



เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

(INDUCTION HEATING)



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537

ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2537

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

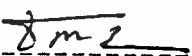
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน (INDUCTION HEATING)

ผู้จัดทำ

1. นายเกรียงไกร กิจแสนมาก 34101030
2. นายสุปรีชา สิมปิภาณุจนโกวิท 34108440



(อ. สมศักดิ์ เขียวศรีกุล)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีของการเหนี่ยวนำความร้อน	5
บทที่ 3 โครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน	24
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์	54
ภาคผนวก	
โปรแกรมควบคุมเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน	
วงจร Voltage to Frequency	
วงจร Converter	
วงจร Sense peak	
วงจร Analog to Digital converter	
วงจร Digital to Analog converter	
วงจร Sense object	

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

(Induction Heating)

นาย เกรียงไกร กิจแสนมาก 34101030

นาย สุปรีชา ลิ้มปิภาณจนโกวิท 34108440

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล

ปีการศึกษา 2537

บทคัดย่อ

ในปฏิญานพนธ์ฉบับนี้ ได้พัฒนา เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน โดยทำงานที่ความถี่รีโซแนนท์เพื่อใช้สำหรับการชุบแข็งของโลหะ โดยความถี่ที่ใช้จะได้โดยประมาณซึ่งอาศัยจากค่ากระแสที่เอาท์พุทสูงสุดซึ่งเป็นจุดที่เกิดสภาวะรีโซแนนท์ สามารถใช้ได้กับความถี่รีโซแนนท์ที่เปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาให้ลดการสูญเสียพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นทางด้านเอาท์พุทของขดลวดจ่ายพลังงาน เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

Abstract

This thesis is about the development of the induction heating running at the resonant frequency for metal surface hardening. The exact frequency is approximated from the maximum output current which occurs at the resonant frequency. It can be adapted to the vary resonant frequencies. Besides it has been developed to reduce the output heat lost at the induce coil. This makes it higher efficiency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ไม่นานมานี้ได้มีการนำหลักการของการเหนี่ยวนำ ของกระแสเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนกันอย่างกว้างขวางและมักใช้กันในงานอ่อนโลหะสำหรับงานทางความร้อน เช่น การหลอมโลหะ (Hot Working) , การบัดกรีแข็ง (Brazing) ฯลฯ การทำงานโดยอาศัยหลักการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กกับเวลา จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าและเกิดกระแสไหลขึ้นในเนื้อเหล็ก ดังนั้น จะทำให้เหล็กร้อน การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กหรือเรียกว่าความถี่ของสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อความลึกของสนามแม่เหล็ก โดยที่ความถี่สูงจะทำให้สนามแม่เหล็กลงไปเนื้อเหล็กได้น้อยลง

อุณหภูมิที่สูงขึ้นในเนื้อเหล็กนั้น ได้จากการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าสกินเอฟเฟ็คท์ (Skin Effect) ซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้นเฉพาะที่ผิวของเหล็ก และเมื่อเราทำให้เหล็กเย็นลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เหล็กเกิดความแข็งเฉพาะที่ผิวโดยที่ภายในเนื้อเหล็กยังคงเป็นเหล็กเหนียวเหมือนเดิมซึ่งจะทำให้เหล็กทนต่อการขูดขีดและไม่เปราะ ซึ่งหลักการนี้ก็คือ การชุบแข็งที่เราทราบกันดีอยู่แล้ว

การชุบแข็งพื้นผิวด้วยกระแสเหนี่ยวนำความถี่สูง ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลาง (0.4-0.5 %C) หรือเหล็กผสม (Alloy Steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลาง ซึ่งเหล็กประเภทนี้สามารถชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดาได้และจะได้รับความแข็งประมาณ 50-60 H_{RC} บางกรณีอาจชุบแข็งด้วยวิธีนี้กับเหล็กที่มีคาร์บอนสูง (0.8-1.2 %C) ได้แต่ต้องควบคุมการให้ปริมาณความร้อนที่ดี และควรจะเป็นงานขนาดใหญ่ เช่น ลูกรีดเหล็ก



รูปที่ 1.1 แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากขดลวดไฟฟ้าทำให้กระแสเหนี่ยวนำขึ้นบริเวณผิวของแท่งเหล็ก

ความหนาของผิวที่กระแสไฟฟ้าผ่านได้ (Depth of current penetration) จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่, ค่า magnetic permeability และค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการ

$$d = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ cm.}$$

- เมื่อ
- d : ความหนาของผิวที่กระแสไฟฟ้าผ่าน (cm.)
 - ρ : ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (micro-ohm-cm.)
 - μ : magnetic permeability (gs/oersted)
 - f : ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz)

สำหรับการคิดอย่างคร่าวๆ จะใช้สูตรดังนี้

$$d = \frac{500}{\sqrt{f}} \text{ cm.}$$

สิ่งที่ต้องพิจารณาประการสำคัญก็คือ ที่อุณหภูมิเหนือ 768 องศาเซลเซียส (Curie point) ซึ่งเหล็กจะเปลี่ยนคุณสมบัติจากแม่เหล็กดูดติดได้ (Ferromagnetic) ไปสู่สภาวะที่แม่เหล็กไม่ดูดติด (Paramagnetic) ค่า magnetic permeability จะเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 768 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ค่า d เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูง จากการทดลองพบว่า เหล็ก 0.4 Xc ค่าความหนา d จะเพิ่มเป็น 17 เท่า เมื่ออุณหภูมิสูง 850 องศาเซลเซียส

นอกจากค่า d จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ ค่าความถี่ และ ค่า magnetic permeability และยังมีขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้อีก จากสูตร

$$d_c = \frac{0.2}{\sqrt{t}} \text{ cm.}$$

เมื่อ t : เวลา (s)

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในการเผาเหล็กให้ร้อน ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการให้ความร้อน (Heating rate) จะได้ค่าพลังงานจำเพาะที่ค่าความถี่ค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับค่า ρ และ μ ตามสูตร

$$E_w = \alpha \sqrt{\mu \rho}$$

เมื่อ α : ค่าคงที่

E_w : ค่าพลังงานจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของ
ความหนาที่ผิว

จะเห็นได้ว่าเมื่อเหล็กถูกทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิ 768 องศาเซลเซียส ค่า E_w จะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะค่า μ ของเหล็กลดลงมาก (ค่า μ ของเหล็กที่อุณหภูมิ 768 องศาเซลเซียสจะเท่ากับค่า μ ของอากาศซึ่งมีค่าน้อยมาก) ดังนั้นอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) จะสูงมากสำหรับความหนาของผิว (Surface layer) ในชั้นแรก และเมื่ออุณหภูมิถึง 768 องศาเซลเซียสอัตราการให้ความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันเนื้อเหล็กในชั้นต่อไปอุณหภูมิยังต่ำอยู่ อัตราการให้ความร้อนแก่เหล็กจะมีค่าสูงทำให้เหล็กในชั้นนี้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิของเหล็กในชั้นที่อยู่ลึกลงไปอัตราการให้ความร้อนจะกลับมีค่าสูงกว่าในชั้นนอก เล็กน้อยเพราะว่าชั้นนอกมีโอกาสถ่ายเทให้อากาศ โดยการแผ่รังสีได้มากกว่า แต่ในที่สุดอุณหภูมิของเหล็กบริเวณผิวที่มีความหนาค่าหนึ่งๆ คิดค่า d แม้จะประกอบด้วยเนื้อเหล็กชั้นๆ หลายชั้นก็ตาม อุณหภูมิในแต่ละชั้นจะไม่แตกต่างกันมาก ในทางปฏิบัติอาจกล่าวได้ว่าร้อนเท่ากันอย่างทั่วถึง ซึ่งจะไม่เกิดปัญหาในการชุบแข็ง

การให้ความร้อนแก่เหล็กโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้น จะต้องทำงานภายใต้สภาวะความถี่รีโซแนนท์ ซึ่งเงื่อนไขการเกิดสภาวะดังกล่าว ขึ้นอยู่กับขนาดและคุณภาพของวัตถุที่จะเหนี่ยวนำความร้อน ค่าคาปาซิแตนซ์และอื่นๆ โดยทั่วไปวงจรเฟสล็อกคูลูป (PLL) จะถูกนำมาใช้สร้างสภาวะดังกล่าว

ในระบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบแก๊วก็คือระบบลเว็ปเฟรีควเซี (Swept-frequency) จะไม่สามารถใช้ได้ในการที่ความถี่รีโซแนนท์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง เพราะค่าความถี่รีโซแนนท์ของเครื่องนั้นเรารู้ได้จากการทดสอบแล้ว และเงื่อนไขการเหนี่ยวนำความร้อนก็ไม่เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีความต้องการที่จะให้ระบบทำงานที่ความถี่ต่างกัน เช่น วัตถุบางชนิดสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้ร้อนได้ที่ความถี่สองค่า ดังนั้นระบบที่สามารถทำงานได้แม้ความถี่รีโซแนนท์จะเปลี่ยนแปลงไปมากจึงเป็นที่ต้องการ จึงได้มีการเสนอระบบใหม่ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีกว่าระบบเก่าซึ่งก็คือ ระบบโพลตรีโซแนนท์

ระบบโพลตรีโซแนนท์ก็คือ ระบบซึ่งจะทำงานติดตามความถี่รีโซแนนท์ของโพลคอยล์ตลอดเวลาในขณะที่ทำการเหนี่ยวนำความร้อนให้แก่โลหะอยู่ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ทำหน้าที่แทนเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop) ซึ่งสามารถที่จะทำงานได้เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปมากๆ ซึ่งส่วนควบคุมความถี่ในระบบมีการทำงานดังนี้

เริ่มแรกไมโครโปรเซสเซอร์จะทำการส่งค่าความถี่เริ่มต้นออกมาก่อนโดยผ่านวงจร

ดีทูปแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นวงจรวีทเอฟก็ทำการเปลี่ยนให้เป็นความถี่ที่ต้องการอีกทีหนึ่ง ผ่านวงจรขับเพื่อไปขับอุปกรณ์สวิทซ์ซึ่ง จากนั้นส่วนตรวจจับกระแสก็จะวัดค่ากระแสส่งผ่านวงจรวีทเอฟแปลงกลับมาเป็นดิจิตอล เพื่อไมโครโปรเซสเซอร์ประมวลผลต่อไป เสร็จแล้วไมโครโปรเซสเซอร์ก็จะส่งข้อมูลใหม่ออกมา ซึ่งจะทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไป การทำงานก็จะวนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไมโครโปรเซสเซอร์พบว่า กระแสที่วัดได้เป็นกระแสสูงสุด ก็จะเก็บค่านั้นไว้ และถ้าหากค่ากระแสลดลงเมื่อวัดครั้งขึ้น ทำให้ความถี่รีโชนแนทเปลี่ยนไป ส่วนควบคุมก็ยังสามารถติดตามหาค่าความถี่รีโชนแนทต่อไปได้

จากหลักการทำงานที่กล่าวมาแล้วนั้น จะเห็นได้ว่า ระบบนี้มีความน่าเชื่อถือได้ เนื่องจากการใช้กระแสมาควบคุมความถี่ ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีความรวดเร็วในการค้นหาความถี่รีโชนแนท

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการนำเอาระบบการควบคุมความถี่แบบใหม่นี้มาใช้ค้นหาความถี่รีโชนแนทที่ต้องการ และสามารถเห็นยวนำความร้อนได้ตามพิกัดที่ต้องการ

ประโยชน์ของเครื่องเห็นยวนำความร้อนโดยสนามแม่เหล็กนี้ ไม่เพียงแต่ใช้ในการชั่งน้ำหนักทำให้ผิวของเหล็กแข็งเท่านั้น เรายังสามารถอาศัยหลักการของเครื่องในการสร้างเตาหลอมไฟฟ้าโดยการลดความถี่ให้ต่ำลง หรือทำเป็นเครื่องให้ความร้อนก่อนที่จะนำไปป้อนหรือขึ้นรูปโลหะ หรือนำไปใช้เชื่อมท่อในแนวยาวของท่อ แบบอัตโนมัติต่อเนื่อง

ข้อได้เปรียบของเครื่องเห็นยวนำความร้อนโดยใช้สนามแม่เหล็กนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนแก่เหล็กโดยวิธีการแบบเก่าโดยการใช้เตา มีดังนี้

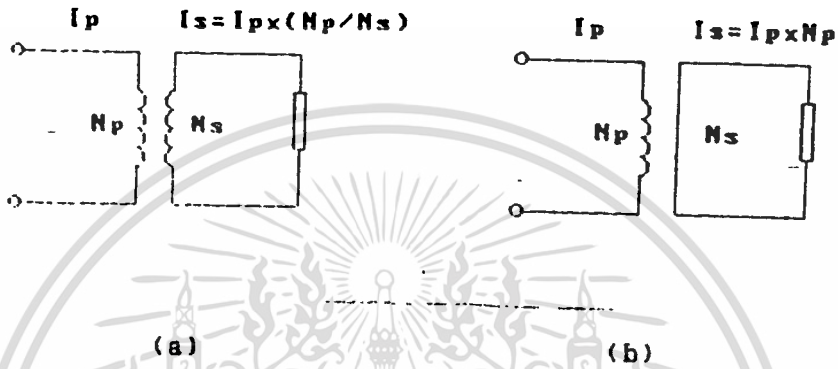
- ใช้เวลาในการเดินเครื่องน้อย
- ใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่เหล็กน้อยกว่า
- สามารถควบคุมให้เกิดความร้อนเฉพาะตำแหน่งได้
- สามารถนำมาปรับปรุงเป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย
- ลดพื้นที่ในการปฏิบัติงาน
- ประสิทธิภาพสูง
- ลดมลภาวะ

จากการที่มองเห็นประโยชน์และความจำเป็นทางอุตสาหกรรม จึงได้มีการทดลองและพัฒนาเครื่องใช้เองภายในประเทศ โดยส่วนประกอบต่างๆ สามารถหาได้ตามท้องตลาดโดยทั่วไป

บทที่ 2

1. หลักการของการเหนี่ยวนำความร้อ

แนวความคิดเบื้องต้นมาจากหลักการของหม้อแปลง จากแบบโครงสร้างจะหมายถึง
ว่าเป็นหม้อแปลงที่มีขดลวดทางทุติยภูมิเพียงรองเดียว และมีการลัดวงจร ดังรูป



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของหม้อแปลงตามหลักการ

จากรูปที่ 2.1 ทำให้เราได้ ลักษณะรูปร่างของคอยล์ของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อ
พันด้วยจำนวนรอบที่เหมาะสมเพื่อเหนี่ยวนำขึ้นงาน ซึ่งเปรียบเสมือนขดทางทุติยภูมิที่มีรอบเดียว
สำหรับขึ้นงานหนึ่ง ๆ จะปรากฏเป็นค่าไหลที่แตกต่างกันไป ตามลักษณะของขึ้นงานด้วยหลักการ
ของหม้อแปลงกำลังที่เราให้ทางด้านหัวคอยล์ก็จะไปปรากฏบนขึ้นงาน ซึ่งถ้าไม่มีการสูญเสีย เราจะ
ได้กระแสที่ไปปรากฏบนขึ้นงานจะเป็นไปตามสมการ $I_s = I_p \times N_s$ สำหรับช่องว่างอากาศ
ระหว่างคอยล์กับแท่งเหล็กที่เป็นไหลจะต้องมีค่าน้อย ๆ เพื่อลดการสูญเสีย

ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของขดลวดของคอยล์จะไปเหนี่ยวนำขึ้นงาน ผลจาก
การเหนี่ยวนำสิ่งที่เราต้องการคือการสูญเสียในรูปของกระแสไหลวน (Eddy current I_{loss})
เพื่อที่จะให้ได้ กระแสสูญเสียมากๆ คือ ต้องมีกระแสสูงๆ และมีความถี่สูง เราจะใช้กระแสไปใน
การควบคุมอุณหภูมิของขึ้นงาน ซึ่งสำหรับความถี่นั้นจะมีผลต่อความลึกของผิวที่ใช้ชุบแข็ง ซึ่งความลึก
ของผิวขึ้นอยู่กับค่าสภาพความต้านทาน resistivity (ρ) , relative permeability (μ)
กับความถี่ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\text{ความลึก} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}}$$

2. ทฤษฎีของการเหนี่ยวนำความร้อนโดยสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา เมื่ออยู่ภายในเนื้อเหล็กจะเกิดปรากฏการณ์ในลักษณะที่ว่า สนามแม่เหล็กที่ผิวมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกจากผิวของเหล็กซึ่งเราเรียกลักษณะนี้ว่าสกินเอฟเฟ็คท์ (Skin Effect) ซึ่งจากผลของสกินเอฟเฟ็คท์นี้ ทำให้มีกระแสไหลเฉพาะที่ผิวของเหล็กเท่านั้น ดังนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าไปให้กับเหล็กจะอยู่เฉพาะที่ผิว

2.1 การกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็ก

ในการหาการกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็กนั้น กำหนดให้ isoplasement current นั้นน้อยมากไม่นำมาคิด

จากสมการของสนามแม่เหล็ก

$$\nabla \times H = J \quad \dots (1)$$

$$\nabla \times E = -(\partial B / \partial t) \quad \dots (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \dots (3)$$

ถ้าในเหล็กมีค่า conductivity (σ) และจากกฎของโอห์ม

$$J = \sigma E \quad \dots (4)$$

แทนค่า J ในสมการ (1)

$$\nabla \times H = \sigma E$$

$$\nabla \times \nabla \times H = \nabla \times (\sigma E)$$

$$\nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H = \nabla(\sigma) \times E + \sigma \nabla \times E \quad \dots (5)$$

จากสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} \nabla \cdot B &= \nabla \cdot \mu H \\ &= H \cdot \nabla \mu + \mu \nabla \cdot H = 0 \end{aligned}$$

$$\nabla \cdot H = -H \cdot \left[\frac{1}{\mu} \right] \nabla \mu \quad \dots (6)$$

แทนค่าจากสมการ (2), (6) ในสมการ (5)

$$\nabla^2 H = \nabla(-H \cdot (1/\mu) \nabla \mu) - \nabla(\sigma) \times E - \sigma(-\partial B / \partial t)$$

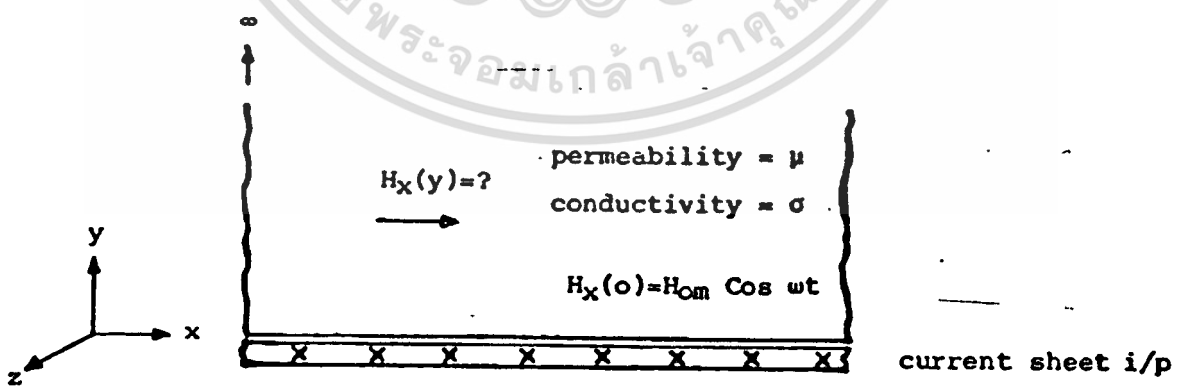
กำหนดให้เหล็กที่ใช้เป็น isotropic media มีค่า permeability (μ) กับค่า conductivity (σ) นั้น คงที่ตลอดเนื้อสาร.

ดังนั้น $\nabla \mu = 0$; $\nabla \sigma = 0$; $\frac{dB}{dH} = \mu$

$$\nabla^2 H = \sigma \left[\frac{dB}{dH} \right] \cdot \left[\frac{\partial H}{\partial t} \right]$$

ดังนั้น $\nabla^2 H = \sigma \mu \left[\frac{\partial H}{\partial t} \right] \dots (7)$

หากการกระจายของ H ภายในเนื้อเหล็ก โดยเริ่มกำหนดจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H_x) ที่ผิวเหล็กมีทิศทางในแนวแกน x เท่านั้น และคิดว่าแท่งเหล็กมีขนาดยาวในแกนต่างๆ มากโดยมี current sheet ที่ทำให้เกิด H_x อยู่ในตำแหน่ง $x = 0$ โดยมีค่าสูงสุดคือ H_{om} และมีทิศทางของ current sheet อยู่ในแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเนื่องจาก current sheet ขนานกับแกน z ตลอด เพราะฉะนั้น ขนาดของ H จะขึ้นอยู่กับค่า y โดยไม่แปรตาม x และ z



รูปที่ 2.2 ขดลวดตัวนำและเหล็กที่หนามาก

กำหนดให้ที่ $y = 0$ (ที่ผิวของเหล็ก)

$$H_x(0) = H_{0m} \cos wt$$

เราสามารถแทนสมการตรีโกณให้อยู่ในรูปของ exponential ได้ โดยจาก Euler's Identities

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการของความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ได้ดังนี้คือ

$$H_x(0) = \operatorname{Re}(H_{0m} \cdot e^{j\omega t})$$

หรืออาจไม่เขียน Re ไว้ แต่เมื่อได้คำตอบก็หาค่า real part จากสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} \nabla^2 H &= \sigma \mu \left[\frac{\partial H}{\partial t} \right] \\ \nabla^2 H &= \left[\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} \right] + \left[\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} \right] + \left[\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีทิศทางในแนวแกน x และ แปรตามระยะทาง y เท่านั้น

$$\left[\frac{d^2 H_x}{dy^2} \right] = \sigma \mu \left[\frac{dH_x}{dt} \right]$$

กำหนดให้ $H_x = H_x(y) \cdot e^{j\omega t}$ โดยที่ $H_x(y)$ เป็นค่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แปรตามระยะ y

$$\therefore \left[\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} \right] - \sigma \mu j \omega H_x = 0$$

จาก $\sigma = 1/\rho$



เมื่อ μ เป็นค่า resistivity

$$\therefore \left[\frac{d^2 H_x}{dy^2} \right] - (\mu/\rho) j\omega H_x = 0$$

กำหนดให้ $\alpha^2 = \left[\frac{\mu\omega}{2\rho} \right]$

$$\therefore \left[\frac{d^2 H_x}{dy^2} \right] - 2j\alpha^2 H_x = 0$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของ differential equation ได้คือ

$$\left[\frac{d^2 H_x}{dy^2} \right] - K^2 H_x = 0$$

เมื่อ $K^2 = 2j\alpha^2$

และ solution of differential ได้ดังนี้

$$H_x = A_1 \cdot \exp(Ky) + A_2 \cdot \exp(-Ky)$$

ซึ่งสามารถหาค่า A_1 และ A_2 ได้จาก boundary condition ที่ตำแหน่ง

$$Y = \alpha \quad H_x = 0$$

$$\therefore A_1 = 0$$

$$Y = 0$$

$$H_x(0) = H_{om} \cdot \exp(j\omega t)$$

$$\therefore A_2 = H_{om} \cdot \exp(j\omega t)$$

ดังนั้น $H_x = H_{om} \cdot \exp(-Ky) \cdot \exp(j\omega t)$

$$\begin{aligned} \text{จาก } K &= \sqrt{2j\alpha^2} \\ &= \sqrt{1+j^2} \cdot \alpha \\ &= (1+j)\alpha \end{aligned}$$

$$H_x = H_{om} \cdot \exp\{-(1+j)\alpha y\} \cdot \exp(j\omega t)$$

$$H_x = H_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha y)\} \quad \dots (8)$$

ซึ่งค่าของ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะเป็น real part

$$H_x(y) = H_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad \dots (9)$$

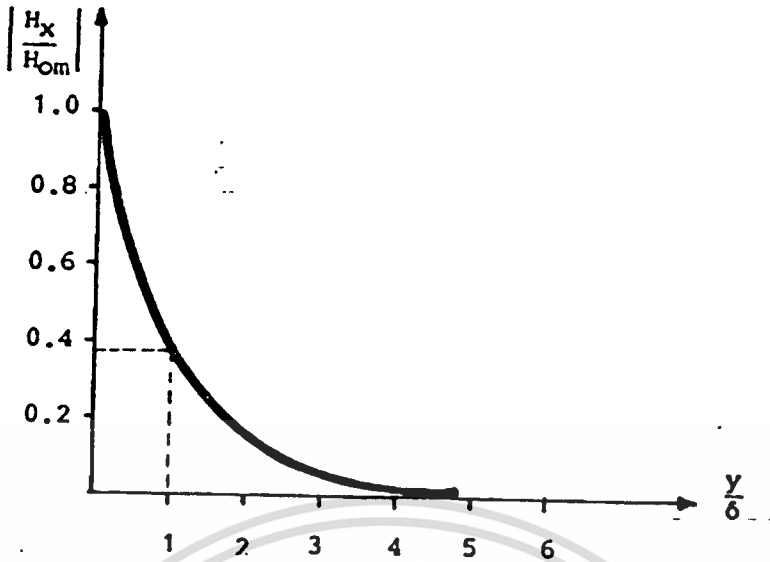
จากสมการจะเห็นว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึก จากผิวตามค่าที่นำมาคือ $\exp(-\alpha y)$ และที่ความลึกต่างๆ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะ lag สนามที่ผิวเป็นมุม αy

2.2 สกินเอฟเฟ็คท์ (Skin Effect)

จากหัวข้อ 2.1 จะเห็นได้ว่าค่าของสนามแม่เหล็กนั้นกระจายตามความลึกของ y โดยแสดงโดยสมการที่ (9) โดยที่เทอมของ $\exp(-\alpha y)$ เป็นตัวกำหนดขนาดของเมกนิจูด ของ H_x ที่ระดับความลึกจากผิวต่างๆ

$$\text{ที่ } y = 1/\alpha \text{ ซึ่งมีผลทำให้เทอม } \exp(-\alpha y) = e^{-1} = 0.368$$

เรียกค่า y นี้ว่า Skin depth ใช้สัญลักษณ์ δ



รูปที่ 2.3 การกระจายของ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กกับความลึก

จาก $\delta = 1/\alpha$

$$\therefore \delta = \sqrt{\frac{2r}{\mu w}} \dots (10)$$

โดยที่ r คือ resistivity โห้ม-เมตร
 μ คือ permeability เวปเปอร์/แอมป์-เทอร์น-เมตร
 w คือ ความเร็วเชิงมุม เรเดียน/ตารางเมตร

ซึ่งจะได้ความล้นนั้แสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 2.3

2.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแสและความเข้มของสนามไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงการกระจายของความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็ก ซึ่งมีค่า permeability คงที่ จึงสามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยสมการที่ (9)

$$H_x(y) = H_{0m} \cdot \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y)$$

และจาก $B = \mu H$

$\therefore B_x(y) = \mu H_{0m} \cdot \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \dots (11)$

นอกจากนี้ยังสามารถหา ความหนาแน่นของกระแส ในเนื้อเหล็กที่จุดต่างๆ ได้ โดยจากที่ทราบว่า

$$\nabla \times H = J$$

โดยที่ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้น มีทิศทางในแนวแกน x เท่านั้น และแปรค่าตามระยะทางในแกน y

เมื่อ i, j, k เป็น unit vector ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

$$\nabla \times H = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ H_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$\therefore J_z(y) = - \left[\frac{\partial H}{\partial y} \right]$

จากสมการที่ (8)

$$H_x = H_{0m} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha y)\}$$

$$= H_{0m} \cdot \exp(j\omega t) \cdot \exp(-\sqrt{2j} \cdot \alpha y)$$

ดังนั้นจะได้

$$J_x(y) = H_{om} \cdot \sqrt{2j} \cdot \alpha \cdot \exp(-\sqrt{2j} \cdot \alpha y) \cdot \exp(j\omega t)$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } \sqrt{2j} &= 1+j \\ &= \sqrt{2} \cdot \exp(j \cdot \pi/4) \end{aligned}$$

$$J_x(y) = \sqrt{2} \cdot H_{om} \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha y + (\pi/4))\}$$

ซึ่งค่าของ ความหนาแน่นกระแส จะเป็นค่า real part

$$J_x(y) = \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot H_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y + (\pi/4)) \quad \dots (12)$$

หา ค่าความหนาแน่นกระแส ที่ตำแหน่ง $y = 0$

$$J_x(y) = \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot H_{om} \cdot \exp(j(\omega t + (\pi/4)))$$

กำหนดให้

$$J_{om} = \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot H_{om} \cdot \exp(j \cdot (\pi/4))$$

ซึ่งค่า J_{om} จะเป็นขนาด magnitude ที่ตำแหน่ง $y = 0$ หรือที่ผิวของโลหะ และ เฟส ของ J จะ lead H ที่จุดต่างๆ เป็นมุม $\pi/4$ หรือ 45 องศา

$$\therefore J_x(y) = J_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(j(\omega t - \alpha y))$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่า ความหนาแน่นกระแส ที่ความลึกต่างๆ จาก

$$J_x(y) = J_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y) \quad \dots (13)$$

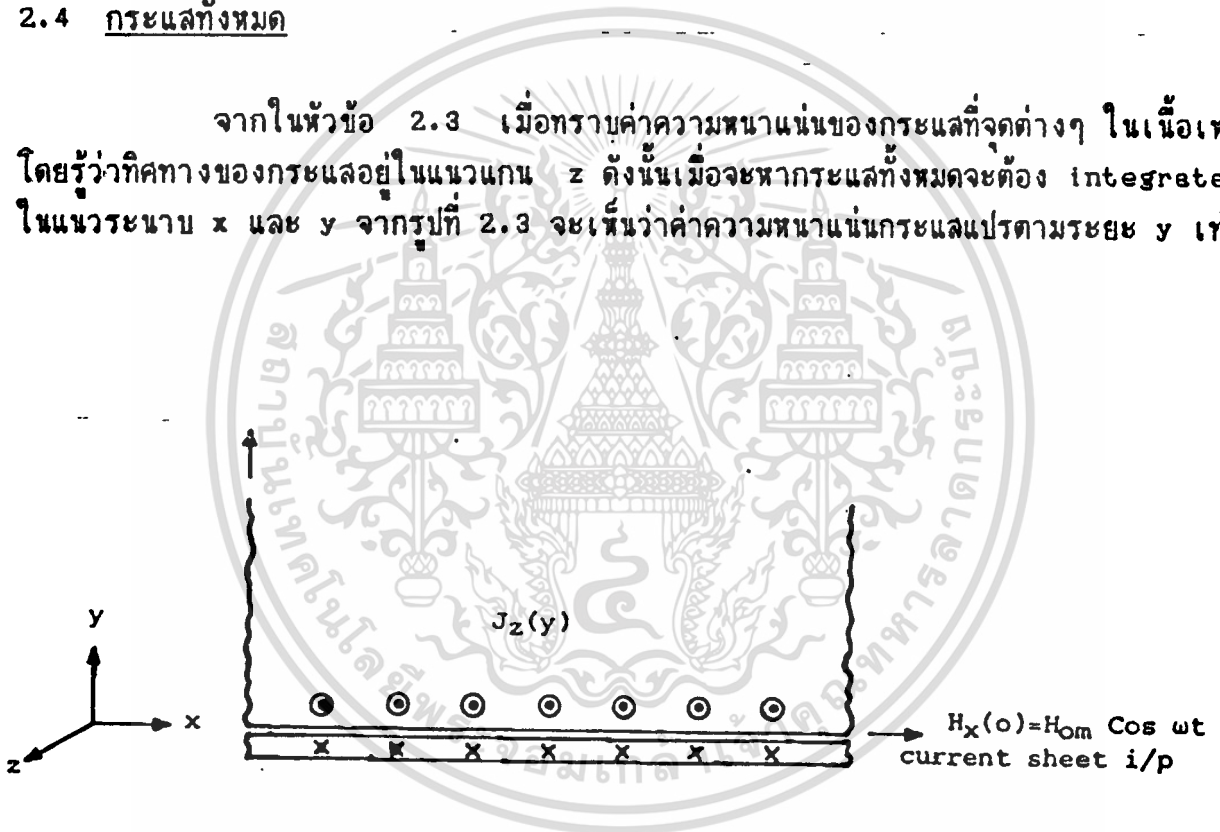
จากการหา ความหนาแน่นกระแสจะพบว่า J จะมีทิศอยู่ในแนวแกน z และจะสามารถหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดในเหล็ก

จาก $E = J/\sigma = \rho J$

$\therefore E_z(y) = \rho J_{0m} \cdot \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \dots (14)$

2.4 กระแสทั้งหมด

จากในหัวข้อ 2.3 เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของกระแสที่จุดต่างๆ ในเนื้อเหล็ก โดยรูปร่างทิศทางของกระแสอยู่ในแนวแกน z ดังนั้นเมื่อจะหากระแสทั้งหมดจะต้อง integrate J ในแนวระนาบ x และ y จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสแปรตามระยะ y เท่านั้น



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของความเข้มของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส

เมื่อ ค่าความหนาแน่นกระแสไม่แปรตามระยะทาง x จึงสามารถหา ค่ากระแสไฟฟ้า ต่อ เมตร ในแนวแกน x

ค่ากระแสไฟฟ้า ต่อ เมตร

$$= \int_0^{\alpha} J_z dy$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{\alpha} J_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y) dy \\
 &= J_{om} \cdot \operatorname{Re} \left[\int_0^{\alpha} \exp\{j\omega t - (1+j)\alpha y\} dy \right] \\
 &= J_{om} \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{\exp\{j\omega t - (1+j)\alpha y\}}{-(1+j)\alpha} \right] \Bigg|_0^{\alpha} \\
 &= J_{om} \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{\exp(j\omega t)}{(1+j)\alpha} \right]
 \end{aligned}$$

จาก $J_{om} = \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot H_{om} \cdot \exp(j \cdot (\pi/4))$

ค่ากระแส ต่อ เมตร = $\operatorname{Re}[H_{om} \cdot \exp(j\omega t)]$
 = $H_{om} \cdot \cos \omega t$. . . (15)

จะเห็นว่ากระแสที่ไหลในเนื้อเหล็กจะมีค่าเท่ากับ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวของเหล็กและ inphase กัน

$\therefore I_m = H_{om}$. . . (16)

2.5 กำลังที่เกิดขึ้นในเหล็ก

จากที่สามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสที่จุดต่างๆ ในเหล็กเมื่อทราบค่า resistivity ของเหล็กแล้ว ก็จะหาค่าของกำลังที่สูญเสียในเหล็กต่อ ล.บ. เมตร เท่ากับ σJ^2 เมื่อต้องการรู้กำลังที่สูญเสียทั้งหมดโดยการ integrate ตลอดปริมาตร

แต่เนื่องจาก J ไม่แปรตามแกน x และ z ดังนั้น จึงสามารถหาค่ากำลังที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิวในแกน x และ z โดย

กำหนดให้ P : กำลังที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิว วัตต์/เมตร²

$$P = \int_0^{\alpha} \rho J_z^2 dy$$

$$= \rho \cdot J_{om}^2 \cdot \int_0^{\alpha} \exp(-2\alpha y) \cdot \cos^2(\omega t - \alpha y) dy$$

จะเห็นว่า เทอม $\cos^2(\omega t - \alpha y)$ เมื่อเรา integrate ในช่วงคาบของคลื่น จะได้เท่ากับ 1/2 โดยที่ αy ไม่มีผลต่อค่าของ integrate เนื่องจากค่า $(-\alpha y)$ เป็นผลทำให้ phase shift ไปเท่านั้นเอง

$$P = (\rho \cdot J_{om}^2 / 2) \cdot \int_0^{\alpha} \exp(-2\alpha y) dy$$

$$= (\rho \cdot J_{om}^2 / 4\alpha) \cdot \exp(-2\alpha y) \Big|_0^{\alpha}$$

$$P = \left[\frac{\rho \cdot J_{om}^2}{4\alpha} \right]$$

$$= \left[\frac{\rho \cdot J_{om}^2 \cdot 8}{4} \right]$$

จาก $|J_{om}| = \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot |H_{om}|$

$$= (\sqrt{2} \cdot |H_{om}|) / 8$$

$\therefore P_{AV} = \left[\frac{\rho \cdot H_{om}^2}{28} \right] \dots (17)$

ค่ากำลังที่สูญเสียที่คำนวณได้เป็นค่าเฉลี่ยซึ่งคิดกำลังรวมทั้งหมด ตั้งแต่ที่ผิว $y = 0$ จนถึง $y = \alpha$ เมื่อค่าเปรียบเทียบความสูญเสียตั้งแต่ผิวถึงจุด y ใดๆ กับความสูญเสียที่ผิวถึง $y = \alpha$ ซึ่งจะออกมาเป็น per unit loss.

$$\begin{aligned}
 P_y/P &= \left(\left| \exp(-2\alpha y) \right| \right)_0^y / \left(\left| \exp(-2\alpha y) \right| \right)_0^\alpha \\
 &= \left[\frac{\exp(-2\alpha y) - 1}{-1} \right] \\
 &= 1 - \exp(-2\alpha y)
 \end{aligned}$$

ที่ $y = 1/\alpha = .8$

$$\begin{aligned}
 P_y/P &= 1 - e^{-2} \\
 &= 1 - 0.135 \\
 &= 0.865
 \end{aligned}$$

ที่ $y = 2/\alpha = 2.8$

$$\begin{aligned}
 P_y/P &= 1 - e^{-4} \\
 &= 1 - 0.018 \\
 &= 0.982
 \end{aligned}$$

2.6 เส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดหาได้โดยการ integrate ตลอดพื้นที่หน้าตัดของสนามแม่เหล็กที่ผ่าน เนื่องจากทิศทางของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กขนานกับแกน x ดังนั้นจะตั้งฉากกับระนาบ $y - z$ ซึ่งค่า B จะเปลี่ยนแปลงตามระยะ y เท่านั้น ดังนั้นเราสามารถหาเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวในแกน z

$$\phi = \mu \cdot H_{om} \int_0^{\alpha} \exp(j\omega t - (1+j)\alpha y) dy(x1)$$

$$= \frac{[\mu \cdot H_{om} \cdot \exp\left\{j\left[\omega t - \frac{\pi}{4}\right]\right\}]}{[\sqrt{2} \cdot \alpha]}$$

ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นค่า real part

$$\phi = \frac{[\mu \cdot H_{om}]}{[\sqrt{2} \cdot \alpha]} \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi}{4}\right]$$

... (18)

2.7 การเหนี่ยวนำคักดาไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ในเนื้อเหล็ก ก็จะสามารหาคการเหนี่ยวนำคักดาที่เกิดขึ้นในขดลวดจ่ายพลังงาน

โดยกำหนดว่าขดลวดจ่ายพลังงานมีอยู่ N รอบ

จาก $emf. = N \left[\frac{d\phi}{dt} \right]$

$$= \frac{[-\mu \cdot N \cdot w \cdot H_{om} \cdot \sin\left[\omega t - \frac{\pi}{4}\right]]}{[\sqrt{2} \cdot \alpha]}$$

$$emf. = \frac{[\mu \cdot N \cdot w \cdot H_{om} \cdot \cos\left[\omega t + \frac{\pi}{4}\right]]}{[\sqrt{2} \cdot \alpha]}$$

... (19)

2.8 การคำนวณหาค่าโดยประมาณ

จากทฤษฎี ในการหาค่า Skin Effect นั้นเรากำหนดได้เป็นแผ่นเหล็กที่มีความยาวในแกนต่าง ๆ ยาวจนถึงอนันต์ แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้นจริง ๆ เป็นการสร้างสูตรอย่างง่าย ๆ แล้วเปรียบเทียบกับการใช้งานจริง ๆ ว่าผิดไปไม่มากนัก

Temperature (อาศา C)	ρ (Ω -m)	μ_r	δ (mm)
20	0.160×10^{-6}	60	0.082
200	0.290×10^{-6}	60	0.111
400	0.483×10^{-6}	60	0.143
600	0.755×10^{-6}	60	0.179
800	1.095×10^{-6}	1	1.666
1000	1.165×10^{-6}	1	1.718
1200	1.220×10^{-6}	1	1.758

ตาราง 2.1 ตัวอย่างการคำนวณหา skin effect

จาก skin depth = $\sqrt{\frac{2\rho}{\mu w}}$

เมื่อไฟที่จ่ายให้กับขดลวด มีความถี่ = 100 กิโลเฮิร์ต

∴ จะได้ $w = 2r \times 100 \times 10^3 = 6.28 \times 10^5$ เรเดียน/วินาที

ค่า resistivity กับค่า permeability เป็นค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็ก

กำหนดให้ค่า relative permeability ของเหล็ก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า curie point $\mu_r = 60$ และ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า curie point (760 C) $\mu_r = 1$

ส่วนค่า resistivity เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของเหล็ก ดังนั้นสามารถคำนวณหา skin depth (δ) ของเหล็กจากตาราง 2.1

ส่วน skin depth ของทองแดง โดยค่า μ_r ของทองแดงที่ใช้เป็นลวดตัวนำ มีค่าเท่ากับ 1

resistivity ที่ 50 C = $2 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{-m}$

$$\text{skin depth} = \sqrt{\frac{2 \times 2 \times 10^{-8}}{1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 6.28 \times 10^6}}$$

$$= 0.225 \text{ มิลลิเมตร}$$

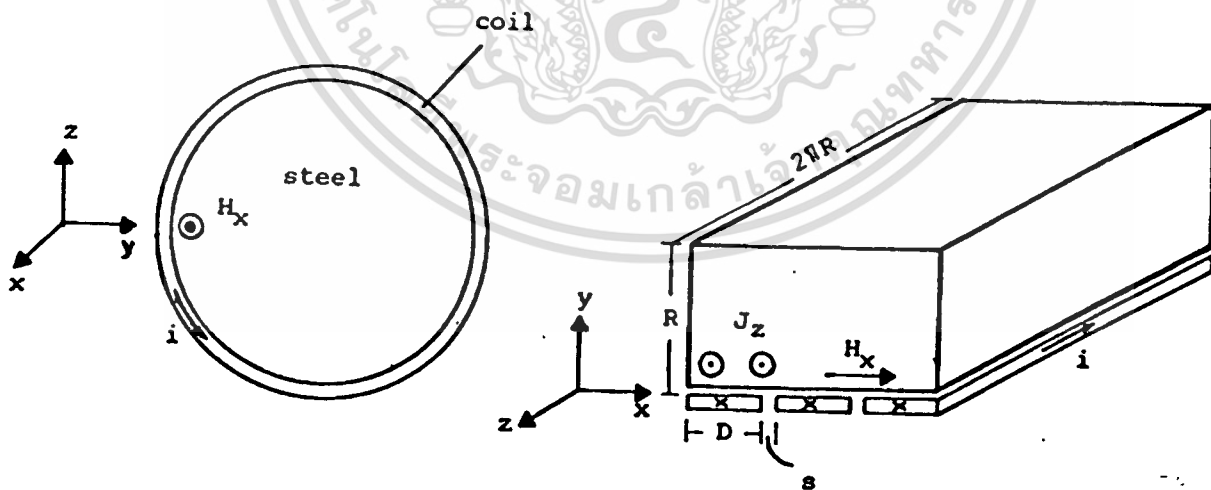
เพราะฉะนั้น ลวดตัวนำที่ใช้จะต้องเป็นแบบแบน

ส่วนขดลวดจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเหนี่ยวนำเหล็กนั้น เมื่อเป็นขดลวดรัศมี R มีจำนวนรอบเท่ากับ N รอบ ความกว้างของลวดที่ใช้ทำขดลวดเท่ากับ D ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ s ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เมื่อจับขดลวดมาตัดแล้วคลี่ออกจะได้

$$\begin{aligned} x &= ND + (N-1)S && \text{เมตร} \\ y &= R && \text{เมตร} \\ z &= 2\pi R && \text{เมตร} \\ V_{max} &= \frac{[\mu_r N w s H_{om} z]}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

... (20)



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบเมื่อคลี่ขดลวดออกมาเป็นแบบ linear ตามแกน x,y และ z

ได้ ดังนั้น \therefore ถ้ารู้ค่าคคคาไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดจ่ายพลังงานจะทำให้สามารถหาค่า H_{om} กระแสทั้งหมดในชั้นงาน $= H_{om} \cdot x$

กระแสทั้งหมดที่ไหลเข้าขดลวด $= \frac{[Hom \cdot x]}{N} \dots (21)$

กำลังที่สูญเสียในเหล็ก $= P \cdot (\text{พื้นที่ของผิวเหล็ก})$

$$= \left[\frac{\rho l om^2}{28} \right] \cdot x \cdot z$$

หรือหากำลังที่ป้อนให้กับขดลวดซึ่งจะเท่ากับกำลังที่สูญเสียในเหล็ก

กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด $= V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$

$$= \left[\frac{1}{2} \right] \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{4} \right]$$

จาก $V_{max} = \frac{\mu \cdot N \cdot w \cdot Hom \cdot z}{\sqrt{2} \cdot \alpha}$

$$I_{max} = \frac{Hom \cdot x}{N}$$

กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด $= \frac{\mu \cdot w \cdot Hom^2}{2\sqrt{2}\alpha} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{4} \right] \cdot (x \cdot z)$

จาก $\mu w = \frac{2\rho}{8}$

และ $\alpha = \frac{1}{8}$

$$\text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่โหลด} = \left[\frac{\rho \text{Hom}^2}{28} \right] \cdot (x \cdot z) \dots (22)$$

จากสมการที่ (20) เมื่อทราบค่าไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดส่งออก ก็จะสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็ก และต่อจากนั้นก็หากระแสที่ไหลในขดลวดตั้งสมการ (21) และ สามารถหาค่ากำลังที่จ่ายให้กับเหล็กได้

3. รูปแบบของการหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

ทฤษฎีของการให้ความร้อนโดยการอาศัยการเหนี่ยวนำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหลอมแบบเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์ทำให้มีการพัฒนาเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำขึ้นแทนเตาหลอมแบบเชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม ข้อได้เปรียบของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำได้แก่

1. ปราศจากก๊าซและของเสียอันจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
2. ใช้ระยะเวลาในการหลอมสั้นกว่า เมื่อเทียบกับเตาหลอมแบบอื่นที่ขนาดเดียวกัน
3. สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและต้นทุนที่ต่ำกว่า
4. ไม่มีการสูญเสียความร้อน ปราศจากควันและความร้อน
5. มีความสูญเสียของโลหะขณะทำการหลอมต่ำ
6. มีค่าบำรุงรักษาเตาหลอมต่ำ
7. สามารถนำวิทยาการใหม่เข้ามาประยุกต์รวมกันได้

ต่อไปจะขอแนะนำชนิดของเตาหลอมที่ใช้กันแพร่หลาย ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่

3.1 เตาหลอมแบบไร้แกนกลาง (Coreless Induction Furnace)

ลักษณะของเตาหลอมแบบนี้จะประกอบด้วย เบ้าหลอมที่ทนความร้อนสูงวางอยู่แกนกลางภายนอกล้อมรอบด้วยคอสล์กำลังซึ่งทำจากทองแดงกลวง สามารถให้นำผ่านเพื่อระบายความ

ร้อน (Cooling) ได้ ตัวคอยล์จะมีสารแม่เหล็กคลุมเพื่อให้นำแม่เหล็กให้ครอบตัวมันเอง เป็นการป้องกันการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวคอยล์ลดลง และป้องกันการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นโลหะที่อยู่ใกล้

ประโยชน์หลักของเตาหลอมแบบไร้แกนกลางคือ การหล่อโลหะ มักจะใช้ในการหลอมโลหะซ้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการก่อนการเทใส่แทนพิมพ์ ส่วนกำลังไฟที่จ่ายให้กับตัวคอยล์ของเตาหลอมแบบไร้แกนกลางนี้มีช่วงความถี่ต่างๆกันดังนี้

1. 50/60 Hz (ความถี่หลัก)
2. 150/180 Hz (Triple Frequency)
3. 500 - 5,000 Hz (2, 3 เป็นความถี่ที่ระดับกลาง)
4. ความถี่ระดับสูง โดยใช้สำหรับเตาหลอมขนาดเล็ก

เตาหลอมแบบไร้แกนกลางมีขอบเขตในการทำงานกับสารอัลลอย (Alloy) หลายชนิดที่การหลอมเดียวกัน และมีความต่อเนื่องในการหลอม โดยจะเริ่มหลอมสารตัวต่อมาเมื่อสารก่อนหน้านั้นหลอมและระบายออกหมดไป แต่มีข้อจำกัดคือ เราไม่สามารถหลอมโลหะขึ้นเล็ก ๆ ที่ความถี่หลักได้ เพราะจะเกิดการลั่นสะเทือนซึ่งจะเป็นอันตรายต่อเข้าหลอม ส่วนที่ระดับความถี่สูงเรามักจะพบเห็นได้กับเตาหลอมขนาดเล็กที่ใช้ในห้องทดลอง เช่น ใช้ในการหลอม ทอง เงิน เป็นต้น เตาหลอมแบบไร้แกนกลาง จะมีช่วงการเริ่มทำงานเร็วจากสภาพที่เข้าเปล่าหรืออุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และให้ผลงานได้มากกว่าเตาหลอมชนิดอื่น

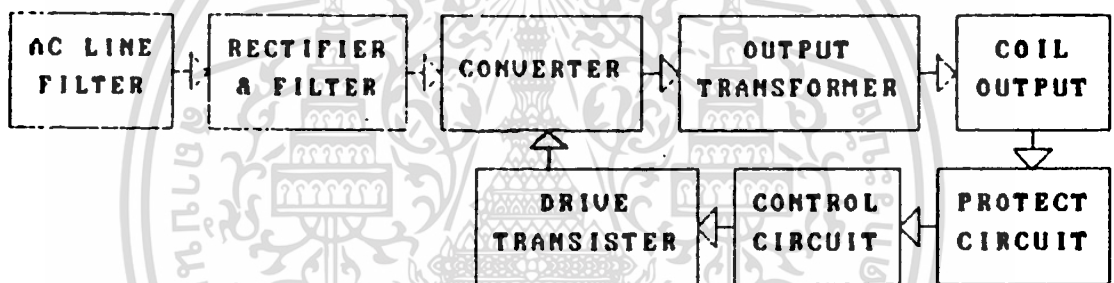
3.2 เตาหลอมแบบช่อง (Channel Induction Furnace)

ลักษณะของเตาหลอมแบบช่องทางที่จะครอบหัวท้ายของตัวอ่างจะบรรจุโลหะ เพื่อสร้างเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าให้ครบวงจรในลักษณะ การลัดวงจรของขดลวดทุกขดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะก็คือ ความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในลวดโลหะนั้นๆ ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราส่วนของจำนวนรอบอันจะมีผลต่อความต้านทานซึ่งจะเป็นตัวจำกัดกระแสไว้ ระดับความถี่ที่ใช้คือ 50/60 Hz มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.5 - 0.7 ซึ่งสูงกว่าแบบไร้แกนกลาง และมีประสิทธิภาพถึง 90-95%

บทที่ 3

โครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

การสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนโดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก สิ่งแรกที่ต้องกระทำคือ สร้างสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาให้ผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็กโดยความถี่ที่จ่ายออกมานั้นจะถูกควบคุมโดย ความต้องการของการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการจะชุบผิวแข็งของเหล็ก ความถี่จะต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้สนามแม่เหล็กไม่ลงไปเนื้อเหล็กมากเกินไป หรือถ้าต้องการให้ความร้อนแก่เหล็กเพื่อหลอมเหล็กหรือให้ความร้อนแก่เหล็กเพื่อใช้ในการขึ้นรูป ความถี่ที่ใช้ก็ไม่ควรที่จะสูงมากจนเกินไป ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

จากรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 8 ส่วน คือ

1. การลดศักดาไฟฟ้า (Step down Voltage)
2. โมดูลสำหรับจ่ายแรงดันให้คอนเวอร์เตอร์ต่อแบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half-Bridge Connected Module)
3. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)
4. วงจรขับ (Driving Circuit)
5. วงจรแปลงระดับแรงดันเป็นความถี่ (Voltage-to-frequency)
6. วงจรจัดเนื้อพัลส์
7. วงจรโหลด (Load Circuit)

8. วงจรตรวจจับชิ้นงาน (Sense Object Circuit)
9. ระบบควบคุม (Control circuit)

ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

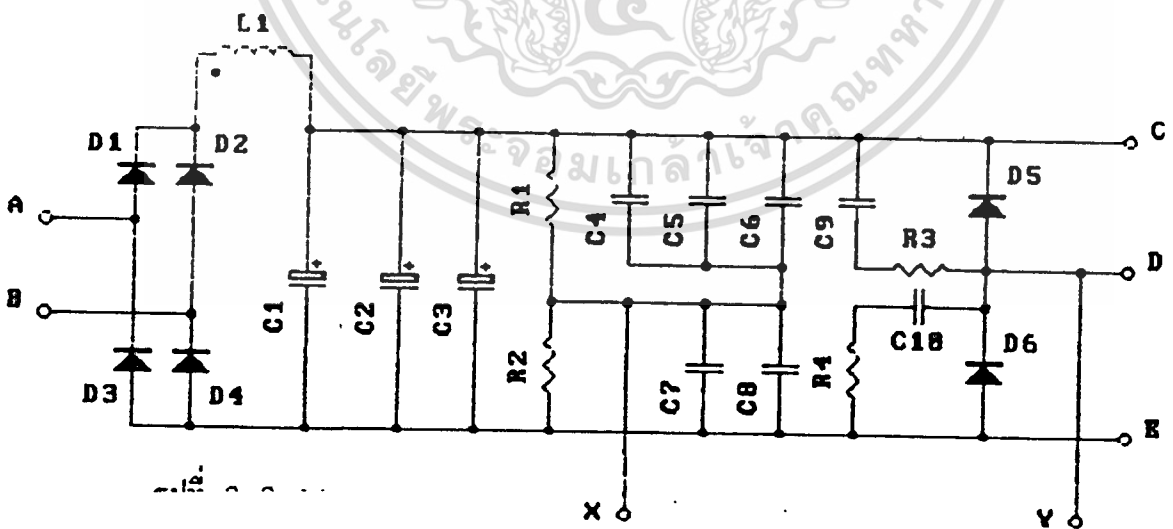
1. การลดค้กตาไฟฟ้า (Step down Voltage)

ทำหน้าที่ลดค้กตาไฟฟ้าให้ได้ค่าเท่ากับที่ต้องการ ประมาณ 80 -100 โวลต์



รูปที่ 3.2 แสดงการลดค้กตาไฟฟ้า

2. โมดูลสำหรับจ่ายแรงดันให้คอนเวอร์เตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half-Bridge Connected Module)



รูปที่ 3.3 แสดงโมดูลสำหรับจ่ายแรงดันให้กับฮาร์ฟบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรในส่วนนี้เป็นส่วนที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากว่าจุดประสงค์ในการทดลองต้อง กระแสที่ไม่สูงมากนัก จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดอาร์ฟบริดจ์และเพื่อต้องการให้มีโมดลของการ จ่ายแรงดันที่ดีและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นโมดลที่ได้รวมเอาส่วนของ การแปลง ไฟตรง ส่วนของวงจรกรอง ภาคจ่ายไฟตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอาร์ฟบริดจ์ และยังรวม ไปถึงสับเบอร์ ซึ่งทำให้โมดลนี้เป็นโมดลที่มีความสมบูรณ์ในตัวเอง เกิดความสะดวกในการใช้ งานได้เป็นอย่างมาก

2.1 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าและกรอง (Rectifier & Filter)

หน้าที่ของวงจรส่วนนี้ก็คือ รับพลังงานโดยตรงจากไฟบ้านมาทำการแปลงแรงดันไฟ สลับที่มีความถี่ 50 เฮิร์ต เพื่อให้เป็นไฟตรง โดยจะเป็นตัวแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มช่วงคลื่น (Full wave Rectifier) แล้วผ่านส่วนของวงจรกรองแรงดัน(Filter) เพื่อกำจัดลักษณะของ แรงดันกระเพื่อม(Ripple) เพื่อส่งเข้าไปยังส่วนของ อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

สำหรับวงจรในส่วนนี้ ส่วนที่สำคัญที่สุดก็คือ บริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge- Rectifier) ซึ่งเวลาเลือกใช้จะต้องแน่ใจว่าสามารถจะทนกระแสและได้รับโวลตรงได้อย่าง น้อย 2 เท่าของค่ากระแสที่ใช้งานมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ (Breakdown Voltage) และจะต้อง ทนต่อกระแสกระชากขณะเริ่มต้นในการเปิดสวิตซ์ทำงานได้ด้วย

สำหรับการเรกติไฟร์ในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ในลักษณะของบริดจ์ เนื่องจากจ่ายกำ ลังได้สูง โดยบริดจ์เรกติไฟร์ (D_1-D_4) ดังในรูปที่ 3.3 เป็นตัวแปลงไฟสลับ (AC) เป็นไฟ ตรง (DC) โดยการต่อไฟกระแสสลับเข้ามาที่จุด A และ B เพื่อผ่านส่วนของบริดจ์เรกติไฟร์ แล้วส่งผ่านไปยัง ขดลวดเหนี่ยวนำ (L_1) ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการเก็บสะสมพลังงาน , ตัวเก็บ ประจุ (C_1, C_2 และ C_3) เป็นตัวกรองให้ได้เป็นแรงดันไฟตรงที่เรียบขึ้น ในลักษณะของวงจร LC-Filter

จากรูปที่ 3.3 ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ทั้ง 3 ตัวนั้นมีค่าเท่ากัน คือ 470 ไมโคร ฟารัด ซึ่งต่อกันในลักษณะขนานกันก็เพื่อเป็นการเพิ่มค่าความจุ ซึ่งจะได้ค่าความเก็บประจุประมาณ 1410 ไมโครฟารัด และเหตุผลที่สำคัญของการขนานตัวเก็บประจุนี้ก็เพื่อเป็นการลดค่าความต้านทานแฝง (ESR) ที่อยู่ภายในตัวเก็บประจุนี้ให้มีค่าน้อยลง และสำหรับค่าของขดลวด L_1 ที่ใช้นั้นเลือกค่าที่ 30 มิลลิเฮนรี่ โดยนั้นไว้บนแกน EI เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้งานในย่านความถี่ต่ำคือ 50 Hz จึงใช้เป็นแกนเหล็กธรรมดาที่เพียงพอแล้ว

2.2 ภาคจ่ายไฟตรงสำหรับอาร์พีบริดจ์

เป็นวงจรส่วนหนึ่งที่ประกอบอยู่ในโมดูล โดยมีตัวต้านทาน R_1 และ R_2 เป็นตัวรักษาระดับแรงดันที่ตกคร่อมจุด CD และ DE คงที่ ซึ่งค่า R_1 และ R_2 ที่ใช้ในวงจรนี้จะใช้ค่าที่เท่ากัน และสำหรับ $C_4 - C_5$ นั้นเป็นตัวเก็บประจุที่กำหนดหน้าที่เพื่อจ่ายกระแสให้แก่อุปกรณ์ลวิตซ์ที่ต่อเข้ามายังจุด CD และ DE

2.3 วงจรลนั้บเบอร์ (Snubber circuit)

สำหรับวงจรลนั้บเบอร์นั้นมีไว้เพื่อลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตกำลัง เนื่องจากพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กในขดลวด เมื่ออุปกรณ์ลวิตซ์หยุดการทำงาน (OFF) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำคิกคาไฟฟ้ากลับทิศในขดลวด ผลคือแรงดันล้นนี้จะเข้าไปเสริมกับแหล่งจ่ายไฟ จึงทำให้คิกคาที่ตกคร่อมอุปกรณ์ลวิตซ์ซึ่งมีลงประมาณ 2 เท่า หรือมากกว่าเมื่อรวมกับสไปค์ (Spike) ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ลวิตซ์นั้นพังได้ง่าย เราจึงควรต้องใช้อุปกรณ์ที่ช่วยป้องกันพลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวดนั้นไม่ให้มีผลต่ออุปกรณ์ลวิตซ์ ซึ่งก็คือการใช้ลนั้บเบอร์ (Snubber) นั้นเอง และสำหรับวงจรลนั้บเบอร์นี้ไดโอดที่ใช้จะต้องเป็นไดโอดชนิด Fast Recovery Diode ซึ่งเมื่อเกิดสไปค์ไดโอดจะเป็นทางผ่านในการเก็บประจุในตัวเก็บประจุ และเมื่ออุปกรณ์ลวิตซ์ทำงาน (ON) จะทำให้ตัวเก็บประจุทำการคายประจุผ่านความต้านทานออกมา ดังนั้นความต้านทานจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการคายประจุ ซึ่งค่าผลคูณของความต้านทานและตัวเก็บประจุ เรียกว่า RC-time Constant ถ้าค่าของ SRC น้อยกว่าเวลาในช่วงเปิด (ON) ของอุปกรณ์ลวิตซ์ จะทำให้ตัวเก็บประจุไม่มีประจุหลงเหลืออยู่ภายใน

ซึ่งจะต่อคร่อมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อช่วยในการกำจัด dv/dt จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า R_3 , C_3 และ D_3 ช่วยป้องกันอุปกรณ์ลวิตซ์ที่จุด CD และ R_4 , C_4 และ D_4 จะป้องกันที่จุด DE

3. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

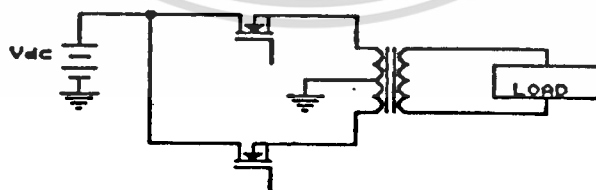
อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นกระแสตรง (DC) ให้เป็นกระแสสลับ (AC) โดยอาศัยอุปกรณ์สวิตช์เป็นตัวเปิดและปิด ซึ่งในโครงงานนี้ใช้ระบบคอนเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว ดังนั้นจะขอกล่าวถึงเฉพาะอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวที่นิยมใช้กันทั่วไปเท่านั้น

ระบบอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- อินเวอร์เตอร์แบบพชพล (Push-Pull Inverter)
- อินเวอร์เตอร์แบบอาร์ฟบริดจ์ (Half-Bridge Inverter)
- อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Inverter)

3.1 อินเวอร์เตอร์แบบพชพล (Push-Pull Inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิตช์เพียง 2 ตัวเท่านั้นแต่ต้องมีหม้อแปลงเซ็นเตอร์แทบ (Center tab) อินเวอร์เตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังสูงมากนัก เนื่องจากการใช้หม้อแปลงเซ็นเตอร์แทบจะทำให้มีค่าของแรงดันสไปค์ (Spike Voltage) เกิดขึ้นมาก และข้อเสียอีกแบบหนึ่งของอินเวอร์เตอร์แบบนี้คือ ต้องพันลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) ให้ขดลวด 2 ขดที่แบ่งโดยจุดกราวน์มีความสมมาตร (Symetrical) กัน ลักษณะของอินเวอร์เตอร์แบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.4

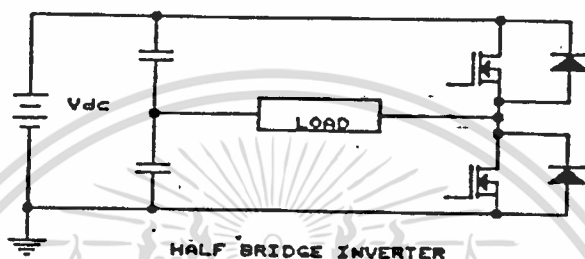


PUSH PULL INVERTER

รูปที่ 3.4 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบพชพล

3.2 อินเวอร์ทเตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half-Bridge Inverter)

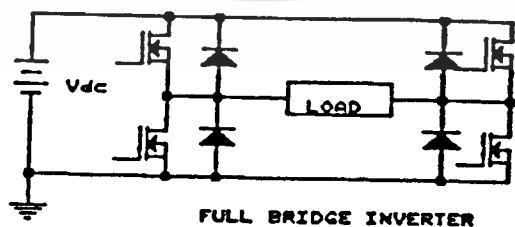
อินเวอร์ทเตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิทช์ 2 ตัวเช่นกัน แต่จะต้องมีตัวเก็บประจุ 2 ตัว เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ทั้ง 2 ตัวนั้นเท่ากัน ข้อเสียของอินเวอร์ทเตอร์แบบนี้คือ ค่ากำลังที่ออกมาจะน้อยกว่าแบบพูลบริดจ์ครึ่งหนึ่ง เนื่องมาจากว่าค่าของแรงดันได้ลดลงครึ่งหนึ่ง ลักษณะของอินเวอร์ทเตอร์แบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงอินเวอร์ทเตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์

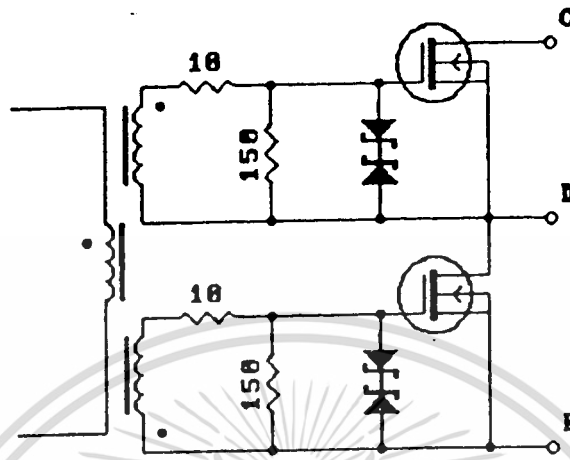
3.3 อินเวอร์ทเตอร์แบบพูลบริดจ์ (Full-Bridge Inverter)

อินเวอร์ทเตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิทช์ 4 ตัว สำหรับอินเวอร์ทเตอร์เฟสเดียวมีข้อได้เปรียบคือสามารถให้กำลังออกมาได้สูง จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการค่ากำลังงานสูงๆ ลักษณะของอินเวอร์ทเตอร์แบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงอินเวอร์ทเตอร์แบบพูลบริดจ์

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ วงจรนี้เราใช้ มอสเฟต เบอร์ MTM15N40 มาต่อกับแบบ ฮาร์ฟบริดจ์ (Half Bridge) ดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงการต่อมอสเฟตแบบฮาร์ฟบริดจ์

เบอร์ MTM15N40 ได้ผลิตขึ้นเพื่อใช้กับแรงดันไฟสูงๆ มีความเร็วในการสวิตซ์ลง ไดโอดที่ต่อระหว่างซอร์ส (Source) กับ เดรน (Drain) มีคุณสมบัติใช้กับโหลดแบบอินดักทีฟ (Inductive Load)

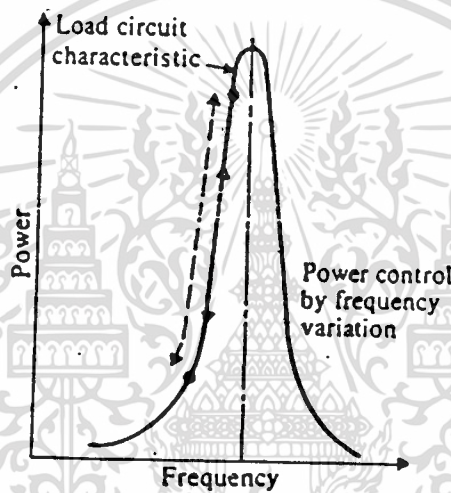
มอสเฟตกำลังมีคุณสมบัติหลายประการแตกต่างไปจากอุปกรณ์ไบโพลาร์ ซึ่งปกติต้องการสัญญาณขับในแรงดันต่ำแต่กระแสสูง ในขณะที่มอสเฟตกำลังต้องการสัญญาณแรงดันสูงโดยดึงกระแสอินพุตต่ำมาก อีกประการหนึ่งแหล่งสัญญาณไฟกระแสสลับต้องสามารถเก็บและปล่อยประจุแก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางขาเกต ทั้งนี้เนื่องจากมอสเฟตกำลังใช้พื้นที่ที่ชิปค่อนข้างใหญ่ ค่าความจุทางขาเกตจึงสูง ใน Switching Amplifier ที่มีประสิทธิภาพสูงได้นั้น จะต้องมิกำลังที่สูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์แอกทีฟน้อยที่สุดคือ

- ก) ต้องทำให้แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ ขณะที่มีกระแสไหลผ่านตัวมันมีค่าน้อยที่สุด
- ข) ในสภาวะที่อุปกรณ์ไม่นำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวมันจะต้องมีค่าน้อยที่สุด
- ค) ในสภาวะที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ คือ ช่วงที่มีแรงดันและกระแสมีช่วงคาบเกี่ยวกัน จะเป็นช่วงที่สั้นที่สุดที่จะทำได้

3.4 ระบบจ่ายกำลังไปสู่หัวคอล์ยโดยใช้อินเวอร์ทเตอร์ ที่ใช้กันมากมีอยู่ 2 ระบบคือ

3.4.1 ระบบสweepเฟรควเอนซี (Swept-frequency)

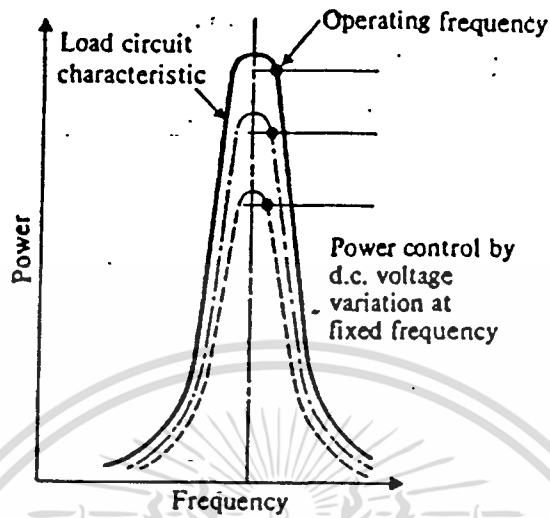
เป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาก่อน ระบบนี้ถูกออกแบบมาสำหรับงานทางด้าน การหลอมที่ต้องการระดับกำลังสูงสุด ประมาณ 100 กิโลวัตต์ (Kilo Watt) โดยค่ากำลังงานที่จ่าย ออกไปสู่โหลดจะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ ข้อได้เปรียบของระบบนี้คือ ค่ากำลังที่ออกสู่โหลดจะ ถูกจำกัดด้วยลักษณะของโหลดในขณะนั้น เหมาะกับโหลดที่มีค่า $Q(x1/R)$ สูง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังต่อค่าความถี่ของระบบนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบสweepเฟรควเอนซี

3.4.2 ระบบโหลดรีโซแนนท์ (Load-resonant)

ระบบนี้ได้รับการพัฒนาต่อมาจากระบบสweepเฟรควเอนซี เพื่อให้มีกำลังออกสู่โหลด สูงขึ้นโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่า Q ของโหลด มีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังสูงๆ ลักษณะการ ทำงานของระบบนี้ค่าความถี่ของอินเวอร์ทเตอร์จะเปลี่ยนไปตามโหลด โดยความถี่จะวิ่งเข้าสู่ ความถี่รีโซแนนท์ และการปรับค่ากำลังที่ออกสู่โหลดทำได้โดยการปรับค่าของไฟกระแสตรงที่จ่าย เข้าสู่อินเวอร์ทเตอร์ ดังนั้น ประสิทธิภาพของระบบสweepเฟรควเอนซีที่หายไปจะถูกกำจัดทิ้งไปใน ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบโหลดรีโซแนนท์ ซึ่งระบบโหลดรีโซแนนท์นี้เป็นระบบ ที่ใช้ในโครงการนี้โดยความถี่รีโซแนนท์จะถูกติดตามโดยไมโครโปรเซสเซอร์ ระบบดังกล่าวแสดง ได้ดังรูปที่ 3.9



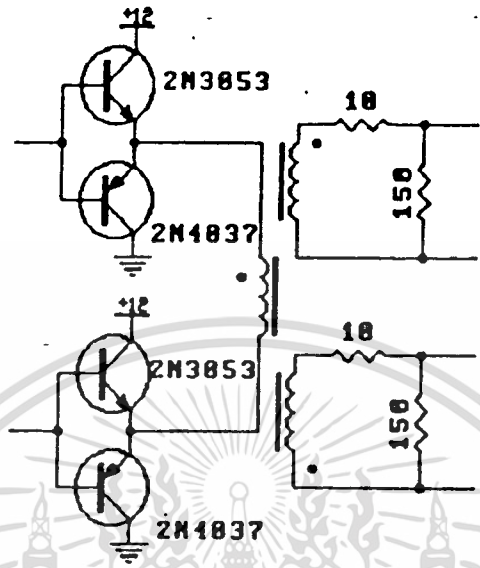
รูปที่ 3.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของระบบไหลตรีโซแนนท์

4. วงจรขับ (Driving Circuit)

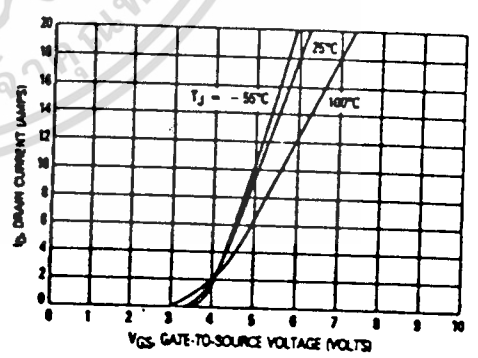
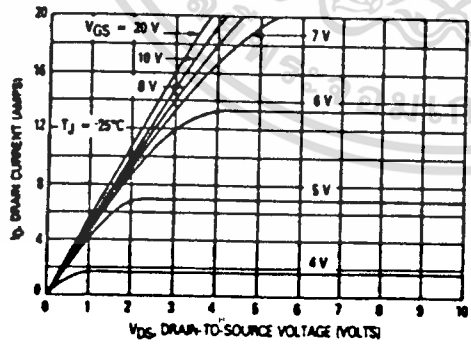
มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิทช์ที่ควบคุมแรงดันการทำงานโดยแรงดันไฟฟ้า สำหรับชนิด เอ็น-แชนแนล (N-Channel) แล้ว ต้องการแรงดันไฟบวกที่ขาเกตและซอร์ส เพื่อยับให้ เกิดกระแสไหลที่ขาเดรน ดังแสดงในรูปที่ 3.10

จากรูปที่ 3.10 มีการต่อทรานซิสเตอร์ในลักษณะของ Emitter-Follow Buffer ซึ่งจะช่วยในการลด t_r (Rise-Time) และ t_f (Fall-Time) ของสัญญาณขับด้วย และสำหรับอินเวอร์ทเตอร์ที่โครงงานนี้ใช้เป็นอินเวอร์ทเตอร์แบบอาร์ฟบริดจ์ ซึ่งจะต้องมีการขับเกตที่ต่างเฟสกันและยังต้องแยกกราวด์ออกจากกันอีกด้วย จึงต้องใช้หม้อแปลงมาช่วยในการแมชซิ่ง ซึ่งหม้อแปลงที่ใช้เป็นแกนเฟอร์ไรท์ ขนาดขอบบิ้น E128 เนื่องจากการใช้งาน ในย่านความถี่สูง

สำหรับสัญญาณที่ควบคุมการขับนั้นจะได้อาจมาจากวงจรในส่วนเอทดี ที่ผ่านการประมวลผลจากไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 แล้ว เพื่อเข้าสู่วงจรการแปลงระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage-to-frequency) ให้เป็นความถี่เพื่อป้อนเข้าไปในส่วนของวงจรคอนเวอร์ทเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 3.10 แสดงส่วนของวงจรขับ



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{DS} กับ I_D

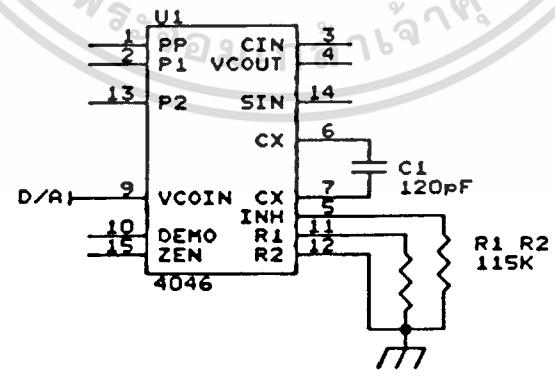
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วงจรแปลงระดับแรงดันเป็นความถี่ (Voltage-to-frequency)

หลังจากที่วงจรตีเอนแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอกแล้ว จะได้ระดับแรงดันต่างๆ กันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ออกมาจาก ไมโครโปรเซสเซอร์ ดังนั้น วงจรวิทเฟม (Voltage-to-frequency) จะเป็นส่วนสำคัญที่จะแปลงระดับแรงดันเหล่านี้ให้เป็นความถี่ที่ต้องการ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ ไอซีเบอร์ 4046 ซึ่งเป็นเฟสล็อกคัลป์ แต่เรานำเอาเฉพาะส่วน VCO มาใช้เพื่อใช้เป็นส่วนของการสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) โดยต่อวงจรในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างภายในของไอซีเฟสล็อกคัลป์



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรสำหรับสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมด้วย 4046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_1 จะเป็นตัวสำคัญในการกำหนดความถี่ของวงจรที่ระดับแรงดันหนึ่งๆ เนื่องจากมักจะเป็นตัวออสซิลเลทความถี่ นิยามว่า R_1 และ C_1 ร่วมกันจะมีผลต่อการกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งานและ R_2 เป็นตัวกำหนดความถี่ออฟเซตที่ต้องการ ซึ่งการกำหนดค่า C_1 , R_1 และ R_2 มีความสำคัญมาก เนื่องจากว่าจะเป็นการกำหนดช่วงความถี่ใช้งานที่เหมาะสม

Typical Performance Characteristics

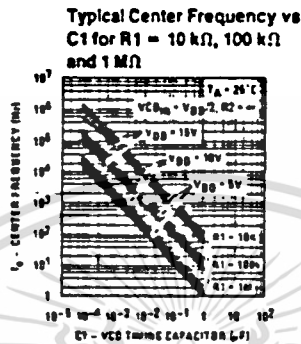


FIGURE a

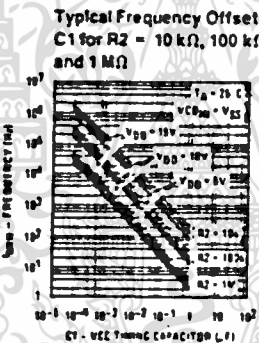


FIGURE b

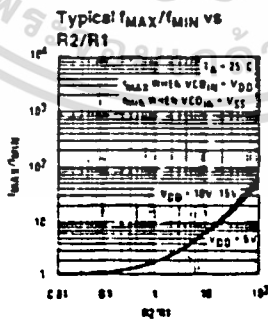


FIGURE c

รูปที่ 3.14 แสดงกราฟการหาค่า R_1 , R_2 และ C_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 (a)

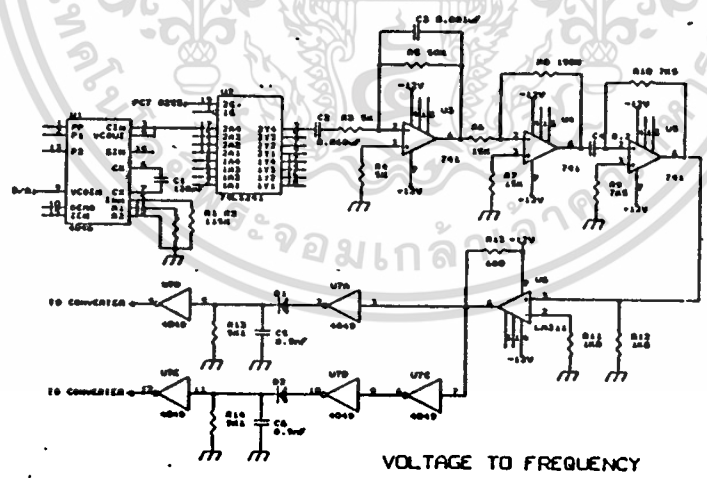
f_0 คือ ความถี่ที่แรงดัน $\frac{V_{pp}}{2}$
 αf_L คือ ช่วงของความถี่ ซึ่งหาได้จาก $f_{max} - f_{min}$

ถ้าหากเรารู้ค่า f_0 และ αf_L แล้ว เราจะสามารถนำมากำหนดค่าของ R_L, R_2 และ C_L ได้

ดังนั้น หา f_{min} จาก $f_0 - f_L$
 นำค่า f_{min} ไปเปิดกราฟในรูปที่ 3.14 (b) เพื่อหาค่า R_L และ C_L
 คำนวณค่า $\frac{f_{max}}{f_{min}}$

นำค่าที่ได้ไปเปิดตารางที่ 3.14 (c) เพื่อหาอัตราส่วน $\frac{R_1}{R_2}$
 จากนั้นก็จะได้ออกมา R_L ออกมา

เมื่อเราได้ค่า R_L, R_2 และ C_L ออกมาแล้วเราก็จะได้ช่วงความถี่ที่เราต้องการ



รูปที่ 3.15 แสดงวงจรแปลงระดับแรงดันเป็นความถี่

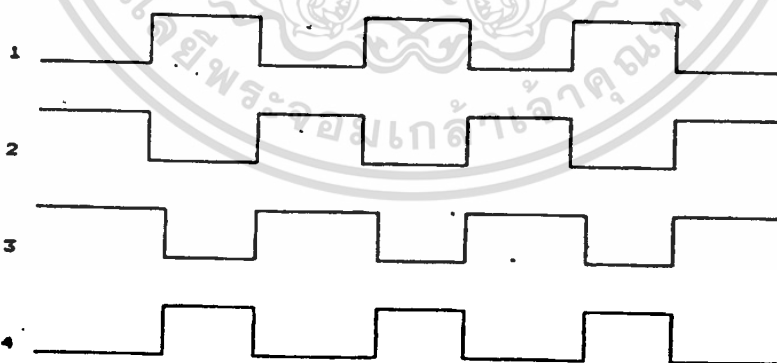
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 ส่วนของการสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม ซึ่งสร้างจาก 4046 เมื่อได้สัญญาณแล้วจะถูกป้อนเข้าไปในไอซี 74LS241 ซึ่งไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 จะนำไปใช้เป็นตัวควบคุมในการจ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณสี่เหลี่ยมที่ออกมาจากไอซี 74LS241 จะถูกนำมาอินทิเกรตในไอซี 741 สองตัวแรก ซึ่งสัญญาณที่ได้ออกมาจะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมจากนั้นก็จะถูกขยายโดย 741 ตัวต่อไป แล้วหลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังวงจรส่วนของการเปรียบเทียบซึ่งใช้ไอซี LM311 ซึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรจัดเนื้องพัลส์ต่อไป

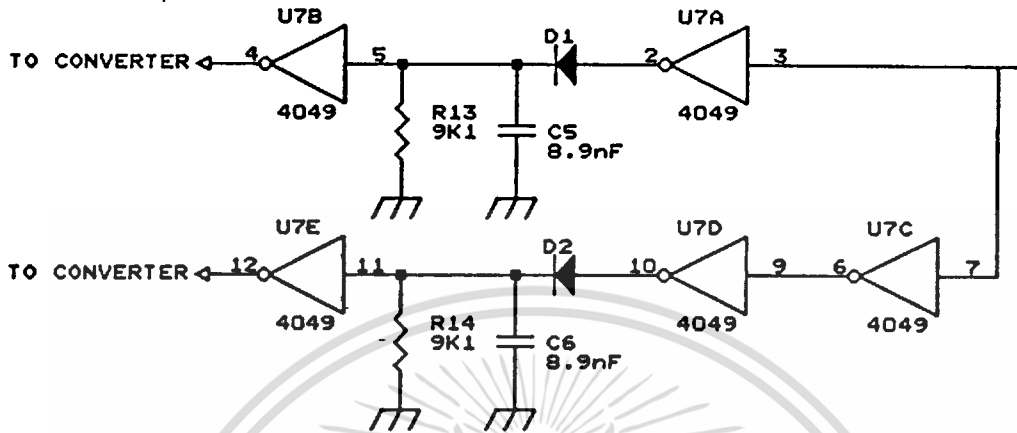
6. วงจรลดขนาดความกว้างของพัลส์

วงจรมีหน้าที่ตัดขนาดความกว้างของเนื้องพัลส์ให้แคบลงเล็กน้อย เพื่อป้องกันการลัดวงจรของมอสเฟตในแนวตั้งเดียวกัน เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วมอสเฟตจะมีเวลาหน่วงเนื่องจากการสวิตชิ่งอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาในด้านการใช้งานให้ปลอดภัยแล้วจึงมีความจำเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาขนาดพัลส์ที่ตัดออกนั้น จะขึ้นอยู่กับว่าเอาท์พุทของวงจรรีเลย์หรือเทอร์สเตอร์จะยังคงเป็นรูปสัญญาณแบบ 2 ระดับอีกด้วย

การทำงานของวงจรมีหลักการของการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุ แล้วนำช่วงเวลามากกระทำทางลอจิก (Logic) จะได้เอาท์พุทเป็นพัลส์ที่เหมือนกับพัลส์ที่เข้ามาทกประการ แต่จะแตกต่างกัน เนื้องพัลส์บริเวณขอบขาขึ้นของพัลส์ขาเข้าจะถูกตัดออกไปเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้าและออกจากวงจรลดขนาดของพัลส์



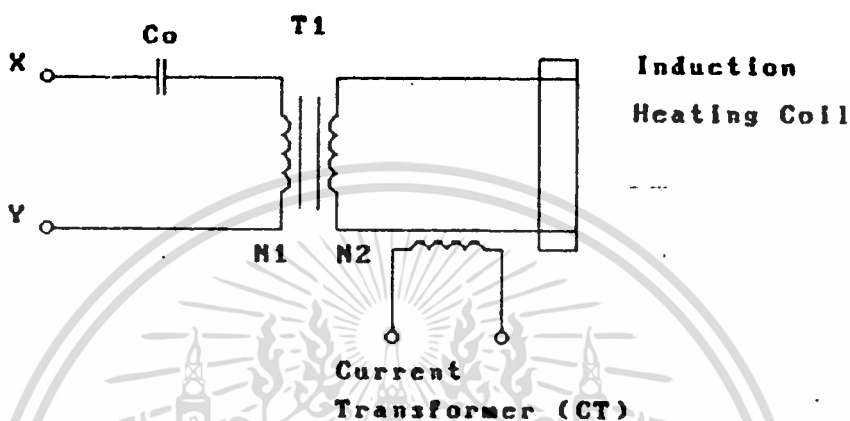
รูปที่ 3.17 แสดงรูปร่างจรลดขนาดของพัลส์

จากรูปที่ 3.16 ตัวเก็บประจุจะช่วยให้คิกที่จาวินทของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ยังคงสถานะเป็น High อยู่อีกช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งช่วงเวลาเวลานี้คือช่วงเวลาที่มีพัลส์จะถูกกำจัดออกไปนั่นเอง สำหรับไดโอดทำหน้าที่บล็อกเพื่อไม่ให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แก่ตัวต้านทานเท่านั้น ดังนั้นจากหลักการนี้การกำหนดขนาดของพัลส์ที่จะถูกกำจัดออกจึงขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุนั่นเอง โดยพิจารณาตัวต้านทานและไอซีที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย หลังจากสัญญาณผ่านวงจรจัดเนื้อพัลส์แล้วก็จะถูกขับกระแสโดยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว คือ เบอร์ 2N3053 และ 2N4037 และ ส่งไปยังส่วนของหม้อแปลงไอโซเลต เพื่อแยกส่วนคิกต่ำและคิกสูงออกจากกัน

7. วงจรโหลด (Load Circuit)

เป็นส่วนที่ต้องวงจรออกมาจากจุด X และ Y ในส่วนของโมดูล ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วยหม้อแปลงที่ใช้ส่งถ่ายพลังงานจากส่วนของอินเวอร์เตอร์ เพื่อส่งไปยังส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำ (Induce CoLi) ซึ่งสัญญาณที่เข้ามาจะเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงที่ได้มาจาก

คอนเวอร์เตอร์ เพราะฉะนั้น จึงควรต้องใช้วัสดุที่เป็นเฟอร์ไรต์เพื่อลดการสูญเสีย สำหรับขดลวดที่ขดกันจะมีกระแสไหลสูงมาก ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับขดลวดความร้อนซึ่งจะเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กเข้าไปในเนื้อเหล็กเพื่อให้เกิดความร้อน เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสแล้วยังประกอบด้วยความร้อนจากตัวชิ้นงานที่ส่งถ่ายมา ดังนั้น จึงต้องมีระบบระบายความร้อนที่ดีด้วย



รูปที่ 3.18 แสดงการต่อส่วนของการนำความร้อน

สำหรับหม้อแปลงตัวนี้ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (N₂) จะพันน้อยๆ ซึ่งในโครงงานนี้จะพันเอาไว้เพียง 1 รอบ (ตามหลักการที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2) ซึ่งวัตถุประสงค์ก็เพื่อต้องการให้กระแสไหลในทางด้านทุติยภูมิสูงๆ เพื่อที่จะจ่ายกำลังให้แก่ขดลวดความร้อนให้มาก ทำให้เกิดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิสูง จึงเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนที่ดี ซึ่งแกนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เป็นแกนแบบ Flyback ที่เป็นวัสดุเฟอร์ไรต์ ชนิด Mn-Zn เพราะว่าการสูญเสียต่ำมากเมื่อใช้งานในความถี่สูง

สำหรับเวลาพันขดลวดควรพันให้แน่นเพื่อป้องกันการสูญเสียที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Reactance) และสำหรับปัญหาในการทดลองที่เกิดขึ้นนี้คือขดลวดทางด้านทุติยภูมินี้จะมีกระแสไหลสูงเพราะฉะนั้นขดลวดที่ใช้จะต้องมีขนาดใหญ่ จึงทำให้การพันค่อนข้างจะเป็นปัญหาอยู่มาก โดยเฉพาะการพันให้แน่นนี้

สำหรับความความถี่รีโซแนนซ์ของวงจรไหล่นี้สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

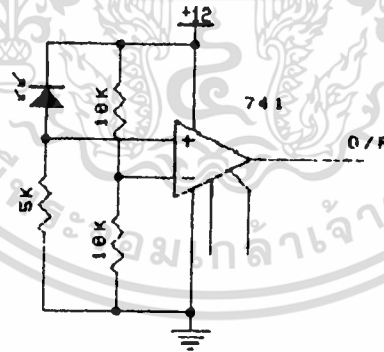
$$W_o = \frac{1}{\sqrt{L.C}}$$

หรือ
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

- โดยที่ f_0 : ความถี่ที่สภาวะรีโซแนนซ์ (Resonant Frequency)
 L : ค่าความเหนี่ยวนำรีโซแนนซ์
 C : ค่าความเก็บประจุรีโซแนนซ์

สำหรับขดลวดความร้อนนั้นจะเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้กับชิ้นงานเหล็กที่ต้องการทำให้ร้อนและเป็นตัวกำหนดจุดที่จะทำผิวแข็ง ดังนั้น ขดลวดความร้อนจะต้องสร้างให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ในทางการคำนวณออกแบบสามารถหาค่าต่างๆได้ โดยการกำหนดเงื่อนไขแต่ในทางใช้งานจริงๆ นั้นยังมีปัญหาอีกมากและยังมีค่าต่างๆ อีกที่ไม่สามารถหาได้ เช่น ค่าความต้านทานของหน้าสัมผัสที่จุดต่อต่างๆ ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขดลวดของสายไฟ ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขดลวดขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งเป็นตัวจำกัดกระแสที่จะจ่ายมาสู่ขดลวดความร้อน ทำให้พลังงานที่จ่ายออกมาไม่ได้พิกัดตามต้องการ

8. วงจรตรวจจับชิ้นงาน (Sense Object circuit)



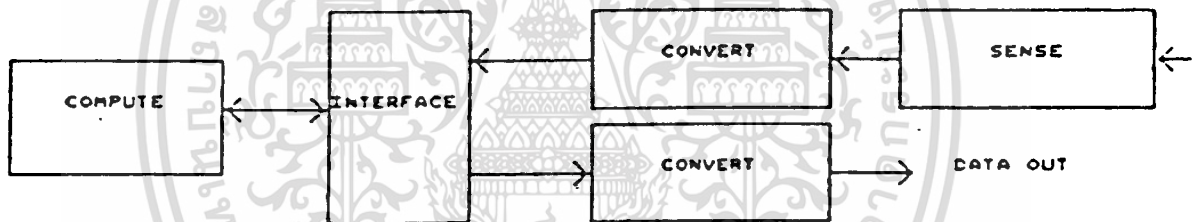
รูปที่ 3.19 แสดงวงจรตรวจจับชิ้นงาน

ใช้คุณสมบัติของ LDR ซึ่งมีคุณสมบัติที่เมื่อมีแสงมากกระทบมากจะทำให้ ความต้านทานตกคร่อมตัวมันมากและในทางกลับกัน เมื่อมีแสงมาตกกระทบน้อยจะทำให้ความต้านทานตกคร่อมตัวมันน้อย จากหลักการนี้ เราสามารถนำมาใช้ตรวจจับชิ้นงานโดยการให้ชิ้นงานเป็นตัวบังแสงที่ตก

กระทบตัว LDR แล้วให้วงจรคอมพาราเตอร์ เป็นตัวตรวจสอบว่ามีชิ้นงานเข้ามาที่ขดลวดความร้อนแล้วหรือยัง ถ้ายังโวลต์เตจที่ขา 6 ของ 741 จะอยู่ในสถานะ Low ถ้ามีชิ้นงานเข้ามาจะอยู่ในสถานะ High

9. ระบบควบคุม (Control system)

ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงระบบควบคุมอินเวอร์ทเตอร์ซึ่งประกอบด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 และวงจรภายนอก โดยจะอธิบายในแง่ของลำดับขั้นตอนการทำงานและอธิบายการทำงานของวงจร การควบคุมอินเวอร์ทเตอร์ในโครงงานนี้ จะแสดงการทำงานคร่าวๆ ได้ดังรูป

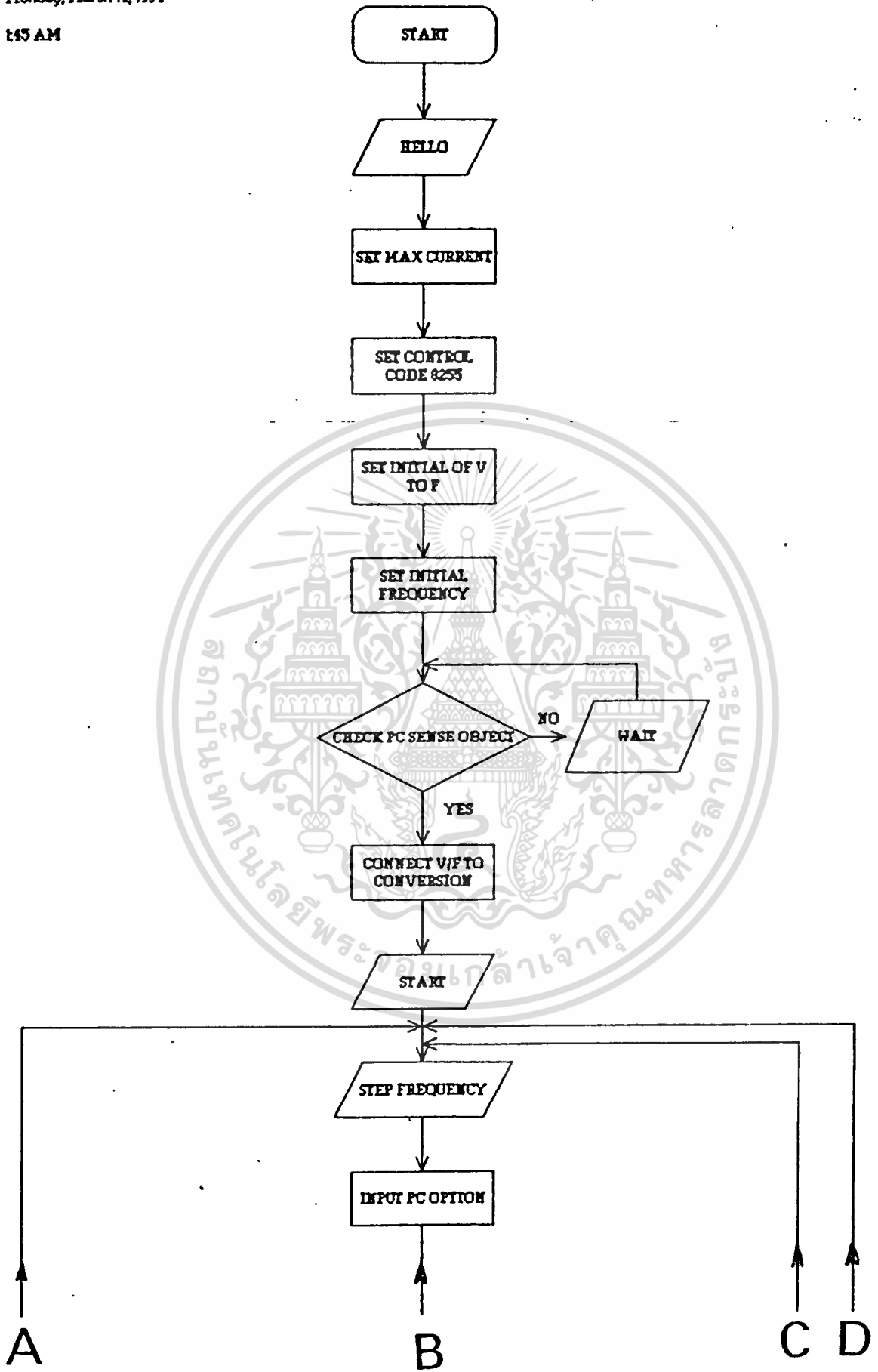


รูปที่ 3.20 แสดง Block diagram

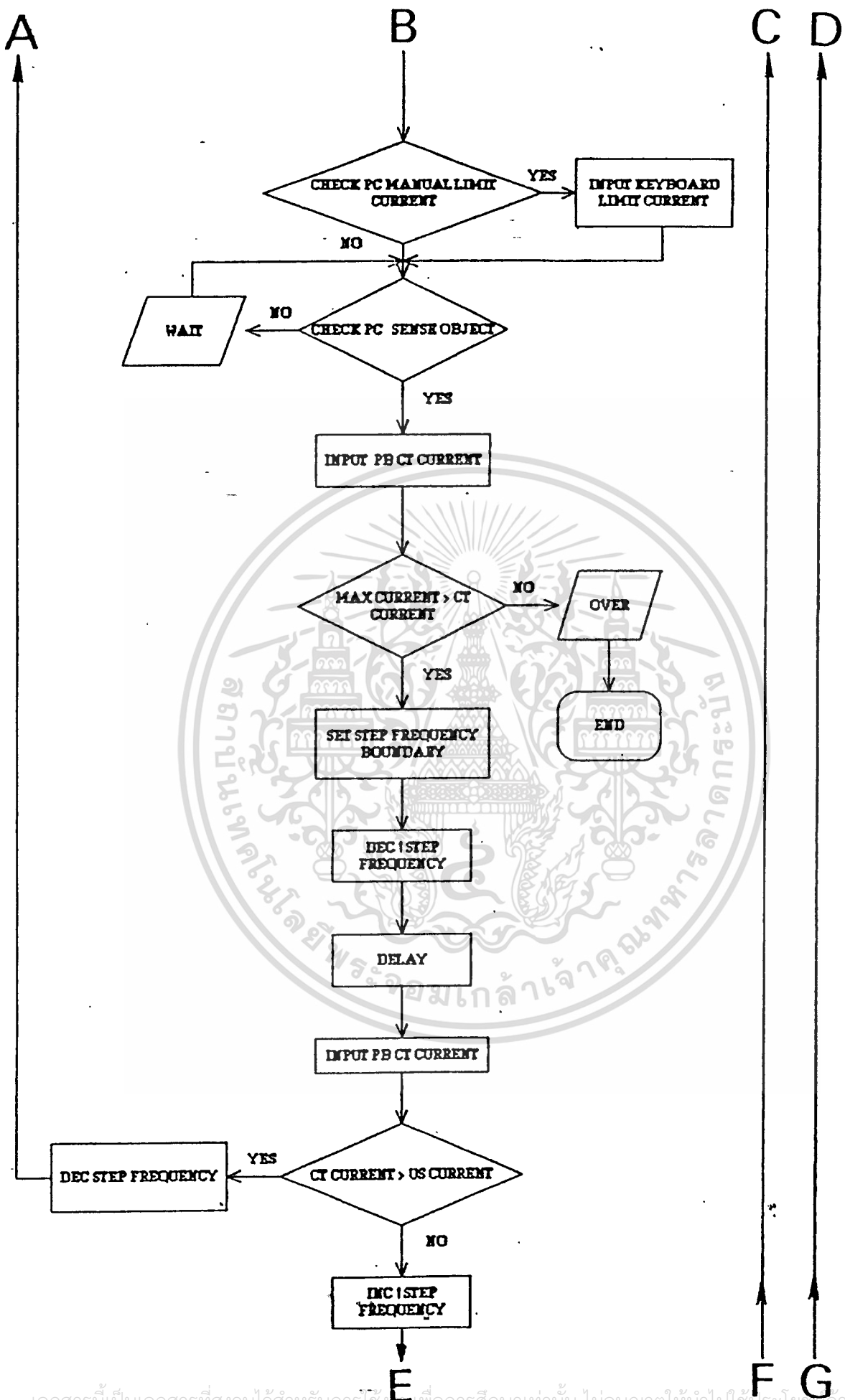
จากรูปจะสรุปการทำงานได้คร่าวๆ ดังนี้ คือ Z-80 จะต้องติดต่อกับวงจรส่งสัญญาณเข้าและออก เพื่อรับและส่งข้อมูลในการที่จะควบคุมการทำงานของอินเวอร์ทเตอร์ได้ รายละเอียดของวงจรและลำดับขั้นตอนต่างๆ จะแสดงในหัวข้อต่อไป

9.1 ลำดับขั้นตอนการทำงาน

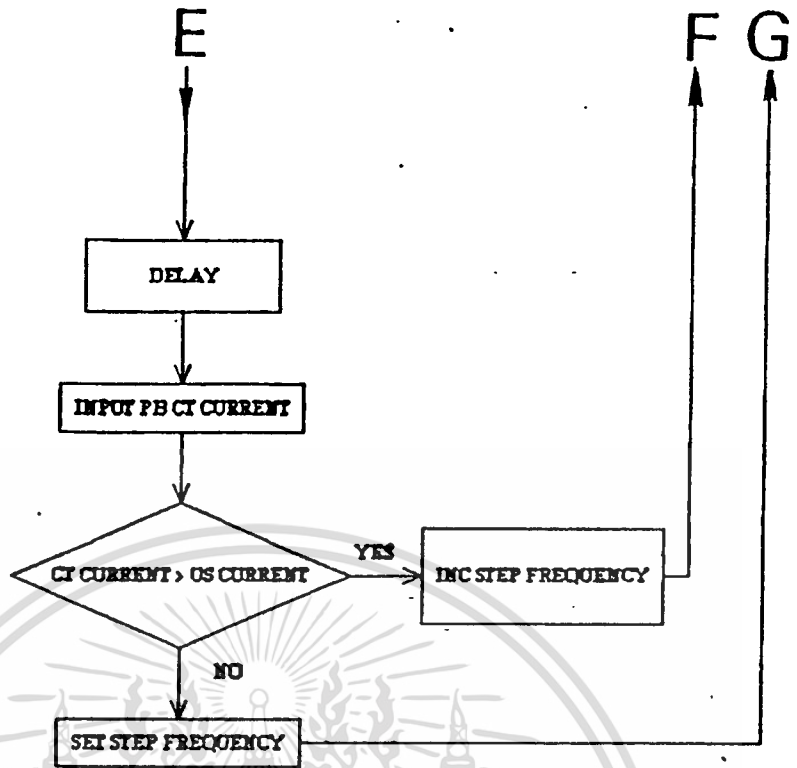
จุดประสงค์ของการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ก็เพื่อควบคุมการทำงานของ มอสเฟต ในอินเวอร์ทเตอร์ เพื่อให้อินเวอร์ทเตอร์สามารถทำงานที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ ของวงจร เห็นยวนำได้ ลำดับขั้นตอนการทำงานของไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 แสดงได้ดัง Flowchart ต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จาก Flowchart ที่ผ่านมาสามารถอธิบายในรายละเอียดได้ดังนี้

ในส่วนแรกจะเป็นการกำหนดสถานะเริ่มต้นในการใช้งานต่างๆ โดยมีการตรวจสอบชิ้นงานว่ามีอยู่หรือไม่ ก่อนเริ่มต้นการทำงานในส่วนการขับของวงจรอินเวอร์เตอร์

ในส่วน Loop การทำงานจะเริ่มจากการตรวจสอบว่าผู้ใช้ต้องการกำหนดกระแสสูงสุดของเครื่องเองหรือไม่ ถ้ามีก็จะหยุดการทำงานไปรอรับค่า นำค่าที่ได้เก็บไว้เพื่อใช้งานต่อไป นอกจากนี้ยังจะต้องมีการตรวจสอบว่าชิ้นงานยังอยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำ (Induce coil) หรือไม่ ถ้าไม่ ก็ให้ทำการหยุดการทำงานชั่วคราว รอจนกว่าผู้ใช้จะทำงานต่อไป หลังจากนั้นก็จะทำการเปรียบเทียบค่ากระแสใช้งานกับกระแสสูงสุดของเครื่อง ถ้ามากกว่าก็จะหยุดการทำงานของส่วนคอนเวอร์เตอร์ทันที ในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนหากระแสสูงสุด โดยเริ่มจากการลดค่าความถี่ลงทีละ 1 step นำค่ากระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสมาทำการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบกับกระแสใช้งานของเครื่อง ถ้าสูงกว่าก็แสดงว่าความถี่ที่ลดลง 1 step ให้กระแสที่มากกว่า ก็ จะทำการลดค่า step frequency ใน address ที่เก็บเดิม แล้วกลับไปวน Loop เริ่มต้น แต่ถ้ากระแสที่ได้ไม่มากกว่าก็จะไปเพิ่มค่า step frequency 1 step นำกระแสมาเปรียบเทียบกับทำนองเดียวกันกับส่วนลด frequency แต่ถ้ากระแสที่ได้ยังไม่มากกว่าอีก ก็ให้คงค่า step frequency เดิมไว้ แล้ววนกลับ Loop

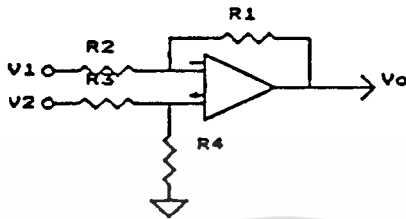
9.2. วงจรตรวจจับขนาดยอดสัญญาณ

ใช้ในการตรวจจับขนาดยอดของสัญญาณกระแสที่ออกมาจากด้านทฤษฎีของหม้อแปลงกระแส เพื่อส่งให้กับวงจรเอตดีให้ส่งข้อมูลเข้า Z-80 นำไปประมวลผลต่อไป การทำงานของวงจรนี้จะต้องสามารถล่าค่าแรงดันไฟตรงที่มีขนาดเท่ากับยอดของสัญญาณกระแส ซึ่งเป็นไฟสลับได้ตลอดเวลาที่สัญญาณกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลง

หลักการทำงานของวงจรนี้จะใช้หลักการวัดและคายของประจุ ของตัวเก็บประจุซึ่งจะพิจารณาได้จากรูปต่อไปนี้

รูปที่ 3.21 แสดงวงจรตรวจจับขนาดของยอดสัญญาณ

จากรูป ตัวไอซีเบอร์ 741 ตัวที่ 1 จะตรวจเช็คสัญญาณที่เข้า ไอซีตัวนี้ถูกต่อแบบ Differential amplifier ซึ่งหลักการและวิธีการต่อวงจรแบบนี้โดยใช้อุปกรณ์โดยทั่วๆ ไป จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.22



DIFFERENTIAL AMPLIFIER

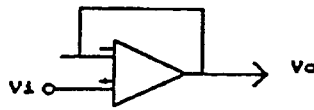
$$V_o = V_1 - V_2 \quad ; \quad R_1=R_2=R_3=R_4$$

$$V_o = -(R_1/R_2)V_1 - (1+(R_1/R_2))(R_3/(R_3+R_4)) V_2$$

รูปที่ 3.22 แสดงวงจร Differential amplifier

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 3.21 กับ 3.22 แล้วพบว่าในกรณีของไอซี 741 ตัวที่ 1 นี้จะไม่ต่อค่า R_1, R_2, R_3, R_4 แต่เนื่องจากวงจรภายในของออปแอมป์เอง จะมีค่าความต้านทานภายในตัวเองอยู่แล้ว นอกจากนี้ ยังประมาณให้ค่าความต้านทานของสายที่ส่งสัญญาณเข้าไอซีมีค่าน้อยมากจนทำให้สมการที่ 2 ในรูปที่ 3.22 เป็นจริง นั่นคือจะได้ $V_2 - V_1 = V_o$ ซึ่งเป็นการนำเอาสัญญาณเอาท์พุทมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุทนั่นเอง ทำให้เมื่อสัญญาณอินพุทมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ก็จะทำให้สัญญาณที่เอาท์พุทมีค่าเป็นบวก และเป็นค่าผลต่างที่มากขึ้นด้วย จากหลักการดังกล่าวนี้ จะทำให้สามารถพิจารณาการทำงานของวงจรได้ดังนี้

เนื่องจากวงจรนี้ได้รับสัญญาณจากหม้อแปลงกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณรูปไซน์ สัญญาณนี้จะถูกตรวจจับและลุ่มค่า (Sampling and Hold) ไอซี 741 ตัวที่ 1 เมื่ออยู่ในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของคิกดาเป็นบวก ของรูปสัญญาณซิกนาค ค่าที่ลุ่มออกมาได้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งค่าเหล่านี้จะแสดงออกที่เอาท์พุทขา 6 ของไอซีตัวนี้ จะไปทำให้เกิดการอัดประจุของตัวเก็บประจุโดยผ่านไดโอดได้ ตัวเก็บประจุจะคงค่าคิกดาที่เกิดขึ้นไว้ ช่วงต่อมาที่เหลือทั้งหมดของคาบของรูปสัญญาณ ตัวเก็บประจุจะไม่สามารถคายประจุได้เนื่องจากคาบเวลาของรูปสัญญาณที่เข้านี้มีค่าน้อยมากนั่นเอง จากหลักการดังกล่าวนี้ก็จะทำให้วงจรสามารถตามยอดสัญญาณที่เข้าได้ ส่วนไอซีตัวที่ 2 จะต่อแบบ Voltage Follower ซึ่งจะทำให้หน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ขยายวงจร สามารถส่งสัญญาณเข้า ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ได้ หลักการและวิธีการต่อวงจร Voltage Follower โดยใช้อุปกรณ์ทั่วๆ ไปได้แสดงดังรูปที่ 3.23



VOLTAGE FOLLOWER

$$V_o = V_1$$

รูปที่ 3.23 แสดงวงจรส่วน Voltage Follower

จากที่กล่าวมาทั้งหมดก็จะทราบได้ว่า วงจรจะส่งค่ายอดสัญญาณออกมาได้อย่างไร แต่ในกรณีที่ค่ายอดสัญญาณลดลงเข้ามา ในช่วงเวลาเอาท์พุทของไอซีเบอร์ 741 จะมีค่าเป็นลบ ในขณะที่คัทคร่อมตัวเก็บประจ้ยังคงเป็นบวกอยู่ ดังนั้นในกรณีนี้จะทำให้ไดโอดถูกป้อนแรงดันกลับ (Reverse bias) ทำให้ไดโอดตัดวงจรออกจากกัน นั่นจะทำให้ตัวเก็บประจมีโอกาศคายประจออกมาได้ผ่านออกมาทางไอซีตัวที่ 2 และคัทคร่อมตัวเก็บประจซึ่งจะแสดงที่เอาท์พุทของไอซีตัวที่ 2 และเป็นเอาท์พุทของวงจรอยู่แล้ว ก็จะลดลงตามที่ตัวเก็บประจคายประจออกมา ตัวเก็บประจจะคายประจจนกระทั่งคัทคร่อมมีค่าน้อย จนทำให้ไดโอดถูกป้อนแรงดันไปข้างหน้า (Forward bias) และตัวเก็บประจถูกอัดประจอีกครั้ง ซึ่งก็จะเป็นดังที่อธิบายไว้ตอนแรก นั่นคือจะทำให้วงจรเปลี่ยนค่าตามการเปลี่ยนแปลงของยอดสัญญาณได้ และคงค่าได้ในขณะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่านี้จะถูกป้อนให้วงจรเหตุต่อไป

9.3. วงจร A/D

A/D เป็นวงจรที่ใช้แปลงสัญญาณแอนาล็อกให้เป็นดิจิทัล ในปริณยานิพนธ์นี้ใช้เพื่อแปลงข้อมูลค่ากระแส ในการป้อนกลับให้ ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 วงจร A/Dจะประกอบด้วย A/D และ วงจรสร้างคัทคร่อมอ้างอิง

A/D ที่ใช้ในวงจรจะใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 ซึ่งเป็น A/D แบบ Successive approximation ที่มีข้อมลออกเป็น 8 บิต และช่วงของคัทคร่อมที่ป้อนเข้าระหว่าง 0-5 โวลต์ ทำงานที่แรงดันอ้างอิง 2.5 โวลต์ และใช้เวลาในการแปลงค่า 100 ns ซึ่งรายละเอียดของ A/D สามารถดูได้จาก Data Book

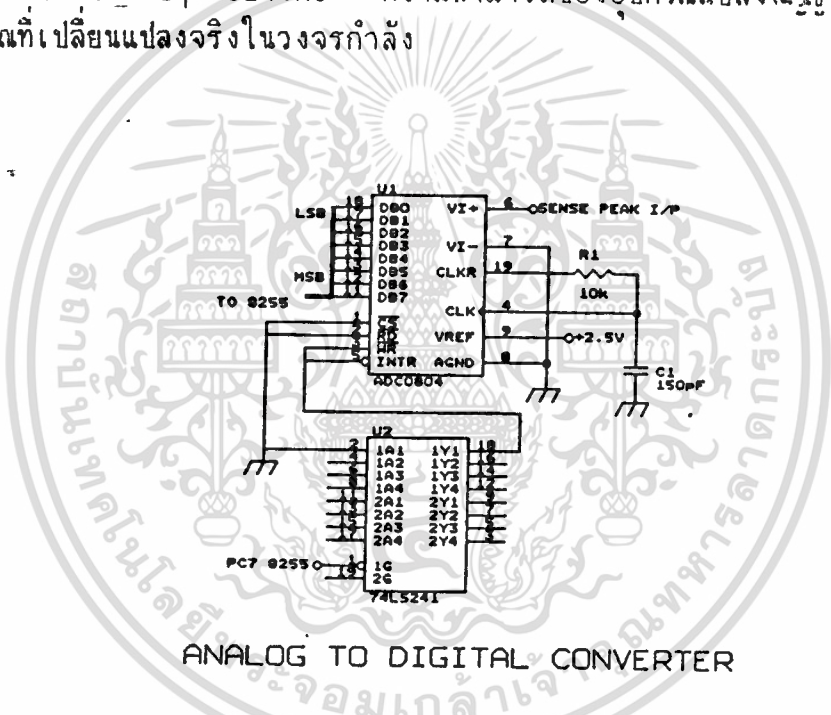
เนื่องจาก A/D เป็นแบบ 8 บิต ทำให้สามารถส่งข้อมลออกได้แตกต่างกัน 256 ค่า

หรือจะแบ่งข้อมูลเข้าออกเป็น 256 ระดับ

ในกรณีของ A/D ที่ใช้ในปริภูมินี้ ข้อมูลแต่ละระดับจะแตกต่างกัน 0.0195 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากรูป และจากการทำงานของวงจรตรวจจับขนาดของสัญญาณ จะพบว่า ข้อมูลแต่ละระดับที่ A/D รับ จะหมายถึงวงจรในวงจรเห็นยวนำความรื้อระที่แตกต่างกัน

$$= \frac{\left[\frac{5-0}{\sqrt{2}} \right]}{256} = 0.0138016 \text{ แอมป์}$$

ซึ่งในการกำหนดช่วงของกระแสที่จะทำให้ข้อมูลแตกต่างกันในแต่ละระดับ ดังที่แสดงดังข้างต้นนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายๆ อย่างคือ ความสามารถของอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (A/D , D/A) ช่วงของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจริงในวงจรกำลัง



รูปที่ 3.24 แสดงวงจร A/D

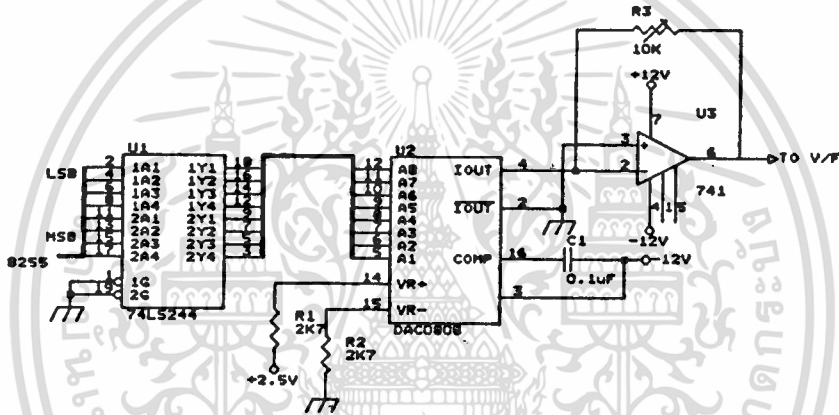
9.4. วงจร D/A

คือ วงจรที่ใช้ในการเปลี่ยน สัญญาณดิจิทัล เป็น สัญญาณอนาล็อกซึ่งต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อรับข้อมูลหลังการประมวลความต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่เท่าไร

สำหรับโครงการนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ DAC0808 มาใช้ในการทำงานซึ่งมีหลักการทำงานแบบ R/2R แลตเตอร์ สำหรับใน DAC0808 R/2R แลตเตอร์ แบ่งกระแสที่ได้จากภาคขยายเป็น 8 ระดับ ขึ้นอยู่กับค่าทางเลขฐาน 2 ทราบซีลเตอร์ไบโพลาร์จะสวิทช์ให้กระแสที่ได้สอดคล้องกับอินพุต A₇ ถึง A₀ การเรียงจากบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดถึงบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดจะกลับกันกับวงจรนี้ทุกๆไป แต่วงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกบางตัวก็ไม่ได้เรียงอย่างนี้ ดังนั้นควรอ่านคู่มืออย่างละเอียดถี่ถ้วนเสียก่อน

DAC0808 มีกระแสเอาท์พุทที่สามารถเปลี่ยนเป็นแรงดันได้ด้วยออปแอมป์ และตัวต้านทาน ทั้งแสดงได้ในรูปที่ 3.25

จากค่าที่เลือกไว้ ได้แรงดันเอาท์พุทเต็มสเกล (อินพุต A₇ ถึง A₀ เป็น "1")
 $2 \text{ โวลต์} \times (5 \text{ กิโลโห์ม} / 1 \text{ กิโลโห์ม}) \times (256/256)$
 ซึ่งเราถือว่า เป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบ 10 โวลต์ เต็มสเกล



DIGITAL TO ANALOG CONVERTER

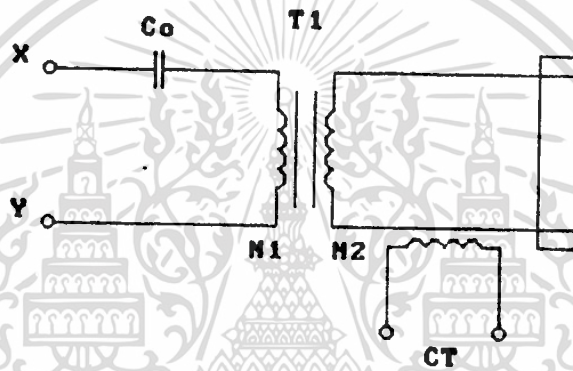
รูปที่ 3.25 แสดงวงจร D/A

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับการทดลองที่ผ่านมา ได้ทดลองเพื่อพัฒนาส่วนของแกนทอระดัดทางด้านขดลวดส่งพลังงานให้มีการสูญเสียลดลงและทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบระบบของการรีโซแนนซ์ ระหว่างทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงส่งผ่านพลังงาน ว่าแบบใดมีประสิทธิภาพมากกว่ากัน เพื่อความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานต่อไป

การทดลองที่ 1



รูปที่ 4.1 วงจรโวลต์รีโซแนนซ์ด้านปฐมภูมิ

สำหรับการทดลองนี้ได้จ่ายไฟสลับเข้ามายังส่วนของวงจรอินพุทเรกติไฟร์ที่ 30 V^{AC} โดยใช้ค่า C เท่ากับ 0.141 μ F เป็นชนิด MKP (0.047 μ F ขนานกัน 3 ตัว) โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าของอินดักแตนซ์ทางด้านปฐมภูมิ แล้วทำการวัดกระแส (โดยต้องวัดที่ความถี่รีโซแนนซ์) ความถี่ สังเกตผลที่เกิดขึ้นแล้งนำมาพอดกราฟ

ผลการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าของกระแสเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอินดักแตนซ์ให้ผลการทดลองดังนี้ ตามตารางที่ 4.1

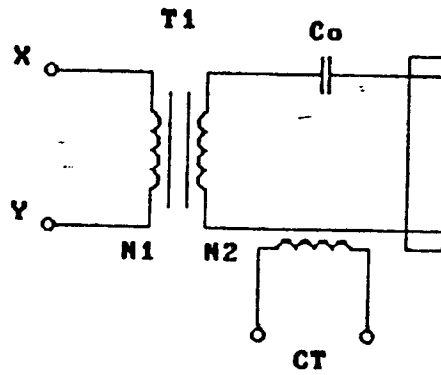
L พันเริ่มตันไว้ที่ 20 รอบ = 62.7 uH
 V_{AC} = 30 V
 C = 3.141 uF (MKP)

ตารางที่ 4.1

L (uH)	I (A)	f (KHz)
62.7	2.1	58.8
58.7	2.2	62.5
52.8	2.0	66.7
47.9	2.1	71.2
44.6	2.3	71.2
40.9	2.4	76.9
35.9	2.5	76.9
32.6	2.5	76.9
28.7	2.8	87.0
24.8	3.0	87.0
20.6	3.2	95.2
16.9	3.6	100.0
12.8	3.8	105.3

จากผลการทดลองจะเกิดความร้อนบนขดลวดและแกนทรอยด์บริเวณที่พันขดลวดปฐมภูมิ เนื่องจากการเกิดการสูญเสียมาก ส่วนทางด้านทุติยภูมิจะไม่ค่อยร้อนเท่าไร

การทดลองที่ 2



รูปที่ 4.2 วงจรโวลต์รีโซแนนซ์ด้านทุติยภูมิ
เหมือนการทดลองแรกเพียงแต่เปลี่ยนเป็นการรีโซแนนซ์ทางด้านทุติยภูมิ

ตารางที่ 4.2

L (uH)	I (A)	f (KHz)
62.7	1.5	384.6
58.7	1.5	384.6
52.8	1.5	384.6
47.9	1.5	384.6
44.6	1.5	384.6
40.9	1.5	384.6
35.9	1.5	384.6
32.6	1.5	384.6
28.7	1.5	384.6
24.8	1.5	384.6
20.6	1.5	384.6
16.9	1.5	384.6
12.8	1.5	384.6

พิจารณาความร้อนที่แกนทรอยด์จะพบว่า จะเกิดความร้อนที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิมากกว่าส่วนปฐมภูมิเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3

ทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน 3 แบบ คือ

1. แบบไม่มีระบบควบคุมความถี่
2. แบบมีระบบควบคุมความถี่
3. แบบมีระบบควบคุมความถี่และปรับปรุ้งหม้อแปลงเป็นแกน Mn-Zn ferrite

ทดลองที่ $V_{dc} = 100 \text{ V}$ $f = 105 \text{ KHz}$

ตารางแสดงผลการทดลอง

เวลา (s)	ไม่มี ระบบควบคุมความถี่			มี ระบบควบคุมความถี่			มีระบบควบคุมความถี่ และเปลี่ยนหม้อแปลง		
	φ 0.8	φ 1.0	φ 1.4	φ 0.8	φ 1.0	φ 1.4	φ 0.8	φ 1.0	φ 1.4
	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)
0	6.8	6.2	5.5	6.8	6.2	5.5	6.8	6.2	5.5
10	6.5	6.2	5.2	6.8	6.2	5.5	6.8	6.2	5.5
20	6.5	6.1	5.2	6.8	6.2	5.5	6.8	6.2	5.5
30	6.4	6.0	5.1	6.8	6.2	5.5	6.8	6.2	5.5
40	6.4	6.0	5.1	6.8	6.2	5.5	-	6.2	5.5
50	6.3	5.9	5.0	6.8	6.2	5.4	-	6.2	5.4
60	6.2	5.8	5.0	-	6.1	5.4	-	6.2	5.4
70	6.2	5.8	4.9	-	6.1	5.4	-	-	5.4
80	6.1	5.7	4.9	-	6.1	5.4	-	-	5.4
90	-	5.6	4.8	-	6.1	5.4	-	-	-
100	-	5.5	4.7	-	6.0	5.3	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมา เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบระบบที่มีการติดตามความถี่ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และระบบที่ไม่มีการติดตามความถี่ ทำให้พอสรุปได้ว่า ระบบที่มีการติดตามความถี่จะมีประสิทธิภาพในด้านกำลังที่สูงกว่า เนื่องจากสามารถทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ตลอดเวลา และเวลาที่ใช้ในการเห็นวามักน้อยกว่าด้วยเช่นกัน จึงทำให้ระบบอินเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์มอสเฟตกำลังมีการสูญเสียที่น้อยกว่าการสวิตชิ่งของความถี่ที่คงที่ตลอดเวลาในระบบเดิม ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

นอกจากนี้เรายังสามารถเพิ่มส่วนควบคุมกระแสของระบบได้ โดยการป้อนค่ากระแสสูงสุดที่ต้องการใส่ในส่วนควบคุม เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานเราจึงได้เพิ่มส่วนของการตรวจจับชิ้นงาน เพื่อทำการเปิดหรือปิดส่วนของวงจรภาคขับมอสเฟตให้ทำงานเมื่อเฉพาะมีชิ้นงานเข้ามาที่เบาให้ความร้อนเท่านั้น ก็จะทำให้ไม่การสูญเสียพลังงานอยู่ตลอดเวลาในขณะที่เปิดเครื่อง โดยไม่มีชิ้นงานอยู่เลย

สำหรับระบบการรีโซแนนซ์ที่ได้ใช้ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบการรีโซแนนซ์ 2 แบบคือ

1. การรีโซแนนซ์ทางด้านปฐมภูมิ เพื่อให้ทางด้านปฐมภูมิเกิดสภาวะของการรีโซแนนซ์เพื่อให้ได้กระแสที่สูงที่สุด แล้วจ่ายเข้าไปในส่วนของทางด้าน Induce coil จะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปความร้อนมาก ซึ่งจากการทดลองทำให้ทราบได้ว่าบางครั้งก็ไม่สามารถให้กระแสทางด้านทุติยภูมิสูงได้ เนื่องจากการอิมพีแดนซ์ของแกนหม้อแปลง
2. การรีโซแนนซ์ทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้ทางด้านทุติยภูมิเกิดสภาวะรีโซแนนซ์เพื่อให้กระแสไหลทางด้านทุติยภูมินี้สูง แต่เนื่องจากค่าของอินดักแตนซ์ทางด้านทุติยภูมินั้นไม่แน่นอนซึ่งจะมีผลกับส่วนของชิ้นงานด้วย จึงทำให้เราตั้งค่าได้ยาก และส่วนใหญ่ค่าอินดักแตนซ์จะมีค่าน้อยทำให้กระแสที่ไหลจะน้อยกว่าแบบที่ 1 อยู่มาก

ซึ่งสำหรับปัญญานินพนธ์นี้ได้เลือกแบบที่ 1 เนื่องจากเป็นระบบที่ติดอยู่แล้วซึ่งเกิดสภาวะของการรีโซแนนซ์ทางด้านปฐมภูมิสามารถที่จะดึงกระแสจากอินเวอร์เตอร์ได้ดีกว่า เราจึงหันมาปรับปรุงทางด้านคุณภาพของแกนหม้อแปลงเอาท์พุท ซึ่งในปัญญานินพนธ์นี้ได้เลือกใช้แบบ Mn-Zn ferrite ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการหลอมเหล็กทำให้เกิดความร้อนที่ระดับเดียวกัน แบบหม้อแปลงแกน Mn-Zn ferrite จะใช้เวลาน้อยกว่าที่ระดับกระแสเท่ากันแสดงว่าให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากเกิดการสูญเสียในแกนเหล็กน้อยมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

; *****
; * SOFTWARE FOR Z80 ET-BOARD VER 3.0 *
; * INDUCTION HEATING *
; *****
;

```

```

ORG 2000H
PORT 20H - VCO O/P
PORT 21H - CURRENT I/P
PORT 22H - OPTION - LOWER I/P PC0,PC2
                - UPPER O/P PC7

```

```

;-----
2000  CD 93 20      MAIN:      CALL HELLO
2003  AF                                XOR A
2004  21 88 21      LD HL,ADDR_CUR1
2007  7E                                LD A,(HL)
2008  23                                INC HL
2009  77                                LD (HL),A
;-----
; * CONTROL CODE *
200A  AF                                XOR A
200B  3E 83      LD A,83H
200D  D3 23      OUT (23H),A
;-----
; * OFF BUFFER *
200F  AF                                XOR A
2010  3E 0E      LD A,0EH
2012  D3 23      OUT (23H),A
;-----
2014  AF                                XOR A
2015  21 8B 21      LD HL,ADDR_VCO1
2018  7E                                LD A,(HL)
2019  23                                INC HL
201A  77                                LD (HL),A
201B  D3 20      OUT (20H),A
;-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

201D AF EYE1: XOR A
201E DB 22 IN A,(22H)
2020 CB 57 BIT 2,A
2022 CA A7 20 JP Z,WAIT1
;-----
; * ON BUFFER *
2025 AF XOR A
2026 3E OF LD A,OFH
2028 D3 23 OUT (23H),A
;-----
; * DISPLAY START *
202A EB BD 20 CALL WORK
202D CD D1 20 LOOP: CALL DISPLAY_VCO
2030 AF EYE2: XOR A
2031 DB 22 IN A,(22H)
2033 CB 47 BIT 0,A
2035 CC ED 20 CALL Z, KEY
2038 CB 57 BIT 2,A
203A CA 07 21 JP Z,WAIT2
;-----
203D AF XOR A
203E 3E OF LD A,OFH
2040 D3 23 OUT (23H),A
;-----
2042 AF XOR A
2043 DB 21 IN A,(21H)
2045 21 8A 21 LD HL,ADDR_CUR3
2048 77 LD (HL),A
2049 2B DEC HL
204A 46 LD B,(HL)
204B B8 CP B
204C D2 2A 21 JP NC,OVER
;-----
204F AF XOR A
2050 21 8C 21 LD HL,ADDR_VCO2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2053	7E	LD A,(HL)
2054	0E 00	LD C,00H
2056	B1	OR C
2057	CA 42 21	JP Z,SEND_00H
205A	0E FF	LD C,FFH
205C	A9	XOR C
205D	CA 49 21	JP Z,SEND_FFH

2060	AF	XOR A
2061	7E	LD A,(HL)
2062	3D	DEC A
2063	D3 20	OUT (20H),A

2065	CD 51 21	CALL DELAY
2068	AF	XOR A
2069	DB 21	IN A,(21H)
206B	21 8A 21	LD HL,ADDR_CUR3
206E	56	LD D,(HL)
206F	BA	CP D
2070	D2 5B 21	JP NC,DEC_FREQ

2073	AF	XOR A
2074	21 8C 21	LD HL,ADDR_VCO2
2077	7E	LD A,(HL)
2078	3C	INC A
2079	D3 20	OUT (20H),A

207B	CD 51 21	CALL DELAY
------	----------	------------

207E	AF	XOR A
207F	DB 21	IN A,(21H)
2081	21 8A 21	LD HL,ADDR_CUR3
2084	56	LD D,(HL)
2085	BA	CP D
2086	D2 65 21	JP NC,INC_FREQ

```

-----
2089 AF XOR A
208A 21 8C 21 LD HL,ADDR_VC02
208D 7E LD A,(HL)
208E D3 20 OUT (20H),A
2090 C3 2D 20 JP LOOP

```

```

-----
2093 AF HELLO: XOR A
2094 3E 03 LD A,03H
2096 D7 RST 10H
2097 21 70 21 LD HL,DATA_HELLO
209A 11 E7 3F LD DE,3FEFH
209D 06 06 LD B,06H
209F ED B0 LDIR
20A1 3E 04 LD A,04H
20A3 06 FF LD B,FFH
20A5 D7 RST 10H
20A6 C9 RET

```

```

-----
20A7 AF WAIT1: XOR A
20A8 3E 03 LD A,03H
20AA D7 RST 10H
20AB 21 76 21 LD HL,DATA_WAIT
20AE 11 E7 3F LD DE,3FE7H
20B1 06 06 LD B,06H
20B3 ED B0 LDIR
20B5 3E 04 LD A,04H
20B7 06 FF LD B,FFH
20B9 D7 RST 10H
20BA C3 1D 20 JP EYE1

```

```

-----
20BD AF WORK: XOR A
20BE 3E 03 LD A,03H
20C0 D7 RST 10H
20C1 21 7C 21 LD HL,DATA_START

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20C4	11 E7 3F	LD DE,3FE7H
20C7	06 06	LD B,06H
20C9	ED B0	LDIR
20CB	3E 04	LD A,04H
20CD	06 FF	LD B,FFH
20CF	D7	RST 10H
20D0	C9	RET

20D1	F5	DISPLAY_VCO:	PUSH AF
20D2	C5		PUSH BC
20D3	D5		PUSH DE
20D4	E5		PUSH HL
20D5	AF		XOR A
20D6	3E 03		LD A,03H
20D8	D7		RST 10H
20D9	21 8C 21		LD HL,ADDR_VCO2
20DC	7E		LD A,(HL)
20DD	32 F1 3F		LD (3FF1H),A
20E0	3E 07		LD A,07H
20E2	D7		RST 10H
20E3	3E 04		LD A,04H
20E5	06 FF		LD B,FFH
20E7	D7		RST 10H
20E8	E1		POP HL
20E9	D1		POP DE
20EA	C1		POP BC
20EB	F1		POP AF
20EC	C9		RET

20ED	F5	KEY:	PUSH AF
20EE	C5		PUSH BC
20EF	D5		PUSH DE
20F0	E5		PUSH HL
20F1	AF		XOR A
20F2	DD 21 89 21		LD IX,ADDR_CUR2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

20F6 06 04          LD B,04H
20F8 3E 08          LD A,08H
20FA D7             RST 10H
20FB 21 89 21       LD HL,ADDR_CUR2
20FE DD 7E 00       LD A,(IX+00H)
2101 7E            LD A,(HL)
2102 E1            POP HL
2103 D1            POP DE
2104 C1            POP BC
2105 F1            POP AF
2106 C9            RET

```

```

-----
2107 F5          WAIT2: PUSH AF
2108 C5          PUSH BC
2109 D5          PUSH DE
210A E5          PUSH HL
210B AF          XOR A
210C 3E 0E       LD A,0EH
210E D3 23       OUT (23H),A
2110 AF          XOR A
2111 3E 03       LD A,03H
2113 D7          RST 10H
2114 21 76 21    LD HL,DATA_WAIT
2117 11 E7 3F    LD DE,3FE7H
211A 06 06       LD B,06H
211C ED B0       LDIR
211E 3E 04       LD A,04H
2120 06 FF       LD B,FFH
2122 D7          RST 10H
2123 E1          POP HL
2124 D1          POP DE
2125 C1          POP BC
2126 F1          POP AF
2127 C3 30 20    JP EYE2
-----

```

```

212A 3E 04      OVER:    LD A,03H
212C D7                RST 10H
212D 21 82 21    LD HL,DATA_OVER
2130 11 E7 3F    LD DE,3FE7H
2133 06 06      LD B,06H
2135 ED B0      LDIR
2137 3E 04      LD A,04H
2139 06 FF      LD B,FFH
213B D7                RST 10H
213C 3E 0E      LD A,0EH
213E D3 23      OUT (23H),A
2140 18 E8      JR OVER

```

```

-----
2142 AF      SEND_OOH: XOR A
2143 77                LD (HL),A
2144 D3 20      OUT (20H),A
2146 C3 2D 20    JP LOOP

```

```

-----
2149 3E FE      SEND_FFH: LD A,FEH
214B 77                LD (HL),A
214C D3 20      OUT (20H),A
214E C3 2D 20    JP LOOP

```

```

-----
2151 F5      DELAY:  PUSH AF
2152 C5                PUSH BC
2153 06 02      LD B,02H
2155 3E 2F      LD A,2FH
2157 D7                RST 10H
2158 C1                POP BC
2159 F1                POP AF
215A C9                RET

```

```

-----
215B 21 8C 21    DEC_FREQ: LD HL,ADDR_VC02
215E 35                DEC (HL)
215F 7E                LD A,(HL)

```

```

2160 D3 20 OUT (20H),A
2162 C3 2D 20 JP LOOP

;-----

2165 AF INC_FREQ: XOR A
2166 21 8C 21 LD HL,ADDR_VCO2
2169 34 INC (HL)
216A 7E LD A,(HL)
216B D3 20 OUT (20H),A
216D C3 2D 20 JP LOOP

;-----

2170 00767938383F ;DATA_HELLO
2176 00003E770478 ;DATA_WAIT
217C 006D78775078 ;DATA_START
2182 00003F3E7950 ;DATA_OVER

;-----

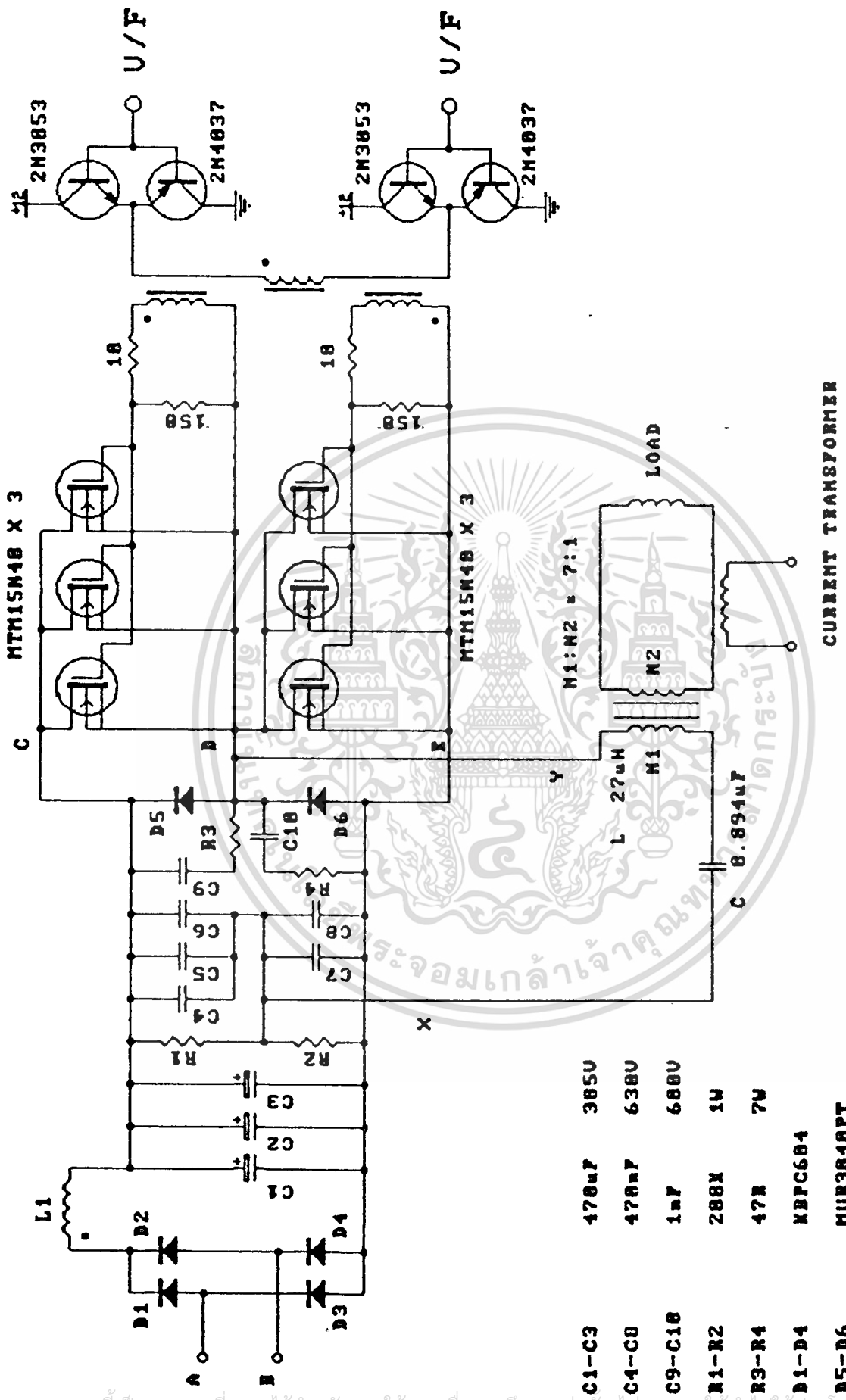
2188 FF ;ADDR_CUR1
2189 FF ;ADDR_CUR2
218A 00 ;ADDR_CUR3
218B 00 ;ADDR_VCO1
218C 00 ;ADDR_VCO2

;-----

0000 END

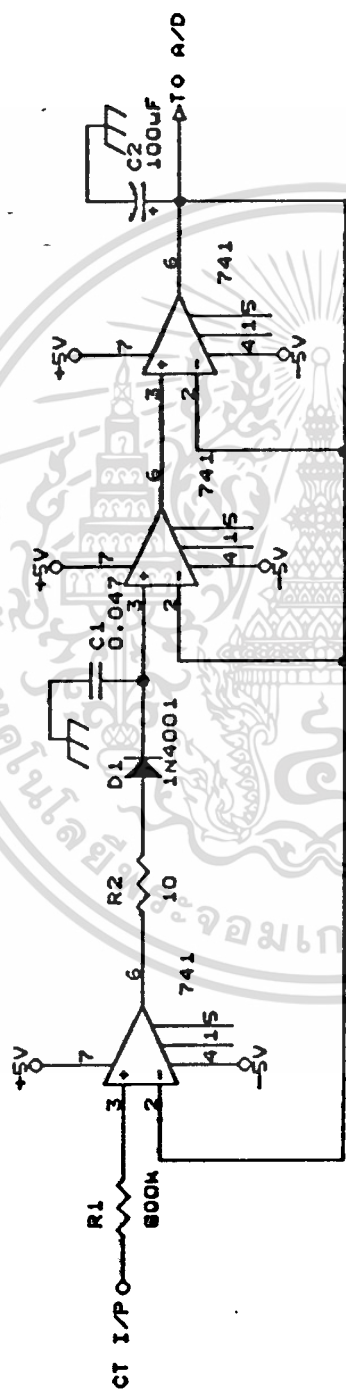
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



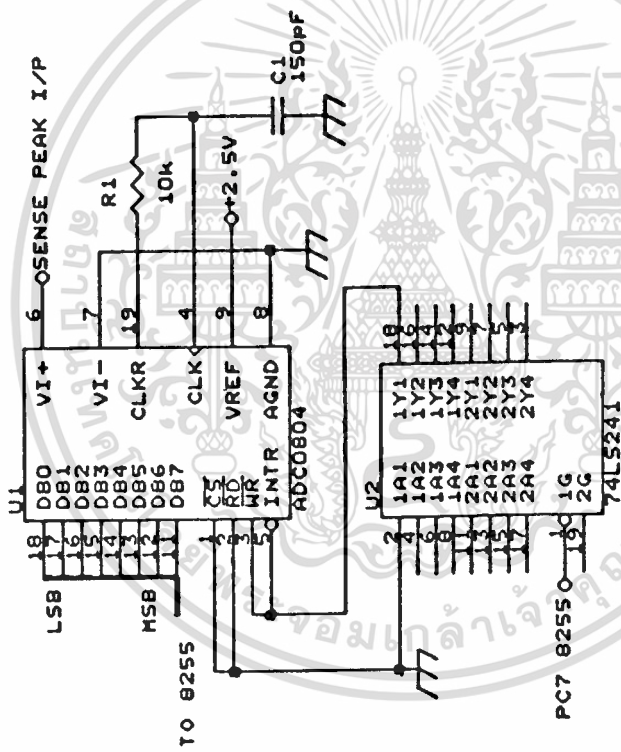
- C1-C3 470uF 385V
- C4-C8 47nF 630V
- C9-C10 1mF 680V
- R1-R2 280X 1W
- R3-R4 47R 7W
- D1-D4 KBPC604
- D5-D6 MUR3840PT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



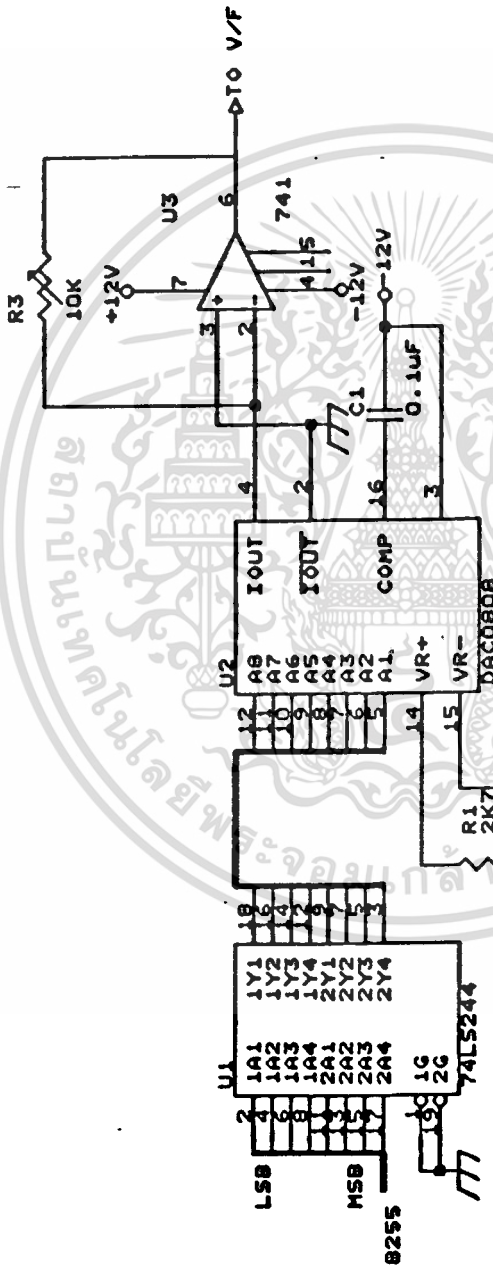
SENSE PEAK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ANALOG TO DIGITAL CONVERTER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DIGITAL TO ANALOG CONVERTER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SENSE OBJECT

กติกการรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาและรวมไปถึงอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ
และก็ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และ เพื่อนๆ ที่ได้ให้กำลังใจ บิดาและมารดาผู้ที่มีพระ
คุณกับข้าพเจ้ายิ่ง และที่สำคัญก็คือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- 1) George Chryssis ; " High-Frequency Switching Power Supply ", McGraw-Hill , New York , 1984.
- 2) John Davies and Peter Simpson ; " Induction Heating Handbook ", McGraw-Hill , New York , 1979.
- 3) Arthur D. Erans ; " Designed with Field-Effect Transister ", McGraw-Hill , New York , 1981.
- 4) Muhaammad H. Rashid ; " Power Electronics Circuit, Device, and Application " , Prentice-Hall , New Jersey , 1993.
- 5) Ned Mohan , Tore M. Undeland and William P. Robbins ; " Power Electronics : Converters , Applications , and Design " , John Wiley & Sons , New York , 1990.
- 6) International Rectifier ; " HEXFET Designer's Manual " , Volume 1 International Rectifier , California , 1993.
- 7) Henry W. Ott ; " Noise Reduction Techniques in Electronic Systems " John Wiley & Sons , Singapore , 1989.
- 8) Frank Pugh and Wes Ponick ; " Student Workbook for Switching Power Supply Videocassette " , McGraw-Hill , New York , 1986.
- 9) MOTOROLA Inc ; " MOTOROLA TMOS POWER MOSFET DATA " .
- 10) Signetics ; " Signetics Linear Products " .
- 11) National Semiconductor ; " CMOS Data Book " .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้