



# เครื่องชุบผิวโลหะด้วยกระแสเหนี่ยวนำ

Induction Heating



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032560

ปีการศึกษา 2535

Induction Heating

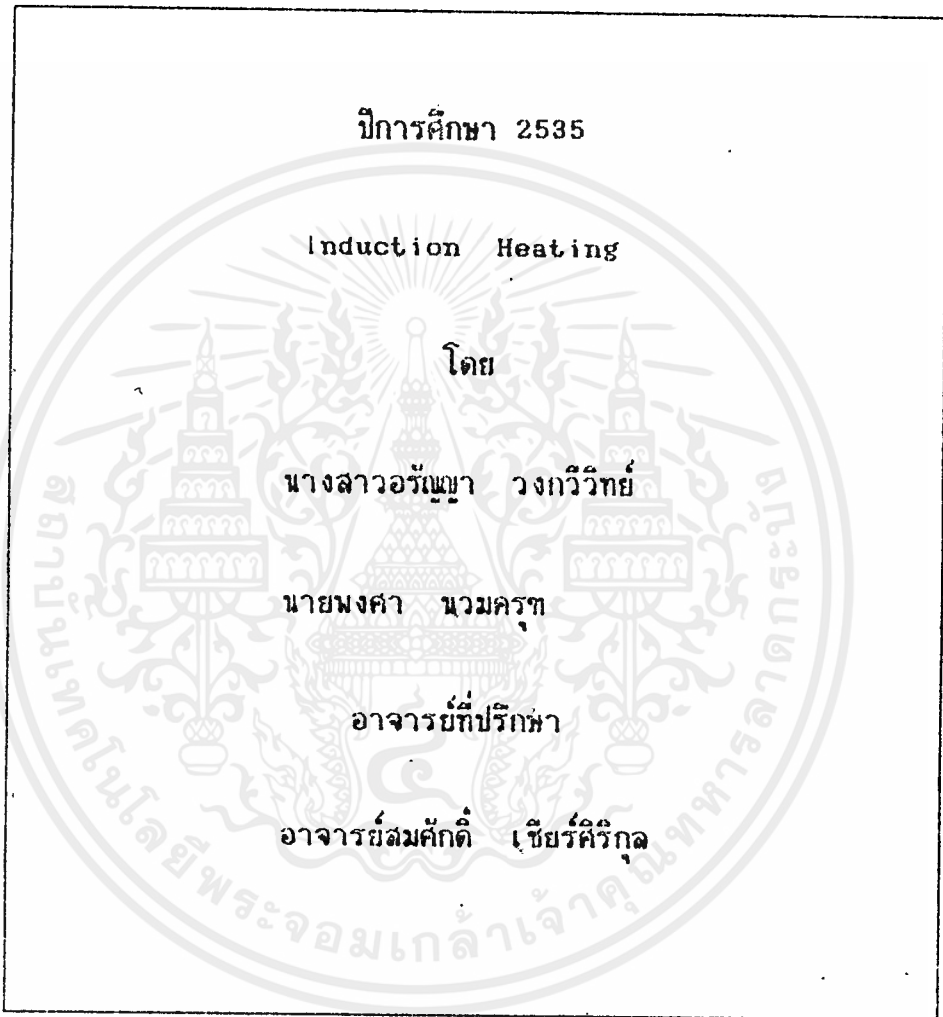
โดย

นางสาวอรุณา วงศ์วิทย์

นายพงศ์ นวมครุฑ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สมศักดิ์ เขียวศิริกุล



วิทยานิพนธ์ปีการศึกษา 2535

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องซบผิวแข็งเหล็ก

ผู้จัดทำ

1. นายพงศา นวมครุฑ

2. นางสาวอรัญญา วงกวีวิทย์



(อาจารย์ลมศักดิ์ เขียวศิริกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องขุดผิวแข็งเหล็ก

พงศา นวมครุฑ

อรัญญา วงกวีวิทย์

อ.ลมศักดิ์ เขียวศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2535

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการพัฒนาเครื่องขุดผิวแข็งเหล็ก โดยอาศัยการ  
เหนียวนำของลนวมแม่เหล็ก เริ่มจากการแปลงไฟกระแสลับเป็นไฟกระแสตรง  
โดยผ่านวงจรเรียงกระแส และทำการแปลงเป็นไฟกระแสสลับความถี่สูง โดยใช้  
มอลเฟตกำลังลวิทซิ่ง เพื่อให้ได้คลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแปลง ความถี่ที่มอลเฟตทำ  
งานในการเหนียวนำความร้อนที่ความถี่รีโซแนนซ์ ได้จากความถี่โดยประมาณซึ่งอาศัย  
ค่ากระแสเอาท์พุทสูงสุดอันเนื่องมาจากเป็นจุดที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ทางด้านทฤษฎี  
ภูมิของหม้อแปลงต่อกับคอล์ย ทำให้เกิดลนวมแม่เหล็กเหนียวนำให้ชิ้นงานเกิดกระแส  
เอ็ดดี้บริเวณผิวของชิ้นงานเรียกว่า "สกินเอฟเฟค" มีผลให้เกิดความร้อนขึ้นเฉพาะที่  
ผิวเหล็ก ความลึกของสกินเอฟเฟคขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความถี่ และเมื่อเหล็ก  
เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะทำให้เหล็กแข็งเฉพาะที่ผิว โดยที่ภายในเนื้อเหล็กยังคงเป็น  
เหล็กเหนียวเหมือนเดิม ซึ่งจะทำให้เหล็กทนต่อการขูดขีดและไม่เปราะ

## Induction Heating

Pongsa Numkrut

Aranya vongkaveevit

Advisor somsuk cheersirikul

### Abstract -

In this thesis, We study and develop of surface hardening by induction heating. At first, AC voltage will be changed by rectifier circuit to DC voltage, being changed again by switching device, POWER MOSFET, to be high frequency square wave, running into high frequency transformer. Operating frequency of the MOSFET is controlled such that an effective value of output current of the MOSFET is kept maximum after predicting an approximate resonance frequency. Connecting secondary transformer with heating coil and yield magnetic field that induces eddy current at the region near the surface called "skin-effect". The depth of skin effect depends on the variation of magnetic frequency. When iron is cooled down suddenly, it will be hardened only its surface but inside still tough. Yield the iron have a scratching resistant and not fragile

# สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1-5
2 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำความร้อนโดยสนามแม่เหล็ก	6-17
3 โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	18-31
4 การพันหม้อแปลง การพันขดลวด และการออกแบบ coil	32-50
5 ผลการทดลอง	51-56
6 บทสรุป	57-59

## สัญลักษณ์

H : ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	หน่วย แอมป์-เทิร์น/ เมตร
B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	หน่วย เทสลา
$\phi$ : เส้นแรงแม่เหล็ก	หน่วย เวบเบอร์
E : ความเข้มของสนามไฟฟ้า	หน่วย โวลต์/ เมตร
J : ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	หน่วย แอมป์/ เมตร
$\sigma$ : conductivity	หน่วย โมล/ เมตร
$\rho$ : resistivity	หน่วย โอห์ม-เมตร
$\mu$ : permeability	หน่วย เวบเบอร์/แอมป์-เทิร์น-เมตร
$\mu_0$ : absolute permeability	หน่วย เวบเบอร์/แอมป์-เทิร์น-เมตร
$\mu_r$ : relative permeability	
$\delta$ : skin depth	หน่วย เมตร
$\omega$ : ความเร็วเชิงมุม	หน่วย เรเดียน/วินาที
P : กำลังที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิว	หน่วย วัตต์/ เมตร
I : กระแสไฟฟ้า	หน่วย แอมป์
V : ศักตาไฟฟ้า	หน่วย โวลต์
L : ค่าความเหนี่ยวนำ	หน่วย เฮนรี่
$R'$ : ความต้านทาน	หน่วย โอห์ม
C : ค่าความเก็บประจุ	หน่วย ฟารัด
N : จำนวนรอบของขดลวด	
G : ช่องอากาศ (Air gap)	หน่วย เมตร
W : พลังงาน	หน่วย จูล
$\odot$ : ทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ	
$\otimes$ : ทิศทางพุ่งเข้าในกระดาษ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทนำ

ในปัจจุบันมนุษย์เราพยายามค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาทดแทนแหล่งพลังงานเก่าที่กำลังจะหมดไปจากโลกนี้ และเครื่องชุบผิวด้วยกระแสเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้ในการชุบพื้นผิวโลหะแทนวิธีเดิม ซึ่งสูญเสียทรัพยากรธรรมชาติอย่างมาก

เครื่องชุบผิวแข็งเหล็กโดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจะทำผิวแข็งของเหล็กที่มีคาร์บอนอยู่ โดยอาศัยคุณสมบัติของเหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอน ที่อุณหภูมิห้องเหล็กจะจับตัวแบบ BCC (Body Centered Cubic) เรียกว่า  $\alpha$ -iron หรือเฟอร์ไรต์ เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน upper critical point จะทำให้เริ่มเปลี่ยนจาก BCC ไปเป็น FCC (Face Centered Cubic) เรียกว่า  $\gamma$ -iron หรือออสเทนไนต์ (Austenite) และเมื่อทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ออสเทนไนต์ เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งโครงสร้างจะเป็นแบบ BCT (Body Centered Tetragonal) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านความแข็ง ทนต่อการเสียดสีและทนต่อความล้าได้ดี ขณะที่คุณสมบัติความเหนียวยังคงอยู่ในเกณฑ์สูง

หลักการทำงานของการชุบแข็งผิวด้วยกระแสเหนี่ยวนำ อาศัยหลักของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเมื่อไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ขึ้นรอบ ๆ ขดลวด และสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะกลับขั้วตามจำนวนความถี่ของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ถ้าเรานำเอาแท่งเหล็กไปใส่ไว้ในขดลวด สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะตัดผ่านเนื้อเหล็กในลักษณะกลับขั้วไปมา จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเนื้อเหล็กที่เรียกว่า กระแสเหนี่ยวนำไหลวน (Induced eddy หรือ Foucault current) แต่การเกิดกระแสไหลวนในเนื้อเหล็กนี้ จะไม่เกิดสมำเสมอตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของแท่งเหล็กจะเกิดมากตามบริเวณผิว ยิ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าสูงกระแสที่เกิดขึ้นจะเข้มข้นมากตามบริเวณผิว ซึ่งเรียกว่า skin effect

การชุบแข็งพื้นผิวด้วยกระแสเหนี่ยวนำความถี่สูง ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลาง (0.4-0.5% c) หรือเหล็กผสม (alloy steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลาง ซึ่งเหล็กประเภทนี้สามารถชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดาได้และจะได้รับความแข็งประมาณ 50-60 H<sub>rc</sub> บางกรณีอาจชุบแข็งด้วยวิธีนี้กับเหล็กที่มีคาร์บอนสูง (0.8-1.2% c) ได้แต่ต้องควบคุมการให้ความร้อนที่ดี และควรจะเป็นงานขนาดใหญ่ เช่น ลูกรีดเหล็ก



รูป แสดงทิศทางของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากขดลวดไฟฟ้าทำให้กระแสเหนี่ยวนำขึ้นบริเวณผิวของแท่งเหล็ก

ความหนาของผิวที่กระแสไฟฟ้าผ่านได้ (Depth of current penetration) จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ค่า magnetic permeability และค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการ

$$d = 5,000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ cm.}$$

เมื่อ d = ความหนาของผิวที่กระแสไฟฟ้าผ่านเป็น ซม.

$\rho$  = ความต้านทานกระแสไฟฟ้า micro-ohm-cm.

$\mu$  = Magnetic permeability gs/oersted

$f$  = ความถี่ของกระแสไฟฟ้า Hz

ในหนังสือบางเล่มจะให้ค่าความหนา  $d$  ในลักษณะที่เป็นสูตรใช้งาน (empirical formula) ไว้สั้น ๆ ดังนี้

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

สิ่งที่จะต้องพิจารณาประการสำคัญก็คือ ที่อุณหภูมิเหนือ 768 องศาเซลเซียส (Curie point) ซึ่งเหล็กจะเปลี่ยนคุณสมบัติจากแม่เหล็กดูดติดได้ (Ferromagnetic) ไปสู่สภาวะที่แม่เหล็กไม่ดูดติด (Paramagnetic) ค่า Magnetic permeability จะเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 768 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ค่า  $d$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูง จากการทดลองพบว่า เหล็ก 0.4%c ค่าความหนา  $d$  จะเพิ่มเป็น 17 เท่า เมื่ออุณหภูมิสูง 850 องศาเซลเซียส

นอกจากค่า  $d$  จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ และค่า Magnetic permeability แล้ว ยังขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้อีก ตามสูตร

$$d_s = 0.2 \sqrt{t}$$

เมื่อ  $t$  = เวลาเป็นวินาที

ดังนั้น ค่าความหนาของผิวที่ได้รับอิทธิพลจากกระแสไหลวนทั้งหมด จะเป็นผลรวมระหว่าง  $d$  กับ  $d_s$  ซึ่งเป็นค่าที่อาจจะคำนวณได้โดยประมาณเมื่อทราบความถี่ และเวลานั่นเอง ถ้าจะหาค่าที่แน่นอนจะต้องทราบค่า  $\rho$  และค่า  $\mu$  ซึ่งจะยากต่อการวัดค่าทั้งสอง เพราะจะเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะค่า  $\mu$  เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในการเผาเหล็กให้ร้อน ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการให้ความร้อน (Heating rate) จะได้ว่าพลังงานจำเพาะที่ค่าความถี่หนึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $\mu$  และ  $\mu$  ดังสูตร

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

เมื่อ  $E_w$  = ค่าพลังงานจำเพาะที่เปลี่ยนเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของความหนาที่ผิว

$$\alpha = \text{ค่าคงที่}$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อเหล็กถูกทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิ 768 องศาเซลเซียส ค่า  $E_w$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะค่า  $\mu$  ของเหล็กลดลงมาก (ค่า  $\mu$  ของเหล็กที่อุณหภูมิ 768 องศาเซลเซียสจะเท่ากับค่า  $\mu$  ของอากาศซึ่งน้อยมาก) ดังนั้นอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) จะสูงมากสำหรับความหนาของผิว (Surface layer) ในชั้นแรก และเมื่ออุณหภูมิถึง 768 องศาเซลเซียสอัตราการให้ความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันเนื้อเหล็กในชั้นต่อไปอุณหภูมิยังต่ำอยู่ อัตราการให้ความร้อนแก่เหล็กจะมีค่าสูงทำให้เหล็กในชั้นนี้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิของเหล็กในชั้นที่อยู่ลึกลงไปอัตราการให้ความร้อนจะกลับมีค่าสูงกว่าในชั้นนอกเล็กน้อยเพราะชั้นนอกมีโอกาสดำยเทความร้อนให้อากาศ โดยการแผ่รังสีได้มากกว่า แต่ในที่สุดอุณหภูมิของเหล็กบริเวณผิวที่มีความหนาค่าหนึ่ง ๆ คิดค่า  $d$  แม้จะประกอบด้วยเนื้อเหล็กชั้น ๆ หลายชั้นก็ตาม อุณหภูมิในแต่ละชั้นจะไม่แตกต่างกันมาก ในทางปฏิบัติอาจกล่าวได้ว่าร้อนเท่ากันอย่างทั่วถึง ซึ่งจะไม่เกิดปัญหาในการชุบแข็ง

ข้อได้เปรียบของเครื่องขุดผิวแข็งเหล็ก โดยการเห็นวนำของลนاعمแม่เหล็ก  
เมื่อเปรียบเทียบกับกาทำให้ความร้อนเหล็กโดยการให้เตา มีดังนี้คือ

- ใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อย
- ใช้เวลาในการให้ความร้อนเหล็กน้อย
- ประสิทธิภาพสูง
- สามารถควบคุมให้ความร้อนเฉพาะตำแหน่งได้
- ลดพื้นที่ในการปฏิบัติงาน
- สามารถนำมาปรับปรุงให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย
- ลดมลภาวะ

จากการที่มองเห็นประโยชน์ และความจำเป็นทางอุตสาหกรรม จึงได้มีการ  
ทดลอง และพัฒนาเครื่องใช้เองภายในประเทศ โดยล่วนประกอบต่าง ๆ สามารถหา  
ซื้อได้ในท้องตลาดโดยทั่วไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการเหนี่ยวนำความร้อนโดยสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา เมื่ออยู่ภายในเนื้อเหล็กจะเกิดปรากฏการณ์ในลักษณะที่ว่า สนามแม่เหล็กที่ผิวมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกจากผิวของเหล็ก ซึ่งเราเรียกลักษณะนี้ว่า skin effect นี้ทำให้มีกระแสไหลเฉพาะที่ผิวของเหล็กเท่านั้น ดังนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าไปให้กับเหล็กจะอยู่เฉพาะที่ผิว

#### 2.1 การกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็ก

ในการหาการกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็กนั้น กำหนดให้ displacement current นั้นน้อยมากไม่นำมาคิด

จากสมการของสนามแม่เหล็ก (Ref. 1)

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

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

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

ถ้าในเนื้อเหล็กมีค่า Conductivity ( $\sigma$ ) และจากกฎของโอห์ม

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

แทนค่า  $J$  ในสมการ (1)

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

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{h} = \nabla \times (\mathbf{E})$$

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

จากสมการ (3)  $\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot \mu \mathbf{H}$

$$= \mathbf{H} \cdot \nabla \mu + \mu \nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = -\mathbf{H} \cdot (1/\mu) \nabla \mu \quad (6)$$

แทนค่าจากสมการ (2), (6) ในสมการ (5)

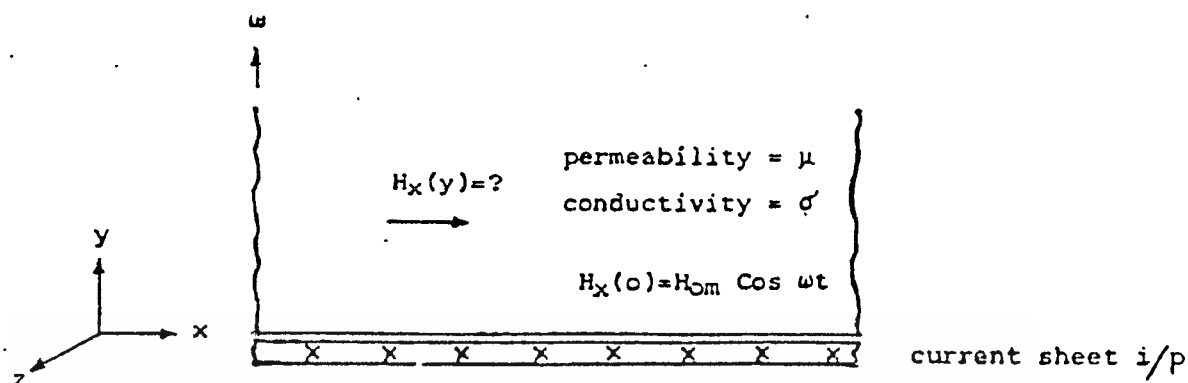
$$\nabla^2 \mathbf{H} = \nabla(\mathbf{H} \cdot (1/\mu)) - \nabla(\sigma) \times \mathbf{E} - \sigma(\partial \mathbf{B} / \partial t)$$

กำหนดให้เหล็กที่ใช้เป็น isotropic media มีค่า permeability ( $\mu$ )  
กับค่า conductivity ( $\sigma$ ) นั้น คงที่ตลอดเนื้อสาร ดังนั้น  $\nabla \mu = 0$  ;  $\nabla \sigma = 0$  ;  
 $d\mathbf{B}/d\mathbf{H} = \mu$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \sigma(d\mathbf{B}/dt) \cdot (\partial \mathbf{H} / \partial t)$$

ดังนั้น  $\nabla^2 \mathbf{H} = \sigma \mu (\partial \mathbf{H} / \partial t) \quad (7)$

หากการกระจายของ  $\mathbf{H}$  ภายในเนื้อเหล็ก โดยเริ่มกำหนดจากค่าความเข้ม  
ของสนามแม่เหล็ก ( $H_{\infty}$ ) ที่ผิวเหล็กมีทิศทางในแนวแกน  $x$  เท่านั้น และคิดว่า  
แท่งเหล็กมีขนาดยาวในแกนต่าง ๆ มากโดยมี current sheet ที่ทำให้เกิด  $H_{\infty}$   
อยู่ภายในตำแหน่ง  $x = 0$  โดยมีค่าสูงสุดคือ  $H_{\infty}$  และมีทิศทางของ current  
sheet ขนาดกับแกน  $z$  ตลอด ดังนั้นขนาดของ  $\mathbf{H}$  จะขึ้นอยู่กับค่าของ  $y$  โดยไม่  
แปรตาม  $x$  และ  $z$



รูปที่ 2.1 ขดลวดตัวนำและเหล็กที่หนามาก

กำหนดให้  $y = 0$  (ที่ผิวของเหล็ก)

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

เราสามารถแทนสมการตรีโกณให้อยู่ในรูปของ exponential ได้ โดยจาก Euler's Idetities (Ref.2)

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

ซึ่งเราสามารถเขียนสมการของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง  $y = 0$  ได้ดังนี้คือ

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

หรืออาจไม่เขียน Re ไว้ แต่เมื่อได้ค่าคำตอบก็หาค่า Real part จากสมการ (7)

$$\nabla^2 H = \sigma \mu (\partial H / \partial t)$$

$$\nabla^2 H = (\partial^2 H_x / \partial x^2) + (\partial^2 H_y / \partial y^2) + (\partial^2 H_z / \partial z^2) = \sigma \mu (\partial H / \partial t)$$

แต่เนื่องจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีทิศทางในแนวแกน x และแปรตามระยะทาง y เท่านั้น



$$(d^2 H_x) / (dy^2) = \mu(dH_x) / dt$$

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

ดังนั้น  $(d^2 H_x) / (dy^2) - \sigma \mu j \omega H_x = 0$

จาก  $\sigma = 1/\rho$  เมื่อ  $\rho$  : เป็นค่า Resistivity

ดังนั้น  $(d^2 H_x) / (dy^2) - (\mu/\rho) j \omega H_x = 0$

กำหนดให้  $\alpha^2 = \mu \omega / 2\rho$

ดังนั้น  $(d^2 H_x) / (dy^2) - 2j\alpha^2 H_x = 0$

ซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปของ differential equation ได้คือ

$$(d^2 H_x) / dy^2 - K^2 H_x = 0 \text{ เมื่อ } K^2 = 2j\alpha^2$$

และ solution of differential ได้ดังนี้

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

ซึ่งสามารถหาค่า  $A_1$  และ  $A_2$  ได้จาก boundary condition (Ref.2)

ที่ตำแหน่ง  $Y = \alpha \quad H_x = 0 \quad \text{ดังนั้น } A_1 = 0$

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

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

ดังนั้น

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

จาก  $K = \sqrt{2j} \cdot \alpha^2 = \sqrt{(1+j)^2} \cdot \alpha = (1+j) \alpha$

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

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

ซึ่งค่าของความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะเป็น real part

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

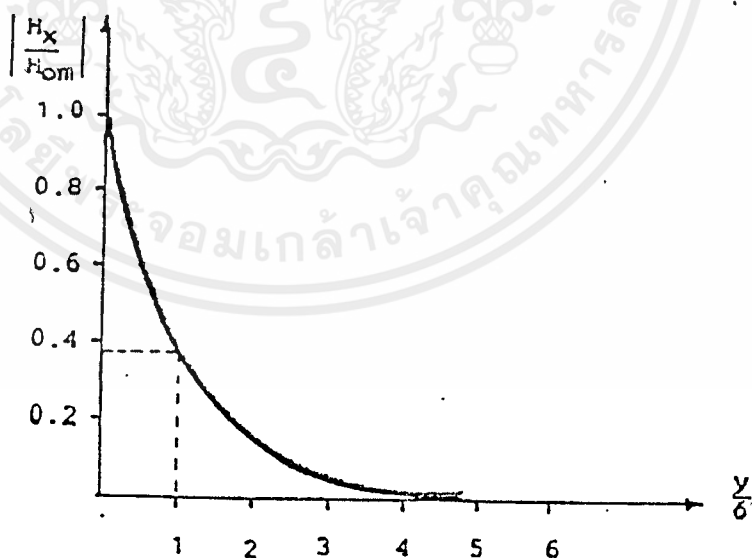
จะเห็นว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึกจากผิว ตามค่าที่นำมาคูณคือ  $\exp(-\alpha y)$  และที่ความลึกต่าง ๆ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะ lag สนามที่ผิวเป็นมุม  $\alpha y$

## 2.2 Skin effect

จากหัวข้อ 2.1 จะเห็นได้ว่า ค่าของสนามแม่เหล็กนั้นกระจายตามความลึกของ  $y$  โดย

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

โดยเทอมของ  $\exp(-\alpha y)$  เป็นตัวกำหนดขนาดของ magnitude ของ  $H_x$  ที่ระดับความลึกจากผิวต่าง ๆ ที่  $y = 1/\alpha$  ซึ่งมีผลทำให้เทอม  $\exp(-\alpha y) = e^{-1} = 0.368$  เรียก  $y$  นี้ว่า skin depth หรือ depth of penetration ใช้สัญลักษณ์



รูปที่ 2.2 การกระจายของ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กกับความลึก

ดังนั้น  $\delta = 1/\alpha$   
 $\delta = \sqrt{2\rho/\mu\omega}$  (10)

โดย  $\rho$  = resistivity โอห์ม-เมตร  
 $\mu$  = permeability เวปเปอร์/แอมป์-เทอร์น-เมตร  
 $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม เรเดียน/วินาที

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ออกมาดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

### 2.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแสและความเข้มของสนามไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงการกระจายของ ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็ก ซึ่งมีค่า permeability คงที่ จึงสามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยจากสมการ (9)

$$H_x(y) = H_x \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y)$$

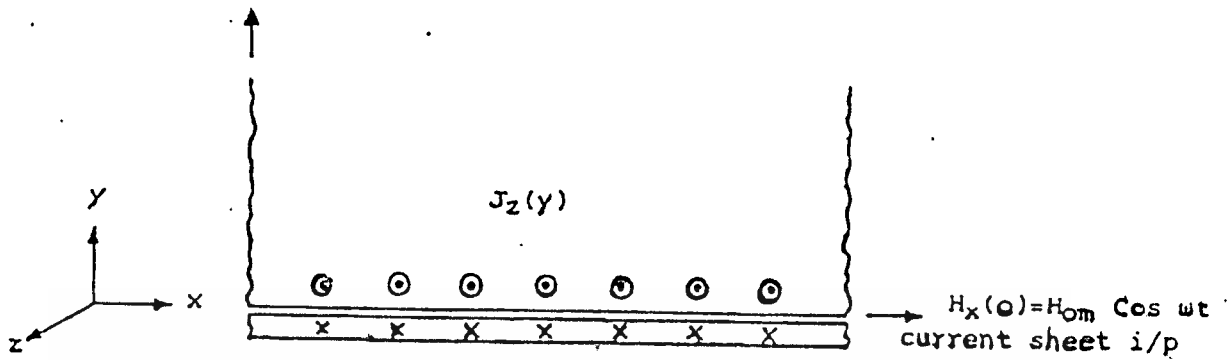
จากการหาความหนาแน่นกระแส จะพบว่า  $J$  จะมีทิศอยู่ในแนวแกน  $z$  และจะสามารถหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดในเหล็ก

จาก  $E = J/\phi = \rho j$

ดังนั้น  $E_z(y) = \rho J_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y)$  (14)

### 2.4 กระแสทั้งหมด

จากในหัวข้อ 2.3 เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของกระแสที่จุดต่าง ๆ ในเนื้อเหล็กโดยรู้วาทิศทางของกระแสอยู่ในแนบแกน  $z$  ดังนั้นเมื่อจะหากระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะต้อง integrate  $j$  ในแนวระนาบ  $x$  และ  $y$  จากรูปที่ 2.3 จะเห็นค่าความหนาแน่นกระแสแปรตามระยะ  $y$  เท่านั้น



รูปที่ 2.3 แลตงทศทางของควมเข้มของสนวมแม่เหล็กและควมหนาแน่นกระแส

เมื่อค่าควมหนาแน่นกระแสไม่แปรตามระยะทาง x จึงสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าต่อเมตร ในแนวแกน x

$$\begin{aligned}
 \text{ค่ากระแสไฟฟ้าต่อเมตร} &= \int_0^\infty J_z dy \\
 &= \int_0^\infty J_{0m} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y) dy \\
 &= J_{0m} \cdot \text{Re} \left[ \int_0^\infty \exp\{j\omega t - (1+j)\alpha y\} dy \right] \\
 &= J_{0m} \cdot \text{Re} \left[ \exp(j\omega t - (1+j)\alpha y) / -(1+j)\alpha \right]_0^\infty \\
 &= J_{0m} \cdot \text{Re}[\exp(j\omega t) / (1+j)\alpha] \\
 \text{จาก } J_{0m} &= \sqrt{2} \cdot \alpha H_{0m} \exp(j\pi/4) \\
 \text{ค่ากระแสต่อเมตร} &= \text{Re}[H_{0m} \exp(j\omega t)] \\
 &= H_{0m} \cdot \cos \omega t \tag{15}
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลในเนื้อเหล็ก จะมีค่าเท่ากับค่าควมเข้มของสนวมแม่เหล็กที่ผิวของเหล็ก และ inphase กัน

ดังนั้น 
$$I_m = H_{0m}$$

## 2.5 กำลังที่เกิดขึ้นในเหล็ก

จากที่เราสามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสที่จุดต่าง ๆ ในเหล็ก เมื่อทราบค่า resistivity ของเหล็กแล้ว ก็จะหาค่าของกำลังที่สูญเสียในเหล็กต่อ ล.บ. เมตร เท่ากับ  $\mu J^2$  เมื่อต้องการรู้กำลังที่สูญเสียทั้งหมดโดยการ integrate ตลอดปริมาตร แต่เนื่องจาก  $J$  ไม่แปรตามแกน  $x$  และ  $z$  ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิวในแกน  $x$  และ  $z$  โดย

กำหนดให้  $P$  : กำลังที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิว วัตต์/เมตร<sup>2</sup>

$$P = \int_0^{\infty} \mu J^2 dy$$

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

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

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

$$= \mu J_{om}^2 / 4\alpha \left| \exp(-2\alpha y) \right|_0^{\infty}$$

$$P = \mu J_{om}^2 / 4\alpha = \mu J_{om}^2 / 4$$

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

ดังนั้น  $P_{av} = \mu H_{om}^2 / 2$

ค่ากำลังที่สูญเสียที่คำนวณได้เป็นค่าเฉลี่ยซึ่งคิดกำลังรวมทั้งหมด ตั้งแต่ที่ผิว  $y = 0$  จนถึง  $y = \alpha$  เมื่อค่าเปรียบเทียบความสูญเสียตั้งแต่ผิวถึงจุด  $y$  ใด ๆ กับความสูญเสียที่ผิวถึง  $y = \alpha$  ซึ่งจะออกมาเป็น per-unit loss

$$P_w / P = \left| \exp(-2\alpha y) \right|_0^y / \left| \exp(-2\alpha y) \right|_0^{\infty}$$

$$= \exp(-2\alpha y) - 1 / -1$$

$$P_w / P = 1 - \exp(-2\alpha y)$$

ที่

$$y = 1/\alpha = d$$

$$P_y/P = 1 - e^{-2} = 1 - 0.865$$

$$y = 2/\alpha = 2$$

$$P_y/P = 1 - e^{-4} = 1 - 0.0018 = 0.982$$

## 2.6 เส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดหาได้โดยการ integrate ตลอดพื้นที่หน้าตัดของ สนามแม่เหล็กที่ผ่าน เนื่องจากทิศทางของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กขนานกับ แกน x ดังนั้นจะตั้งฉากกับระนาบ y-z ซึ่งค่า B จะเปลี่ยนตามระยะ y เท่านั้น ดังนั้นเราสามารถหาเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวในแกน x

$$\begin{aligned}\phi &= \mu H_{om} \int_0^{\infty} \exp[j\omega t - (1+j)\alpha y(x)] \\ &= \mu H_{om} / \sqrt{2\alpha} \exp[j(\omega t - \tau/4)]\end{aligned}$$

ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นค่า real part

$$\phi = \mu H_{om} / \sqrt{2\alpha} \cdot \cos(\omega t - \tau/4)$$

## 2.7 การเหนี่ยวนำคักตาไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดในเนื้อเหล็ก ก็สามารถหาการเหนี่ยวนำคักตาที่เกิดขึ้นในขดลวดจ่ายพลังงาน โดยกำหนดว่าขดลวดจ่ายพลังงานมีอยู่ N รอบ จาก

$$\text{emf.} = N d\phi/dt$$

$$= -(\mu N \omega H_{om}) / (\sqrt{2\alpha} \cdot \sin(\omega t - \tau/4))$$

$$\text{emf.} = (\mu N \omega H_{om}) / (\sqrt{2\alpha} \cdot \cos(\omega t + \tau/4))$$

## 2.8 การคำนวณหาค่าโดยประมาณ

จากทฤษฎี ในการหาค่าของ skin effect นั้นเรากำหนดให้เป็นแผ่นเหล็ก

ที่มีความยาวในแกนต่าง ๆ ยาวจนถึงอนันต์ แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น  
จริง ๆ เป็นการสร้างรูปสูตรอย่างง่าย ๆ แล้วเปรียบเทียบกับการใช้งานจริง ๆ ว่า  
ผิดไปไม่มากนัก

temperature ( ° c )	$\rho$ ( $\Omega - m$ )	$\mu_r$	$\delta = \sqrt{2\rho/\mu\omega}$ (mm)
20	$0.160 \times 10$	60	0.164
200	$0.290 \times 10$	60	0.221
400	$0.483 \times 10$	60	0.286
600	$0.755 \times 10$	60	0.357
800	$1.095 \times 10$	1	3.33
1000	$1.165 \times 10$	1	3.44
1200	$1.22 \times 10$	1	3.52

ตาราง 2.1 ตัวอย่างการคำนวณหา skin depth ( )

จาก skin depth =  $\sqrt{2\rho/\mu\omega}$

เมื่อไฟที่จ่ายให้กับขดลวด มีค่ามถึ = 85.9 กิโลเฮิร์ต

ดังนั้นจะได้  $\omega = 2\pi * 85.9 * 10^3 = 5.4 * 10^5$  เรเดียน/วินาที

ค่า resistivity กับค่า permeability เป็นค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็ก  
point  $\mu_r = 60$  และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า curie point ( $760^\circ C$ )  $\mu_r = 1$   
skin depth( $\delta$ ) ของเหล็กจากตาราง 2.1

ส่วน skin depth ของทองแดงโดยค่า  $\mu_r$  ของทองแดงที่ใช้เป็นลวดตัวนำ  
มีค่าเท่ากับ 1

resistivity ที่  $50 \text{ C } 2 * 10$  โอห์ม-เมตร

$$\text{skin depth} = \sqrt{2 * 2 * 10 / 4 * 10 * 5.4 * 10^2}$$

$$= 0.003 \text{ มิลลิเมตร}$$

เพราะฉะนั้น ลวดตัวนำที่ใช้จะต้องเป็นแบบแบน

ส่วนขดลวดจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเหนี่ยวนำเหล็กนั้น เมื่อเป็นขดลวดรัศมี R มีจำนวนรอบเท่ากับ N รอบ ความกว้างของลวดที่ใช้ทำขดลวดเท่ากับ D ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ s ดังรูปที่ 2.4

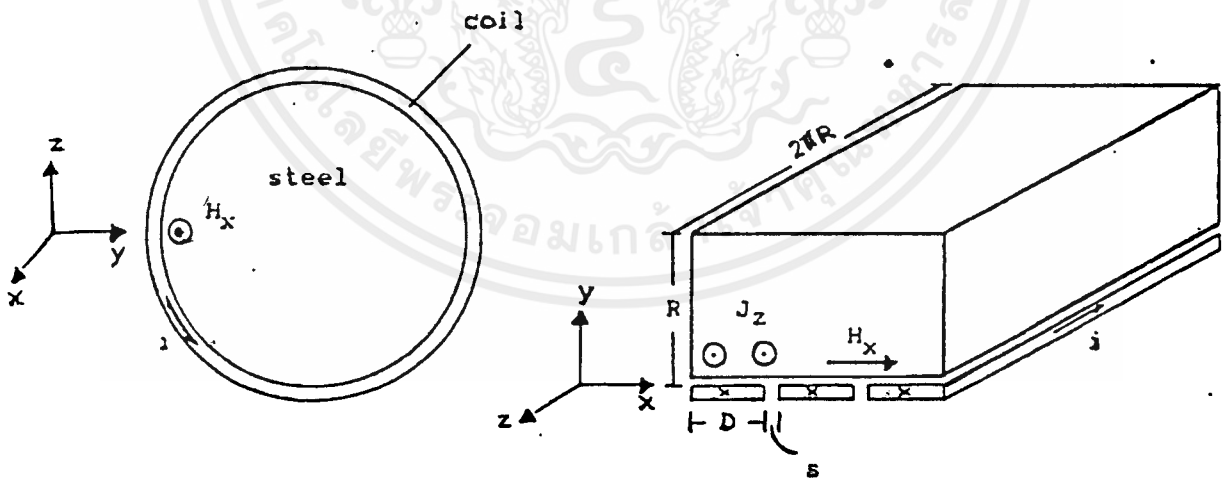
เมื่อจับขดลวดมาตัดแล้วคลี่ออกจะได้

$$x = ND (N-1) S \text{ เมตร}$$

$$Y = R \text{ เมตร}$$

$$Z = 2 \pi R \text{ เมตร}$$

$$V_{\text{max}} = \sqrt{2} \mu N w H_{\text{om}} Z (20)$$



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบเมื่อคลี่ขดลวดออกมาเป็นแบบ linear ตามแกน x,y และ z

ดังนั้น ถ้ารู้ค่าคัตตาไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดจ่ายพลังงานจะทำให้สามารถหา  
ค่า  $H_{om}$  ได้

$$\text{ดังนั้นกระแสทั้งหมดในขั้วงาน} = H_{om} \cdot X$$

$$\text{กระแสทั้งหมดที่ไหลเข้าขดลวด} = H_{om} \cdot X/N \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังที่สูญเสียในเหล็ก} &= P. \text{ (พื้นที่ผิวของเหล็ก)} \\ &= [\mu I_{om}^2 / 2\delta] (x.z) \end{aligned}$$

หรือหากำลังที่ป้อนให้กับขดลวดซึ่งจะเท่ากับกำลังที่สูญเสียในเหล็ก

$$\begin{aligned} \text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด} &= V_{rms} \cdot I_{rms} \cos \theta \\ &= 1/2 V_{max} \cdot I_{max} \cos \pi/4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } V_{max} &= \mu N \omega H_{om} Z / \sqrt{2} \alpha \\ I_{max} &= H_{om} \cdot X/N \end{aligned}$$

$$\text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด} = \mu \omega H_{om}^2 X^2 / 4 (x.z)$$

$$\text{จาก } \mu \omega = 2\mu / \delta^2 \quad \text{และ } \alpha = 1/\delta$$

$$\text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด} = [\mu H_{om}^2 / 2\delta] (x.z) \quad (22)$$

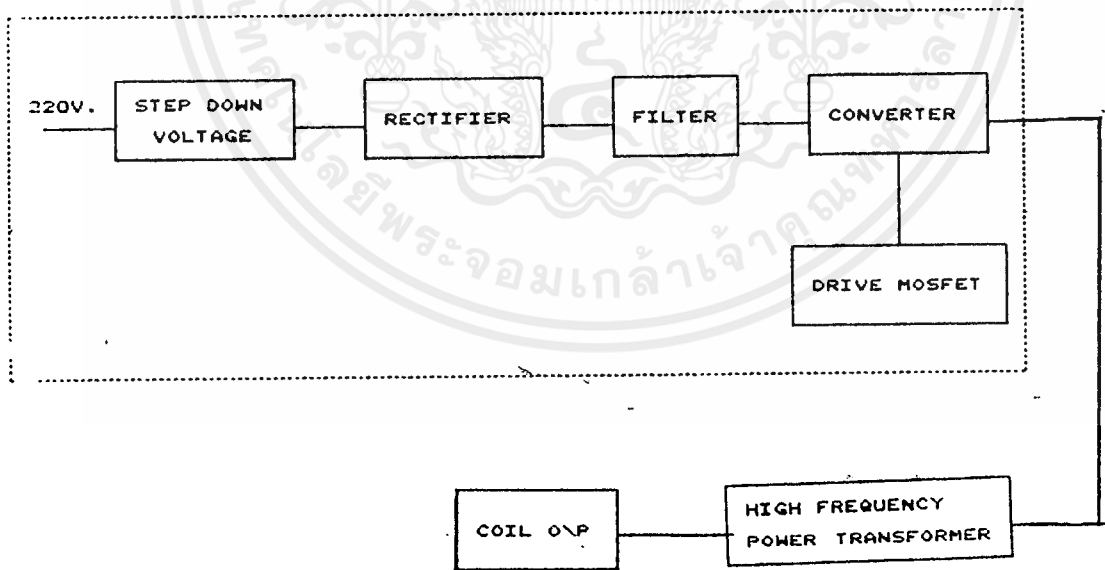
จากสมการ (20) เมื่อทราบถึงคัตตาไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดส่งออก จะ  
สามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็ก และต่อจากนั้นก็สามารถหากระแสที่ไหลใน  
ขดลวดดังสมการ (21) และสามารถหากำลังที่จ่ายให้กับเหล็ก

### บทที่ 3

#### โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

การสร้างเครื่องขั้วเหล็ก โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก เราจะต้องสร้างสนามแม่เหล็ก ที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา ให้ผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็ก โดยความถี่ต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้สนามแม่เหล็กไม่ลงไปลึกเกิน ซึ่งความถี่จะเป็นตัวกำหนดความหนาของขั้วแข็งได้ ต่อมาเราก็มาพิจารณาว่าเราจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา เพื่อเป็นตัวส่งพลังงาน เข้าไปในเนื้อเหล็กได้อย่างไร

โดยการสร้างเครื่องขั้วแข็งเหล็กที่มีขนาดกำลัง 2-3 KW มีความถี่ 100 KH<sub>z</sub> จะเห็นว่าความถี่ของสนามแม่เหล็กสูงกว่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ (50 H<sub>z</sub>) ทำได้โดยแปลงจากไฟกระแสสลับ 50 H<sub>z</sub> ให้เป็นไฟกระแสตรงแล้วแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่มีความถี่ 100 KH<sub>z</sub> ซึ่งมีส่วนประกอบวงจรตามรูป 3.1



รูป 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

### 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ว่าประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่ต่อกัน โดยแบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้ คือ

3.1.1 การลดศักดาไฟฟ้า (Stepdown Voltage) ทำหน้าที่ลดศักดาไฟฟ้าลงเหลือประมาณ 80-100 โวลต์

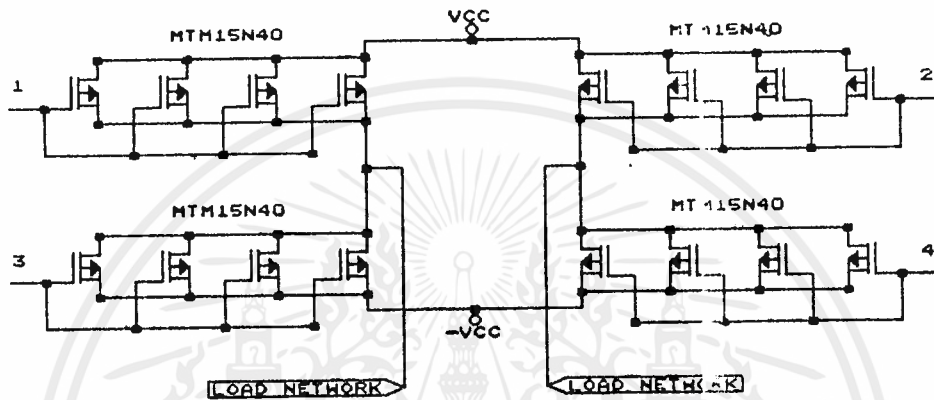


รูป 3.2 แสดงวงจรลดศักดาไฟฟ้า

3.1.2 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) จะเป็นตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง โดยจะเป็นตัวแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มช่วงคลื่น (full wave Rectifier)

3.1.3 วงจรกรอง (Filter) ทำหน้าที่นำสัญญาณจากวงจรแปลงกระแสไฟฟ้ามากรองให้เรียบ โดยใช้วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (L-C Filter)

3.1.4 คอนเวอร์เตอร์ (Converter) เป็นตัวแปลงกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับโดยใช้ Power MOSFET ในวงจรนี้เราใช้ FET เบอร์ MIM15N40 มาต่อกันแบบ Bridge ดังนี้



รูป 3.3 แสดงการต่อ FET แบบ Bridge

FET หมายเลข 1 กับ 4 และ 2 กับ 3 จะทำงานคู่กัน

เมื่อ 1 กับ 4 ON FET 2 กับ 3 จะ OFF

เมื่อ 2 กับ 3 ON FET 1 กับ 4 จะ OFF

เบอร์ MTM15N40 ซึ่งถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้กับโวลต์เตจสูง ๆ มีความเร็วในการ Switch สูง ไดโอดที่ต่อระหว่าง Source กับ Drain มีคุณสมบัติใช้กับ Inductive load

Power MOSFET มีคุณสมบัติหลายประการ แตกต่างไปจากอุปกรณ์ไบโพลาร์ ซึ่งปกติต้องการสัญญาณขับในแรงดันต่ำแต่กระแสสูง ในขณะที่ Power MOSFET ต้องการสัญญาณแรงดันสูง โดยดึงกระแสอินพุตต่ำมาก อีกประการหนึ่งแหล่งสัญญาณไฟกระแสสลับ ต้องสามารถ Charge และ Discharge แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางขาเกต

ทั้งนี้เนื่องจาก Power MOSFET ใช้พื้นที่ที่ขั้วค่อนข้างใหญ่ค่าความจุทางขาคาทจึงสูง ใน Switching Amplifier ที่มีประสิทธิภาพสูงได้นั้น จะต้องมีการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ Active น้อยที่สุดคือ

ก) ต้องทำให้แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ Active ขณะที่มีการไหลผ่านตัวมัน มีค่าน้อยที่สุด

ข) ในสภาวะที่อุปกรณ์ Active ไม่นำกระแสจะต้องมีการไหลผ่านตัวมันมีค่าน้อยที่สุด

ค) ในสภาวะที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ คือ ช่วงที่มีแรงดันและกระแสมีช่วงคาบเกี่ยวกัน จะเป็นช่วงที่สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

### ข้อได้เปรียบของการใช้มอสเฟต

#### ด้านความเร็ว

มอสเฟตกำลังมีความเร็วในการสวิตชิ่ง ด้วยความรวดเร็วโดยปราศจากการสะสมประจุอย่างไบโพล่าทรานซิสเตอร์จึงไม่คิดช่วงเวลาสะสม จึงทำให้ขนาดและน้ำหนักเบา จึงทำให้มอสเฟตมีความเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ในการสวิตชิ่งมาก

ความเร็วของมอสเฟตนั้น ขึ้นอยู่กับการอัดและคายประจุของการเก็บประจุของมอสเฟตเอง โดยจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

#### ลักษณะของอินพุท

ขาเกทของมอสเฟตกำลัง นั้นจะถูกแยก(isolate) จากแหล่งจ่ายด้วยชั้นของอ็อกไซด์ที่ทำให้เกิดความต้านทานกระแสตรงประมาณ 40 เมกกะโอห์ม มอสเฟตจะถูกไบอัสด้วยแรงดัน 10 โวลต์ ด้วยแรงดันขนาดนี้ จึงสามารถขับมอสเฟตนี้ด้วย ไอซี ซิมอล หรือ ทิกเก็ตแอล ได้โดยตรง จึงไม่ต้องคำนึงถึงกระแสของโหลด ทำให้ลดความยุ่งยากของวงจรขับ โดยรวมแล้วจะทำให้ประหยัดยิ่งขึ้น

### ย่านทำงานปลอดภัย

การใช้งานเกินพิกัดของมอสเฟตนั้น อาจจะทำให้มอสเฟตพังได้ แต่มอสเฟตแล้วบางทีอาจจะไม่จำเป็นจะต้องใช้วงจรสับเบอร์ก็ได้ หรือใช้ตัวเก็บประจุค่าน้อยๆ ได้ ขอบเขตของย่านปลอดภัย ถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุด แรงดันเบรคดาวน์ และความจุของอุปกรณ์ ขอบเขตของย่านปลอดภัยจะกว้าง เนื่องจากไม่เกิดเบรคดาวน์ เซ็คันดารี

### แรงดัน

แรงดันต่ำสุดของมอสเฟตหาได้จากค่าความต้านทานของอุปกรณ์  $r_{DS}$  สำหรับอุปกรณ์แรงดันต่ำ ค่าของ  $r_{DS}$  จะต้องมีค่าต่ำสุด สำหรับอุปกรณ์แรงดันสูงค่า  $r_{DS}$  ต้องมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก ส.ป.ล. อุณหภูมิของ  $r_{DS}$  เป็นบวก

### ลัมประสิทธิทางอุณหภูมิ

ลัมประสิทธิทางอุณหภูมิของมอสเฟตมีค่าตรงข้ามกับทรานซิสเตอร์ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในตัวมอสเฟตสูงขึ้น กระแสเดรนจะมีค่าลดลง ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหนี้อุณหภูมิ (thermal runaway)

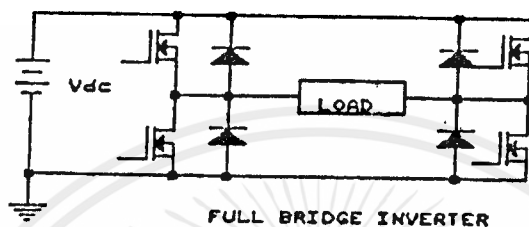
### เพิ่มกำลังได้

สามารถเพิ่มกำลังของการสวิตชิ่งได้โดยการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันหลายๆตัว

อย่างไรก็ดีการมอสเฟตกำลังก็มีข้อเสียเช่นกัน ค่า  $r_{DS(on)}$  ในมอสเฟตกำลังสูงกว่าในทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพล่า ดังนั้น การใช้งานที่ความถี่ต่ำซึ่งค่าความสูญเสียขณะนำกระแสในอุปกรณ์สวิตชิ่งกำลัง เป็นสำคัญ จึงไม่ควรใช้มอสเฟตกำลัง

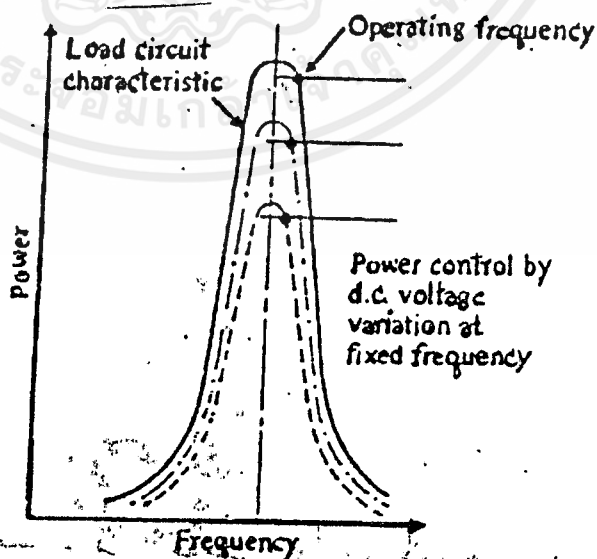
## อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

อินเวอร์เตอร์แบบนี้ใช้อุปกรณ์สวิทซ์ 4 ตัว สำหรับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมีข้อได้เปรียบคือสามารถให้กำลังงานได้สูง จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการค่ากำลังสูงๆ ลักษณะของอินเวอร์เตอร์แบบนี้แสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.4 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

ระบบอินเวอร์เตอร์แบบนี้ เป็นระบบซึ่งใช้ในโครงการนี้ โดยใช่วงจรขับแบบพัลส์เทรันทราานสฟอร์มเมอร์ มีลิ้นับเบอร์ป้องกันสไปล์โวลเตจ และมีเดทโทมเพื่อป้องกันการลัดวงจรในกิ่งเดียวกัน สำหรับการงานร่วมกับวงจรถ่ายเหี้ยวน้ำนั้น จะทำงานด้วยระบบโพลริโซแนนซ์คือ ความถี่ของอินเวอร์เตอร์จะวิ่งเข้าหาความถี่โซแนนซ์ตลอดเวลา เพื่อให้เกิดกำลังสูงสุดในวงจร



รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนค่ากำลังของระบบโพลริโซแนนซ์

## การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส คือ

$$I_D = \beta \left[ (V_G - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

เมื่อ

$$\beta = \mu_n C_{ox} \cdot \frac{W}{L} (\epsilon - V)^{-1}$$

$V_T$  คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold  $V_{Dtoge}$ )

$C_{ox}$  คือ ความจุไฟฟ้าของออกไซด์ มีหน่วยเป็นฟารัดต่อตารางพื้นที่

$V_G$  คือ ค่าแรงดันขา Gate

เมื่อพิจารณากรณีที่ MOSFET ทำงานในช่วงเชิงเส้น ( $V_{DS}$  มีค่าน้อย ๆ)

จะพิจารณาได้ว่า  $V_G - V_T > V_{DS}$   $V^2$

ดังนั้น  $(V_G - V_T) V_{DS} \gg \frac{V_{DS}^2}{2}$

$$I_D = \beta (V_G - V_T) V_{DS}$$

เมื่อพิจารณาที่  $\beta (V_G - V_T) V_{DS}$  ค่าที่ค่าหนึ่ง ๆ จะได้ว่า

$I_D \propto V_{DS}$  หรือแปรผันกันเป็นแบบเส้นตรง

ดังนั้นจาก  $I_D - V_{DS}$  char. ในช่วงเชิงเส้นจะสามารถหา

$$1. \text{ ค่า } \epsilon_m \text{ (ช่วงเชิงเส้น) เมื่อ } \epsilon_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} \right|_{V_{DS} \text{ คงที่}}$$

2. ค่า  $g_{m,d}$  (ช่วงเชิงเส้น) เมื่อ  $g_{m,d} = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{DS}} \Big|_{V_G}$  คงที่

3. ค่า  $R_{oN}$  เมื่อ  $R_{oN} = \frac{1}{g_{m,d}}$

เมื่อพิจารณาเฉพาะทำ MOSFET ทำงานในช่วงอิมิตัว

พิจารณาเมื่อ  $V_G - V_T < V_{DS}$

ดังนั้น

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_G - V_T)^2$$

หรือ

$$\sqrt{I_D} = \frac{(\sqrt{\beta} \cdot V_G) - (\sqrt{\beta} \cdot V_T)}{\sqrt{2}}$$

เมื่อพิจารณาว่า  $\beta$  และ  $V_T$  เป็นค่าคงที่นั่นคือ  $\sqrt{I_D}$  แปรผันเป็นเส้นตรงกับค่า  $V_G$

ดังนั้นจาก  $I_D - V_{DS}$  char. ในช่วงอิมิตัว จะสามารถหา

1. ค่า  $V_T$  เมื่อพิจารณาที่  $I_D = 0$  จะได้  $V_T = V_G$

2.  $G_{m(sat)}$

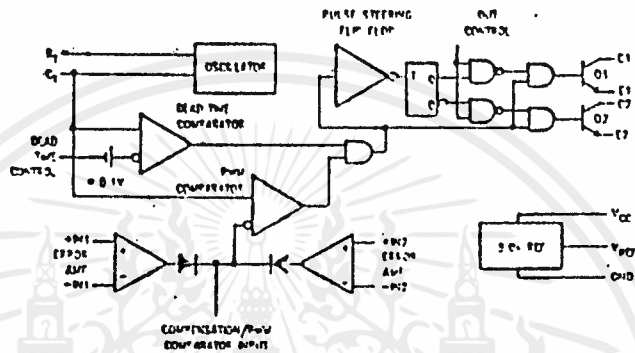
3.  $R_{oN}$  เมื่อ  $R_{oN} = \frac{1}{g_{m(sat)}}$

$g_{m(sat)}$



TL 494 เป็นไอซี 16 ขา กำหนดค่าความถี่ของ Square wave มีโครงสร้างภายในดังรูปข้างล่าง

Block Diagram



รูป 3.7 แสดงโครงสร้างภายในของ TL 494

TL 494 ถูกกำหนดความถี่ Oscillate ด้วยค่า  $R_c$  และ  $C_c$  คำนวณ ได้

จากสูตร

$$F_{osc} = \frac{1.1}{R_c C_c}$$

เกทที่ขับเอาท์พุททรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  สามารถกระทำได้เมื่อ Clock ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ low ปรากฏการณ์นี้เกิดระหว่างที่ Saws tooth V มากกว่าสัญญาณควบคุม ค่า Dead time กำหนดได้ที่ขา 4

3.1.8 ไอโซเลท (Isolate) ทำหน้าที่แยกส่วนของสัญญาณที่เป็นสี่เหลี่ยมที่ส่งมาจากส่วนออสซิลเลเตอร์ กับส่วนวงจรขับ Power MOSFET เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณที่กลับมาจากด้าน Power โดยใช้ Transformer ที่มีแกนเป็น Ferrite ในการ Isolate เหตุที่ต้องใช้แกน Ferrite เพราะเป็นแกนที่ใช้กับหม้อแปลงความถี่สูงได้อย่างดี และเลือกแกนที่เหมาะสมกับความถี่ 100 KHz ด้วย

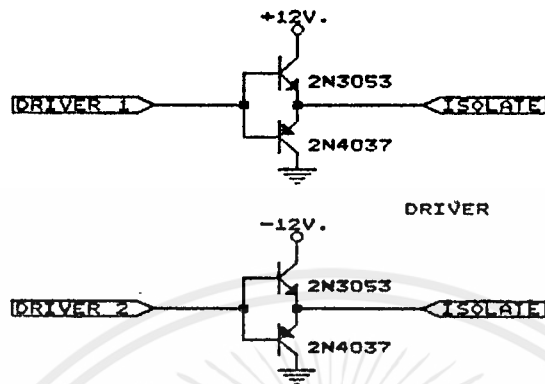


รูปที่ 3.8 แสดงหม้อแปลง Isolate

เราให้ Primary (input) 1 ชุด แต่ Secondary (output) มี 4 ชุด โดยมีอัตราส่วนจำนวนรอบดั่งสมการ

$$\frac{N_1}{N} = \frac{N_2}{N} = \frac{N_3}{N} = \frac{N_4}{N} = 1$$

3.1.9 วงจรขับ MOSFET (driver) จะเป็นตัวป้อนสัญญาณเข้าที่ขาเกต (Gate) ของ MOSFET ภาค Driver แสดงดังรูป.



รูปที่ 3.9 แสดงวงจร Driver

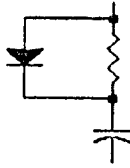
ภาค Driver ประกอบด้วย Transistor 2 ชุด คือ 2N3053 และ 2N4037  
 2N3053 เป็น Transistor ชนิด NPN จะทำงานเมื่อสัญญาณที่ขา BASE เป็นบวก  
 2N4037 เป็น Transistor ชนิด NPN จะทำงานเมื่อสัญญาณที่ขา BASE เป็นลบ

จะเห็นว่า 2N3053 และ 2N4037 มาต่อกันตั้งในวงจรข้างบน จะสลับกันทำงาน เมื่อสัญญาณที่ขา Base เป็น Pulse สัญญาณ Output ที่ขา Emitter จะมีรูปสัญญาณเหมือนขา Base แต่กระแสจะถูกขยายด้วยค่า  $\beta$  ( $I_e = \beta I_b$ )

สำหรับ Inverter 4049 ทำหน้าที่เป็น Buffer

### 3.1.10 วงจรชั้นสับเบออร์ (RC shunt snubber)

วงจรชั้นสับเบออร์มีไว้เพื่อลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลัง และค่าสไปค์ (spike) โวลต์เฉพาะขณะเริ่มหยุดทำงาน โดยวงจรชั้นสับเบออร์จะลดค่าการเพิ่มของโวลต์เตจที่เพิ่มขึ้นเมื่อทรานซิสเตอร์กำลังหยุดทำงาน โดยการชาร์จกระแสเข้าที่คาปาซิเตอร์และคายออกผ่านค่าความต้านทานในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน รูปแบบของวงจรชั้นสับเบออร์แสดงไว้ดังรูป



แสดงการต่อขึ้นสนับเบอร์

การคำนวณวงจรขึ้นสนับเบอร์ ทำโดยการสมมติให้ค่ากระแสที่ลดลงในช่วง  
ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานเป็นเชิงเส้น ดังนั้นค่ากระแสจะแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 i &= I(1-t/t_c) \\
 e &= \int_0^{t_c} (I-i) dt \\
 &= \frac{1}{c} \int_0^{t_c} t dt \\
 &= \frac{It^2}{2ct_c}
 \end{aligned}$$

ให้  $e = E$  เมื่อ  $t = t_c$  เราจะได้ค่าคาปาซิเตอร์ของสนับเบอร์เท่ากับ

$$c = \frac{It_c}{2E}$$

โดยที่ค่า  $t_c$  จะเป็นเวลาที่กระแสที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลังได้ลดลงขณะหยุด  
ทำงานและมักจะกำหนดให้เป็นค่าฟอลไทม์ (Fall Time) ของการแสของ  
การลวิตซ์

ค่าความต้านทานของวงจรขึ้นสนับเบอร์ เป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่จะไหลผ่าน  
ตัวทรานซิสเตอร์ ในขณะที่สนับเบอร์คายกระแสต่ำสุดที่เป็นไปได้ของความต้านทาน  
สามารถหาได้จาก

$$R_{in} = E / (I_m - I_r)$$

โดยที่ค่า  $I_m$  เป็นค่ากระแสของตัวทรานซิสเตอร์กำลังและค่า  $I_r$  เป็นค่า

กระแสที่ไหลผ่านโหลดในช่วงที่ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงานและค่าสูงสุดที่ค่า  $R_{\square}$  จะเป็นไปได้ สามารถหาได้จากช่วงการทำงานต่ำสุดของทรานซิสเตอร์ ( $T_{on(min)}$ ) โดยที่ช่วงการทำงานต่ำสุดของทรานซิสเตอร์ จะต้องมีค่าน้อยที่สุดเป็น 3 เท่าของไทม์คอนแลแตนท์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $R_{\square} C_{\square}$  เราจะได้

$$(T_{on(min)}) = 3R_{\square} C_{\square}$$

เราจะได้สมการของ  $R_{\square}$  คือ

$$R_{\square} < T_{on(min)} / 3C_{\square}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่า  $R_{\square}$  คือ

$$E / (1 - I_r) <= R_{\square} <= T_{on(min)} / 3C_{\square}$$

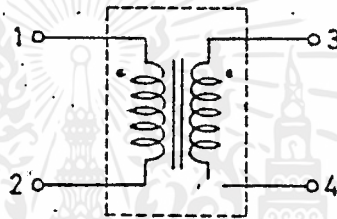


## บทที่ 4

### การผันหม้อแปลง การผันขดลวด และการออกแบบ coil

#### การผันหม้อแปลง

หม้อแปลง เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟสลับจากแรงดันหนึ่งไปเป็นแรงดันไฟสลับขนาดที่ต้องการ โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ผ่านขดลวด ลักษณะของหม้อแปลงเป็นดังนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะหม้อแปลง

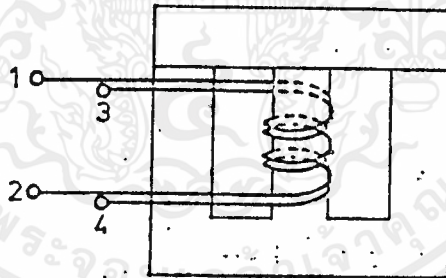
ขดลวดทางด้านจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงตามรูปคือขั้ว 1 และ 2 เรียกว่าขดปฐมภูมิ แรงดันไฟออกทางขั้ว 3 กับ 4 เรียกว่าขดทุติยภูมิ

หม้อแปลงตัวหนึ่งอาจมีขดทุติยภูมิหลายๆขดก็ได้ เครื่องหมายจุด(.) ที่ปลายขดแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิคือ ขั้วที่ 1 กับขั้วที่ 3 จะมีเฟสตรงกันคือ ในขณะที่ศักดาไฟเข้าขั้ว 1 สูงกว่าขั้ว 2 ศักดาที่ขั้วออกที่ 3 จะสูงกว่าขั้วที่ 4 และในทำนองเดียวกัน ขณะที่ขั้ว 1 มีศักดาต่ำกว่า ที่จุด 2 ขั้วที่ 3 จะมีศักดาต่ำกว่าขั้ว 4 ด้วย

โดยรูปแล้วหม้อแปลงจะรับพลังงานไฟฟ้าเข้าทางขดปฐมภูมิ สูญเสียเป็นพลังงานความร้อนไปบางส่วน และที่เหลือก็เป็นพลังงานไฟฟ้าออกที่ขดทุติยภูมิ หม้อแปลงจึงถูกบอกขนาดเป็น หน่วยกำลังที่มันถ่ายเทได้ ซึ่งก็คือ VA (ซึ่งก็คือกำลังไฟฟ้าได้จากแรงดันไฟสลับ \* กระแสสลับ)

### การทำงานของหม้อแปลง

แรงดันไฟสลับที่จ่ายให้ที่ขดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆขดปฐมภูมิ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ จะเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดเวลา กล่าวคือจากไม่มีสนามแม่เหล็กเลย ค่อยๆมีมากขึ้นในทิศทางหนึ่งจนสูงสุด แล้วค่อยๆยุบตัวลดขนาดลงจนเป็นศูนย์ แล้วก็ค่อยๆเพิ่มมีมากขึ้นอีก แต่ในทิศทางตรงกันข้าม จนสูงสุดแล้วก็ยุบตัวลงจนเป็นศูนย์ แล้วก็เพิ่มขึ้นอีกเหมือนทิศทางในครั้งแรก เป็นเช่นนี้สลับกันไปมา ตามความถี่ของไฟสลับที่ป้อนเข้ามา ถ้ามีขดอีกขดหนึ่งมาวางใกล้ๆ สนามแม่เหล็กนี้ สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นี้ จะตัดขดลวดนั้นเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในขดลวดนี้ได้ แรงดันนี้จะมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดที่นำมาวางใกล้ๆ และสนามแม่เหล็กไปตัดกับขดลวดได้มากน้อยเพียงใด เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิมาตัดขดทุติยภูมิมากๆ จึงให้ทั้งขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมินั้นอยู่บนแกนเหล็กอันเดียวกัน โดยแกนเหล็กนี้จะต่อกันอยู่อย่างครบวงจร คือมีเนื้อเหล็กตลอดวง จึงทำแกนขึ้นโดยแผ่นเหล็ก รูปตัว E และ I แล้วพันขดลวดทั้งสองไว้ตรงกลางตามรูป



รูปที่ 4.2 ตัว E และ I เป็นแกน

ความลัมพันธ์ของแรงดันไฟ เข้าที่ขดปฐมภูมิกับแรงดันไฟออกที่ขดทุติยภูมิคือ

$$E_1 = n_1$$

$$E_2 = n_2$$

เมื่อ  $E_1 =$  แรงดันไฟสลับ เข้าที่ขดปฐมภูมิ

$E_2 =$  แรงดันไฟสลับ เข้าที่ขดทุติยภูมิ

$n_1$  = จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

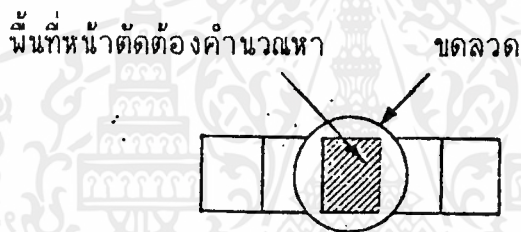
$n_2$  = จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ

### การออกแบบหม้อแปลง

1. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง จะหาขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ต้องรู้กำลังของหม้อแปลงว่าจะให้จ่ายได้เท่าใด กำลังของหม้อแปลงก็คือผลคูณของกระแสและแรงดันที่หม้อแปลงตัวนี้จะจ่ายได้ นั่นคือ เท่ากับ  $V \cdot A$  เมื่อ  $V$  คือแรงดันเอาต์พุตและ  $A$  คือกระแสเอาต์พุต

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} = \sqrt{V \cdot A}$$

5.58



รูปที่ 4.3 มองด้านบนของหม้อแปลง

2. หาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ เอาพื้นที่หน้าตัดที่ได้จากข้อ 1 มาคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิตามสูตร

$$N = \frac{E \cdot 10^4}{4 \cdot F \cdot B_m \cdot A}$$

$E$  คือ แรงดันปฐมภูมิ (220 โวลต์)

$F$  คือ ความถี่ของไฟกระแสสลับทางอินพุต (50 Hz)

$B_m$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ผ่านแกนที่แกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว (ใช้ 64500 เกลิน / ตารางนิ้ว)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนซึ่งหาได้จากข้อ 1 (ตารางนิ้ว)

### 3. หาจำนวนรอบทางทุติยภูมิ หาได้จากสูตร

$$E_1 = n_1$$

$$E_2 = n_2$$

โดย  $E_1$  = แรงดันขดปฐมภูมิ

$E_2$  = แรงดันขดทุติยภูมิ

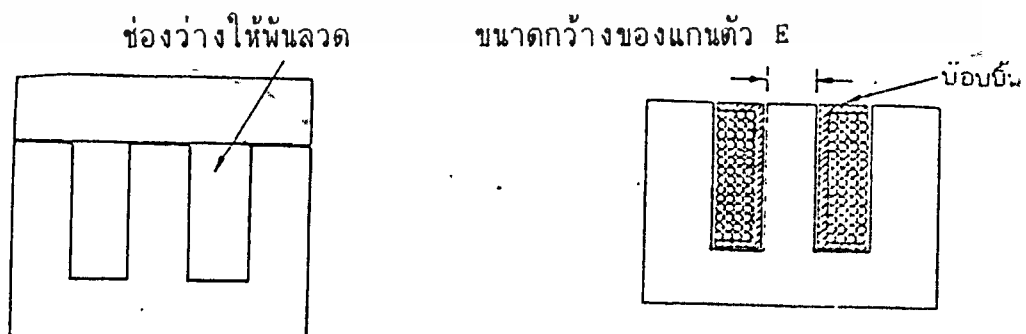
$n_1$  = จำนวนรอบขดปฐมภูมิ

$n_2$  = จำนวนรอบขดทุติยภูมิ

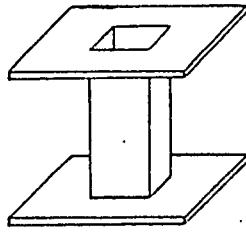
### 4. หาขนาดของลวดที่ใช้พัน

4.1 ข้อจำกัดทางด้านไฟฟ้า ข้อจำกัดทางด้านนี้คือ ลวดต้องไม่ร้อนเกินไปเมื่อจ่ายกระแสเต็มๆ ดังนั้นก็หมายความว่าต้องไม่ให้ลวดรับกระแสมากเกินไปเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของลวด ตัวเลขที่ใช้มากคือ 400 - 700 เซอร์ควิลามิล/แอมแปร์ ซึ่งถ้ากำหนดว่าจะใช้กระแสกี่แอมแปร์ ก็สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดได้ ตัวเลข 400 - 700 นี้แล้วแต่เราจะเลือกใช้ ถ้าเลือกตัวเลขน้อย เช่น 450 CM/AMP จะได้ลวดขนาดเล็กกว่า ซึ่งอาจมีผลเสียด้าน Regulation ได้ ถ้าเลือก 600 CM/AMP จะได้ลวดขนาดใหญ่ขึ้น แต่หม้อแปลงจะมี Regulation ดี แต่แพงกว่า ให้เลือกดูเอง

4.2 ข้อจำกัดทางด้านขนาด เนื่องจากลักษณะตัวแกนเหล็กเป็นรูปตัว E และมีช่องว่างเหลือไว้ ให้พันลวดตามรูป และมีผู้ผลิตขึ้นมาเป็นขนาดต่างๆ เนื่องจากเราไม่พันลวดลงบนแกนเลยโดยตรง แต่พันในบ็อบบิ้น แล้วจึงเอาบ็อบบิ้นมาสวมแกนตัว E ตามรูป

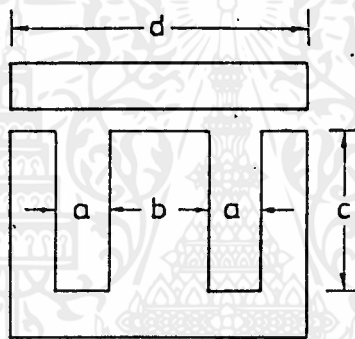


รูปที่ 4.4 การนำเอาบ็อบบิ้นมาสวมแกนตัว E



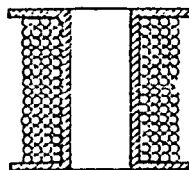
รูปที่ 4.5 ตัวบ็อบบี้

ทั้งบ็อบบี้ก็มีขายเป็นขนาดต่างๆ ดังนั้นต้องเลือกขนาดบ็อบบี้ให้สวมแกนเหล็กพอดี แล้วเรียงแผ่นเหล็กซ้อนกันให้ได้พื้นที่ที่เราคำนวณเอาไว้ รายละเอียดของตัว E และ I จะมีสัดส่วนดังนี้คือ



$$a : b : c : d = 1 : 2 : 3 : 6$$

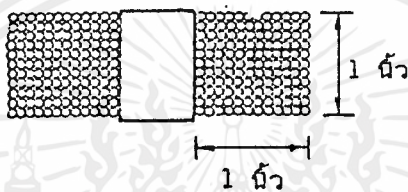
จากอัตราส่วนนี้ เราทราบระยะด้านใดด้านหนึ่ง ย่อมคำนวณหาความยาวของด้านที่เหลือได้หมด แกนตัว E ที่มีขายจะมีขนาดดังต่อไปนี้ (บอกขนาดของด้าน b เป็นมิลลิเมตร) คือ 10, 13, 16, 19, 20, 22, 25, 28, 32, 38, 45, 52, 63 เวลาพันลงในบ็อบบี้แล้วจะเป็นลักษณะดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ขนาดของขดลวด ต้องเลือกให้ขดลวดทั้งหมดพันลงในบ็อบบิ้นและสวมลงแกนได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่ามีพื้นที่หน้าตัดแกนอยู่เท่าใด

ตารางที่ 1 จะบอกว่าลวดทองแดงเบอร์ไหนเมื่อพันรอบบ็อบบิ้นแล้วได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวด 1 ตารางนิ้วต้องพันที่รอบ เช่น ลวดเบอร์ 23 SWG ถ้าพันรอบแกนบ็อบบิ้น 1340 รอบ พื้นที่หน้าตัดจะมีขนาด 1 ตารางนิ้ว ดังนั้นถ้าบ็อบบิ้นสูง 1 นิ้ว ขดลวดจะอ้วนหนาออกมา 1 นิ้วตามรูป



รูปที่ 4.7 แสดงพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ขนาดเบอร์ลวด SWG	จำนวนรอบ/พื้นที่หน้าตัด ขดลวด 1 ตารางนิ้ว	พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด 1 เส้น (เซอร์คิวลาร์มิล)
15	177	5178
16	221	4107
17	277	3257
18	437	2048
19	548	1524
21	852	1022
22	1065	810.1
23	1340	624.4
24	1665	509.5
25	2100	404
26	2630	320.4
27	3320	254.1
28	4145	201.5
30	5250	104.9
31	6510	126.7

## การพันขดลวด

### ขดลวดแกนสารแม่เหล็ก

แกนแม่เหล็กแต่ละชนิด จะมีความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ประจำตัวมันอยู่ ซึ่งค่านี้จะเป็นตัวที่ต้องนำมาพิจารณาในการพันขดลวด หรือหม้อแปลง โดยเฉพาะในย่านความถี่สูง

ก่อนที่จะพันหม้อแปลงหรือขดลวดแกนสารแม่เหล็กจะต้องพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ชนิดของแกน ขนาดของแกน จำนวนรอบ เป็นต้น

### ชนิดของแกน

การเลือกชนิดของแกนมีผลต่อค่า  $Q$  และแบนด์วิดของตัวหม้อแปลงและขดลวดด้วยแกนทอรอยด์เป็นแกนที่สามารถนำไปใช้ได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 Hz จนถึงย่าน UHF ปกติแล้วเราจะพบเห็นการนำแกนทอรอยด์มาใช้ในงานในหม้อแปลงธรรมดาทุกชิ้น ทั้งนี้เพราะแกนทอรอยด์ นั้นจะมีการป้องกันฟลักซ์รั่วได้ด้วยตนเอง (self-shielding) อีกทั้งขนาดเล็กกว่าการใช้หม้อแปลงขนาดปกติ และสามารถใช้งานในย่านความถี่สูง

### ขนาดของแกน

การเลือกขนาดของแกนจะมีผลต่อการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก โดยแกนขนาดใหญ่ จะอิ่มตัวช้ากว่าแกนขนาดเล็ก ในกรณีของกระแสไฟฟ้าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของแกนกำหนดโดยสมการ

$$B_{OP} (ac) = \frac{E_{rms} \cdot 10^8}{4.44 \cdot jN_p \cdot A_c} \quad (\text{เกาส์})$$

สูตรข้างบนนี้ใช้ในกรณีมีแต่ไฟฟ้ากระแสลับผ่านเท่านั้น ถ้ามีไฟกระแสตรงด้วย สูตรจะมีลักษณะดังนี้

$$B_{OP} (total) = \frac{E_{rms} \cdot 10^8 + N_p I_{dc} A_L}{4.44 \cdot jN_p \cdot A_c \cdot 10A}$$

โดย

- $A_L$  = พื้นที่หน้าตัดที่มีแรงแม่เหล็กไหลผ่าน (ตารางเซนติเมตร)
- $E_{rms}$  = แรงดันที่ป้อนให้ (โวลต์)
- $N_p$  = จำนวนรอบที่พันบนแกน (รอบ)
- $j$  = ความถี่ใช้งาน (Hz)
- $B_{max}$  = ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด (เกาส์)
- $I_{oc}$  = กระแสไฟตรงที่ไหลผ่านขดลวด
- $A_L$  = ค่าคงที่ของแกนแต่ละแบบ (กำหนดจากโรงงาน)

### ชนิดของหม้อแปลงแมตซิ่ง

ในงานทางด้านความถี่สูง หม้อแปลงแมตซิ่งที่ใช้มีอยู่หลายลักษณะตามการใช้งาน เช่น แบนด์กว้าง, แบนด์แคบ ฯลฯ ซึ่งหม้อแปลงแมตซิ่งนี้มีข้อกำหนดกว้างๆ อยู่คือ จะมีต้องมีค่ารีแอคแตนซ์ ของขดลวดมีค่าน้อยกว่า 4 เท่าของอิมพีแดนซ์ขดลวด เช่น หม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์ทางด้าน โพรมารี 300 โอห์ม ทางเซคันดารี 50 โอห์ม เพราะฉะนั้นค่ารีแอคแตนซ์ ( $X_L$ ) ควรมีค่าไม่เกิน 1200 โอห์ม และ 200 โอห์ม ตามลำดับ

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการพันหม้อแปลงแมตซิ่งคือ ค่าความซึมซาบของแกนจะเป็นตัวบอกถึงความกว้างของช่วงความถี่ใช้งานของหม้อแปลง และเมื่อความถี่ใช้งานสูง ผลต่าง ๆ ของแกนจะลดลง

หม้อแปลงสำหรับใช้งานทั่วไป เป็นการพันหม้อแปลงแมตซิ่งที่เหมือนกับการพันหม้อแปลงธรรมดาคือ ใช้ขดลวดอาบนํ้ายาพันบนแกน โดยแกนที่ใช้พันก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นหลัก

### จำนวนรอบ

ถ้ารู้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการและรู้ค่าคงที่  $A_L$  ของแกน ก็สามารถคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดได้จากสมการ

$$\text{จำนวนรอบ} = \frac{100\sqrt{L(\mu H)}}{A_L}$$

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดจะเปลี่ยนแปลงไป ตามความห่างของขดลวดบนแกน โดยถ้าขดลวดอยู่ห่างกัน ค่าความเหนี่ยวนำจะน้อย แต่ถ้าขดลวดอยู่ชิดกัน ค่าความเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์ สูตรการคำนวณคือ

$$\text{จำนวนรอบ} = \frac{1000\sqrt{L(\text{mH})}}{A_L}$$

และค่า  $Q$  ยังขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวดด้วย ถ้าขดลวดเล็กค่า  $Q$  ก็จะต่ำลงด้วย ดังนั้นเพื่อให้ค่า  $Q$  สูง จึงต้องเลือกลวดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไว้ก่อน

#### การพันขดลวด

ในการพันขดลวดบนแกนทอรอยด์ ถ้าจำนวนรอบน้อย ๆ ก็ยังไม่มีปัญหาอะไร แต่เมื่อจำนวนรอบสูง จะเกิดค่าความจุไฟฟ้าแฝงขึ้น โดยเกิดจากการที่ลวดมาอยู่ชิดกันมา ค่าความจุนี้จะทำให้วงจรทำงานผิดไป จึงต้องทำการกำจัดค่าความจุให้เหลือน้อยที่สุด วิธีหนึ่งคือ เว้นระยะระหว่างจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดในการพันลวด ให้ห่างกันประมาณ 30 องศา ตามรูปที่ 3 (จะทำให้ความจุแฝงนี้ลดลงได้ แต่การทำเช่นนั้น จะทำให้ขดลวดที่พัน ไม่กระจายอยู่รอบทุกพื้นที่ผิวของแกน ทำให้ต้องการเบียดขดลวดเข้าชิดกัน เมื่อขดลวดอยู่ชิดกันมากขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำจะมากขึ้นตามด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของค่าความเหนี่ยวนำ เราจะทำแก้ไขโดยการปรับแต่งวงจรในช่วงสุดท้าย

ในรูป 3 (ค) แสดงให้เห็นถึงการคับปลิงสัญญาณออกมาใช้งาน ในกรณีที่วงจรในภาคต่อไปมีอิมพีแดนซ์ต่ำจำนวนรอบของขดลวดคับปลิงก็ไม่จำเป็นต้องมีมากจากรูป 8 (ค) ได้แสดงการพันไว้ 4 รอบ แต่สำคัญคือ ทิศทางของการพันจะต้องพันตามทิศทาง การพันของขดลวดเดิม คือ รูป 3 (ข)

สำหรับการพันขดลวดเข้าไปในแกนทอรอยด์ แตกต่างจากการพันขดลวดแบบแกนชนิดอื่นตรงที่เราต้องรู้จำนวนรอบที่จะต้องพันก่อน แล้วจึงมาคำนวณหาความ

ยาวของขดลวดที่ต้องการใช้ จากนั้นจึงตัดขดลวดตามความยาวที่ต้องการแล้วพันไว้บนกระสวยตามรูปที่ 3 (ก) เวลาพันก็ใช้วิธีสอดกระสวยเข้าไปในแกนทอรอยด์ที่ละรอบจนกว่าจะครบตามจำนวนรอบที่ต้องการ (ซึ่งกระสวยต้องมีขนาดเล็กพอที่จะรอดผ่านรูขอบแกนทอรอยด์ได้ด้วย)

## การออกแบบ coil

หลักการทั่วไปในการออกแบบ Coil

Coil ที่จะนำไปใช้ในงานชุบผิวแข็งเหล็ก, การเชื่อมต่อ, การขึ้นรูปโลหะ มักจะพันจำนวนรอบน้อย ๆ รูปร่างลักษณะการพันขึ้นอยู่กับชิ้นงาน และพื้นที่ในการให้ความร้อน

การคำนวณ Coil จะต้องใช้ค่าโวลเตจที่เหมาะสม เช่น อาจใช้ 460 volts สำหรับเครื่องให้ความร้อนที่ใช้การปรับความถี่หรือ 400 หรือ 800 โวลต์ ในการให้ความร้อนใน motor และ generator การพัน Coil ต้องให้จำนวนรอบการพันกับ แหล่งจ่ายไฟสัมพันธ์กัน

เริ่มแรกเราต้องพิจารณาความถี่และจำนวนพาวเวอร์ ที่ต้องการทั้งหมดใน ขบวนการ และอัตราการผลิต, ขนาดของชิ้นงาน, ส่วนประกอบของโลหะ และอุณหภูมิที่จะเพิ่มขึ้นในระหว่างขบวนการ

โดยจำนวนรอบของคอล์ย จะมีผลกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและความลึกของการแล ที่จะเกิดขึ้นในชิ้นงาน กำลังที่สูญเสียจากชิ้นงานจะอยู่ในรูปการแผ่กระจายความร้อน, การนำความร้อน, และการพาความร้อน

สำหรับเครื่องชุบผิวเหล็ก เมื่อเรารู้กำลังที่จะให้กับชิ้นงาน พื้นที่ในการให้ความร้อน และความหนาแน่นของพลังงานบริเวณผิวของชิ้นงาน เราก็สามารถออกแบบ คอล์ยโดยใช้สูตร

$$P_{\text{ew}} = \frac{I_w^2 N_w^2 P_w * 10^{-9}}{d_w l_w}$$

เมื่อ  $P_{\text{ew}}$  = ความหนาแน่นของพลังงานบริเวณผิวของชิ้นงาน KW/cm<sup>2</sup>

- $I_c$  = กระแสที่ไหลใน Coil ( $A_{rms}$ )
- $N_c$  = จำนวนรอบของ Coil
- $l_w$  = ความยาวของชิ้นงานที่ให้ความร้อน (cm)
- $\rho_w$  = ความต้านทานเฉลี่ยของชิ้นงาน (microhm-cm)
- $\sigma_w$  = ความลึกของกระแสในชิ้นงาน
- $l_c$  = ความยาว Coil (cm) สมมติให้มีค่า =  $l_w$

ค่าความต้านทานของชิ้นงาน และความลึกของกระแส เราหาจาก คุณสมบัติทางกายภาพและขึ้นกับทางเลือกความถี่ ตัวแปรที่สำคัญจะเป็นพวก กระแสภายใน Coil จำนวนรอบการพัน Coil และ ความยาวของ Coil

คุณสมบัติที่จะนำไปประยุกต์ในการออกแบบ

หลักการสำคัญในการเลือก Coil เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามความเหมาะสมของงาน มีวิธีเลือกต่อไปนี้

1. ดูคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- ส่วนผสมของโลหะและลำดับก่อนหลังของการผสมส่วนประกอบต่าง ๆ
- อัตราการผลิต lb/ซ.ม หรือ นิ้ว/ซ.ม
- น้ำหนักของชิ้นงานที่จะให้ความร้อน M, lb
- ขอบเขตความลึกผิวที่ต้องการ  $d_w$ , นิ้ว
- ขนาดของชิ้นงาน
  - 1. ขนาดภายนอก  $d_w$ , นิ้ว
  - 2. ขนาดความยาวของชิ้นงานที่จะให้ความร้อน  $l_w$ , นิ้ว
- พื้นที่ที่จะทำการทำผิวแข็งเหล็ก  $A_w$ , นิ้ว

2. เลือกแหล่งจ่ายไฟที่ให้ความถี่เหมาะสม

ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรสำคัญ ต่อการกำหนดความลึกผิวของชิ้นงาน ในการทำผิวแข็งเหล็ก, รูปร่างของชิ้นงานอัตราการผลิตโดยทั่วไปเราจะใช้ความถี่

ความถี่ / ความลึกผิว
3,000 cps / 0.100 - 0.250 นิ้ว
9,600 cps / 0.080 - 0.120 นิ้ว
450 KC / 0.030 - 1.090 นิ้ว

### 3. เลือกวิธีการชุบผิวแข็งเหล็ก

ชิ้นงานชิ้นเล็ก ๆ จะใช้วิธี Single - shot และออกแบบ Coil ที่สามารถให้ความร้อน ได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานขนาดใหญ่ ดังนี้

เช่นพวก เฟลา, แกนเฟลา, หมุด เป็นต้น ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางและพื้นที่ผิวคงที่ ใช้การสแกนผ่าน Coil สำหรับเกียร์จะใช้วิธี หมุนเข้าไปข้างใน Coil

### 4. หาพื้นที่ในการให้ความร้อนและการชุบผิวแข็งเหล็ก ( $A_w/in^2$ )

5. ประมาณค่าของ Power Density ( $P_w/in^2$  และเวลาที่ต้องการ t (วินาที)

### 6. เลือกขนาดของ Coil

เรามักจะนับจำนวนรอบของ Coil ให้น้อยที่สุดและพื้นที่ของ Coil ใกล้เคียงกับชิ้นงานมากที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของตำแหน่ง และเงื่อนไขต่าง ๆ

ทั้ง 5 ขั้นตอนข้างต้น มีข้อมูลดังนี้

ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ f, Cps

วิธีการชุบผิวแข็งเหล็ก

พื้นที่ในการให้ความร้อนและการชุบผิวแข็งเหล็ก  $P_w$

ค่า Power density  $P_w/in^2$

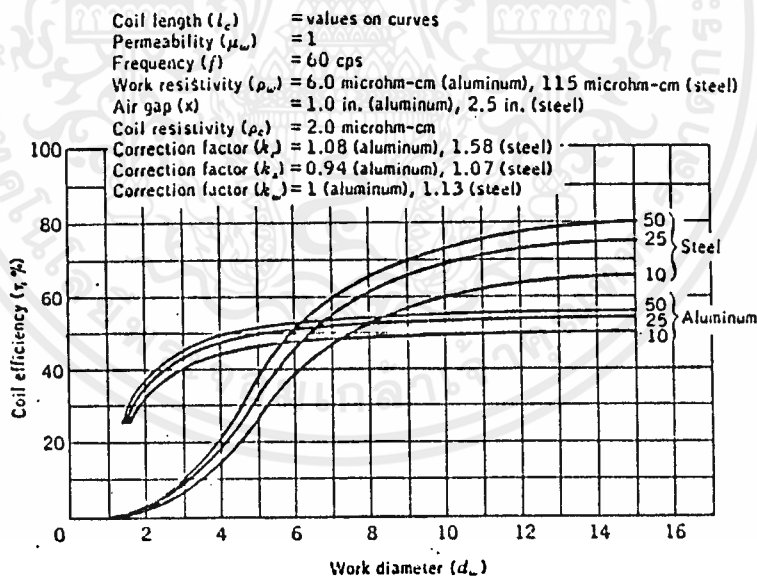
กำลังของงาน  $P_w, K_w$   
 เวลาในการให้ความร้อน  $t$  (วินาที)  
 ขนาดของ Coil

Approximate Coil-Design Method

วิธีการออกแบบ Coil เกราะ ๆ (โดยประมาณ)

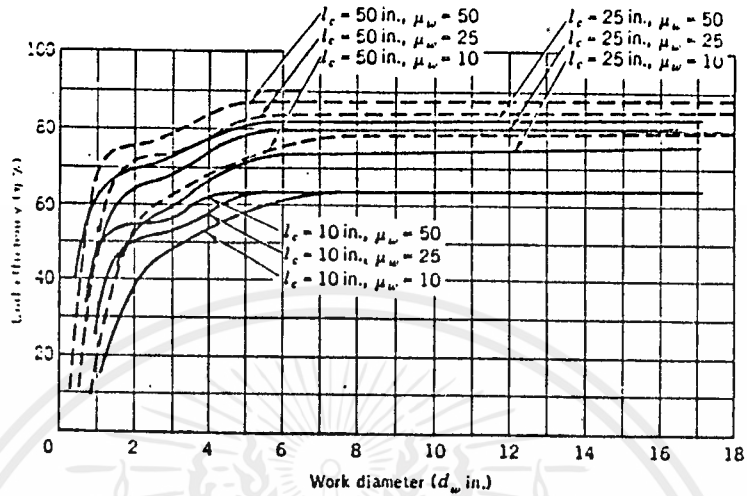
วิธีนี้เป็นวิธีที่เร็ว และมีความถูกต้องพอสมควรในการออกแบบ Coil ซึ่งมีตัวแปรหลัก ๆ ดังนี้ กำลังจากแหล่งจ่าย, แรงดัน, กระแส และจำนวนรอบการพัน Coil และสามารถหาค่า power factor, ประสิทธิภาพ, และ copper loss ของ Coil ได้ด้วย

กราฟแสดง ประสิทธิภาพของ Coil และขนาดของขดขดงาน



รูป 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Coil Efficiency และค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของ Coil ของ Aluminum (70 ถึง 1000 F) และ Steel (1400 ถึง 2300 F)

Coil length ( $l_c$ ) = values on curves  
 Permeability ( $\mu_w$ ) = values on curves  
 Frequency ( $f$ ) = 60 cps  
 Work resistivity ( $\rho_w$ ) = 54 microhm-cm  
 Air gap ( $x$ ) = 1.5 in.  
 Coil resistivity ( $\rho_c$ ) = 2.0 microhm-cm  
 Correction factor ( $k_1$ ) = 2.37  
 Correction factor ( $k_2$ ) = 0.87 ( $d_w < 3$  in.), 0.94 ( $d_w > 3$  in.)  
 Correction factor ( $k_3$ ) = 0.54 ( $d_w < 3$  in.), 0.81 ( $d_w > 3$  in.)



รูป 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Coil Efficiency และ  
 ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของ Steel (70 ถึง 1400 F)

ประสิทธิภาพของ Coil หาได้ดังนี้

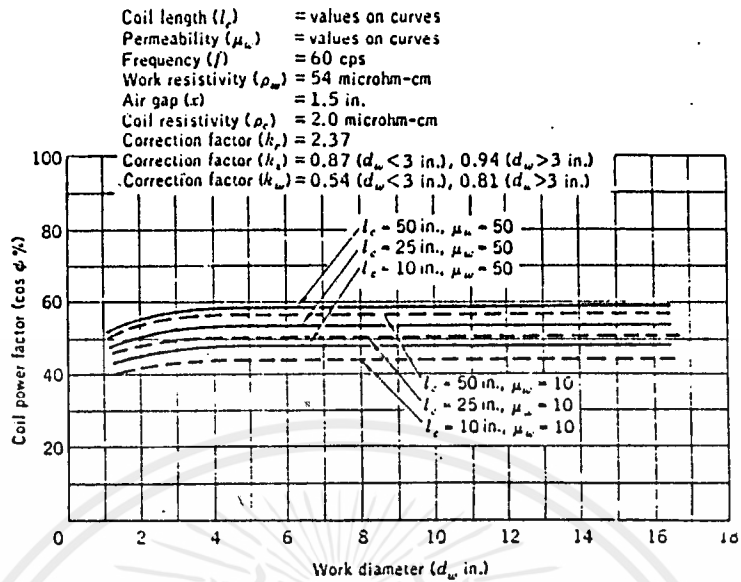
$$N = \frac{P_w}{P_o} * 10^2 \%$$

$N$  = ประสิทธิภาพของ Coil %

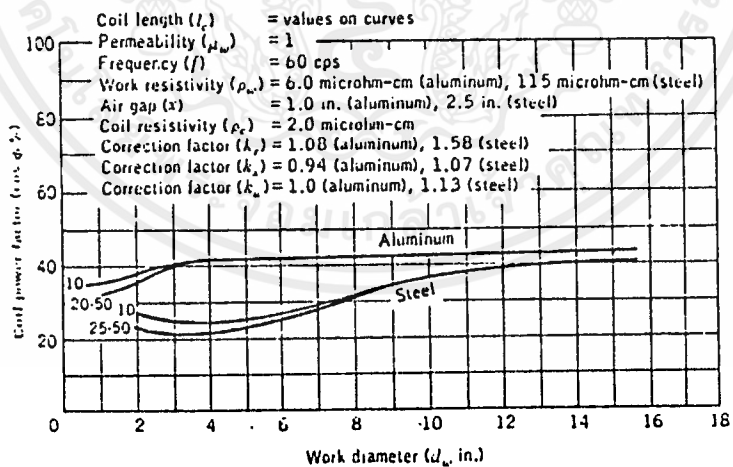
$P_w$  = กำลังทั้งหมดที่ให้กับชิ้นงาน รวมถึง radiation loss ( $K_w$ )

$P_o$  = กำลังทั้งหมดที่เกิดขึ้นใน Coil รวมถึง การสูญเสียต่าง ๆ ( $K_w$ )

กราฟแสดงค่า power factor ของ Coil กับขนาดของชิ้นงานสำหรับ  
 Aluminum และ steel



รูป 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Factor ของ Coil กับเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงานของ Aluminum และ steel



รูป 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Factor ของ Coil กับเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานสำหรับ Steel (70 ถึง 1400 F)

ค่า power factor หาได้ดังนี้

$$\cos \phi = \frac{P_o * 10^{12}}{KVA_o} = \frac{P_o * 10^5}{E_c I_c} \%$$

$KVA_o$  = Kilovolt-amperes ของ Coil

$E_c$  = โวลเตจของ Coil (V)

$I_c$  = กระแสของ Coil (A)

และค่าอิมพีแดนซ์ต่อกำลังสองของจำนวนรอบการพัน coil

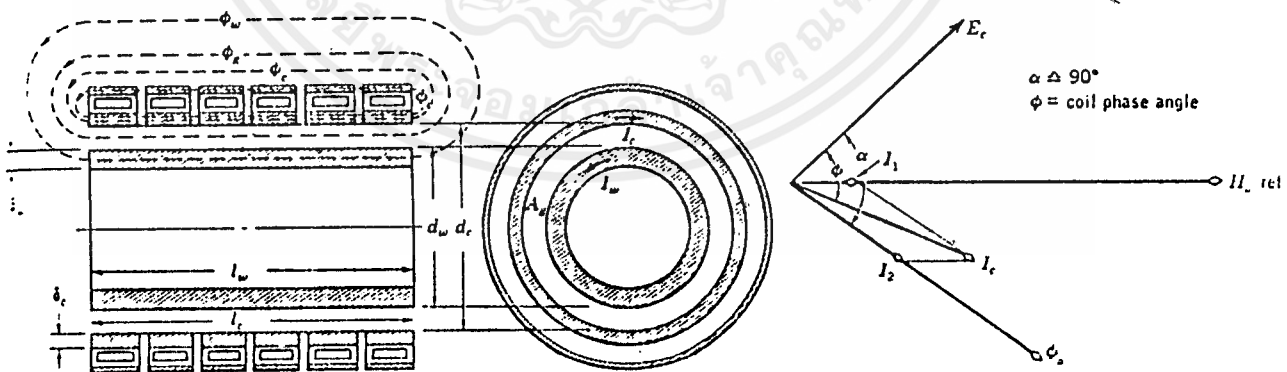
$$\frac{Z^1}{N_c^2} = \frac{KAV_c * 10^3}{(I_c N_c)^2} = \frac{E_c * 10^{-3}}{N_c KVA_c}$$

### EQUIVALENT CIRCUIT COIL-DESIGN METHOD

วิธีการออกแบบ coil

Coil จะถูกออกแบบโดยเราต้องรู้ค่า resistances และ reactance ก่อน ปกติคอยล์จะพันแบบ Single-layer และอาจใช้ น้ำในการระบายความร้อน นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียความร้อนก่อนที่จะมาถึงชิ้นงาน

ถ้าให้  $H_{RM}$  เป็น magnetic field strength บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานที่จะทำให้เกิดความร้อน



รูป 4.1 แสดงเส้นทางเดินของ Flux และ เวกเตอร์โตะแกรมของ Solenoid Coil

- จากรูป เราให้
1.  $\phi_w$  = ฟลักซ์ที่ขึ้นงาน
  2.  $\phi_g$  = ฟลักซ์ในอากาศ
  3.  $\phi_c$  = ฟลักซ์ที่ผ่านผิวหน้าของคอล์ย

กำลังที่เกิดกับขึ้นงาน

$$= P_w = \mu r j H_{RM}^2 (l_w A_w) P$$

ฟลักซ์รวมที่เกิดขึ้นในขึ้นงาน

$$\phi_{wm} = \mu H_{RM} A_g$$

ฟลักซ์ที่เกิดในอากาศ  $\phi_g$  มีจำนวนมาก

$$\phi_{gm} = \mu_0 H_{RM} A_g$$

ฟลักซ์ที่เกิดในคอล์ย  $\phi_c$  บริเวณผิวของคอล์ยจะเกิดปรากฏการณ์ skin effect ทำให้มีกระแสไหลบริเวณผิวหน้าของทองแดง

$$\phi = \frac{\mu_0 H_{om}}{\sqrt{2\alpha}} \frac{1-j}{\sqrt{2}} = \frac{\mu_0 H_{om} c (1-j)}{2}$$

$$\phi_{cm} = \frac{K_r \mu_{oc} (r_{dc}) H_{om} (1-j)}{2}$$

### การขุดผิวแข็งเหล็ก

การผลิตเครื่องขุดผิวแข็งเหล็ก เป็นที่นิยม และมีประโยชน์อย่างแพร่หลาย เหตุผลหนึ่ง เนื่องจากข้อดีต่าง ๆ ในการกำหนดตำแหน่งความลึกของการทำผิวแข็งเหล็กและอัตราการเร็วในการให้ความร้อนเพียงพอที่จะป้องกัน การนำความร้อนออกจากพื้นที่ปฏิบัติการ

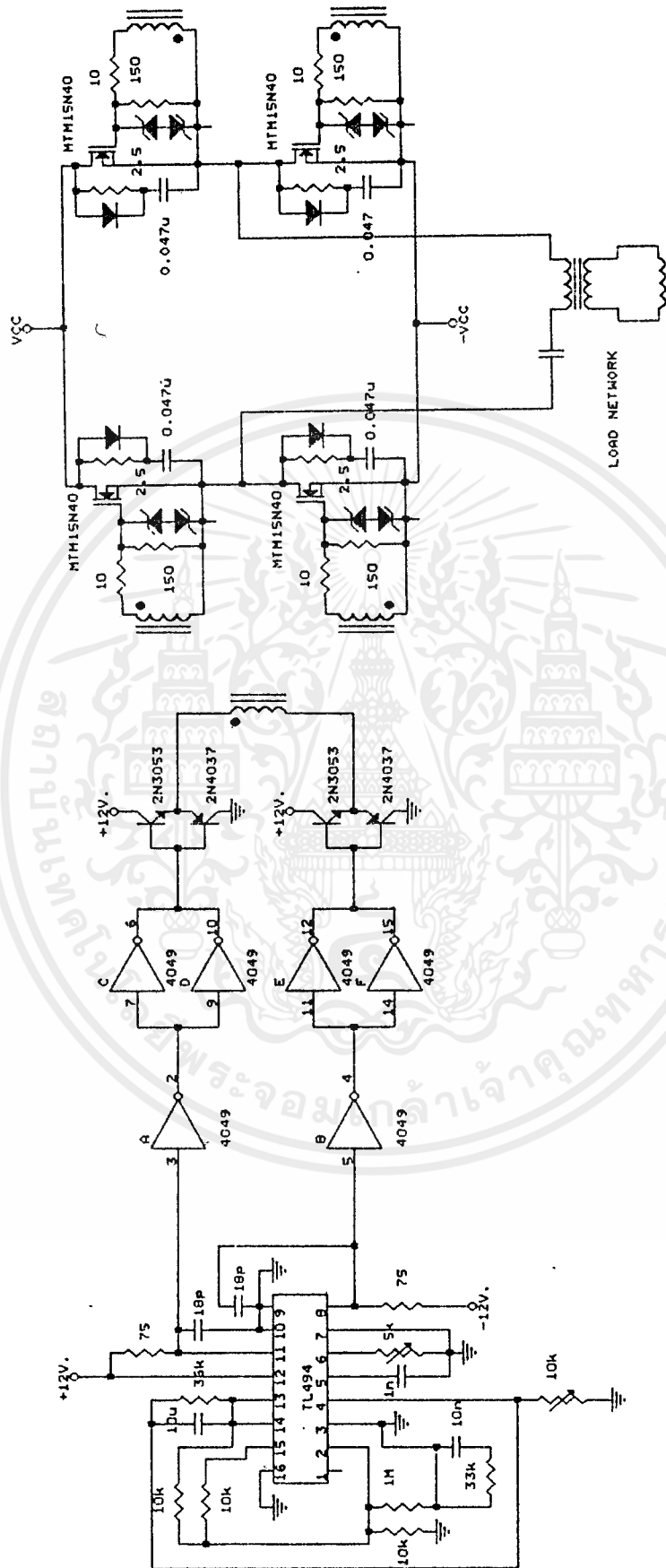
แสดงความสัมพันธ์ของความลึก ในการขุดผิวแข็งเหล็ก และตัวแปร

ต่างๆ เช่นเวลาในการให้ความร้อน ๆ ความถี่ เป็นต้น ใช้อุณหภูมิช่วง 1550 และ 1650 องศา F ได้ความลิกผิวประมาณ 0.01 และ 0.20 นิ้ว

เราสามารถสรุปได้ว่า

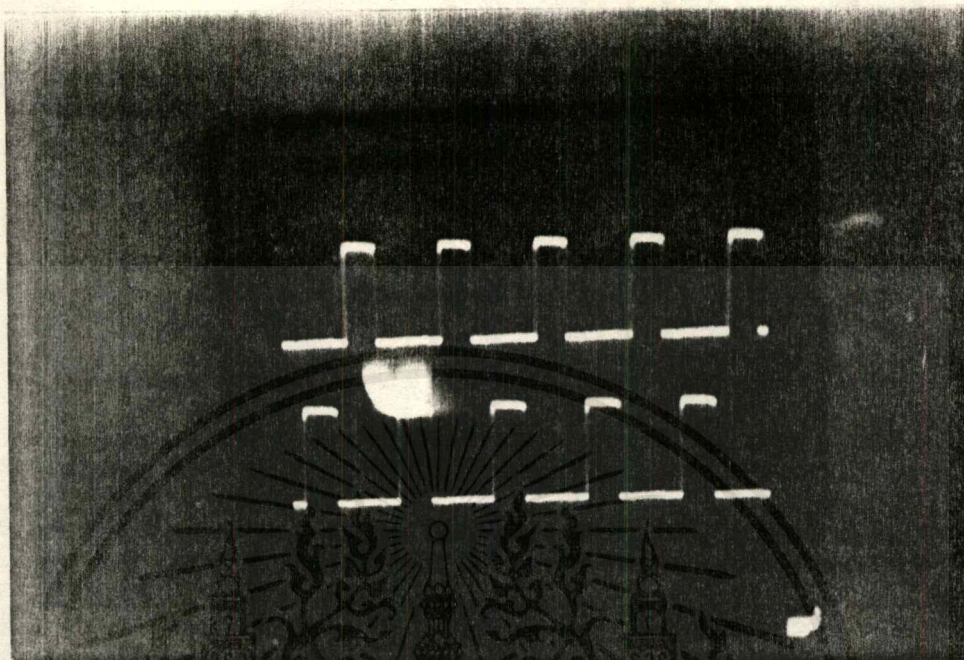
1. ถ้าต้องการให้ความลิกผิวน้อยลง ต้องให้ความถี่สูงขึ้น
2. ให้ความถี่เหมาะสมจะได้ความลิกผิวน้อย, ใช้เวลาในกระบวนการน้อย และความหนาแน่นพลังงานสูง



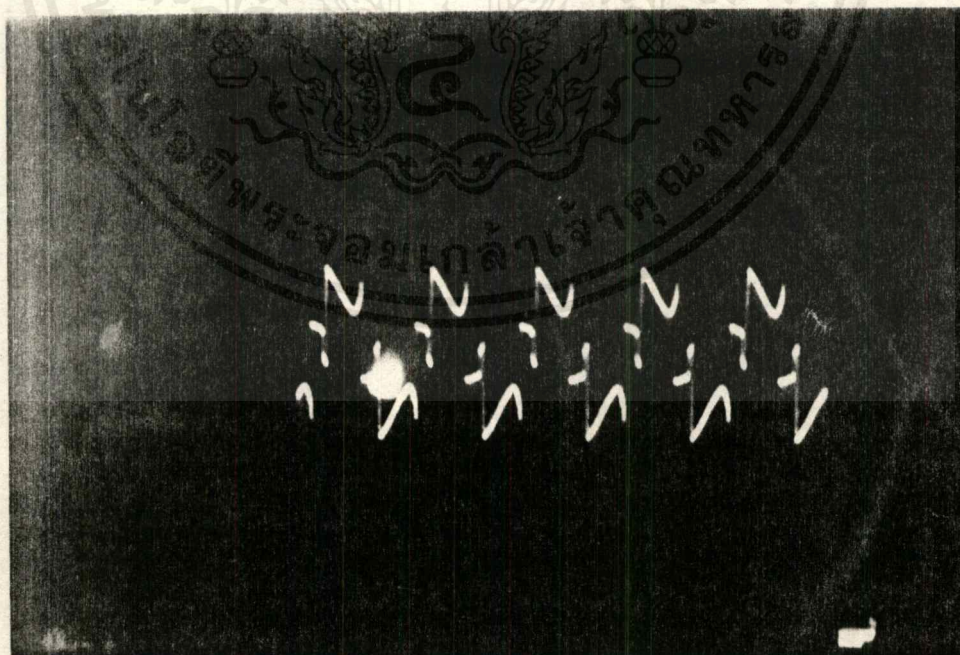


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ผลการทดลอง

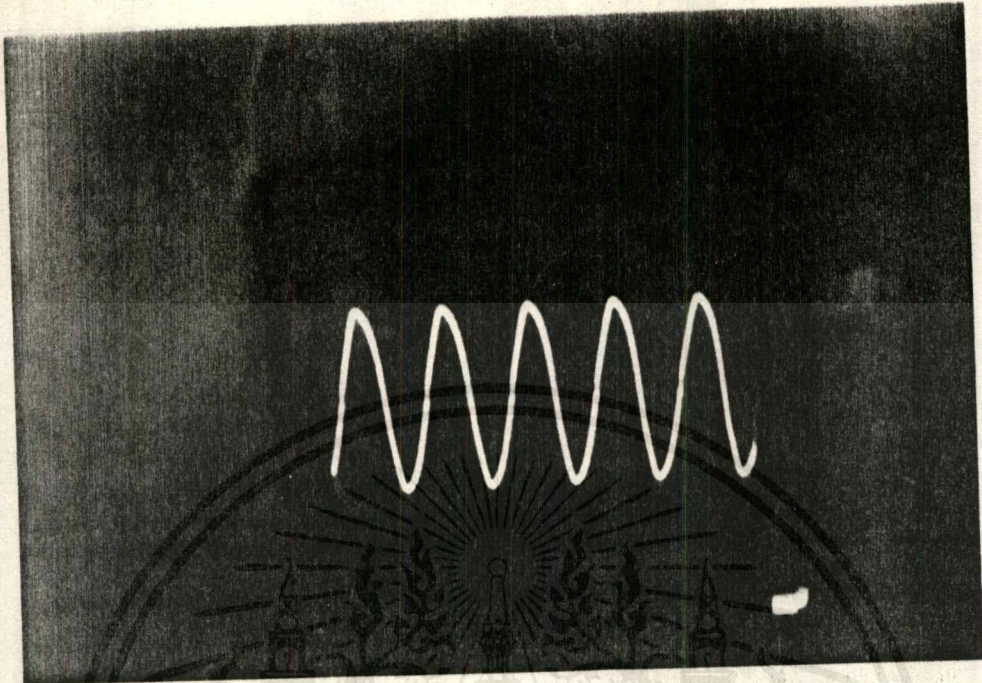


รูปที่ 1 สัญญาณขา 8,11 ของ TL 494 (5V/div)

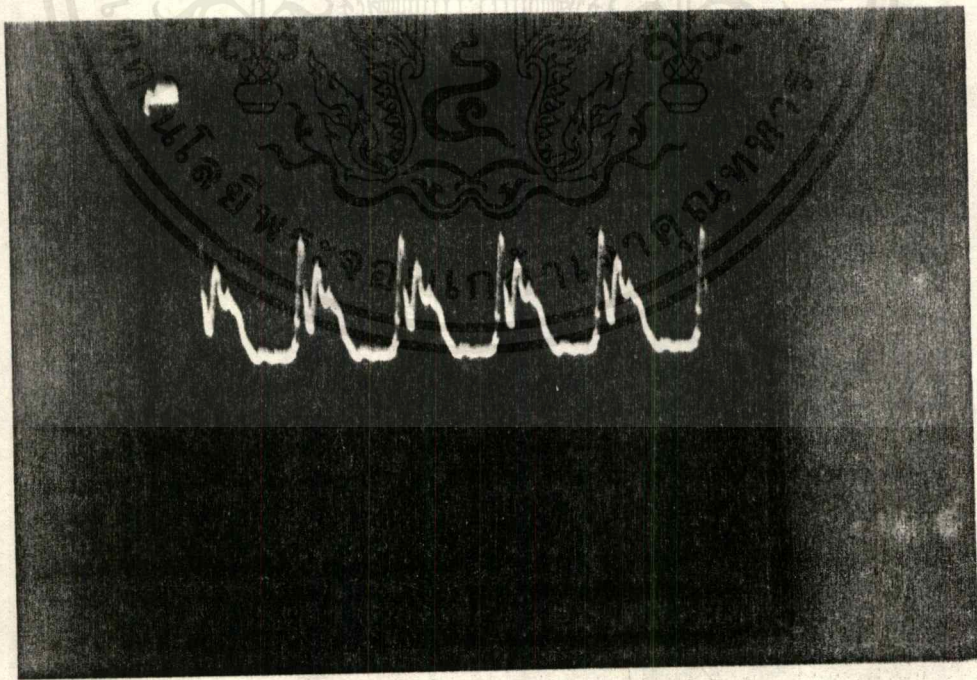


รูปที่ 2 สัญญาณของส่วน Isolate (5V/div)

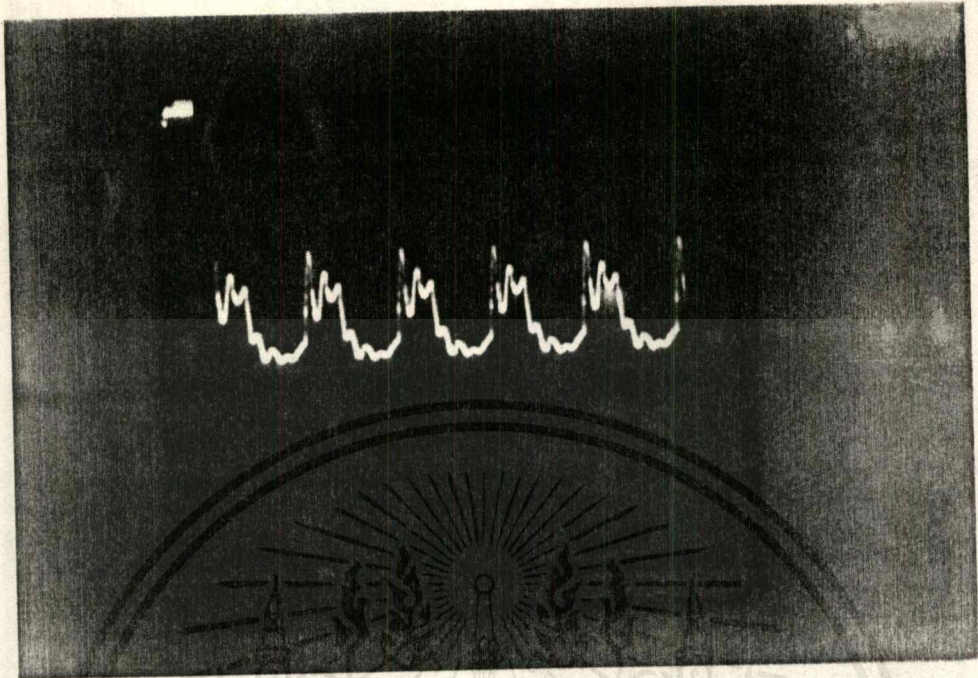
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



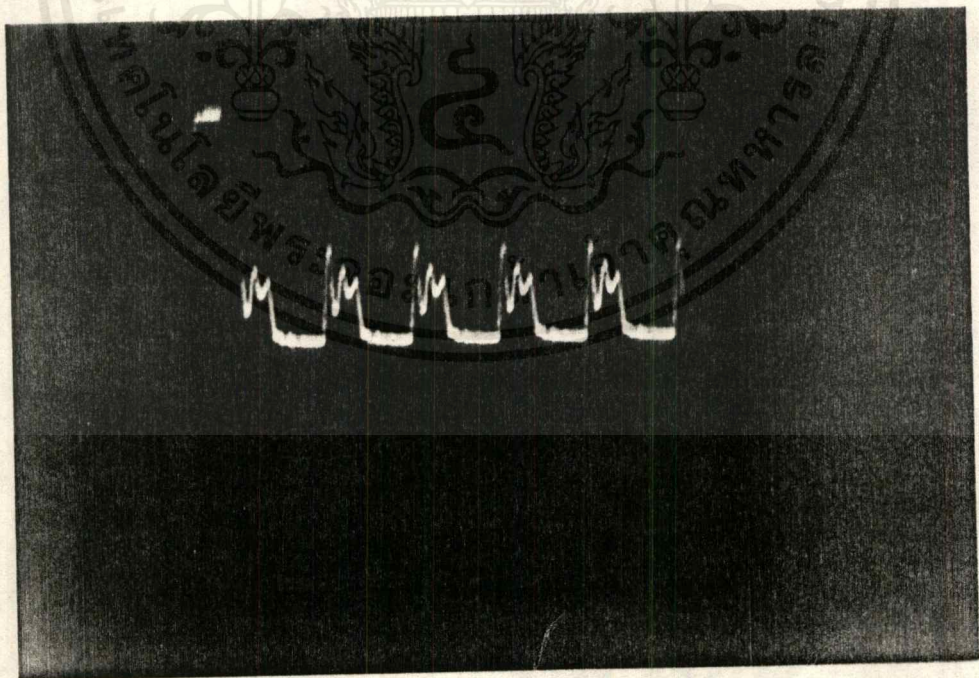
รูปที่ 3 สัญญาณคร่อมขา G กับ S ของ MOSFET ตัวที่ 1, 2, 3, 4



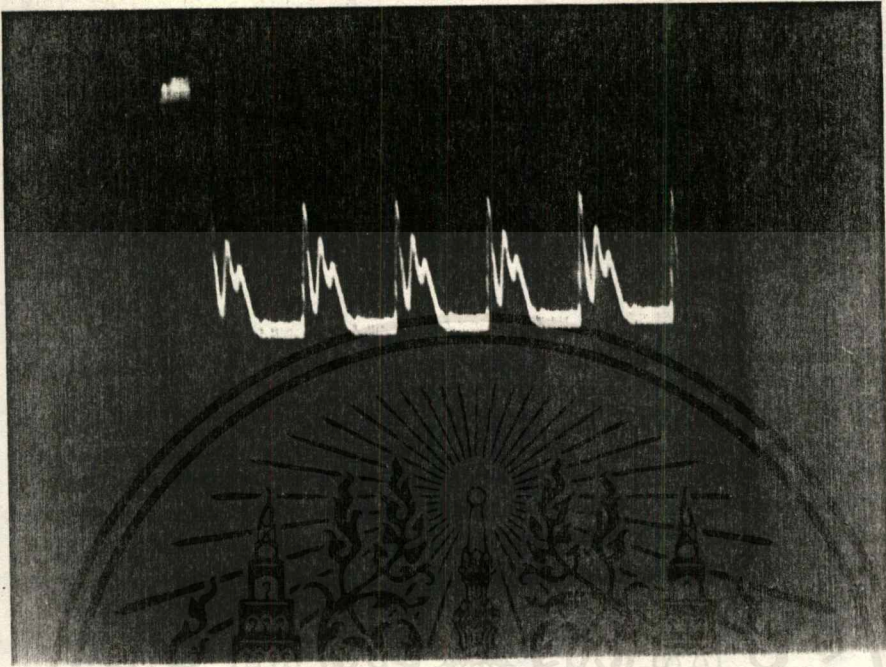
รูปที่ 4 สัญญาณคร่อมขา D กับ S ของ MOSFET ตัวที่ 1



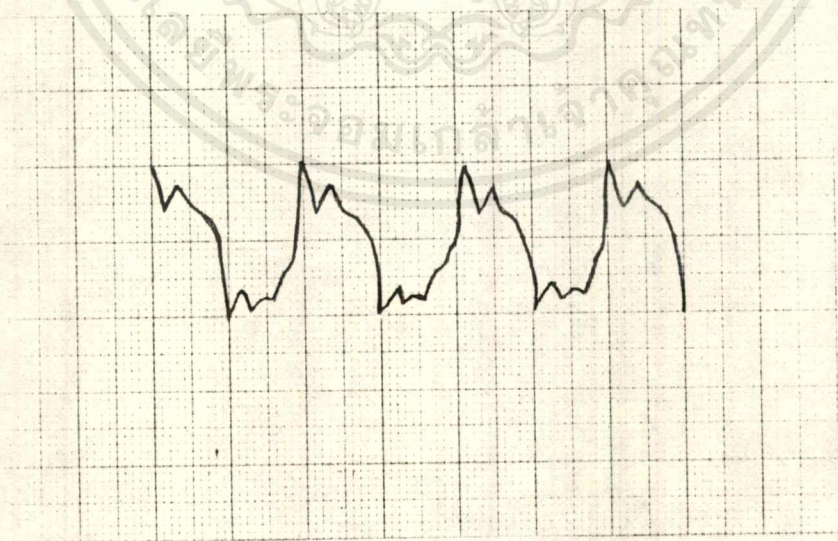
รูปที่ 5 ลักษณะคร่อมขา D กับ S ของ MOSFET ตัวที่ 2



รูปที่ 6 ลักษณะคร่อมขา D กับ S ของ MOSFET ตัวที่ 3



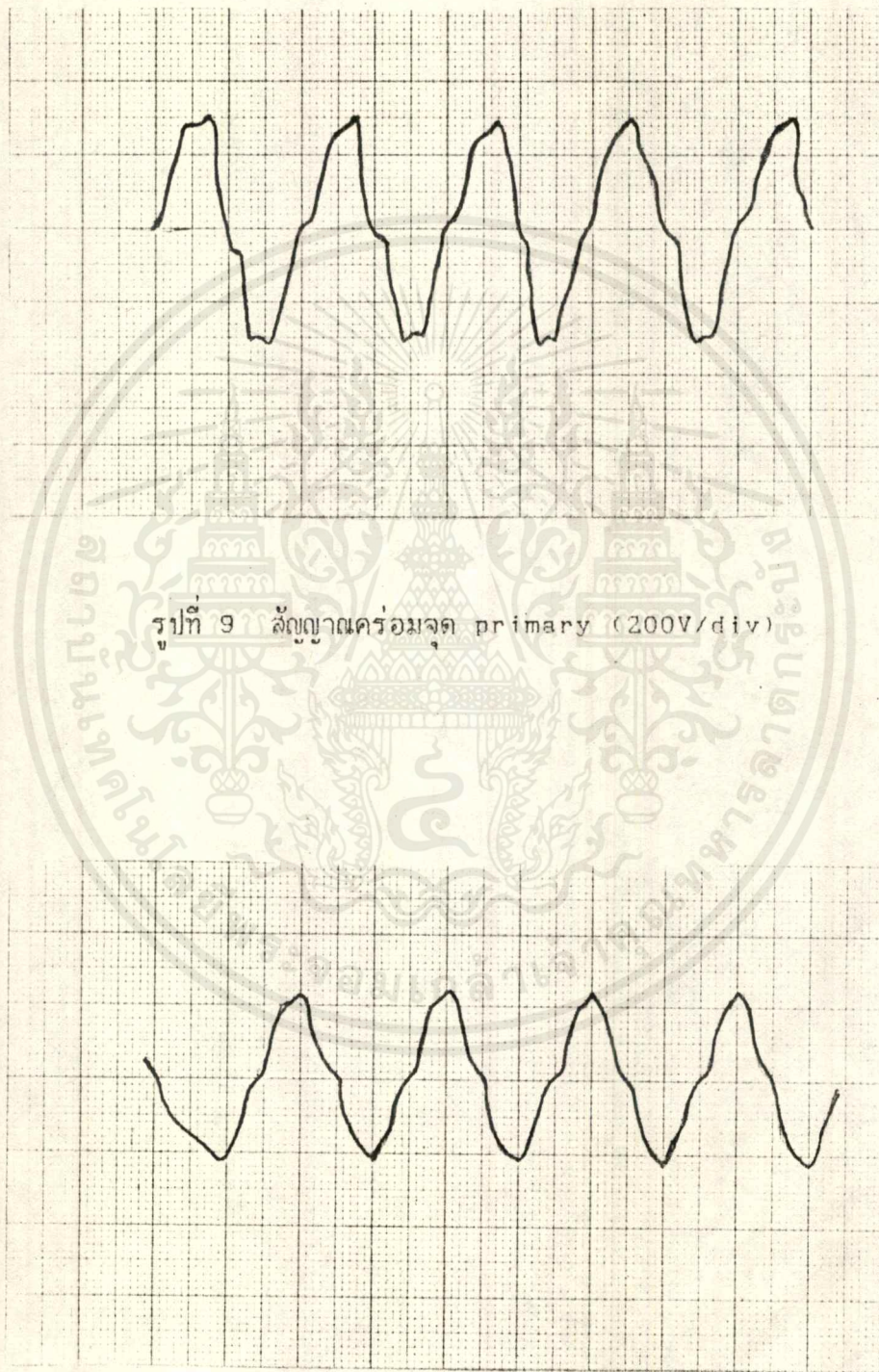
รูปที่ 7 สัญญาณคร่อมขา D กับ S ของ MOSFET ตัวที่ 4



รูปที่ 8 สัญญาณคร่อมจุด x,y (100V/div).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

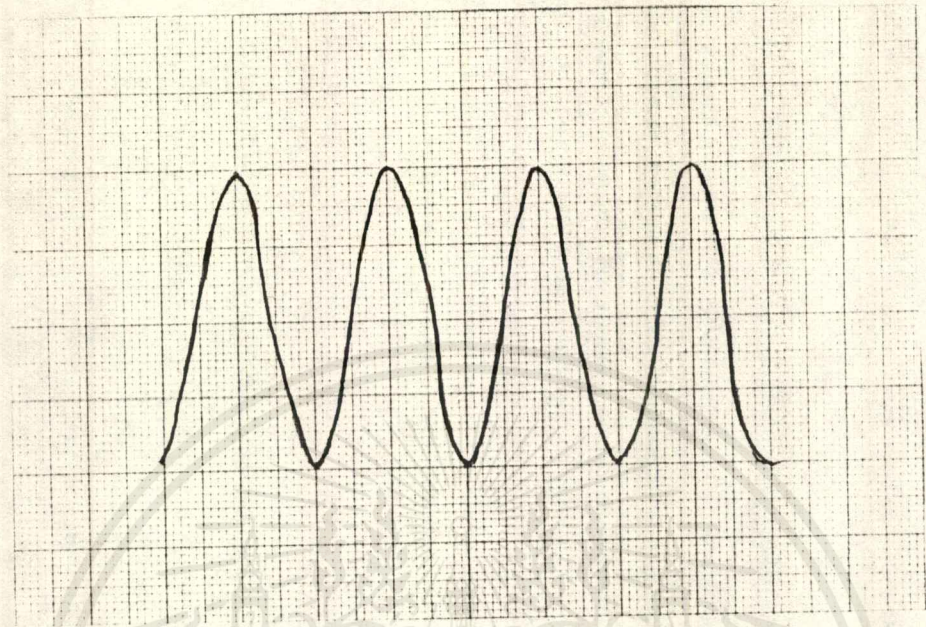
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



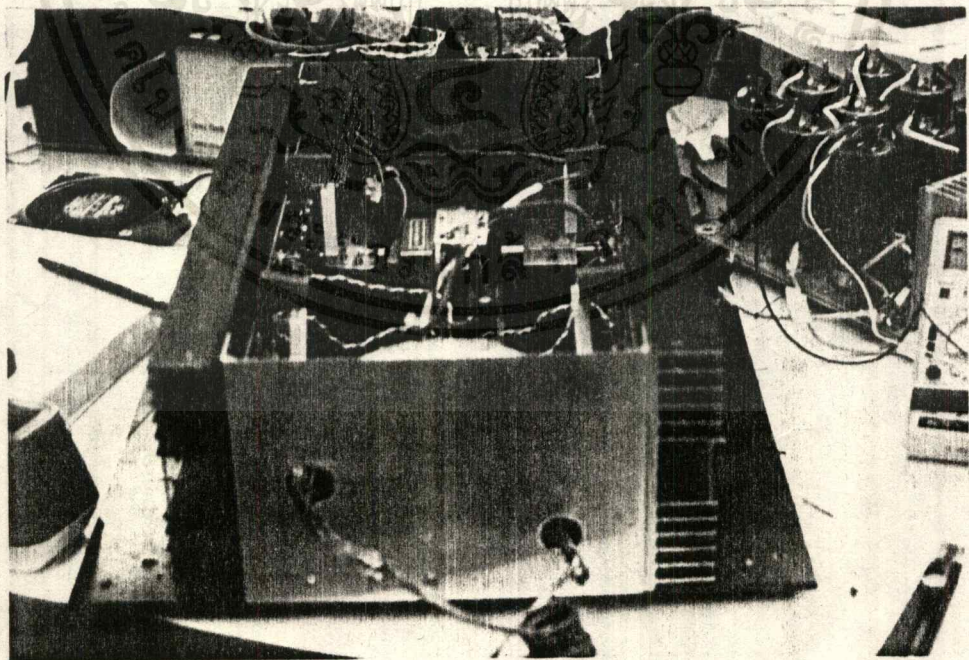
รูปที่ 9 สัญญาณแคว่อมจุด primary (200V/div)

รูปที่ 10 สัญญาณแคว่อมจุด secondary (20V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ55เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 สัญญาณแคว่อม C (200V/div)



รูปที่ 12 โครงสร้างเครื่องขบผิวแข็งเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทสรุป

เครื่องชัฟฟ์แข็งเหล็ก โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ทำงานโดยใช้หลักการ คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กกับเวลาจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำคักตาไฟฟ้าและเกิดกระแสไหลขึ้นในเนื้อเหล็ก ซึ่งจะทำให้เหล็กร้อน การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กหรือเรียกว่าความถี่ของสนามแม่เหล็ก จะมีผลต่อความลึกของสนามแม่เหล็กที่ลงไปเนื้อเหล็ก โดยความถี่ยิ่งสูงขึ้น สนามแม่เหล็กก็จะลงไปเนื้อเหล็กได้น้อยลง ดังนั้น การกำหนดความถี่ของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจึงมีความสำคัญ เพื่อให้ได้ความลึกของผิวตามความต้องการ เช่น ถ้าใช้ในงานทำผิวแข็งเหล็ก ก็ต้องปรับความถี่ให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องการทำให้เหล็กร้อนก่อนอัดขึ้นรูปก็ไม่ต้องปรับความถี่ให้สูงมาก เพราะต้องการให้ร้อนทั่วทั้งชิ้นเหล็ก

การเลือกความถี่ให้เหมาะสมเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะจะมีความสัมพันธ์กับความลึกจากผิวในการชัฟฟ์แข็งเหล็ก ถ้าต้องการความลึกผิวมาก แต่ใช้เครื่องความถี่สูงมาก จะมีผลทำให้ผิวงานนั้นเสียได้ เนื่องจากพลังงานความร้อนเข้าไปบริเวณผิวบางมาก และต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนเคลื่อนตัวลงลึกจากผิว ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวสูงเกิน เป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเสีย แต่ถ้าความถี่สูงไปไม่เพียงพอ ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กเข้าไปลึกเกินความต้องการ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำผิวแข็งให้บางตามต้องการได้ และถึงแม้จะเลือกความถี่ได้เหมาะสมแล้ว แต่มีจุดที่ทำให้ความลึกของผิวผิดพลาด เนื่องจากกำลังของเครื่อง โดยถ้าเครื่องมีกำลังไม่พอ ก็จะต้องใช้เวลาในการที่จะให้เหล็กมีอุณหภูมิถึงระดับที่ต้องการซึ่งจะทำให้ให้อุณหภูมิภายในชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ผิว เป็นสาเหตุให้ความลึกของผิวแข็งมากกว่าความต้องการ ถ้าลดเวลาลง อุณหภูมิของเหล็ก ก็จะไม่ถึงระดับจะทำให้ความลึกผิวต่ำกว่าจุดที่ต้องการ

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ เมื่อใช้ Power MOSFET มาทำงานสวิตซ์ซึ่งจำเป็นต้องมีสแน็บเบอร์ เพื่อทำหน้าที่ในการป้องกัน ในขณะที่หยุดนำกระแส ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำคักตาไฟฟ้าจากขดลวดของหม้อแปลง จ่ายพลังงานความถี่สูงออกมาใน

ลักษณะของสไปด์ ดังนั้นไม่เพียงแต่เลือก PowerMOSFET ที่ทนเค้นค่าไฟฟ้าได้สูง  
แล้วยังต้องมีตัวเก็บพลังงานของสไปด์ ซึ่งในการออกแบบ เราใช้สับเบอร์ดเป็นตัวรับ  
พลังงานของสไปด์ จะมีผลเป็นตัวควบคุมไม่ให้คิกดาคร่อม Power MOSFET มากเกิน  
ไป แต่ขอเสียในการใช้สับเบอร์ด จะทำให้มีการสูญเสียทางด้านพลังงาน โดยเมื่อ  
Power MOSFET ทำให้ Power MOSFET ต้องรับกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นการออก  
แบบสับเบอร์ดที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการใช้ MOSFET เป็นตัว  
สวิตซ์

จากการที่ใช้ MOSFET เป็นตัวสวิตซ์ ตัวจ่ายกระแสตรงก็จะจ่ายกระแสออก  
มาเป็นช่วงจังหวะเหมือนกัน ข้อสำคัญ คือตัวจ่ายไฟกระแสตรงจะต้องสามารถตอบสนอง  
สนองกับความถี่ของการสวิตซ์และเมื่อ MOSFET หยุดนำกระแสจะมีการคือพลังงาน  
งานกลับสู่ตัวจ่ายไฟกระแสตรง ตัวจ่ายไฟกระแสตรงจะต้องสามารถรับพลังงานนี้ไว้  
ได้ เพราะถ้ารับไม่ได้ ผลที่ออกมา ก็จะเกิดสัญญาณรบกวนรวมทั้งเกิดสไปด์ ซึ่งจะเป็น  
อันตรายต่อเครื่อง ดังนั้นการออกแบบวงจรของสัญญาณของตัวจ่ายไฟกระแสตรงจึง  
มีความสำคัญมาก

นอกจากนี้แล้วการเลือกชนิดของแกนหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงก็มีความสำคัญ  
ในที่นี้เราใช้แกนเฟอร์ไรท์ เพราะเป็นแกนที่เหมาะสมกับการใช้งานความถี่สูง แต่ก็ยังมี  
ปัญหาด้านความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์ ซึ่งทำให้แกนร้อนวิธีกักไขถ้าจำเป็นต้องใช้  
แกนเฟอร์ไรท์ จะทำได้โดยการลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กลง มีผล  
ให้ความสูญเสียในแกนลดลง และอีกข้อหนึ่งคือทางด้านความร้อนที่เกิดขึ้นทาง  
ด้านเขตลวดทุติยภูมิ เพราะต่ออยู่กับขดลวดจ่ายพลังงานกระแสจะไหลสูงมาก อาจ  
จะต้องมีการระบายความร้อน โดยใช้น้ำระบายความร้อน โดยการต่อเชื่อมท่อทอง  
แดงติดกับลวดตัวนำที่เป็นขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้ น้ำไหลเข้าไประบายความ  
ร้อนออก

จากการสร้างต้นแบบของเครื่องเห็นย่นำสนามแม่เหล็ก ทำให้ทราบถึงปัญหา  
ต่าง ๆ ของการออกแบบเครื่อง เพราะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการหาวัสดุที่มีใน  
ท้องตลาดบ้านเรา ในตลาดของวัสดุทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ในประเทศไทย ยังคงค่อนข้าง

ข้างจะจำกัด อยู่ในวงการขึ้นส่วนของเครื่องใช้ขนาดเล็ก ขึ้นส่วนที่ใช้ทางด้านอุตสาหกรรมค่อนข้างหายาก และมีราคาแพง ทางด้านคุณภาพก็ยังมีปัญหาเพราะซึ่งมาต้องนำมาทดสอบให้แน่ใจก่อนว่าจะทำงานได้ตามต้องการหรือไม่

เครื่องจักรในตระกูลของเครื่องเหี้ยวนำสนามแม่เหล็ก มีมากมายและมีความจำเป็นทางด้านงานอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้ คือ

1. เครื่องทำผิวแข็งเหล็ก ซึ่งใช้ในการทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่ผลิตขึ้นมา มีคุณภาพดีทนต่อการขัดสีและมีความเหนียวไม่เปราะหรือแตกง่าย

2. ทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อที่จะทำการอัดหรือตัดขึ้นรูป โดยไม่จำเป็นต้องให้เตาเผาเหมือนในสมัยก่อน ซึ่งต้องใช้เวลามากในการเผาเหล็ก แต่ถ้าใช้วิธีการเหี้ยวนำสนามแม่เหล็ก จะสามารถใช้เวลาน้อยในการผลิตขึ้นส่วน

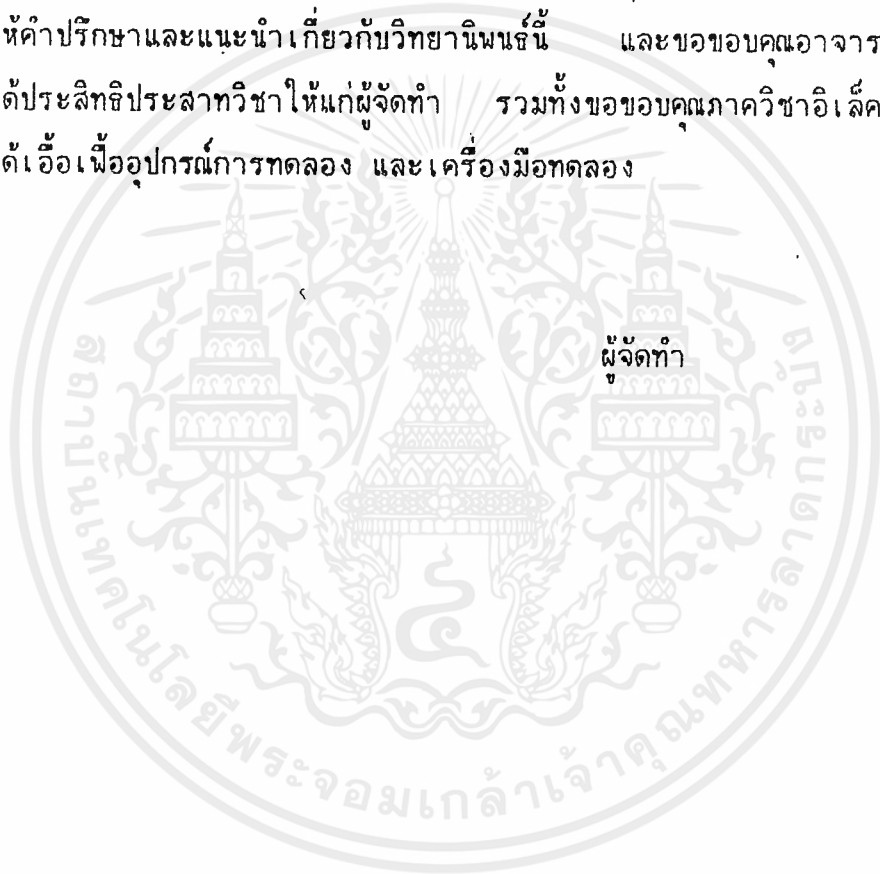
จากการใช้หลักวิธีการเหี้ยวนำสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่าข้อดีอยู่มากพอสมควรเมื่อเทียบกับการใช้เตาเผาแบบเดิม คือ

- ใช้เวลาในการปฏิบัติงานน้อย
- ใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อย
- ใช้เนื้อที่ติดตั้งเครื่องน้อย
- มีผลเสียต่อสภาวะแวดล้อมน้อยมาก
- ประสิทธิภาพของเครื่องสูง
- กำหนดความลึกจากผิวได้ง่ายขึ้น
- ทำเป็นเครื่องอัตโนมัติได้ง่าย
- คุณภาพในการผลิตดี

ในการสร้าง และการพัฒนาเครื่องเหี้ยวนำสนามแม่เหล็กต่อไปจะสามารถสร้างได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากมีข้อมูลต่าง ๆ มากพอสมควรในการสร้างเครื่องหลัก การสวิตซ์ซึ่งยังมีการต่ออีกหลายแบบ สำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ก็ต้องมีการพัฒนากับต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆฝ่าย ขอขอบคุณ อ.สมศักดิ์ เข็ญศิริกุล ที่ได้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาให้แก่ผู้จัดทำ รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทดลอง และเครื่องมือทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. GEORGE CHRYSISS "HEGHT-FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLIES"  
McGraw-Hill , INC,1984
2. JONH DAVIES, PETER SIMPSON "INDUCTION HEATING HANDBOOK"  
McGraw-Hill, INC,1979
3. B.W WILLIA " POWER ELECTRONIC" MACMILLAN EDUCATION  
LTD, 1987
4. WILLIAM MACMERRY. "SELECTION OF SNUBBERS AND CLAMPS TO  
OPTIMZE THE DESIGN OF TRANSISTER SITCHING CONVERTERS"  
IEEE TRANSACTIONS INDUSTRY APPLICATIONS. VOI.1A-16,NO,  
JULY/AUGUST 1981
5. RICHARD L. STOLL, "THE ANALYSIS OF EDDY CURRENTS"  
OXFORD, CLARENDON PRESS, 1974
6. WILLIAM H. HAYT, JR. "ENGINEERING ELECTRO-MAGNETICS"  
MC. GRAW-HILL BOOK COMPANY, 1974
7. JOSEPH A. EDMINISTER, "ELECTRIC CIRCUIT" MC. GRAW-HILL  
BOOK COMPANY, 1965
8. CHARLIE R. BROOKS, "HEAT TREANTMENT OF FERROUS ALLAYS"  
HEMISPHERE PUBLISHING CORPORATION, 1979

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Designer's Data Sheet*  
**Power Field Effect Transistor**  
**N-Channel Enhancement**  
**Mode Silicon Gate TMOS**

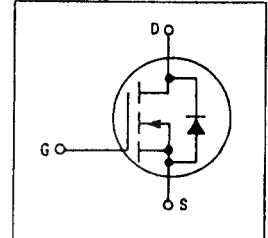


**MTM15N35**  
**MTM15N40**

TMOS POWER FETs  
 15 AMPERES  
 $r_{DS(on)} = 0.3 \text{ OHM}$   
 350 and 400 VOLTS

These TMOS Power FETs are designed for high voltage, high speed power switching applications such as switching regulators, converters, solenoid and relay drivers.

- Silicon Gate for Fast Switching Speeds — Switching Times Specified at 100°C
- Designer's Data —  $I_{DSS}$ ,  $V_{DS(on)}$ ,  $V_{GS(th)}$  and SOA Specified at Elevated Temperature
- Rugged — SOA is Power Dissipation Limited
- Source-to-Drain Diode Characterized for Use With Inductive Loads

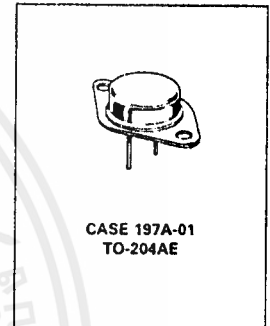


**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	MTM		Unit
		15N35	15N40	
Drain-Source Voltage	$V_{DSS}$	350	400	Vdc
Drain-Gate Voltage ( $R_{GS} = 1 \text{ M}\Omega$ )	$V_{DGR}$	350	400	Vdc
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	± 20		Vdc
Drain Current — Continuous	$I_D$	15		Adc
	$I_{DM}$	70		
Total Power Dissipation ( $\theta_{TC} = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C)	$P_D$	250		Watts
		2		$W/^\circ\text{C}$
Operating and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to 150		$^\circ\text{C}$

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Thermal Resistance — Junction to Case — Junction to Ambient	$R_{\theta JC}$	0.5	$^\circ\text{C/W}$
	$R_{\theta JA}$	30	
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	$T_L$	275	$^\circ\text{C}$



Designer's Data for "Worst Case" Conditions — The Designer's Data Sheet permits the design of most circuits entirely from the information presented. SOA Limit curves — representing boundaries on device characteristics — are given to facilitate "worst case" design.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit	
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Drain-Source Breakdown Voltage ( $V_{GS} = 0, I_D = 0.25 \text{ mA}$ )	$V_{(BR)DSS}$	350 400	— —	Vdc	
Zero Gate Voltage Drain Current ( $V_{DS} = \text{Rated } V_{DSS}, V_{GS} = 0$ ) ( $V_{DS} = 0.8 \text{ Rated } V_{DSS}, V_{GS} = 0, T_J = 125^\circ\text{C}$ )	$I_{DSS}$	— —	0.2 1	mAdc	
Gate-Body Leakage Current, Forward ( $V_{GSF} = 20 \text{ Vdc}, V_{DS} = 0$ )	$I_{GSSF}$	—	100	nAdc	
Gate-Body Leakage Current, Reverse ( $V_{GSR} = 20 \text{ Vdc}, V_{DS} = 0$ )	$I_{GSSR}$	—	100	nAdc	
<b>ON CHARACTERISTICS*</b>					
Gate Threshold Voltage ( $V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1 \text{ mA}$ ) $T_J = 100^\circ\text{C}$	$V_{GS(th)}$	2 1.5	4.5 4	Vdc	
Static Drain-Source On-Resistance ( $V_{GS} = 10 \text{ Vdc}, I_D = 7.5 \text{ Adc}$ )	$r_{DS(on)}$	—	0.3	Ohm	
Drain-Source On-Voltage ( $V_{GS} = 10 \text{ V}$ ) ( $I_D = 15 \text{ Adc}$ ) ( $I_D = 7.5 \text{ Adc}, T_J = 100^\circ\text{C}$ )	$V_{DS(on)}$	— —	— —	Vdc	
Forward Transconductance ( $V_{DS} = 15 \text{ V}, I_D = 7.5 \text{ A}$ )	gFS	6	—	mhos	
<b>DYNAMIC CHARACTERISTICS</b>					
Input Capacitance	( $V_{DS} = 25 \text{ V}, V_{GS} = 0,$ $f = 1 \text{ MHz}$ ) See Figure 11	$C_{iss}$	—	3000	pF
Output Capacitance		$C_{oss}$	—	500	
Reverse Transfer Capacitance		$C_{rss}$	—	200	
<b>SWITCHING CHARACTERISTICS* (<math>T_J = 100^\circ\text{C}</math>)</b>					
Turn-On Delay Time	( $V_{DD} = 25 \text{ V}, I_D = 0.5 \text{ Rated } I_D$ $R_{gen} = 50 \text{ ohms}$ ) See Figures 9, 13 and 14	$t_{d(on)}$	—	60	ns
Rise Time		$t_r$	—	180	
Turn-Off Delay Time		$t_{d(off)}$	—	450	
Fall Time		$t_f$	—	180	
Total Gate Charge	( $V_{DS} = 0.8 \text{ Rated } V_{DSS},$ $I_D = \text{Rated } I_D, V_{GS} = 10 \text{ V}$ ) See Figure 12	$Q_g$	110 (Typ)	160	nC
Gate-Source Charge		$Q_{gs}$	50 (Typ)	—	
Gate-Drain Charge		$Q_{gd}$	60 (Typ)	—	
<b>SOURCE DRAIN DIODE CHARACTERISTICS*</b>					
Forward On-Voltage	( $I_S = \text{Rated } I_D$ $V_{GS} = 0$ )	$V_{SD}$	1.3 (Typ)	1.6	Vdc
Forward Turn-On Time		$t_{on}$	Limited by stray inductance		
Reverse Recovery Time		$t_{rr}$	1200 (Typ)	—	ns
<b>INTERNAL PACKAGE INDUCTANCE</b>					
Internal Drain Inductance (Measured from the contact screw on the header closer to the source pin and the center of the die)	$L_d$	5 (Typ)	—	nH	
Internal Source Inductance (Measured from the source pin, 0.25" from the package to the source bond pad)	$L_s$	12.5 (Typ)	—		

\*Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300 \mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

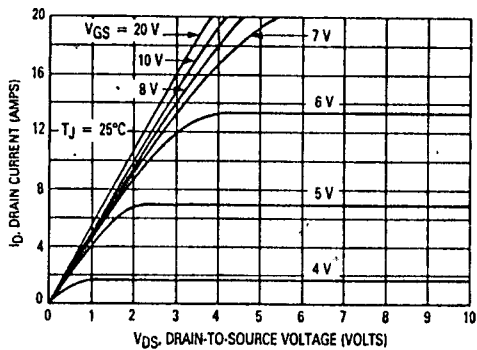


Figure 1. On-Region Characteristics

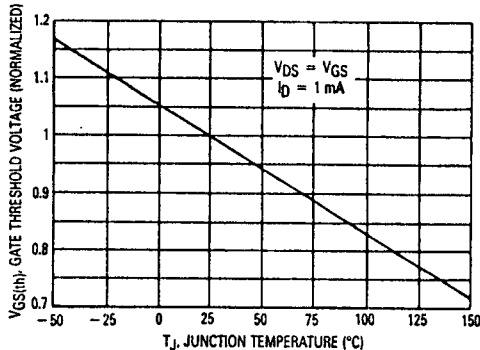


Figure 2. Gate-Threshold Voltage Variation With Temperature

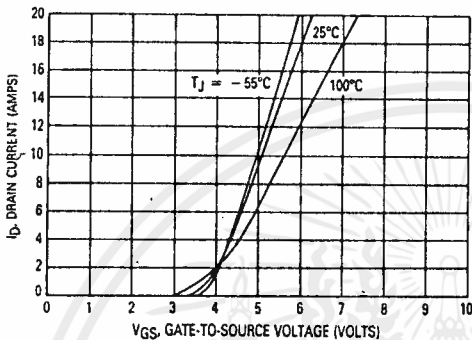


Figure 3. Transfer Characteristics

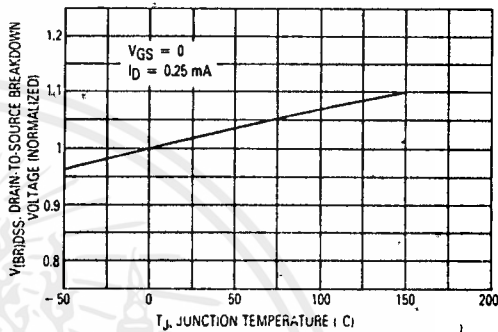


Figure 4. Breakdown Voltage Variation With Temperature

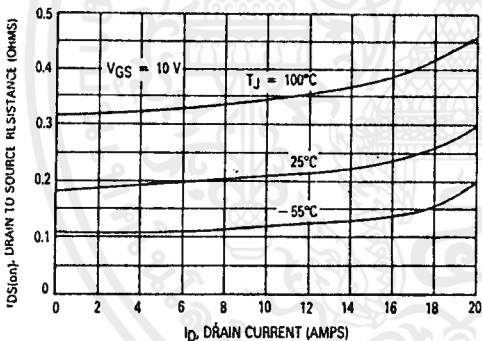


Figure 5. On-Resistance versus Drain Current

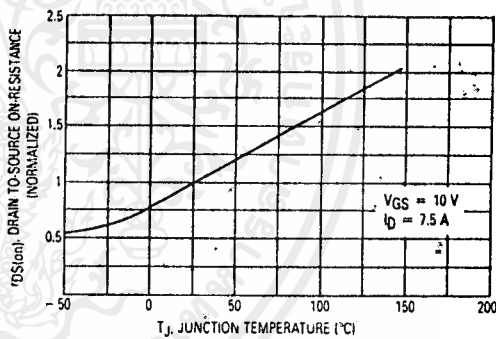


Figure 6. On-Resistance Variation With Temperature

3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAFE OPERATING AREA INFORMATION

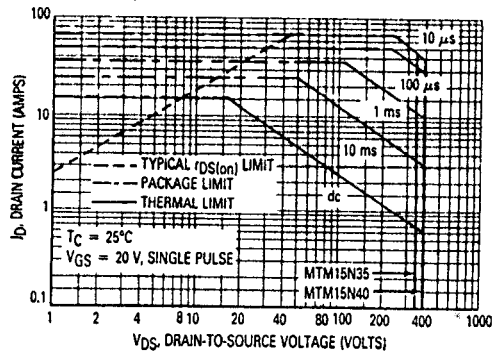


Figure 7. Maximum Rated Forward Biased Safe Operating Area

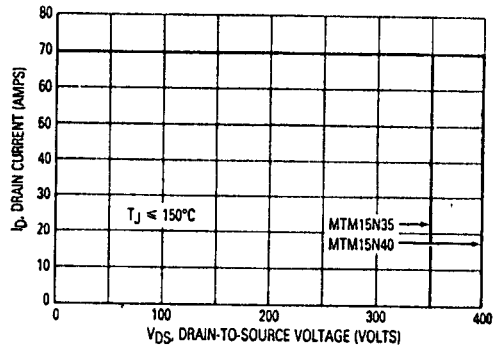


Figure 8. Maximum Rated Switching Safe Operating Area

FORWARD BIASED SAFE OPERATING AREA

The FBSOA curves define the maximum drain-to-source voltage and drain current that a device can safely handle when it is forward biased, or when it is on, or being turned on. Because these curves include the limitations of simultaneous high voltage and high current, up to the rating of the device, they are especially useful to designers of linear systems. The curves are based on a case temperature of 25°C and a maximum junction temperature of 150°C. Limitations for repetitive pulses at various case temperatures can be determined by using the thermal response curves. Motorola Application Note, AN569, "Transient Thermal Resistance-General Data and Its Use" provides detailed instructions.

SWITCHING SAFE OPERATING AREA

The switching safe operating area (SOA) of Figure 8 is the boundary that the load line may traverse without incurring damage to the MOSFET. The fundamental limits are the peak current,  $I_{DM}$  and the breakdown voltage,  $V_{(BR)DSS}$ . The switching SOA shown in Figure 8 is applicable for both turn-on and turn-off of the devices for switching times less than one microsecond.

The power averaged over a complete switching cycle must be less than:

$$\frac{T_{J(max)} - T_C}{R_{\theta JC}}$$

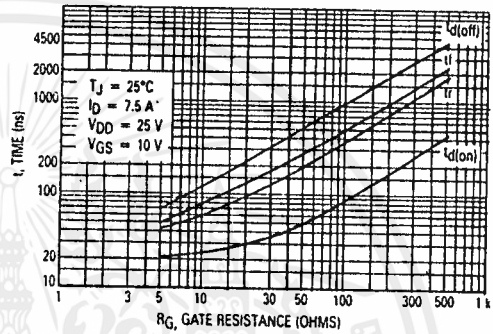


Figure 9. Resistive Switching Time Variation With Gate Resistance

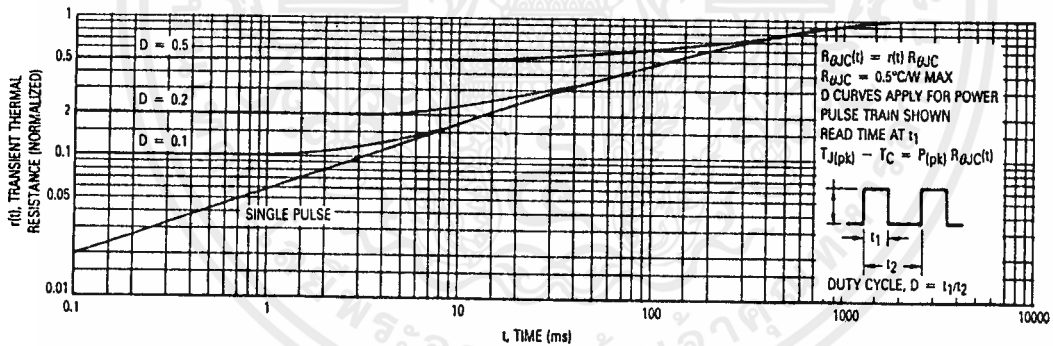


Figure 10. Thermal Response

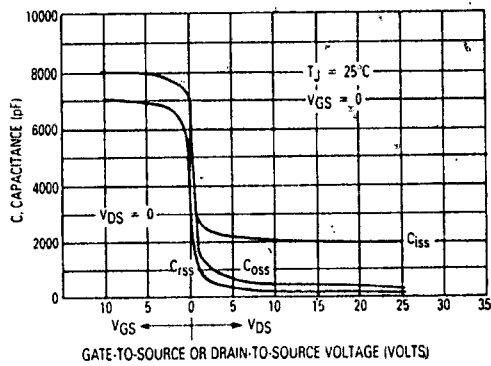


Figure 11. Capacitance Variation

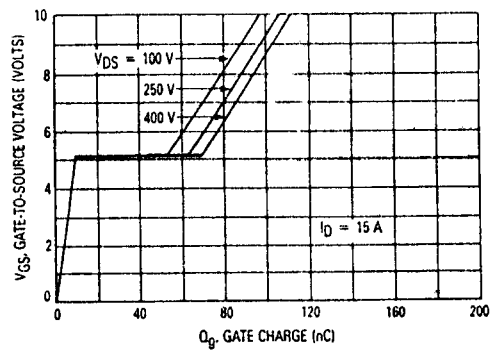


Figure 12. Gate Charge versus Gate-to-Source Voltage

RESISTIVE SWITCHING

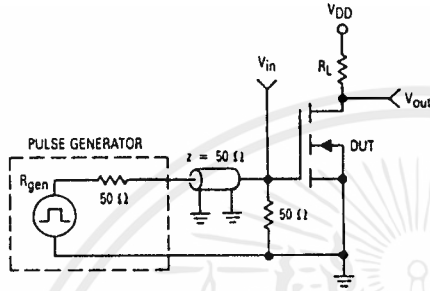


Figure 13. Switching Test Circuit

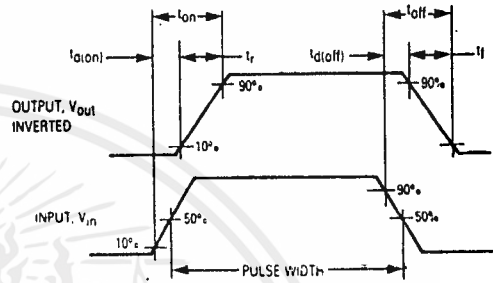


Figure 14. Switching Waveforms

OUTLINE DIMENSIONS

NOTES

- DIMENSIONS Q AND U ARE DATUMS AND T IS BOTH A DATUM AND SEATING PLANE
- POSITIONAL TOLERANCE FOR HOLE D  
 $\phi 0.010$  (M) (L) (U) (T)
- POSITIONAL TOLERANCE FOR LEADS  
 $\phi 0.012$  (L) (O) (U)
- DIMENSIONING AND TOLERANCING PER Y14.5 1987
- CONTROLLING DIMENSION INCH

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	18.30	39.37	1.510	1.550
B	19.30	21.08	0.760	0.830
C	6.35	7.62	0.250	0.300
D	1.43	1.60	0.057	0.063
E	1.52	1.77	0.060	0.070
F	30.14	BSC	1.187	BSC
G	10.93	BSC	0.430	BSC
H	5.46	BSC	0.215	BSC
J	16.89	BSC	0.665	BSC
K	11.18	12.19	0.440	0.480
O	3.84	4.04	0.151	0.161
R	25.15	26.67	0.990	1.050
U	1.94	4.08	0.181	0.161

CASE 197A-01  
TO-204AE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้