.22 ไมโครฟารัด

- Auto-zero Capacitor

Auto-zero capacitor จะทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนในระบบ สำหรับ display 200 มิลลิโวลต์ สัญญาณรบกวนจะมีผลต่อการแสดงผลอย่างมาก เราใช้ค่าตัวเก็บประจุค่า 0.47 ไมโครฟารัด เป็นตัวกำจัดสัญญาณรบกวนนั้น และทำให้วงจรแสดงผลเป็นศูนย์ ในขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุต

### การกำหนดย่านวัดสูงสุด

ค่าแรงไฟอินพุตที่จะวัดได้สูงสุดนั้น จะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของแรงไฟ  $V_{ref}$  นั่นคือหากเราต้องการวัดสัญญาณ อินพุตที่มีความแรงเต็มย่านวัด 200 มิลลิโวลต์ แล้วละก็ เราจะต้องปรับให้  $V_{ref}$  มีค่าเท่ากับ 100 มิลลิโวลต์ หรือหากต้องการย่านวัดสูงสุด 2 โวลต์ เราจะต้องปรับให้  $V_{ref}$  เท่ากับ 1 โวลต์

- วงจรกำเนิดสัญญาณคล็อก

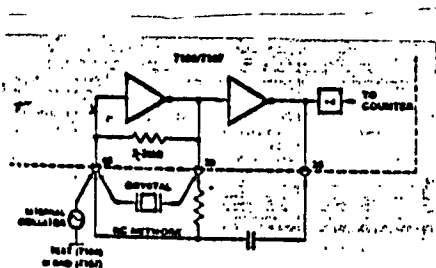
หัวใจในการทำงานของวงจรดิจิทัลก็คือสัญญาณคล็อก สำหรับวงจรนี้ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานคือ 48 KHz และ 40 KHz.

ซึ่งวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณคล็อกอาจทำได้หลายรูปแบบ เช่น นำสัญญาณจากวงจรถ่ายกำเนิดความถี่จากภายนอกมาต่อเข้าที่ขา 40 โดยตรง

หรืออาจใช้คริสตัล ค่าความถี่ที่ต้องการต่อคร่อมระหว่าง ขา 39-40 ก็ได้

ส่วนวิธีที่ง่ายที่สุดคือ ต่อเป็นวงจร R-C ออสซิลเลเตอร์ ดังรูป 6.4 และสามารถคำนวณค่า R-C ได้จาก

$$F = 0.45/RC$$



รูปที่ 6.4 วงจร กำหนดสัญญาณคล็อก

ในการคำนวณเราอาจเปลี่ยนแปลง ค่าคาปาซิเตอร์ให้ได้ความถี่ที่ต้องการได้ โดยกำหนดค่ารีซิสเตอร์ = 100K เท่านั้น

และที่ความถี่ 48 KHz จะได้ค่า C เท่ากับ 100 PF

- เรฟเฟอเรนซ์คาปาซิเตอร์ ( $C_{ref}$ ) ที่ต่ออยู่ระหว่างขา 33-34 นั้น เราใช้ค่า 0.1MF เป็นอย่างน้อย

- อินทิเกรตติ้งรีซิสเตอร์ ( $R_{int.}$ ) ซึ่งต่อที่ขา 28 นั้น จะต้องใช้ค่าที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับย่านวัดสูงสุดที่ต้องการ เช่นที่ย่านวัด 2 โวลต์ เราให้ค่า  $R = 470K$  และในวงจรของเรา ที่กำหนดย่านวัดสูงสุด 200 มิลลิโวลต์ จะได้ค่า  $R$  เท่ากับ 47K

- อินทิเกรตติ้งคาปาซิเตอร์ ( $C_{int}$ )

ในกรณีที่เราใช้ความถี่ตลอด 48 KHz. นั้นควรใช้ค่า 0.22 MF

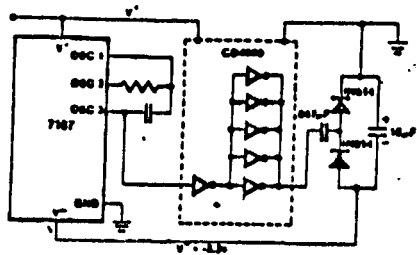
- ออโตซีโร่คาปาซิเตอร์ (Autozero)

เป็นคาปาซิเตอร์ที่ทำหน้าที่ให้วงจรแสดงผลเป็นศูนย์ ในขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุต การกำหนดค่า C ขึ้นอยู่กับย่านวัด เช่นย่านวัด 2 โวลต์ เราใช้ค่า 0.047 MF และที่ย่านวัด 200 มิลลิโวลต์ เราใช้ค่า 0.47 MF

- เพาเวอร์ซัพพลาย

โดยปกติแรงไฟที่เลี้ยงวงจรประกอบด้วยไฟบวก ไฟลบและกราวด์ ดังนั้นในการใช้งานหากใช้ประจำที่ ท่านก็อาจสร้างวงจรแปลงไฟดังกล่าวได้ไม่ยาก

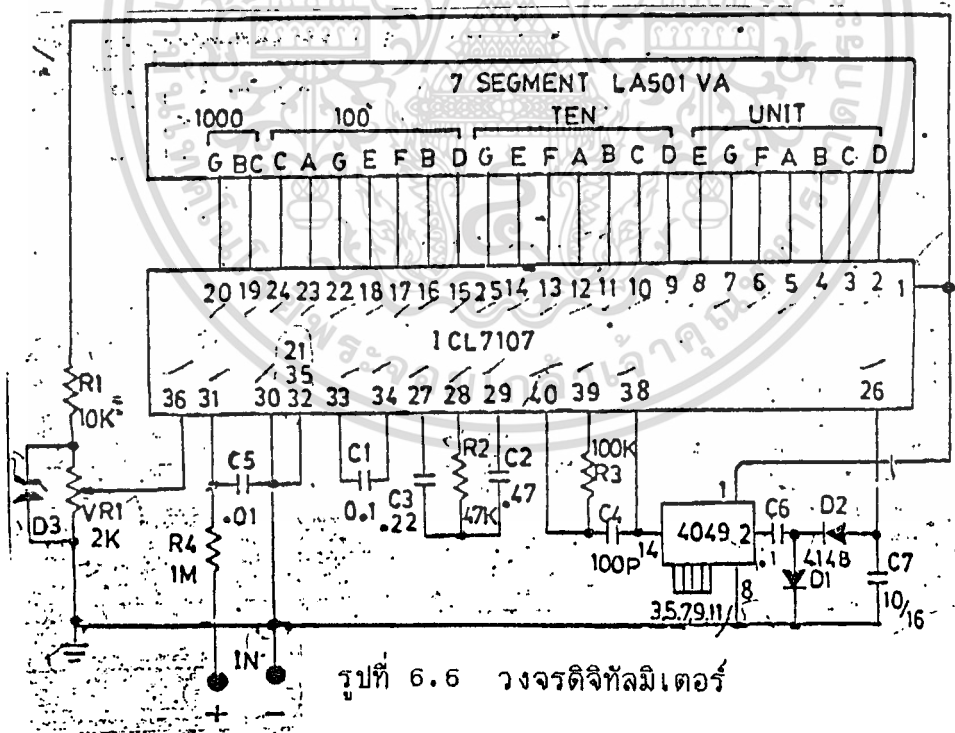
แต่หากท่านต้องการความสะดวกในการใช้งาน ก็อาจเปลี่ยนใช้แบตเตอรี่จ่ายไฟบวกให้กับวงจรเพียงด้านเดียว แล้วสร้างวงจรแปลงไฟลบขึ้นใหม่ได้ดังรูป 6.5



รูปที่ 6.5 วงจรกำเนิดโพลบ

การทำงานของวงจรสร้างโพลบ อย่างง่าย ๆ ก็คือ การนำเอาสัญญาณคล็อกจากขา 38 ของไอซีมาผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรเรตติไฟร์แบบฮาล์ฟเวทโวลเตจดับเบิลอร์ ได้เป็นโพลบ ไปเลี้ยงไอซีที่ขา 26

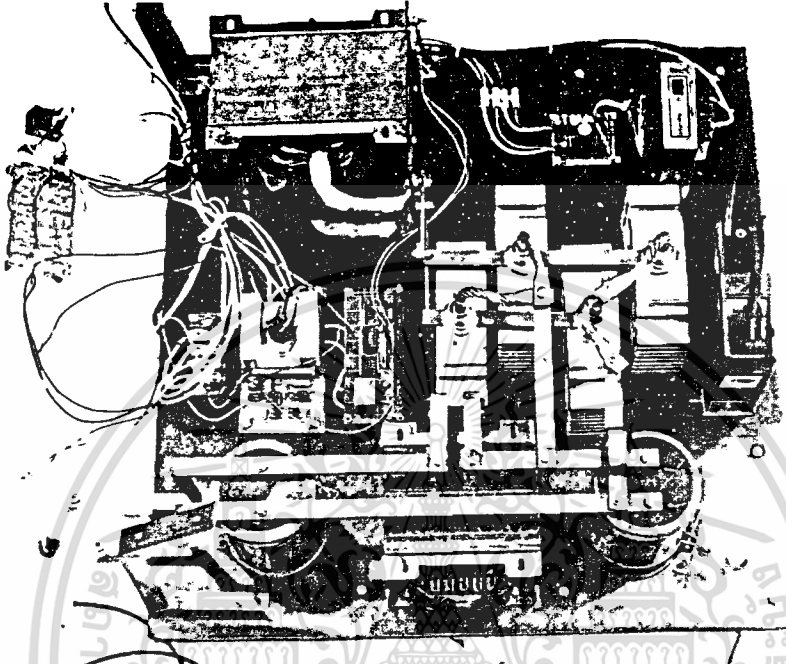
ในรูปที่ 6.6 เป็นวงจรดิจิทัลมิเตอร์ ที่ออกแบบสำหรับการใช้งานจริง โดยกำหนดย่านวัดสูงสุดเท่ากับ 200 มิลลิโวลท์



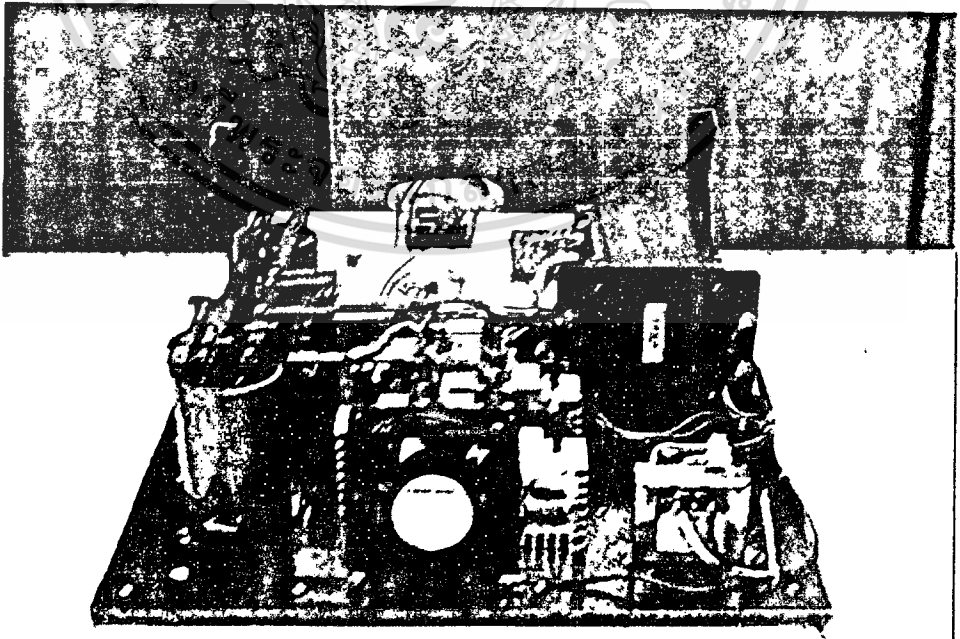
รูปที่ 6.6 วงจรดิจิทัลมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

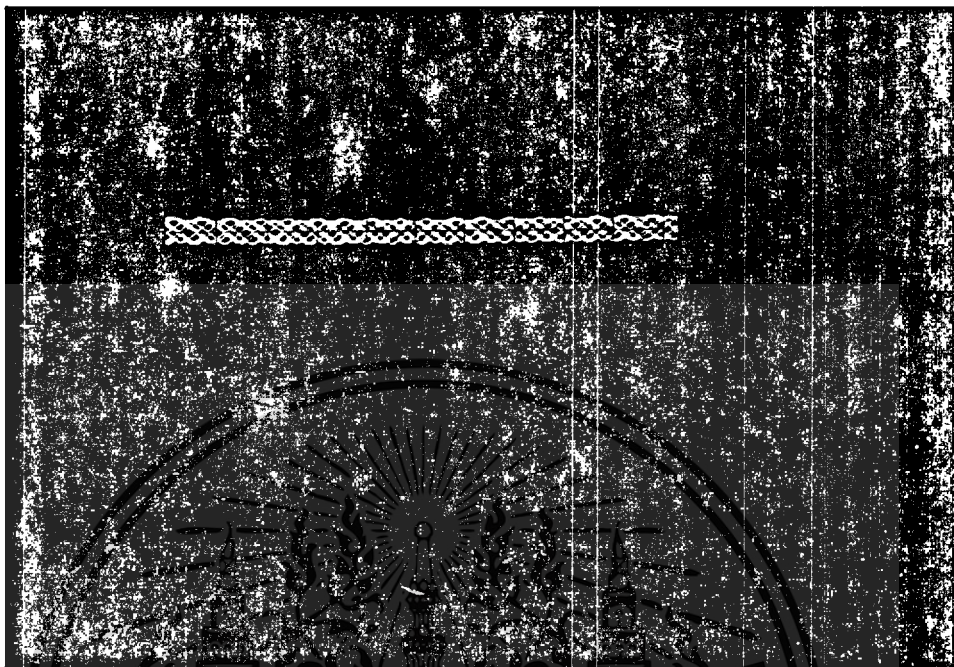


รูปที่ 7.1 แสดงถึงส่วนประกอบทั้งหมดของโครงการ " เครื่องจ่ายกำลังสำหรับ เครื่องขุดโลหะด้วยไฟฟ้า ( ทางด้านบน )

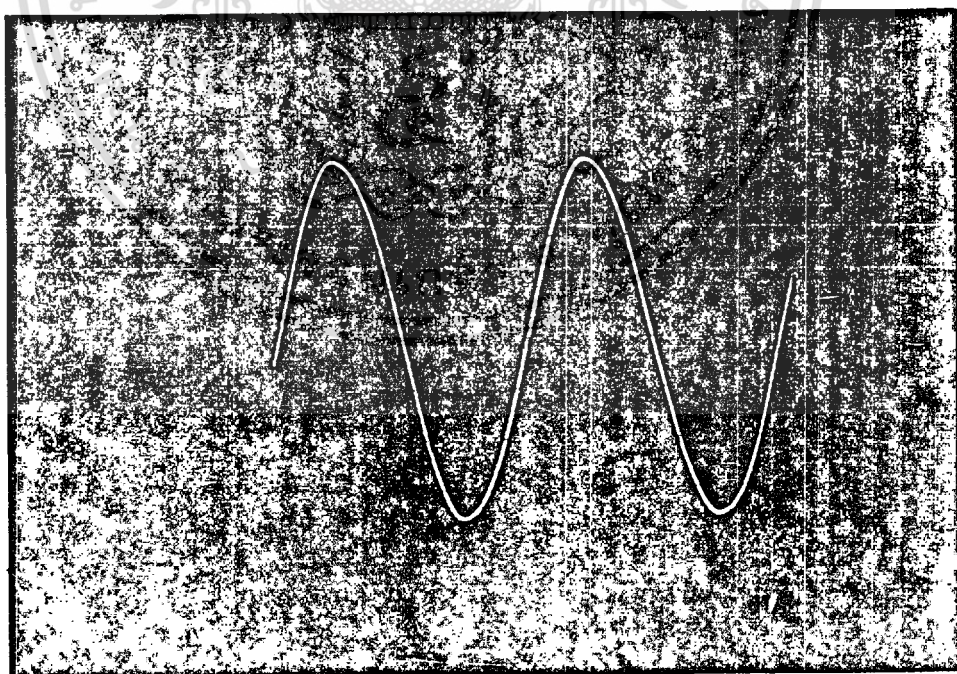


รูปที่ 7.2 แสดงถึงส่วนประกอบทั้งหมดของโครงการ " เครื่องจ่ายกำลังสำหรับ เครื่องขุดโลหะด้วยไฟฟ้า ( ทางด้านหลัง )

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

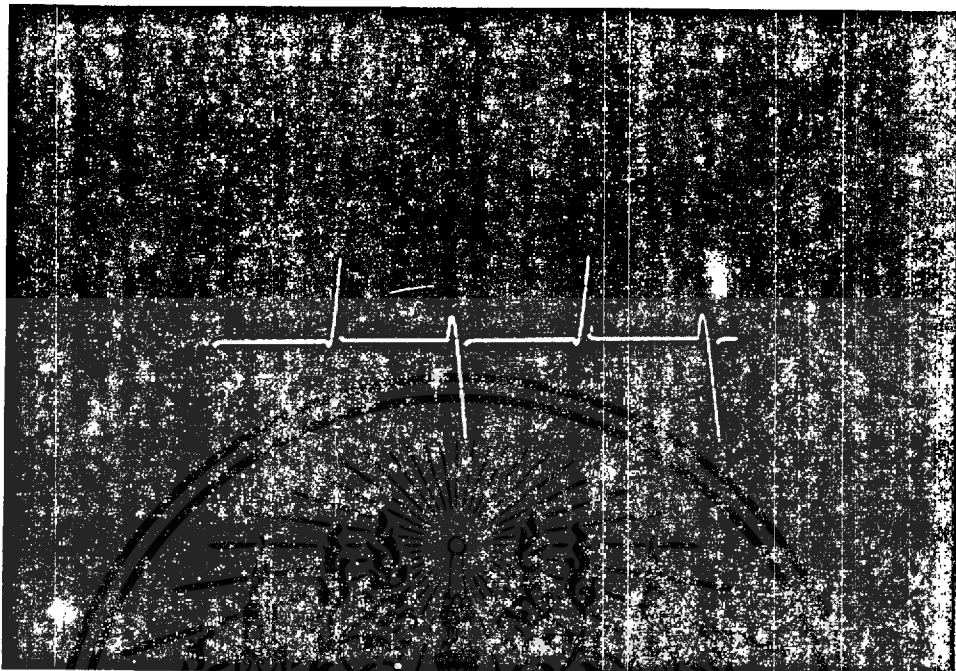


รูปที่ 7.3 แสดงถึงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของมิโหลด มีค่าได้ประมาณ 4 โวลต์เฉจท์

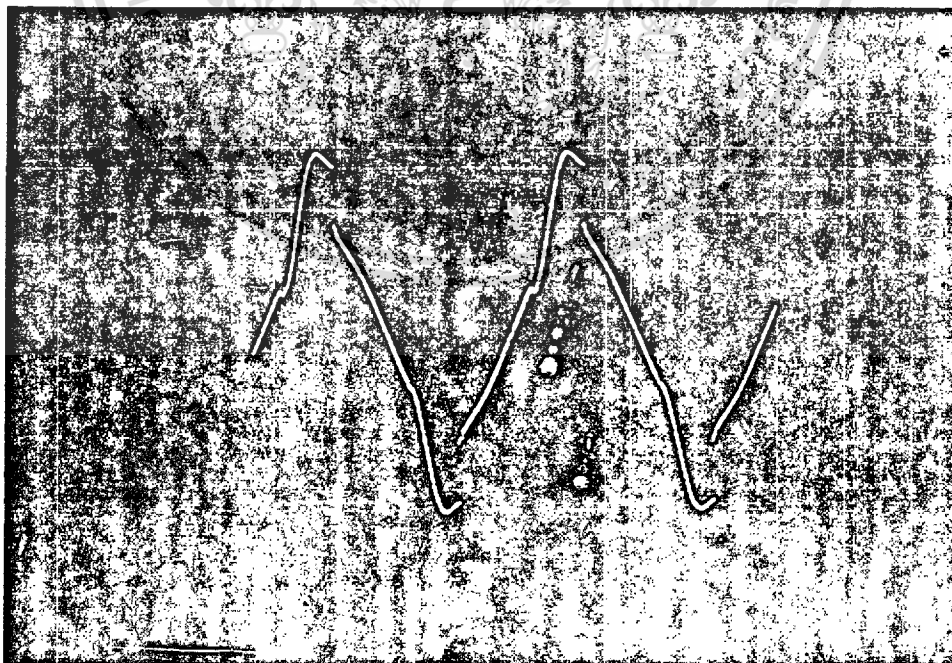


รูปที่ 7.4 แสดงถึงสัญญาณแรงดันของแหล่งกำเนิดของวงจรถวลุมเฟส

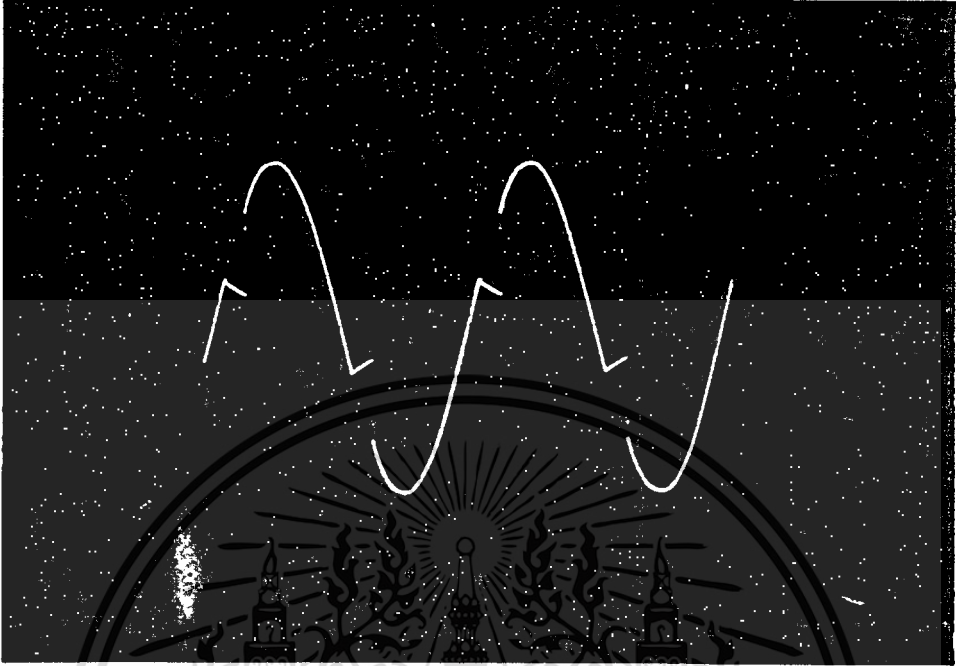
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 แสดงถึงสัญญาณแรงดันที่ตกกกดล่อมไตแอดเมื่อวัดสัญญาณที่ขา MT1 และ  
ขา MT2 ของวงจรควบคุมเฟส



รูปที่ 7.6 แสดงถึงสัญญาณแรงดันที่วัดระหว่างขาเกตของไตแอด เมื่อเทียบกราวด์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.7 แสดงถึงสัญญาณแรงดันที่วัดด้านเอาต์พุตของวงจรควบคุมเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูงต่ออาจารย์ภากร หุตะสังภาค อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำชี้แนะ และให้ความสนับสนุนมาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจมาตลอดในการทำโครงการนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณต่อ คุณพ่อ คุณแม่ และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอน คอยให้กำลังใจ และให้ความสนับสนุนในทุก ๆ ด้านมาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. ชูชัย ชนสารตั้งเจริญ "ทฤษฎีวงจรรีเลคทรอนิกส์" Physics Center, หน้า 43-53, 2533.
2. ยืน ภู่วรรณ "ทฤษฎีและการทำงานของงานอิเล็กทรอนิกส์" ซีเอ็ด ยูเคชั่น, หน้า 153-163, 168-176, 2531.
3. สุวรรณ จันทร์งาม "งานตกแตงผิวสำเร็จ" วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตพระนครเหนือ, 2528.
4. สัมพันธ์ หาญขุเล "เครื่องกลไฟฟ้า" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2525.
5. สันต์ คิวรัตน์ ว.ศบ,พ.ม "วิศวกรรมไฟฟ้า 2 ไฟฟ้ากระแสสลับ" ชุมนุมวิชาการคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 1  
WIRE SIZE TABLE

S.N.	Met	SWG	AWG	Bare dia mm	Dia with Enam mm	Area of bare cond sq. mm	R/Km @20 deg C ohms	Wt. kg/km
1	0.07	-	-	0.07	0.086	0.003848	4480	0.0361
2	-	45	41	0.071	0.086	0.003973	4340	0.0369
3	0.08	-	40	0.08	0.097	0.00501	3441	0.0465
4	-	44	-	0.081	0.097	0.005189	3323	0.0481
5	0.09	-	39	0.09	0.107	0.006318	2729	0.0585
6	-	43	-	0.091	0.109	0.006567	2626	0.061
7	0.10	-	-	0.1	0.117	0.007854	2195	0.074
8	-	-	38	0.101	0.119	0.007967	2164	0.07
9	-	42	-	0.102	0.119	0.008107	2127	0.075
10	0.11	-	-	0.11	0.13	0.009503	1814	0.0869
11	-	41	-	0.112	0.132	0.00981	1758	0.0908
12	-	-	37	0.113	0.135	0.01005	1716	0.0931
13	0.12	-	-	0.12	0.14	0.01131	1524	0.1034
14	-	40	-	0.122	0.142	0.011675	1477	0.1079
15	-	-	36	0.127	0.147	0.01267	1361	0.1168
16	0.13	-	-	0.13	0.15	0.013273	1299	0.1215
17	-	39	-	0.132	0.152	0.0137	1258	0.1262
18	0.14	-	-	0.14	0.163	0.015394	1120	0.1416
19	-	-	35	0.142	0.165	0.01589	1085	0.1467
20	0.15	-	-	0.15	0.173	0.01767	975.6	0.1625
21	-	38	-	0.152	0.175	0.01824	945.2	0.1679
22	0.16	-	34	0.16	0.183	0.02014	856	0.1849
23	0.17	-	-	0.17	0.196	0.0227	759	0.2096
24	-	37	-	0.173	0.198	0.02343	735.9	0.2202
25	0.18	-	33	0.18	0.206	0.0254	678.8	0.2349
26	0.19	-	-	0.19	0.216	0.02835	608.1	0.2676
27	0.193	36	-	0.193	0.218	0.02927	589.1	0.2686
28	0.20	-	-	0.20	0.226	0.03142	548.8	0.2897
29	-	-	32	0.203	0.229	0.03243	531.6	0.297
30	-	35	-	0.213	0.241	0.03575	482.2	0.3281

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.N.	Met	SWG	AWG	Bare dia mm	Dia with Enam mm	Area of bare cond sq.mm	R/Km @20 deg C ohms	Wt. kg/km
31	0.22	-	-	0.22	0.249	0.03801	453.6	0.3516
32	-	-	31	0.227	0.254	0.04039	426.9	0.3676
33	0.23	-	-	0.23	0.262	0.04155	415.0	0.3847
34	-	34	-	0.234	0.264	0.04289	402.0	0.3932
35	0.25	-	-	0.25	0.279	0.04909	351.2	0.4453
36	-	33	30	0.254	0.287	0.05067	340.3	0.4650
37	0.27	-	-	0.27	0.302	0.05726	301.1	0.5204
38	-	32	-	0.274	0.307	0.0591	291.7	0.5408
39	-	-	29	0.286	0.323	0.06422	268.5	0.5931
40	-	31	-	0.295	0.33	0.06818	252.9	0.6245
41	0.30	-	-	0.30	0.335	0.07069	243.9	0.6455
42	-	30	-	0.315	0.351	0.07791	221.3	0.7121
43	0.32	-	28	0.32	0.358	0.08098	212.9	0.7367
44	-	29	-	0.345	0.384	0.09372	184.0	0.8559
45	0.35	-	-	0.35	0.389	0.09621	179.2	0.895
46	-	-	27	0.361	0.401	0.1021	168.8	0.9341
47	-	28	-	0.376	0.417	0.1110	155.3	1.014
48	0.38	-	-	0.38	0.422	0.1134	152.0	1.041
49	0.4	-	-	0.40	0.447	0.1257	137.2	1.157
50	-	-	26	0.405	0.45	0.1288	133.9	1.171
51	-	27	-	0.417	0.462	0.1363	126.5	1.245
52	0.45	-	-	0.45	0.498	0.159	108.4	1.45
53	-	-	25	0.455	0.503	0.1624	106.2	1.483
54	-	26	-	0.457	0.505	0.1642	105.0	1.499
55	0.5	-	-	0.5	0.554	0.1964	87.8	1.796
56	-	25	-	0.508	0.561	0.2027	85.1	1.851
57	-	-	24	0.511	0.564	0.2047	84.2	1.871
58	0.55	-	-	0.55	0.605	0.2376	72.6	2.174
59	-	24	-	0.559	0.612	0.2452	70.3	2.233
60	-	-	23	0.573	0.627	0.2582	66.8	2.357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.N.	Met	SWG	AWG	Bare dia mm	Dia with Enam mm	Area of bare cond sq.mm	R/Km @20 deg C ohms	Wt. kg/km
61	0.6	-	-	0.6	0.655	0.2827	61.0	2.57
62	-	23	-	0.61	0.665	0.2919	59.1	2.655
63	-	-	22	0.644	0.701	0.3255	53.0	2.95
64	0.65	-	-	0.65	0.709	0.3318	52.0	3.218
65	0.7	-	-	0.7	0.759	0.3848	44.8	3.505
66	-	22	-	0.711	0.770	0.3973	43.4	3.607
67	-	-	21	0.723	0.782	0.4105	42.0	3.733
68	0.75	-	-	0.75	0.808	0.4418	39.0	4.000
69	0.8	-	-	0.8	0.861	0.5027	34.3	4.556
70	-	21	20	0.813	0.874	0.5189	33.2	4.702
71	0.85	-	-	0.85	0.914	0.5674	30.4	5.148
72	0.9	-	-	0.9	0.963	0.6362	27.1	5.743
73	-	-	19	0.912	0.975	0.6527	26.4	5.906
74	-	20	-	0.914	0.978	0.6567	26.3	5.939
75	0.95	-	-	0.95	1.016	0.7088	24.3	6.41
76	1.0	-	-	1.0	1.067	0.7854	21.95	7.07
77	-	19	-	1.016	1.082	0.8107	21.27	7.324
78	-	-	18	1.024	1.092	0.8231	20.95	7.435
79	1.1	-	-	1.1	1.17	0.9503	18.14	8.584
80	-	-	17	1.15	1.222	1.038	16.61	9.386
81	1.2	-	-	1.2	1.273	1.131	15.24	10.19
82	-	18	-	1.219	1.293	1.167	14.77	10.537
83	-	-	16	1.291	1.367	1.309	13.18	11.692
84	1.3	-	-	1.3	1.377	1.327	12.98	11.976
85	1.4	-	-	1.4	1.478	1.539	11.2	13.872
86	-	17	-	1.422	1.501	1.589	10.85	14.313
87	-	-	15	1.45	1.529	1.65	10.45	14.883
88	1.5	-	-	1.5	1.582	1.704	10.11	15.356
89	1.6	-	-	1.6	1.684	2.011	8.575	18.118
90	-	16	-	1.626	1.709	2.075	8.307	18.678

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.N.	Met	SWG	AWG	Bare dia mm	Dia with Eenam mm	Area of bare cond sq.mm	R/Km @20 deg C ohms	Wt. kg/km
91	-	-	14	1.628	1.712	2.081	8.285	18.758
92	1.8	-	-	1.8	1.892	2.545	6.775	22.93
93	-	15	13	1.829	1.92	2.627	6.564	23.64
94	2.0	-	-	2.0	2.096	3.142	5.488	28.24
95	-	14	-	2.032	2.129	3.243	5.317	29.15
96	-	-	12	2.053	2.149	3.309	5.211	29.74
97	-	-	11	2.304	2.408	4.172	4.136	37.48
98	-	13	-	2.337	2.441	4.289	4.02	38.56
99	2.5	-	-	2.5	2.611	4.909	3.512	44.07
100	-	-	10	2.588	2.7	5.261	3.277	47.26
101	-	12	-	2.642	2.756	5.48	3.146	49.22
102	-	-	9	2.906	3.028	6.632	2.6	60.0
103	-	11	-	2.946	3.068	6.818	2.529	61.0
104	3.0	-	-	3.0	3.119	7.069	2.439	63.0
105	-	10	-	3.251	3.383	8.302	2.077	74.0
106	-	-	8	3.264	3.396	8.366	2.061	75.0
107	3.5	-	-	3.5	3.637	9.621	1.792	86.0
108	-	9	-	3.658	3.8	10.51	1.641	94.0
109	-	-	7	3.665	3.807	10.55	1.634	95.0
110	4.0	-	-	4.0	4.155	12.57	1.372	113.0
111	-	8	-	4.064	4.219	12.97	1.329	116.0
112	-	-	6	4.115	4.27	13.3	1.297	119.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX. 2

TRANSFORMERS AND CHOKE LAMINATIONS

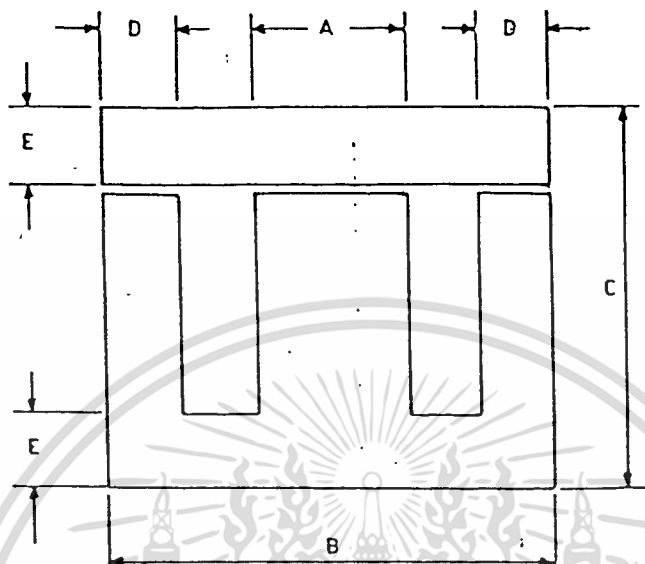
STANDARD TYPES

Type	Ref.	[refer fig A 3.1-3.2]									
		No	Drg	A cm	B cm	C cm	D cm	E cm	Ac sq. cm	Aw sq. cm	Ap cm**4
17	A3.1			1.27	3.81	3.18	0.635	0.635	1.61	1.2	1.95
12A	,,			1.59	4.76	3.97	0.794	0.794	2.52	1.884	4.75
21	,,			1.59	5.08	5.398	0.794	0.794	2.52	3.32	8.36
10	,,			1.59	6.033	5.398	0.953	0.953	2.52	4.43	11.2
10A	,,			1.59	6.033	5.398	0.953	0.953	2.52	4.43	11.2
1	,,			1.673	6.429	5.715	0.794	0.794	2.789	6.543	18.2
74	,,			1.753	5.239	4.366	0.873	0.873	3.063	2.28	6.98
23	,,			0.905	5.175	4.763	0.953	0.953	3.63	2.72	9.88
11	,,			1.905	7.62	5.715	0.953	0.953	3.63	7.26	26.4
11A	,,			1.905	7.62	6.667	0.953	0.953	3.63	9.07	32.9
2	,,			1.905	7.62	7.623	0.953	0.953	3.63	10.89	39.52
30	,,			2.0	6	5	1.0	1.0	4.0	3.0	12.0
31	,,			2.223	6.668	5.556	1.11	1.11	4.94	3.71	18.3
45	,,			2.223	6.668	5.556	1.11	1.11	4.94	3.71	18.3
15	,,			2.54	7.62	6.35	1.27	1.27	6.45	4.84	31.2
44	,,			2.54	7.62	6.35	1.27	1.27	6.45	4.84	31.2
14	,,			2.54	8.41	6.67	1.35	1.27	6.45	6.55	42.2
4	,,			2.54	9.68	9.68	1.35	1.27	6.45	15.85	102.2
33	,,			2.8	8.4	7.0	1.4	1.4	7.84	5.88	46.1
3	,,			3.175	9.525	7.94	1.59	1.59	10.08	7.54	76.0
13	,,			3.175	10.16	8.89	1.27	1.27	10.08	14.11	142.3
4A	,,			3.334	10.48	8.73	1.67	1.67	11.12	10.26	114.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ **contd.** โดยไม่ผ่านการคำ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

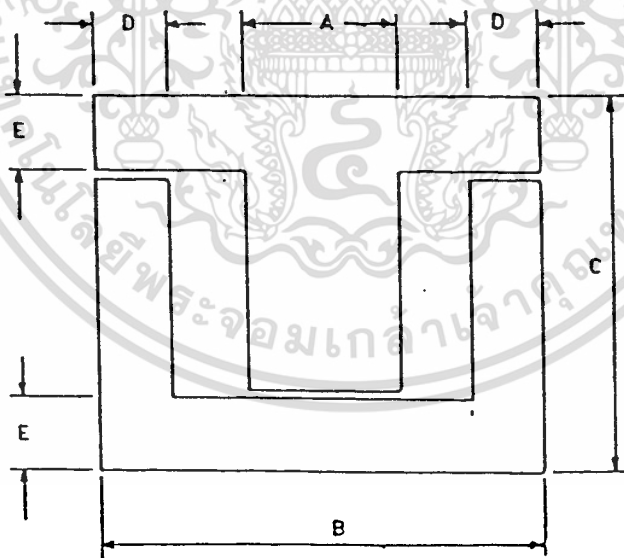
Type	Ref.	[refer fig A 3.1-3.2]							
No	Drg	A cm	B cm	C cm	D cm	E cm	Ac sq.cm	Aw sq.cm	Ap cm <sup>3</sup> x 4
16	A3.1	3.81	11.43	9.53	1.905	1.905	14.5	10.89	158.0
5	,,	3.81	12.07	9.53	1.905	1.905	14.5	12.73	184.5
6	,,	3.81	12.7	11.43	1.905	1.905	14.5	19.35	280.8
7	,,	5.08	15.24	12.54	2.54	2.54	25.8	18.95	488.9
④	,,	5.08	15.24	12.7	2.54	2.54	25.8	19.35	499.5
8	,,	5.08	18.41	17.25	2.54	2.54	25.8	51.23	1322
34	A3.2	1.59	7.94	6.35	1.275	1.275	2.5	6.68	16.3
9	,,	2.223	8.26	6.35	1.11	0.794	4.4	9.1	44.9
9A	,,	2.223	8.26	6.35	1.11	1.11	4.9	7.9	38.9
4AX	,,	2.38	9.05	8.096	1.11	1.11	5.6	13.07	74.1
75	,,	2.54	10.16	8.57	1.275	1.275	6.5	15.26	98.4
35A	,,	3.81	15.87	13.34	1.905	1.905	14.5	39.34	570.4
8B	A3.1	7.62	23.50	19.69	3.81	3.81	58.1	65.52	3804
100	,,	10.17	35.56	25.4	5.08	5.08	103.2	116.1	11988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ 168 อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



E AND I TYPE

FIG. A·3·1



I AND U TYPE

FIG. A·3·2

DIFFERENT TYPE OF STAMPINGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MOTOROLA

MC14510B

BCD UP/DOWN COUNTER

The MC14510B BCD up/down counter is constructed with CMOS P-channel and N-channel enhancement type devices in a single monolithic structure. The counter consists of type D flip flop stages with a gating structure to provide type T flip flop capability. The counter can be cleared by applying a high level on the Reset line. This complementary CMOS counter finds primary use in up/down and difference counting and frequency synthesizer applications where low power dissipation and/or high noise immunity is desired. It is also useful in A/D and D/A conversion and for magnitude and sign generation.

- Quiescent Current = 5.0 nA/package typical @ 5.0 Vdc
- Noise Immunity = 45% of VDD typical
- Diode Protection on All Inputs
- Supply Voltage Range = 3.0 Vdc to 18 Vdc
- Low Input Capacitance = 5.0 pF typical
- Internally Synchronous for High Speed
- Logic Edge-Clocked Design - Count Occurs on Positive Going Edge of Clock
- 5.0 MHz Counting Rate
- Asynchronous Preset Enable Operation
- Capable of Driving Two Low-power TTL Loads, One Low-power Schottky TTL Load or Two HTL Loads Over the Rated Temperature Range.

CMOS MSI

LOW POWER COMPLEMENTARY CMOS

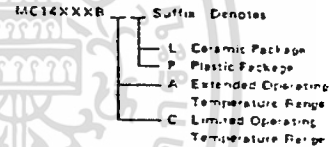
BCD UP/DOWN COUNTER



L SUFFIX CERAMIC PACKAGE CASE 620

P SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 648

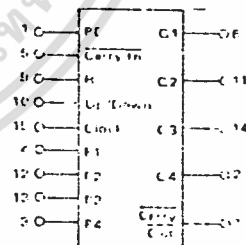
ORDERING INFORMATION



MAXIMUM RATINGS (Voltage in terms of Vcc)

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	0.5 to 18	Vdc
Logic Input Voltage	V <sub>I</sub>	0 to V <sub>CC</sub> + 0.5	Vdc
DC Current Drain (per pin)	I <sub>I</sub>	10	mAdc
Operating Temperature Range (Ceramic)	T <sub>OP</sub>	-55 to +125	°C
Operating Temperature Range (Plastic)	T <sub>OP</sub>	-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	T <sub>S</sub>	-65 to +150	°C

CLOCK DIAGRAM



V<sub>CC</sub> = 5Vdc  
V<sub>EE</sub> = 0Vdc

TRUTH TABLE

UP/DOWN	UP/DOWN	Pin 1 (PE)	Pin 5 (Clock In)	Pin 8 (H)	Pin 10 (Up/Down)	Pin 11 (Clock)	Pin 12 (F0)	Pin 13 (F1)	Pin 14 (F2)	Pin 15 (F3)	Pin 16 (F4)
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	T <sub>low</sub> *		25°C			T <sub>high</sub> *		Unit	
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max		
Input Voltage V <sub>in</sub> = V <sub>DD</sub> or 0	"0" Level V <sub>OL</sub>	5.0		1.0		1	0.5		0.05	V <sub>dc</sub>	
		10		0.75		1	0.5		0.05	V <sub>dc</sub>	
		15		0.5		1	0.5		0.05	V <sub>dc</sub>	
V <sub>in</sub> = 0 or V <sub>DD</sub>	"1" Level V <sub>OH</sub>	5.0	4.5		4.5	5.0		4.5	5.0	V <sub>dc</sub>	
		10	5.1		5.0	5.0		5.0	5.0	V <sub>dc</sub>	
		15	14.1		14.5	15		14.9	15.0	V <sub>dc</sub>	
Output Voltage V <sub>o</sub> = 0 or V <sub>DD</sub>	"0" Level V <sub>OL</sub>	5.0		1.5		1.5		1.5		V <sub>dc</sub>	
		10		1.0		1.0		1.0		V <sub>dc</sub>	
		15		0.7		0.7		0.7		V <sub>dc</sub>	
	"1" Level V <sub>OH</sub>	5.0	2.1		2.4		2.4		2.5	V <sub>dc</sub>	
		10	1		1.1		1.1		1.0	V <sub>dc</sub>	
		15	11.0		11.0		11.0		11.0	V <sub>dc</sub>	
Output Drive Current (AL Device) Source	I <sub>OH</sub>	5.0	1.2		1.0	1.2		-0.7		mA <sub>dc</sub>	
		5.0	-0.25		0.2	0.25		-0.14		mA <sub>dc</sub>	
		10	-0.62		-0.5	-0.9		-0.25		mA <sub>dc</sub>	
		15	-1.1		-1.5	-3.1		-1.1		mA <sub>dc</sub>	
	Sink	I <sub>OL</sub>	5.0	0.04		0.1	0.8		0.36		mA <sub>dc</sub>
			10	1.6		1.3	2.25		0.9		mA <sub>dc</sub>
			15	4.2		3.4	8.8		2.4		mA <sub>dc</sub>
			5.0	-1.0		-0.8	-1.7		-0.6		mA <sub>dc</sub>
	Source	I <sub>OH</sub>	5.0	-0.2		-0.16	-0.36		-0.12		mA <sub>dc</sub>
			5.0	-0.2		-0.16	-0.36		-0.12		mA <sub>dc</sub>
			10	-0.5		-0.4	-0.9		-0.3		mA <sub>dc</sub>
			15	-1.4		-1.2	-3.5		-1.0		mA <sub>dc</sub>
Sink	I <sub>OL</sub>	5.0	0.02		0.44	0.8		0.36		mA <sub>dc</sub>	
		10	1.3		1.1	2.25		0.9		mA <sub>dc</sub>	
		15	3.6		3.0	8.8		2.4		mA <sub>dc</sub>	
		5.0	-		-0.1	-		-1.0		μA <sub>dc</sub>	
15	-		-0.3	-		-1.0		μA <sub>dc</sub>			
5.0	-		-	5.0	7.5		-		pF		
Quiescent Current (AL Device) (Per Package)	I <sub>DD</sub>	5.0		5.0		0.005	5.0		150	μA <sub>dc</sub>	
		10		10		0.010	10		300	μA <sub>dc</sub>	
		15		20		0.015	20		600	μA <sub>dc</sub>	
Quiescent Current (AL/CP Device) (Per Package)	I <sub>DD</sub>	5.0		20		0.005	20		150	μA <sub>dc</sub>	
		10		40		0.010	40		300	μA <sub>dc</sub>	
		15		80		0.015	80		600	μA <sub>dc</sub>	
Supply Current (AL/CP Device plus Constant) (Per Package) * I <sub>DD</sub> = 30 μF or 2 outputs, all other's switched	I <sub>T</sub>	5.0				I <sub>T</sub> = (0.55 μA/Hz) × I <sub>DD</sub>				μA <sub>dc</sub>	
		10				I <sub>T</sub> = (1.2 μA/Hz) × I <sub>DD</sub>				μA <sub>dc</sub>	
		15				I <sub>T</sub> = (1.7 μA/Hz) × I <sub>DD</sub>				μA <sub>dc</sub>	

\* 15°C for AL Device, -40°C for AL/CP Device.  
 † -125°C to AL Device, +85°C for AL/CP Device.  
 ‡ Community standard for worst case input combination.  
 § 20 MHz for both "1" and "0" level: 1.0 Vdc min (V<sub>DD</sub> - 5.0 Vdc), 2.0 Vdc min (V<sub>DD</sub> - 10 Vdc), 2.5 Vdc min (V<sub>DD</sub> - 15 Vdc).  
 ¶ State totals only, current at loads other than 50 pF.  
 †† I<sub>T</sub>(CL) = I<sub>T</sub>(20 pF) + 1 × 10<sup>-3</sup> (CL - 20) V<sub>DD</sub>.  
 ††† I<sub>T</sub> is in μA per package, CL in pF, V<sub>DD</sub> in Vdc, and f in MHz output frequency.  
 †††† Figures given are for the typical characteristics only at 25°C.

This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields, however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For proper operation it is recommended that V<sub>in</sub> and V<sub>OH</sub> be constrained to the range V<sub>DD</sub> ± (V<sub>in</sub> or V<sub>OH</sub>) ≤ V<sub>DD</sub>. Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (either V<sub>DD</sub> or V<sub>SS</sub>).

SWITCHING CHARACTERISTICS (C<sub>L</sub> = 50 pF, T<sub>A</sub> = 25°C)

Characteristic	Symbol	VDD	All Types			Unit
			Min	Typ	Max	
<b>Output Rise Time</b> $t_{rLH} = (3.0 \text{ ns/pF}) C_L + 30 \text{ ns}$ $t_{rLH} = (1.5 \text{ ns/pF}) C_L + 15 \text{ ns}$ $t_{rLH} = (1.1 \text{ ns/pF}) C_L + 10 \text{ ns}$	$t_{rLH}$	5.0 10 15	— — —	180 90 65	300 100 120	ns
<b>Output Fall Time</b> $t_{fHL} = (1.5 \text{ ns/pF}) C_L + 25 \text{ ns}$ $t_{fHL} = (0.75 \text{ ns/pF}) C_L + 12.5 \text{ ns}$ $t_{fHL} = (0.55 \text{ ns/pF}) C_L + 9.5 \text{ ns}$	$t_{fHL}$	5.0 10 15	— — —	100 50 40	200 100 60	ns
<b>Propagation Delay Time</b> <b>Clock to Q</b> $t_{PLH, \text{PHL}} = (1.7 \text{ ns/pF}) C_L + 230 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.66 \text{ ns/pF}) C_L + 97 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.5 \text{ ns/pF}) C_L + 75 \text{ ns}$ <b>Clock to Carry Out</b> $t_{PLH, \text{PHL}} = (1.7 \text{ ns/pF}) C_L + 230 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.66 \text{ ns/pF}) C_L + 97 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.5 \text{ ns/pF}) C_L + 75 \text{ ns}$ <b>Carry In to Carry Out</b> $t_{PLH, \text{PHL}} = (1.7 \text{ ns/pF}) C_L + 55 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.66 \text{ ns/pF}) C_L + 47 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.5 \text{ ns/pF}) C_L + 35 \text{ ns}$ <b>Reset or Reset to 0</b> $t_{PLH, \text{PHL}} = (1.7 \text{ ns/pF}) C_L + 230 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.66 \text{ ns/pF}) C_L + 97 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.5 \text{ ns/pF}) C_L + 75 \text{ ns}$ <b>Reset or Reset of Carry Out</b> $t_{PLH, \text{PHL}} = (1.7 \text{ ns/pF}) C_L + 465 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.6 \text{ ns/pF}) C_L + 192 \text{ ns}$ $t_{PLH, \text{PHL}} = (0.5 \text{ ns/pF}) C_L + 125 \text{ ns}$	$t_{PLH, \text{PHL}}$	5.0 10 15	— — —	315 130 100	630 260 200	ns
<b>Clock Pulse Width</b>	$t_{WH}$	5.0 10 15	350 170 140	200 100 75	— — —	ns
<b>Clock Pulse Frequency</b>	$f_{cl}$	5.0 10 15	— — —	3.0 6.0 8.0	1.0 3.0 4.0	MHz
<b>Reset or Reset Removal Time**</b>	$t_{rem}$	5.0 10 15	660 230 160	325 115 90	— — —	ns
<b>Clock Rise and Fall Time</b>	$t_{rLH}, t_{fHL}$	5.0 10 15	— — —	— — —	15 16 15	ps
<b>Carry In Setup Time</b>	$t_{su}$	5.0 10 15	200 120 100	130 60 50	— — —	ns
<b>Carry Out Setup Time</b>	$t_{su}$	5.0 10 15	600 200 175	250 100 75	— — —	ns
<b>Reset Enable Pulse Width</b>	$t_{WH}$	5.0 10 15	200 100 80	100 50 40	— — —	ns

\*The formula given is for the typical characteristic only.

\*\*The Reset or Reset Signal must be Low prior to 2 (two) rising and falling edges of the clock.

FIGURE 1 - POWER DISSIPATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

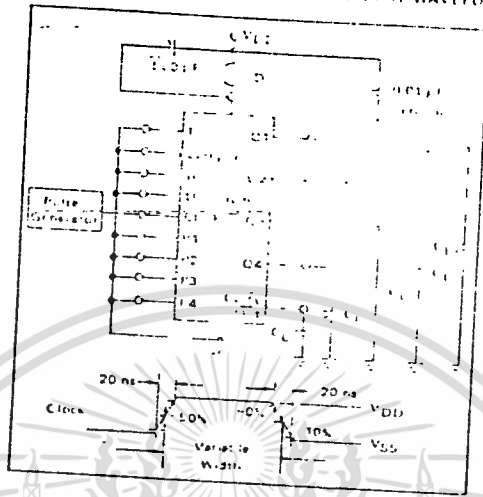
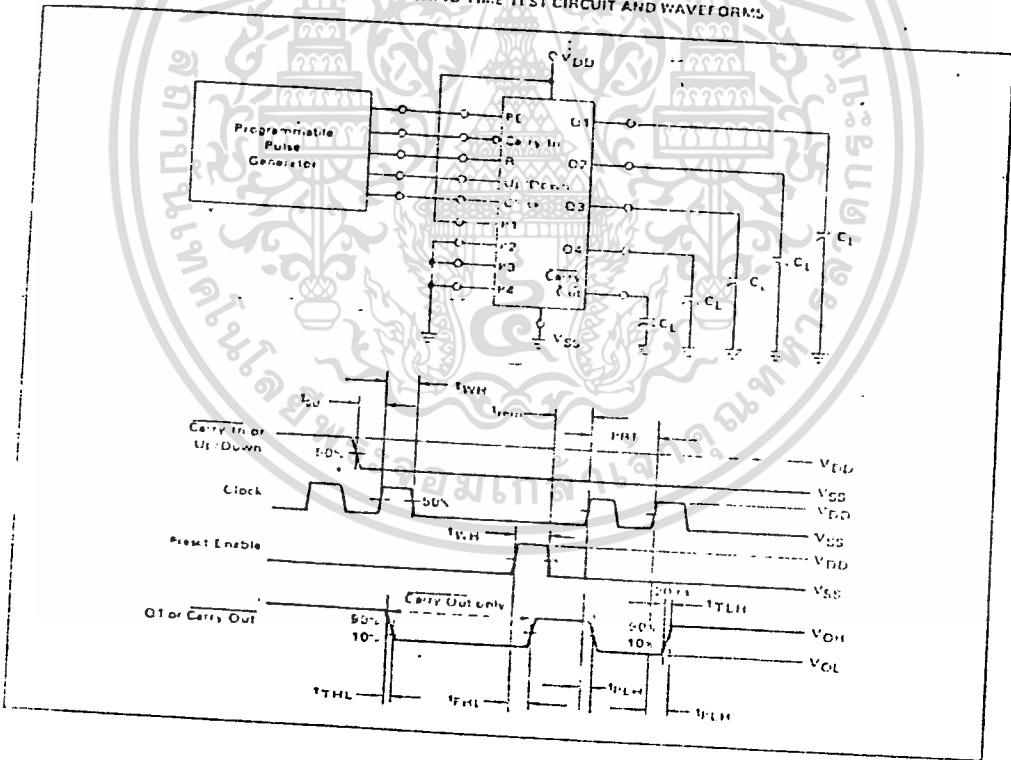
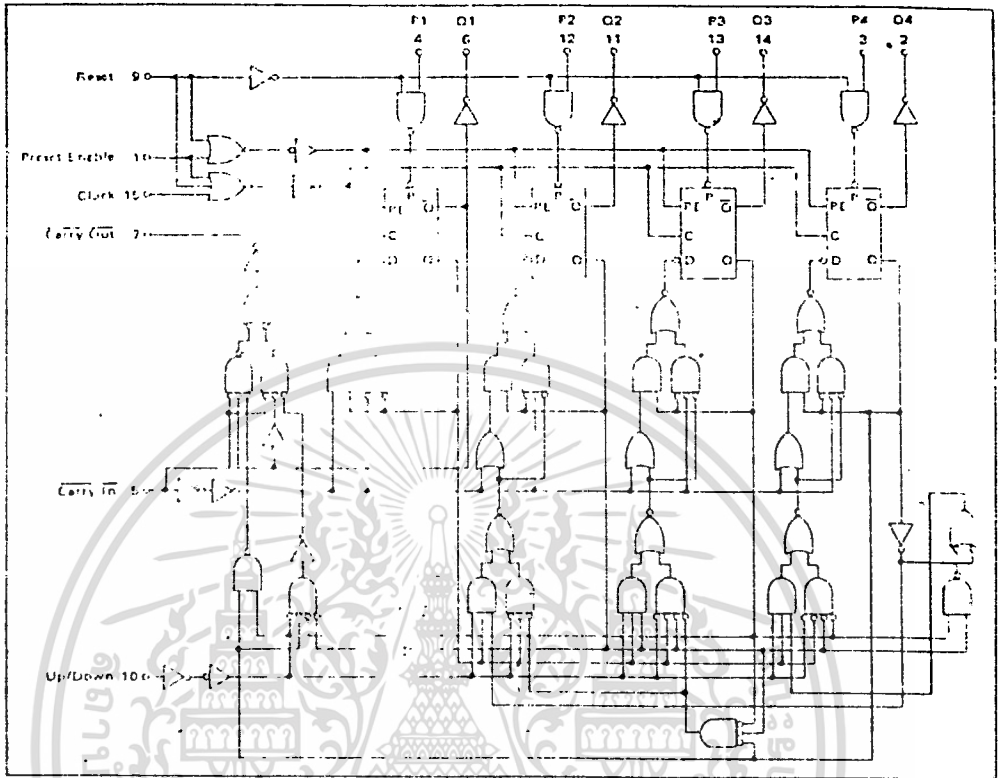


FIGURE 2 - SWITCHING TIME TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS



LOGIC DIAGRAM



TIMING DIAGRAM

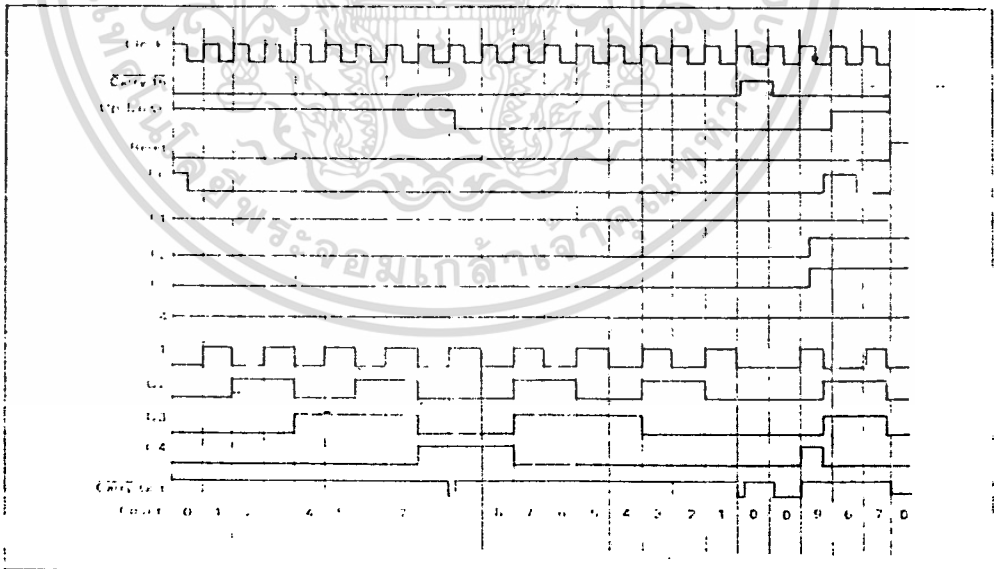


FIGURE 7 - PROGRAMMABLE CASCADABLE FREQUENCY DIVIDER

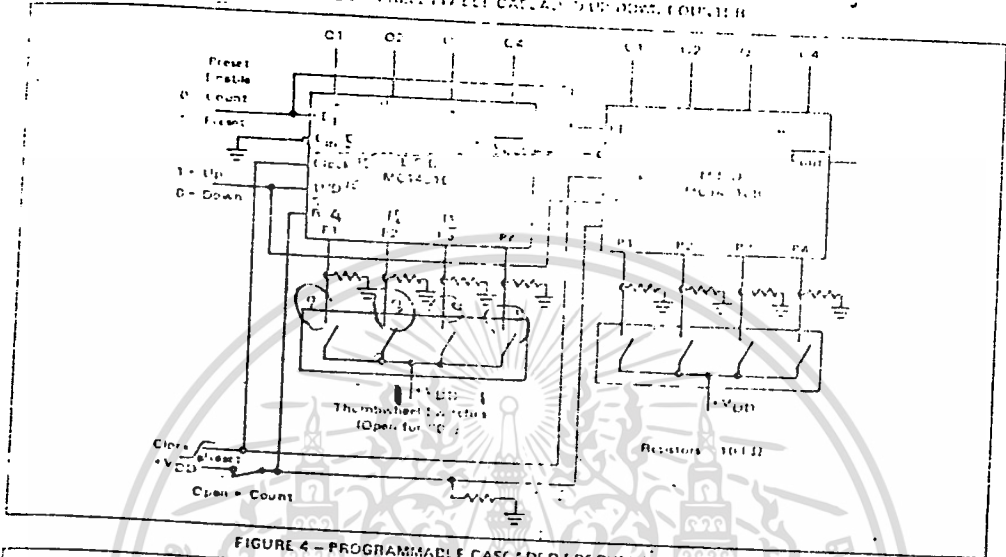
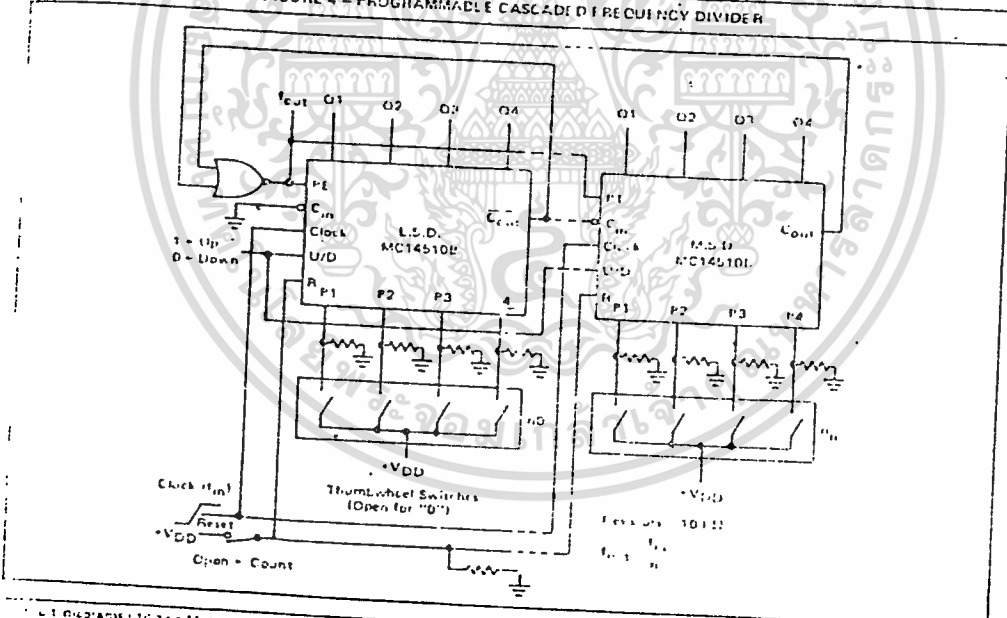


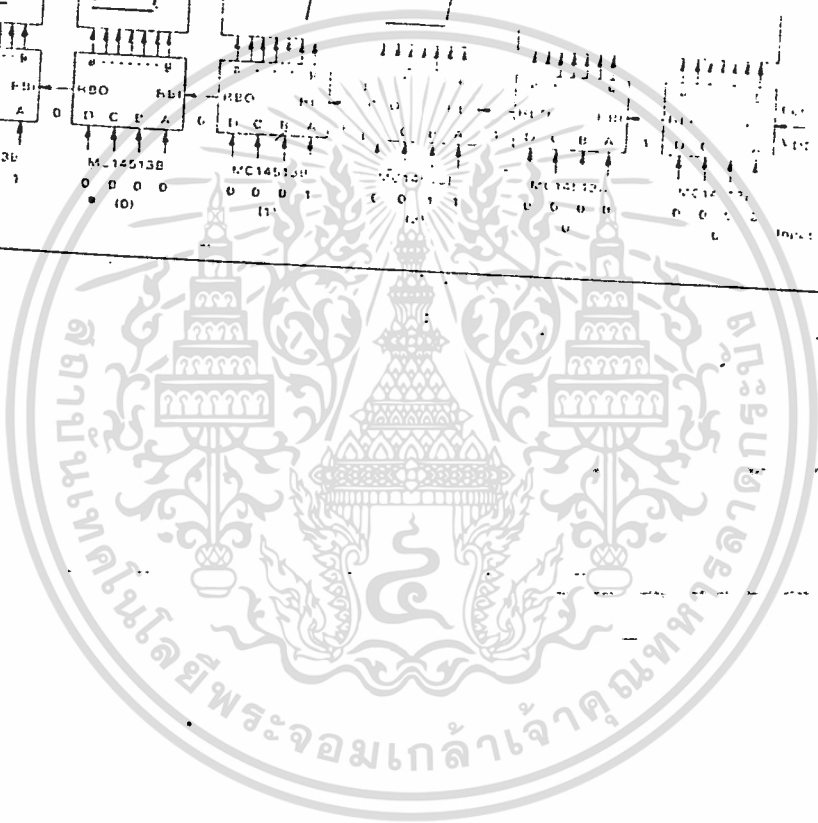
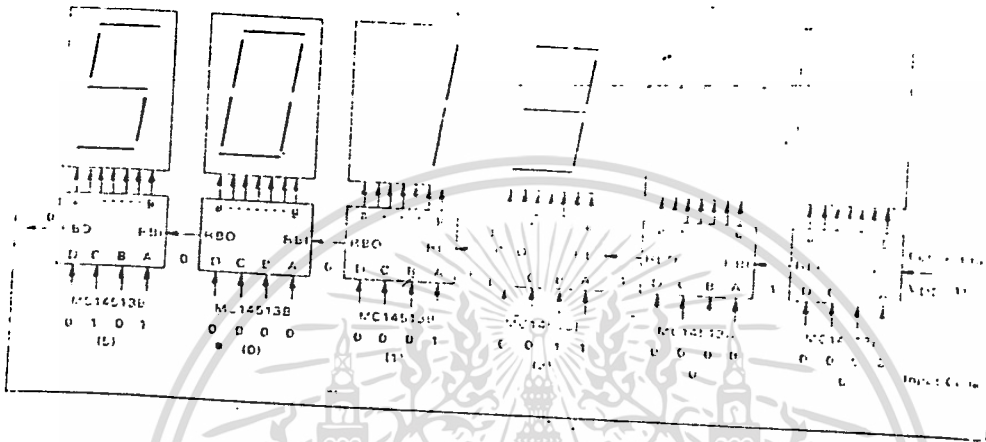
FIGURE 4 - PROGRAMMABLE CASCADABLE FREQUENCY DIVIDER



This diagram is a typical application of Motorola products and is included as a service to our customers. It is not intended to be used for any other purpose. Motorola does not assume any responsibility for the use of this information in any other application. The information has been carefully checked and is believed to be entirely reliable. However, no responsibility is assumed for the consequences of any use of this information in any other application. The information is given as a service to the purchaser of the product and is not intended to be used for any other purpose.

TYPICAL APPLICATIONS FOR DIGITAL BLANKING (Cont)

TRAILING EDGE ZERO SUPPRESSION



7



MOTOROLA

**B-SUFFIX SERIES CMOS GATES**

The B Series logic gates are constructed with 2<sup>n</sup> input CMOS technology using metal gate devices in a single layer metal structure (metal over polysilicon MOS). Their primary use is as a logic buffer or inverter and/or high noise immunity is desired.

- Quiescent Current = 0.5 nA typical @ 5V<sub>DD</sub>
- AC Immunity = 45% of V<sub>DD</sub> Typ
- Supply Voltage Range = 3.0 Vdc to 18 Vdc
- All Outputs Buffered
- Capable of Driving Two Low-power TTL Loads or One Low-power Schottky TTL Load or Two TTL Loads in the Rate-10 Input Load Range.
- Double Diode Protection on All Inputs
- Pin-for-Pin Replacements for Corresponding CD4000 Series B-Suffix Devices

**ORDERING INFORMATION**

MC14XXXB - Suffix Denotes



**L SUFFIX**  
CERAMIC PACKAGE  
CA 14032

- L - Ceramic Package
- P - Plastic Package
- A - Extended Operating Temperature Range
- C - Limited Operating Temperature Range



**P SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CA 14040

**MAXIMUM RATINGS** (Values are referred to V<sub>SS</sub>)

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V <sub>DD</sub>	3.0 - 18	Vdc
Input Voltage - All Inputs	V <sub>IN</sub>	V <sub>DD</sub> - 0.5	Vdc
Current Drain per Pin	I <sub>I</sub>	10	μA
Operating Temperature Range - All Devices	T <sub>A</sub>	Commercial	0 to 70
		CL, CF Devices	-40 to 125
Storage Temperature Range	T <sub>STG</sub>	Commercial	-55 to 150
		CL, CF Devices	-65 to 150

This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields; however, it is advised that maximum precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For precise operation it is recommended that V<sub>IN</sub> and V<sub>OUT</sub> be constrained to the range V<sub>DD</sub> < V<sub>IN</sub> or V<sub>OUT</sub> < V<sub>DD</sub>.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V<sub>SS</sub> or V<sub>DD</sub>).

- MC14001B  
Quad 2-Input NOR Gate
- MC14002B  
Dual 4-Input NOR Gate
- MC14011B  
Quad 2-Input NAND Gate
- MC14012B  
Dual 4-Input NAND Gate
- MC14023B  
Triple 3-Input NAND Gate
- MC14025B  
Triple 3-Input NOR Gate
- MC14068B  
8-Input NAND Gate
- MC14071B  
Quad 2-Input OR Gate
- MC14072B  
Dual 4-Input OR Gate
- MC14073B  
Triple 3-Input AND Gate
- MC14075B  
Triple 3-Input OR Gate
- MC14078B  
8-Input NOR Gate
- MC14081B  
Quad 2-Input AND Gate
- MC14082B  
Dual 4-Input AND Gate

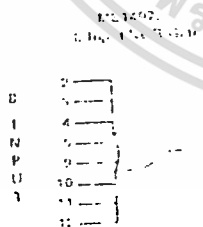
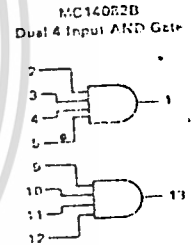
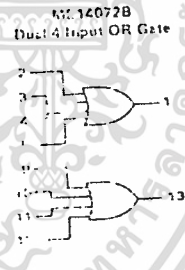
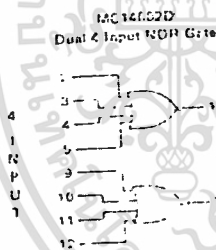
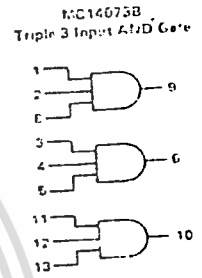
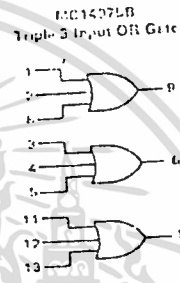
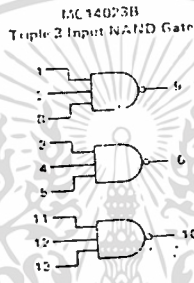
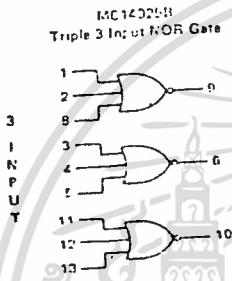
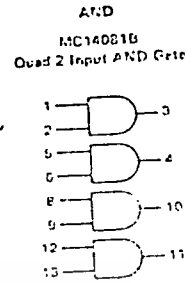
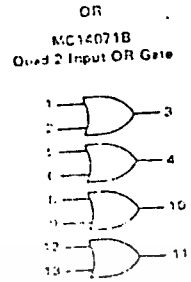
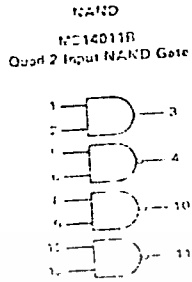
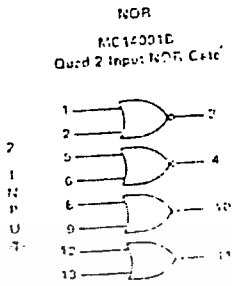
**CMOS SSI**

FUNCTIONAL COMPLEMENTARY MOS

**B-SERIES GATES**

# CMOS B-SERIES GATES

## LOGIC DIAGRAMS



V. D. Jan 14  
Rev. P. 7  
10-2-11-13

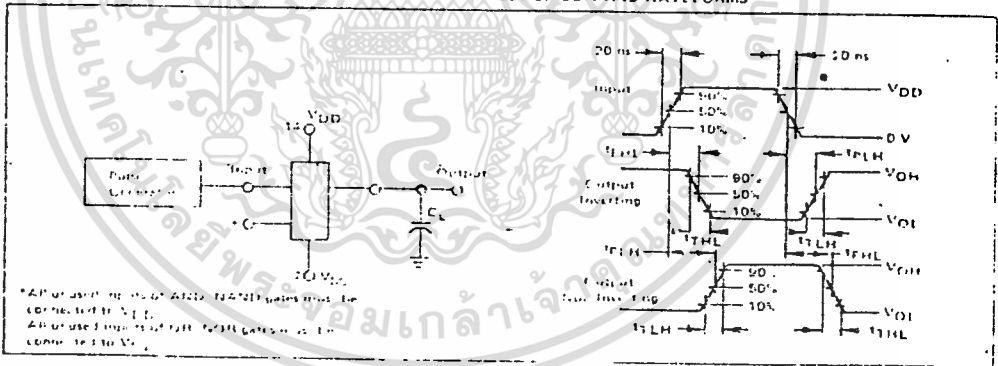
B-SERIES GATE SWITCHING TIMES

SWITCHING CHARACTERISTICS\* (C<sub>L</sub> = 50 pF, T<sub>A</sub> = 25° C)

Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	Min	Typ	Max	Unit
Output Rise Time, All B-Series Gates †T <sub>HL</sub> (1.25 ns/pf) C <sub>L</sub> + 23 ns †T <sub>LH</sub> (0.60 ns/pf) C <sub>L</sub> + 20 ns †T <sub>LH</sub> (0.40 ns/pf) C <sub>L</sub> + 20 ns	†T <sub>HL</sub>	5.0 10 15	-	100 50 40	200 100 -	ns
Output Fall Time, All B-Series Gates †T <sub>HL</sub> (1.35 ns/pf) C <sub>L</sub> + 31 ns †T <sub>LH</sub> (0.60 ns/pf) C <sub>L</sub> + 20 ns †T <sub>LH</sub> (0.40 ns/pf) C <sub>L</sub> + 20 ns	†T <sub>FH</sub>	5.0 10 15	-	100 50 40	200 100 80	ns
Propagation Delay Time MC14001B, MC14011B only †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.20 ns/pf) C <sub>L</sub> + 80 ns †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.36 ns/pf) C <sub>L</sub> + 32 ns †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.26 ns/pf) C <sub>L</sub> + 27 ns All Other 2, 3, and 4 Input Gates †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.80 ns/pf) C <sub>L</sub> + 115 ns †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.36 ns/pf) C <sub>L</sub> + 47 ns †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.26 ns/pf) C <sub>L</sub> + 37 ns B-Input Gates (MC1406BR, MC1407BR) †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.50 ns/pf) C <sub>L</sub> + 155 ns †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.36 ns/pf) C <sub>L</sub> + 62 ns †P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub> (0.26 ns/pf) C <sub>L</sub> + 47 ns	†P <sub>LH</sub> , †P <sub>HL</sub>	5.0 10 15  5.0 10 15  5.0 10 15	- - -  - - -  - - -	125 50 40  160 65 50  200 80 60	250 100 80  200 130 100  350 150 110	ns

\*The formulas given are for the typical characteristics only.

FIGURE 1 - SWITCHING TIME TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS



# CMOS B-SERIES GATES

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

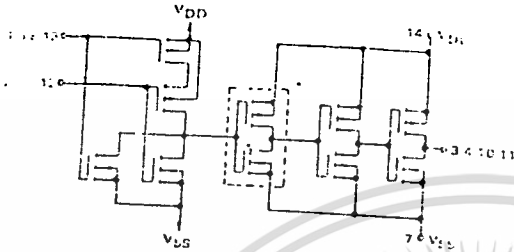
Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> V <sub>OH</sub>	T <sub>typ</sub>			25°C			T <sub>High</sub>		Unit
			Min	Max	Min	Min	Max	Min	Max		
Output Voltage (AL Device) V <sub>OH</sub> (I <sub>OH</sub> = 0 mA)	V <sub>OH</sub>	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	V	
		5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	V	
Output Voltage (CL-CP Device) V <sub>OH</sub> (I <sub>OH</sub> = 10 μA) V <sub>OL</sub> (I <sub>OL</sub> = 15 mA)	V <sub>OH</sub> V <sub>OL</sub>	5.0 0.1	4.9 0.1	4.8 0.1	4.7 0.1	4.6 0.1	4.5 0.1	4.4 0.1	4.3 0.1	V	
		5.0 0.1	4.9 0.1	4.8 0.1	4.7 0.1	4.6 0.1	4.5 0.1	4.4 0.1	4.3 0.1	V	
Output Voltage (AL Device) V <sub>OH</sub> (I <sub>OH</sub> = 10 μA) V <sub>OL</sub> (I <sub>OL</sub> = 15 mA)	V <sub>OH</sub> V <sub>OL</sub>	5.0 0.1	4.9 0.1	4.8 0.1	4.7 0.1	4.6 0.1	4.5 0.1	4.4 0.1	4.3 0.1	V	
		5.0 0.1	4.9 0.1	4.8 0.1	4.7 0.1	4.6 0.1	4.5 0.1	4.4 0.1	4.3 0.1	V	
Output Drive Current (AL Device) Source Sink	I <sub>OH</sub>	2.5 V <sub>OH</sub>	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	mA	
		4.6 V <sub>OH</sub>	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	mA	
		9.5 V <sub>OH</sub>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	mA	
	I <sub>OL</sub>	2.5 V <sub>OL</sub>	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	mA	
		4.6 V <sub>OL</sub>	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	mA	
		9.5 V <sub>OL</sub>	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	mA	
Output Drive Current (CL-CP Device) Source Sink	I <sub>OH</sub>	2.5 V <sub>OH</sub>	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	mA	
		4.6 V <sub>OH</sub>	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	mA	
		9.5 V <sub>OH</sub>	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	mA	
	I <sub>OL</sub>	2.5 V <sub>OL</sub>	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	mA	
		4.6 V <sub>OL</sub>	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	mA	
		9.5 V <sub>OL</sub>	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	mA	
Input Current (AL Device)	I <sub>in</sub>	15	15	15	15	15	15	15	nA		
Input Current (CL-CP Device)	I <sub>in</sub>	15	15	15	15	15	15	15	nA		
Input Capacitance (I <sub>in</sub> = 0)	C <sub>in</sub>	15	15	15	15	15	15	15	pF		
Quiescent Current (AL Device) (P <sub>in</sub> = 0)	I <sub>DD</sub>	5.0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	μA	
		2.5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	μA	
		15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	μA	
Quiescent Current (CL-CP Device) (P <sub>in</sub> = 0)	I <sub>DD</sub>	5.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	μA	
		2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	μA	
		15	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	μA	
Total Supply Current (†) † Dynamic Load (C <sub>L</sub> = 50 pF)	I <sub>T</sub>	5.0	10	10	10	10	10	10	10	mA	
		2.5	20	20	20	20	20	20	20	mA	
		15	40	40	40	40	40	40	40	mA	

† I<sub>DD</sub> = 100 μA (AL Device), 400 μA (CL-CP Device)  
 † I<sub>T</sub> = 125 μA (AL Device), 250 μA (CL-CP Device)  
 † The minimum is required for worst case input combination  
 † V<sub>OH</sub> Min = 4.9 V (I<sub>OH</sub> = 10 μA) and V<sub>OL</sub> Max = 0.1 V (I<sub>OL</sub> = 15 mA)  
 † V<sub>OH</sub> Min = 4.9 V (I<sub>OH</sub> = 10 μA) and V<sub>OL</sub> Max = 0.1 V (I<sub>OL</sub> = 15 mA)  
 † To calculate total supply current at loads other than 10 μA  
 $I_T (ICL) = I_{DD} (I) + n \times 10^{-3} (ICL - 50) V_{DD}$   
 where I<sub>T</sub> is in mA (per package), C<sub>L</sub> in pF, V<sub>DD</sub> in Volts, f in kHz is input frequency and n is number of gates per IC package  
 † The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C

# CMOS B-SERIES GATES

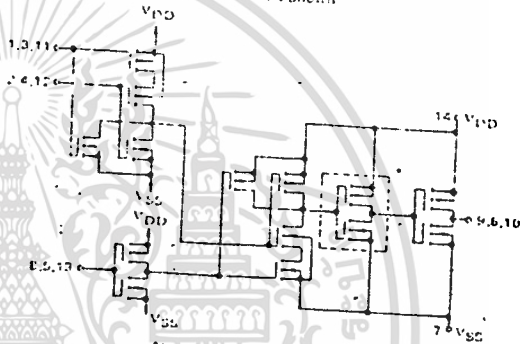
## CIRCUIT SCHEMATIC NOR, OR Gates

MC14001B  
MC14071B  
One of Four  
Gates Shown



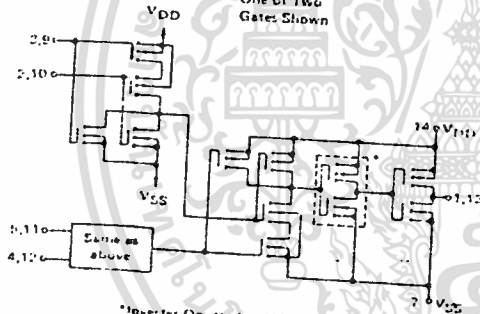
\*Inverter Omitted in MC14001B

MC14025B  
MC14075B  
One of Three  
Gates Shown



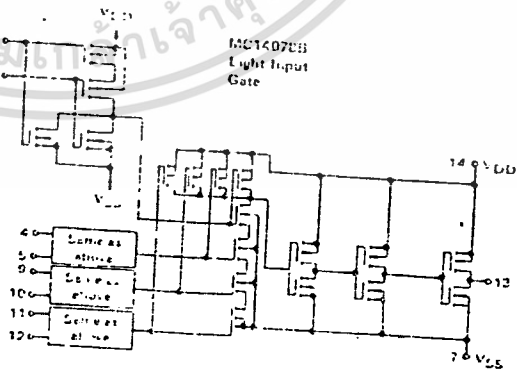
\*Inverter Omitted in MC14025B

MC14002B  
MC14072B  
One of Two  
Gates Shown



\*Inverter Omitted in MC14002B

MC14072B  
Light Input  
Gate



CIRCUIT SCHEMATICS  
NAND, AND Gates

MC14011B  
MC14051B  
One of Four  
Gates Shown

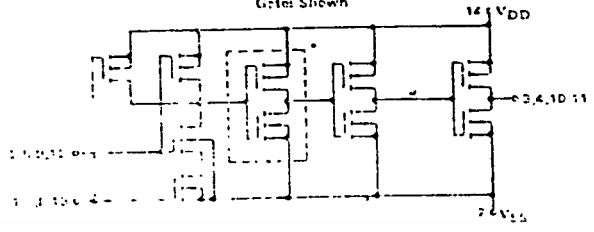
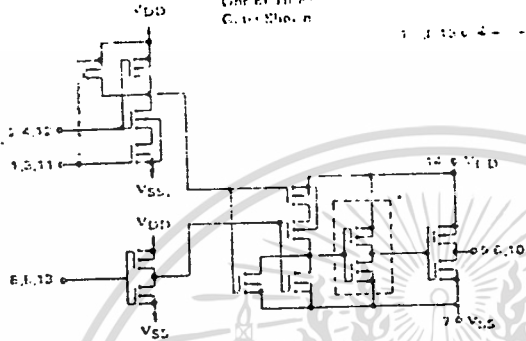


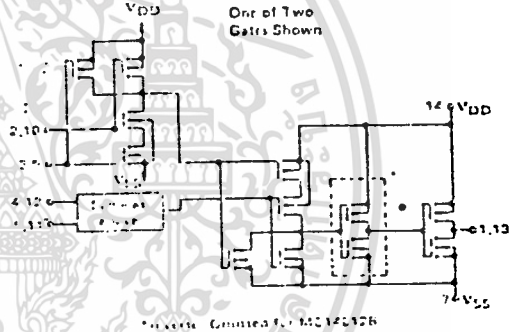
FIGURE 1-10 MC14011B

MC14022B  
MC14072B  
One of Three  
Gates Shown



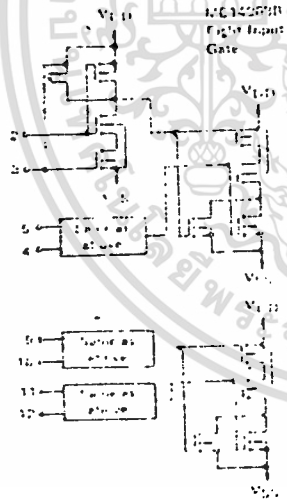
\*Inverter Connected to MC14022B

MC14012B  
MC14052B  
One of Two  
Gates Shown



\*Inverter Connected to MC14012B

MC14022B  
Eight Input  
Gate

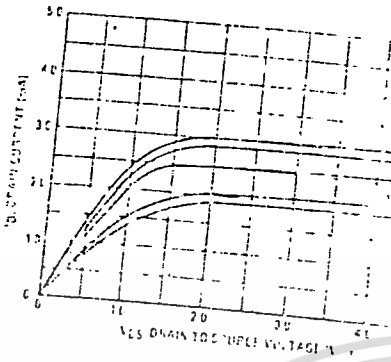


7

TYPICAL BULK GATE CHARACTERISTICS

N-CHANNEL DRAIN CURRENT (I<sub>DN</sub>)

FIGURE 2 - V<sub>GS</sub> = 5.0 Vdc



P-CHANNEL DRAIN CURRENT (I<sub>DP</sub>)

FIGURE 3 - V<sub>GS</sub> = 5.0 Vdc

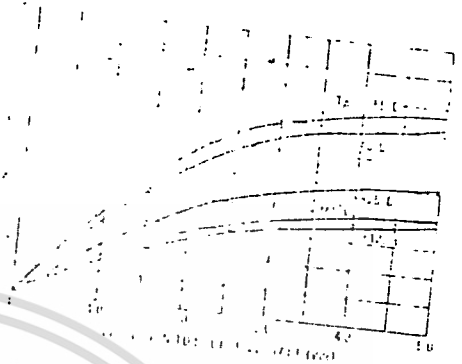


FIGURE 4 - V<sub>GS</sub> = 10 Vdc

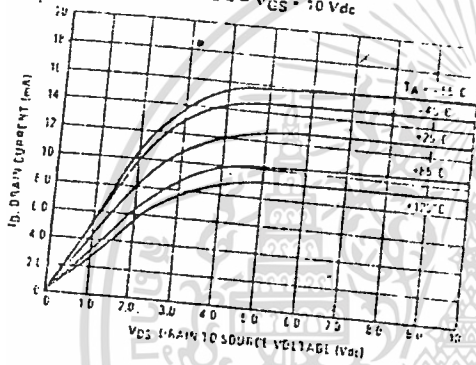


FIGURE 5 - V<sub>GS</sub> = 10 Vdc

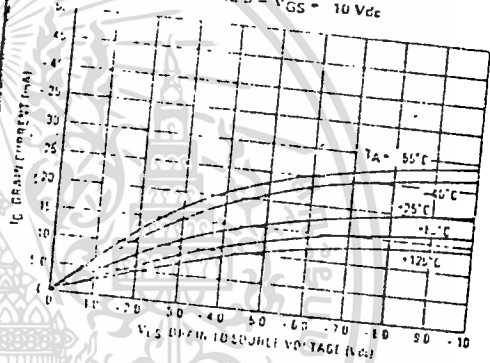


FIGURE 6 - V<sub>GS</sub> = 15 Vdc

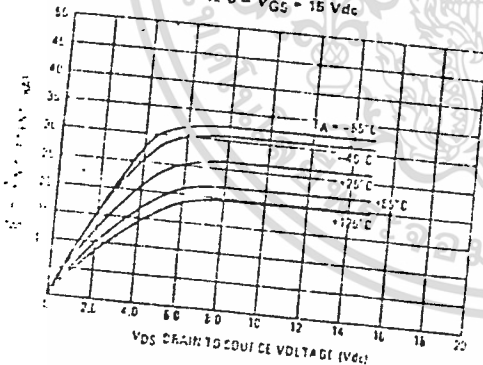
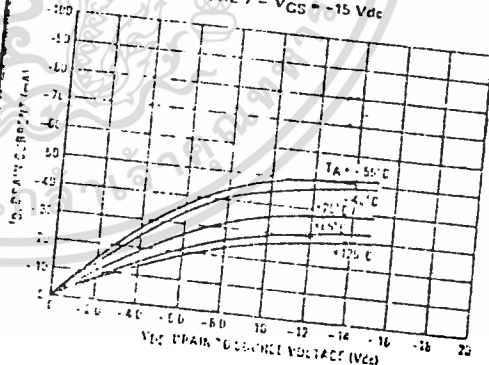


FIGURE 7 - V<sub>GS</sub> = 15 Vdc



7

FIGURE 8 -  $V_{DD} = 5.0 \text{ Vdc}$

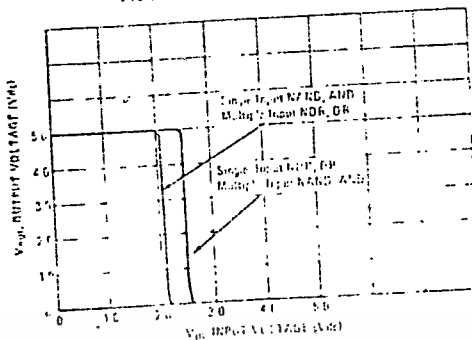


FIGURE 9 -  $V_{DD} = 10 \text{ Vdc}$

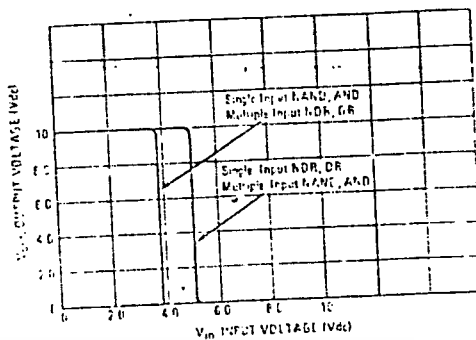
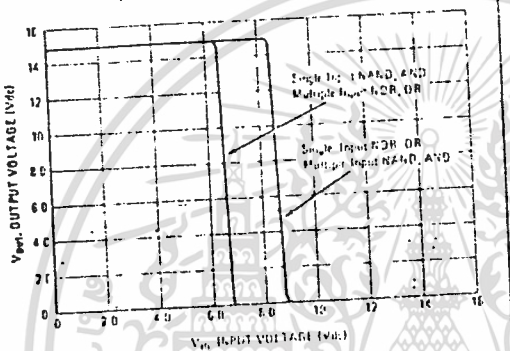


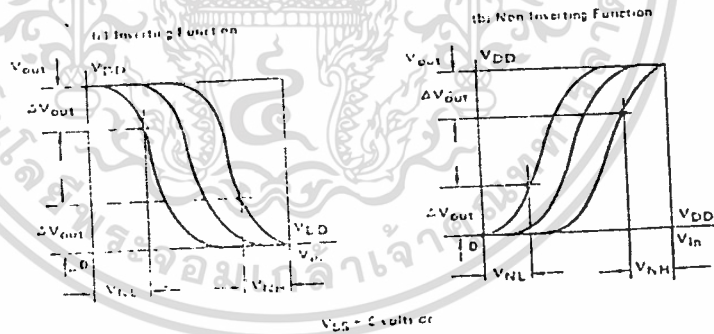
FIGURE 10 -  $V_{DD} = 15 \text{ Vdc}$



DC NOISE IMMUNITY ( $V_{NL}$  AND  $V_{NH}$ )

The DC noise immunity is defined as the input voltage range from an ideal "1" or "0" input level (assuming the previous CMOS driving state is unloaded which does not produce output state (combination) change(s)). The typical and limit values of the input ranges  $V_{NL}$  and  $V_{NH}$  for the output to stay within a range  $\pm V_{out}$  from either  $V_{DD}$  or  $V_{SS}$  are given in the Electrical Characteristics table. The definitions of  $V_{NL}$ ,  $V_{NH}$ , and  $\pm V_{out}$  are illustrated in Figure 11 for inverting and non-inverting functions.

FIGURE 11 - DC NOISE IMMUNITY





BCD-TO-SEVEN SEGMENT LATCH/DECODER/DRIVER

The MC14513B BCD-to-seven segment latch/decoder/driver is constructed with complementary MOS (CMOS) enhancement mode devices and NPN bipolar output drivers in a single monolithic structure. The circuit provides the functions of a 4-bit storage latch, an 8421 BCD-to-seven segment decoder, and an output drive capability. Lamp test (LT), blanking (BL), and latch enable (LE) inputs are used to test the display, to turn off or pulse modulate the brightness of the display, and to store a BCD code, respectively. The Ripple Carry Input (RCI) and Ripple Carry Output (RCO) can be used to connect multiple latches in series. It can be used with 5V CMOS or 10V CMOS (MC14513D) packaged Small Outline Transistors (SOT) or through-hole or leaded components directly or indirectly.

Applications include: instrument (e.g., counter, DVM, etc.) display driver, computer calculator display driver, cockpit display driver, and various clock, watch, and timer uses.

- Quiescent Current: 5.0 mA (typical @ 5 Vdc)
- Low Logic Circuit Power Dissipation
- High Current Sourcing Outputs (Up to 25 mA)
- Latch Storage of Binary Input
- Blanking Input
- Lamp Test Provision
- Readout Blanking on all Illegal Input Combinations
- Lamp Intensity Modulation Capability
- True Sine (Multiplexing) Capability
- Adds Ripple Blanking In, Ripple Blanking Out to MC14511B
- Supply Voltage Range: 3.0 Vdc to 18 Vdc
- Capable of Driving Two Low Power TTL Loads, One Low Power Schottky TTL Load to Ten TTL Loads Over the Rated Temperature Range

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	3.0 to 18	Vdc
Input Voltage (All Inputs)	V <sub>I</sub>	0 to V <sub>CC</sub> + 0.5	Vdc
Output Current (Per Output)	I <sub>O</sub>	10	mA (dc)
Operating Temperature Range	T <sub>OP</sub>	-55 to +125	°C
Storage Temperature Range	T <sub>STG</sub>	-65 to +150	°C
Maximum Power Dissipation (Per Output)	P <sub>DM</sub>	25	mW
Maximum Junction Temperature	T <sub>JM</sub>	150	°C

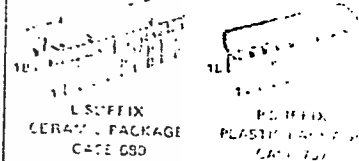
Note 1: See Note 1 of MC14511B.

Stresses in excess of those indicated above may cause permanent damage to the device. These conditions are intended to define a rating condition. For life, reliability, and performance, the user should observe the maximum ratings. The user should also observe the recommended operating conditions. The user should also observe the recommended operating conditions. The user should also observe the recommended operating conditions.

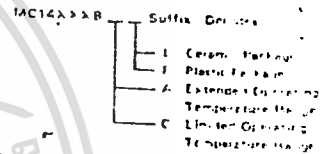
CMOS MSI

(LOW POWER COMPLEMENTARY MOS)

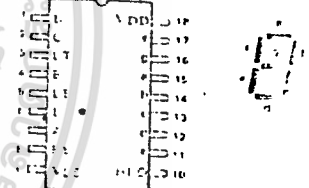
BCD-TO-SEVEN SEGMENT LATCH/DECODER/DRIVER WITH RIPPLE BLANKING



ORDERING INFORMATION



PIN ASSIGNMENT



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	VDD Vdc	T <sub>low</sub> *		T <sub>high</sub> *			T <sub>high</sub> *		Unit
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
Output Voltage - Segment Outputs V <sub>OL</sub> = VDD - 0	VOL	5.0		0.05		0	0.05		0.05	Vdc
		10		0.1		0	0.1		0.1	
		15		0.15		0	0.15		0.15	
	V <sub>OH</sub> = 0 or VDD	VOH	5.0	4.1		4.1	4.0		4.1	Vdc
			10	3.1		3.1	3.0		3.1	
			15	2.1		2.1	2.0		2.1	
Output Voltage - H <sub>l</sub> Output V <sub>OL</sub> = VDD - 0	VOL	5.0		0.05		0	0.05		0.05	Vdc
		10		0.1		0	0.1		0.1	
		15		0.15		0	0.15		0.15	
	V <sub>OH</sub> = 0 or VDD	VOH	5.0	4.1		4.1	4.0		4.1	Vdc
			10	3.1		3.1	3.0		3.1	
			15	2.1		2.1	2.0		2.1	
Output Voltage - H <sub>l</sub> Output V <sub>OL</sub> = 1/2 VDD	VOL	5.0		0.05		0	0.05		0.05	Vdc
		10		0.1		0	0.1		0.1	
		15		0.15		0	0.15		0.15	
	V <sub>OH</sub> = 0 or VDD	VOH	5.0	4.1		4.1	4.0		4.1	Vdc
			10	3.1		3.1	3.0		3.1	
			15	2.1		2.1	2.0		2.1	
Output Voltage - H <sub>l</sub> Output V <sub>OL</sub> = 1/2 VDD	VOL	5.0		0.05		0	0.05		0.05	Vdc
		10		0.1		0	0.1		0.1	
		15		0.15		0	0.15		0.15	
	V <sub>OH</sub> = 0 or VDD	VOH	5.0	4.1		4.1	4.0		4.1	Vdc
			10	3.1		3.1	3.0		3.1	
			15	2.1		2.1	2.0		2.1	
Output Voltage - Signals 41 Device	Source	VOL	5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			Vdc
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
			5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
		Sink	5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			Vdc
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
			5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
	Sink	VOL	5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			Vdc
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
			5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
		VOH	5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			Vdc
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			
			5.0	4.10	4.10	4.57	4.1			
			10	3.10	3.10	3.54	3.1			
			15	2.10	2.10	2.51	2.1			

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Continued)

	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	T <sub>low</sub> *		25°C			T <sub>high</sub> *		Unit
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
Output Drive Current - RBG Output (AL Device)	I <sub>OH</sub>	5.0	-0.40	-	-0.32	-0.64	-	-0.22	-	nA/c
(V <sub>OH</sub> = 2.5 Vdc)										
(V <sub>OH</sub> = 9.5 Vdc)										
Output Drive Current - RBG Output (AL Device)	I <sub>OL</sub>	5.0	0.18	-	0.15	0.29	-	0.10	-	nA/c
(V <sub>OL</sub> = 0.5 Vdc)										
(V <sub>OL</sub> = 1.5 Vdc)										
Output Drive Current - RED Output (CL/CP Device)	I <sub>OH</sub>	5.0	-0.25	-	-0.21	0.64	-	-0.17	-	nA/c
(V <sub>OH</sub> = 2.5 Vdc)										
(V <sub>OH</sub> = 9.5 Vdc)										
Output Drive Current - RED Output (CL/CP Device)	I <sub>OL</sub>	5.0	0.12	-	0.065	0.29	-	0.030	-	nA/c
(V <sub>OL</sub> = 0.5 Vdc)										
(V <sub>OL</sub> = 1.5 Vdc)										
Output Drive Current - Segments (AL Device)	I <sub>OL</sub>	5.0	0.64	-	0.51	0.83	-	0.36	-	nA/c
(V <sub>OL</sub> = 0.4 Vdc)										
(V <sub>OL</sub> = 0.5 Vdc)										
Output Drive Current - Segments (AL Device)	I <sub>OL</sub>	5.0	0.62	-	0.44	0.88	-	0.30	-	nA/c
(V <sub>OL</sub> = 0.4 Vdc)										
(V <sub>OL</sub> = 0.5 Vdc)										
Input Current (AL Device)	I <sub>in</sub>	15	-	±0.1	-	±0.00001	±0.1	-	±1.0	µA/c
Input Current (CL/CP Device)	I <sub>in</sub>	15	-	±0.3	-	±0.00001	±0.3	-	±1.0	µA/c
Input Capacitance (V <sub>in</sub> = 0)	C <sub>in</sub>	-	-	-	-	5.0	7.5	-	-	pF
Quiescent Current (AL Device) (Pb Package)	I <sub>QD</sub>	5.0	-	5.0	-	0.005	5.0	-	150	µA/c
Quiescent Current (AL Device) (Pb Package)	I <sub>QD</sub>	10	-	10	-	0.010	10	-	300	µA/c
Quiescent Current (AL Device) (Pb Package)	I <sub>QD</sub>	15	-	20	-	0.015	20	-	600	µA/c
Quiescent Current (CL/CP Device) (Pb Package)	I <sub>QD</sub>	5.0	-	20	-	0.005	20	-	150	µA/c
Quiescent Current (CL/CP Device) (Pb Package)	I <sub>QD</sub>	10	-	40	-	0.010	40	-	300	µA/c
Quiescent Current (CL/CP Device) (Pb Package)	I <sub>QD</sub>	15	-	80	-	0.015	80	-	600	µA/c
Total Supply Current** (Dynamic plus Quiescent, Pb Package)	I <sub>T</sub>	10	-	I <sub>T</sub> = (1.8 µA/MHz) f + I <sub>QD</sub>						µA/c
Total Supply Current** (Dynamic plus Quiescent, Pb Package)	I <sub>T</sub>	15	-	I <sub>T</sub> = (3.8 µA/MHz) f + I <sub>QD</sub>						
Total Supply Current** (Dynamic plus Quiescent, Pb Package)	I <sub>T</sub>	15	-	I <sub>T</sub> = (5.7 µA/MHz) f + I <sub>QD</sub>						

\*T<sub>low</sub> = 15°C for AL device, 40°C for CL/CP Device

T<sub>high</sub> = 125°C for AL device, 100°C for CL/CP Device

\*\* I<sub>T</sub> is dynamic supply current plus quiescent current (I<sub>QD</sub>)

I<sub>QD</sub> is I<sub>QD</sub> for I<sub>in</sub> = 1 and 100 nA/c

1.0 Vdc = V<sub>OH</sub> = 0 Vdc

2.0 Vdc = V<sub>OH</sub> = 1.5 Vdc

2.5 Vdc = V<sub>OH</sub> = 9.5 Vdc

† To calculate total supply current at loads other than 50 Ω:  
I<sub>T</sub> (µA) = I<sub>1</sub> (50 Ω) + 5.5 × 10<sup>-3</sup> (C<sub>L</sub> - 50) V<sub>DD</sub> / f  
where I<sub>1</sub> is in µA (per package), C<sub>L</sub> is in pF, V<sub>DD</sub> is in Vdc, and f is in MHz is input frequency.

\*\* The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

FIGURE 1 DYNAMIC POWER DISSIPATION SIGNAL WAVEFORMS

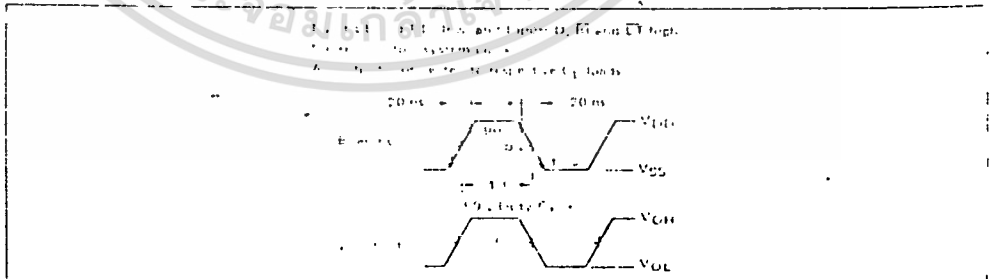
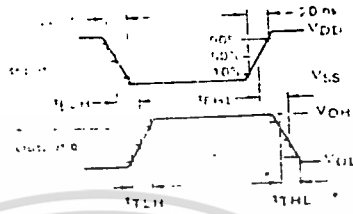


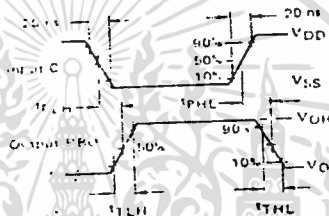


FIGURE 2 - DYNAMIC SIGNAL WAVEFORMS

Setup Time (t<sub>su</sub>) and Hold Time (t<sub>h</sub>) at HBI, D and LE low, and Inputs A, B, ET and ET high



Inputs A, B, and LE low, and Inputs C, ET and ET high



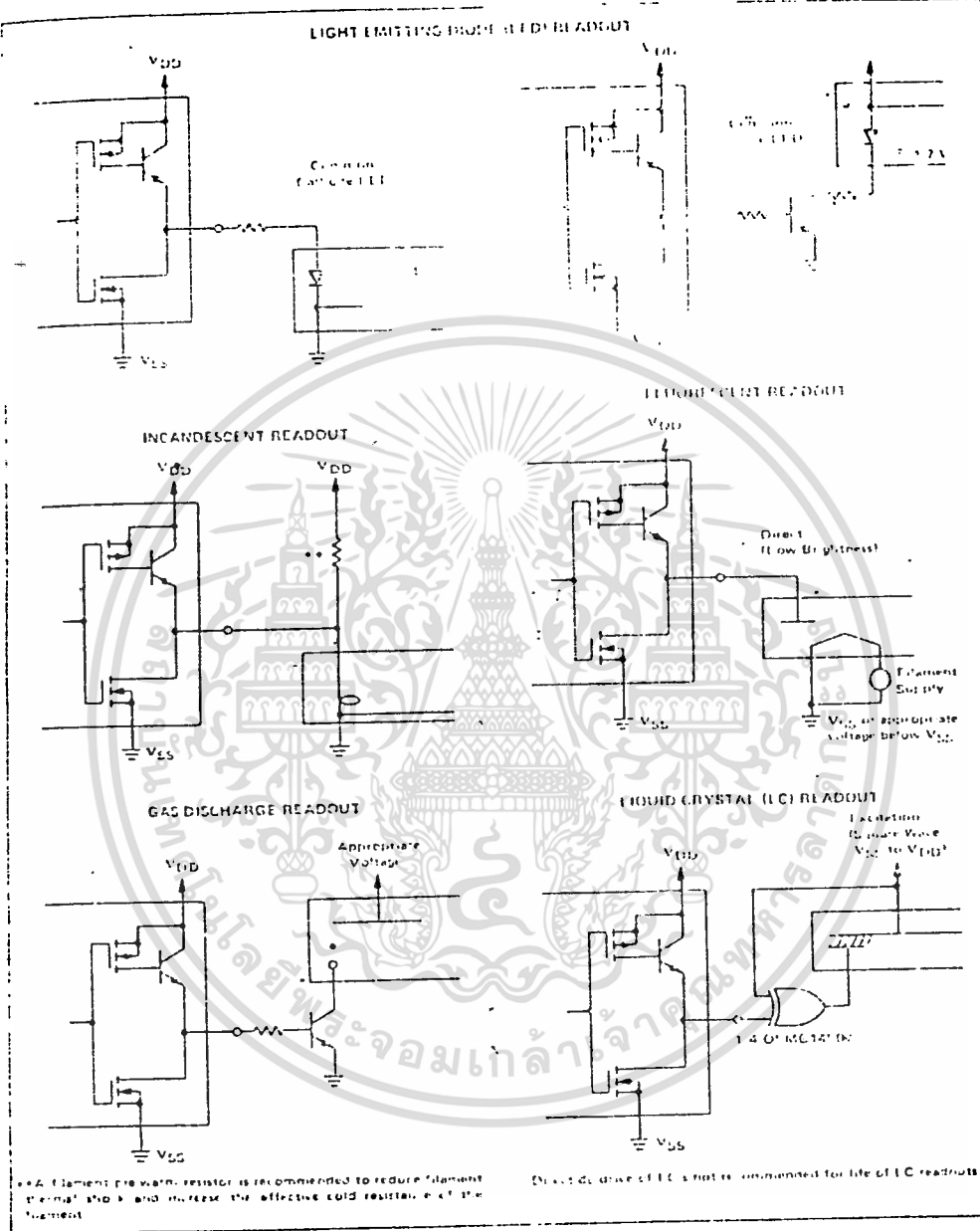
Setup and Hold Times at HBI and D low, Inputs A, B, ET and ET high.



Setup and Hold Times at HBI and D low, Inputs A, B, ET and ET high.

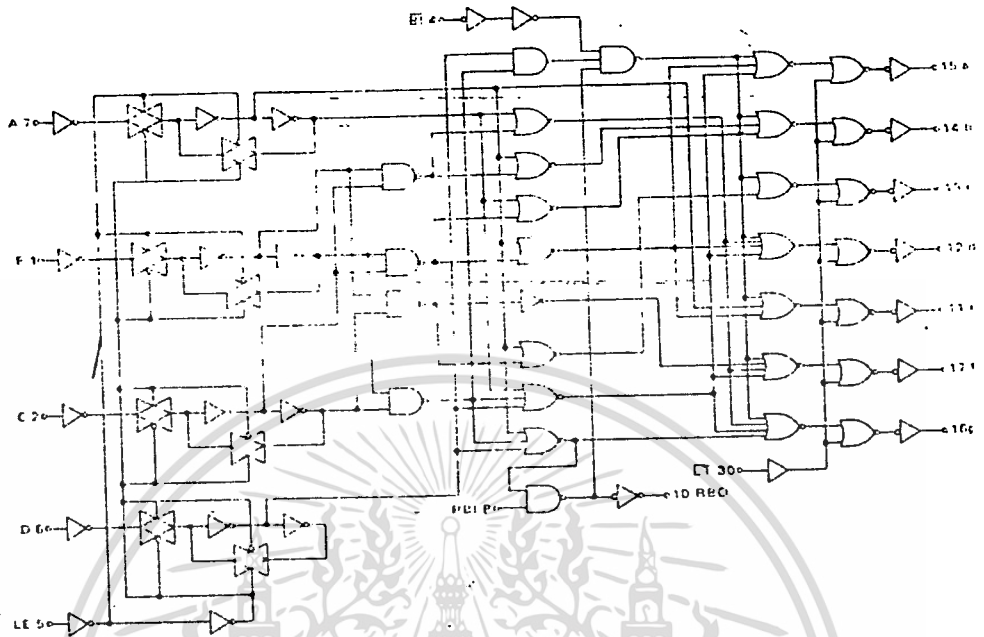


CONNECTIONS TO VARIOUS DISPLAY READOUTS



77

LOGIC DIAGRAM



TYPICAL APPLICATIONS FOR RIPPLE BLANKING

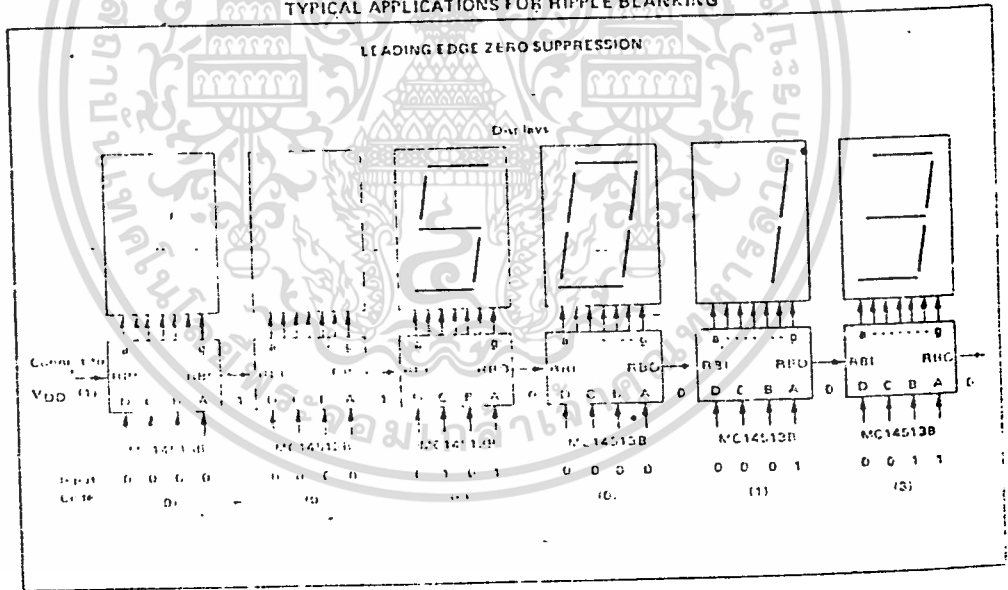


FIGURE 3 - PRESET TABLE CALCULATED UP/DOWN COUNTER

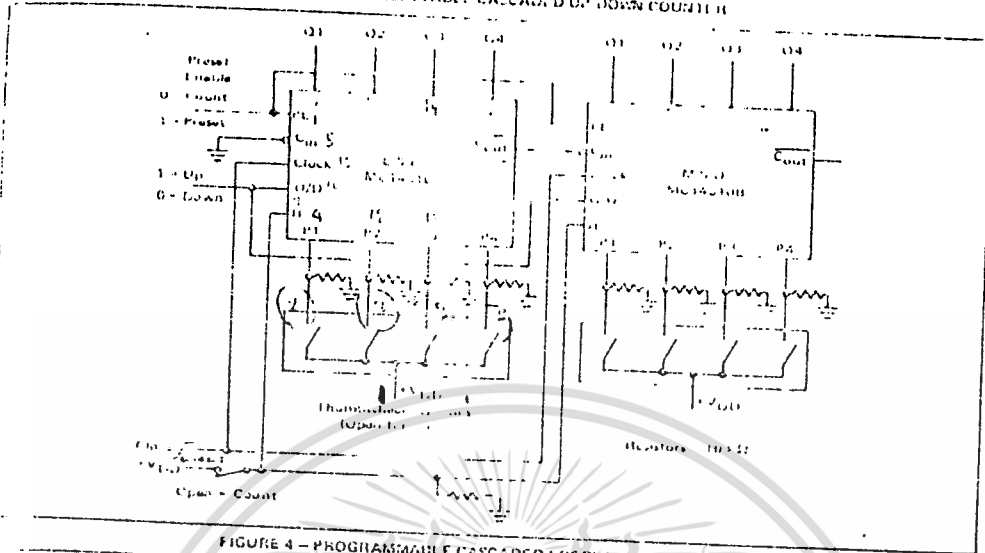
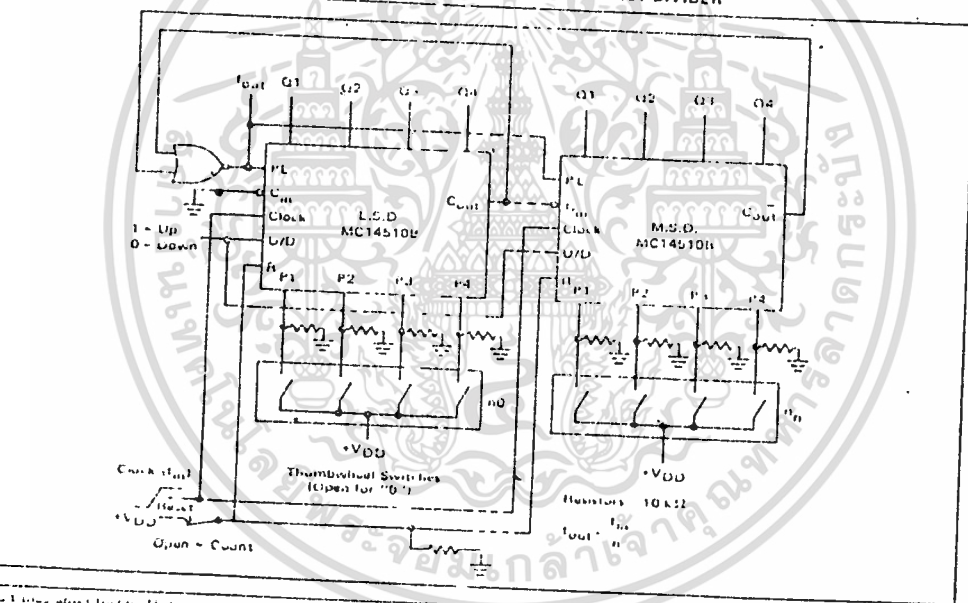


FIGURE 4 - PROGRAMMABLE CASCADED FREQUENCY DIVIDER



Other Motorola products are included as means of illustrating typical semiconductor applications, consequently, no information sufficient for construction purposes is not necessarily given. The information has been carefully checked and

is believed to be entirely reliable. However, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, such information does not convey to the purchaser of the semiconductor devices described any license under the patent rights of Motorola Inc. or others.



TEST CIRCUITS

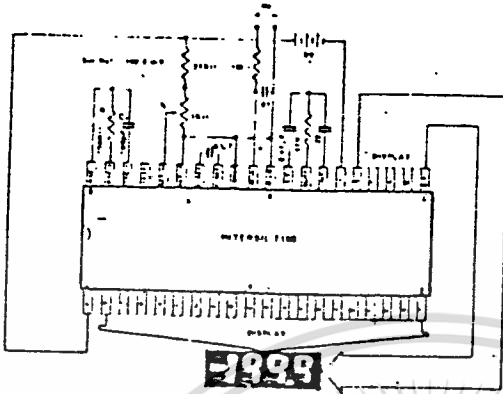


Figure 1: 7106

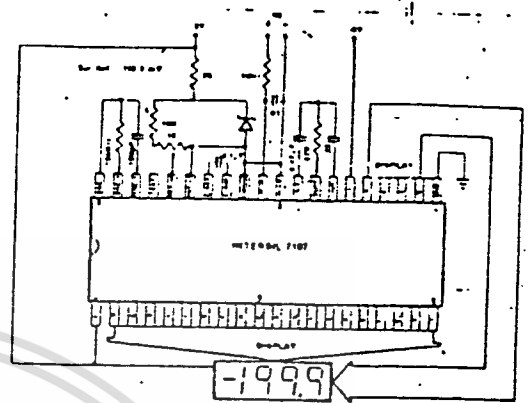


Figure 2: 7107

DETAILED DESCRIPTION  
ANALOG SECTION

Figure 3 shows the Block Diagram of the Analog Section for the ICL 7106 and 7107. Each measurement cycle is divided

into three phases. They are (1) auto-zero (A-Z), (2) signal integrate (INT) and (3) de-integrate (DE).

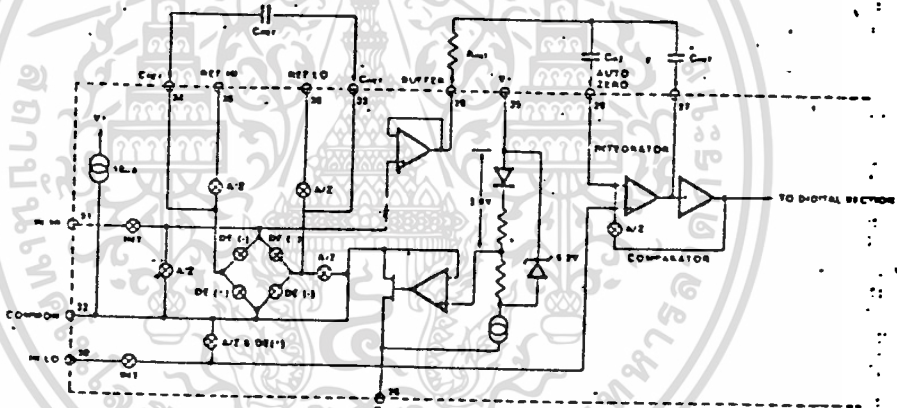


Figure 3: Analog Section of 7106/7107.

1. Auto-zero phase

During auto-zero three things happen. First, input high and low are disconnected from the pins and internally shorted to analog common. Second, the reference capacitor is charged to the reference voltage. Third, a feedback loop is closed around the system to charge the auto-zero capacitor  $C_{AZ}$  to compensate for offset voltages in the buffer amplifier, integrator, and comparator. Since the comparator is included in the loop, the A-Z accuracy is limited only by the noise of the system. In any case, the offset referred to the input is less than  $10\mu V$ .

2. Signal Integrates phase

During signal integrate, the auto-zero loop is opened, the internal short is removed, and the internal input high and low are connected to the external pins. The converter then integrates the differential voltage between input

high and input low for a fixed time. This differential voltage can be within a wide common mode range; within one volt of either supply. If, on the other hand, the input signal has no return with respect to the converter power supply, input low can be tied to analog common to establish the correct common-mode voltage. At the end of this phase, the polarity of the integrated signal is determined.

3. De-integrate phase

The final phase is de-integrate, or reference integrate. Input low is internally connected to analog common and input high is connected across the previously charged reference capacitor. Circuitry within the chip ensures that the capacitor will be connected with the correct polarity to cause the integrator output to return to zero. The time required for the output to return to zero is proportional to the input signal. Specifically the digital reading displayed is  $1000 \frac{V_{IN}}{V_{REF}}$ .

ICL7107  
 10200 7107 225-69886 FAX: 645-5555

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

ICL 7107

ICL 7106

Supply Voltage (V <sub>+</sub> to V <sub>-</sub> )	15V
Analog Input Voltage (either input) (Note 1)	V <sub>+</sub> to V <sub>-</sub>
Reference Input Voltage (either input)	V <sub>+</sub> to V <sub>-</sub>
Clock Input	Test to V <sub>+</sub>
Power Dissipation (Note 2)	
Ceramic Package	1000 mW
Plastic Package	800 mW
Operating Temperature	0°C to +70°C
Storage Temperature	-65°C to +160°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	300°C

Supply Voltage (V <sub>+</sub> to V <sub>-</sub> )	15V
Analog Input Voltage (either input) (Note 1)	V <sub>+</sub> to V <sub>-</sub>
Reference Input Voltage (either input)	V <sub>+</sub> to V <sub>-</sub>
Clock Input	Test to V <sub>+</sub>
Power Dissipation (Note 2)	
Ceramic Package	1000 mW
Plastic Package	800 mW
Operating Temperature	0°C to +70°C
Storage Temperature	-65°C to +160°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	300°C

Note 1: Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to 100 μA  
 Note 2: Dissipation rating assumes device is mounted with all leads soldered to printed circuit board

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Note 3)

CHARACTERISTICS	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Zero Input Reading	V <sub>in</sub> = 0.0V Full Scale = 200.0 mV	000.0	000.0	000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	V <sub>in</sub> = V <sub>ref</sub> V <sub>ref</sub> = 100 mV	999	999-1000	1000	Digital Reading
Rollover Error (Difference in reading for equal positive and negative reading near Full Scale)	V <sub>in</sub> = ±V <sub>in</sub> = 200.0mV	-1	1	1	Counts
Linearity (Max deviation from best straight line fit)	Full scale = 200mV or full scale = 2.000V	-1	1	1	Counts
Common Mode Rejection Ratio (Note 4)	V <sub>cm</sub> = ±1V, V <sub>in</sub> = 0V Full Scale = 200.0mV		50		μV/V
Noise (P <sub>k</sub> - P <sub>k</sub> value not exceeded 95% of time)	V <sub>in</sub> = 0V Full Scale = 200.0mV		15		μV
Leakage Current @ Input	V <sub>in</sub> = 0V		1	10	pA
Zero Reading Drift	V <sub>in</sub> = 0 0° ≤ T <sub>A</sub> ≤ 70°C		0.2	1	μV/°C
Scale Factor Temperature Coefficient	V <sub>in</sub> = 199.0mV 0° ≤ T <sub>A</sub> ≤ 70°C (F at Ref 0ppm/°C)		1	5	ppm/°C
Supply Current (Does not include LED current for 7107)	V <sub>in</sub> = 0		0.8	1.8	mA
Analog Common Voltage (with respect to pos. supply)	25K(Ω) between Common & pos. Supply	2.4	2.8	3.2	Volts
Temp. Coeff. of Analog Common (with respect to pos. Supply)	25K(Ω) between Common & pos. Supply		80		ppm/°C
7106 ONLY Pk-Pk Segment Drive Voltage (Note 5)	V Supply = 9V	4	5	6	Volts
7106 ONLY Pk-Pk Backplane Drive Voltage (Note 5)	V Supply = 9V	4	5	6	Volts
7107 ONLY Segment Sinking Current (Except Pin 19)	V Supply = 5.0V Segment voltage = 3V	5	8.0		mA
7107 ONLY Segment Sinking Current (Pin 19 only)	V Supply = 5.0V Segment voltage = 3V	10	16		mA

Note 2: Unless otherwise noted, specifications apply to both the 7106 and 7107 at T<sub>A</sub> = 25°C, f<sub>max</sub> = 48kHz. 7106 is tested in the circuit of Figure 1. 7107 is tested in the circuit of Figure 2.

Note 4: Refer to "Differential Input" discussion on page 4.

Note 5: Back plane drive is in phase with segment drive for 'off' segment, 180° out of phase for 'on' segment. Frequency is 20 times conversion rate. Average DC component is less than 50mV.

Differential Input

The input can accept differential voltages anywhere within the common mode range of the input amplifier, or specifically from 0.5 volts below the positive supply to 1.0 volt above the negative supply. In this range the system has a CMRR of 86 dB typical. However, since the integrator also swings with the common mode voltage, care must be exercised to assure the integrator output does not saturate. A worse case condition would be a large positive common-mode voltage with a near full-scale negative differential input voltage. The negative input signal drives the integrator positive when most of its swing has been used up by the positive common mode voltage. For these critical applications the integrator swing can be reduced to less than the recommended 2V full scale swing with little loss of accuracy. The integrator output can swing within 0.3 volts of either supply without loss of linearity.

Differential Reference

The reference voltage can be generated anywhere within the power supply voltage of the converter. The main source of common mode error is a roll-over voltage caused by the reference capacitor losing or gaining charge to stray capacity in its nodes. If there is a large common mode voltage, the reference capacitor can gain charge (increase voltage) when called up to de-integrate a positive signal but lose charge (decrease voltage) when called up to de-integrate a negative input signal. This difference in reference for (+) or (-) input voltage will give a roll-over error. However, by selecting the reference capacitor large enough in comparison to the stray capacitance, this error can be held to less than 0.5 count for the worse case condition. (See Component Values Selection below).

Analog Common

This pin is included primarily to set the common mode voltage for battery operation (7106) or for any system where the input signals are floating with respect to the power supply. The common pin sets a voltage that is approximately 2.8 volts more negative than the positive supply. This is selected to give a minimum end-of-life battery voltage of about 6V. However, the analog common has some of the attributes of a reference voltage. When the total supply voltage is large enough to cause the zener to regulate (>7V), the common voltage will have a low voltage coefficient (0.01%/V), low output impedance (<15 $\Omega$ ), and a temperature coefficient typically less than 80ppm/ $^{\circ}$ C.

The limitations of the on-chip reference should also be recognized, however. With the 7107, the internal heating which results from the LED drivers can cause some degradation in performance. Due to their higher thermal resistance, plastic parts are poorer in this respect than ceramic. The combination of reference Temperature Coefficient (TC), internal chip dissipation, and package thermal resistance can increase noise near full scale from 25  $\mu$ V to 80  $\mu$ Vpk-pk. Also the linearity in going from a high dissipation count such as 1000 (20 segments on) to a low dissipation count such as 1111 (2 segments on) can suffer by a count or more. Devices with a positive TC reference may require several counts to pull out of an overload condition. This is because overload is a low dissipation mode, with the three least significant digits blanked. Similarly, units with a negative TC may cycle between overload and a non-overload count as the die alternately heats and cools. All

these problems are of course eliminated if an external reference is used.

The 7106, with its negligible dissipation, suffers from none of these problems. In either case, an external reference can easily be added, as shown in fig. 4.

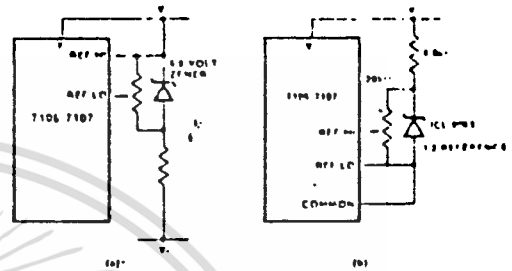


Figure 4: Using an External Reference

Analog common is also the voltage the input returns to during auto-zero and de-integrate. If signal low is different from analog common, a common mode voltage exists in the system and is taken care of by the excellent CMRR of the converter. However, in some applications input low will be set at a fixed known voltage (power supply common, for instance). In this application, analog common should be tied to the same point, thus removing the common mode voltage from the converter. The same holds true for the reference voltage. If reference can be conveniently referenced to analog common, it should be since this removes the common mode voltage from the reference system.

Within the IC, analog common is tied to an N channel FET that can sink 30mA or more of current to hold the voltage 2.8 volts below the positive supply (when a load is trying to pull the common line positive). However, there is only 10 $\mu$ A of source current, so common may easily be tied to a more negative voltage thus overriding the internal reference.

Test

The test pin serves two functions. On the 7106 it is coupled to the internally generated digital supply through a 500 $\Omega$  resistor. Thus it can be used as the negative supply for externally generated segment drivers such as decimal points or any other presentation the user may want to include on the LCD display. Figures 5 and 6 show such an application.

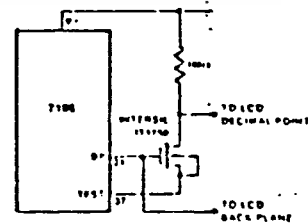


Figure 5: Simple Inverter for Fixed Decimal Point



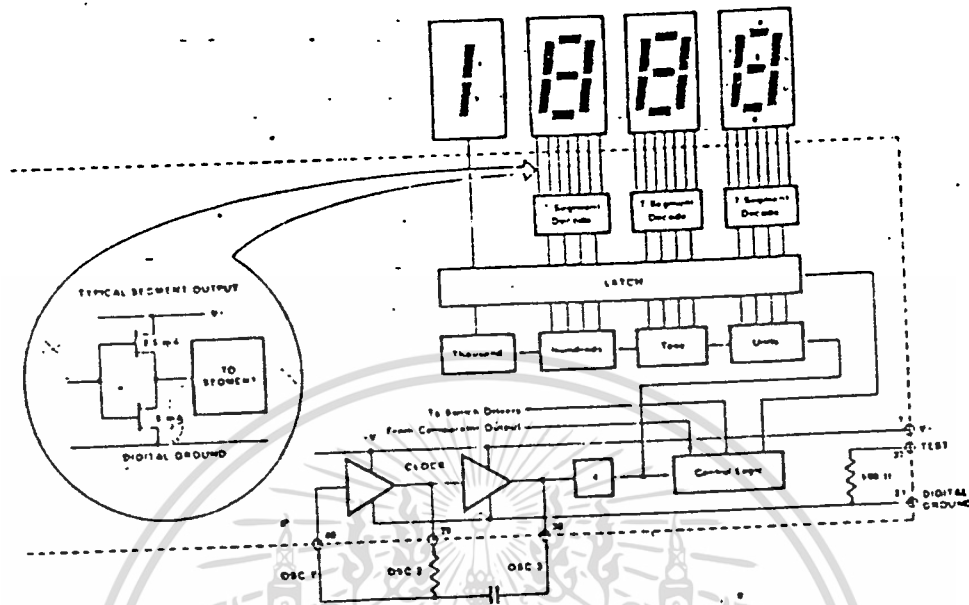


Figure 8: Digital Section 7107

**System Timing**

Figure 9 shows the clocking arrangement used in the 7106 and 7107. Three basic clocking arrangements can be used:

1. An external oscillator connected to pin 40.
2. A crystal between pins 25 and 40.
3. An R-C oscillator using all three pins.

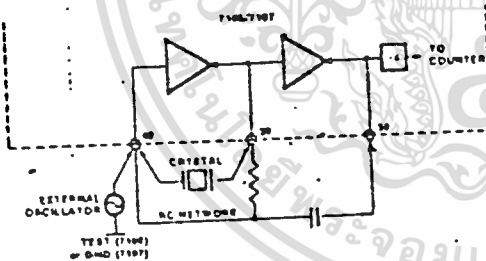


Figure 9: Clock Circuits

The oscillator frequency is divided by four before it clocks the decade counters. It is then further divided to form the three convert-cycle phases. These are signal integrate (1000 counts), reference de-integrate (0 to 2000 counts) and auto-zero (1000 to 3000 counts). For signals less than full scale, auto-zero gets the unused portion of reference de-integrate. This makes a complete measure cycle of 4,000 (16,000 clock pulses) independent of input voltage. For three readings/second, an oscillator frequency of 48kHz would be used.

To achieve maximum rejection of 60 Hz pickup, the signal integrate cycle should be a multiple of 60 Hz. Oscillator frequencies of 240kHz, 120kHz, 80kHz, 60kHz, 48kHz, 40kHz, 33 1/3 kHz, etc. should be selected. For 50Hz rejection, oscillator frequencies of 200kHz, 100kHz, 66 2/3 kHz, 50kHz, 40kHz, etc. would be suitable. Note that

40kHz (2.5 readings/second) will reject both 50 and 60 Hz (also 400 and 440 Hz).

**COMPONENT VALUE SELECTION**

**1. Integrating Resistor**

Both the buffer amplifier and the integrator have a class A output stage with 100µA of quiescent current. They can supply 20µA of drive current with negligible non-linearity. The integrating resistor should be large enough to remain in this very linear region over the input voltage range, but small enough that input leakage requirements are not placed on the PC board. For 2 volt full scale, 470KΩ is near optimum and similarly a 47KΩ for a 200.0 mV scale.

**2. Integrating Capacitor**

The integrating capacitor should be selected to give the maximum voltage swing that ensures tolerance build-up will not saturate the integrator swing (approx. 0.3 volt from either supply). In the 7106 or the 7107, when the analog common is used as a reference, a nominal 2.2 volt full scale integrator swing is fine. For the 7107 with ±5 volt supplies and analog common tied to supply ground, a ±3.5 to ±4 volt swing is nominal. For three readings/second (48kHz clock), nominal values for C<sub>int</sub> are .22 and .10µF, respectively. Of course, if different oscillator frequencies are used, these values should be changed in inverse proportion to maintain the same output swing.

An additional requirement of the integrating capacitor is it have low dielectric absorption to prevent roll-over errors. While other types of capacitors are adequate for this application, polypropylene capacitors give undetectable errors at reasonable cost.

**3. Auto-Zero Capacitor**

The size of the auto-zero capacitor has some influence on the noise of the system. For 200 mV full scale where noise

is very important, a 0.47  $\mu$ F capacitor is recommended. On the 2 volt scale, a 0.047  $\mu$ F capacitor increases the speed of recovery from overload and is adequate for noise on this scale.

4. Reference Capacitor

A 0.1  $\mu$ F capacitor gives good results in most applications. However, when a large common mode voltage exists (i.e. the reference low is not at analog common) and a 200 mV scale is used, a larger value is required to prevent roll-over error. Generally 1.0  $\mu$ F will hold the roll-over error to 0.5 count in this instance.

5. Oscillator Components

For all ranges of frequency a 100K $\Omega$  resistor is recommended and the capacitor is selected from the equation  $f = \frac{1}{2.2RC}$ . For 48kHz clock (3 readings/second), C = 100pF.

6. Reference Voltage

The analog input required to generate full-scale output (2000 counts) is,  $V_{in} = 2V_{ref}$ . Thus, for the 200.0mV and 2.000 volt scale,  $V_{ref}$  should equal 100.0 mV and 1.000 volt, respectively. However, in many applications where the A/D is connected to a transducer, there will exist a scale factor other than unity between the input voltage and the digital reading. For instance, in a weighing system, the designer might like to have a full scale reading when the voltage from the transducer is 0.682V. Instead of dividing the input down to 200.0 mV, the designer should use the input voltage directly and select  $V_{ref} = 341V$ . Suitable values for integrating resistor and capacitor would be 120K $\Omega$  and 22  $\mu$ F. This makes the system slightly quieter and also avoids a divider network on the input. The 7107 with  $\pm 5$  volts supplies can accept input signals up to  $\pm 4$  volts. Another advantage of this system occurs when a digital reading of zero is desired for  $V_{in} \neq 0$ . Temperature

and weighing systems with a variable tare are examples. This offset reading can be conveniently generated by connecting the voltage transducer between analog high and common and the variable (or fixed) offset voltage between common and analog low.

7. 7107 Power Supplies

The 7107 is designed to work from  $\pm 5$  volt supplies. However, if a negative supply is not available, it can be generated from the clock output with 2 diodes, 2 capacitors, and an inexpensive I.C. Figure 10 shows this application.

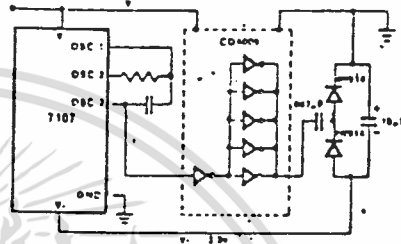


Figure 10: Generating Negative Supply from +5v

In fact, in selected applications no negative supply is required. The conditions to use a single +5V supply are:

1. The input signal can be referenced to the center of the common mode range of the converter.
2. The signal is less than  $\pm 1.5$  volts.
3. An external reference is used.

TYPICAL APPLICATIONS

The 7106 and 7107 may be used in a wide variety of configurations. The circuits which follow show some of the

possibilities, and serve to illustrate the exceptional versatility of these A/D converters.

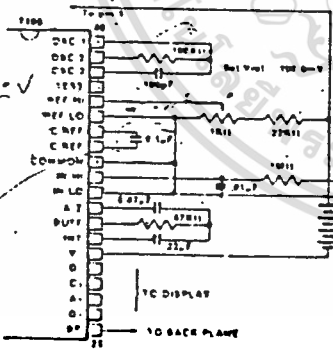


Figure 11: 7106 using the internal reference. Values shown are for 200.0 mV full scale, 3 readings per second, floating supply voltage (+V battery).

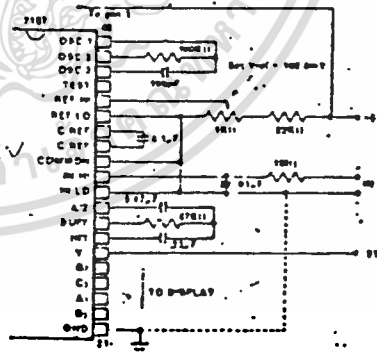
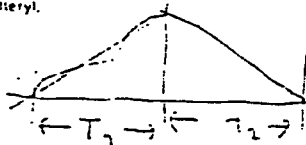


Figure 12: 7107 using the internal reference. Values shown are for 200.0 mV full scale, 3 readings per second. IN LO may be tied to either COMMON for inputs floating with respect to supplies, or GND for single ended inputs. (See discussion under Analog Common on page 4).

บริษัท อินเทลไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด

138 ถนนพหลโยธิน แขวงจตุจักร กรุงเทพฯ 10300

TEL: 02-254 10200 โทร. 225-6986 FAX: 062-225-6985

TYPICAL APPLICATIONS (Contd.)

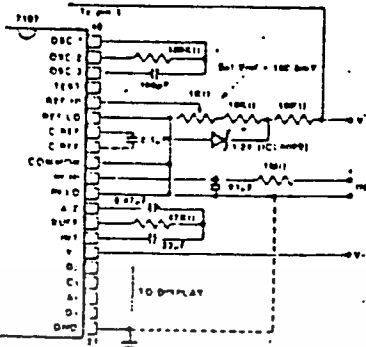


Figure 13: 7107 with an external band-gap reference (1.2V type). IN LO is tied to COMMON, thus establishing the correct common mode voltage. If COMMON is not shorted to GND, the input voltage may float with respect to the power supply and COMMON acts as a pre-regulator for the reference. If COMMON is shorted to GND, the input is single ended (referred to supply ground) and the pre-regulator is over-ridden.

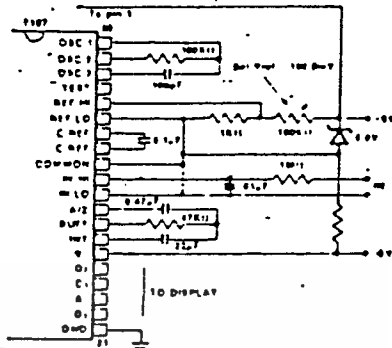


Figure 14: 7107 with Zener diode reference. Since low T C zeners have breakdown voltages  $\sim 5$   $\mu$ V, diode must be placed across the total supply (10V). As in the case of Figure 12, IN LO may be tied to either COMMON or GND.

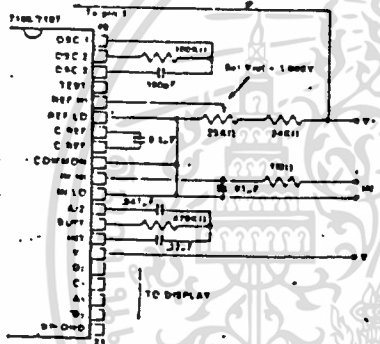


Figure 15: 7106/7107 Recommended component values for 200mV full scale.

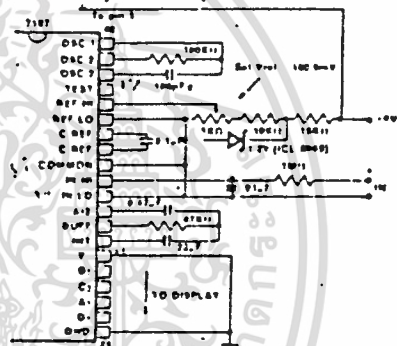


Figure 16: 7107 operated from single 4.5V supply. An external reference must be used in this application, since the voltage between V<sub>+</sub> and V<sub>-</sub> is insufficient for correct operation of the internal reference.

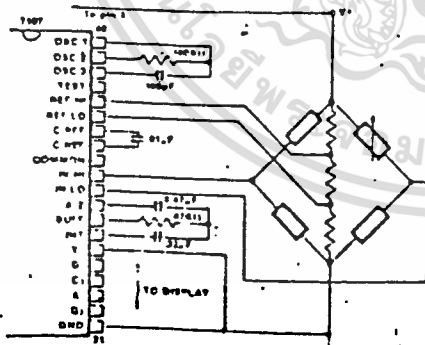


Figure 17: 7107 measuring ratio-metric values of Quad Load Cell. The resistor values within the bridge are determined by the desired sensitivity.

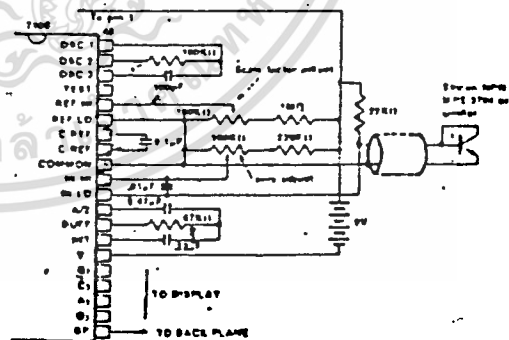


Figure 18: 7106 used as a digital centigrade thermometer. A silicon diode-connected transistor has a temperature coefficient of about  $-2$   $\mu$ V/ $^{\circ}$ C. Calibration is achieved by placing the sensing transistor in ice water and adjusting the zeroing potentiometer for a 000  $\theta$  reading. The sensor should then be placed in boiling water and the scale-factor potentiometer adjusted for 100  $^{\circ}$ C reading.



TYPICAL APPLICATIONS (Contd.)

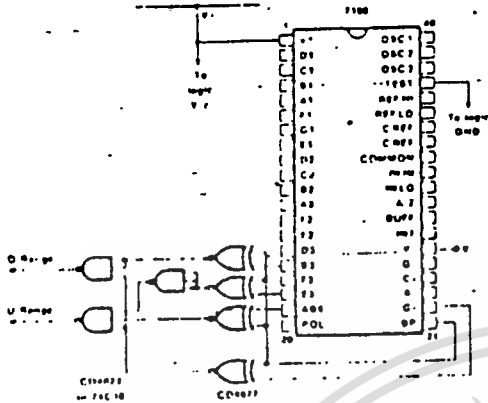


Figure 19: Circuit for developing Underrange and Overrange signals from 7106 outputs

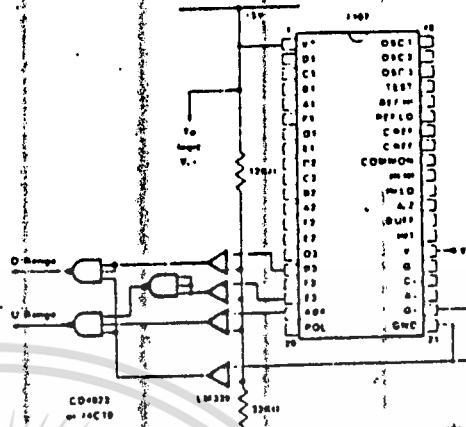


Figure 20: Circuit for developing Underrange and Overrange signals from 7107 outputs. The LM339 is required to ensure logic compatibility with heavy display loading.

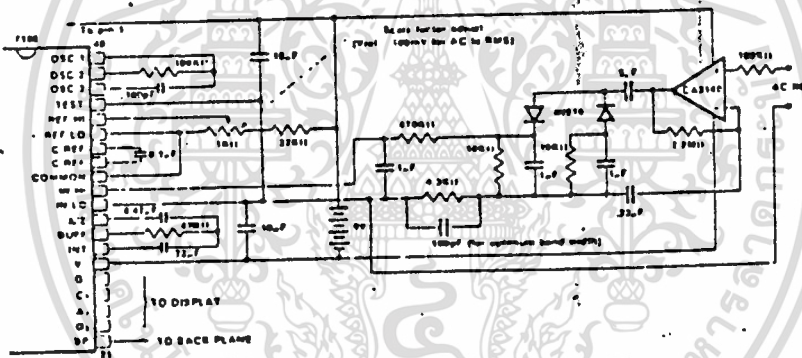


Figure 21: AC to DC Converter with 7106 Test is used as a common mode reference level to ensure compatibility with most op-amps.

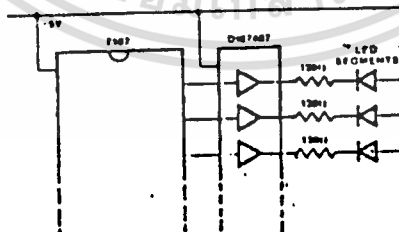
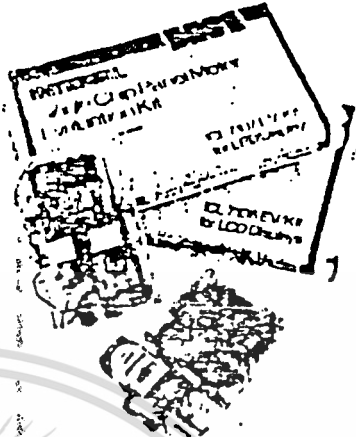


Figure 22: Display Buffering for increased drive current. Requires four DM7407 Hex Buffers. Each buffers is capable of sinking 40 mA max.

7106/7107 EVALUATION KITS

After purchasing a sample of the 7106 or the 7107, the majority of users will want to build a simple voltmeter. The parts can then be evaluated against the data sheet specifications, and tried out in the intended application. However, locating and purchasing even the small number of additional components required, then wiring a breadboard, can often cause delays of days or sometimes weeks. To avoid this problem and facilitate evaluation of these unique circuits, Intersil is offering a kit which contains all the necessary components to build a 3 1/2 digit panel meter. With the help of this kit, an engineer or technician can have the system "up and running" in about half an hour.

Two kits are offered, the ICL7106EV/KIT and the ICL7107EV/KIT. Both contain the appropriate IC, a circuit board, a display (LCD for 7106EV/KIT, LEDs for 7107EV/KIT), passive components, and miscellaneous hardware.



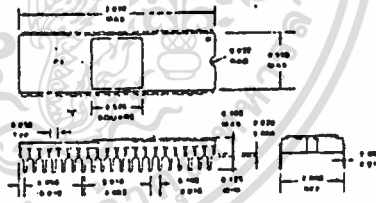
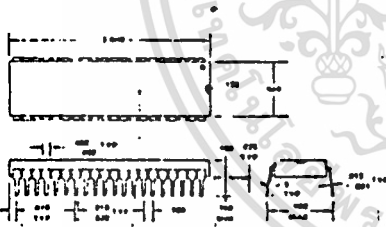
APPLICATION NOTES

- A016 "Selecting A/D Converters," by David Fullagar
- A017 "The Integrating A/D Converter," by Lee Evans
- A018 "Do's and Don'ts of Applying A/D Converters," by Peter Bradshaw and Skip Osgood
- A019 "4 1/2 Digit Panel Meter Demonstrator/Instrumentation Boards," by Michael Dufort
- A023 "Low Cost Digital Panel Meter Designs," by David Fullagar & Michael Dufort

PACKAGE DIMENSIONS TYPICAL CONNECTION DIAGRAMS

40 Pin Plastic Dual-In-Line Package

40 Pin Ceramic Dual-In-Line Package



บริษัท อิลเซทรอนิกส์ จำกัด

138 ถนนบ้านนาใหม่ แขวงวังใหม่ ปทุมธานี กรุงเทพฯ 10200 โทร 2-5-6666 FAX 2-5-6666