

การพัฒนาเครื่องให้ความร้อนเหล็กโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

DEVELOPMENT OF AN INDUCTION HEATING MACHINE



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

I

Abstract

II

บทที่ 1 บทนำ

1

บทที่ 2 ทฤษฎีของการเหนี่ยวนำความร้อนโดยแม่เหล็กไฟฟ้าสลับ

3

2.1 การกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็ก

3

2.2 Skin Effect

7

2.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแส และความเข้มของสนามไฟฟ้า

8

2.4 กระแสทั้งหมด

10

2.5 กำลังที่เกิดขึ้นในเหล็ก

11

2.6 เส้นแรงแม่เหล็ก

13

2.7 การเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า

13

2.8 การคำนวณหาคาโดยประมาณ

14

บทที่ 3 โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

18

3.1 ส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

19

3.1.1 ลดศักดาไฟฟ้า (Step down voltage)

19

3.1.2 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier)

19

3.1.3 วงจรกรอง (Filter)

19

3.1.4 คอนเวอร์เตอร์ (Converter)

19

3.1.5 หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง

19

(High-Frequency Power Transformer)

19

3.1.6 ขดลวดจ่ายพลังงาน (Coil O/P)

19

3.1.7 ระบบขับทรานซิสเตอร์ (Drive Transistor)

20

3.1.8	วงจรป้องกัน (Protect Circuit)	20
3.2	ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง	20
3.2.1	กค ON - M/C 1	20
3.2.2	กค ON - M/C 2	20
3.2.3	กค ON - M/C 3	20
3.2.4	กค ON - M/C 4	20
3.3	ระบบป้องกัน	21
3.3.1	ระบบป้องกันการตัดวงจร	21
3.3.2	ระบบป้องกันศักดาไฟฟ้า	21
3.3.3	ระบบป้องกันการทำงานเกินพิกัด	21
3.4	ระบบระบายความร้อน	24
3.4.1	เครื่องปรับอากาศ	24
3.4.2	น้ำระบายความร้อน	24
บทที่ 4	การออกแบบเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	25
4.1	การลัดศักดาไฟฟ้า	25
4.2	วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า	27
4.3	วงจรกรอง	28
4.3.1	วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ (L-Filter)	29
4.3.2	วงจรกรองแบบตัวเก็บประจุ (C-Filter)	34
4.4	หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง	35
4.5	ขดลวดจ่ายพลังงาน	38
4.6	คอนเวอร์เตอร์	40
4.7	ระบบขับทรานซิสเตอร์	41
4.8	วงจรป้องกัน	45

บทที่ 5	การสร้างส่วนประกอบและผลการทดสอบ	46
5.1	การสร้างหม้อแปลง 3 เฟสแบบอัตโนมัติ(3 Phase Auto - Tranaformer)	46
5.2	ทดสอบทรานซิสเตอร์กำลัง	49
5.3	การออกแบบสร้างและทดสอบความต้านทาน	51
5.4	การทดสอบแกนเฟอร์ไรท์	53
5.5	การทดสอบวงจรกรอง	56
5.6	ไฟเลี้ยงของวงจรขับทรานซิสเตอร์	57
5.7	วงจรสับเบอร์ด	57
5.8	หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง	59
5.9	ขดลวดจ่ายพลังงาน	62
5.10	สัญญาณไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ	64
บทที่ 6	บทสรุป	68
	เอกสารอ้างอิง	72
	กิตติกรรมประกาศ	73
	ภาคผนวก	
ผ.1	The iron-carbon phase diagram	74
ผ.2	ทรานซิสเตอร์กำลัง	75
ผ.3	K-FET (2SK134)	76
ผ.4	J-FET (2SJ49)	79
ผ.5	Drive (75492)	83

5.1	แกนเหล็กของหม้อแปลงแบบออโต	47
5.2	ขดลวดของหม้อแปลงแบบออโต	47
5.3	หม้อแปลงแบบออโต	48
5.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าป้อนเข้ากับกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ	48
5.5	วงจรทดสอบทรานซิสเตอร์	49
5.6	ความต้านทานที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์	52
5.7	ความต้านทานของสแน็บเบอร์	52
5.8	Close core	53
5.9	Slug core	54
5.10	กราฟความสัมพันธ์ของ $v$ กับ $i$ เมื่อแกนเป็นแบบ Close core กับแบบ Slug core	54
5.11	กราฟความสัมพันธ์ของ $B$ กับ $I$ เมื่อแกนเป็นแบบ Close core กับแบบ Slug core	55
5.12	วงจรสแน็บเบอร์	58
5.13	หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงแบบ Slug core	60
5.14	หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงแบบ Close core	60
5.15	ขดลวดของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงที่ได้จากการกลิ้ง	61
5.16	ขดลวดจ่ายพลังงานขณะทำการทดสอบ	63
5.17	ต้นแบบของขดลวดจ่ายพลังงาน	63
5.18	สัญญาณ $V_{BE}$ กับ $V_{CE}$ ทางคาน Forward	65
5.19	สัญญาณ $V_{CE}$ ของทางคาน Forward และทางคาน Backward	65
5.20	สัญญาณ $V_{BE}$ กับ $V_{CE}$ ของทางคาน Forward และทางคาน Backward	66
5.21	สัญญาณของกระแสที่ไหลออกจากวงจรกรอง	66
5.22	สัญญาณที่ขั้วของขดลวดจ่ายพลังงาน	67

ตารางที่

2.1 ตัวอย่างการคำนวณหา skin depth

14

5.1 ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์

40



## 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	: ศักดาไฟฟ้า	หน่วย	โวลต์
L	: ค่าความเหนี่ยวนำ	หน่วย	เฮนรี
R	: ความต้านทาน	หน่วย	โอห์ม
C	: ค่าความเก็บประจุ	หน่วย	ฟารัด
N	: จำนวนรอบของขั้วลวด		
g	: ช่องอากาศ (Air gap)	หน่วย	เมตร
W	: พลังงาน	หน่วย	จูล
$V_{BE}$	: ศักดาไฟฟ้าคร่อมขา B กับ E ของทรานซิสเตอร์	หน่วย	โวลต์
$V_{CE}$	: ศักดาไฟฟ้าคร่อมขา C กับ E ของทรานซิสเตอร์	หน่วย	โวลต์

- $V_{CC}$  : ศักดาไฟฟ้าของตัวจ่ายไฟกระแสตรง หน่วย โวลต์
- $I_B$  : กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขา B ของทรานซิสเตอร์ หน่วย แอมป์
- $I_C$  : กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขา C ของทรานซิสเตอร์ หน่วย แอมป์
- ⊙ : ทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ
- ⊗ : ทิศทางพุ่งเข้าในกระดาษ
- M/C : Magnetic Contactor
- C.B. : Circuit Breaker
- VMP : Voltage Motor Protector



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องให้ความร้อนเหล็กโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก
โดย	พิชิต ล้ายอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2529

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องให้ความร้อนเหล็กโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ความถี่สูง ซึ่งอาศัยหลักการจากเมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าในเนื้อเหล็กและเกิดกระแสไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อเหล็ก และกระแสไหลวนที่เคลื่อนตัวในเนื้อเหล็ก จะหนาแน่นที่บริเวณใกล้ผิวเหล็ก ซึ่งผลดังกล่าวเรียกว่า "สะกินเอฟเฟค(Skin-Effect) ความลึกของสะกินเอฟเฟคขึ้นอยู่กับความถี่ของสนามแม่เหล็ก

โดยเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Induction Heating Machine) ทำงานโดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นตัวสวิชชิง (Switching) โดยต่อแบบพุช-พูล (push-pull) และมีตัวหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงโดยใช้แกนแบบเฟอร์ไรท์ ซึ่งเครื่องมีขนาด 50 KVA 25 กิโลเฮิรท์ สามารถทำผิวแข็งหนาตั้งแต่ 1 มม. ถึง 6 มม. โดยที่ขดลวดจ่ายพลังงานจะออกแบบเฉพาะขึ้นงานเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพขึ้นงาน

Thesis Title	Development of an Induction Heating Machine
Name	Pichit Lumyong
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Birasak Varasundharosoth
Level of study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Electrical Engineering
Academic Year	1986

Abstract

This thesis is the research and development of an induction heating machine. It is based on the principle when magnetic field varies with time, resulting in induced emf. in steel. This cause the eddy current to flow in the steel, which make the steel heated. The eddy current movement in the steel is concentrated at the region near the surface and hence the produce so called "Skin-Effect". The depth of skin effect, or skin depth, depends on the vary of frequency of magnetic field.

The induction heating machine, is operated by power transistors connected in push-pull switching with a high-frequency power transformer using a ferrite core. The rating of machine is 50 KVA , 25 KHz ; and a skin-depth of 1-6 mm. The output coil is designed to be suitable for a particular workpiece.

เครื่องชุบผิวแข็งเหล็กโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ( Surface Hardening by Induction Heating ) จะทำผิวแข็งของเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ โดยคุณสมบัติของเหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนที่อุณหภูมิห้องเหล็กจะจับตัวแบบ BCC (Body-Centered Cubic) เรียกว่า  $\alpha$  - iron หรือ เฟอร์ไรต์ เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน upper critical point จะทำให้เริ่มเปลี่ยนจาก BCC ไปเป็น FCC (Face - Centered Cubic) เรียกว่า  $\gamma$  - iron หรือ ออสเทนไนต์ (Austenite) โดยสามารถดูได้จาก iron-carbon phase diagram (Ref.6) และเมื่อทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (quenching) จาก ออสเทนไนต์ จะได้เป็น มาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งโครงสร้างจะเป็น BCT (Body - Centered Tetragonal) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านความแข็ง (Hardness)

อุณหภูมิที่สูงขึ้นในเนื้อเหล็กนั้น ได้จากการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลง และเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิด skin effect ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า skin depth ได้ จากผลของ skin effect ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของเหล็ก

เมื่อทำให้เหล็กที่ผ่านเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Induction Heating) เย็นลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เหล็กแข็งเฉพาะที่ผิว โดยที่ภายในเนื้อเหล็กยังคงเป็นเหล็กเหนียวเหมือนเดิม ซึ่งจะทำให้เหล็กทนต่อการขัดสีและไม่เปราะเนื่องจากภายในยังคงเหนียว

ประโยชน์ของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ไม่เพียงแต่ใช้ทำผิวแข็งเหล็กเท่านั้น ยังสามารถใช้หลักการของเครื่องในการสร้างเตาหลอมไฟฟ้าโดยการลดความถี่ให้ต่ำลง หรือทำเป็นเครื่องให้ความร้อนโลหะก่อนที่จะนำไปกัดหรือป้อนขึ้นรูปโลหะ หรือนำไปใช้ในการเชื่อมท่อในแนวยาวของท่อแบบอัตโนมัติต่อเนื่อง

ข้อได้เปรียบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนเหล็กโดยการใช่เตา มีดังนี้คือ

- ใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อย
- ใช้เวลาในการให้ความร้อนเหล็กน้อย

- ประสิทธิภาพสูง
- สามารถควบคุมไทรอนเฉพาะตำแหน่งได้
- ลดพื้นที่ในการปฏิบัติการ
- สามารถนำมาปรับปรุงให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย
- ลดมลภาวะ

จากการที่มองเห็นประโยชน์และความจำเป็นในอุตสาหกรรม จึงได้มีการทดลองและพัฒนาเครื่องขึ้นใช้เองภายในประเทศ โดยส่วนประกอบต่าง ๆ สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดโดยทั่วไป



## บทที่ 2

### ทฤษฎีของการเหนี่ยวนำความร้อนโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับ

สนามแม่เหล็กซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเมื่ออยู่ภายในเนื้อเหล็กจะเกิดปรากฏการณ์ในลักษณะที่ว่า สนามแม่เหล็กที่ผิวมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกจากผิวของเหล็ก ซึ่งเราเรียกลักษณะนี้ว่า skin effect ซึ่งจากผลของ skin effect นี้ ทำให้มีกระแสไหลเฉพาะที่ผิวของเหล็กเท่านั้น ดังนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าไปให้กับเหล็กจะอยู่เฉพาะที่ผิว

#### 2.1 การกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็ก

ในการหาการกระจายของสนามแม่เหล็กในเนื้อเหล็กนั้น กำหนดให้ displacement current นั้นน้อยมากไม่นำมาคิด

จากสมการของสนามแม่เหล็ก (Ref. 1)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

ถ้าในเหล็กมีค่า conductivity ( $\sigma$ ) และจากกฎของโอห์ม

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

แทนค่า  $\mathbf{J}$  ในสมการ (1)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times (\sigma \mathbf{E})$$

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

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (3)} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} &= \nabla \cdot \mu \mathbf{H} \\ &= \mathbf{H} \cdot \nabla \mu + \mu \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= -\mathbf{H} \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mu \end{aligned} \quad (6)$$

แทนค่าจากสมการ (2),(6) ในสมการ (5)

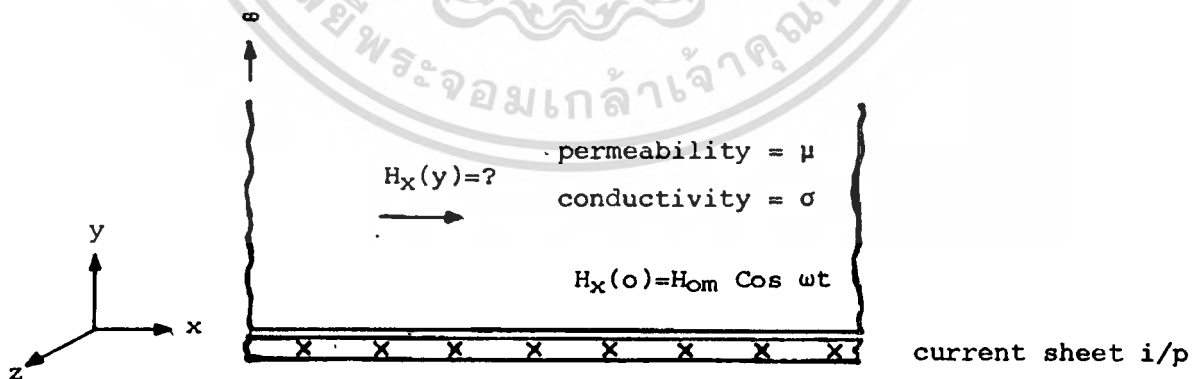
$$\nabla^2 H = \nabla(-H \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mu) - \nabla(\sigma) \times E - \sigma(\frac{-\partial B}{\partial t})$$

กำหนดให้เหล็กที่ใช้เป็น isotropic media มีค่า permeability ( $\mu$ ) กับค่า conductivity( $\sigma$ ) นั้น คงที่ตลอดเนื้อสาร ดังนั้น  $\nabla \mu = 0$  ;  $\nabla \sigma = 0$  ;  $\frac{dB}{dt} = \mu$

$$\nabla^2 H = \sigma \frac{dB}{dt} \cdot \frac{\partial H}{\partial t}$$

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

หากการกระจายของ H ภายในเนื้อเหล็ก โดยเริ่มกำหนดจากค่า ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $H_x$ ) ที่ผิวเหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน x เท่านั้น และคิดว่าแท่งเหล็กมีขนาดยาวในแกนต่าง ๆ มาก โดยมี 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  $\therefore$  ขนาดของ H จะขึ้นอยู่กับค่า y โดยไม่แปรตาม x และ z



รูปที่ 2.1 ขดลวดตัวนำและเหล็กที่หนาอย่างมาก

กำหนดให้  $y = 0$  (ที่ผิวของเหล็ก)

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

เราสามารถแทนสมการตรีโกณมิติอยู่ในรูปของ exponential ได้ โดยจาก Euler's Identities (Ref.2)

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

ซึ่งสามารถเขียนสมการของความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่ตำแหน่ง  $y = 0$  ได้ดังนี้คือ

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

หรืออาจไม่เขียน Re ไว้ แต่เมื่อใดคำตอบก็หาค่า real part จากสมการ (7)

$$\nabla^2 H = \sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$
$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = \sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

แต่เนื่องจากว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีทิศทางในแนวแกน  $x$  และแปรตามระยะทาง  $y$  เท่านั้น

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} = \sigma \mu \frac{dH_x}{dt}$$

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

$$\therefore \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} - \sigma j \omega H_x = 0$$

จาก  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  เมื่อ  $\rho$  : เป็นค่า resistivity

$$\therefore \frac{d^2 H_x}{dy^2} - \frac{\mu}{\rho} j \omega H_x = 0$$

กำหนดให้  $\alpha^2 = \frac{\mu\omega}{2\rho}$

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

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของ differential equation ได้คือ

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - K^2 H_x = 0 \quad \text{เมื่อ } K^2 = 2j\alpha^2$$

และ solution of differential ใต้งี้

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

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

ที่ตำแหน่ง

$Y = \infty \quad H_x = 0 \quad \therefore A_1 = 0$

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

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

ดังนั้น

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

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

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

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

ซึ่งค่าของ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะเป็น real part

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

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

### 2.2 Skin effect

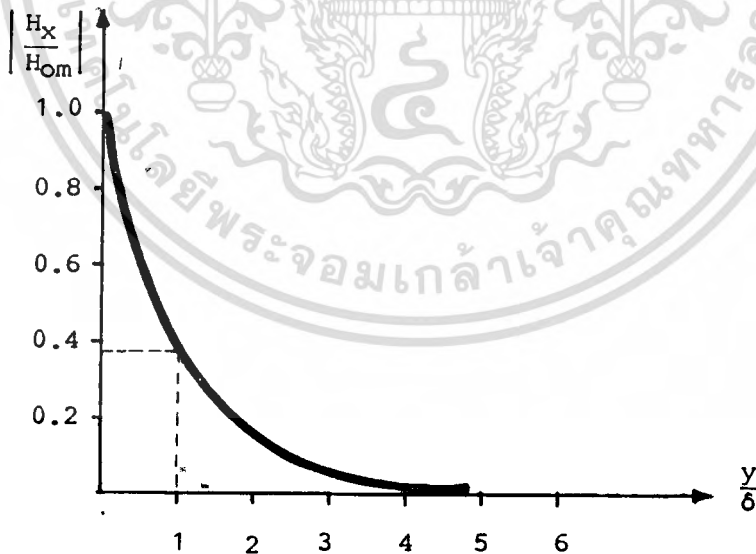
จากหัวข้อ 2.1 จะเห็นได้ว่าค่าของสนามแม่เหล็กนั้นกระจายตามความลึกของ  $y$  โดย

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

โดย เทอมของ  $\exp(-\alpha y)$  เป็นตัวกำหนดขนาดของ magnitude ของ  $H_x$  ที่ระดับความลึกจากผิวต่าง ๆ

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

เรียกค่า  $y$  นี้ว่า skin depth หรือ depth of penetration ใช้สัญลักษณ์  $\delta$



รูปที่ 2.2 การกระจายของ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กกับความลึก

$$\therefore \delta = \frac{1}{\alpha}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \tag{10}$$

โดยที่  $\rho$  : resistivity โอม-เมตร  
 $\mu$  : permeability เวบเบอร์/แอมป์-เทอรัน-เมตร  
 $\omega$  : ความเร็วเชิงมุม เรเดียน/วินาที

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ออกมาดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

2.3 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแสและความเข้มของสนามไฟฟ้า เมื่อทราบถึงการกระจายของ ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็ก ซึ่งมีค่า permeability คงที่ จึงสามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยจากสมการ (9)

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

และจาก  $B = \mu H$

$$\therefore B_x(y) = \mu H_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \tag{11}$$

นอกจากนี้ยังสามารถหา ความหนาแน่นของกระแส ในเนื้อเหล็กที่จุดต่าง ๆ ได้ โดย จากที่ทราบว่า  $\nabla \times H = J$

โดยที่ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้น มีทิศทางในแนวแกน x เท่านั้น และแปรค่าตาม ระยะทางในแกน y

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

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

$$\therefore J_Z(y) = - \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

จากสมการ(8)

$$\begin{aligned} H_x(y) &= H_{Om} \exp(-\alpha y) \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha y)\} \\ &= H_{Om} \exp(j\omega t) \cdot \exp(-\sqrt{2}j \cdot \alpha y) \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

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

จาก

$$\sqrt{2}j = 1+j = \sqrt{2} \cdot \exp(j \frac{\pi}{4})$$

$$J_Z(y) = \sqrt{2}H_{Om} \cdot \alpha \exp(-\alpha y) \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4})\}$$

ซึ่งค่าของ ความหนาแน่นกระแส จะเป็นค่า real part

$$J_Z(y) = \sqrt{2}\alpha H_{Om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4}) \tag{12}$$

หาค่า ความหนาแน่นกระแส ที่ตำแหน่ง  $y = 0$

$$J_Z(0) = \sqrt{2}\alpha \cdot H_{Om} \cdot \exp\{j(\omega t + \frac{\pi}{4})\}$$

กำหนดให้

$$J_{Om} = \sqrt{2}\alpha H_{Om} \exp(j\frac{\pi}{4})$$

ซึ่งค่า  $J_{Om}$  จะเป็นขนาด magnitude ที่ตำแหน่ง  $y = 0$  หรือที่ผิวของโลหะ และ เฟส ของ  $J$  จะ lead  $H$  ที่จุดต่าง ๆ เป็นมุม  $\pi/4$  หรือ  $45^\circ$

$$\therefore J_z(y) = J_{0m} \exp(-\alpha y) \cdot \exp\{j(\omega t - \alpha y)\}$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่า ความหนาแน่นกระแส ที่ความลึกต่าง ๆ จาก

$$J_z(y) = J_{0m} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y) \quad (13)$$

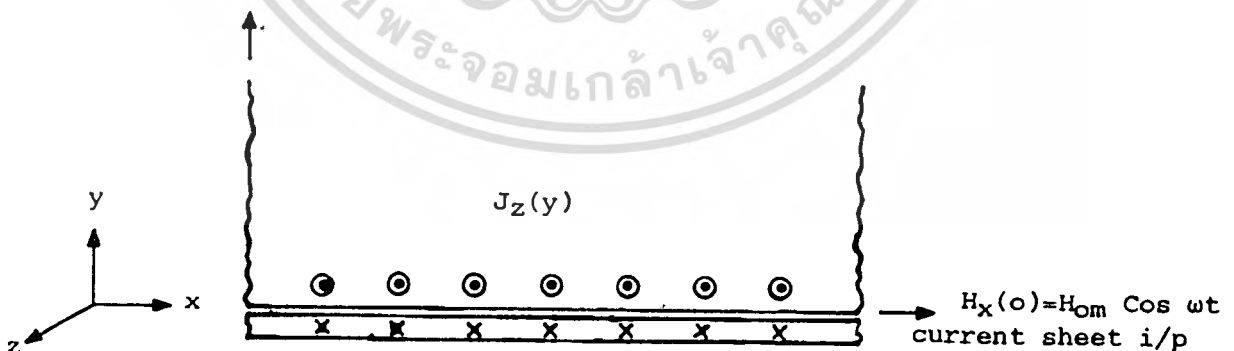
จากการหา ความหนาแน่นกระแส จะพบว่า  $\sigma$  จะมีทิศอยู่ในแนวแกน  $z$  และจะสามารถหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดในเหล็ก

จาก 
$$E = \frac{J}{\sigma} = \rho J$$

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

#### 2.4 กระแสทั้งหมด

จากในหัวข้อ 2.3 เมื่อทราบค่า ความหนาแน่นของกระแสที่จุดต่าง ๆ ในเนื้อเหล็กโดยรูวาทิศทางของกระแสอยู่ในแนวแกน  $z$  ดังนั้นเมื่อจะหากระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะต้อง integrate  $J$  ในแนวระนาบ  $x$  และ  $y$  จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสแปรตามระยะ  $y$  เท่านั้น



รูปที่ 2.3 แสดงทิศทางของความเข้มของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส

เมื่อ ค่าความหนาแน่นกระแสไม่แปรตามระยะทาง  $x$  จึงสามารถหา ค่ากระแสไฟฟ้า ต่อ เมตร ในแนวแกน  $x$

$$\begin{aligned} \text{ค่ากระแสไฟฟ้า ต่อ เมตร} &= \int_0^{\infty} J_z dy \\ &= \int_0^{\infty} J_{om} \cdot \exp(-\alpha y) \cdot \cos(\omega t - \alpha y) dy \\ &= J_{om} \cdot \text{Re} \left[ \int_0^{\infty} \exp\{j\omega t - (1+j)\alpha y\} dy \right] \\ &= J_{om} \cdot \text{Re} \left[ \frac{\exp\{j\omega t - (1+j)\alpha y\}}{-(1+j)\alpha} \right]_0^{\infty} \\ &= J_{om} \cdot \text{Re} \left[ \frac{\exp(j\omega t)}{(1+j)\alpha} \right] \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{ค่ากระแส ต่อ เมตร} &= \text{Re} [ H_{om} \cdot \exp(j\omega t) ] \\ &= H_{om} \cdot \cos \omega t \end{aligned} \tag{15}$$

จะเห็นว่ากระแสที่ไหลในเนื้อเหล็ก จะมีค่าเท่ากับ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวของเหล็ก และ inphase กัน

$$\therefore I_m = H_{om} \tag{16}$$

## 2.5 กำลังที่เกิดขึ้นในเหล็ก

จากที่สามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสที่จุดต่างๆ ในเหล็กเมื่อทราบค่า resistivity ของเหล็กแล้ว ก็จะสามารถหาค่าของกำลังที่สูญเสียในเหล็กต่อ ล.บ.เมตร เท่ากับ  $\omega^2$  เมื่อต้องการรู้ กำลังที่สูญเสียทั้งหมดโดยการ integrate ตลอดปริมาตร

แต่เนื่องจาก  $J$  ไม่แปรตามแกน  $x$  และ  $z$  ดังนั้นจึงสามารถหาค่าล่งที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิว  
ในแกน  $x$  และ  $z$  โดย

กำหนดให้  $P$  : กำลังที่สูญเสียต่อพื้นที่ผิว  $\text{วัตต์/เมตร}^2$

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

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

จะเห็นว่า เทอม  $\cos^2(\omega t - \alpha y)$  เมื่อเรา integrate ในช่วงคาบของคลื่น จะได้  
เท่ากับ  $\frac{1}{2}$  โดยที่  $\alpha y$  ไม่มีผลต่อค่าของ integrate เนื่องจากค่า  $(-\alpha y)$  เป็นผลทำให้ phase  
shift ไปเท่านั้นเอง

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

$$= \rho \frac{J_{om}^2}{4\alpha} \left[ \exp(-2\alpha y) \right]_0^{\infty}$$

$$P = \rho \frac{J_{om}^2}{4\alpha} = \rho \frac{J_{om}^2}{4} \delta$$

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

$$\therefore P_{av} = \rho \frac{H_{om}^2}{2\delta} \tag{17}$$

ค่ากำลังที่สูญเสียที่คำนวณได้เป็นค่าเฉลี่ยซึ่งคิดกำลังรวมทั้งหมด ตั้งแต่ผิว  $y = 0$  จน  
ถึง  $y = \infty$  เมื่อค่าเปรียบเทียบความสูญเสียตั้งแต่ผิวถึงจุด  $y$  ใด ๆ กับความสูญเสียที่ผิวถึง  $y = \infty$   
ซึ่งจะออกมาเป็น per-unit loss

$$\frac{P_y}{P} = \frac{|\exp(-2\alpha y)|_0^y}{|\exp(-2\alpha y)|_0^{\infty}} = \frac{\exp(-2\alpha y) - 1}{-1}$$

$$\frac{P_y}{P} = 1 - \exp(-2\alpha y)$$

ที่  $y = \frac{1}{\alpha} = 0.6$

$$\frac{P_y}{P} = 1 - e^{-2} = 1 - 0.135 = 0.865$$

$y = \frac{2}{\alpha} = 2.6$

$$\frac{P_y}{P} = 1 - e^{-4} = 1 - 0.018 = 0.982$$

### 2.6 เส้นแรงแม่เหล็ก

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

$$\begin{aligned} \oint &= \mu H_{om} \int_0^{\infty} \exp[ j\omega t - (1+j)\alpha y ] dy (\times 1) \\ &= \frac{\mu H_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \exp[ j(\omega t - \frac{\pi}{4}) ] \end{aligned}$$

ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นค่า real part

$$\oint = \frac{\mu H_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cdot \cos(\omega t - \frac{\pi}{4}) \tag{18}$$

### 2.7 การเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดในเนื้อเหล็ก ก็จะสามารถหาการเหนี่ยวนำศักดาที่เกิดขึ้นในขดลวดจ่ายพลังงาน

โดยกำหนดว่าขดลวดจ่ายพลังงานมีอยู่ N รอบ

จาก

$$\begin{aligned} \text{emf.} &= N \frac{d\phi}{dt} \\ &= - \frac{\mu N \omega H_{0m}}{\sqrt{2\alpha}} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \\ \text{emf.} &= \frac{\mu N \omega H_{0m}}{\sqrt{2\alpha}} \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{4}) \end{aligned} \quad (19)$$

## 2.8 การคำนวณหาค่าโดยประมาณ

จากทฤษฎี ในการหาค่าของ skin effect นั้นเรากำหนดให้เป็นแผ่นเหล็กที่มีความยาวในแกนต่าง ๆ ยาวจนถึงอนันต์ แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้นจริง ๆ เป็นการสร้างสูตรอย่างง่าย ๆ แล้วเปรียบเทียบกับการใช้งานจริง ๆ ว่าผิดไปไม่มากนัก

temperature (°C)	$\rho$ ( $\Omega\text{-m}$ )	$\mu_r$	$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$ (mm)
20	$0.160 \times 10^{-6}$	60	0.164
200	$0.290 \times 10^{-6}$	60	0.221
400	$0.483 \times 10^{-6}$	60	0.286
600	$0.755 \times 10^{-6}$	60	0.357
800	$1.095 \times 10^{-6}$	1	3.33
1000	$1.165 \times 10^{-6}$	1	3.44
1200	$1.22 \times 10^{-6}$	1	3.52

ตาราง 2.1 ตัวอย่างการคำนวณหา skin depth ( $\delta$ )

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

เมื่อไฟที่จ่ายให้กับขดลวด มีความถี่ = 25 กิโลเฮิร์ต

∴ จะได้  $\omega = 2\pi \times 25 \times 10^3 = 1.57 \times 10^5$  เรเดียน/วินาที

ค่า resistivity กับค่า permeability เป็นค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็ก

กำหนดให้ค่า relative permeability ของเหล็ก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า curie point

$\mu_r = 60$  และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า curie point (760 °C)  $\mu_r = 1$

ส่วนค่า resistivity เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของเหล็ก ดังนั้นสามารถคำนวณหา

skin depth (δ) ของเหล็กจากตาราง 2.1

ส่วน skin depth ของทองแดง โดยค่า  $\mu_r$  ของทองแดงที่ใช้เป็นลวดตัวนำ มีค่าเท่ากับ 1

resistivity ที่ 50 °C =  $2 \times 10^{-8}$  โอห์ม-เมตร

$$\text{skin depth} = \sqrt{\frac{2 \times 2 \times 10^{-8}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1.57 \times 10^5}}$$

= 0.45 มิลลิเมตร

เพราะฉะนั้น ลวดตัวนำที่ใช้จะต้องเป็นแบบแบน

ส่วนขดลวดจ่ายพลังงานที่ใช้ในการเหนี่ยวนำเหล็กนั้น เมื่อเป็นขดลวดครีมี R มีจำนวนรอบเท่ากับ N รอบ ความกว้างของลวดที่ใช้ทำขดลวดเท่ากับ D ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ S ดังแสดงในรูปที่ 2.4

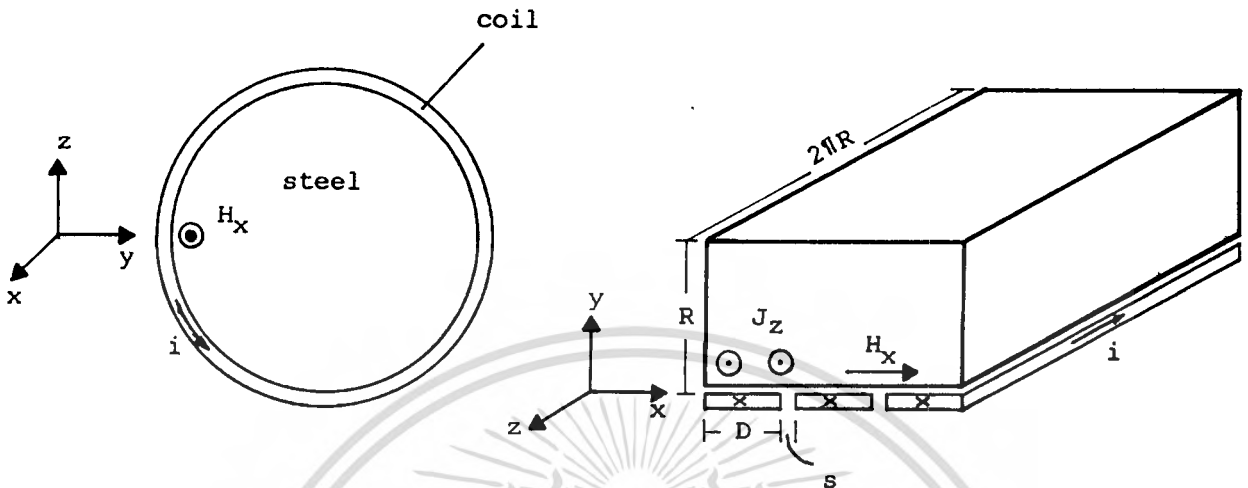
เมื่อจับขดลวดมาคัดแล้วคล้อออกจะได้

$x = ND \pm (N - 1)S$  เมตร

$y = R$  เมตร

$z = 2 \pi R$  เมตร

$V_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mu N \omega \delta H_{\text{om}} Z$  (20)



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบเมื่อคลื่นออกมาเป็นแบบ linear ตามแกน x,y และ z

∴ ถ้าราคาไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดจ่ายพลังงานจะทำให้สามารถหาค่า  $H_{om}$  ได้

$$\text{คั้งนั้กระแสทั้งหมดในขั้งาน} = H_{om} \cdot x$$

$$\text{กระแสทั้งหมดที่ไหลเข้าขดลวด} = \frac{H_{om} x}{N} \quad (21)$$

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

$$= \frac{I_{om}^2}{\rho \cdot 2\delta} (x \cdot z)$$

หรือหากำลังที่ป้อนให้กับขดลวดซึ่งจะเท่ากับกำลังที่สูญเสียในเหล็ก

$$\text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด} = V_{rms} \cdot I_{rms} \cos \theta$$

$$= \frac{1}{2} V_{max} \cdot I_{max} \cos \pi/4$$

$$\text{จาก } V_{\max} = \frac{\mu N \omega H_{\text{om}} z}{\sqrt{2} \alpha}$$

$$I_{\max} = \frac{H_{\text{om}} \cdot x}{N}$$

$$\text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด} = \frac{\mu \omega H_{\text{om}}^2}{2\sqrt{2} \alpha} \cos \pi/4 (x \cdot z)$$

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

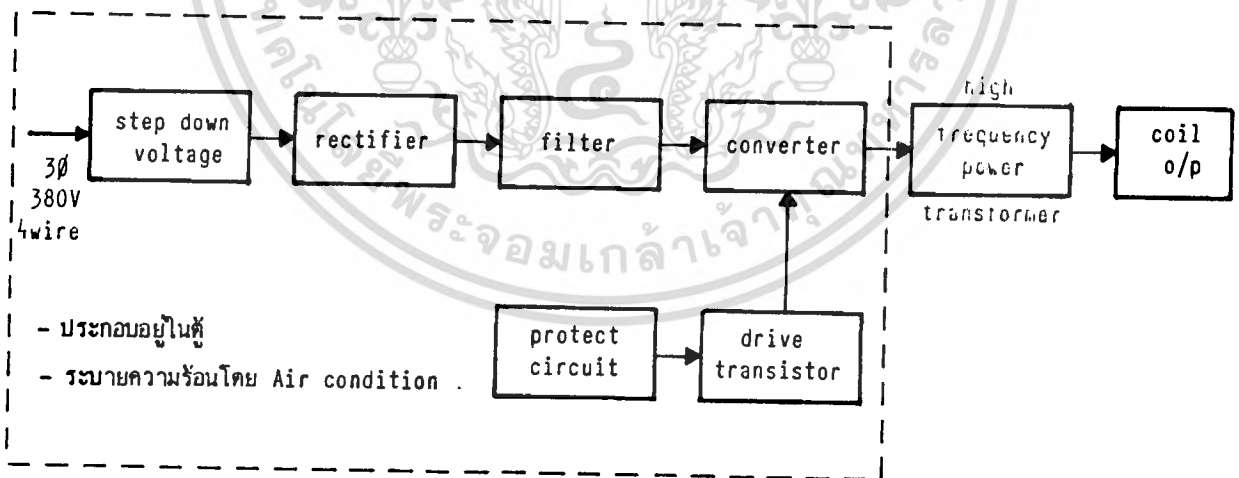
$$\text{กำลังที่ป้อนเข้าสู่ขดลวด} = \frac{\rho H_{\text{om}}^2}{2\delta} (x \cdot z) \quad (22)$$

จากสมการ (20) เมื่อทราบถึงศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดส่งออก จะสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็ก และต่อจากนั้นก็หากระแสที่ไหลในขดลวดคั้งสมการ (21) และสามารถหากำลังที่จ่ายให้กับเหล็ก

### โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

การสร้างเครื่องขั้วผิวแข็งเหล็กโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก สิ่งแรกที่ต้องสร้างสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาให้ผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็ก โดยความถี่ต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้สนามแม่เหล็กไม่ลงไปลึกเกิน จึงทำให้สามารถกำหนดความหนาของผิวแข็งได้ จากนั้นต้องมาพิจารณาว่าจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาเพื่อเป็นตัวส่งพลังงานเข้าไปในเนื้อเหล็กได้อย่างไร

โดยการสร้างเครื่องขั้วผิวแข็งที่มีขนาดกำลัง 50 kVA มีความถี่ 25 กิโลเฮิรตซ์ จะเห็นว่าความถี่ของสนามแม่เหล็กสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟ คือ 50 เฮิรตซ์ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องแปลงความถี่จาก 50 เฮิรตซ์ ไปเป็น 25 กิโลเฮิรตซ์ ทำได้โดยแปลงจากไฟกระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรงแล้วแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่มีความถี่ 25 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีส่วนประกอบวงจรดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Block-Diagram ของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ซึ่งส่วนประกอบที่อยู่ภายในเส้นประจะประกอบรวมกันอยู่ในตู้ควบคุม โดยมีการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้โดยเครื่องปรับอากาศ โดยตู้จะปิดทึบเพื่อป้องกันฝุ่นและสภาวะแวดล้อม ส่วนประกอบที่เหลือ คือ หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง (High-Frequency Power Transformer) และขดลวดจ่ายพลังงาน (Coil O/P) จะอยู่ใกล้กับชิ้นงานที่ต้องการชุบผิวแข็ง โดยจะระบายความร้อนด้วยน้ำ

### 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กว่าประกอบด้วยส่วนต่างๆที่ต่อกัน โดยแบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- 3.1.1 การลดศักดาไฟฟ้า (Stepdown Voltage) ทำหน้าที่ลดศักดาไฟฟ้าลงเหลือครึ่งหนึ่งโดยใช้หม้อแปลง 3 เฟสแบบออโต (3 Phase Auto Transformer)
- 3.1.2 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) จะเป็นตัวแปลงไฟกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง โดยเป็นการต่อแบบวงจรแปลงกระแส 3 เฟสแบบเต็มช่วงคลื่น (3-Phase Full Wave Rectifier)
- 3.1.3 วงจรรอง (Filter) เป็นตัวทำหน้าที่นำสัญญาณจากวงจรแปลงกระแสไฟฟ้ามารองให้เรียบ โดยใช้วงจรรองแบบ ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ (L-C Filter)
- 3.1.4 คอนเวอร์เตอร์ (converter) เป็นตัวแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ โดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง (Power Transistor) เป็นตัวสวิชชิงแบบพุชพูล (Push-Pull)
- 3.1.5 หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง (High-Frequency Power Transformer) เป็นตัวส่งผ่านพลังงานจากศักดาสูง แล้วลดศักดาลงเพื่อที่จะจ่ายไฟให้กลับขดลวดจ่ายพลังงานโดยต้องเป็นหม้อแปลงที่สามารถใช้กลับความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต
- 3.1.6 ขดลวดจ่ายพลังงาน (Coil O/P) เป็นตัวที่ต่อกับขดลวดของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้เข้าไปในเนื้อเหล็กตามที่ต้องการ จะ

ออกแบบเฉพาะชิ้นงานเพื่อที่จะได้ผิวแข็งตามจุดที่ต้องการ

3.1.7 ระบบขับทรานซิสเตอร์ (Drive Transistor) เป็นตัวสร้างสัญญาณป้อนเข้าที่ขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวสลับกันทำงานตามที่ต้องการ

3.1.8 วงจรป้องกัน (Protect Circuit) เป็นวงจรที่สร้างขึ้นมาควบคุมการทำงานของเครื่อง เพื่อป้องกันอันตรายจากความผิดปกติของสัญญาณจากส่วนประกอบต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว เป็นส่วนประกอบหลักในการทำงานของเครื่อง

### 3.2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง

ในการทำงานของเครื่องจำเป็นต้องมีขั้นตอนการทำงานว่าส่วนไหนทำงานก่อน เพื่อการเดินเครื่องอย่างปลอดภัย พร้อมทั้งยังสามารถตั้งเวลาให้ชดเชยจ่ายพลังงานทำงานในช่วงเวลาที่กำหนดได้จากรูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งหน้าที่ของ M/C (Magnetic Contactor) และรูปที่ 3.3 จะแสดงขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของ M/C

เมื่อเปิด C.B. (Circuit Breaker) ไฟจะจ่ายเข้าที่จุดต่อรวม (Terminal) เพื่อจ่ายไฟให้เครื่องปรับอากาศ แทนซ์ และจ่ายไฟภายในตู้ โดยมีลำดับการเปิดเครื่องดังนี้

3.2.1 กด ON-M/C 1 จะมีไฟเลี้ยงเข้าระบบขับทรานซิสเตอร์และวงจรป้องกันสัญญาณที่ออกจากระบบขับทรานซิสเตอร์จะเป็นไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้ ถ้าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสูงหรือต่ำเกิน 5 % หรือเฟสใดเฟสหนึ่งหายไปจะเปิดเครื่อง (ON) ไม่ได้

3.2.2 กด ON-M/C 2 จ่ายไฟ 3 เฟส 380 โวลต์ ให้กับหม้อแปลง 3 เฟสแบบออโต

3.2.3 กด ON-M/C 3 ต่อไฟกระแสดังที่ออกจากวงจรกรองเข้าคอนเวอเตอร์ ทำให้ระบบพร้อมที่จะทำงาน

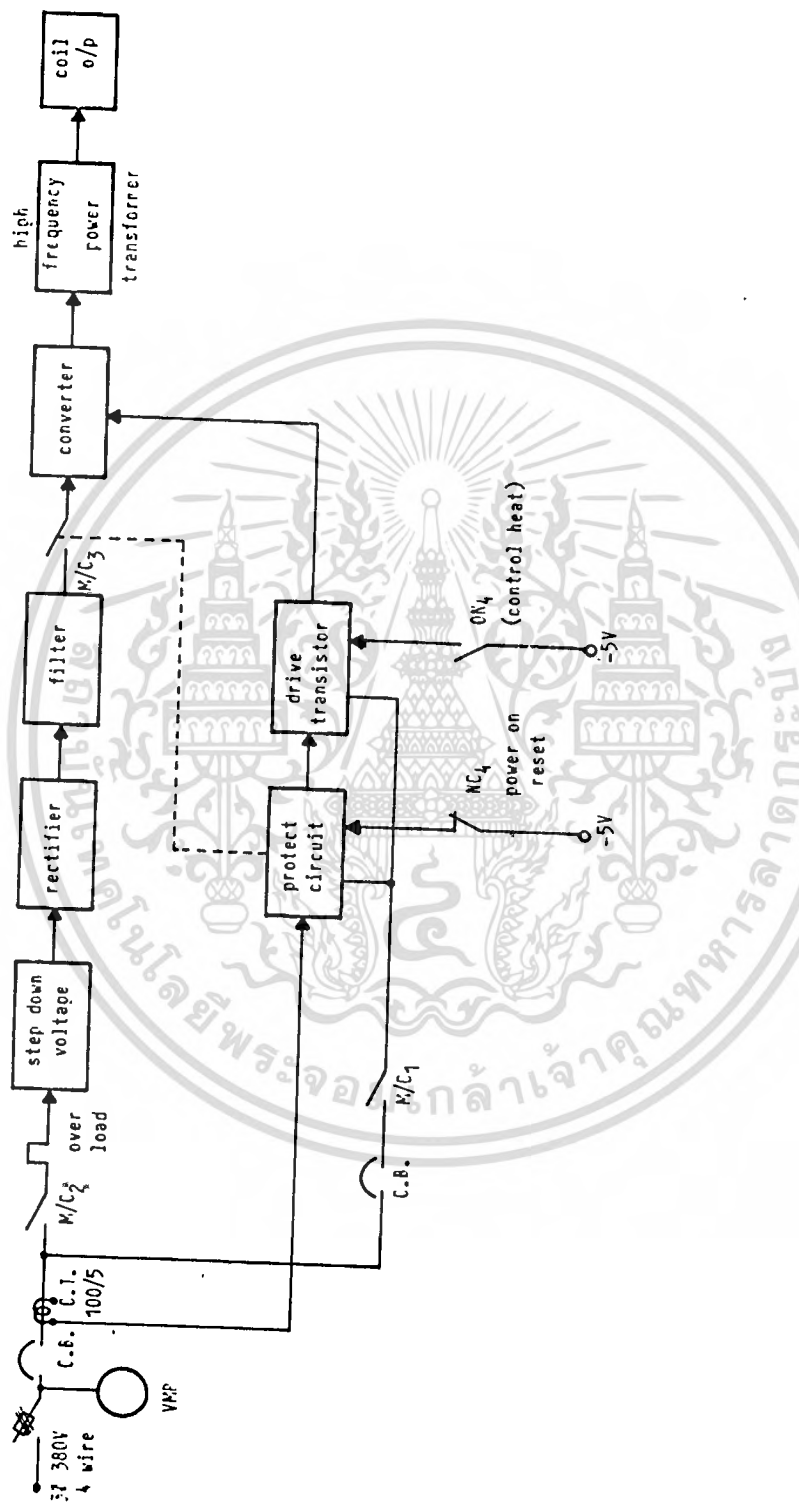
3.2.4 กด ON-M/C 4 สัญญาณความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต จะถูกป้อนเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่สวิชชิงตามพัลส์ (pulse) สัญญาณที่ป้อนช่วงนี้จะมีสนามแม่เหล็กออกจากชดเชยจ่ายพลังงานเพื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ

เหล็กที่ทำการชุบผิวแข็ง และเมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้ตัวตั้งเวลา (timer) จะตัดไฟเลี้ยงขดลวดของ M/C 4 เมื่อต้องการให้ความร้อนอีกก็กด ON-M/C 4

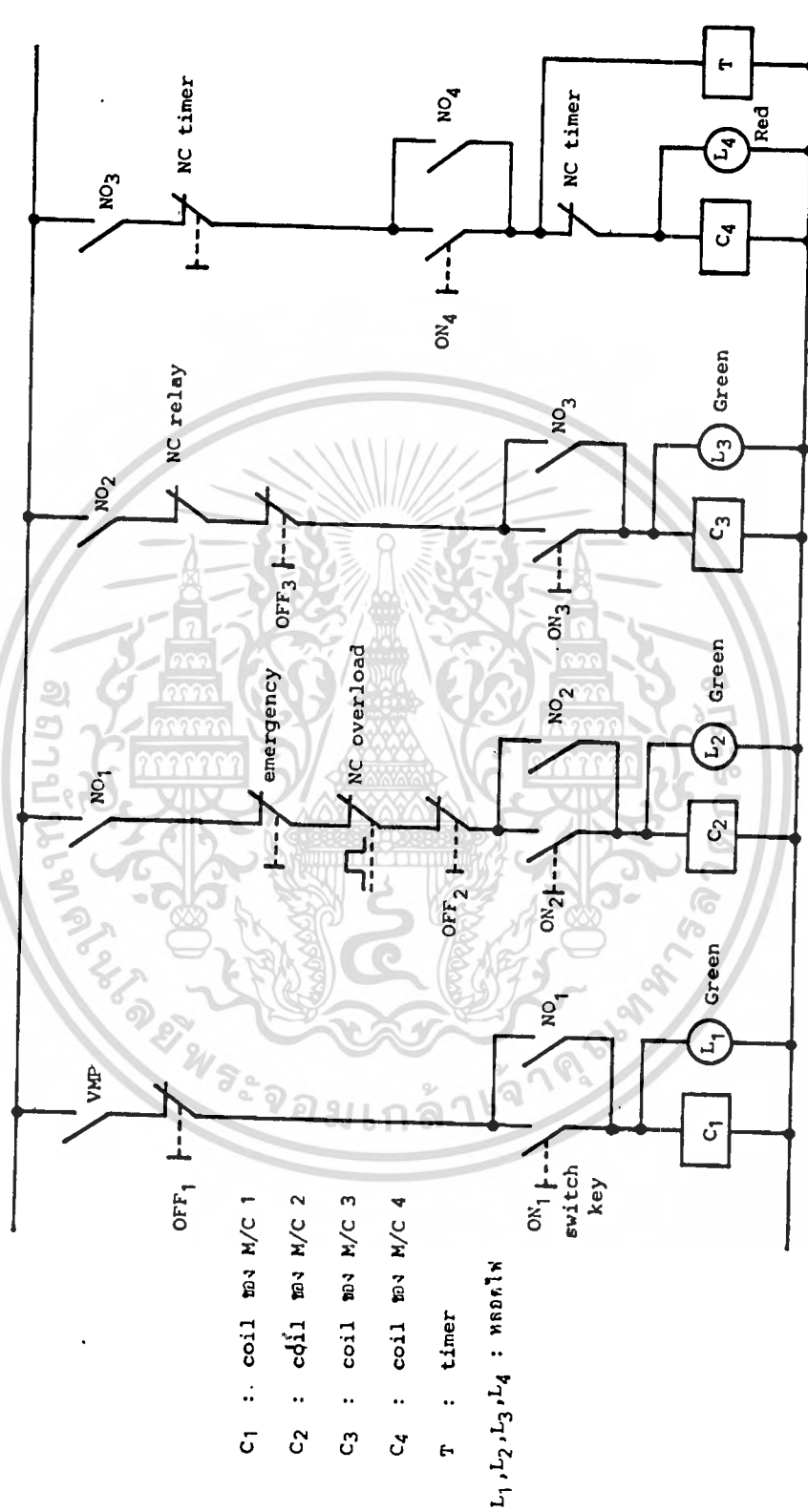
### 3.3 ระบบป้องกัน

การป้องกันการผิดปกติของเครื่อง เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อระบบและป้องกัน เมื่อระบบจ่ายไฟผิดปกติรวมถึงการใช้งานเกินพิกัดของเครื่อง ซึ่งส่วนนี้มีความสำคัญโดยประกอบด้วยระบบป้องกันต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 3.3.1 ระบบป้องกันการลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรในเครื่องจะทำให้ระบบจ่ายไฟจ่ายกระแสลัดวงจรมากกว่าปกติ ดังนั้นระบบจะต้องตัดออก โดยจะมี C.B. เป็นตัวตัด และเพื่อให้ระบบสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้อย่างไม่จำกัด จึงเพิ่ม Fuse Load Break เข้าไป
- 3.3.2 ระบบป้องกันตัดค่าไฟฟ้า เนื่องจากระบบไฟจ่ายเข้าเครื่องอาจมีปัญหาในคานตัดค่าไฟฟ้าสูงหรือต่ำเกินไป ทำให้เครื่องทำงานผิดปกติ หรือเนื่องมาจากเฟสของไฟที่จ่ายเข้าเครื่องเกิดการหายไปเฟสใดเฟสหนึ่ง จะทำให้เกิดความผิดปกติหลายประการในเครื่อง จากปัญหาที่กล่าวมาจำเป็นต้องตัดระบบออก ดังนั้นจึงคิด VMP (Voltage Motor Protector) ซึ่งสามารถทำงานในการตัดไฟผิดปกติและจะไปตัดไฟเลี้ยงของ M/C 1 ทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องได้หรือเครื่องจะหยุดทำงาน พร้อมทั้งจะแสดงสัญญาณไฟว่าเฟสไหนมีปัญหา
- 3.3.3 ระบบป้องกันและการทำงานเกินพิกัด เนื่องจากระบบได้ออกแบบมา ให้มีพิกัดกำลัง 50 KVA ดังนั้นจำเป็นต้องมีตัวตัดเมื่อใช้กำลังเกินพิกัด โดยใช้ตัวโอเวอร์โหลด (Over Load) ควบกับ M/C 2 เพื่อสั่งให้ M/C 2 หยุดทำงาน



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของ M/C



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุมการทำงาน M/C

### 3.4 ระบบระบายความร้อน

เนื่องจากเครื่องเหี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เป็นเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นต้องติดตั้งอยู่ในโรงงาน ซึ่งอุณหภูมิของโรงงานนั้นสูง รวมถึงสภาวะแวดล้อมทางคานฝุ่นและแมลงต่าง ๆ หรือสัตว์ขนาดเล็ก ดังนั้นเราจะป้องกันสภาวะแวดล้อมไม่ให้มีผลต่อเครื่องได้อย่างไร ซึ่งเป็นปัญหาเดียวกันกับการออกแบบวิธีระบายความร้อน

ในเครื่องเหี่ยวนำสนามแม่เหล็กเครื่องนี้ ใช้การระบายความร้อน 2 แบบ เพื่อความเหมาะสมของการใช้งาน คือ

- 3.4.1 เครื่องปรับอากาศ ใช้ระบายความร้อนส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบรวมกันอยู่ในตู้ควบคุม ดังนั้นการออกแบบตู้จะเป็นแบบปิดสนิทไม่มีช่องระบายอากาศ ทำให้สามารถป้องกันสภาวะแวดล้อมที่จะมีผลในการรบกวนเครื่อง รวมทั้งยังสามารถลดความชื้นภายในตู้ ด้วยการระบายความร้อนโดยใช้เครื่องปรับอากาศจะให้ผลดี เนื่องจากเป็นการลดอุณหภูมิภายในตู้ ถ้าใช้วิธีระบายความร้อนโดยพัดลม ถ้าอุณหภูมิโดยรอบสูงการระบายความร้อนจะไม่ดี
- 3.4.2 น้ำระบายความร้อน เป็นวิธีระบายความร้อนในจุดที่เกิดอุณหภูมิขึ้นสูงมากจำเป็นต้องนำความร้อนออกไปอย่างรวดเร็ว โดยส่วนที่จะเกิดความร้อนขึ้นสูงคือหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงและขดลวดจ่ายพลังงานซึ่ง ทั้ง 2 ตัวนี้จะอยู่ใกล้กันงานที่ร้อน และมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวขดลวดจ่ายพลังงานมาก และยังมีความร้อนที่เกิดจากความสูญเสียในแกนเหล็ก แต่ความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดที่ขดลวดจ่ายพลังงานดังนั้นลวดตัวนำที่มาใช้จึงต้องมีภายในกลาง เพื่อให้น้ำไหลเข้าไประบายความร้อนและยังคงไม่มีผลต่อการนำกระแส เพราะกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนตัวเฉพาะที่ผิวของลวดตัวนำ และส่วนที่ต้องระบายความร้อนอีกส่วนหนึ่ง คือ ทางคานทุติยภูมิของหม้อแปลงจ่ายความถี่สูงโดยออกแบบให้เชื่อมท่อน้ำติดกับแท่งตัวนำ

## การออกแบบเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

จากบทที่แล้วได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของเครื่องว่าประกอบด้วยอะไรบ้าง แต่ละส่วนมีหน้าที่อย่างไร ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละส่วนรวมถึงหลักการในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบจะมีคหหลักพยายามใช้ของที่มีอยู่ในห้องตลาดโดยทั่วไป

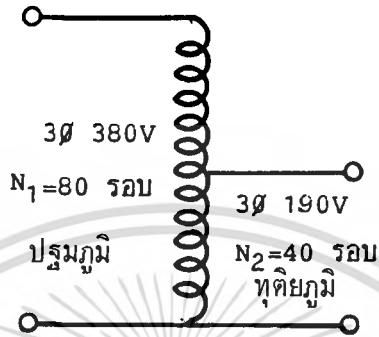
โดยในตอนเริ่มสร้างได้ทดลองกับชิ้นงานเล็ก ๆ ก่อน โดยทำเครื่องขนาดเล็กทดลองเพื่อที่จะทราบปัญหาเพื่อใช้ในการออกแบบ การสร้างความถี่โดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นตัวสวิชซึ่งโดยต่อแบบพุช-พูล ปัญหาของการสวิชซึ่งก็คือเมื่อไอทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน จะมีการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าเนื่องมาจากภาระที่เราใช้เป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากการถ่ายเทพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กกลับคืนสู่ระบบจ่ายไฟกระแสตรง ดังนั้นการออกแบบระบบจะต้องมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1 การลดศักดาไฟฟ้า

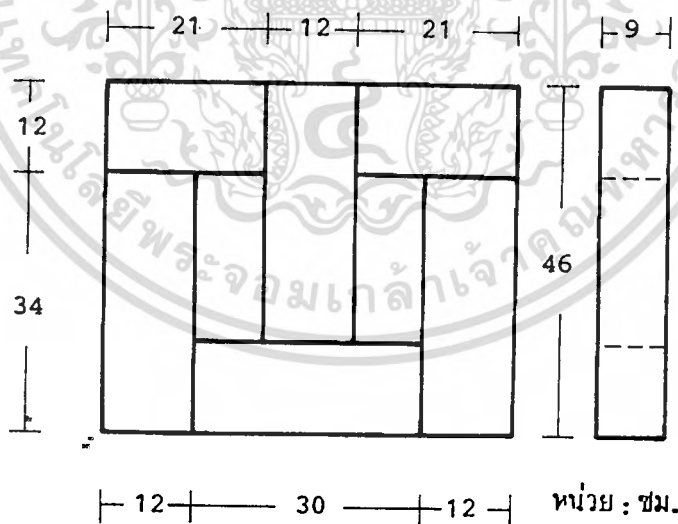
ในการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวสวิชซึ่งแบบพุช-พูล จะทำให้ศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่กรอมทรานซิสเตอร์จะเป็น 2 เท่าของศักดาไฟกระแสตรงที่จ่ายให้ระบบสวิชซึ่ง ดังนั้นถ้ารับไฟกระแสสลับแล้วมาแปลงเป็นไฟกระแสตรง โดยไม่มีการลดระดับศักดาไฟฟ้าจะได้ศักดาไฟกระแสตรงเท่ากับ 539 โวลต์โดยประมาณ เพราะฉะนั้นจะหาทรานซิสเตอร์ที่ทนแรงดัน 1,078 โวลต์ได้เป็นเรื่องยาก

จึงได้ลดแรงคั่นลงเหลือครึ่งหนึ่งของแรงคั่นที่จ่ายจากการไฟฟ้า เพราะฉะนั้นศักดาไฟฟ้าต่อเฟสเท่ากับ 110 โวลต์ โดยใช้หม้อแปลง 3 เฟสแบบออโต(3 Phase Auto Transformer) ซึ่งมีวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.1 และขนาดของแกนของเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.2 โดยใช้แกนเหล็กชนิด Cold-Roll Grain Oriented Silicon Steel

หม้อแปลงเป็นแบบแห้ง (Dry Type) โดยออกแบบให้ขดลวดแต่ละชั้นมีเบกาลีทรวงระหว่างชั้นเพื่อให้เป็นช่องระบายความร้อนที่เกิดขึ้น การออกแบบพยายามให้จำนวนชั้นของขดลวดน้อยเพื่อการระบายความร้อนที่ดี



รูปที่ 4.1 หมอแปลงแบบออโต



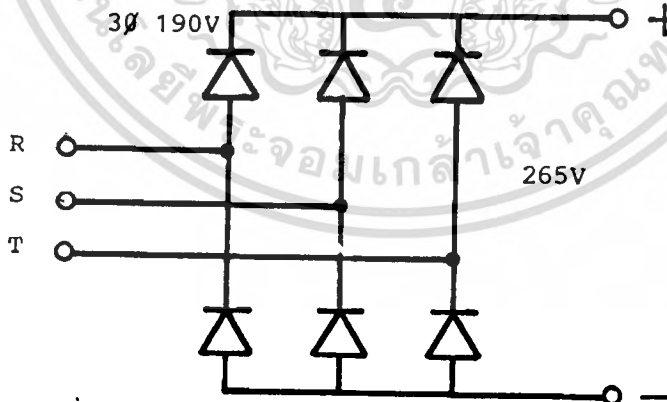
รูปที่ 4.2 แสดงแกนเหล็กของหมอแปลง 3 เฟส แบบออโต

ขนาดของหม้อแปลง 3 เฟสแบบออโต

- ศักดิ์คาไฟฟ้าป้อนเข้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิรต์ ต่อแบบววาย (Y-Connected)
- ศักดิ์คาไฟฟ้าส่งออก 3 เฟส 190 โวลต์ 50 เฮิรต์
- พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก = 108 ตารางเซนติเมตร  
( แขนเหล็กหน้ากว้าง 12 เซนติเมตร วางซ้อนกันหนา 9 เซนติเมตร )
- ลวดทองแดงที่ใช้เป็นตัวนำขนาด 4×7 ตารางมิลลิเมตร
- จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ = 80 รอบ
- จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ = 40 รอบ  
( ขั้วออกต่อที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของขดลวด )

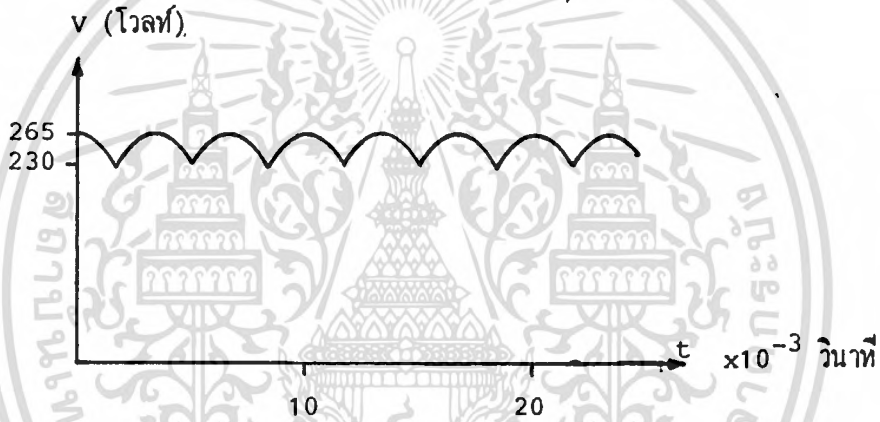
#### 4.2 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า

ทำหน้าที่รับไฟกระแสสลับจากหม้อแปลง 3 เฟสมาแปลงเป็นไฟกระแสตรง โดยใช้ไดโอด มาต่อเป็นวงจรแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟสแบบเต็มช่วงคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟส แบบเต็มช่วงคลื่น

เพราะฉะนั้นศักดาไฟฟ้าสูงสุดจาก 3 เฟส 190 โวลต์เท่ากับ 269 โวลต์  
ศักดาไฟฟ้าคร่อมไดโอดแต่ละประมาณ 2 โวลต์  
ไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากวงจรแปลงกระแสเท่ากับ 265 โวลต์  
กระแสพิคที่ออกจากวงจรแปลงกระแส ที่ 50 kVA เท่ากับ 189 แอมป์  
สัญญาณส่งออกของวงจรแปลงกระแสแสดงดังรูปที่ 4.4

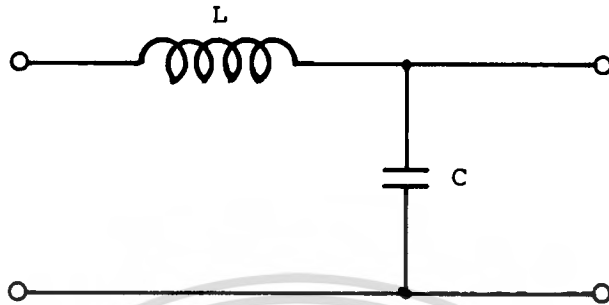


รูปที่ 4.4 สัญญาณส่งออกของวงจรแปลงกระแส

#### 4.3 วงจรกรองสัญญาณ

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณ โดยการใช้วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ จะยึดหลักพลังงานที่ต้องการทดแทนขณะที่ศักดาตกลง จากรูปที่ 4.5 เป็นวงจรกรองสัญญาณ

โดยการออกแบบโดยประมาณ โดยคิดว่าภาวะที่ต่อจากวงจรกรองเป็นความต้านทานที่มีค่าคงที่ขณะให้กำลัง 50 kVA และศักดาป้อนเข้าวงจรกรองดูจากรูป 4.4



รูปที่ 4.5 วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

เพราะฉะนั้น 50 kVA ที่ 265 โวลต์ ;  $I = 50,000/265 = 189$  แอมป์  
 ดังนั้นคิดเป็นความต้านทานที่ต่อ =  $265/189 = 1.4$  โอห์ม

ที่ 230 โวลต์ ; จะมีกระแสไหล =  $230/1.4 = 164$  แอมป์

P : ผลต่างของกำลังที่เข้าสู่ความต้านทานขณะ 265 โวลต์และ 230 โวลต์

$$P = 189 \times 265 - 164 \times 230 = 12,300 \text{ วัตต์}$$

W : เป็นพลังงานที่ต้องการมาทดแทน

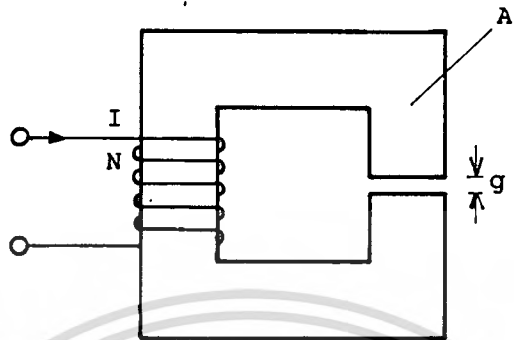
$$W = 1/4 \times 12,300 \times 20/12 \times 10^{-3} = 5.12 \text{ จูล}$$

#### 4.3.1 วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ (L-Filter)

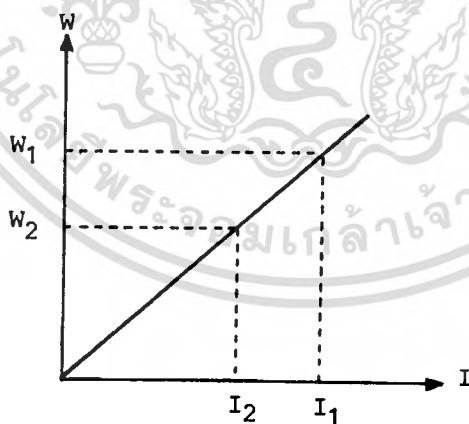
ทำงานได้โดยเก็บพลังงานอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก และเมื่อกระแสที่ไหลในขดลวดที่พันเป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้พลังงานที่สะสมมีการเปลี่ยนแปลง ด้วย

จาก Ampere's Law

$$\oint H \cdot dl = NI$$



รูปที่ 4.6 แสดงค่าต่างๆของตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากวงจรแม่เหล็กมีช่องอากาศ (Air-gap) และทำงานอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กยังไม่อิ่มตัว ให้คิดว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ทั้งหมดตกคร่อมอยู่ในช่องอากาศ โดยที่ช่องอากาศกว้างเท่ากับ  $g$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6

$$NI = H \cdot g = \frac{B}{\mu_0} \cdot g$$

$$N = \frac{B \cdot g}{\mu_0 I}$$

เมื่อ  $N$  : เป็นจำนวนรอบของลวดตัวนำ

$I$  : เป็นกระแสที่ไหลในลวดตัวนำ

ไม่ว่ากระแสไหลจะเป็นเท่าใดในช่วงเชิงเส้น แสดงในรูปที่ 4.7 ดังนี้

$$\frac{B_1 g}{\mu_0 I_1} = \frac{B_2 g}{\mu_0 I_2}$$

$$B_2 = B_1 \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

เมื่อ  $I_1$  : เป็นค่ากระแสสูงสุดที่ไหลในขดลวด

$B_1$  : เป็นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศขณะกระแส  $I_1$

$I_2$  : เป็นค่ากระแสที่ลดลงมาต่ำสุดในขดลวด

$B_2$  : เป็นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะกระแส  $I_2$

จากสมการของพลังงานที่สะสมในวงจรแม่เหล็ก

$$W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A \cdot g$$

$W$  : เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในช่องอากาศ

$A$  : เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศ

เพราะฉะนั้นผลต่างของพลังงานที่สะสมในช่องอากาศ ( $\Delta W$ ) ขณะที่กระแส  $I_1$  และ  $I_2$

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{1}{2} \frac{A \cdot g}{\mu_0} (B^2 - B^2) \\ &= \frac{1}{2} \frac{A \cdot g}{\mu_0} B^2 \left(1 - \frac{I_2^2}{I_1^2}\right) \end{aligned}$$

ในการออกแบบให้ที่กระแสไหลสูงสุดนี้ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1 เทสลา ดังนั้น  $B = 1$  เทสลา

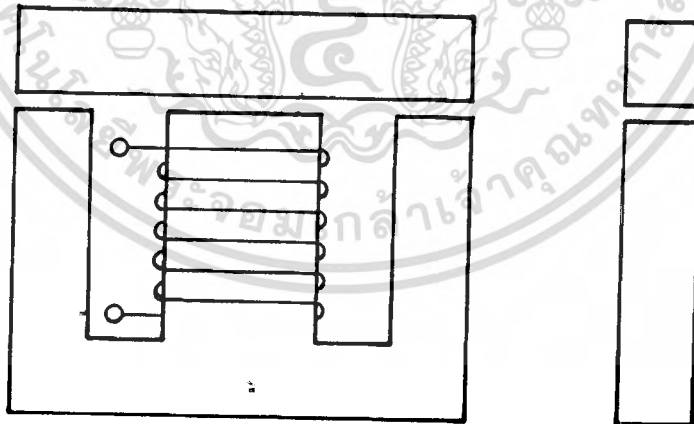
$$\Delta W = 5.12 \text{ จูล}$$

ออกแบบเป็นวงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัวขนานกัน เพื่อแบ่งกระแสที่ไหลในลวดตัวนำ

เพราะฉะนั้น  $I_1 = 189/2 = 94.5$  แอมป์

$$I_2 = 169/2 = 82 \text{ แอมป์}$$

$$\Delta W = 5.12/2 = 2.56 \text{ จูล}$$



รูปที่ 4.8 แกน E-I ที่ใช้ทำตัวเหนี่ยวนำ

ใช้แกนมาตรฐาน E-I ขนาด 3 นิ้ว เรียงซ้อนกันหนา 4 นิ้ว ดังรูปที่ 4.8 ดังนั้น สามารถหาความกว้างของช่องอากาศ

$$\begin{aligned}
 A &= 3 \times 4 \times (2.5)^2 \times 10^{-4} && \text{ตารางเมตร} \\
 &= 7.7 \times 10^{-3} && \text{ตารางเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

จะได้

$$2.56 = \frac{1}{2} \frac{7.7 \times 10^{-3} \times g}{4\pi \times 10^{-7}} \times (1)^2 \left[ 1 - \frac{(82)^2}{(94.5)^2} \right]$$

$$\therefore g = 3.4 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$$

ดังนั้นจะใช้ช่องอากาศกว้างประมาณ 4 มิลลิเมตร เนื่องจากใช้แกน E-I มาตรฐาน ดังนั้นช่องอากาศระหว่างแกน E-I จะเป็นระยะเท่ากับ 2 มม. โดยใช้เบกาไลท์หนา 2 มม. กันระหว่างแกน E-I

หาจำนวนรอบของลวดที่พัน

$$N = \frac{B_1 \cdot g}{\mu_0 I_1}$$

$$\therefore N = \frac{1 \times 4 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 94.5} = 34 \text{ รอบ}$$

ลวดที่ใช้พันในวงจรรอง แต่ละตัวใช้ขนาด 14 x 2.7 ตารางมิลลิเมตร

### 4.3.2 วงจรกรองแบบตัวเก็บประจุ (C-Filter)

การออกแบบใช้ตัวเก็บประจุ เป็นตัวช่วยทดแทนพลังงานที่ขาดหายไปในช่วงกระเพื่อม (ripple) ของสัญญาณ ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ตัวเก็บประจุมาต่อดังรูปที่ 3.5

$$\text{พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ} = \frac{1}{2} C V^2$$

พลังงานที่ถูกจ่ายออกจากตัวเก็บประจุ เมื่อลดศักดาจาก  $V_1$  ไปในศักดาไฟฟ้า  $V_2$

$$\text{พลังงานที่จ่ายออกมา} = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2)$$

ในการออกแบบตัวเก็บประจุควรมีขนาดใหญ่ เนื่องจากจะช่วยให้การกระเพื่อมมีค่าน้อยลงได้มากแต่ตัวเก็บประจุที่ใช้กับค่าศักดาสูงๆ โดยที่มีค่าความเก็บประจุสูงนั้นหาได้ยากในท้องตลาดจึงใช้ตัวเก็บประจุที่มีศักดาไฟฟ้ากระแสตรงสูงเพียงพอมานานกันแทน

จากศักดาที่ออกจากวงจรแปลงกระแสที่มีขนาดแรงดัน 265 โวลต์ ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้จะมีศักดา 330 โวลต์ โดยเหตุผลเพื่อที่ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอาจสูงขึ้นได้และอีกประการหนึ่งก็เนื่องมาจากการสวิตชิงของทรานซิสเตอร์บนภาระที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดมีการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน ซึ่งเป็นลักษณะย้อนคืนพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กจากภาระซึ่งเรียกว่าสไปค์ (Spike) ซึ่งพลังงานบางส่วนจะถูกส่งคืนกลับไปทั่ววงจรกรองแบบตัวเก็บประจุด้วย

ตัวเก็บประจุที่ใช้ขนาด 330 โวลต์ 100 ไมโครฟารัด ขนาดกัน 20 ตัว

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความจุ ;  $C = 100 \times 20 = 2,000$  ไมโครฟารัด

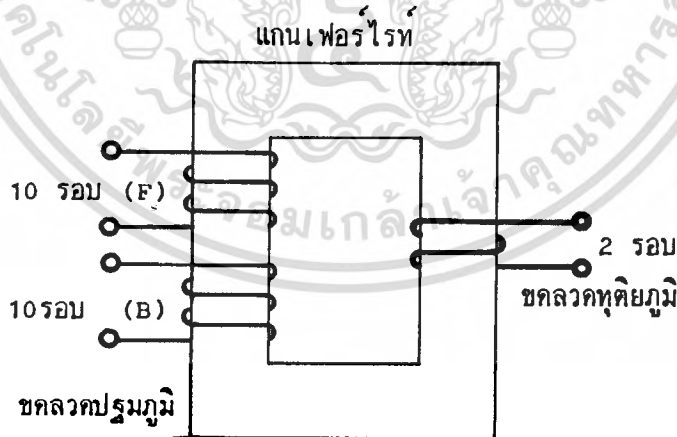
$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่จ่ายออกจากตัวเก็บประจุ} &= \frac{1}{2} \times 0.002 \times (265^2 - 230^2) \\ &= 17.3 \text{ จูล} \end{aligned}$$

จากวงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้ออกแบบมาแล้ว ประโยชน์ที่ได้รับอีกอย่างหนึ่งคือ จะช่วยเป็นตัวลดสัญญาณรบกวนจากการสวิตชิง เพื่อไม่ให้จ่ายคืนกลับมาให้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส

#### 4.4 หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง (High Frequency Power Transformer)

เป็นตัวทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากสัปดาห์ไฟฟ้าสูง ลดลงเป็นสัปดาห์ไฟฟ้าค่าแต่กระแสสูงเพื่อที่จ่ายให้กับขดลวดจ่ายพลังงาน โดยทางด้านขดลวดจ่ายพลังงานนั้นต้องการกระแสไหลผ่านสูงเพื่อที่จะสร้างสนามแม่เหล็ก และเนื่องจากความถี่ไฟที่ป้อนเข้าหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงเท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ต ดังนั้นแกนของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงจะเป็นแกนเฟอร์ไรท์ เพื่อที่ความสูญเสียในแกนเหล็กจะต่ำ

เนื่องจากทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงต่อกับ คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ซึ่งเป็นแบบพุช-พูล (Push-Pull) ดังนั้นขดลวดปฐมภูมิจะมีสองขดคือ Forward Coil (F) และ Backward coil (B) ซึ่งจะทำงานสลับกันดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนขดลวดทุติยภูมิจะมีขดเดียวและกระแสที่ไหลในลวดตัวนั้นมาก ดังนั้นต้องระบายความร้อนโดยใช้น้ำ ซึ่งขดลวดทุติยภูมิจะเป็นท่อสี่เหลี่ยมเพื่อที่ภายในท่อจะมีน้ำไหลผ่าน เพื่อนำความร้อนออกจากลวดตัวนำ



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง

ส่วนของแกนของหม้อแปลงที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์นั้นขนาดใหญ่ ซึ่งหาซื้อเป็นลักษณะแกน E-I มาตรฐานไม่ได้ จึงใช้แกนเฟอร์ไรต์แบบแท่งยาวนำมาตัดประกอบมาเป็นลักษณะของ core type ดังแสดงในรูปที่ 4.10

แท่งเฟอร์ไรต์แต่ละแท่งหนา 0.9 ซม. กว้าง 1.0 ซม. ตรงมุมปาดโค้ง พื้นที่หน้าตัดแต่ละแท่งเท่ากับ  $0.75 \text{ (ซม)}^2$  ยาว 18 ซม. นำมาเรียงซ้อนกัน 21 แท่ง โดยใช้กาว epoxy เป็นตัวยึดระหว่างแท่ง

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์} &= 0.75 \times 21 \times 10^{-4} \\ &= 15.75 \times 10^{-4} \quad (\text{เมตร})^2 \end{aligned}$$

- ขดลวดปฐมภูมิทั้งหมด 2 ขด

โดยแต่ละขดมีจำนวนรอบเท่ากับ 10 รอบ

ขนาดของเส้นลวดทองแดงใช้ลวดแบนขนาด  $14 \times 2.7 \text{ (มม)}^2$

- ขดลวดทุติยภูมิ

มีอยู่ขดเดียวโดยพันไว้ 2 รอบ ขดลวดที่จะใช้จะมีลักษณะท่อสี่เหลี่ยมขนาดความหนาของท่อเท่ากับ 3 มม

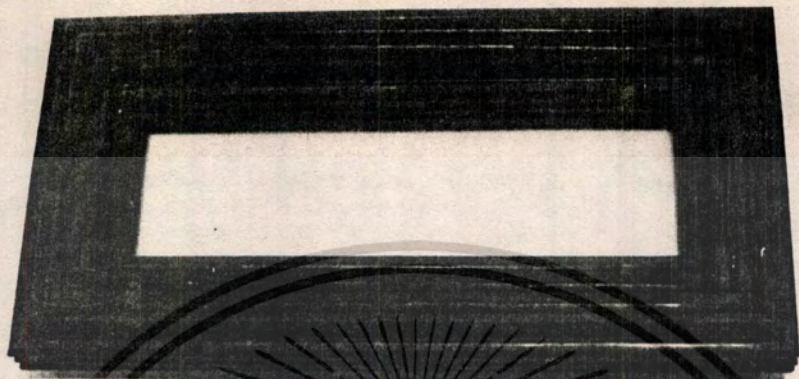
โดย ท่อ กว้าง 50 มม

หนา 16 มม

อัตราส่วนจำนวนรอบ (turn-ratio)

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ}}{\text{จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ}} \\ &= \frac{10}{2} = 5 \end{aligned}$$

แกนเฟอร์ไรต์จะอิมค้ำที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 0.2 เทสลา



รูปที่ 4.10 แสดงแกนเฟอร์ไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

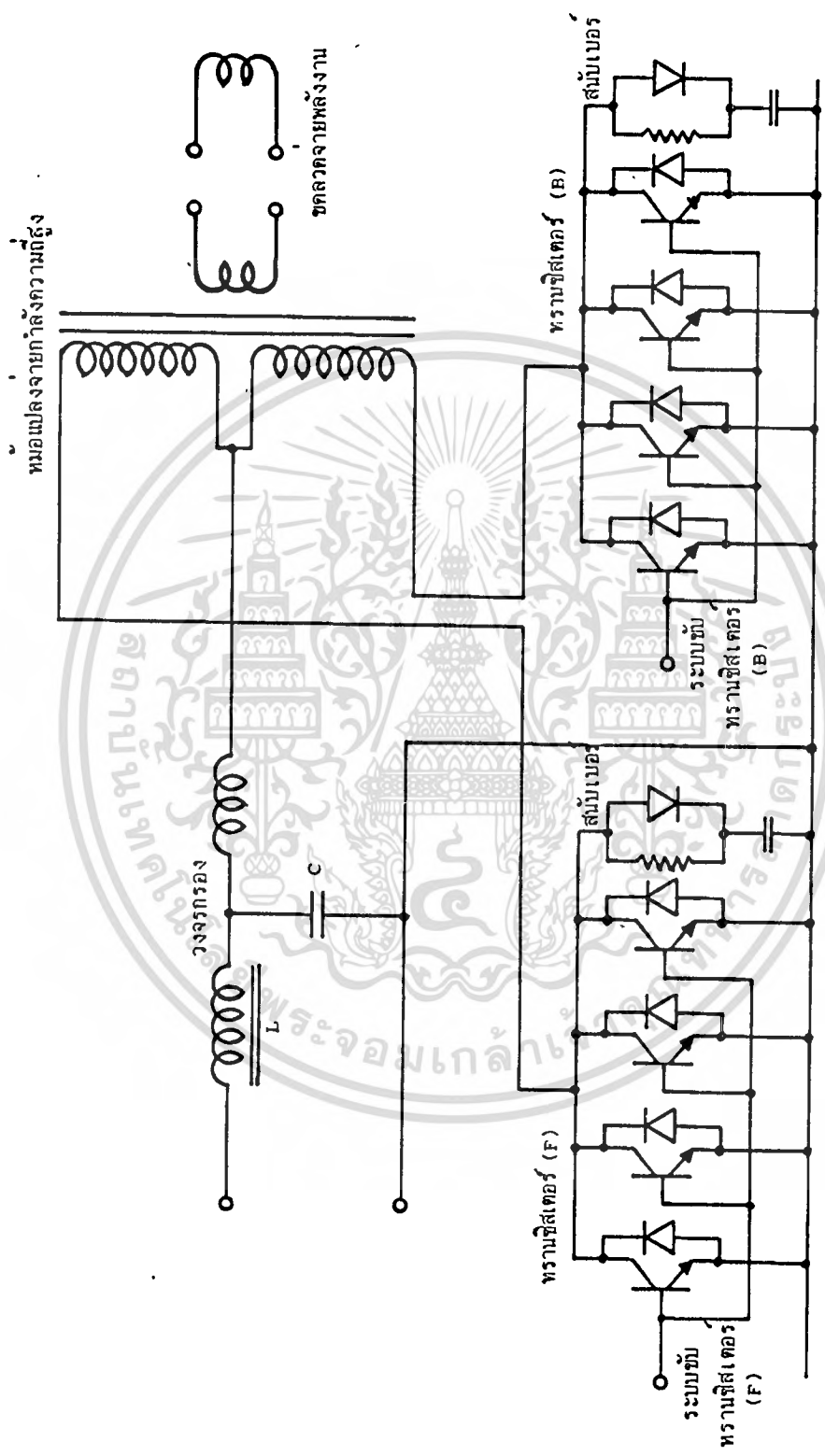
#### 4.5 ขดลวดจ่ายพลังงาน

เป็นส่วนที่ต่อจากหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง โดยที่ขดลวดจ่ายพลังงานจะเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กให้เข้าไปในเหล็กเพื่อที่จะทำให้เหล็กร้อน โดยที่กระแสในขดลวดจ่ายพลังงานนั้นมีความหนาแน่นมาก ทำให้ขดลวดจ่ายพลังงานจะร้อน และความร้อนที่ขดลวดจ่ายพลังงานอีกส่วนหนึ่งมาจากชิ้นงาน ดังนั้นต้องมีการระบายความร้อนออกจากขดลวดจ่ายพลังงาน โครงสร้างของลวดตัวนำจะทำจากท่อเพื่อที่จะให้น้ำไหลอยู่ภายใน และเนื่องจากผลของ skin effect กระแสที่ไหลในลวดตัวนำจะเคลื่อนเฉพาะที่ผิวเท่านั้น

การออกแบบขดลวดจ่ายพลังงานเพื่อคำนวณหาค่าต่าง ๆ จากบทที่ 2 ในการใช้งาน ลวดตัวนำของขดลวดจ่ายพลังงานจะต้องอยู่ใกล้กับเหล็กที่ต้องการให้เหนียวมากที่สุด เพราะจะทำให้สนามแม่เหล็กผ่านในเนื้อเหล็กมากที่สุด โดยลักษณะของขดลวดแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขดลวดจ่ายพลังงาน



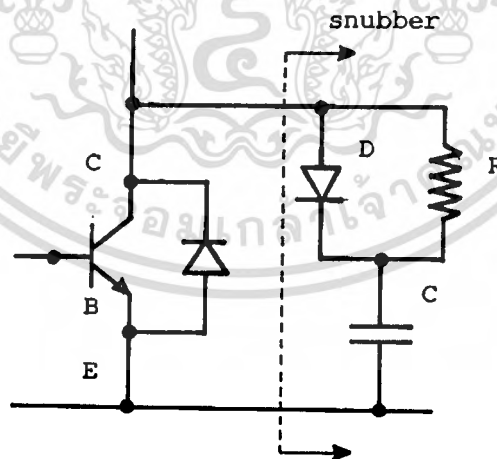
รูปที่ 4.12 การต่อวงจรของทรานซิสเตอร์

#### 4.6 คอนเวอร์เตอร์

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับความถี่ 25 กิโลเฮิรต์ โดยใช้การสวิตซ์ชิ่งของทรานซิสเตอร์โดยใช้วงจรแบบ พุช-พูล คือใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว แต่ละตัวต่อกับแต่ละขดของขดลวดปฐมภูมิ ของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวสลับกันทำงาน

เนื่องจากทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวทำงานพร้อมกันไม่ได้ ดังนั้นช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์จะมีช่วงว่างที่ทรานซิสเตอร์ไม่ได้ทำงานทั้งสองตัวเป็นผลทำให้เกิดสไปค์ ซึ่งสไปค์ที่เกิดขึ้นคร่อมขา C กับ E ของทรานซิสเตอร์อาจมีผลให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้

วิธีลดสไปค์ทำได้โดยเพิ่ม snubber (Snubber) แสดงในรูปที่ 3.13 โดย snubber จะต่อคร่อมขา C กับ E ของทรานซิสเตอร์ทำงาน โดยเมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน จะทำให้ศักดาไฟฟ้าคร่อมขา C กับ E สูงขึ้น ตัวเก็บประจุจะถูกป้อนเก็บประจุ โดยผ่านไดโอดซึ่งเป็นชนิด Fast Recovery Diode ดังนั้นพลังงานที่สะสมในรูปสนามแม่เหล็กจะถูกจ่ายมาเก็บในตัวเก็บประจุ และเมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานตัวเก็บประจุจะคายประจุผ่านความต้านทานที่ต่อขนานกับไดโอด



รูปที่ 4.13 แสดงการต่อ snubber

เนื่องจากต้องการความถี่ที่สวิชชิ่ง 25 กิโลเฮิรท์ ซึ่งช่วงคาบของเวลาเท่ากับ  $40 \times 10^{-6}$  วินาที ดังนั้นทรานซิสเตอร์ทั้ง Forward และ Backward ต้องสลับกันทำงานในช่วงคาบเวลานี้ โดยแต่ละตัวจะต้องใช้เวลาทำงานน้อยกว่า  $20 \times 10^{-6}$  วินาที

ในการเลือกทรานซิสเตอร์ต้องสามารถทนศักดาไฟฟ้าได้เกิน 2 เท่า ของศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่าย รวมทั้งเวลาในการช่วงเปิด (ON) และ ช่วงปิด (OFF) ทรานซิสเตอร์ต้องไม่เกินช่วงเวลา การระบายความร้อนออกจากทรานซิสเตอร์มีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดขนาดการระบาย กระแสนอกจากข้อมูลที่ให้มาจากผู้ผลิต

ส่วนใหญ่ทรานซิสเตอร์กำลังที่ใช้ในการสวิชชิ่งมี Free Wheeling Diodes ประกอบ อยู่ในส่วนของทรานซิสเตอร์เรียบร้อย โดยไดโอดจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านให้พลังงานคืนกลับสู่แหล่งจ่ายไฟ

ดังนั้นการลัดสไปค์จะต้องมีทั้งสับเบอรั และแหล่งจ่ายไฟจะต้องสามารถรับพลังงานคืนกลับได้ ตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับขาออกของวงจรรอง ต้องสามารถตอบสนองกับช่วงเวลาของสไปค์ เพื่อที่ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้ในสับเบอรัจะได้ไม่มีขนาดใหญ่ และลดการสูญเสียในสับเบอรั

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ทั้ง Forward กับ Backward นั้น ใช้ทรานซิสเตอร์ขนาดกัน 4 ตัว เพื่อให้รับกระแสได้มากขึ้นเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะได้น้อยลง และสัญญาณที่ป้อนเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ได้มาจากวงจรรบบขับทรานซิสเตอร์ โดยสัญญาณที่ป้อนเข้าขาเบสในช่วงหยุดไม่ให้ทรานซิสเตอร์ทำงานจะให้ป้อนไบอัสย้อนกลับ

#### 4.7 ระบบขับทรานซิสเตอร์

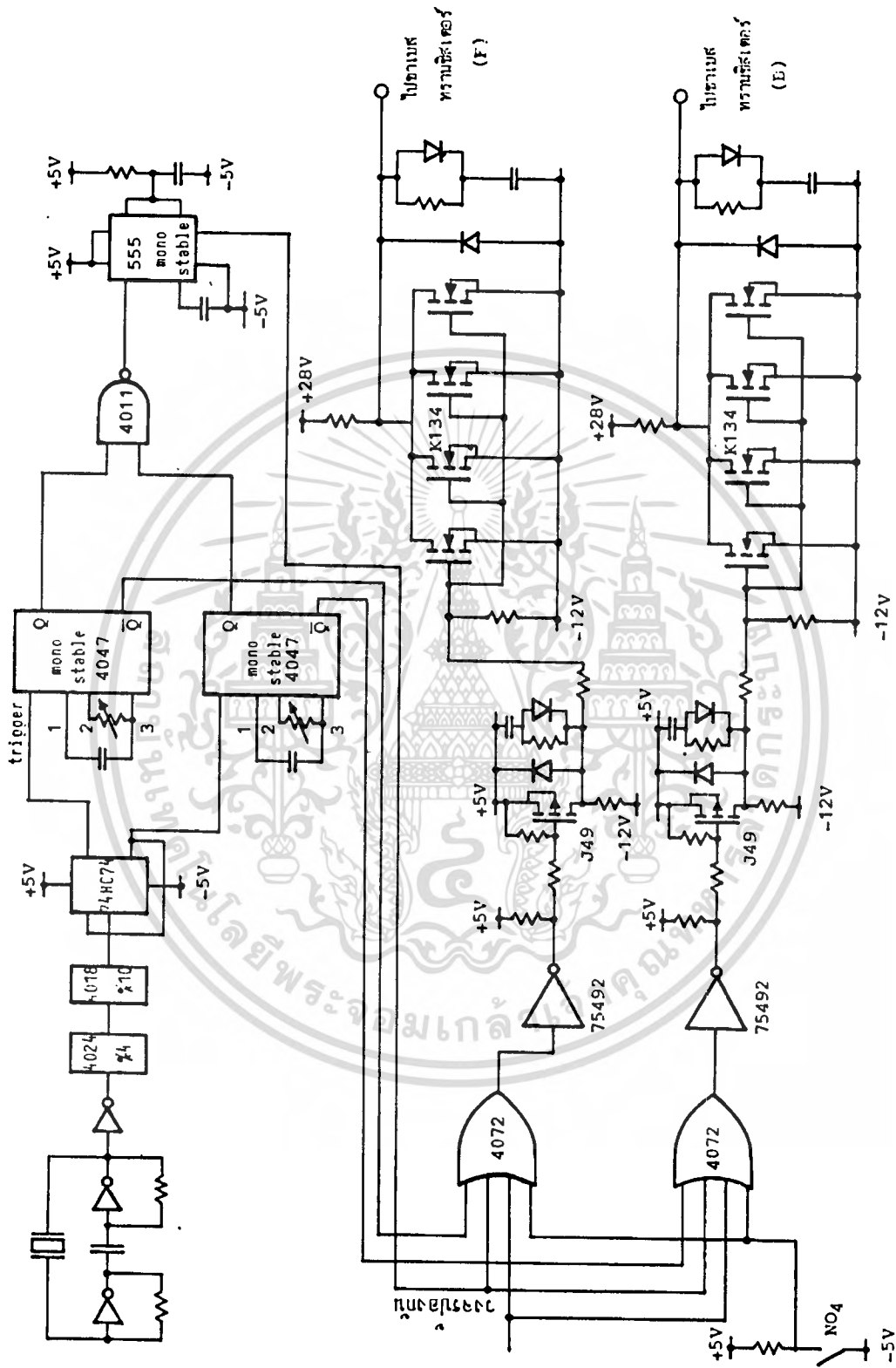
วงจรรบบขับทรานซิสเตอร์ จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อป้อนที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ โดยออกแบบให้กระแสไบอัสทรานซิสเตอร์ 5 แอมป์ และเมื่อต้องการหยุดทรานซิสเตอร์ต้องทำการป้อนไบอัสย้อนกลับโดยออกแบบให้ป้อนไบอัสย้อนกลับ เท่ากับ  $-10$  โวลต์

วงจรรบบขับทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.14 การทำงานของวงจรมี Crystal เป็นตัวกำเนิดความถี่และหารความถี่ออกมาเป็น 25 กิโลเฮิรท์ จากนั้นเข้าวงจรปรับช่วงเปิดและปิดของสัญญาณและป้อนเข้าสู่ or-gate ซึ่งทำหน้าที่ปิดกั้นสัญญาณไม่ให้ออกไปที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ จาก

or-gate จะป้อนเข้าสู่ระบบขับ โดยจะป้อนเข้า Open Collector Transistor ซึ่งเป็น IC-drive เพื่อขับ J-FET จาก J-FET ก็จะไปขับ K-FET โดยที่ K-FET จะทำหน้าที่เป็น O/P ของระบบขับทรานซิสเตอร์เพื่อต่อเข้ากับขาเบสของทรานซิสเตอร์ โดยมี Timing diagram ดังแสดงในรูปที่ 4.15

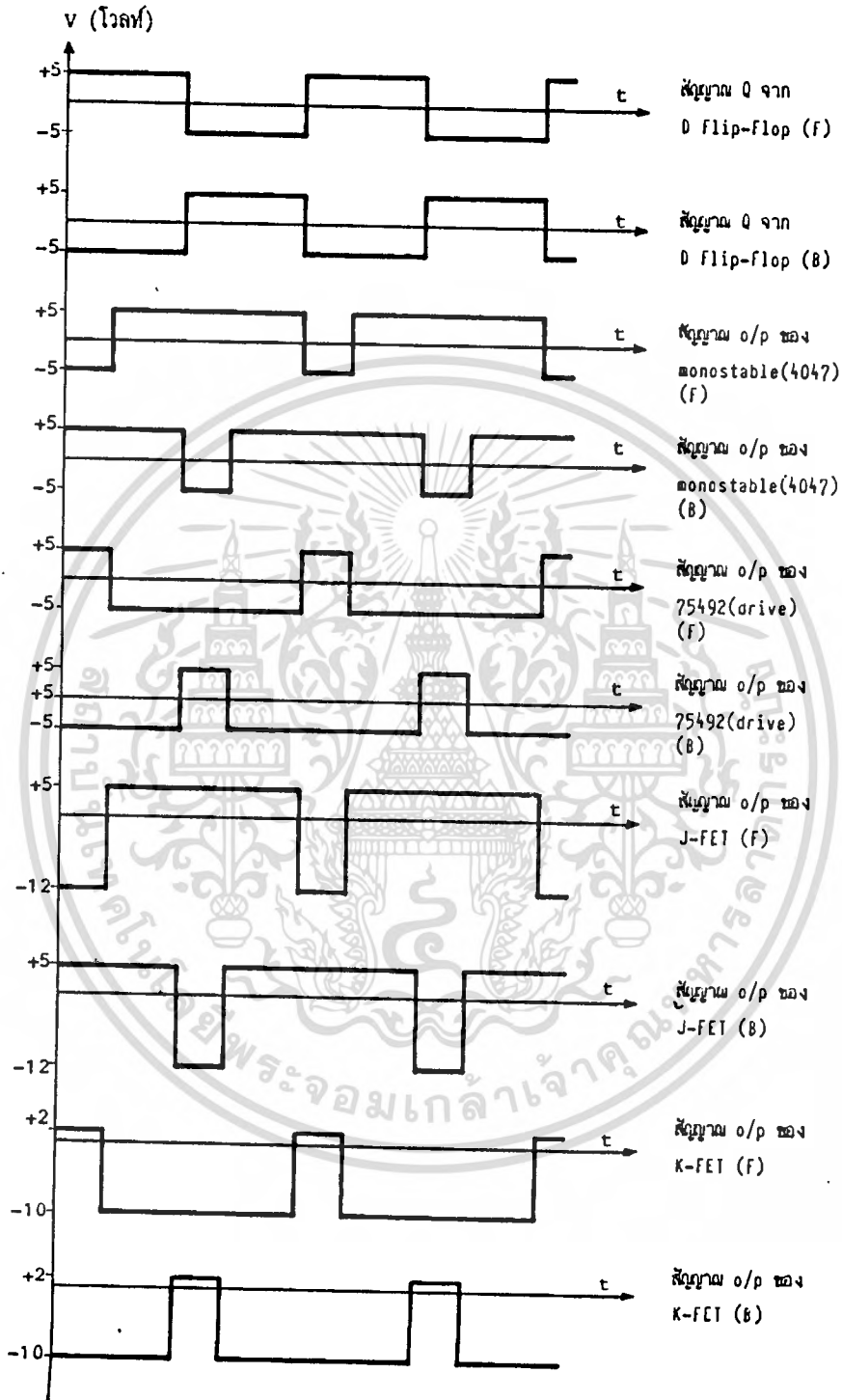
ขณะที่ไม่ต้องการให้สัญญาณออกที่ขั้วคลวจ่ายพลังงานทำได้โดยให้สัญญาณที่ or-gate เป็น high ซึ่งผลก็จะได้สัญญาณออกจากระบบขับทรานซิสเตอร์เป็น -10 โวลต์ และเมื่อต้องการให้ขั้วคลวจ่ายพลังงานทำงาน โดยส่วนควบคุมจะมีส่วนตั้งเวลาให้สัญญาณ low ที่ or-gate จะทำให้สัญญาณความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ผ่านระบบขับทรานซิสเตอร์ออกมาป้อนให้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์





รูปที่ 4.14 วงจรขั้วพหามชีเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



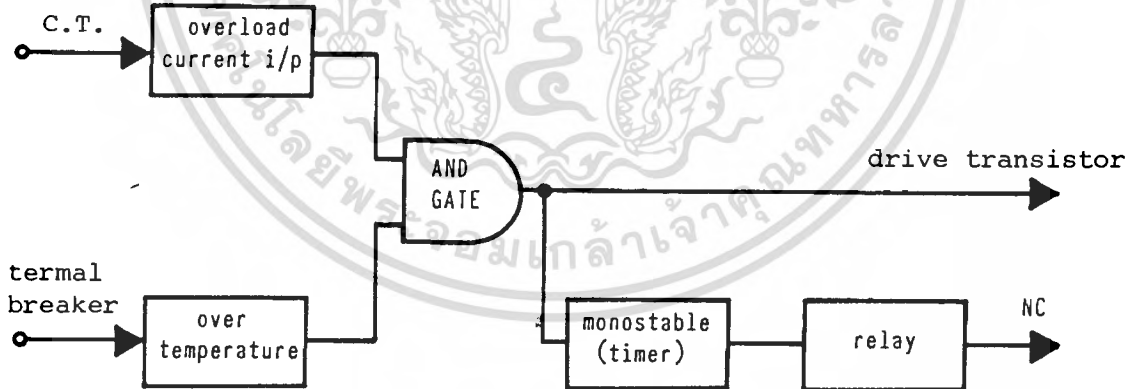
รูปที่ 4.15 Timing Diagram

#### 4.8 วงจรป้องกัน (Protect Circuit)

เป็นวงจรป้องกันความผิดปกติ . เนื่องจาก กระแสป้อนเข้าเกินพิกัด อุณหภูมิที่แกนเฟอร์ไรท์สูงเกิน หรือความถี่ผิดปกติ รวมทั้งช่วงการแบ่งคาบการทำงานของทรานซิสเตอร์ทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

โดยเมื่อระบบตรวจพบความผิดปกติจะนำสัญญาณทั้งหมดรวมกันโดย or-gate และจาก or-gate ของวงจรถูกป้องกัน จะส่งสัญญาณไปที่ or-gate ระบบขับทรานซิสเตอร์เพื่อหยุดไม่ให้สัญญาณความถี่ 25 กิโลเฮิรท์ ออกจาก or-gate

รวมทั้งสัญญาณที่ตรวจความผิดปกติจะถูกป้อนเข้า โมโนสเตเบิล (monostable) เพื่อทำการตัดระบบ M/C 2 และ M/C 3 โดยใช้รีเลย์ เป็นตัวตัดไฟเลี้ยงของ M/C (magnetic contactor)



รูปที่ 4.16 Protect Diagram

การสร้างส่วนประกอบและผลการทดสอบ

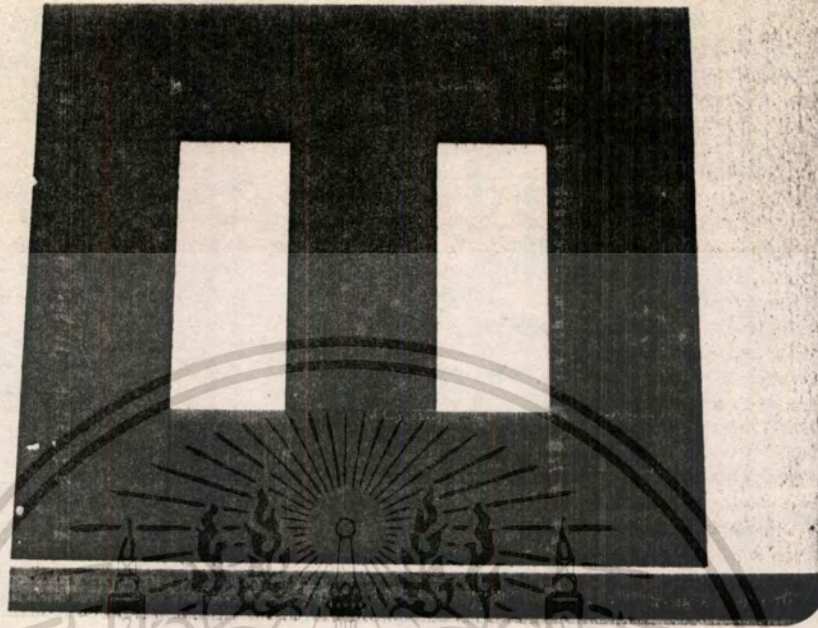
จากบทที่แล้วได้กล่าวถึงส่วนประกอบของเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและแนวทางการคิดในการออกแบบในส่วนต่าง ๆ เป็นส่วน ๆ เพื่อสร้างเครื่องขึ้นมา จากแนวทางการคิดก็มาถึงว่าจะหาส่วนประกอบต่าง ๆ ที่จะมาใช้ในการสร้างรวมทั้งความเหมาะสมในการใช้งาน

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาการสร้าง รวมทั้งแนวทางการแก้ไขให้เหมาะสมกับสภาพภายในประเทศ โดยคำนึงถึงวัสดุที่ใช้นั้นควรจะสามารถหาซื้อได้จากท้องตลาด รวมทั้งความเหมาะสมทางด้านราคาและสามารถสร้างขึ้นใช้งานเองได้หรือไม่ โดยจะกล่าวถึงส่วนประกอบต่าง ๆ รวมทั้งข้อจำกัดในการสร้าง

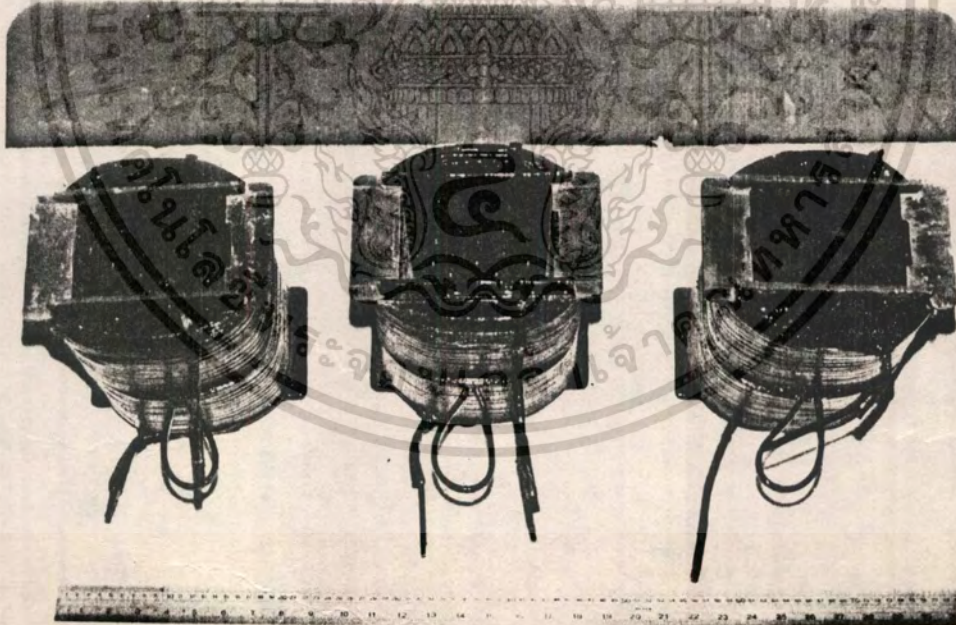
5.1 การสร้างหม้อแปลง 3 เฟส แบบออโต (3 Phase Auto-transformer)

จากการออกแบบในหัวข้อ 4.1 ได้นำมาสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3 โดยรูปที่ 5.1 จะเป็นลักษณะของการตัดแกนเหล็กเพื่อจัดเรียงเป็นแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเหล็กที่ใช้จะเป็นแบบ Cold-Roll Grain Oriented Silicon Steel และรูปที่ 5.2 เป็นขดลวดที่พันเรียบร้อยและอาบนํ้ายาวานิชพร้อมทั้งอบเรียบร้อย เพื่อประกอบเข้ากับแกนเหล็กของหม้อแปลง รูปที่ 5.3 เป็นหม้อแปลงที่ประกอบเรียบร้อย โดยจะมีเหล็กรูปตัวยูเป็นตัวลัดให้แกนไม่ขยับ จากนั้นก็ทำการทำขั้วจ่ายไฟเข้าและออก เพื่อสะดวกในการต่อใช้งาน

เมื่อประกอบหม้อแปลงเรียบร้อยแล้ว ทดลองจ่ายไฟแล้ววัดกระแสว่าผิดปกติหรือเปล่า และเสียงของหม้อแปลงดังผิดปกติหรือไม่ ถ้าดังควาเกิดจากอะไร ลาดนํ้ายาวานิช เพื่อช่วยให้การเกาะกันระหว่างแกนเหล็กดีขึ้น ทดสอบหม้อแปลงโดยการจ่ายไฟตามพิกัดแล้วตั้งทิ้งไว้ดูอุณหภูมิของแกนเหล็กสูงผิดปกติหรือเปล่า จากนั้นใช้วาริแอค (Variac) ปรับสัปดาห์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหม้อแปลง เพื่อวัดสัปดาห์ไฟฟ้ากับกระแสที่เข้าหม้อแปลง แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงในรูปที่ 5.4 เพื่อควาหม้อแปลงที่ออกแบบนั้นทำงานอยู่ในช่วงอิมิตัวหรือไม่

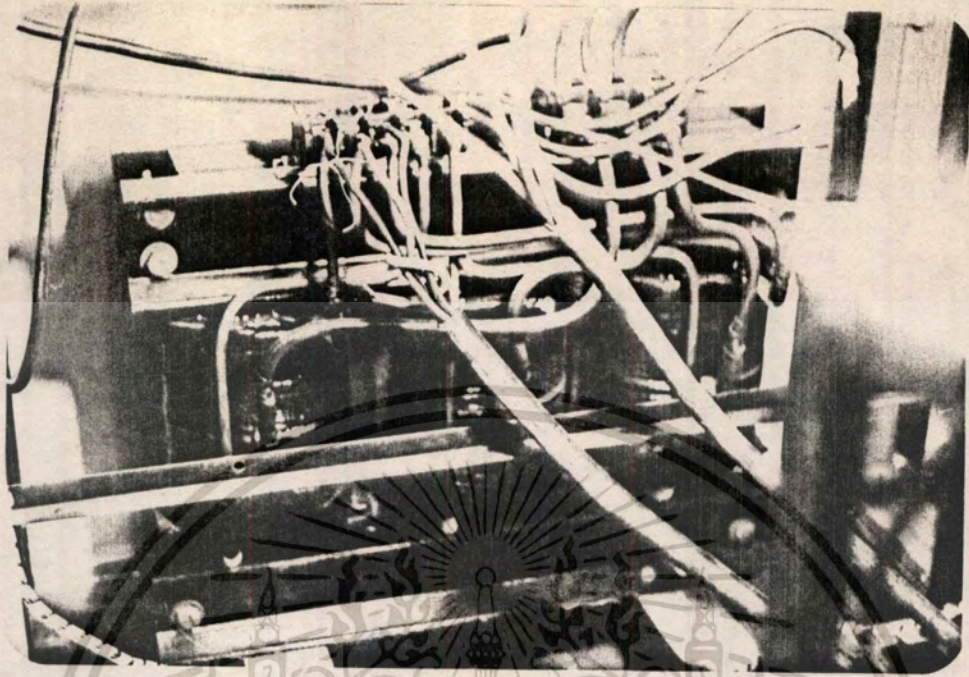


รูปที่ 5.1 แกนเหล็กของหม้อแปลงแบบออโต



รูปที่ 5.2 ขดลวดของหม้อแปลงแบบออโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 หม้อแปลงแบบออโต

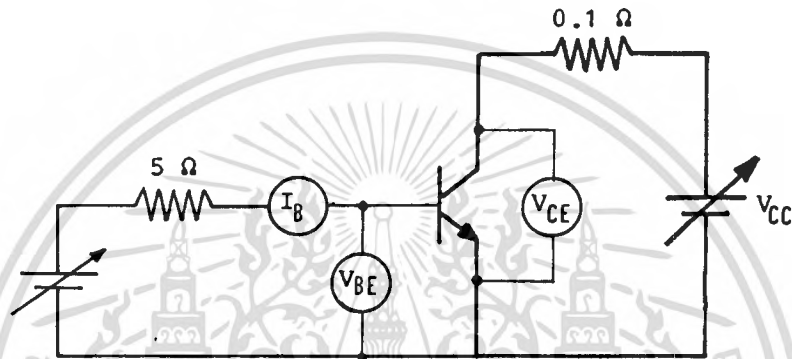


รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าป้อนเข้ากับกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ทดสอบทรานซิสเตอร์กำลัง

ในการนำทรานซิสเตอร์กำลังมาใช้งานจำเป็นต้องมีการทดสอบว่าทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ตามพิกัดของทรานซิสเตอร์หรือไม่ โดยเฉพาะในการใช้งานในลักษณะนำทรานซิสเตอร์มาขนานกัน จำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อคัดทรานซิสเตอร์ที่มีค่าต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.5 วงจรทดสอบทรานซิสเตอร์

ในการทดสอบนี้ จะดูผลการไบอัสตัวทรานซิสเตอร์ให้อิ่มตัว (saturate) แล้วดูศักดาไฟฟ้าคร่อมขา C กับขา E เป็น  $V_{CE}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยทำการบันทึกค่าที่ค่ากระแสเบส ( $I_B$ ) กับกระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลกเตอร์ ( $I_C$ ) ว่าจะมีศักดาไฟฟ้าคร่อมขา C กับขา E ( $V_{CE}$ ) เท่าไร เมื่อเปรียบเทียบและคัดกลุ่ม และพร้อมกันก็เป็นการทดสอบว่าทรานซิสเตอร์ยังทำงานได้หรือไม่ ในตารางที่ 5.1 เป็นตัวอย่างค่าที่ได้จากการทดสอบทรานซิสเตอร์ ตัวที่นำมาใช้งาน

การทดสอบจะเป็นการทำให้สามารถตัดสินใจแน่นอนว่าใช้กระแสไบอัสเท่าไร จึงทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัวอย่างแน่นอน

$I_{B'} \text{ (แอมป์)}$	$V_{BE} \text{ (โวลต์)}$	$V_{CC} \text{ (โวลต์)}$	$V_{CE} \text{ (โวลต์)}$	$I_C \text{ (แอมป์)}$
0.2	2.01	3.00	1.36	16.4
	2.11	5.40	1.49	39.1
	2.15	7.14	1.61	55.3
	2.18	9.20	1.92	72.8
	2.19	11.00	2.29	87.1
0.5	2.06	3.22	1.36	18.6
	2.13	5.18	1.44	37.4
	2.18	7.18	1.51	56.7
	2.21	9.20	1.58	76.2
	2.23	11.00	1.68	93.2
	2.24	12.80	1.98	108.2
	2.25	14.30	2.37	119.3
1.0	2.05	1.98	1.30	6.8
	2.11	3.20	1.37	18.3
	2.18	5.19	1.44	37.5
	2.22	7.15	1.50	56.5
	2.23	9.28	1.55	77.3
	2.28	11.2	1.60	96.0
	2.30	13.2	1.65	115.5
	2.32	15.2	1.74	134.6
	2.33	16.6	1.86	147.4

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์

### 5.3 การออกแบบสร้างและทดสอบความต้านทาน

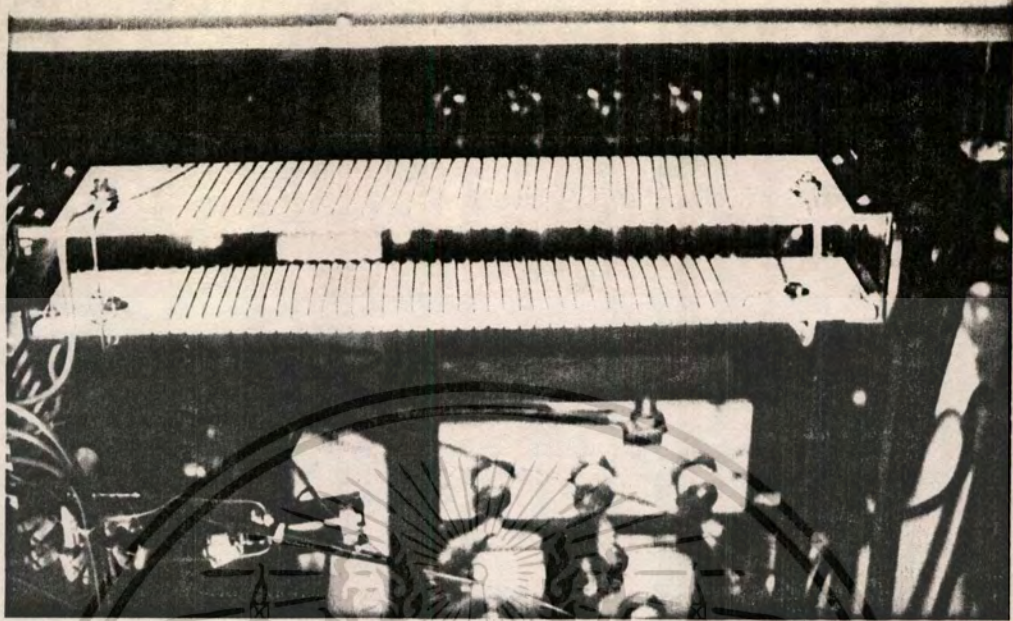
ความต้านทานที่ใช้ในเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมีความสำคัญมาก เนื่องมาจากเป็นตัวกำหนดกระแสที่ไหล ถ้าค่าผิดพลาดไปจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าไปผิดพลาดด้วยและเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านมีค่าสูง และรวมถึงกำลังที่สูญเสียในความต้านทานจะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งจำเป็นต้องให้อัตราการระบายความร้อนออกต้องเพียงพอ ไม่เช่นนั้นจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิของความต้านทานที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงผลจากค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ในตัวความต้านทานอื่นเนื่องมาจากลวดที่ใช้ทำความต้านทานต้องนำมาพันและการนำความต้านทานมาใช้เป็นภาระของการสวิชชิง ดังนั้นจำเป็นต้องลดค่าความเหนี่ยวนำให้น้อยที่สุด เนื่องมาจากว่าในทองตลาดนั้นหาตัวความต้านทานที่มีคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้วได้ยากและยังมีราคาแพง จึงได้ทำการออกแบบตัวความต้านทานขึ้นมาใช้เอง

ลวดความต้านทานใช้ลวดนิโครม โดยสิ่งแรกคือต้องการความต้านทานที่โอห์มกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานจะเป็นตัวกำหนดขนาดเส้นลวดว่าควรใช้ลวดเบอร์อะไร เพื่อกระแสที่ไหลจะไม่เกินพิกัด โดยความต้านทานจะเป็นตัวกำหนดทางความยาว

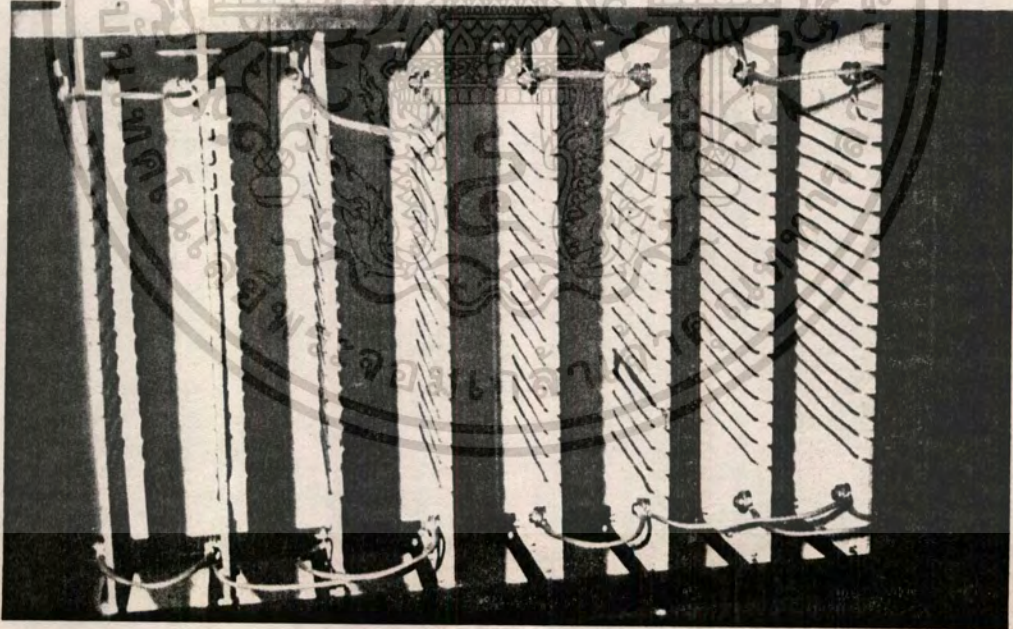
$$\text{ความยาวของขดลวด} = \frac{\text{ความต้านทานที่ต้องการ}}{\text{ความต้านทาน/ความยาว}}$$

ถ้าทางผู้ชายไม่มีข้อมูล ความต้านทาน/ความยาว สามารถหาได้โดยการทดสอบคัดเส้นลวดยาวพอประมาณใช้วิธี โวลท์-แอมป์ หากค่าความต้านทาน แลวนำมาหารด้วยความยาวจะได้ ความต้านทาน/ความยาวลวด

จากการออกแบบและสร้าง จะได้ความต้านทาน ในรูปที่ 5.6 และ 5.7 เป็นความต้านทานที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์และของวงจรถนั้บเบอร์ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 ความต้านทานที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 5.7 ความต้านทานของวงจрс่นับเบอร์

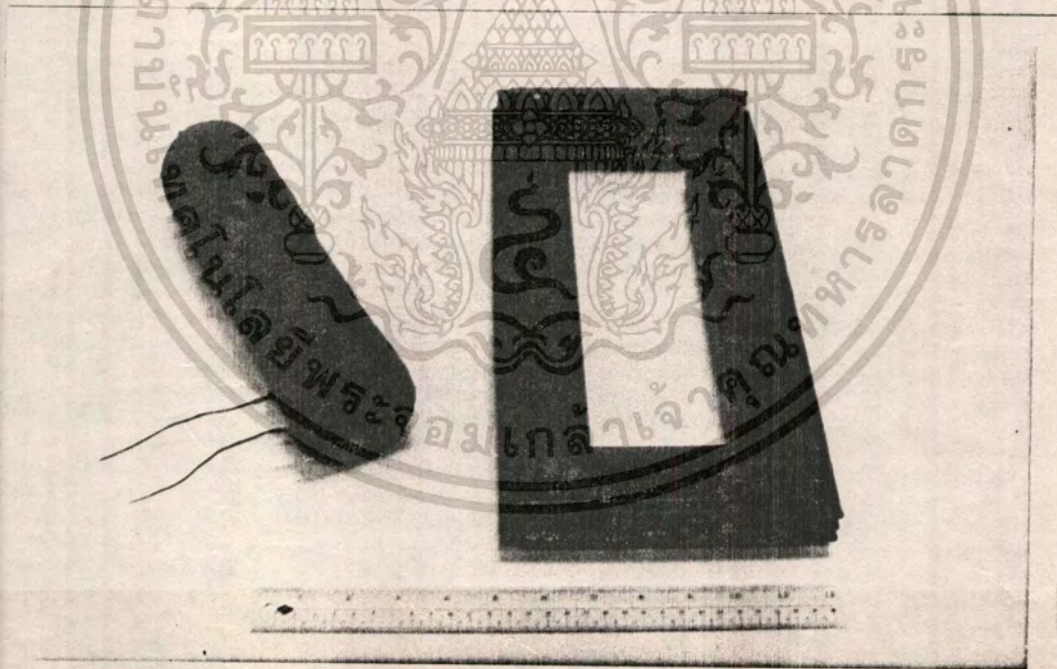
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การทดสอบแกนเฟอร์ไรท์

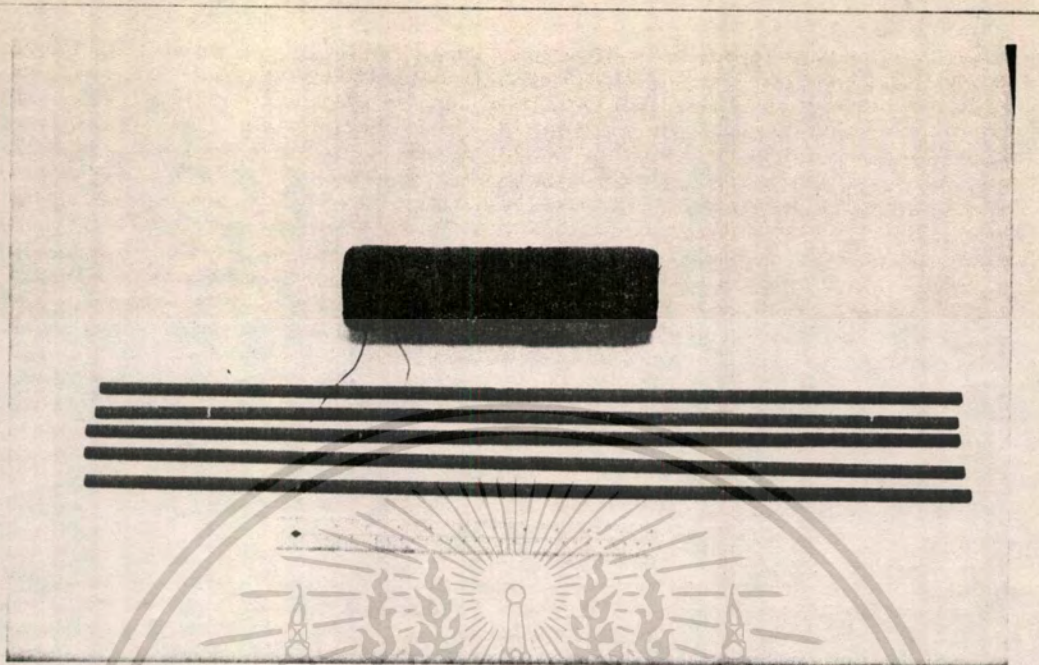
มีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อความแน่ใจว่าสามารถนำไปใช้งานได้ตามที่ออกแบบ แต่เนื่องจากไม่สามารถหาแหล่งจ่ายความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต โดยสามารถจ่ายกำลังไค้มาก ๆ ดังนั้นการทดสอบแกนจะทดสอบที่ 50 เฮิร์ตแทน เพื่อดูว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ว่ามีค่าสูงสุดไค้เท่าไร

โดยการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างแกนเฟอร์ไรท์ 2 แบบ คือ Close core ในรูปที่ 5.8 และ Slug core ในรูปที่ 5.9 โดยทั้งสองแบบจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

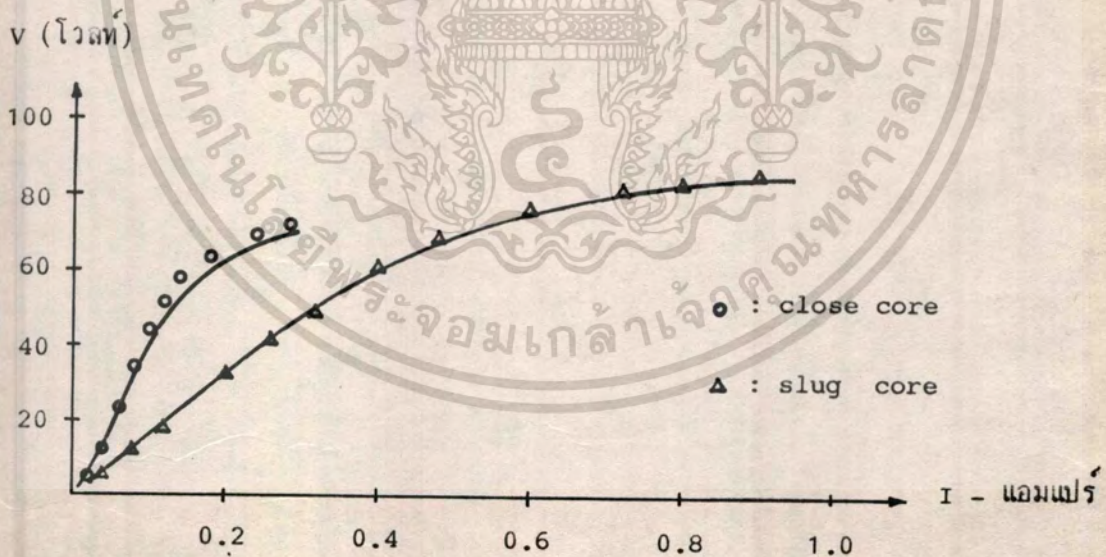
จากนั้นทำการป้อนไฟกระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ต วัดความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเข้า แล้วนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 5.10 และกราฟความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณจากศักดาไฟฟ้า ในรูปที่ 5.11 และทำการทดสอบหาค่าความต้านทานของลวดว่ามีผลต่อการทดสอบน้อยมาก



รูปที่ 5.8 Close core

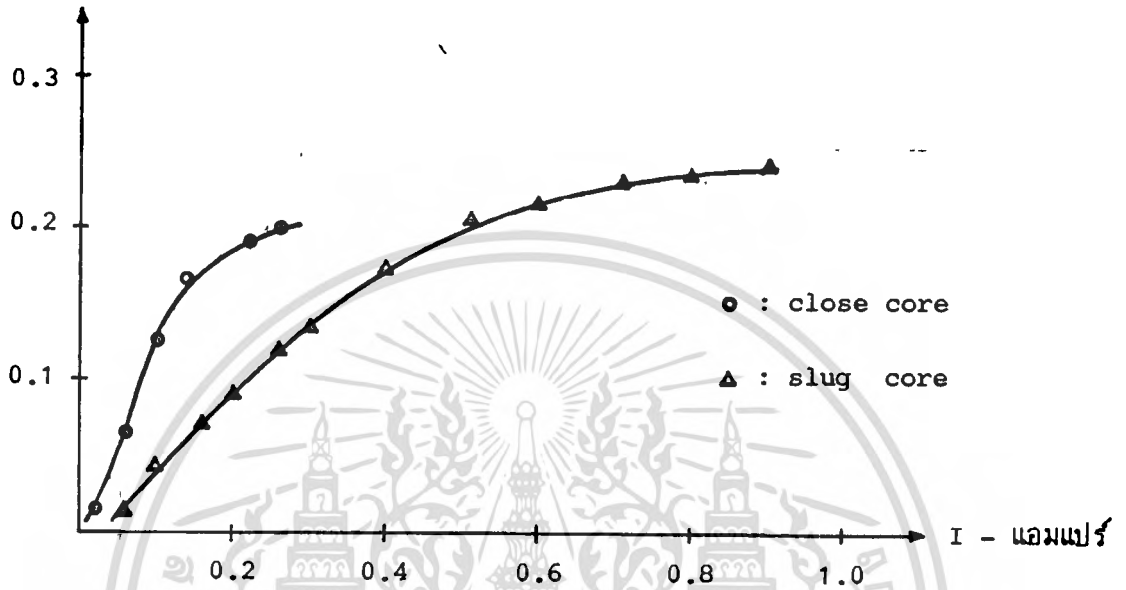


รูปที่ 5.9 Slug core



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ของ V และ I เมื่อแกนเป็นแบบ Close core กับแบบ Slug core

B (เทสล่า)



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ของ B กับ I เมื่อแกนเป็นแบบ Close core กับแบบ Slug core

### 5.6 ไฟเลี้ยงวงจรขั้วทรานซิสเตอร์

ในวงจรขั้วทรานซิสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุมป้อนให้ทรานซิสเตอร์กำลังทำงานสวิชซึ่งตามที่ต้องการ ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้วงจรขั้วทรานซิสเตอร์กำลังทำงานได้สมบูรณ์คือ ส่วนของไฟเลี้ยงวงจร ซึ่งมีหลายระดับคือ  $\pm 5$  โวลต์ ,  $+5$  กับ  $-12$  โวลต์ และ  $+28$  กับ  $-12$  โวลต์ ซึ่งการเลือกชนิดของไฟเลี้ยงมีความจำเป็นต่อการใช้ระบบสวิชซึ่งมาก โดยต้องคำนึงถึงกำลังจ่ายของไฟเลี้ยง และยังปัญหาการตอบสนองของแหล่งจ่ายว่าสามารถรับพลังงานที่ย้อนคืนหรือสามารถตอบสนองกับความถี่ของที่ใช้ได้หรือไม่ ในขนาดของการสวิชซึ่งที่ต้องการกำลังไม่มากจะใช้ไฟเลี้ยงแบบไหนยังไม่เป็นปัญหาใหญ่ แต่ในส่วนที่จ่ายกำลังมากจำเป็นต้องมีความเข้าใจในการออกแบบ โดย  $\pm 5$  โวลต์ และ  $+5$  กับ  $-12$  โวลต์ ใช้ไอซีเร็กกูเลทแบบจ่ายแรงดันคงที่ ส่วน  $+28$  โวลต์ กับ  $-12$  โวลต์ใช้วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า 3 เฟสแบบเต็มช่วงคลื่นเพราะเนื่องจากจะจ่ายโหลดได้มากแล้วยังมีข้อดีทางด้านกรตอบสนอง แต่มีความยุ่งยากในการออกแบบให้ได้อัตราดับสวิตช์ไฟฟ้าคงที่ตามต้องการ การออกแบบการจ่ายไฟเลี้ยงวงจรแต่ละส่วนที่แยกระบบออกจากกันแล้ว ยังแยกการจ่ายออกเป็นช่องทางด้าน Forward กับทางด้าน Backward ออกจากกัน เพื่อพยายามลดสัญญาณรบกวนระหว่างกัน

### 5.7 วงจรสับเบอ

เนื่องจากพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กในขดลวด เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงานจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้ากลับทิศในขดลวด ผลจะทำให้เสริมกับแหล่งจ่ายไฟจึงทำให้ศักดาไฟฟ้าคร่อมขา C กับ E ( $V_{CE}$ ) สูงประมาณ 2 เท่า หรือมากกว่าเมื่อรวมกับสไปค์ ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นวงจรสับเบอก็เป็นตัวช่วยป้องกันไม่ใ้ทรานซิสเตอร์เสียหาย จากวงจรสับเบอในรูปแบบที่ 5.12 เราจะออกแบบสร้างวงจรสับเบอได้อย่างไร สิ่งแรกที่ควรคำนึงถึงคือชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้โดยเริ่มจาก ไดโอดต้องเป็นชนิดฟาสต์รีคฟเวอรี่ (Fast recovery diode) . เมื่อเกิดสไปค์ขึ้นไดโอดจะเป็นทางผ่านในการเก็บประจุเข้าตัวเก็บประจุ และเมื่อทรานซิสเตอร์อิ่มตัว (saturated) จะทำให้ตัวเก็บประจุทำการคายประจุผ่านความต้านทาน ดังนั้นความต้านทานจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการคายประจุซึ่งค่าผลคูณของ R กับ C เรียก

ว่า RC-timeconstant โดยถ้าค่า  $5RC$  น้อยกว่าเวลาในช่วงเปิด (ON) ของทรานซิสเตอร์จะทำให้ ตัวเก็บประจุไม่มีประจุหลงเหลืออยู่ภายใน แต่ค่า  $R$  น้อยเกินไปกระแสนิการคายประจุอาจเกิน พิกัดที่ทรานซิสเตอร์ทนได้ ส่วนตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นตัวเก็บประจุจะต้องตอบสนองกับสไปค์ได้ ดังนั้นตัวเก็บประจุของสแน็บเบอ์ที่ใช้จะ ใช้พวกพลาสติก(plastic)และได้ทำชุดของตัวเก็บประจุไว้สำหรับปรับค่า  $C$  เพราะเนื่องมาจาก ว่าเมื่อเปลี่ยนขดลวดจ่ายพลังงาน ซึ่งจะมีผลถึงพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.12 วงจรสแน็บเบอ์

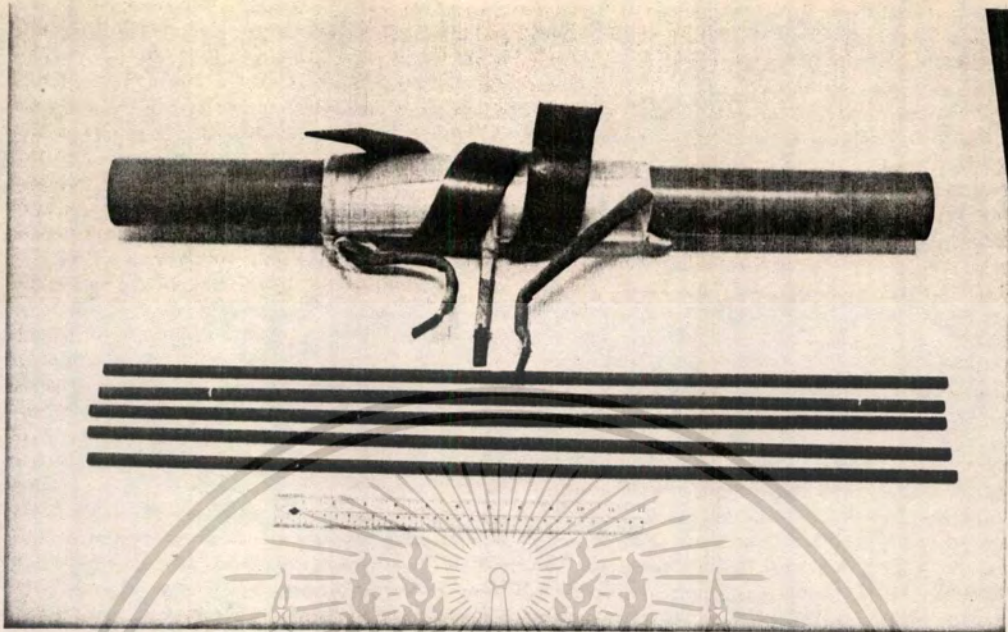
## 5.8 หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง

จากหลักการที่ออกแบบได้นำมาสร้างหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงและได้ทำการทดลองหลาย ๆ แบบเพื่อที่จะสามารถหาข้อสรุปในการออกแบบสร้างรูปแบบที่แน่นอน โดยหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงจะมีปัญหาในการสร้าง เนื่องมาจากการท้าวส์ที่ใช้ในการสร้าง

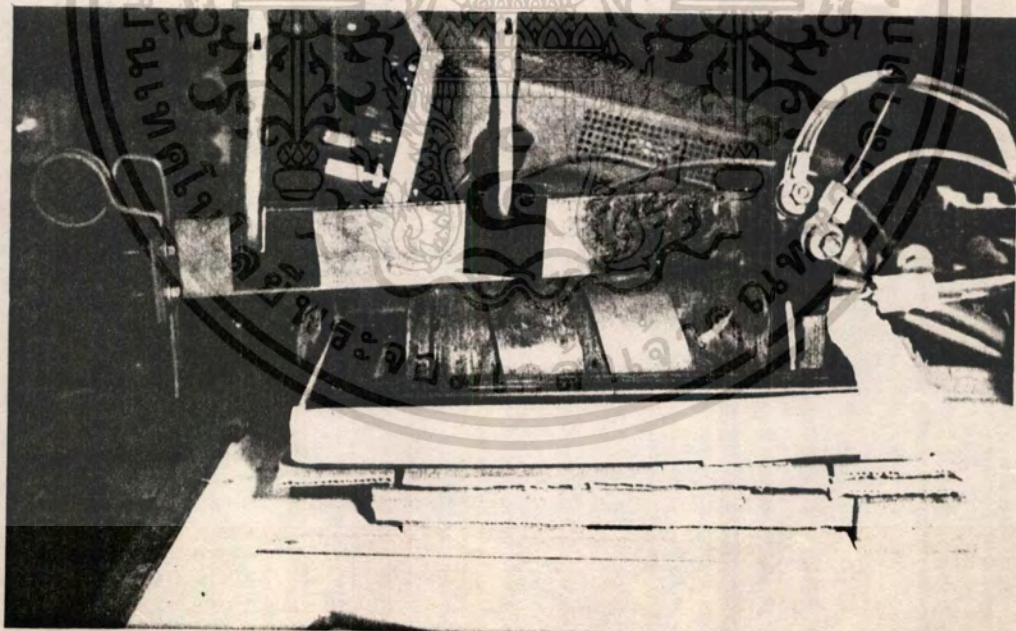
ในขั้นแรกได้ทำการสร้างแกนและทำต้นแบบของหม้อแปลงในหลายรูปแบบ ทั้งแบบ slug core ในรูปที่ 5.13 และแบบ Close core ในรูปที่ 5.14 ซึ่งทั้ง 2 แบบ มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ปัญหาของแบบ Slug core คือ พลังงานที่สะสมในรูปของสนามแม่เหล็กมาก ส่วนในแบบของ Close core คือสร้างแกนได้ยากและยังมีข้อจำกัดทางด้านส่วนยาวที่พันลวดเพราะมีข้อจำกัดในการหาซื้อแท่งเฟอร์ไรท์ ดังนั้นแบบ Slug core สร้างได้ง่ายกว่า Close core แต่ในการทดสอบใช้งานทั้ง 2 แบบ ในเครื่องนี้จึงเลือกใช้แบบ Close core เนื่องมาจากปัญหาสไปค

ปัญหาการพันขดลวดก็มีมาก เนื่องจากระบบสวิชชิงแบบพชพค ดังนั้นปัญหาที่ตามมาเราสร้างขดลวดทางด้านปฐมภูมิให้มีขนาดเท่ากันและตองใหม่ผลของสนามแม่เหล็กคอดขดลวดทุติยภูมิเท่ากันด้วย พร้อมทั้งปัญหาว่าจะพันขดลวดทุติยภูมิให้แน่นได้อย่างไรเพราะทางด้านทุติยภูมิกระแสไหลมาก ดังนั้นลวดตัวนำใหญ่ยากแก่การพันและมีปัญหาทางด้านการพันไม่สมคูลย์ รวมทั้งยังคงมีปัญหาด้านสนามแม่เหล็กรั่วมากด้วย

แต่ได้ทำการสร้างและทำการทดลองใช้งานในแบบต่างกันของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงซึ่งก็พยายามแก้ไขวิธีต่าง ๆ เพื่อที่ลดปัญหาทางด้านการสร้าง เพื่อให้ขดลวดทุติยภูมิรัดแน่นกับขดลวดปฐมภูมิเพื่อลดสนามแม่เหล็กรั่วไหล ดังนั้นในขั้นสุดท้ายได้ทำการพัฒนาขดลวดจากตองพันเป็นการกลึงท่อทองแดงให้เป็นเส้นเหมือนกับเป็นขดลวดที่พันทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในรูปที่ 5.15 เพื่อลดปัญหาทางด้านค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล(leakage reactance) และผลทั้ง 2 ขดจะได้เท่ากัน และแก้ปัญหาความร้อนโดยการเชื่อมท่อทองแดงติดกับขดลวดทุติยภูมิ เพื่อใช้นำระบายความร้อน

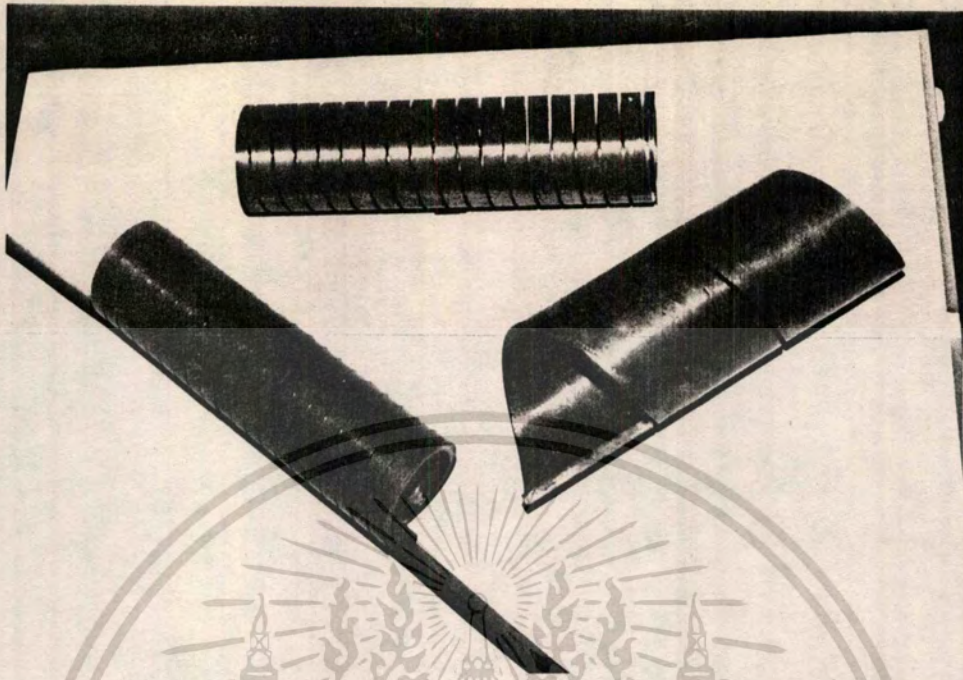


รูปที่ 5.13 หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงแบบ Slug core



รูปที่ 5.14 หม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงแบบ Close core

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



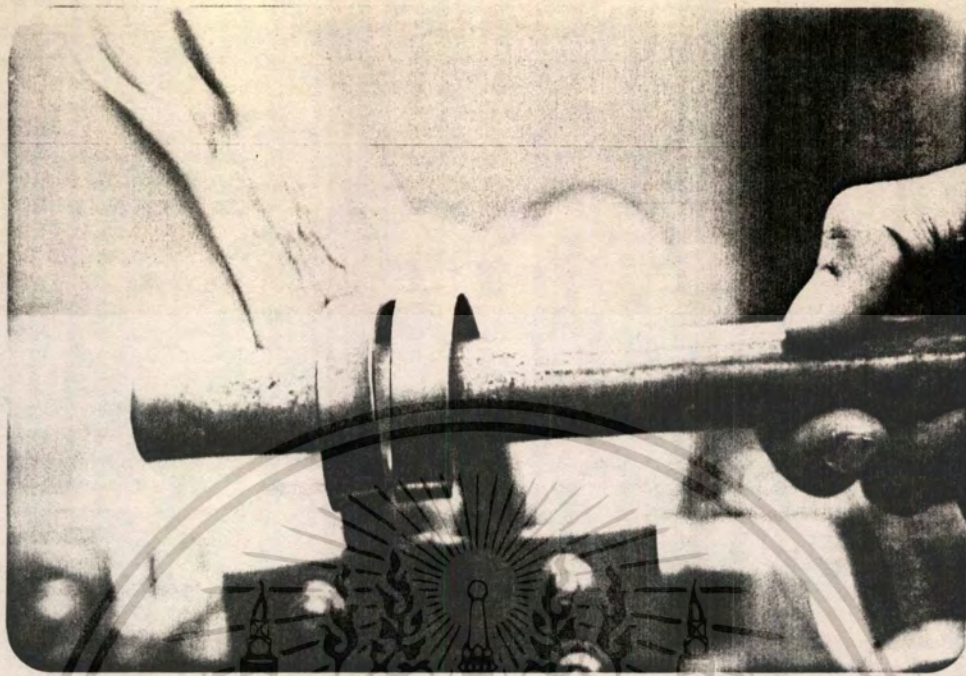
รูปที่ 5.15 ขดลวดของ หมอแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงที่ได้จากการกลึง

## 5.9 ขคลวคจายพลังงาน

เป็นตัวที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อจ่ายให้กับชิ้นงานเหล็กที่ต้องการทำผิวแข็ง และเป็นตัวกำหนดจุดที่จะทำผิวแข็ง ดังนั้นขคลวคจายพลังงานจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับชิ้นงาน

ในทางออกแบบคำนวณเราสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้โดยการกำหนดเงื่อนไข แต่ในการใช้งานจริง ๆ นั้น ยังมีปัญหาอีกมากและยังมีค่าต่าง ๆ ที่ไม่สามารถคำนวณหาได้ เช่นค่าความต้านทานของหน้าสัมผัสที่จุดต่อต่าง ๆ ค่าความเหนียวนำสนามแม่เหล็กไว้ไหลของสายไฟที่เดินในตู้และต่อออกมาที่หม้อแปลงค่าความเหนียวนำสนามแม่เหล็กไว้ไหลของขคลวคจายพลังงานและทุติยภูมิ ซึ่งจะเป็นตัวจำกัดกระแสหรือกำลังที่จะจ่ายมาสู่ขคลวคจายพลังงาน ทำให้พลังงานที่ได้ออกมาไม่ถึงพิกัดที่ต้องการ

ดังนั้นจึงต้องคอย ๆ ปรับปรุงที่จุดต่าง ๆ ส่วนขคลวคจายพลังงาน หลังจากที่คำนวณขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของขคลวคแล้ว การสร้างรูปแบบยังมีความจำเป็นมาก เนื่องมาจากว่าขคลวคจายพลังงานจะต้องมีระบบระบายความร้อน คือ ภายในขคลวคจะเป็นท่อเพื่อนำจะเป็นตัวระบายความร้อน ในการทดลองต้นแบบนั้นยังไม่มีการระบายความร้อนที่ขคลวคจายพลังงาน เพราะต้องการดูผลจากการทดลองใช้งานก่อน เพื่อที่การออกแบบจะได้ตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ



รูปที่ 5.16 ขดลวดจ่ายพลังงานขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 5.17 ต้นแบบของขดลวดจ่ายพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.10 สัญญาณไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ

ได้ทำการวัดสัญญาณไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ เพื่อที่ทราบถึงการทำงานของระบบว่าถูกต้องหรือไม่ โดยตัวอย่างสัญญาณต่าง ๆ มีดังนี้ รูปที่ 5.18 เป็นสัญญาณระหว่าง  $V_{BE}$  กับ  $V_{CE}$  ทางคาน Forward รูปที่ 5.19 เป็นสัญญาณของ  $V_{CE}$  ของทางคาน Forward และทางคาน Backward รูปที่ 5.20 เป็นรูปสัญญาณของ  $V_{BE}$  กับ  $V_{CE}$  ของทั้งทางคาน Forward และทางคาน Backward สัญญาณที่กล่าวมาในรูปที่ 5.18, 5.19 , 5.20 เป็นสัญญาณที่วัดที่ตัวทรานซิสเตอร์ เพื่อดูการทำงานของทรานซิสเตอร์ว่าถูกต้องตามความต้องการหรือไม่และสัญญาณทั้งทางคาน Forward และทางคาน Backward เท่ากันหรือไม่ เพื่อที่ได้ทราบถึงปัญหาที่เกิดจากการสวิชชิง

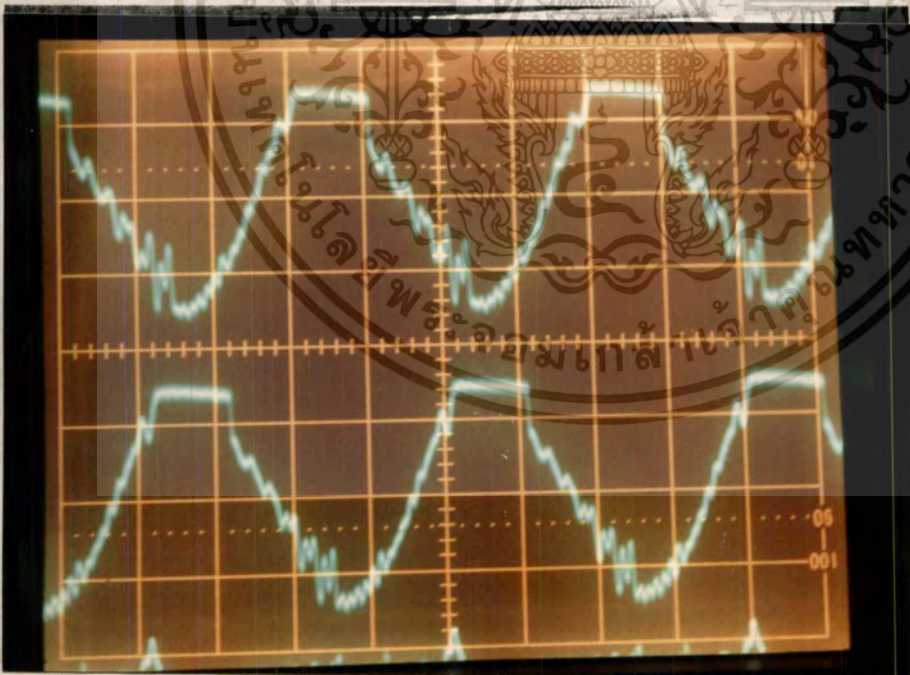
และจุดที่ต้องวัด คือ สัญญาณของกระแสที่ไหลออกจากวงจรรองแสดงในรูปที่ 5.21 ซึ่ง จะเห็นว่า กระแสที่ไหลจะมีความถี่เป็น 2 เท่า คือ 50 กิโลเฮิร์ต เนื่องจาก 2 ขดลวดสลับกัน ทำงาน และลักษณะการไหลของกระแสที่ดูจากรูปสัญญาณ คือ ช่วงครึ่งบวกจะเป็นช่วงกระแสไหลเข้า ขดลวดและครึ่งลบจะเป็นช่วงที่กระแสไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟ

รูปที่ 5.22 เป็นรูปสัญญาณของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดจ่ายพลังงาน ซึ่งจะเห็นว่า โกลเคียงไซน์เวฟ (Sine wave) ขนาดของสัญญาณที่วัดที่ขดลวดจ่ายพลังงานเปลี่ยนแปลงตามขดลวดจ่ายพลังงาน เนื่องจากเรกูเลชัน (Regulation) ของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง



$V_{BE}$  10 โวลต์/ช่อง  
 $V_{CE}$  200 โวลต์/ช่อง  
 $10 \times 10^{-6}$  วินาที/ช่อง

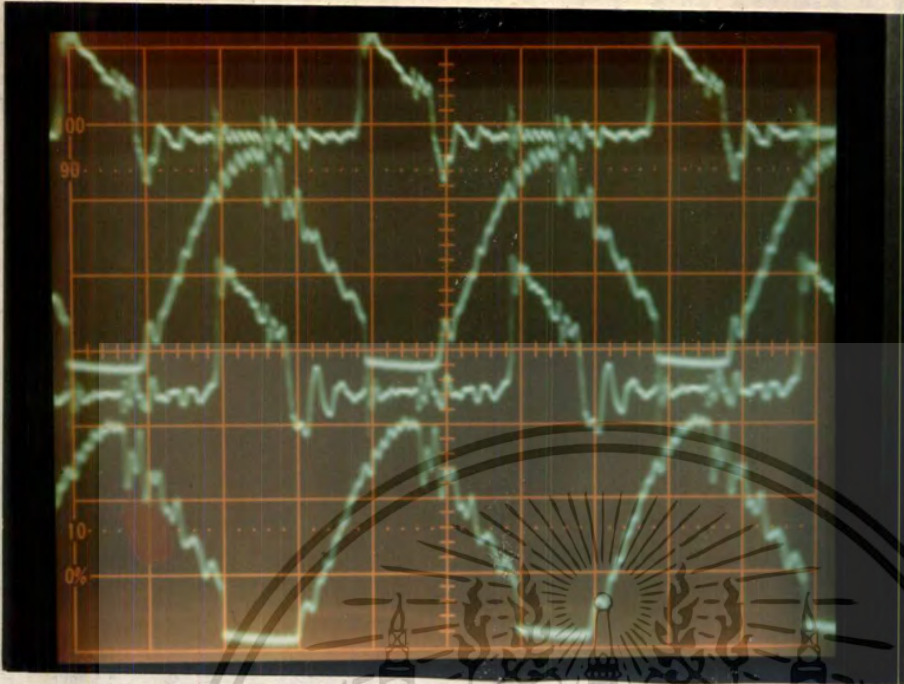
รูปที่ 5.18 สัญญาณ  $V_{BE}$  กับ  $V_{CE}$  ทางด้าน Forward



$V_{CE}$  200 โวลต์/ช่อง  
 $10 \times 10^{-6}$  วินาที/ช่อง

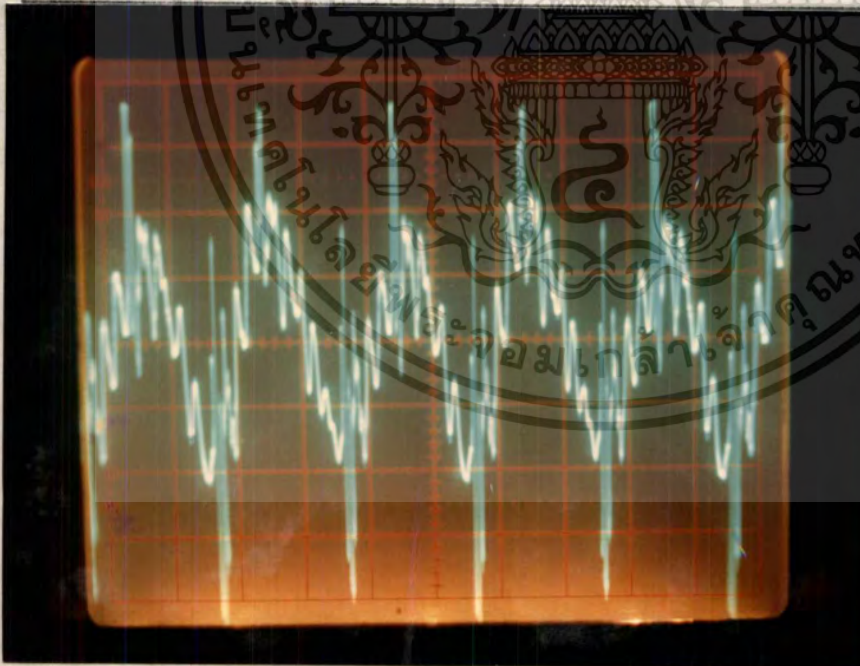
รูปที่ 5.19 สัญญาณ  $V_{CE}$  ของทางด้าน Forward และทางด้าน Back

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$V_{BE}$  10 โวลต์/ช่อง  
 $V_{CE}$  200 โวลต์/ช่อง  
 $10 \times 10^{-6}$  วินาที/ช่อง

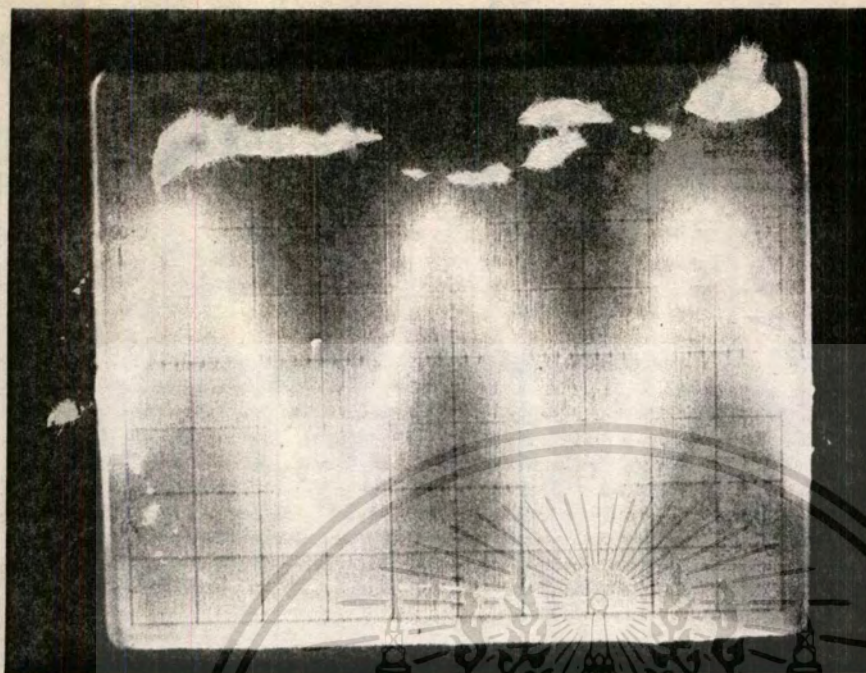
รูปที่ 5.20 สัญญาณ  $V_{BE}$  กับ  $V_{CE}$  ของทางคาน Forward และทางคาน Backward



R ที่ใช้วัด  
50 มิลลิโวลต์/100 แอมป์  
v 0.1 โวลต์/ช่อง  
 $10 \times 10^{-6}$  วินาที/ช่อง

รูปที่ 5.21 สัญญาณของกระแสที่ไหลออกจากวงจรถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



v 10 โวลต์/ช่อง  
 $10 \times 10^{-6}$  วินาที/ช่อง

รูปที่ 5.22 สัญญาณที่ขั้วของขดลวดจ่ายพลังงาน



เครื่องขูดผิวแข็งเหล็กโดยการเหนียวนำสนามแม่เหล็กหรือบางครั้งเรียกสั้น ๆ ว่าเครื่องเหนียวนำสนามแม่เหล็ก ทำงานโดยอาศัยหลักการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กกับเวลาจะทำให้เกิดการเหนียวนำศักดาไฟฟ้าและเกิดกระแสไหลวนในเนื้อเหล็ก ดังนั้นจะทำให้เหล็กร้อน การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กหรือเรียกว่าความถี่ของสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อความลึกของสนามแม่เหล็กที่ลงไปเนื้อเหล็ก โดยความถี่ที่สูงขึ้นสนามแม่เหล็กก็จะลงไปเนื้อเหล็กได้น้อยลง ดังนั้นการกำหนดความถี่ของเครื่องเหนียวนำสนามแม่เหล็กจึงมีความสำคัญ เพราะจะได้ตรงตามความต้องการ เช่น การทำผิวแข็งเครื่องต้องมีความถี่สูง แต่ถาต้องการทำให้เหล็กร้อนก่อนอัดขึ้นรูปไม่มีความจำเป็นต่อความถี่สูงมากเพราะต้องการให้อุ่นทั้งชิ้นเหล็ก

การเลือกความถี่ให้เหมาะสมเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะมีความสัมพันธ์กับความหนาของผิวแข็ง ถ้าต้องการผิวแข็งหนาแต่ใช้เครื่องความถี่สูงมากผลทำให้ผิวชิ้นงานเสีย เนื่องมาจากว่าพลังงานความร้อนเข้าไปเฉพาะที่ผิวเหล็กบางมากและต้องใช้เวลานานมากในการให้ความร้อนเคลื่อนตัวลงลึกจากผิว จึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวสูงเกินจะมีผลให้ผิวชิ้นงานเสีย แต่ถาความถี่สูงไม่เพียงพอก็จะทำให้สนามแม่เหล็กเข้าไปลึกเกินความต้องการ ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถทำผิวแข็งให้บางตามที่ต้องการ

ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่ง คือ ถึงแม้จะเลือกความถี่ได้เหมาะสมแล้ว แต่ยังมีจุดที่ทำให้ความหนาผิดพลาด เนื่องมาจากกำลังของเครื่อง โดยถาเครื่องมือกำลังไม่พอก็จะต้องใช้เวลานานในการที่จะให้เหล็กมีอุณหภูมิถึงระดับที่ต้องการ ดังนั้นก็จะทำให้อุณหภูมิภายในชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ผิว จึงทำให้ความหนาของผิวแข็งมากกว่าที่ต้องการ ถาลดเวลาลงอุณหภูมิของเหล็กก็จะไม่ถึงระดับจะทำให้ได้ความแข็งของเหล็กต่ำกว่าจุดที่ต้องการ

ในการออกแบบเครื่องเหนียวนำสนามแม่เหล็ก โดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นตัวสวิชซึ่งซึ่งออกแบบให้สร้างควมถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ดังนั้นช่วงคาบของสัญญาณคิดเป็นเวลา  $40 \times 10^{-6}$  วินาที ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ทำงานช่วง Forward กับช่วง Backward จะสลับกันทำงานในช่วง

เวลาไม่เกิน  $20 \times 10^{-6}$  วินาที ซึ่งเมื่อคุณุ่มือของทรานซิสเตอร์กำลังเวลาของสตอเรจไทม์ (storage time) โดยทั่วไปประมาณ  $10 \times 10^{-6}$  วินาที รวมกับฟอลล์ไทม์ (fall time) ประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  วินาที และไรส์ไทม์ (rise time) ประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  วินาที ดังนั้น จะเห็นว่าความถี่ที่ออกแบบจะเป็นค่าสูงสุดที่สามารถใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นตัวสวิชชิง ส่วนทางด้านศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์  $V_{CE}$  จะเป็น 2 เท่าของศักดาไฟกระแสดตรงที่ออกจากวงจรกรองสัญญาณ โดยยังไม่คิดสไปค ดังนั้นจึงต้องเลือกทรานซิสเตอร์ที่ทนศักดาไฟฟ้าได้สูงกว่า 2 เท่าของศักดาไฟกระแสดตรงที่ไค่วงจรกรองสัญญาณ

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ เมื่อใช้ทรานซิสเตอร์กำลังมาทำงานสวิชชิงจำเป็นต้องมีสแน็บเบอร์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันทรานซิสเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าจากขดลวดของหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูงออกมาในลักษณะที่เรียกว่าสไปค ดังนั้นไม่เพียงแต่ต้องเลือกทรานซิสเตอร์ที่ทนศักดาไฟฟ้าได้สูงแล้วยังต้องมีตัวเก็บพลังงานของสไปค ซึ่งในการออกแบบใช้วงจรสแน็บเบอร์เป็นตัวรับพลังงานของสไปค จะมีผลเป็นตัวควบคุมไม่ให้ศักดาคร่อมทรานซิสเตอร์สูงเกินไป แต่ข้อเสียในการใช้วงจรสแน็บเบอร์จะทำให้มีการสูญเสียทางด้านพลังงาน โดยเมื่อทรานซิสเตอร์นำกระแสไฟฟ้า จะเป็นช่วงถ่ายพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุของสแน็บเบอร์ทั้งในความต้านทานของตัวสแน็บเบอร์ อีกข้อหนึ่งคือกระแสจากสแน็บเบอร์จะไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทำให้ทรานซิสเตอร์ต้องรับกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบสแน็บเบอร์จึงมีความสำคัญในการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวสวิชชิง

จากการที่ทรานซิสเตอร์ทำงานสวิชชิง ดังนั้นตัวจ่ายไฟกระแสดตรงก็จะจ่ายกระแสออกมาเป็นช่วงจังหวะเหมือนกัน - ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่ง ก็คือ ตัวจ่ายไฟกระแสดตรงจะต้องสามารถตอบสนองกับความถี่ของการสวิชชิงและเมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส จะมีการคืนพลังงานกลับสู่ตัวจ่ายไฟกระแสดตรง ตัวจ่ายไฟกระแสดตรงจะต้องสามารถรับพลังงานนี้ไว้ได้ เพราะถ้ารับไม่ได้ผลที่ออกมา ก็จะเกิดสัญญาณรบกวนรวมทั้งเกิดสไปค ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อเครื่อง ดังนั้นการออกแบบวงจรกรองสัญญาณของตัวจ่ายไฟกระแสดตรงจึงมีความสำคัญมาก

และเมื่อวัดสัญญาณของกระแสที่ไหลออกจากตัวกรองสัญญาณ จะเห็นว่ากระแสจะมีลักษณะเป็นการจ่ายพลังงานและรับพลังงานกลับคืน โดยที่ควมถี่เป็น 50 กิโลเฮิร์ต

ในการใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิชชิงโดยเลือกแบบการต่อเป็นแบบพหุขมูล ดังนั้นหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง จะต้องใช้ขดลวดปฐมภูมิ 2 ขด ซึ่งโดยทั่วไป 2 ขด ต้องมีขนาดต่าง ๆ เท่ากัน เพราะจะมีผลทำให้สัญญาณของทั้งทางคาน Forward กับทางคาน Backward เท่ากันด้วยและขดลวดทุติยภูมิจะต้องคลุมขดลวดปฐมภูมิเท่ากัน ไม่เช่นนั้นจะทำให้สัญญาณจะไม่สมดุลย์และผลของการคิงกำลังจ่ายสู่ขดลวดจ่ายพลังงานจะไม่เท่ากันทั้งทางคาน Forward กับทางคาน Backward และจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้น

นอกจากนี้แล้วหม้อแปลงจ่ายพลังงานความถี่สูง ยังมีส่วนสำคัญ คือ ทางคานการเลือกแกนเนื่องจากความถี่สูงจึงต้องใช้แกนเฟอร์ไรท์ แต่ก็ยังมีปัญหาทางคานความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์ซึ่งทำให้แกนร้อน วิธีแก้ไขถ้าจำเป็นต้องใช้แกนเฟอร์ไรท์ จะทำได้โดยการลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กลงผลจะทำให้ความสูญเสียในแกนลดลง และอีกข้อหนึ่งคือทางคานความร้อนที่เกิดขึ้นทางคานขดลวดทุติยภูมิเพราะต่ออยู่กับขดลวดจ่ายพลังงาน และกระแสไหลสูงมาก จึงต้องมีการระบายความร้อน โดยใช้น้ำระบายความร้อน โดยการเชื่อมต่อทองแดงติดกับลวดคั่นน้ำที่เป็นขดลวดทางคานทุติยภูมิ เพื่อให้น้ำไหลเข้าไประบายความร้อนออก

จากการสร้างต้นแบบของเครื่องเหี่ยวน้ำสนามแม่เหล็ก ทำให้ทราบถึงปัญหาต่าง ๆ ของการออกแบบเครื่อง เพราะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการหว่านวัสดุที่มีในทองตลาด ในตลาดของวัสดุทางคานอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศ ยังค่อนข้างจะจำกัดอยู่ในวงการชิ้นส่วนของเครื่องใช้ขนาดเล็ก โดยชิ้นส่วนที่ใช้ทางคานอุตสาหกรรมหาได้ยากและมีราคาแพง ทางคานคุณภาพก็ยังมีปัญหาเพราะซื้อมาต้องนำมาทดสอบก่อนว่าทำงานได้หรือไม่

เครื่องจักรในตระกูลของเครื่องเหี่ยวน้ำสนามแม่เหล็ก มีมากมายและมีความจำเป็นทางคานอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้ คือ

- ทำผิวแข็งเหล็ก ซึ่งใช้ในการทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่ผลิตขึ้นมาใหม่มีคุณภาพที่ดี โดยทนต่อการขัดสีและมีความเหนียวไม่เปราะแตกง่าย
- ทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูง เพื่อที่จะทำการอัดหรือคดขึ้นรูป โดยไม่จำเป็นต้องใช้เตาเผาซึ่งต้องใช้เวลามาก แต่ถ้าใช้วิธีการเหี่ยวน้ำสนามแม่เหล็ก จะสามารถใช้เวลาน้อยในการผลิตชิ้นส่วน และยังสามารถปรับปรุงระบบเป็นระบบการผลิตแบบ

### อัตโนมัติ

- ทำเตาหลอมเหล็ก โดยเป็นลักษณะเตาหลอมขนาดเล็ก

จากการใช้หลักวิธีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่ามีข้อดีในการใช้วิธีนี้อยู่มากพอสมควร

ควร คือ

- ใช้เวลาในการปฏิบัติงานน้อย
- ใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อย
- ใช้เนื้อที่ติดตั้งเครื่องน้อย
- ไม่มีผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม
- ประสิทธิภาพของเครื่องสูง
- ทำเป็นเครื่องอัตโนมัติได้ง่าย
- คุณภาพในการผลิตดี

ในการสร้างและการพัฒนาเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเครื่องต่อไป จะสามารถสร้างได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากมีข้อมูลต่าง ๆ มากพอสมควรในการสร้างเครื่อง หลักการสวิตซ์ซึ่งยังมีการต่อกอีกหลายแบบ และจะใช้ตัวอะไร เป็นตัวทำหน้าที่สวิตซ์ซึ่งนั้นยังรอการวิจัยและพัฒนาขึ้นใช้เองภายในประเทศ

ในประเทศ

ทางด้านผู้วิจัยหวังว่า ผลงานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อประเทศในด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม และลดการนำเข้าของเครื่องจักรจากต่างประเทศ รวมทั้งเสริมความรู้ทางด้านการใช้เครื่องจักรให้เหมาะสม

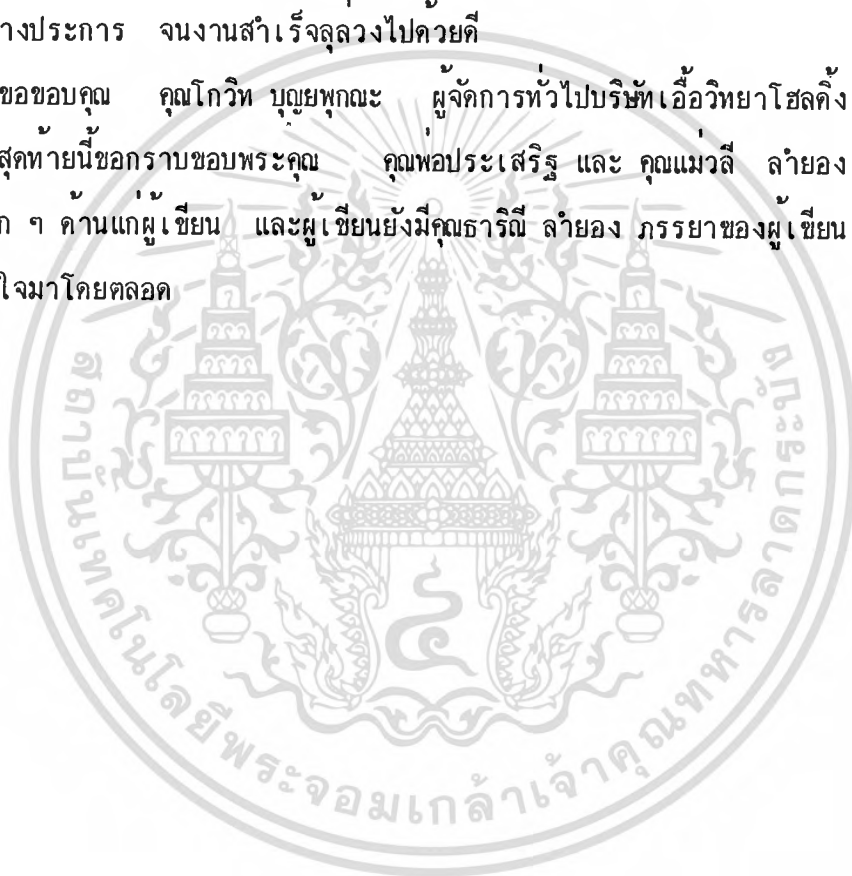
เอกสารอ้างอิง

- 1) Richard L. Stoll, "The Analysis of Eddy Currents"  
Oxford, Clarendon Press, 1974
- 2) John Davies and Peter Simpson, "Induction Heating Handbook"  
Mc.Graw-Hill Book Company, 1979
- 3) George Chryssis, "High-Frequency Switching Power Supply"  
Mc.Graw-Hill Book Company, 1984
- 4) William H. Hayt, Jr. "Engineering Electro-Magnetics"  
Mc.Graw-Hill Book Company, 1974
- 5) Joseph A. Edminister, "Electric Circuit"  
Mc.Graw-Hill Book Company, 1965
- 6) Charlie R. Brooks, "Heat Treatment of Ferrous Alloys"  
Hemisphere Publishing Corporation, 1979
- 7) Arthur D. Erans, "Designing with Field-Effect Transistors"  
Mc.Graw-Hill Book Company, 1981

### กิติกรรมประกาศ

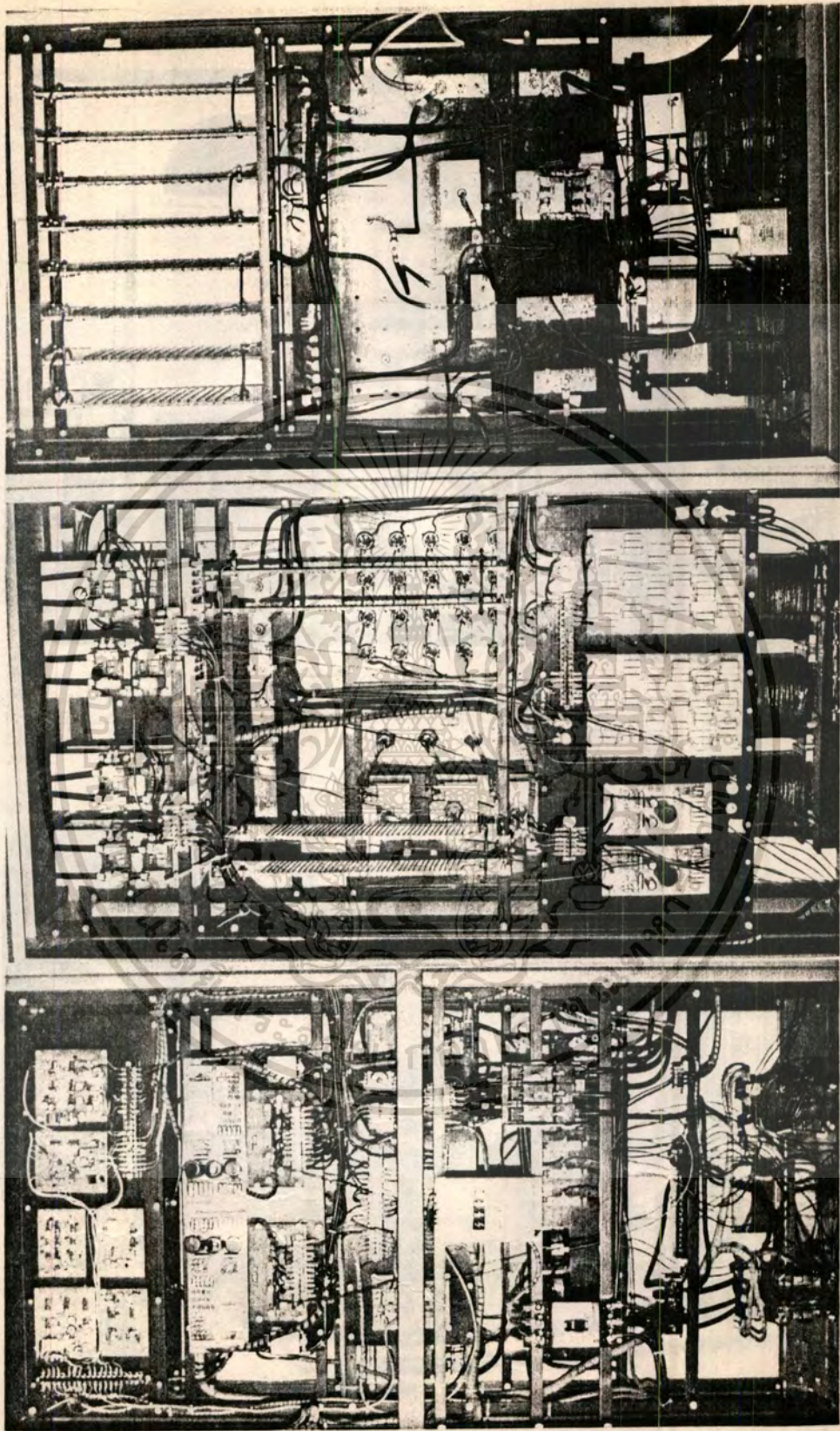
วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร. พีรศักดิ์ วรรณโรสด อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำชี้แนะและให้ความสนับสนุนมาโดยตลอด และขอขอบคุณ อ.วีรศักดิ์ วงศ์วิวัติ , อ.ประภาส ไพรสุวรรณา , อ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล , อ.ชัยวุฒิ จิตรอุทัย , อ.สุวัชร์ โสมพงษ์ , คุณวรรณภา สุขมากอนันต์ และน้อง ๆ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์บางประการ จนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณโกวิท บุญยพุกณะ ผู้จัดการทั่วไปบริษัท เอื้อวิทยาโฮลดิ้ง จำกัด สักทายนี่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพอประเสริฐ และ คุณแม่วลี ล้ายอง ที่ให้ความสนับสนุนในทุก ๆ ด้านแก่ผู้เขียน และผู้เขียนยังมีคุณธารีณี ล้ายอง ภรรยาของผู้เขียน คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

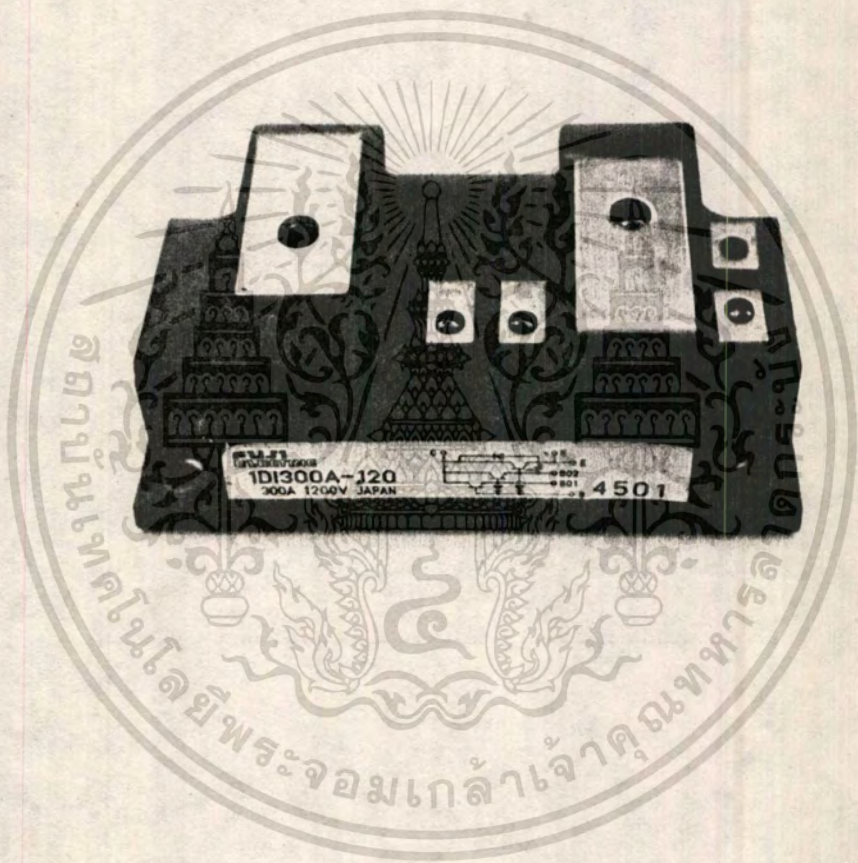




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



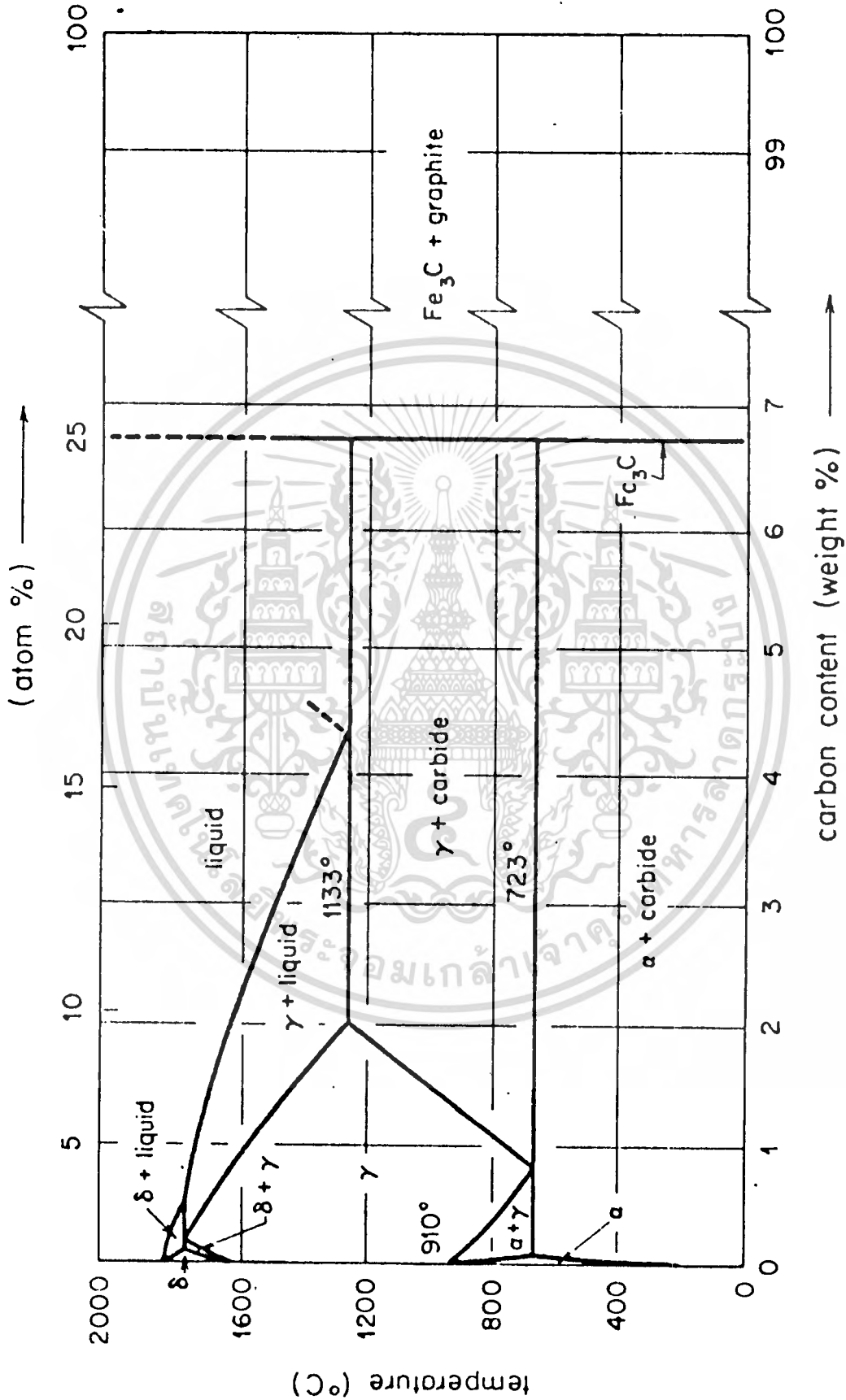
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก



The iron-carbon phase diagram. (Adapted from "Metals Handbook," 8th ed., vol. 8, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1973.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N.2

# 1200V POWER MODULES

## 1200V POWER MODULES

Large capacity, high voltage power transistors incorporating an increased number of junctions have many advantages over similar discrete devices.

These 1200V transistor power modules were developed primarily for 480V PWM controlled inverters and they have relatively large overload capacities.

The Vce (max) is 1200V and can be directly connected to 480V line circuit. They are highly economical to use since they do not need transformers.

FUJI 1200V power modules are electrically-isolated between the package and the lead terminals so that isolation of each individual component is not required. Use of these power modules will lead to the simplification of circuit, permit more compact layouts and reduce manufacturing time and costs. Important considerations in this age of energy conservation.

### General features

**-Electrically-isolated package**  
FUJI modules are electrically isolated. Collectors of ordinary discrete transistors carry a base plate potential. This is not true for FUJI power modules, and several FUJI power modules can be mounted on the same cooling fan without discharge to their individual bus bars. This permits better utilization of heat sinks and results in savings in system size and weight.

**-Simple connection**  
The screw-type collector, emitter and base terminals are all on the same plane. Groups of modules can be bus bar connected.

**-Free wheel diodes**  
FUJI power modules incorporated built in free wheel diodes for higher efficiency. Circuit design can be simplified, making modules more compact as a result.

**-Planar reliability**  
FUJI modules employ highly reliable triple diffusion planar transistors. Their dependable uniform characteristics set new standards in operational efficiency.

50A, 75A, 100A and 200A of 1200V modules will be marketed in September, 1984.



## 1200V MODULES

FUJI power modules are available in 1 pack (Ic = 300A) and 2 pack (Ic = 150A). Vce (max) = 1200 volts, Vce (max) = 1200 volts for direct connection to 480 volt line circuit.  
Ic = 150 amp  
Excellent high speed switching characteristics make them highly suitable for PWM inverters.

In the module package the terminals of collector and emitter do have no barriers between them. These terminals are flush with the case (see photo). This feature allows direct connection to the PC board. Moreover, the circuit wiring and the power bus bar can be laid out without crossing.  
Modules meet the requirements of IEC 1024 standards.

### Specification

Model	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)	Vce (max)
1200V120	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
1200V150	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
1200V200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

### Circuit schematic

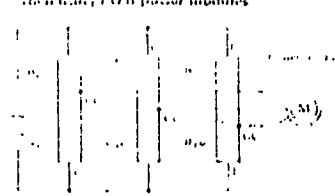


### Motor control circuit (Example)

When using discrete devices



### Inverters using FUJI power modules



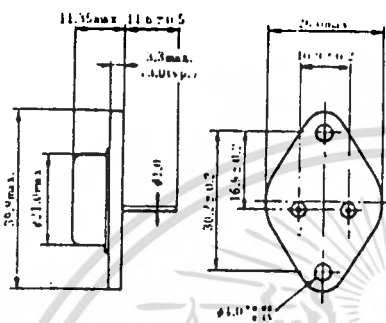
# 2SK133, 2SK134, 2SK135

シリコンチャンネルエンハンスメント MOS FET

電力増幅用  
2SJ48, 2SJ49, 2SJ50 とコンプリメンタリペア

SILICON N-CHANNEL ENHANCEMENT MOS FET

LOW FREQUENCY POWER AMPLIFIER  
Complementary pair with 2SJ48, 2SJ49 and 2SJ50



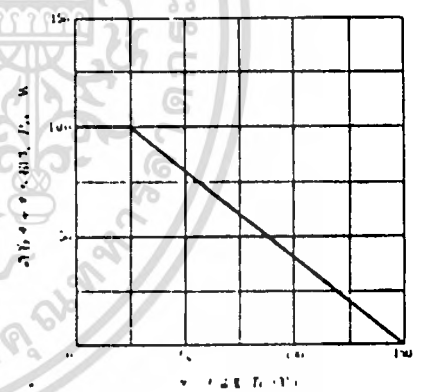
1. Gate
  2. Drain
  3. Source
  4. Case
- (Dimensions in mm)

(JEDEC TO-3)

最大定格 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

記号	項目	Symbol	2SK133	2SK134	2SK135	Unit
V <sub>GS</sub>	ゲート・ソース電圧	V <sub>GS</sub>	120	140	160	V
V <sub>DS</sub>	ドレイン・ソース電圧	V <sub>DS</sub>	±14	±14	±14	V
I <sub>D</sub>	ドレイン電流	I <sub>D</sub>	7	7	7	A
P <sub>ch</sub>	チャンネル損失	P <sub>ch</sub>	100	100	100	W
T <sub>stg</sub>	保存温度	T <sub>stg</sub>	-55 ~ +150	55 ~ +150	-55 ~ +150	°C

許容チャンネル損失のケース温度による変化  
MAXIMUM CHANNEL DISSIPATION CURVE



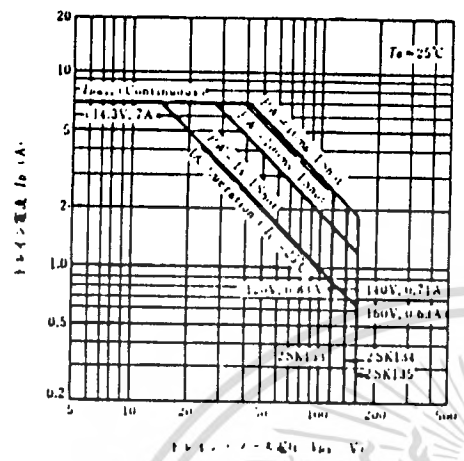
電気的特性 ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C)

記号	項目	Symbol	Test Condition	2SK133			2SK134			2SK135			Unit
				min	typ	max	min	typ	max	min	typ	max	
V <sub>GS(off)</sub>	ゲート・ソース遮断電圧	V <sub>GS(off)</sub>	I <sub>D</sub> =10mA, V <sub>DS</sub> =-10V	120	-	-	140	-	-	160	-	-	V
V <sub>GS(sat)</sub>	ゲート・ソース飽和電圧	V <sub>GS(sat)</sub>	I <sub>D</sub> =±100μA, V <sub>DS</sub> =0	±14	-	-	±14	-	-	±14	-	-	V
V <sub>GS(on)</sub>	ゲート・ソース飽和電圧	V <sub>GS(on)</sub>	I <sub>D</sub> =100mA, V <sub>DS</sub> =10V	0.15	-	1.45	0.15	-	1.45	0.15	-	1.45	V
V <sub>GS(th)</sub>	ゲート・ソース閾値電圧	V <sub>GS(th)</sub>	I <sub>D</sub> =7A, V <sub>DS</sub> =0	-	-	12	-	-	12	-	-	12	V
t <sub>on</sub>	オン時間	t <sub>on</sub>	V <sub>GS</sub> =10V, I <sub>D</sub> =3A*	0.7	1.0	1.4	0.7	1.0	1.4	0.7	1.0	1.4	μs
C <sub>iss</sub>	入力容量	C <sub>iss</sub>	V <sub>GS</sub> =10V, V <sub>DS</sub> =-10V, f=1MHz	-	600	-	-	600	-	-	600	-	pF
C <sub>oss</sub>	出力容量	C <sub>oss</sub>		-	350	-	-	350	-	-	350	-	pF
C <sub>isr</sub>	入力逆転容量	C <sub>isr</sub>		-	10	-	-	10	-	-	10	-	pF
t <sub>on</sub>	オン時間	t <sub>on</sub>	V <sub>GS</sub> =20V, I <sub>D</sub> =4A	-	180	-	-	180	-	-	180	-	ns
t <sub>off</sub>	オフ時間	t <sub>off</sub>		-	60	-	-	60	-	-	60	-	ns

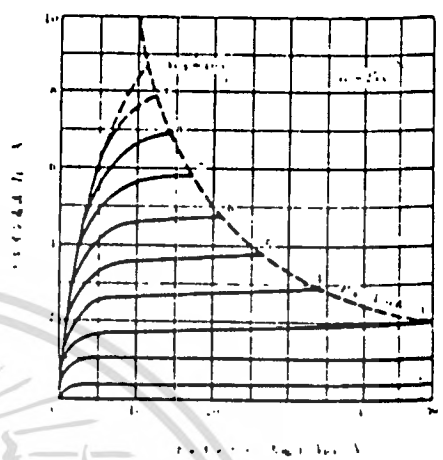
เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

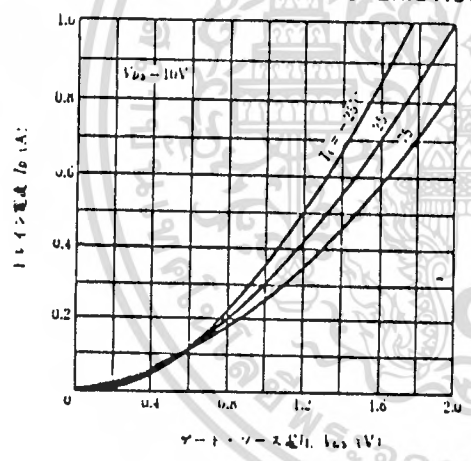
安全動作領域  
AREA OF SAFE OPERATION



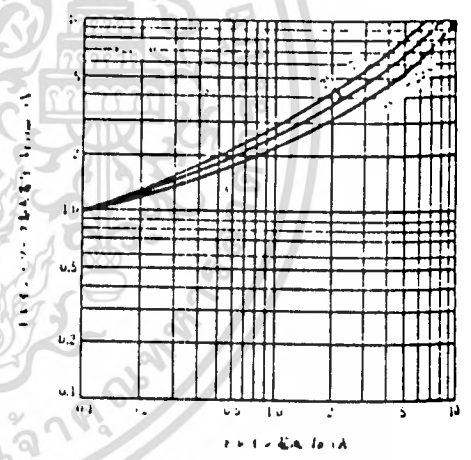
ソース接地出力静特性  
TYPICAL OUTPUT CHARACTERISTICS



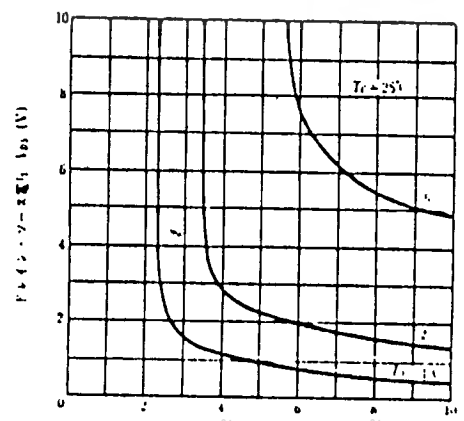
ソース接地伝達静特性  
TYPICAL TRANSFER CHARACTERISTICS



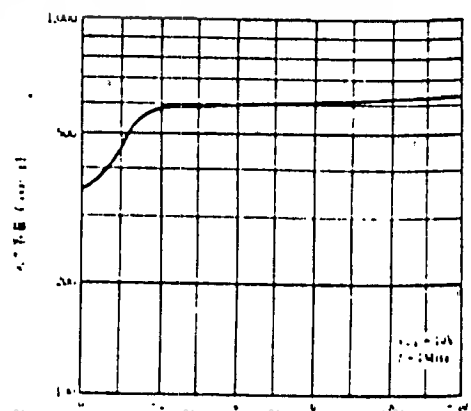
ドレイン・ソース飽和電圧対ドレイン電流特性  
DRAIN TO SOURCE SATURATION VOLTAGE VS. DRAIN CURRENT



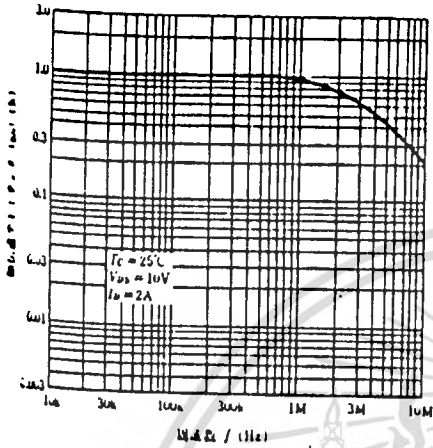
ドレイン・ソース電圧対ゲート・ソース電圧特性  
DRAIN TO SOURCE VOLTAGE VS. GATE TO SOURCE VOLTAGE



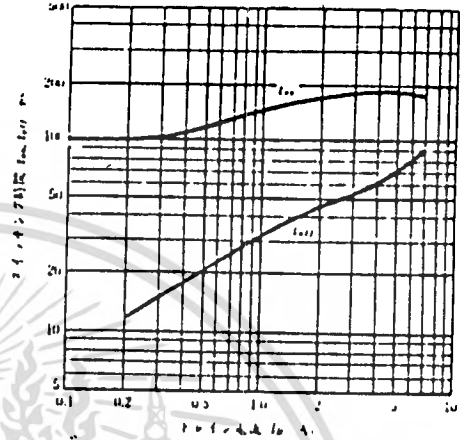
入力容量対ゲート・ソース電圧特性  
INPUT CAPACITANCE VS. GATE TO SOURCE VOLTAGE



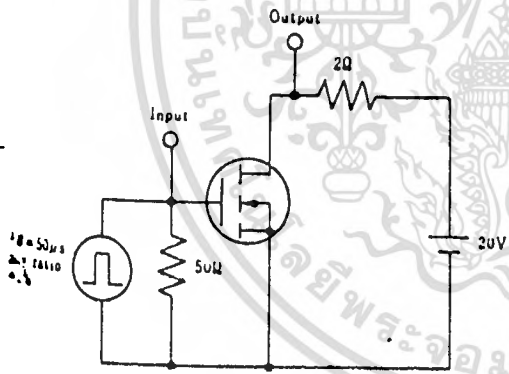
順伝達アドミタンス対周波数特性  
FORWARD TRANSFER ADMITTANCE  
VS. FREQUENCY



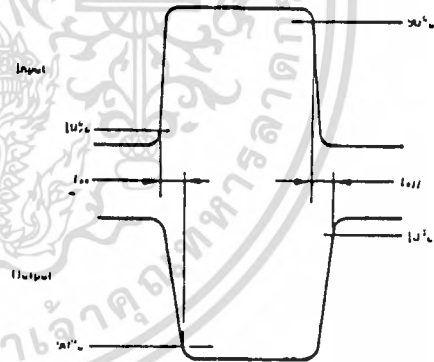
スイッチング時間対ドレイン電流特性  
SWITCHING TIME VS.  
DRAIN CURRENT



スイッチング時間測定回路  
SWITCHING TIME TEST CIRCUIT



応答波形  
RESPONSE WAVEFORM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2SJ48, 2SJ49, 2SJ50

シリコンPチャネルエンハンスメントMOS FET

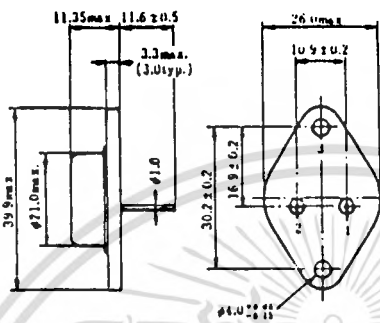
SILICON P-CHANNEL ENHANCEMENT MOS FET

低周波電力増幅用

LOW FREQUENCY POWER AMPLIFIER

2SK133, 2SK134, 2SK135 とコンプリメンタリペア

Complementary pair with 2SK133, 2SK134 and 2SK135



1. ヤート : Gate
  2. ドレイン : Drain
  3. ソース : Source (ヤース) (Case)
- (Dimensions in mm)

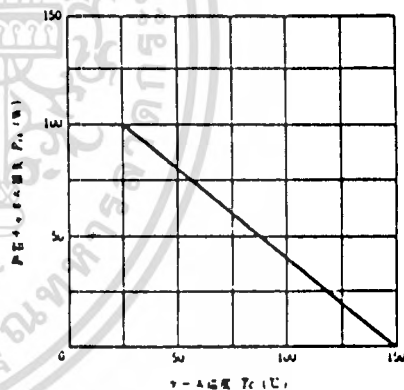
(JEDEC TO-3)

## 絶対最大定格 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

項	II	Symbol	2SJ48	2SJ49	2SJ50	Unit
ドレイン・ソース電圧		$V_{DS}$	-120	-140	-160	V
ヤート・ソース電圧		$V_{GS}$	±14	±14	±14	V
ドレイン電流		$I_D$	-7	-7	-7	A
Pチャネル損失		$P_{ch}$	100	100	100	W
チャネル温度		$T_{ch}$	150	150	150	$^\circ\text{C}$
周囲温度		$T_{amb}$	-55 ~ +150	-55 ~ +150	-55 ~ +150	$^\circ\text{C}$

$T_a = 25^\circ\text{C}$ における許容値  
Values at  $T_a = 25^\circ\text{C}$

## 許容チャネル損失のケース温度による変化 MAXIMUM CHANNEL DISSIPATION CURVE



## 電気的特性 ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

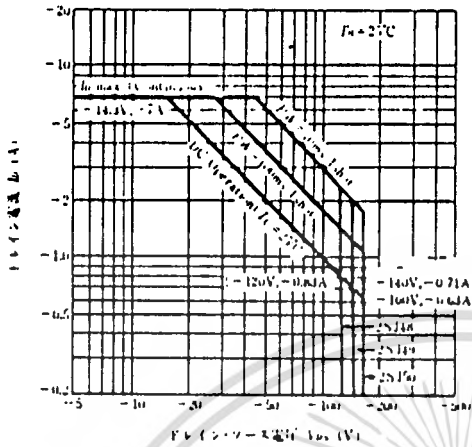
項目	Symbol	Test Condition	2SJ48			2SJ49			2SJ50			Unit
			min	typ	max	min	typ	max	min	typ	max	
ドレイン・ソース破壊電圧	$V_{DS, max}$	$I_D = -10\text{mA}, V_{GS} = 10\text{V}$	-120	—	—	-140	—	—	-160	—	—	V
ヤート・ソース破壊電圧	$V_{GS, max}$	$I_D = \pm 100\mu\text{A}, V_{DS} = 0$	±14	—	—	±14	—	—	±14	—	—	V
ヤート・ソース逆断電圧	$V_{GS, off}$	$I_D = -100\text{mA}, V_{DS} = -10\text{V}$	-0.15	—	-1.45	-0.15	—	-1.45	-0.15	—	-1.45	V
ドレイン・ソース飽和電圧	$V_{DS, sat}$	$I_D = -7\text{A}, V_{GS} = 0^\circ$	—	—	-12	—	—	-12	—	—	-12	V
伝達アドミタンス	$ y_{fs} $	$V_{DS} = -10\text{V}, I_D = -3\text{A}^\circ$	0.7	1.0	1.4	0.7	1.0	1.4	0.7	1.0	1.4	S
入力容量	$C_{in}$	$V_{DS} = -10\text{V}, V_{GS} = 5\text{V}, f = 1\text{MHz}$	—	900	—	—	900	—	—	900	—	pF
出力容量	$C_{out}$		—	400	—	—	400	—	—	400	—	pF
遅延容量	$C_{tr}$		—	40	—	—	40	—	—	40	—	pF
ターンオン時間	$t_{on}$	$V_{DS} = -20\text{V}, I_D = -4\text{A}$	—	230	—	—	230	—	—	230	—	ns
ターンオフ時間	$t_{off}$		—	110	—	—	110	—	—	110	—	ns

$^\circ$  Pulse Test

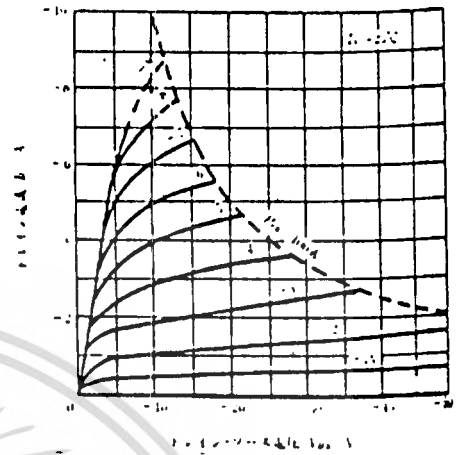
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลืกทั้งห้านนี้ให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

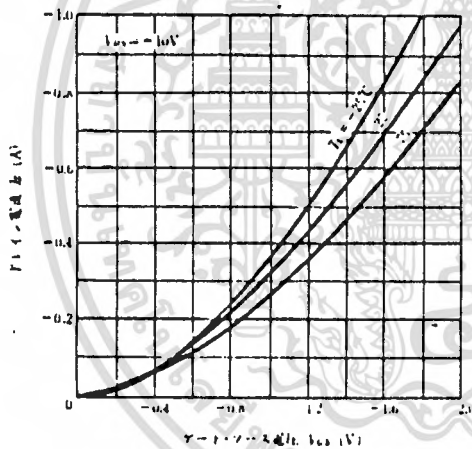
安全動作領域  
AREA OF SAFE OPERATION



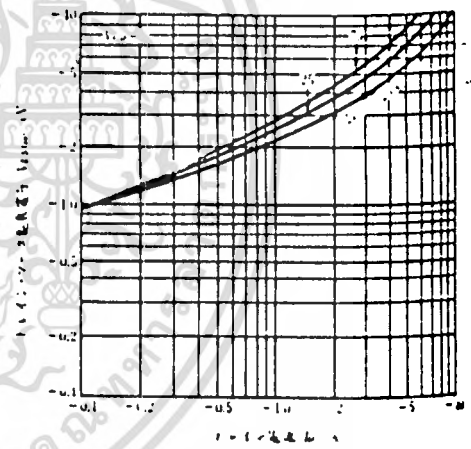
ソース接地出力静特性  
TYPICAL OUTPUT CHARACTERISTICS



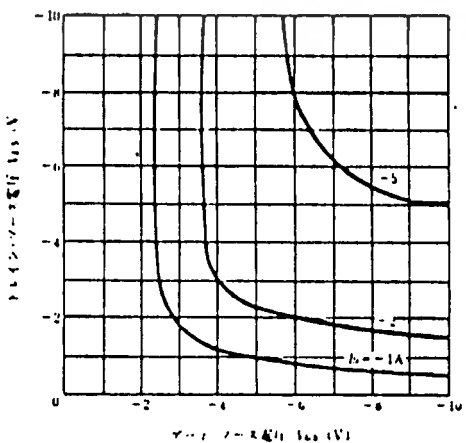
ソース接地伝達静特性  
TYPICAL TRANSFER CHARACTERISTICS



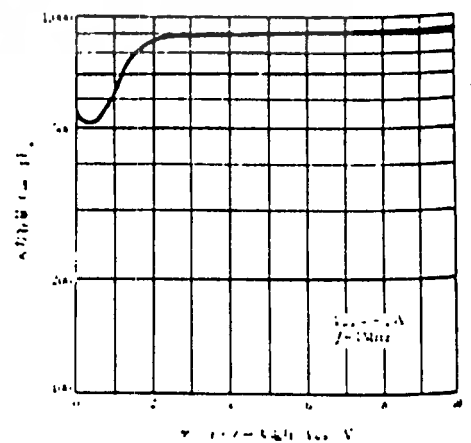
ドレイン・ソース飽和電圧対ドレイン電流特性  
DRAIN TO SOURCE SATURATION  
VOLTAGE VS. DRAIN CURRENT



ドレイン・ソース電圧対ゲート・ソース電圧特性  
DRAIN TO SOURCE VOLTAGE VS.  
GATE TO SOURCE VOLTAGE

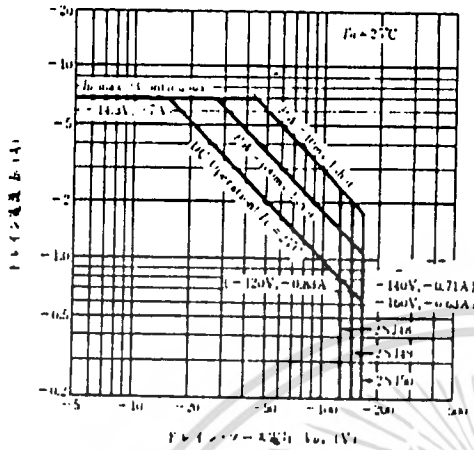


入力容量対ゲート・ソース電圧特性  
INPUT CAPACITANCE VS. GATE TO  
SOURCE VOLTAGE

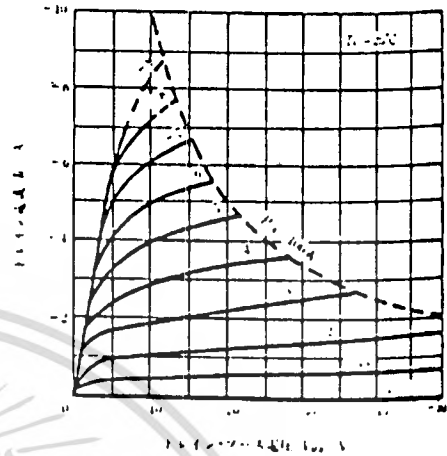


2SJ48, 2SJ49, 2SJ50

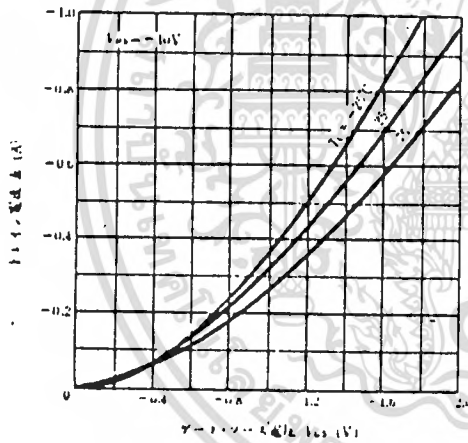
安全動作領域  
AREA OF SAFE OPERATION



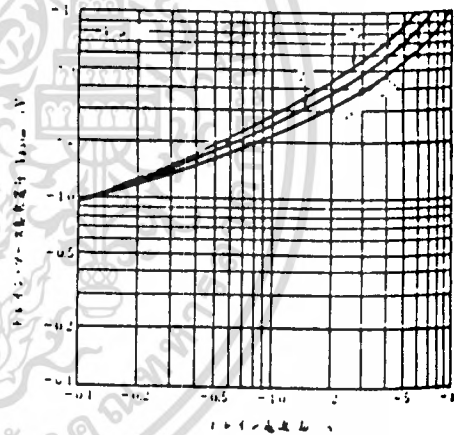
ソース接地出力特性  
TYPICAL OUTPUT CHARACTERISTICS



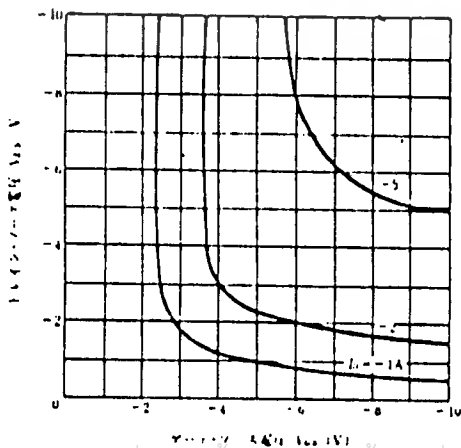
ソース接地伝達特性  
TYPICAL TRANSFER CHARACTERISTICS



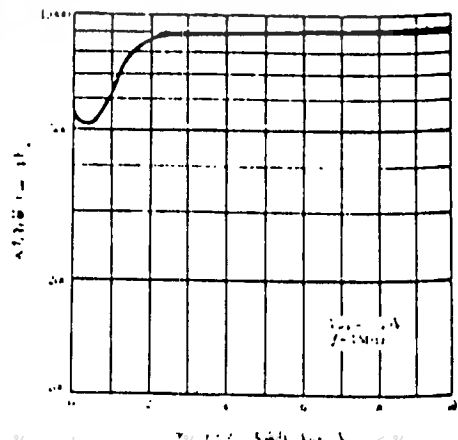
ドレイン・ソース飽和電圧対ドレイン電流特性  
DRAIN TO SOURCE SATURATION  
VOLTAGE VS. DRAIN CURRENT



ドレイン・ソース電圧対ゲート・ソース電圧特性  
DRAIN TO SOURCE VOLTAGE VS.  
GATE TO SOURCE VOLTAGE



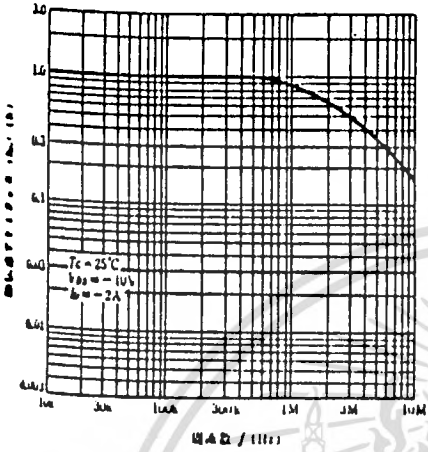
入力容量対ゲート・ソース電圧特性  
INPUT CAPACITANCE VS. GATE TO  
SOURCE VOLTAGE



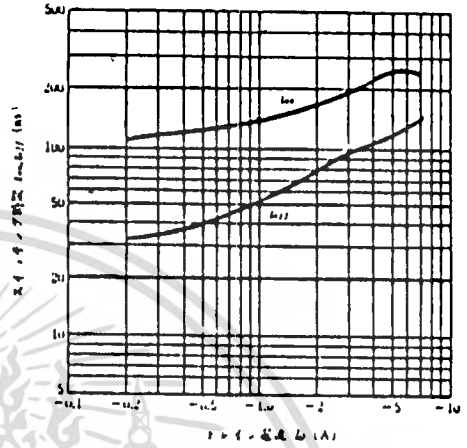
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

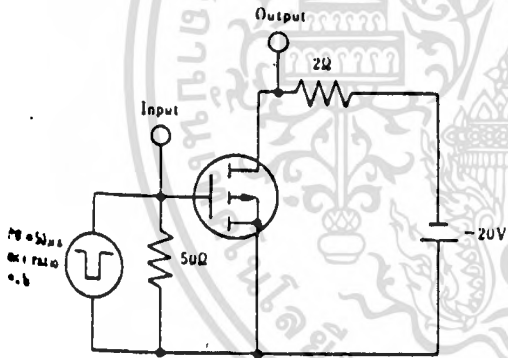
順伝達アドミタンス対周波数特性  
FORWARD TRANSFER ADMITTANCE  
VS. FREQUENCY



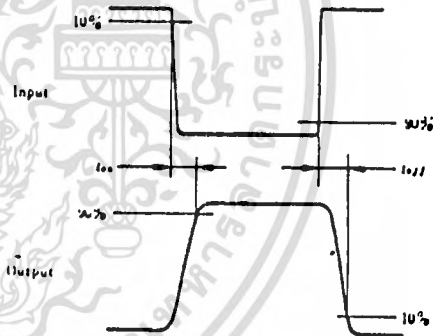
スイッチング時間対ドレイン電流特性  
SWITCHING TIME VS.  
DRAIN CURRENT



スイッチング時間測定回路  
SWITCHING TIME TEST CIRCUIT



応答波形  
RESPONSE WAVEFORM





# Display Drivers

DS75491, DS75492

## DS75491 MOS-to-LED Quad Segment Driver DS75492 MOS-to-LED Hex Digit Driver

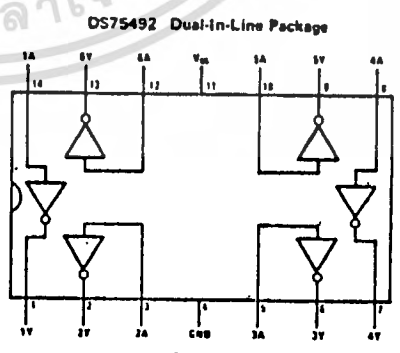
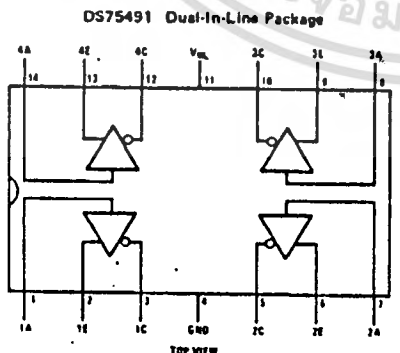
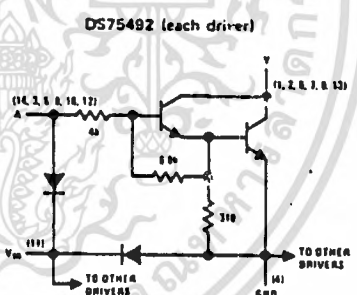
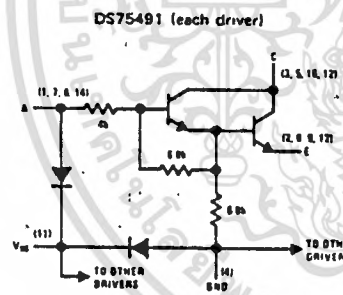
### General Description

The DS75491 and DS75492 are interface circuits designed to be used in conjunction with MOS integrated circuits and common-cathode LED's in serially addressed multi-digit displays. The number of drivers required for this time-multiplexed system is minimized as a result of the segment-address-and-digit-scan method of LED drive.

### Features

- 50 mA source or sink capability per driver (DS75491)
- 250 mA sink capability per driver (DS75492)
- MOS compatibility (low input current)
- Low standby power
- High-gain Darlington circuits

### Schematic and Connection Diagrams



Order Number DS75491N  
or DS75492N  
See NS Package N14A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DS75491, DS75492

### Absolute Maximum Ratings (Note 1)

	DS75491	DS75492
Input Voltage Range (Note 4)	-5V to V <sub>SS</sub>	-5V to V <sub>SS</sub>
Collector Output Voltage (Note 5)	10V	10V
Collector Output to Input Voltage	10V	10V
Emitter to Ground Voltage (V <sub>i</sub> ≥ 5V)	10V	
Emitter to Input Voltage	5V	
Voltage at V <sub>SS</sub> Terminal With Respect to Any Other Device Terminal	10V	10V
Collector Output Current		
Each Collector Output	50 mA	250 mA
All Collector Outputs	200 mA	600 mA
Continuous Total Dissipation	600 mW	600 mW
Operating Temperature Range	0°C to +70°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	+65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C	300°C

### Electrical Characteristics

DS75491 (V<sub>SS</sub> = 10V, T<sub>A</sub> = 0°C to +70°C unless otherwise noted) (Notes 2 and 3)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V <sub>CE ON</sub> "ON" State Collector Emitter Voltage	Input = 8.5V through 1 kΩ, T <sub>A</sub> = 25°C V <sub>E</sub> = 5V, I <sub>C</sub> = 50 mA		0.9	1.2	V
I <sub>C OFF</sub> "OFF" State Collector Current	V <sub>C</sub> = 10V, I <sub>IN</sub> = 40 μA V <sub>i</sub> = 0V, V <sub>IN</sub> = 0.7V			100	μA
I <sub>i</sub> Input Current at Maximum Input Voltage	V <sub>IN</sub> = 10V, V <sub>i</sub> = 0, I <sub>C</sub> = 20 mA		2.2	3.3	mA
I <sub>E</sub> Emitter Reverse Current	V <sub>IN</sub> = 0, V <sub>E</sub> = 5V, I <sub>C</sub> = 0			100	μA
I <sub>SS</sub> Current Into V <sub>SS</sub> Terminal				1	mA

DS75492 (V<sub>SS</sub> = 10V, T<sub>A</sub> = 0°C to +70°C unless otherwise noted) (Notes 2 and 3)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V <sub>OL</sub> Low Level Output Voltage	Input = 6.5V through 1 kΩ, T <sub>A</sub> = 25°C I <sub>OUT</sub> = 250 mA		0.9	1.2	V
I <sub>OH</sub> High Level Output Current	V <sub>OH</sub> = 10V, I <sub>IN</sub> = 40 μA V <sub>IN</sub> = 0.5V			200	μA
I <sub>i</sub> Input Current at Maximum Input Voltage	V <sub>IN</sub> = 10V, I <sub>OL</sub> = 20 mA		2.2	3.3	mA
I <sub>SS</sub> Current Into V <sub>SS</sub> Terminal				1	mA

### Switching Characteristics

DS75491 (V<sub>SS</sub> = 7.5V, T<sub>A</sub> = 25°C)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
t <sub>PLH</sub> Propagation Delay Time, Low-to-High Level Output (Collector)	V <sub>IN</sub> = 4.5V, V <sub>E</sub> = 0,		100		ns
t <sub>PHL</sub> Propagation Delay Time, High-to-Low Level Output (Collector)	R <sub>L</sub> = 200Ω, C <sub>L</sub> = 15 pF		20		ns

DS75492 (V<sub>SS</sub> = 7.5V, T<sub>A</sub> = 25°C)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
t <sub>PLH</sub> Propagation Delay Time, Low-to-High Level Output	V <sub>IN</sub> = 7.5V, R <sub>L</sub> = 39Ω,		300		ns
t <sub>PHL</sub> Propagation Delay Time, High-to-Low Level Output	C <sub>L</sub> = 15 pF		30		ns

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. Except for "Operating Temperature Range" they are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: Unless otherwise specified min/max limits apply across the 0°C to +70°C temperature range for the DS75491 and DS75492.

Note 3: All currents into device pins shown as positive, out of device pins as negative, all voltages referenced to ground unless otherwise noted. All values shown as max or min on absolute value basis.

Note 4: The input is the only device terminal which may be negative with respect to ground.

Note 5: Voltage values are with respect to network ground terminal unless otherwise noted.