

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

INDUCTION MELTING



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเศษฐจำเริญ

ดร. วิจิตร กิณเรศ

อ. สุรินทร์ คำฝอย

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 37001  
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

1. นายอมรพันธ์ องค์สุรกุล
2. นายอิทธิพล วิชากุล
3. นายเอกชัย ตันทนงศักดิ์กุล

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ. ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร. วิจิตร กิณเรศ)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ. สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Induction Melting

Amornphan Ongsurakul

Ittipon Wipagoon

Ekachai Tantanongsakkul

Assc.Prof.Dr. Viriya Pichetjamroen Advisor

Dr. Vijit Kinnares Advisor

Surin Kamfoi Advisor

1999

### Abstract

In accordance with the Faraday's law, the magnetic flux induction is applied for induction furnace. Induced voltage and eddy current in crucible are produced by the derivation of electromagnetic flux caused by AC voltage during the period of time ( $E = d\phi/dt$ ). As the result, heat produced by eddy current can melt the workpiece as requirement. In order to melt the aluminum work piece and transfer the energy effectively, the resonant frequency shall be applied in the full wave inverter which its switching device is MOSFET. The MOSFETs will switch from ordinary AC frequency 50 Hz to nearly the resonant frequency. The inducted melting process shall be succeeded completely by 2.3 kW electrical power required. We choose to use 30-50 kHz Frequency as the resonant frequency in this project and output power can be controlled with phase controlled by UC3879. We also use ferrite core for the matching transformer in order to minimize all losses during operation at high frequency. This can increase the eddy current in crucible and transfer the heat energy from the crucible to the workpiece at the optimum point.

## สารบัญ

|                                                                         | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ                                                                | I    |
| ABSTRACT                                                                | II   |
| สารบัญภาพ                                                               | III  |
| สารบัญตาราง                                                             | VI   |
| บทที่ 1 บทนำ                                                            | 1    |
| บทที่ 2 การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ                                     | 3    |
| 2.1 หลักการเบื้องต้นของการให้ความร้อน                                   | 6    |
| 2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน                               | 10   |
| 2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับบ้ำหลอม                              | 10   |
| 2.2.2 การประมาณการเหนี่ยวนำความร้อน                                     | 18   |
| 2.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบกับอุณหภูมิและความเข้มสนามแม่เหล็ก | 19   |
| 2.3 การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก                          | 20   |
| 2.4 หลักการรีโซแนนซ์                                                    | 27   |
| 2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC                                        | 27   |
| 2.4.1.1 พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L กับ C                                | 30   |
| 2.4.1.2 Q แฟกเตอร์ของวงจรอนุกรม RLC                                     | 30   |
| 2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน                                              | 31   |
| 2.4.2.1 Q แฟกเตอร์ของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานในทางปฏิบัติ                   | 33   |
| บทที่ 3 โครงสร้างวงจร                                                   | 34   |
| 3.1 วงจรเรียงกระแส(Rectifier) และวงจรกรองแรงดัน(Filter)                 | 34   |
| 3.1.1 วงจรเรียงกระแสหรือวงจรเรกติไฟเออร์ (Rectifier)                    | 34   |
| 3.1.2 วงจรกรองแรงดัน(Filter)                                            | 35   |
| 3.2 อินเวอร์เตอร์(Inverter)                                             | 36   |
| 3.2.1 ลักษณะการทำงานของวงจร                                             | 36   |
| 3.2.2 มอสเฟตกำลัง (Power Mosfet)                                        | 37   |
| 3.2.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ $t_0$ สำหรับฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์           | 39   |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.4 ตัวเก็บประจุลึกลับ $C_b$ เพื่อป้องกันการไม่สมมาตร       |    |
| ฟลักซ์แม่เหล็ก                                                | 39 |
| 3.3 หม้อแปลงความถี่สูง                                        | 40 |
| 3.3.1 ลักษณะแกนที่ใช้                                         | 40 |
| 3.3.1.1 การอิมตัวของแกนเฟอร์ไรต์                              | 41 |
| 3.3.1.2 ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์                          | 42 |
| 3.4 วงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลัง                 | 42 |
| 3.4.1 วงจรเรคทูเลเตอร์                                        | 43 |
| 3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์                                    | 43 |
| 3.4.2.1 ไอซีเบอร์ UC3879                                      | 43 |
| 3.4.2.2 การกำหนดเวลาการทำงาน                                  | 45 |
| 3.4.2.3 การปรับเลื่อนเฟส                                      | 45 |
| 3.4.3 วงจรแยกกราวด์                                           | 45 |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง                                 | 48 |
| 4.1 ผลของการเปลี่ยนความถี่กับการดึงกำลังไฟฟ้าของโหลด          | 48 |
| 4.2 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา                       | 50 |
| 4.3 ผลของการเปลี่ยนมุมเฟสกับการดึงกระแสของโหลด                | 52 |
| 4.4 การหาประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์                             | 54 |
| 4.5 ผลของการเปลี่ยนรอบของขดลวดรอบเบ้าหลอม                     | 56 |
| 4.5.1 ผลของการเปลี่ยนรอบกับการดึงกระแสของโหลด                 | 56 |
| 4.5.2 ผลของการเปลี่ยนรอบกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เบ้าหลอม | 57 |
| 4.6 ภาพสัญญาณต่างๆ                                            | 60 |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป                                      | 64 |
| ภาคผนวก                                                       |    |
| ภาคผนวก ก. วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และวงจร Isolate         |    |
| นำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์และวงจรในการทดลอง                      |    |
| ภาคผนวก ข. ข้อมูลของอุปกรณ์                                   |    |
| - IRFP 460                                                    |    |
| - UC 3879                                                     |    |

## เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

|                                                                                                                 | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งตัวนำทรงกระบอก                                                            | 4    |
| รูปที่ 2.2 เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด                                                                               | 4    |
| รูปที่ 2.3 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก                                                   | 5    |
| รูปที่ 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่เป็นสารแม่เหล็ก                                                      | 5    |
| รูปที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กต้องผ่านเบ้าหลอม<br>และไปตัดผ่านชิ้นงาน                  | 7    |
| รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป                                                                           | 8    |
| รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน                                                                         | 8    |
| รูปที่ 2.8 แผ่นคัลเบ้าหลอม                                                                                      | 9    |
| รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส<br>กับระยะทางจากผิวของเบ้าหลอม                                   | 9    |
| รูปที่ 2.10 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอมในอุดมคติ                                                      | 10   |
| รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวเบ้าหลอม                                        | 12   |
| รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวเบ้าหลอม                                   | 16   |
| รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์<br>ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดัน                            | 16   |
| รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก<br>กับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ | 17   |
| รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนกับชิ้นงาน                                                              | 17   |
| รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะใด ๆ กับระยะจากผิว                                                   | 18   |
| รูปที่ 2.17 พลิกซ์สนามแม่เหล็กที่คัลต้องผ่านเบ้าหลอม<br>และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก                               | 21   |
| รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก                                                                                | 23   |
| รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า                                                                                   | 23   |
| รูปที่ 2.20 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่มีจำนวน $N_c$ รอบ                                                          | 26   |
| รูปที่ 2.21 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่ สำหรับวงจรอนุกรม<br>RLC รีโซแนนซ์                        | 27   |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.22 กราฟอิมพีแดนซ์ กระแส และมุมเฟส กับความถี่<br>สำหรับรีโซแนนซ์แบบอนุกรม                                              | 28 |
| รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V_R$ , $V_C$ และ $V_L$ กับความถี่                                                      | 29 |
| รูปที่ 2.24 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร RLC รีโซแนนซ์                                                                   | 30 |
| รูปที่ 2.25 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นกระแสที่จุดรีโซแนนซ์<br>ของวงจร RLC ขนาน                                               | 31 |
| รูปที่ 2.26 วงจร RLC แบบขนานในทางปฏิบัติ                                                                                       | 32 |
| รูปที่ 2.27 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่<br>สำหรับรีโซแนนซ์แบบขนาน                                               | 32 |
| รูปที่ 3.1 วงจรบริดจ์เรคตีไฟเออร์                                                                                              | 34 |
| รูปที่ 3.2 การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์                                                                                          | 35 |
| รูปที่ 3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์                                                                                       | 36 |
| รูปที่ 3.4 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด N Chanel                                                                                     | 38 |
| รูปที่ 3.5 คุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต                                                                                          | 38 |
| รูปที่ 3.6 ลักษณะของการเกิดความลาด (Droop) ขึ้นบนแรงดัน<br>ที่ตกคร่อมไพลมารีเมื่อต่อตัวเก็บประจุลึอกถึง $C_b$ คั่นเข้ามาในวงจร | 40 |
| รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของหม้อแปลง                                                                          | 41 |
| รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนของวงจรควบคุม                                                                                  | 43 |
| รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ UC3879                                                                        | 44 |
| รูปที่ 3.10 การต่อวงจรที่ขาไอซีเบอร์ UC3879                                                                                    | 45 |
| รูปที่ 3.11 วงจร isolate                                                                                                       | 46 |
| รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่ากระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์<br>โดยมีการปรับความถี่ที่จุดรีโซแนนซ์ต่างๆ                                 | 49 |
| รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการทดลองการหาค่าเทียบกับเวลา                                                                                | 51 |
| รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของการดิ่งกระแสกับการปรับมุมเฟส                                                                           | 53 |
| รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันอินพุต                                                             | 55 |
| รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิเทียบกับ<br>การเปลี่ยนจำนวนรอบขดลวดรอบเบ้าหลอม                                                 | 58 |
| รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันและกระแสด้านอินพุต                                                                                      | 60 |
| รูปที่ 4.7 สัญญาณขับมอสเฟตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์                                                                        | 60 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.8 แสดง Dead time ของสัญญาณขับมอเตอร์                                                             | 61 |
| รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์<br>ขณะทำงานที่ความถี่รีโซแนนซ์                    | 61 |
| รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์<br>ขณะทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่รีโซแนนซ์ | 62 |
| รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์<br>ขณะทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่รีโซแนนซ์ | 62 |
| รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณด้านขาขึ้นของกระแสและแรงดันที่ความถี่รีโซแนนซ์                                      | 63 |
| รูปที่ 14.13 แสดงสัญญาณด้านขาของกระแสและแรงดันที่ความถี่รีโซแนนซ์                                         | 63 |



## สารบัญตาราง

|                                                                                   | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 4.1 การดั่งกระแสนของโหนดโดยมีการปรับความถี่<br>ที่จตุรีโซแนนซ์แตกต่างกัน | 49   |
| ตารางที่ 4.2 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา                              | 51   |
| ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนมุมเฟสกับการดั่งกระแสโหนด                              | 53   |
| ตารางที่ 4.4 แสดงการหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์                                 | 55   |
| ตารางที่ 4.5.1 แสดงผลของการเปลี่ยนรอบกับการดั่งกระแสของโหนด                       | 56   |
| ตารางที่ 4.5.2 แสดงผลของการเปลี่ยนรอบกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เข้าหาลอม       | 58   |

## บทที่ 1

### บทนำ

เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้น เป็นการให้หลักการของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงจุดที่สามารถที่จะทำให้ชิ้นงานหลอมได้ โดยจะมีรูปพลังงานที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับเครื่องหลอม 3 รูป คือ เริ่มต้นจากพลังงานในรูปไฟฟ้า พลังงานในรูปสนามแม่เหล็ก และสุดท้ายพลังงานความร้อนที่จะส่งถ่ายไปสู่ชิ้นงานเพื่อนำไปสู่การหลอม

ในเบื้องต้นของเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้นจะรับพลังงานไฟฟ้ามาเป็นอันดับแรก คือเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรเรกติไฟเออร์ (rectifier) และฟیلเตอร์ (filter) เพื่อกรองสัญญาณรบกวนและแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อควบคุมให้มีกระแสไหลคงที่และป้อนให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Inverter) ทำการสวิตช์ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกลับออกมา และสามารถควบคุมความถี่ได้ ซึ่งมีลักษณะคลื่นเป็นสแควร์ที่มีความถี่สูงๆ ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency) เนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หลังจากนั้นก็จะนำไปเป็นอินพุตให้กับหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ที่แปลงแรงดันให้ต่ำลงและเพิ่มกระแสที่ไหลไปยังโหลดที่เป็นโหลดรีโซแนนซ์แบบอนุกรม การเพิ่มกระแสให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อไปทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มากที่สุดเพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวนในตัวเบ้าหลอม ซึ่งก็คือการแปรเป็นพลังงานในรูปสนามแม่เหล็ก และหลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ในรูปของพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นที่เบ้าหลอม จากนั้นความร้อนจึงถ่ายเทจากเบ้าหลอมไปสู่ชิ้นงานที่เป็นอุณหภูมิเย็นเพื่อให้เกิดการหลอมขึ้น

เนื่องจากเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้น เป็นเครื่องหลอมที่ค่อนข้างประหยัดพลังงาน มีการสูญเสียพลังงานน้อย ใช้เวลาในการหลอมเร็ว ใช้พื้นที่ในการทำงานน้อย เงียบ ปลอดภัย ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นส่วนที่ทำให้ส่วนประกอบของชิ้นงานหลังการหลอมเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เห็นได้ชัดว่าเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษา และพัฒนา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการหลอมอุณหภูมิเย็นโดยอาศัยการเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ส่วนประกอบของวงจร หลักการทำงานของวงจรส่วนต่างๆ ในวงจร โดยมีรายละเอียดในบทต่างๆ ดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงโครงงานทุกๆ ไป
- บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน และหลักการรีโซแนนซ์
- บทที่ 3 โครงสร้างของวงจร
- บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ลักษณะรูปคลื่นกระแสและแรงดัน
- บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป



## บทที่ 2

### การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

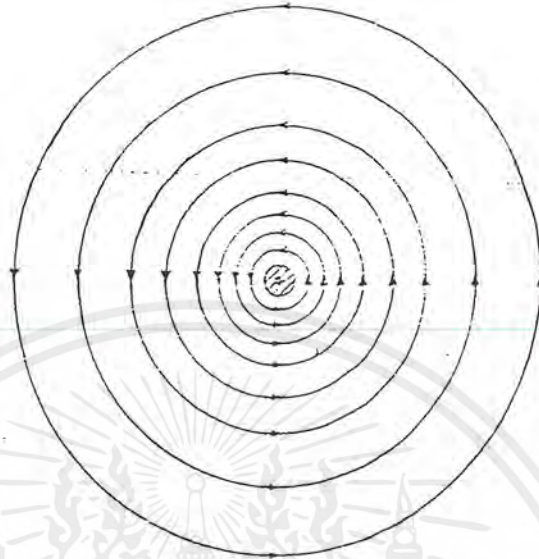
การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ต้องการจะหลอม โดยอาศัยทฤษฎีของฟาราเดย์ คือ จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานและเกิดความร้อนในชิ้นงานต่อไป

โดยจะป้อนกระแสและแรงดันไฟสลับเข้าตัววงจรเรกติไฟเออร์ (Rectifier) ผ่านฟิลเตอร์ (Filter) เพื่อกรองให้เป็นไฟตรง ผ่านวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Inverter) เพื่อทำการสวิตช์ให้ได้ไฟสลับที่มีความถี่สูงให้ใกล้เคียงกับความถี่ที่จูลรีโซแนนซ์ ซึ่งที่จูลรีโซแนนซ์เป็นจุดที่จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยหลังจากนั้นก็จะนำไปเป็นอินพุตให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อแปลงกระแสให้สูงขึ้นและนำไปจ่ายให้แก่ชุดบ้ำหลอม เพื่อนำไปสู่การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานต่อไป

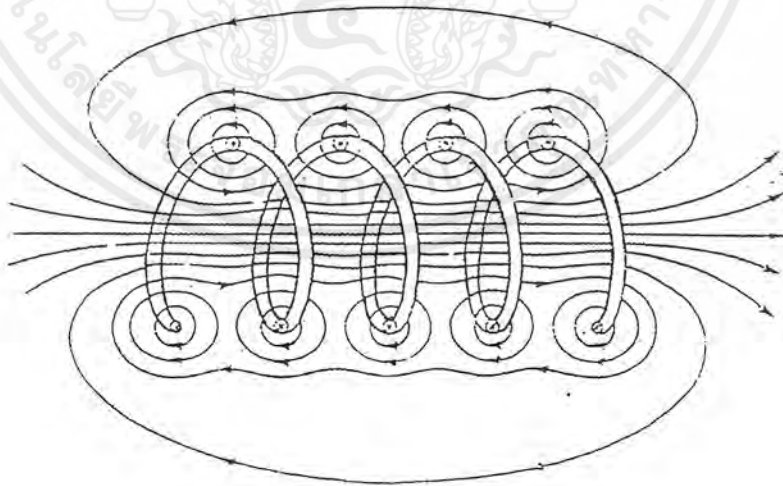
สำหรับทฤษฎีพื้นฐานก็จะอาศัยการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยพิจารณาจากสูตรพื้นฐาน

$$VI = I^2R \quad (2.1)$$

เมื่อจ่ายไฟกระแสตรงเข้าไปในตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งตัวนำซึ่งเป็นไปตามกฎมือขวา ที่บริเวณใกล้ๆ กับแท่งตัวนำจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงกว่าจุดอื่น และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความเข้มของสนามแม่เหล็กยังขึ้นอยู่กับกระแสไฟที่จ่ายเข้าไปยังแท่งตัวนำด้วย ดังรูปที่ 2.1 ถ้าจ่ายไฟตรงไปยังขดลวดโซลินอยด์ ผลที่เกิดขึ้นคือ ที่ภายในขดลวดจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าบริเวณภายนอกขดลวด ดังรูปที่ 2.2 รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งตัวนำทรงกระบอกและเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด

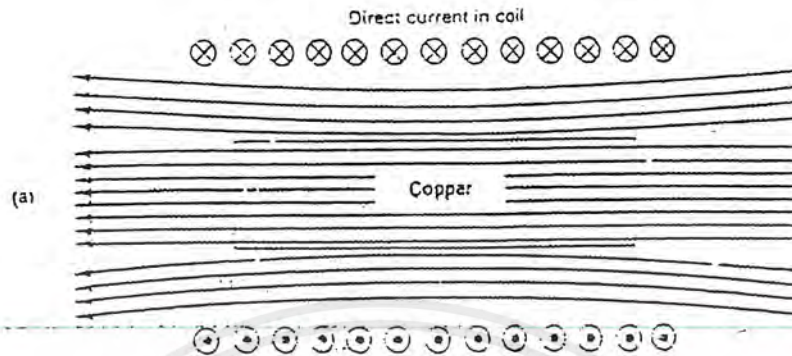


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งตัวนำทรงกระบอก

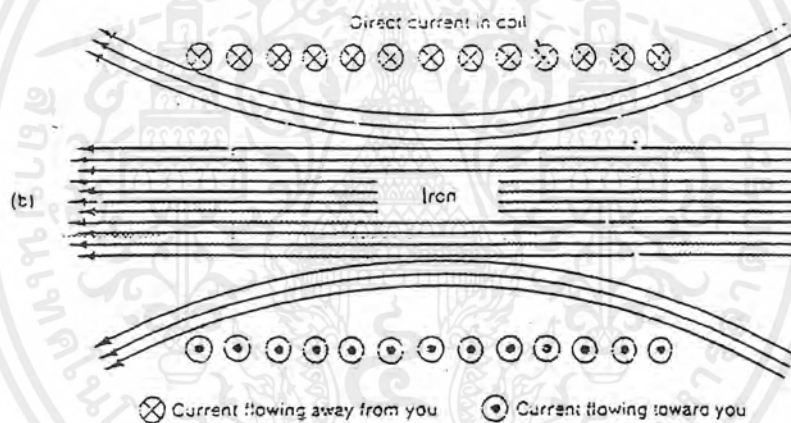


รูปที่ 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่เป็นสารแม่เหล็ก

พิจารณาเมื่อเอาแท่งตัวนำไปใส่ไว้ในคอยล์ที่จ่ายไฟกระแสตรงเข้าไป ถ้าแท่งตัวนำไม่เป็นสารแม่เหล็กจะสังเกตเห็นว่าจะไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.3 เมื่อเราเปลี่ยนแท่งตัวนำเป็นสารแม่เหล็ก จะสังเกตเห็นว่าจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2.4 ก็เนื่องจากค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (permeability) ของสารแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก

เมื่อเรานำแท่งตัวนำไปไว้ในคอยล์ที่จ่ายไฟกระแสตรงเข้าไป จะไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และก็จะไม่เกิดกระแสไหลวนด้วย ถ้าเราเปลี่ยนจากไฟกระแสตรงมาเป็นไฟกระแสสลับ ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และจะเกิดผลของกระแสไหลวนด้วย ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยฟาราเดย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระแสไฟฟ้าไหลวนส่วนมากจะไหลอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานแล้วจะค่อยๆ ไหลลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลเมื่อความลึกผิวของชิ้นงานมากขึ้นพูดอีกนัยหนึ่งก็คือกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไหลอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานนั่นเองปรากฏการณ์นี้เรียกว่า " Skin Effect " เนื่องจากการแปรสัณฐานของกระแสไหลวนนี้จะไหลวนรอบชิ้นงานเป็นเส้นทางปิด ดังนั้นจึงทำให้เกิดการขัดสีของโมเลกุลตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับจนกระทั่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นบนชิ้นงานโดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า "Eddy Current Loss" ซึ่งความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังบริเวณอื่น โดยการแผ่รังสีที่บริเวณผิว การพาความร้อนและการนำความร้อน เพราะฉะนั้นชิ้นงานที่เป็นพวกสารแม่เหล็กจึงสามารถที่จะหลอมได้โดยการอาศัยผลของการถ่ายเทความร้อนจากเบ้าหลอมไปสู่ชิ้นงานและผลของ eddy current loss ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานร่วมกัน

## 2.1 หลักการเบื้องต้นของการให้ความร้อน

ในการทำให้เกิดพลังงานความร้อน ก็คืออาศัยการแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งก็ต่อมาจากการอาศัยการสูญเสียของแกนเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis) และการสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวน (eddy current) ดังสมการ

$$\text{การสูญเสียในแกนเหล็ก} \quad P_c = P_h + P_e \quad (2.2)$$

$$\text{การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส} \quad P_h = K_h f B_{\max}^2 \quad (2.3)$$

$$\text{การสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวน} \quad P_e = K_e f^2 B_{\max}^2 \quad (2.4)$$

หลักการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

### 1. การให้พลังงานความร้อนทางอ้อม โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

คือ เมื่อขดลวดสร้างสนามที่เบ้าหลอม ได้รับการป้อนไฟฟ้าสลับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กคล่องผ่านขดลวดสร้างสนาม ชิ้นงาน และเบ้าหลอม แกรไฟต์ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ถ้าชิ้นงานที่ต้องการหลอมไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Non-Ferromagnetic) การหลอมจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากเบ้าหลอมเพียงอย่างเดียว

### 2. การให้พลังงานความร้อนทางตรง โดยอาศัยหลักการกระแสไหลวน

คือ ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นสารแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะคล่องผ่านขดลวดสร้างสนาม, ชิ้นงาน และเบ้าหลอม เช่นกัน แต่จะเกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหลวน (eddy current) ไหลอยู่ในชิ้นงานด้วย

รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก คล้องผ่านเบ้าหลอมและไปตัดผ่านชิ้นงาน ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนได้หรือไม่มากนักขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กและการนำไฟฟ้าของวัสดุที่จะนำมาใช้หลอม ถ้าหากเราพิจารณาการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยให้ทั้งระบบเป็นหม้อแปลงหนึ่งชุด ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนเบ้าหลอมจะเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบหนึ่งรอบ และชิ้นงานเป็นโหลดที่ต่ออยู่ซึ่งความต้านทานสมมูลย์ของโหลดที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่เบ้าหลอมจะมีค่าสูงเนื่องจากเป็นวัสดุที่ทำมาจากกราฟไฟ ดังนั้นความต้านทานสมมูลย์ในวงจรจึงเป็นผลของเบ้าหลอมเป็นส่วนใหญ่

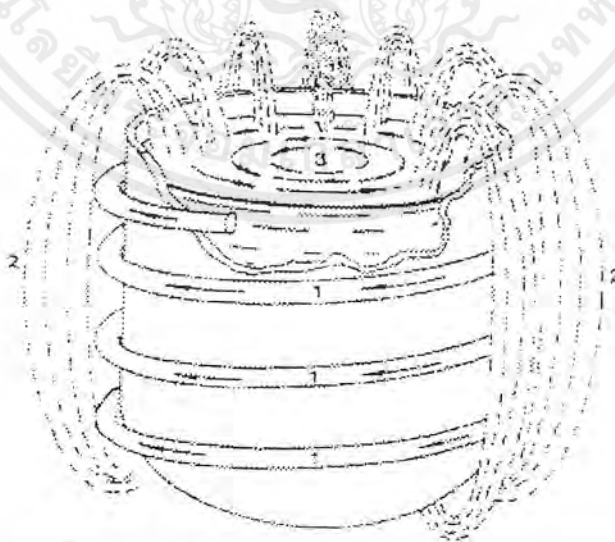
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงโดยทั่วไป ส่วนรูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำ เบ้าหลอมและชิ้นงาน จะเห็นว่าถ้า  $I_C$  เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วน  $I_W$  เป็นกระแสที่ไหลในเบ้าหลอม กระแสทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$I_W = N_C I_C \quad (2.5)$$

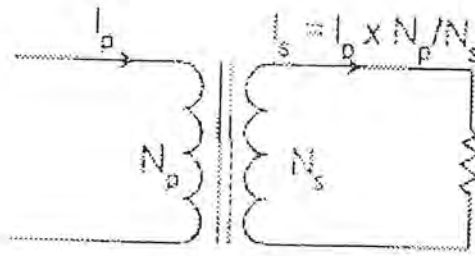
โดยที่  $N_C$  คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ  
กำลังสูญเสียเป็นความร้อนในเบ้าหลอมมีค่าเท่ากับ

$$P_W = N_C^2 I_C^2 R_W \quad (2.6)$$

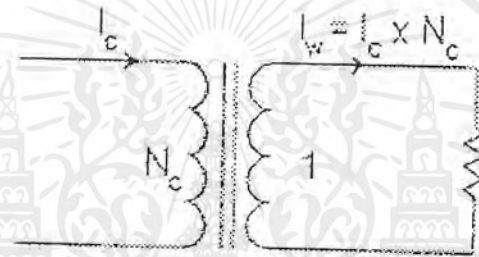
โดยที่  $R_W$  คือ ความต้านทานสมมูลย์ของเบ้าหลอม



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก  
คล้องผ่านเบ้าหลอมและไปตัดผ่านชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยทั่วไป



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน

จากรูปที่ 2.5 และจากปรากฏการณ์ผิวถ้าพิจารณาว่า กระแสโดยส่วนมากไหลอยู่ในระดับความลึกผิว จะสามารถหาความต้านทานสมมูลของได้ดังรูปที่ 2.8 เมื่อทำการคลี่เบ้าลอมออก ความต้านทานของเบ้าลอมจะมีค่า

$$R_w = \frac{2\pi R \rho}{\delta l_w} \quad (2.7)$$

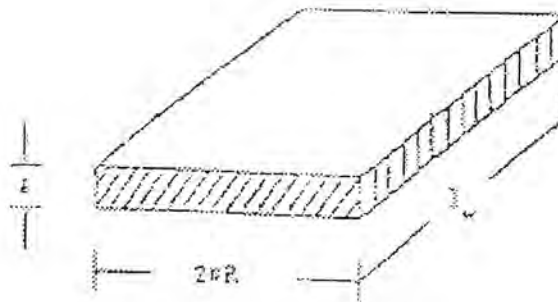
โดยที่  $\rho$  คือ สภาพความต้านทานจำเพาะของเบ้าลอม

$$\delta \text{ คือ ความลึกผิว } = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu \omega}}$$

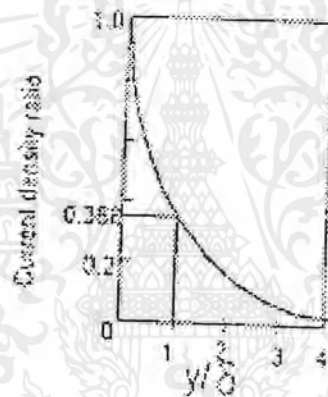
$\mu$  คือ ค่าความซึมซาบของเบ้าลอม และ  $f, \omega$  คือ ค่าความถี่

$R$  คือ รัศมีของเบ้าลอม

$l_w$  คือ ความยาวของเบ้าลอมซึ่งเท่ากับความสูงของขดลวดหนึ่งขด



รูปที่ 2.8 แสดงแผ่นคลิเบ้าหลอม



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส  
กับระยะทางจากผิวของเบ้าหลอม

จากสมการที่ (2.7) ความต้านทานสมมูลจะมีความสัมพันธ์กับ สภาพความต้านทาน ความ  
ลึกผิว และลักษณะทางเรขาคณิตของเบ้าหลอมด้วย

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของเบ้า  
หลอม เนื่องจากปรากฏการณ์ผิว จึงทำให้ความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับระยะทางจากผิวเป็น  
ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ที่ระดับความลึกผิว ความหนาแน่นของกระแสจะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของ  
ความหนาแน่นของกระแสที่ผิวเบ้าหลอม จึงประมาณว่ากระแสโดยส่วนมากจะไหลอยู่ในระดับ  
ความลึกผิวนี้

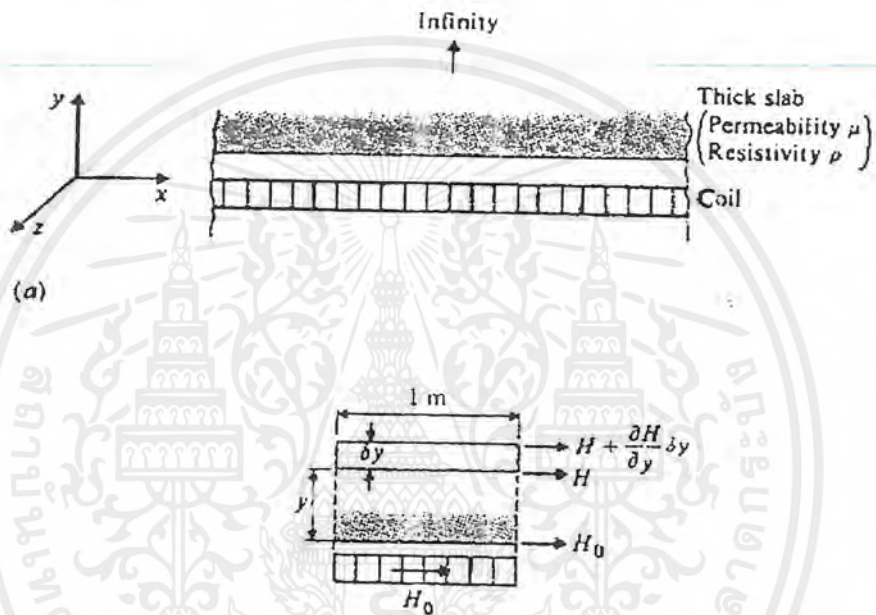
ถ้าพิจารณาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะพบว่า ไม่มีการใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกแต่ใช้เบ้าหลอมเป็นแหล่งความร้อนของตนเอง อีกทั้งเบ้าหลอมก็ไม่จำเป็นที่จะต้องสัมผัสกับขด  
ลวดสร้างสนามแม่เหล็ก การให้ความร้อนในลักษณะนี้จึงสามารถทำได้สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน

### 2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเป้าหมายลอม

ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เข้าใจโดยอาศัยทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะอธิบายการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเป้าหมายลอมที่มีลักษณะอุดมคติที่เรียกว่า Semi - infinite slab ถ้าสามารถทำความเข้าใจกับเป้าหมายลอมที่มีลักษณะอุดมคติ จะทำให้เข้าใจการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับเป้าหมายลอม



รูปที่ 2.10 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเป้าหมายลอมในอุดมคติ

รูปที่ 2.10 แสดงระบบที่ประกอบด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและเป้าหมายลอมยาวและหนามากโดยเป้าหมายลอมจะวางอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เป้าลอมที่มีลักษณะเป็นอุดมคติดังกล่าว เทียบได้กับโหลดทรงกระบอกที่มีรัศมีเป็นอนันต์ ในที่นี้สมมติว่าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าหมายลอมมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น  $H_0$  เนื่องจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ชิดกับเป้าหมายลอมมาก ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าหมายลอม โดยความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลาในทิศทางตามแกน  $X$  และสร้างกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ผิวเป้าหมายลอมตามแกน  $Z$  โดยความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นปริมาณเวกเตอร์ในที่นี้จะสมมติเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าหมายลอมดังนี้

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

$$H_Y = 0, \quad H_Z = 0 \quad (2.8)$$

โดยที่  $H_{om}$  คือค่ายอดของ  $H_X$  ที่ผิวชั้นงาน ( $y=0$ ) จากสมการ พื้นฐานทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบว่า

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \bar{E} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \bar{J} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{J}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 H_X}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 H_Y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 H_Z}{\partial t^2} \right] \quad (2.10)$$

เนื่องจากเป้าหมายลอมมีลักษณะเป็นอุดมคติทำให้  $H_Y = H_Z = 0$  ดังนั้น  $\bar{H}$  จะมีส่วนประกอบในทิศทางแกน X อย่างเดียว แสดงว่า

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{\partial^2 H_X}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_X}{\partial t} \quad (2.11)$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์ย่อยจะมีผลเฉลยในรูป  $H_X = H_X(Y) \cos \omega t$  ซึ่ง  $H_X(y)$  คือการเปลี่ยนแปลงของ  $H_X$  กับระยะทางในแนวแกน y ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ (2.11) ใหม่ในรูปสมการเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\frac{d^2 H_X}{dy^2} - j \frac{\mu}{\rho} \omega H_X = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{ให้} \quad \alpha^2 = \frac{\mu \omega}{2\rho} = \frac{1}{\delta^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{d^2 H_X}{dy^2} - 2j\alpha^2 H_X = 0 \quad (2.14)$$

เขียนสมการใหม่ได้

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - k^2 H_x = 0 \quad (2.15)$$

โดยที่  $k^2 = 2j\alpha^2$  สมการข้างบนจะมีผลเฉลยดังนี้

$$H_x(y) = A_1 \exp(ky) + A_2 \exp(-ky) \quad (2.16)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตเมื่อ  $y = \infty$ ;  $H_x$  จะมีค่าจำกัดค่าใดค่าหนึ่งแสดงว่า  $A_1 = 0$  และเมื่อ  $y = 0$ :  $H_x(y) = H_{om} \exp(j\omega t)$  ดังนั้น

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-ky) \exp(j\omega t) \quad (2.17)$$

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\sqrt{2j\alpha}y) \exp(j\omega t) \quad (2.18)$$

แต่  $\sqrt{2j} = \pm(1+j)$  ดังนั้น

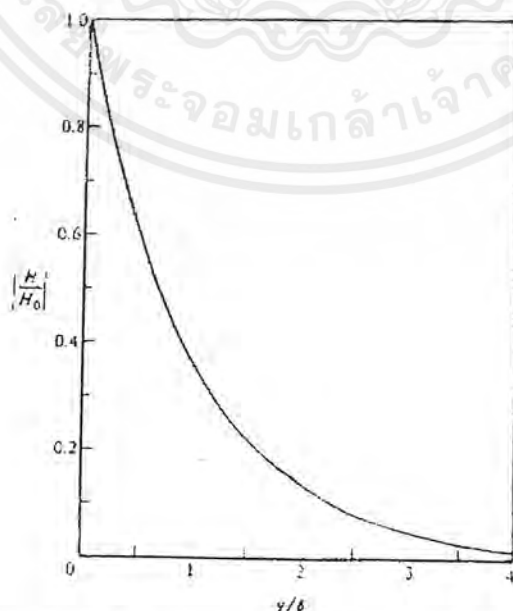
$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y(1+j)) \exp(j\omega t) \quad (2.19)$$

ใช้คำตอบเฉพาะส่วนจริง

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.20)$$

จากผลเฉลยตามสมการที่ (2.20) พบว่าที่ผิวของเบ้าหลอม  $y = 0$ ;  $H_x = H_{om} \cos(\omega t)$  ตามเงื่อนไขที่สมมติไว้ และที่ระยะใด ๆ จากผิวของเบ้าหลอมในทิศทางแกน Y ขนาดของความเข้มข้นแม่เหล็กจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสที่ระยะใด ๆ

จากผิวของเบ้าหลอมจะเป็นแบบล้าหลังเมื่อเทียบกับมุมเฟสที่ผิวเป็นปริมาณ  $\alpha y = \frac{y}{\delta}$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับระยะจากผิวเบ้าหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.20) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะใด ๆ กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเปลือก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 ถ้ากำหนดให้ความลึกผิวแทนด้วยสัญลักษณ์ ความลึกผิวนี้จะมีค่า  $\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}$  จะเห็นว่าที่ระดับความลึกผิว ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพียง 0.368 ของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิว ส่วนค่าความหนาแน่นกระแส ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก และฟลักซ์สนามแม่เหล็ก สามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

จาก 
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.21)$$

$$B_x(y) = B_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.22)$$

และจาก 
$$\vec{J} = \text{curl}(\vec{H}) \quad (2.23)$$

แสดงว่า 
$$\vec{J}_z = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \vec{k} ; \vec{J}_x = 0 ; \vec{J}_y = 0 \quad (2.24)$$

$$\vec{J}_z = \{\alpha \sqrt{2j} \exp(-\alpha y \sqrt{2j} + j\omega t)\} H_{om} \vec{k} \quad (2.25)$$

$$\vec{J}_z = \left\{ \alpha \sqrt{2} \exp\left(-\alpha y(1+j) + j\omega t + j\frac{\pi}{4}\right) \right\} H_{om} \vec{k} \quad (2.26)$$

ใช้เฉพาะส่วนจริงได้

$$\vec{J}_z = \alpha \sqrt{2} H_{om} \left[ \exp(-\alpha y) \cos\left(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4}\right) \right] \vec{k} \quad (2.27)$$

จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสที่เหนี่ยวนำมีทิศทางตั้งฉากกับความเข้มสนามแม่เหล็กเสมอ และมีมุมเฟสหน้าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่  $\frac{\pi}{4}$

เมื่อ  $y = 0$

$$\begin{aligned} J_{zo} &= \alpha \sqrt{2} H_{om} \exp j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \\ J_{zo} &= \alpha \sqrt{2} H_{om} \exp j\frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} J_z(y) &= J_{om} \exp(j\omega t - \alpha y \sqrt{2j}) \\ J_z(y) &= J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \end{aligned} \quad (2.29)$$

จากผลเฉลยของความหนาแน่นกระแส สามารถหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า จากความสัมพันธ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_z = \rho J_z \quad (2.30)$$

$$E_z = \rho J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.31)$$

จากผลเฉลยจากข้างต้นจะพบว่าปริมาณ  $\vec{H}$  ;  $\vec{B}$  ;  $\vec{j}$  และ  $\vec{E}$  จะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือเป็นไปตามปรากฏการณ์ผิว และจากความหนาแน่นกระแส สามารถหาค่ากระแสผลรวมความยาวได้ดังนี้

$$I = \int_0^\infty J_z(y) dy (x1) \quad (2.32)$$

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

$$I = J_{om} \operatorname{Re} \left[ \int_0^\infty \exp(j\omega t - (1+j)\alpha y) dy \right]$$

$$I = J_{om} \operatorname{Re} \left[ \frac{\exp(j\omega t)}{(1+j)\alpha} \right]$$

$$I = \frac{J_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$$

จากผลเฉลยของสมการที่ (2.32) จะพบว่ากระแสผลรวมความยาวต่อหนึ่งความยาวจะมีมุมเฟสล่าหลังมุมเฟสของความหนาแน่นกระแสที่ผิวอยู่  $\frac{\pi}{4}$  แต่จาก

$$J_{om} = \alpha \sqrt{2} H_{om} \exp j \frac{\pi}{4} \quad (2.33)$$

แสดงว่า 
$$I = \alpha \sqrt{2} H_{om} \exp j \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right) \frac{\exp \left( j \frac{\pi}{4} \right)}{\alpha \sqrt{2}}$$

$$I = H_{om} \exp(j\omega t) \quad (2.34)$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง

$$I = H_{om} \cos \omega t \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) จะเห็นว่ากระแสต่อหนึ่งความยาวมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิว ซึ่งสอดคล้องกับกฎฟาราเดย์ที่ว่า

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I \quad (2.36)$$

$$H(x1) = I$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ  $I = H_{om} \cos \omega t$

จากที่กล่าวมาเมื่อมีกระแสไหลในเบ้าหลอมย่อมเกิดความร้อนขึ้น กำลังสูญเสียต่อ 1 ตารางเมตรที่ผิวเบ้าหลอมจะมีค่า

$$P_s = \int_0^\infty \rho J_z^2(y) dy (xl)(xl) \quad (2.37)$$

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสแปรตามเวลาเป็นรายคาบในการหาค่ากำลังสูญเสีย ต่อหนึ่งพื้นที่ จึงต้องหาค่าเฉลี่ยกำลัง 1 คาบเวลาด้วยสมการที่ (2.37) จึงเป็น

$$P_s = \frac{\rho}{T} J_{om}^2 \int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-2\rho y) \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt \quad (2.38)$$

$$P_s = \frac{\rho}{2} J_{om}^2 \exp(-2\alpha y) dy \quad (2.39)$$

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

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

แต่จาก  $|J_{om}| = \frac{\sqrt{2}|H_{om}|}{\delta} = \frac{2H_0}{\delta}$

$$P_s = \frac{\rho}{\delta} H_0^2 \quad (2.40)$$

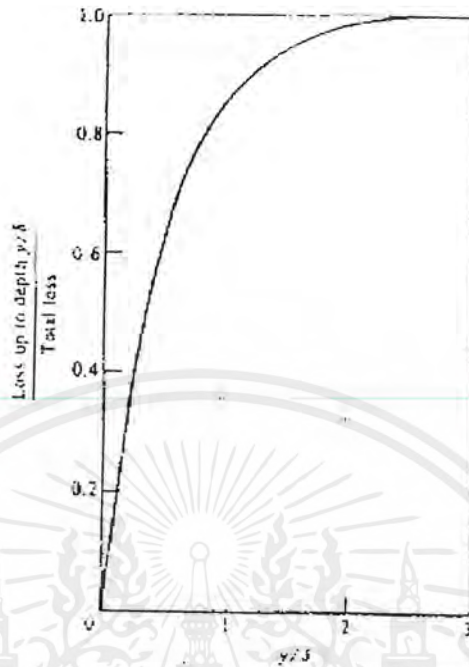
$$\frac{P_{sy}}{P_s} = 1 - \exp(-2\alpha y) \quad (2.41)$$

โดยที่  $H_0$  คือค่าอาร์เอ็มเอส ของ  $H_{om}$  ถ้าให้  $P_{sy}$  คือกำลังสูญเสียของเบ้าหลอมจากผิวถึงระดับความลึก  $y$  สัดส่วนของ  $P_{sy}$  กับ  $P_s$  แสดงดังสมการที่ (2.41) และความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของ  $P_{sy}$  และ  $P_s$  กับสัดส่วนของระยะทางจากผิวและความลึกผิวแสดง ดังรูปที่ 2.12 จากค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก สามารถหาค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กรวมต่อหนึ่งความยาวและค่าแรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กดังกล่าว ได้ดังนี้

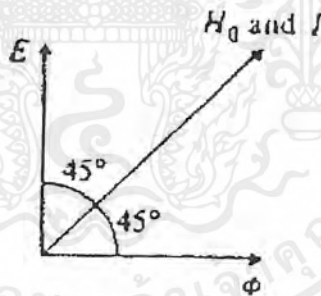
$$\phi = \int B_x(y) dy$$

$$\phi = \text{Real} \left[ \mu H_{om} \int_0^\infty \exp(j\omega t - (1+j)y) dy \right] \quad (2.42)$$

$$\phi = \frac{\mu H_{om}}{\alpha \sqrt{2}} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right) \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวเข้าหลอม



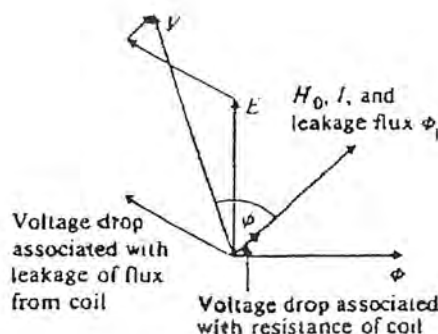
รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดัน

และจาก 
$$E = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.44)$$

$$E = -\frac{\mu N}{\alpha \sqrt{2}} H_{om} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$$

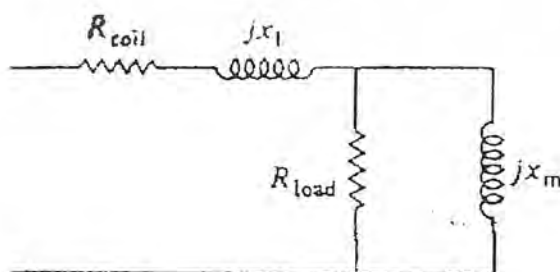
$$E = \frac{\mu N H_{om} \omega}{\alpha \sqrt{2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ

จากสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.45) จะเห็นว่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กผลรวมจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H_{om}$  และมุมเฟสจะล้าหลังมุมเฟสของความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่  $\frac{\pi}{4}$  และแรงดันที่เกิดขึ้นจะนำหน้ากระแสผลรวมอยู่  $\frac{\pi}{4}$  จากความสัมพันธ์ที่กล่าวสามารถนำไปเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่าง ๆ ได้ดังรูป 2.13 จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมจะพบว่าในกรณีที่เบ้าหลอมเป็นลักษณะอุดมคติ วงจรทางไฟฟ้าจะมีตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหลังที่มีค่าเป็น 0.707 แสดงว่าส่วนประกอบในส่วนจริง และส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลย์มีค่าเท่ากัน แต่ความเป็นจริงขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะมีความเหนี่ยวนำรั่วไหล ซึ่งทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบเลวลง และตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็มีความต้านทานของตัวเองอยู่แล้ว ทำให้เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.14 และสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าของระบบได้ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อนกับชิ้นงาน

### 2.2.2 การประมาณการเหนี่ยวนำความร้อน

$$\text{จาก } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}} \quad (2.46)$$

โดยที่  $\delta$  คือค่าความลึกผิว

$\rho$  คือค่าความต้านทานจำเพาะ

$\mu$  คือค่าความซึมซาบของเบ้าหลอม

$f$  คือค่าความถี่ที่ใช้งาน

สำหรับเบ้าหลอมที่เป็นแท่งโลหะทรงกระบอกรัศมี  $R$  ให้

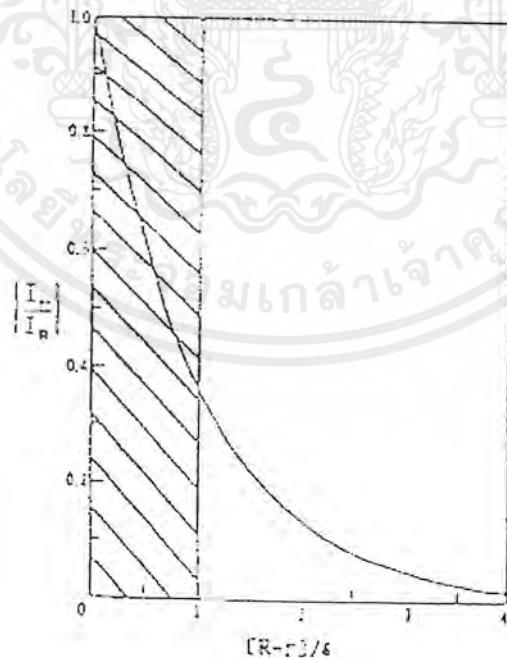
$I_R$  คือค่ากระแสที่ผิวเบ้าหลอม

$I_r$  คือค่ากระแสที่ระยะใด ๆ จากจุดศูนย์กลาง

ในกรณีที่สมมติว่า  $R$  ใหญ่กว่า  $\delta$  มาก ๆ แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_r$  กับ  $I$  จะเป็นดังนี้

$$I_r = I_R \exp\left[\frac{-(R-r)}{\delta}\right] \quad (2.47)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะใด ๆ กับระยะจากผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่ไหลในเบ้าหลอมได้จากการอินทิเกรต กระแสที่รัศมีใด ๆ กับความลึกกระแสที่ได้ จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟดังรูปที่ 2.16 แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ที่แรเงาก่อให้อีกนัยหนึ่งได้ว่าถึงแม้ว่ากระแสที่ไหลในเบ้าหลอมมีความสัมพันธ์กับระยะทางเป็น เอกซ์โพเนนเชียล แต่เหมือนกับว่ามีกระแสคงที่ขนาด  $I_R$  ไหลอยู่ที่ผิวเข้าหลอมในระดับความลึก  $\delta$  ถ้าเบ้าหลอมมีความยาว  $l_w$  แล้วมีความต้านทานสมมูลย์ที่กระแสคงที่ขนาด  $I_R$  ไหลผ่านจะมีค่า

$$R_w = \frac{2\pi R \rho}{\delta l_w} \quad (2.48)$$

ถ้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กมีจำนวนรอบเท่ากับ  $N_c$  และมีกระแสไหลผ่านขดลวดเป็น  $I_c$  และมีกระแสไหลผ่านเบ้าหลอม  $N_c I_c$  กำลังปรากฏที่เบ้าหลอมจะมีค่า

$$P_w = \frac{2\pi R \rho}{\delta l_w} N_c^2 I_c^2 \quad (2.49)$$

ในกรณีที่  $R$  ไม่ได้มากกว่า  $\delta$  มาก ๆ แล้ว จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสรุปได้ว่า

$$P_w = \mu \pi f H_{Rm}^2 l A_{wp} \quad (2.50)$$

ซึ่ง  $P$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ  $\frac{(2R)}{\delta}$  ในการคำนวณกำลังความร้อนที่เกิดขึ้นที่เบ้าหลอม กำลังที่ได้จะขึ้นอยู่กับ ค่าความถี่ที่ใช้งาน ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และคุณสมบัติของเบ้าหลอม ซึ่งหมายถึงขนาดและรูปร่าง รวมทั้งค่าความต้านทานจำเพาะ และค่าความซึมซาบของเบ้าหลอม เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่เบ้าหลอม จึงควรศึกษาว่าค่าเหล่านี้เปลี่ยนแปลงอย่างไร ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่โดยทั่วไปความถี่จะไม่มีผลต่อค่าทั้งสองเท่าใดนัก

### 2.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบกับอุณหภูมิ และความเข้มสนามแม่เหล็ก

ความซึมซาบโลหะนั้นปกติจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับสารที่เป็นประเภทเฟอร์โรแมกเนติกความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก กับความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นเชิงเส้น แต่จะเป็นไปตามกราฟกระแสทำแม่เหล็ก จะพบว่าความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติกจะขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก และระดับความอิ่มตัวของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กด้วย ได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบของสารกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้ผลเป็นที่ยอมรับตามสมการที่ (2.51) นอกจากค่าความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติก ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วยกล่าวคือปกติค่าความซึมซาบของสารประเภทนี้จะค่อนข้างมีค่าคงที่กับอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดอิ่มตัวค่าความซึมซาบของสารจะลดลงเป็นค่าความซึมซาบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญญากาศทันที มีผลให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นสารแม่เหล็ก สำหรับเหล็กผสมคาร์บอน 0.50% จะมีอุณหภูมิอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ  $760^{\circ}\text{C}$

$$\mu = \left( 1.43 \cdot 10^6 \frac{B_s}{B_{om}} + 1 \right) \mu_0 \quad (2.51)$$

$B_s$  ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิมิตัว

$H_{om}$  ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด

$\mu_0$  ค่าความซึมซาบของสูญญากาศ

### 2.3 การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากขดลวดให้ความร้อนมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับหม้อแปลง โดยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนเบ้าหลอมจะเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบหนึ่งรอบ และชิ้นงานเป็นโหลดที่ต่ออยู่ซึ่งความต้านทานสมมูลของโลหะที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยที่วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน สามารถที่จะพิจารณาว่ามีความต้านทานต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติสามารถที่จะวัดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห่อหุ้มพีแคนซ์ เครื่องวิเคราะห์ห่อหุ้มพีแคนซ์นี้จะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ได้ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรสมมูลของขดลวด เบ้าหลอมและชิ้นงาน

จากรูปที่ 2.17 ให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวของเบ้าหลอม คือ  $H_{Rm}$  และฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านระบบประกอบด้วย

$\phi_w$  เส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องผ่านเบ้าหลอม

$\phi_g$  เส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องผ่านอากาศ

$\phi_c$  เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านผิวของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในหัวข้อ 2.2 สามารถสรุปได้ว่า

$$P_w = \mu \pi f H_{Rm}^2 (l_w A_w) p \quad (2.52)$$

$$\phi_w = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) = \mu_0 \mu_r H_{Rm} A_w (q - jp) \quad (2.53)$$

โดย  $H_{Rm}$  ค่ายอดของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวของเบ้าหลอม ( $\text{Am}^{-1}$ )

$\phi_{wm}$  ค่ายอดของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องผ่านเบ้าหลอม (Wb)

$l_w$  ความยาวชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำ (m)

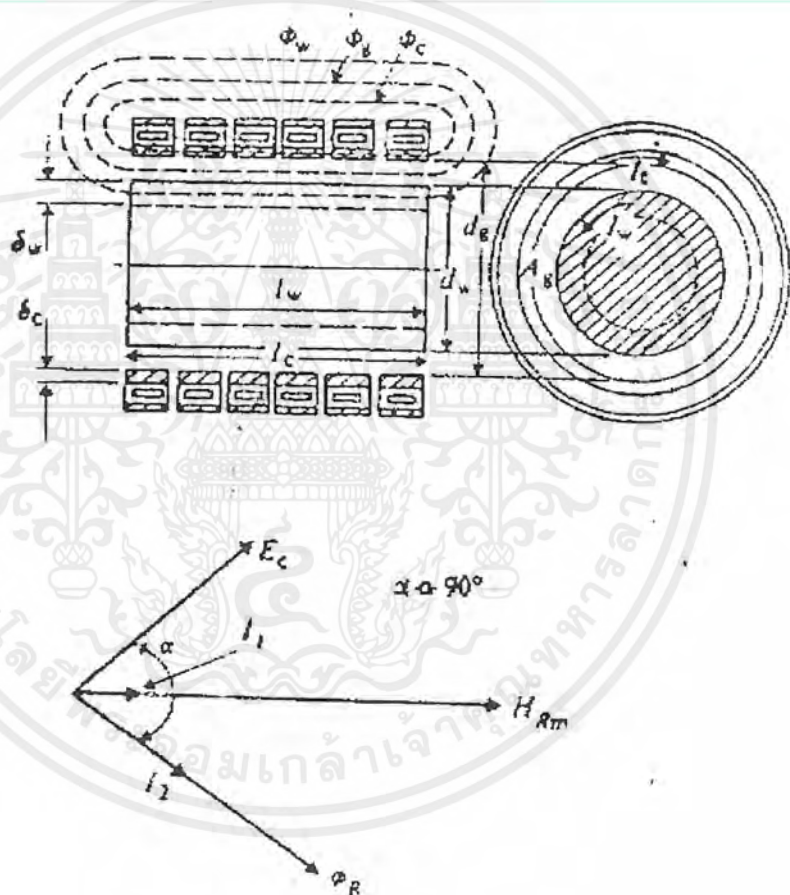
$A_w$  พื้นที่หน้าตัดของเบ้าหลอม ( $\text{m}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหัวข้อ 2.2 ถ้า  $\frac{d}{\delta} > 8$  แล้ว

$$p = \frac{2}{\left(1.23 + \frac{d}{\delta}\right)} \quad (2.54)$$

$$q = \frac{2}{d/\delta} \quad (2.55)$$



รูปที่ 2.17 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านเข้าหลอม และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

$\phi_c$  คือ ค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ซึ่งปกติฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ในขณะที่ไม่มีเข้าหลอม ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีเข้าหลอมอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เพราะพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์ต้องผ่านจะลดลง

นอกจากนี้ฟลักซ์สนามแม่เหล็กส่วนนี้ ยังผลให้ตัวประกอบกำลังของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเลวลง โดยปกติ

$$\phi_{gm} = \mu_0 H_{Rm} A_g \quad (2.56)$$

โดยที่  $A_g$  คือพื้นที่ที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กต้องผ่านอากาศ

$\phi_c$  คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ล่องขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็เกิดปรากฏการณ์ผิวเช่นเดียวกับที่บ้ำหลอม ตามปกติขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะสร้างจากทองแดงที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นแม่เหล็ก จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสรุปได้ว่า

$$\phi_{cm} = k_r \mu_0 \delta_c \pi d_c H_{om} \frac{(1-j)}{2} \quad (2.57)$$

$\delta_c$  คือความลึกที่เกิดในขดลวด และ  $k_r$  คือ Correction Factor ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 1.5 โดยทั่วไปจะใช้ค่า 1.15

จาก 
$$\phi_{om} = \phi_{wm} + \phi_{gm} + \phi_{cm} \quad (2.58)$$

$$\phi_{om} = \mu_0 H_{om} \left[ \left( A_g + \mu_r + qA_w + k_r d_r \delta_c \frac{\pi}{2} \right) - j \left( \mu_r p A_w + k_r d_c \delta_c \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.59)$$

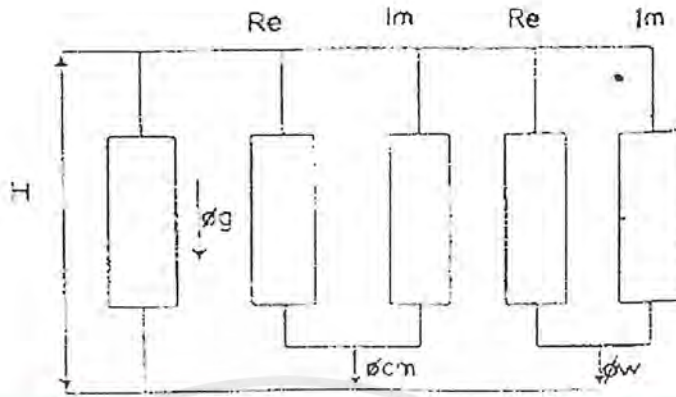
จาก 
$$H_{om} = \frac{\sqrt{2} I_c N_c}{l_c} \quad (2.60)$$

ให้  $E_c$  เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันตกคร่อมขดลวด

$$E_c = j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_c \phi_{om} \quad (2.61)$$

ได้ว่า

$$E_c = \frac{2\pi f \mu_0}{l_0} N_c^2 I_c \left[ \left( \mu_r p A_w + k_r d_c \delta_c \frac{\pi}{2} \right) + j \left( A_g + \mu_r q A_w + k_r d_c \delta_c \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.62)$$



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

จากสมการฟลักซ์สนามแม่เหล็ก สามารถที่จะเขียนเป็นเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กได้ ดังรูปที่ 2.18 ส่วนรูปที่ 2.19 เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ส่วนที่เป็นความต้านทานมาจากเบ้าหลอมและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำจากเบ้าหลอม ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และส่วนที่เป็นอากาศ ซึ่งอยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ได้

$$Z = (R_w + R_c) + j(X_c + X_w + X_c) \quad (2.63)$$

$$\text{ความต้านทานของเบ้าหลอม} \quad R_w = K(\mu_p A_w) \quad (2.64)$$

$$\text{ความต้านทานของขดลวด} \quad R_c = \frac{K}{2} (k_r \pi d_c \delta_w) \quad (2.65)$$

$$\text{รีแอกแตนซ์จากช่องอากาศ} \quad X_c = K A_c \quad (2.66)$$

$$\text{รีแอกแตนซ์จากชิ้นงาน} \quad X_w = K(\mu_r q A_w) \quad (2.67)$$

$$\text{รีแอกแตนซ์จากขดลวด} \quad X_c = \frac{K}{2} (k_r \pi d_c \delta_c) \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ 
$$K = 2\pi f \mu_0 \left( \frac{N_c^2}{I_c} \right) \quad (2.69)$$

ค่าเหล่านี้สามารถที่จะนำมาคำนวณเป็นคุณสมบัติของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่สำคัญได้ดังนี้

ประสิทธิภาพขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 
$$\eta = \left[ \frac{R_w}{(R_c + R_w)} \right] \quad (2.70)$$

ตัวประกอบกำลังของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 
$$\cos \theta = \frac{R_w + R_c}{|Z|} \quad (2.71)$$

โดยที่ 
$$Z^2 = (R_w + R_c)^2 + (X_e + X_w + X_c)^2 \quad (2.72)$$

กำลังงานที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 
$$P_c = \frac{P_w}{\eta} \quad (2.73)$$

กำลังที่ปรากฏที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก Coil 
$$VA = \frac{P}{\cos \theta} \quad (2.74)$$

$$\text{Coil } VA = I_c^2 |Z| \quad (2.75)$$

แรงดันต่อรอบที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 
$$\frac{E_c}{N_c} = \frac{\text{Coil } VA}{\text{Total Ampere Turn}} \quad (2.76)$$

$$= \frac{(VA)_c}{H_0 l_c}$$

Ampere Turn ของขดลวด

$$I_c \cdot N_c = H_0 l_c$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นถ้าพิจารณาโดยละเอียดจะได้ว่า

$$R_c = \pi \sqrt{\pi k_r d_c} \left[ \frac{N_c^2}{I_c} \right] \sqrt{\rho_c \mu_0 f} \quad (2.77)$$

โดยประมาณ 
$$R_w = 4 \sqrt{\pi A_w} \left[ \frac{N_c^2}{d_c l_c} \right] \sqrt{\rho_w \mu_w f} \quad (2.78)$$

$$L_c = \frac{\sqrt{\pi}}{2} k_r d_c \left[ \frac{N_c^2}{I_c} \right] \sqrt{\frac{\rho_c \mu_0}{f}} \quad (2.79)$$

โดยประมาณ 
$$L_w = \frac{2 A_w}{\sqrt{\pi d_w}} \left[ \frac{N_c^2}{I_c} \right] \sqrt{\frac{\rho_w \mu_w}{f}} \quad (2.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_g = \mu_0 \left[ \frac{N_c^2}{l_c} \right] A_w \quad (2.81)$$

จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้ พบว่าค่าพารามิเตอร์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและเบ้าหลอมจะขึ้นกับลักษณะและขนาดของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก รวมทั้งจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและถ้าพิจารณาให้ขดลวดและเบ้าหลอมคงที่ สำหรับความต้านทานเนื่องจากเบ้าหลอมและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะแปรตามรากที่สองของค่าความต้านทานจำเพาะ ความซึมซาบทางแม่เหล็ก และความถี่

ในกรณีของค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากเบ้าหลอมและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะแปรตามรากที่สองของค่าความต้านทานจำเพาะ ความซึมซาบทางแม่เหล็ก และแปรผกผันกับรากที่สองของความถี่

ในกรณีของค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากแกนอากาศ พบว่าจะขึ้นกับลักษณะของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก พื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็กต้องผ่าน โดยจะไม่มีความสัมพันธ์กับความถี่

ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะพบว่าเป็นการยากที่จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ เพราะค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของเบ้าหลอมด้วย และจากที่กล่าวมาจากการคำนวณจะคิดว่าเป็นกรณีอุดมคติคือขดลวดมีความยาวมาก ๆ และฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านช่องอากาศจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ค่าที่ได้อาจผิดไปจากความจริง เช่น ในกรณีฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านอากาศ จึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนสูตรที่ใช้ในการคำนวณให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยจะคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่คล่องผ่านอากาศ รูปที่ 2.20 แสดงขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบเป็น  $N_c$  รอบ จึงสูตรที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นสูตรที่มีการปรับปรุงให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

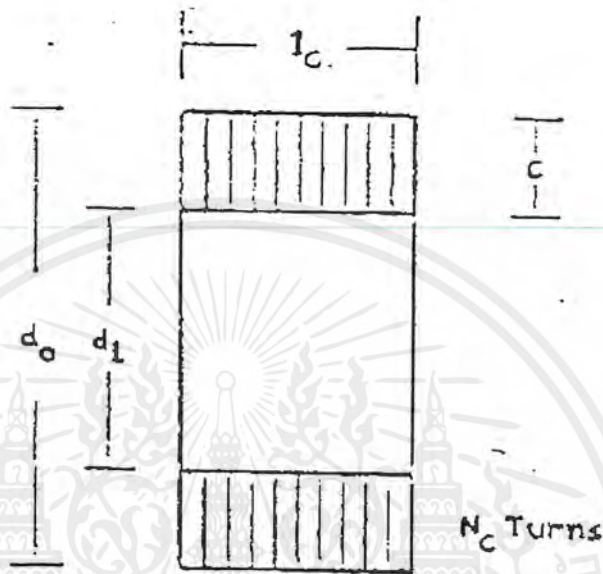
$$L_g = \lambda d N_c^2 (\mu H) \quad (2.82)$$

$$\lambda = \frac{0.1 \pi^2}{\left\{ 0.45 + \gamma + \beta + \frac{2\gamma\beta(\gamma + l_c)}{3(\gamma + 2)} \right\}} \quad (2.83)$$

$$\gamma = \frac{l_c}{d} \quad (2.84)$$

$$\beta = \frac{c}{d} \quad (2.85)$$

$$d = \frac{(d_0 + d_1)}{2} \quad (2.86)$$



รูปที่ 2.20 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่มีจำนวน  $N_c$  รอบ

ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้นี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำของช่องอากาศทั้งหมด ในกรณีที่  
มีเข้าหาลอมอาจต้องคูณด้วยตัวประกอบ เพื่อให้เป็นเพียงพื้นที่ส่วนที่เป็นฟลักซ์สนามแม่เหล็กต้อง  
ผ่านเท่านั้น

## 2.4 หลักการรีโซแนนซ์

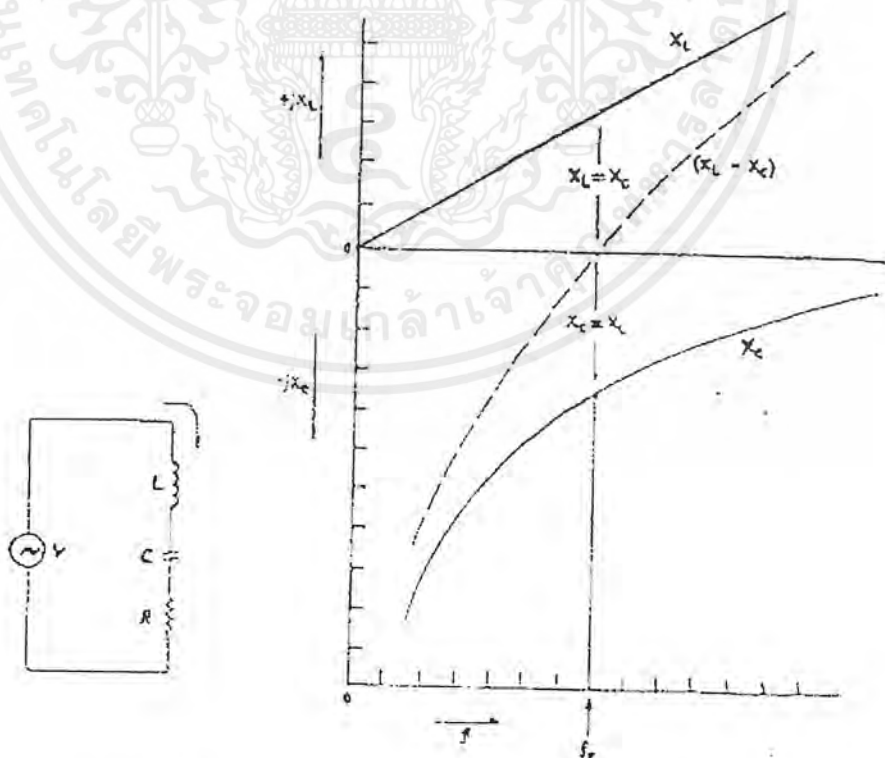
เมื่อเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรอนุกรม RLC จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่ง ค่า  $X_L$  จะเท่ากับ  $X_C$  เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC มีค่าต่ำที่สุดนั่นคือ  $Z=R$  ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า “ ปรากฏการณ์รีโซแนนซ์ ” และความถี่ที่เกิดขึ้น ณ จุดรีโซแนนซ์นี้เราจะเรียกว่า “ ความถี่รีโซแนนซ์ ” และเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดรีโซแนนซ์นี้มีค่าต่ำสุดดังนั้นค่ากระแสที่ไหลผ่านในวงจรจึงมีค่ามากที่สุด

ในทำนองเดียวกันถ้าเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร RLC แบบขนานจนถึงค่าหนึ่งก็จะพบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์รีโซแนนซ์ได้เช่นกันนั่นคือค่า  $X_L$  จะเท่ากับ  $X_C$  อย่างไรก็ตามค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้น ณ จุดรีโซแนนซ์ที่ต่อแบบขนานนี้จะมีค่ามากที่สุด และจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่า น้อยที่สุดซึ่งจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแบบอนุกรม

### 2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC

จากรูป 2.21 ก) จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC ที่ต่อแบบอนุกรมจะมีค่าดังสมการ

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.87)$$



ก) วงจรอนุกรม RLC

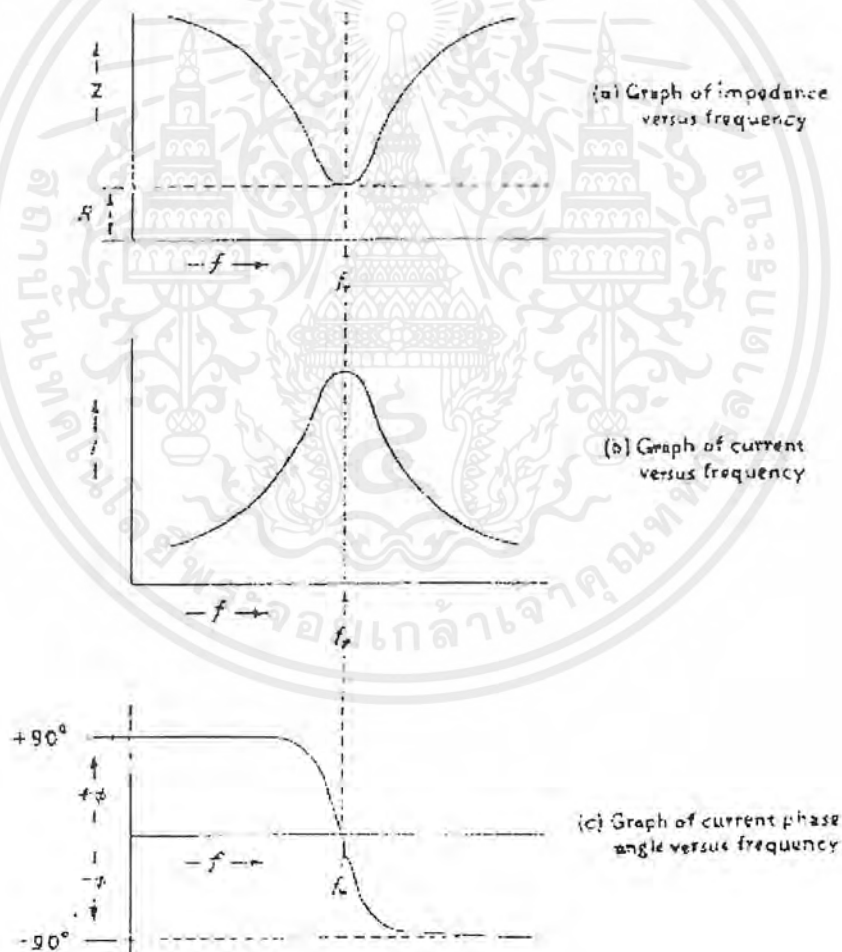
ข)  $X_L, X_C$  เมื่อพล็อตตามความถี่

รูปที่ 2.21 การพล็อตค่า  $+jX_L$  และ  $-jX_C$  กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่า  $X_L = 2\pi fL$  และ  $X_C = 1/2\pi fC$  ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์จึงขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ จากรูป 2.21 ข) จะเห็นว่าเมื่อความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น

ค่า  $X_L$  ก็จะมีค่า เพิ่มขึ้นส่วน  $X_C$  จะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นด้วยโดยที่ผลรวมของค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ  $(X_L - X_C)$  ดังนั้นถ้าหากความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับความถี่รีโซแนนซ์แล้วก็จะผลทำให้ค่า นั่นคือ ค่า รีแอกแตนซ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือค่าอิมพีแดนซ์รวมจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของวงจร  $Z = R$

จากรูป 2.22 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจรที่ความถี่ใดๆ ดังสมการ



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ กระแส และมุมเฟส กับความถี่ สำหรับรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.88)$$

$$I = V/Z \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่ความถี่รีโซแนนซ์จะได้ดังสมการ

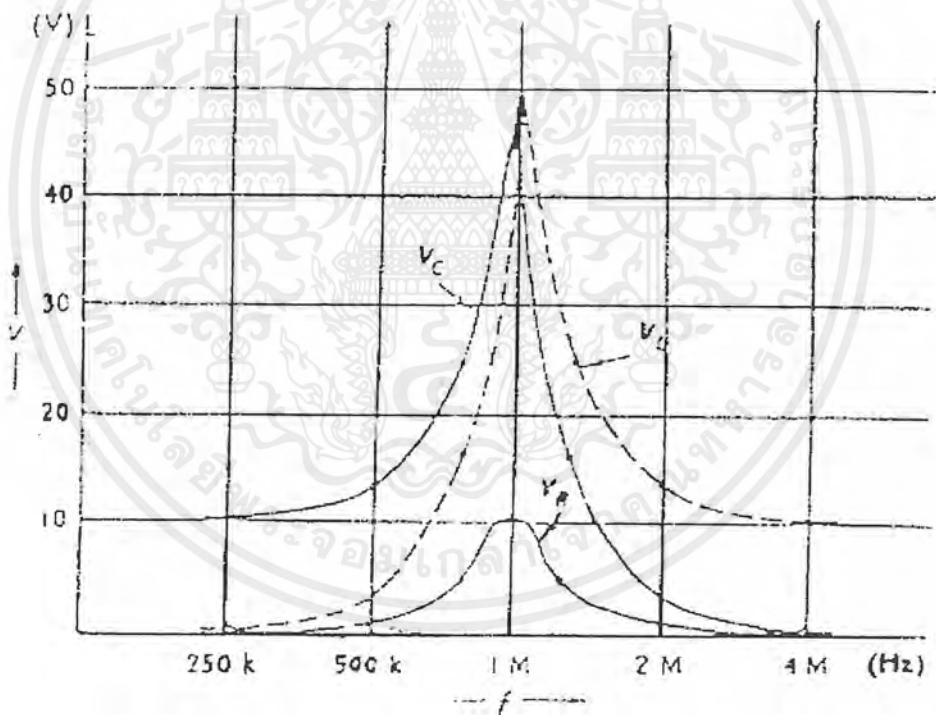
$$Z = R \quad (2.90)$$

$$I = V/R \quad (2.91)$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ความถี่ใดๆ ดังสมการ

$$V_R = IR, \quad V_L = IX_L, \quad V_C = IX_C \quad (2.92)$$

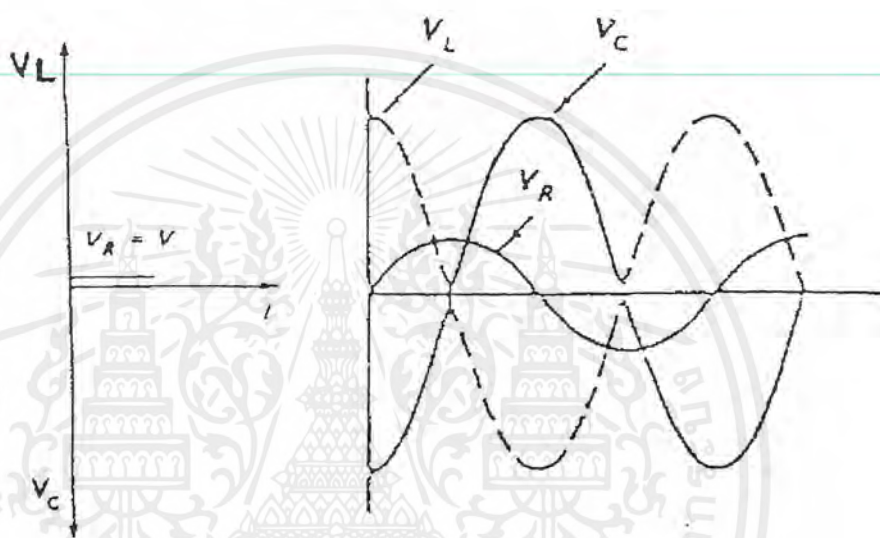
เมื่อนำค่า  $V_R$ ,  $V_L$  และ  $V_C$  ที่ความถี่ใดๆ มาพล็อต จะได้ดังรูป 2.23 ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่รีโซแนนซ์นั้น ค่า  $V_L$  และ  $V_C$  จะมีค่ามากกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายหลายเท่า แต่ค่า  $V_R$  จะมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $V_R$ ,  $V_C$  และ  $V_L$  กับความถี่

### 2.4.1.1 พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L กับ C

เมื่อเรานำรูปคลื่นแรงดัน  $V_R$ ,  $V_L$  และ  $V_C$  ที่ความถี่รีโซแนนซ์มาพล็อตจะได้ดังรูป 2.24 จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดัน  $V_L$  และ  $V_C$  จะกลับเฟสกันอยู่ 180 องศา ส่วนรูปคลื่น  $V_R$  จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $V_L$  และ  $V_C$  มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าจะมีการส่งผ่านพลังงานกันระหว่าง L กับ C อย่างไรก็ตามก็จะไม่มีการสะสมพลังงานเกิดขึ้นที่จุดรีโซแนนซ์นี้



ก) รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม  
ของวงจรรีโซแนนซ์

ข) รูปคลื่นแรงดัน  $V_R$ ,  $V_L$  และ  $V_C$   
ที่จุดรีโซแนนซ์

รูปที่ 2.24 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร RLC รีโซแนนซ์

### 2.4.1.2 Q แฟกเตอร์ของวงจรอนุกรม RLC

พิจารณาสมการ  $I$ ,  $V_L$  และ  $V_C$  ที่จุดรีโซแนนซ์จะได้ดังสมการ

$$I = V/R \quad (2.93)$$

$$V_L = IX_L = V X_L/R \quad (2.94)$$

$$V_C = IX_C = V X_C/R \quad (2.95)$$

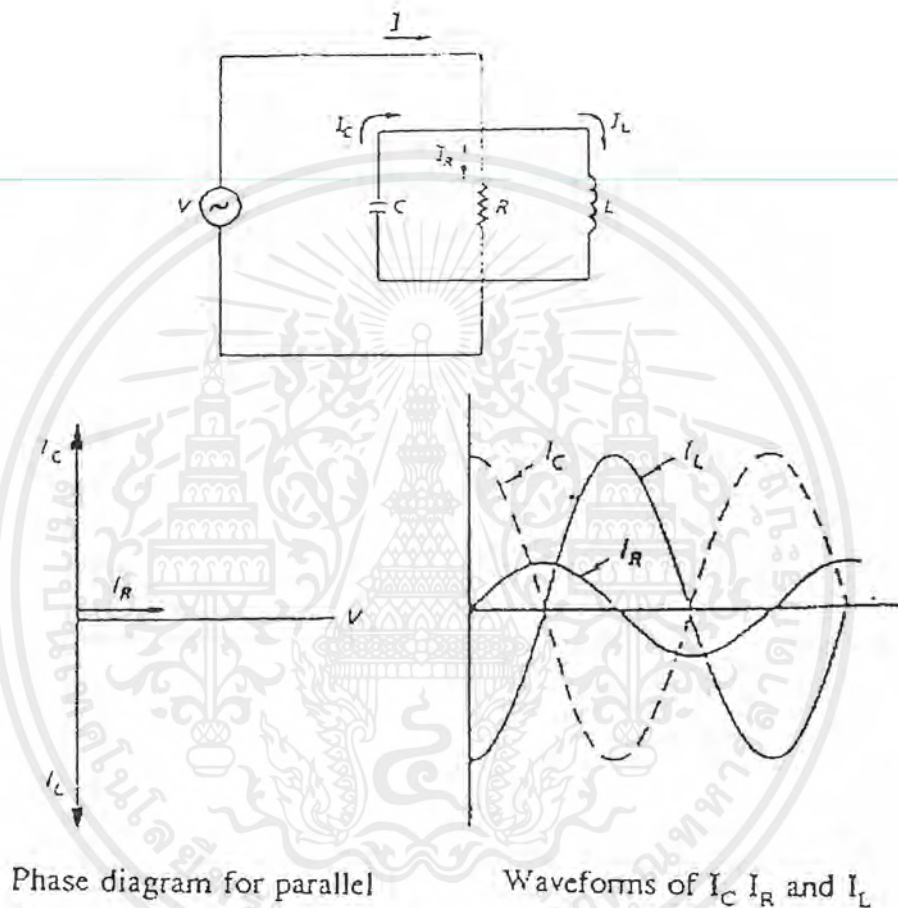
โดยที่อัตราส่วน  $V_L/V$  และ  $V_C/V$  จะเรียกว่า “ QUALITY FACTOR ” ซึ่งจะมีค่าดังสมการ

$$Q = X_L/R = X_C/R = 1/\omega CR \quad (2.96)$$

### 2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

จากรูป 2.25 จะเห็นว่าค่าอิมิตแดนซ์ของวงจรจะมีค่าดังสมการ

$$Y = 1/R + j(1/X_C - 1/X_L) \quad (2.97)$$



รูปที่ 2.25 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นกระแสที่จู่รีโซแนนซ์ของวงจร RLC ขนาน

ถ้าหากปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟไปจนมีค่าเท่ากับความถี่รีโซแนนซ์แล้วจะมีผลทำให้ค่า  $X_L$  มีค่าเท่ากับ  $X_C$  เพราะฉะนั้นแอดมิตแดนซ์รวมจะมีค่าเท่าส่วนกลับของค่าความต้านทานของวงจร  $1/R$  และกระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าต่ำที่สุดโดยจะมีค่าเท่ากับ  $V/R$  นอกจากนี้ก็จะมีการส่งผ่านพลังงานกันระหว่าง  $L$  กับ  $C$  เช่นเดียวกับวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

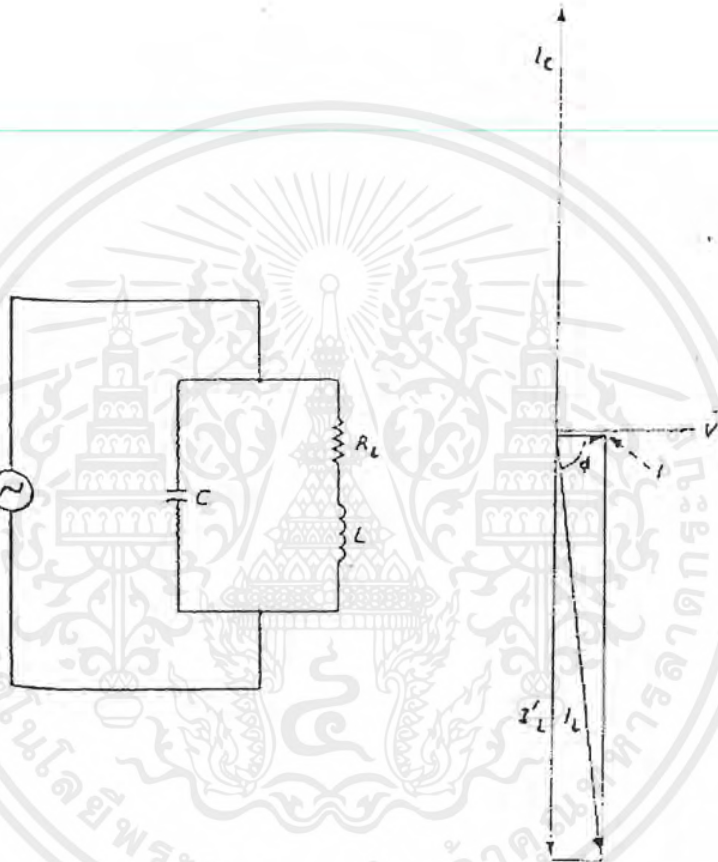
ในทางปฏิบัติวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานจะเป็นลักษณะดังรูป 2.26 โดยที่ค่าอิมิตแดนซ์รวมของวงจรจะมีค่าดังสมการ

$$Y = 1/(R + jX_L) + 1/jX_C \quad (2.98)$$

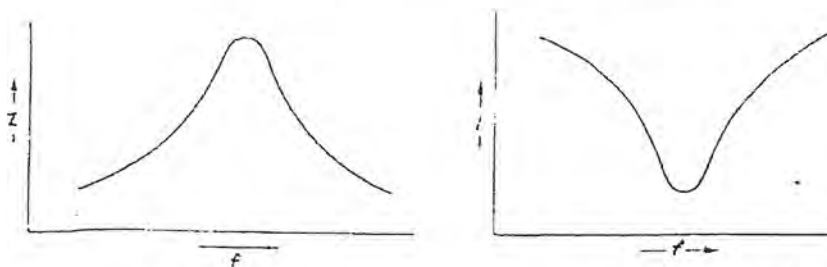
โดยที่จูลรีโซแนนซ์นั้นค่า  $X_C$  จะมีค่าดังสมการ

$$X_C = (R^2 + X_L^2) / X_L \quad (2.99)$$

$$Z = L/RC \quad (2.100)$$



รูปที่ 2.22 แสดงวงจร RLC แบบขนานในทางปฏิบัติ



ก) ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่

ข) ค่ากระแสกับความถี่

รูปที่ 2.27 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่สำหรับรีโซแนนซ์แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2.1 Q แฟกเตอร์ของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานในทางปฏิบัติ

ค่า Q แฟกเตอร์ของวงจรนี้จะมีค่าดังสมการ

$$Q = I_L/I = I_C/I = X_C/R = (R^2 + X_L^2)/RX_L \quad (2.101)$$

โดยที่ความถี่รีโซแนนซ์ ( $f_r$ ) จะมีค่าดังสมการ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR_L^2}{L}} \quad (2.102)$$

จากรูป 2.27 จะพบว่าวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานในทางปฏิบัติ นั้น จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด และกระแสจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่รีโซแนนซ์ จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการทำงานที่จูลรีโซแนนซ์จะให้ค่ากำลังที่สูงที่สุด ( $P_{max}$ ) เนื่องจากจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำได้สูงสุดซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในเบ้าหลอมเพื่อทำให้เกิดความร้อนสำหรับใช้ในการหลอมให้ได้มากที่สุดจนสามารถหลอมชิ้นงานหรือใช้เวลาในการหลอมให้น้อยที่สุดซึ่งสามารถทำได้โดยการทำให้ความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์และความถี่ของวงจรตรงส่วนโหลดมีค่าตรงกัน โดยที่ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในวงจรจะมาจากผลของขดลวด สร้างสนามแม่เหล็ก, เบ้าหลอมและชิ้นงาน ส่วนตัวเก็บประจุที่ใส่เพิ่มเข้าไปก็เพื่อปรับปรุค่าตัวประกอบกำลังของวงจรให้ดีขึ้น

### บทที่ 3

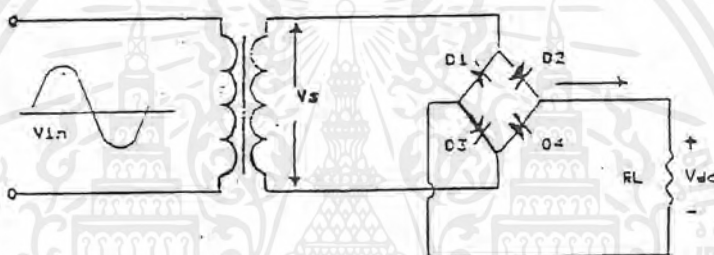
#### โครงสร้างของวงจร

#### 3.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรกรองแรงดัน (Filter)

3.1.1 วงจรเรียงกระแสหรือวงจรเรกติไฟเออร์ (Rectifier) คือ วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง หรือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางเดียวเท่านั้น อุปกรณ์ทั่วไปที่ใช้ในวงจรได้แก่ ไดโอด

วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสในโครงงานเป็นวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์หรือบริดจ์ไดโอด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier)

การทำงานของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์จะมีทิศทางการทำงานตามลักษณะของลูกศร นั่นคือ เมื่อ  $V_s$  เพิ่มขึ้นทางบวก ไดโอด D2 และ D3 จะนำกระแส และเมื่อแรงดัน  $V_s$  ลงไปทางลบ ไดโอด D1 และ D4 จะนำกระแส เป็นผลทำให้กระแสไหลผ่านโหลด  $R_L$  ในทิศทางเดียวเท่านั้น

##### 1. ค่ากระแสกระชาก $I_{sm}$ (Maximum Surge Current)

กระแสกระชากสูงสุดที่ผ่านบริดจ์ไดโอดขณะเปิดเครื่อง เมื่อตัวเก็บประจุฟิเตอร์ยังไม่มีประจุสะสมอยู่ ดังนั้นการเลือกบริดจ์ไดโอดจะต้องให้มีค่าอัตราทนกระแสกระชากประมาณ 20-30 เท่าของพิกัดกระแสเฉลี่ยขณะถูกไบแอสตรง

##### 2. ค่ากระแสเฉลี่ยเมื่อถูกไบแอสตรง $I_{fm}$ (Average Forward Current)

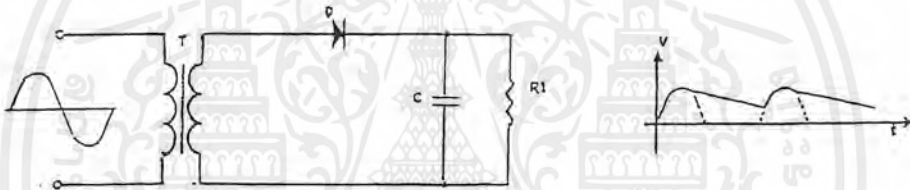
ค่ากระแสเฉลี่ยที่บริดจ์ไดโอดขณะทำงาน ควรมีการเผื่อค่าไว้ประมาณ 1.5-2 เท่าจากที่คำนวณได้ในวงจร เพื่อความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งาน

### 3. อัตราทนแรงดันไบแอสกลับสูงสุด $V_{min}$

อัตราทนแรงดันไบแอสกลับสูงสุดของไดโอดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าแรงดันขดสูงสุด ( $V_{pack}$ ) ของแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุต และต้องมีการเผื่อค่าให้มากกว่าแรงดันขดสูงสุดของแรงดันไฟสลับด้วยเพื่อป้องกันทรานเซียนท์ในไฟสลับ

#### 3.1.2 วงจรกรองแรงดัน (Filter)

แรงดันที่ผ่านวงจรเรกติไฟเออร์มาแล้วนั้น ถ้าพิจารณากันอย่างละเอียดแล้วจะเห็นว่าลักษณะแรงดันที่ได้มานั้นไม่ราบเรียบ จำเป็นจะต้องมีวงจรช่วยทำให้ลักษณะกระแสและแรงดันนั้นราบเรียบขึ้น นั่นก็คือใช้วงจรฟิลเตอร์



รูปที่ 3.2 การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์

แรงดันไฟฟ้าที่ได้ที่โหลดนั้น ต้องการให้เป็นไฟตรงที่เรียบขึ้น จึงใช้วิธีการใส่ตัวเก็บประจุ ทั้งนี้เพราะตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่สำคัญคือ การสะสมประจุไว้ในตัวมัน เมื่อใดที่กระแสป้อนน้อย มันก็จะเอาประจุที่เก็บสะสมไว้ในตัวมันจ่ายแทนซึ่งก็คือการคายประจุ เมื่อใดที่จะต้องจ่ายโหลดน้อย มันก็จะแบ่งมาสะสมไว้ซึ่งก็คือการชาร์จประจุ ซึ่งจะช่วยให้ลดผลของแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ซึ่งสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุให้เหมาะสมได้ดังนี้

$$C_{\text{filter}} = \frac{I_o t_{on(max)}}{V_r} \quad (3.1)$$

โดย  $I_o$  คือ ค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรียงกระแส (แอมแปร์)  
 $t_{on(max)}$  คือ ช่วงเวลาที่ C คายประจุ (วินาที)  
 $V_r$  คือ ค่าขดถึงขดของแรงดันกระเพื่อมที่เอาที่พุทของวงจรเรียงกระแส (Vp-p)

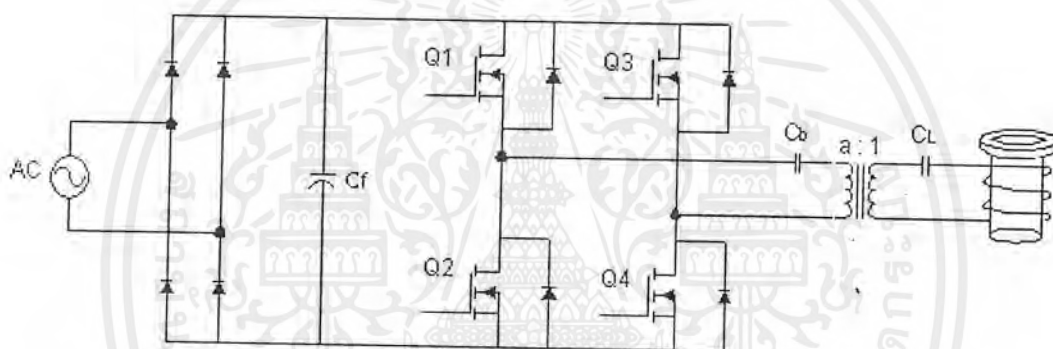
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.1) พบว่า เมื่อ  $C$  มีค่ามากขึ้นทำให้แรงดันกระเพื่อมมีค่าน้อยลง ดังนั้น ชนิดและขนาดของตัวเก็บประจุจึงมีผลกับแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ของแรงดันไฟตรงได้โดยปกติการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจะยอมให้วงจรเรียงกระแสมีค่าแรงดันกระเพื่อมไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันเอาต์พุต

## 3.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

### 3.2.1 ลักษณะการทำงานของวงจร

ในโครงการใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ในการแปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูงโดยอาศัยการสวิตชิงของเพาเวอร์มอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

เราเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบฮาล์ฟบริดจ์แล้วจะมีข้อดีกว่าตรงที่แรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนี้ จะมีระดับแรงดันเท่ากับแรงดันอินพุตไฟตรง แต่แบบฮาล์ฟบริดจ์จะมีเพียงครึ่งหนึ่งของระดับแรงดันอินพุตเท่านั้น ดังนั้นถ้าระดับแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบเท่ากัน แบบฟูลบริดจ์จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าฮาล์ฟบริดจ์ถึง 2 เท่า โดยที่อินเวอร์เตอร์จะคอยจ่ายไฟกระแสสลับผ่านหม้อแปลงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในเบ้าหลอมจนสามารถหลอมชิ้นงานได้ ซึ่งโครงการนี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนความถี่ให้เป็นความถี่สูง ๆ ค่าหนึ่ง เนื่องจากกำลังความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลวนในเบ้าหลอมนั้นแปรตามความถี่ ตามสมการ (2.50) นั่นเอง จากรูปที่ 3.3 อินเวอร์เตอร์มีหลักการทำงานดังนี้คือ เพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัวจะทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา  $Q_1$  และ  $Q_4$  จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลา และเมื่อหยุดนำกระแส จะได้  $Q_2$  และ  $Q_3$  นำกระแสพร้อมกันในครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบเวลาที่เหลือ ซึ่งจะทำงานสลับกันอย่างนี้เรื่อยไป โดยได้แรงดันตกคร่อมขดไฟโหมรีมีค่าเท่ากับ  $V_m - 2V_{CE(sat)}$  และแรงดันตกคร่อม Q1 และ Q4 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{CEQ2(sat)}$  และ  $V_{in} - V_{CEQ3(sat)}$  ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม Q2 และ Q3 ขณะหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับ  $V_m - V_{CEQ1(sat)}$  และ  $V_{in} - V_{CEQ4(sat)}$  ตามลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอดทำหน้าที่เป็นคอมมิวเตตติ้งไดโอด (Comutating Diode) ให้กับวงจรโดย

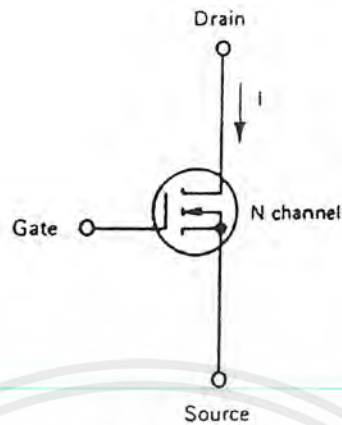
1. ป้องกันการเกิดแรงดันสไปค์ขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากความเหนี่ยวนำแฝงในหม้อแปลง โดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำแฝงนี้จะถูกถ่ายทอดออกไปยังภาคอินพุตด้วยคอมมิวเตตติ้งไดโอด จึงไม่ทำให้เกิดแรงดันสไปค์เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส

2. ในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟต Q1 และ Q4 เริ่มหยุดนำกระแส ขดลวดไฟโหมรี  $N_p$  จะมีการกลับขั้วแรงดันเกิดขึ้น ถ้าไม่มีคอมมิวเตตติ้งไดโอด Q2 และ Q3 จะได้รับแรงดันตกคร่อมที่เกินเป็นลบ ในขณะที่ Q1 และ Q4 ก็จะมีแรงดันตกคร่อมมากกว่าค่า  $V_m$  ในกรณีนี้ ไดโอดจะอยู่ในลักษณะไบแอสตรงจากแรงดันของขดไฟโหมรีและลดค่าแรงดันนี้ลงไปเพื่อป้องกันเพาเวอร์มอสเฟต

### 3.2.2 มอสเฟตกำลัง (Power Mosfet)

มอสเฟตกำลังหรือเพาเวอร์มอสเฟต เป็นอุปกรณ์เพาเวอร์เซมิคอนดักเตอร์ที่มีขนาดกำลังต่ำ แต่มีความสามารถในการสวิทช์ซึ่งที่ความถี่สูงๆ ได้ดี มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ชนิดที่ควบคุมการทำงานด้วยแรงดัน (Voltage Controlled) โดยจะต้องมีศักยะไฟฟ้าตกคร่อมที่ขาเกต (gate) และซอร์ส (source) เพื่อที่จะสร้างสัญญาณกระแสที่ขาเดรน (drain) เนื่องจากขาเกตถูกแยกจากขาซอร์สโดยชั้นซิลิกอนออกไซด์ (Silicon Oxide) จึงเปรียบเสมือนมีค่าตัวเก็บประจุ C อยู่ ที่ทางด้านอินพุต เราจึงกล่าวได้ว่ามอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่มี High Impedance

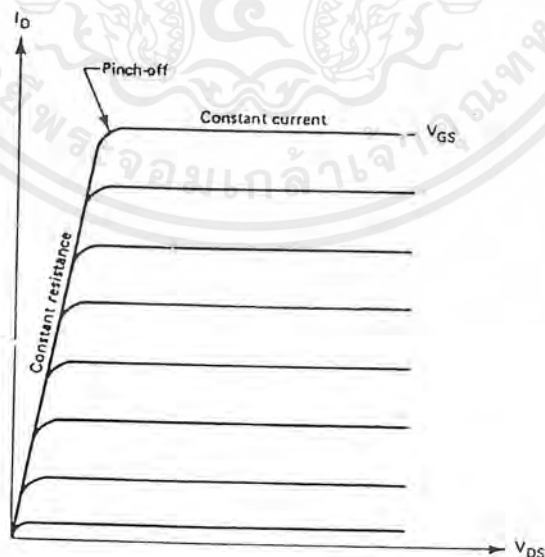
การหยุดการทำงานของมอสเฟตไม่จำเป็นต้องทำการรีเวิร์สกระแส เพราะมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ประเภท Majority carrier semiconductor มันจะเริ่มหยุดนำกระแสทันทีที่ไม่มีศักยะไฟฟ้าที่ขาเกตและซอร์ส ดังนั้นการหยุดนำกระแสของมอสเฟตจึงขึ้นอยู่กับค่าศักยะไฟฟ้าที่เกตและซอร์ส



รูปที่ 3.4 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด N Channel

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต ลักษณะของกราฟแสดงขอบเขตการทำงานที่ชัดเจน 2 ลักษณะ คือ ภาวะความต้านทานคงที่ (Constant Resistant) และ ภาวะกระแสคงที่ (Constant Current)

ที่ภาวะกระแสคงที่ เมื่อศักดาไฟฟ้าที่เกตและซอร์สเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นตามเป็นสัดส่วน จนกระทั่งศักดาไฟฟ้าที่เกตและซอร์สเพิ่มขึ้นถึงจุดที่เรียกว่า Pinch-off กระแสเดรนจะเริ่มคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ภาวะความต้านทานคงที่ ก็คือภาวะที่ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ขาเดรนและซอร์สหรือ โวลต์เทจครอปที่ขาเดรนและซอร์ส จะเป็นสัดส่วนกับกระแสเดรน ซึ่งเปรียบเสมือนมีตัวต้านทาน คงที่ตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดกำลังสูญเสีย (Power loss)

### 3.2.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ $t_0$ สำหรับฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เมื่อพิจารณาจากวงจรพบว่า Q1 กับ Q2 และ Q3 กับ Q4 จะนำกระแสพร้อมกันไม่ได้ เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรของแรงดันอินพุตและมอสเฟตอาจพังเสียหายได้ เพราะถึงแม้ว่าจะ กำหนดให้วงจรควบคุมสั่งงานเพาเวอร์มอสเฟตที่ครึ่งหนึ่งของคาบเวลาเท่ากันแล้วก็ตาม เพาเวอร์ มอสเฟตก็ยังไม่ปลอดภัยเพียงพอ เพราะการตอบสนองของเพาเวอร์มอสเฟตอาจเป็นไปได้ช้าเนื่อง จากการเกิดประจุสะสมขึ้นในมอสเฟตขณะนำกระแส เมื่อหยุดจ่ายกระแสไบแอสให้กับเพาเวอร์ มอสเฟตที่เวลา  $t = T/2$  ประจุสะสมจะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตนำกระแสต่อไปได้อีกชั่วระยะเวลา หนึ่งก่อนที่กระแสจะลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันกับเพาเวอร์มอสเฟตตัวที่เหลือเริ่มได้ รับกระแสไบแอสที่เวลา  $t = T/2$  เช่นเดียวกัน ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัวนำกระแสพร้อมกัน และเกิดการพังเสียหายอย่างรวดเร็ว

ดังนั้น การกำหนดค่าเวลาเพื่อ  $t_0$  จึงมีความจำเป็น โดยปกติมักกำหนดค่าเวลาเพื่อ  $t_0$  ไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของครึ่งคาบเวลา ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดของเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าได้ไม่เกิน

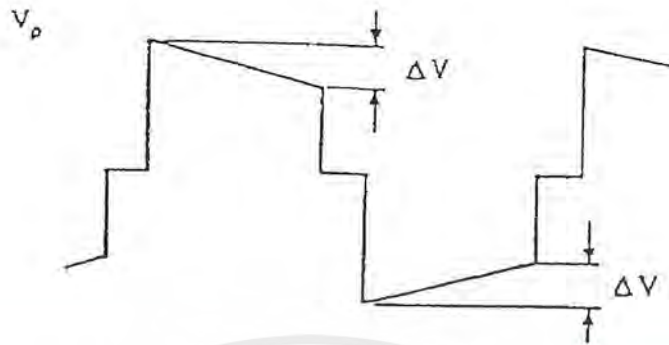
$$t_{on(max)} = 0.4 T \quad (3.2)$$

### 3.2.4 ตัวเก็บประจุล้อยก $C_b$ เพื่อป้องกันการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็ก

ตัวเก็บประจุล้อยก (Blocking Capacitor)  $C_b$  ที่ต่อเพิ่มเข้ามาในวงจรนั้น มีหน้าที่หลักคือ ป้องกันการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ขณะวงจรทำงาน

โดยการต่อตัวเก็บประจุล้อยก  $C_b$  คั่นเข้ามาในวงจร จะทำให้  $C_b$  มีการเก็บประจุและ คายประจุสลับกันไปตามทิศทางของกระแสที่ไหลในเซดไพรมารี  $N_p$  ถ้าผลของการเกิดประจุสะสม ทำให้ Q1 กับ Q4 และ Q2 กับ Q3 มีช่วงเวลานำกระแสไม่เท่ากัน ก็จะทำให้การเก็บประจุและ คายประจุของ  $C_b$  ใช้เวลาไม่เท่ากัน นั่นคือ หากเพาเวอร์มอสเฟตตัวใดมีค่าช่วงเวลานำกระแส มากว่า ในกรณีนี้ค่ากระแสสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นตามช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามก็จะทำให้มี ประจุเหลือค้างใน  $C_b$  ดังนั้นเมื่อเพาเวอร์มอสเฟตอีกตัวเริ่มนำกระแส แรงดันตกค้างใน  $C_b$  จะช่วย เพิ่มค่าแรงดันตกคร่อมขดไพรมารีให้มีค่ามากขึ้น ค่าของกระแสสูงสุดก็จะมีค่าเท่ากันได้และไม่ เกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของการเกิดความลาด (Droop) ขึ้นบนแรงดันที่ตกคร่อมไพรมารี  
เมื่อต่อตัวเก็บประจุลือกถึง  $C_b$  คั่นเข้ามาในวงจร

อย่างไรก็ตาม การต่อตัวเก็บประจุลือกถึง  $C_b$  คั่นเข้ามาในวงจรจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารีมีค่าลดลงตามเวลาหรือเกิดความลาด (droop) ขึ้นบนแรงดัน เนื่องจากแรงดันส่วนหนึ่งไปตกคร่อม  $C_b$  นั้นเอง จากรูปที่ 3.6 และจะมีผลต่อแรงดันทางด้านเซคันดารีทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่เอาต์พุตซึ่งไม่เป็นที่ต้องการเช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดค่า  $C_b$  ให้มีค่าเหมาะสม เพื่อให้เกิดความลาดบนแรงดันที่ขดไพรมารีต่ำที่สุด การกำหนดค่าของ  $C_b$  อาจทำได้ดังนี้คือ

$$C_b = \frac{I_{p(pk)} (0.4T)}{\Delta V} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $I_{p(pk)}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ขดไพรมารี  
 $\Delta V$  คือ ค่าของความลาดแรงดันสูงสุดที่ยอมได้ (ไม่เกิน 20% ของ  $V_m/2$ )  
 $T$  คือ ค่าคาบเวลาการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

### 3.3 หม้อแปลงความถี่สูง

#### 3.3.1 ลักษณะแกนที่ใช้

โดยปกติในหม้อแปลงสวิตชิ่งนิยมใช้ “แกนเฟอร์ไรต์” เพราะมีจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูงและเกิดการสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง ซึ่งในการเลือกจะต้องมีการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีและขนาดของแกน ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

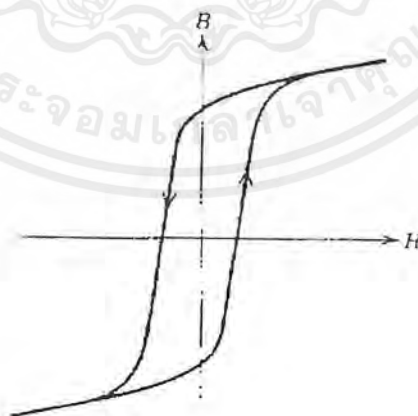
$$\Delta B = \frac{V * t}{N_p * A_c} * 10^8 \quad (3.4)$$

- โดย  $\Delta B$  คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกน (เกาส์)  
 $V$  คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารี (V)  
 $N_p$  คือ ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารี (รอบ)  
 $A_c$  คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน (ตารางเซนติเมตร)  
 $t$  คือ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น (วินาที)

จากสมการ (3.4) พบว่าถ้าจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีมีค่าน้อยลง จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์มีค่ามากขึ้น ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดลวดของขดไพรมารี จะทำให้ใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูงทำให้หม้อแปลงให้กำลังได้สูงขึ้น

เมื่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะทำให้แรงดันตกคร่อมขดไพรมารีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุตจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์มอสเฟตขณะที่กำลังนำกระแสสูง ๆ แทน ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตพังเสียหายได้ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงอีกด้วย ดังนั้น การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์จะต้องคำนึงถึง

### 3.3.1.1 การอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของหม้อแปลง

จากลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสดังรูปที่ 3.7 พบว่า ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก H เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก H ก็ตาม จากจุดดังกล่าวแสดงว่า แกนเฟอร์ไรต์เริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation) ดังนั้นในการใช้งานจะต้องระวังไม่ให้แกนเฟอร์ไรต์อิ่มตัว โดย

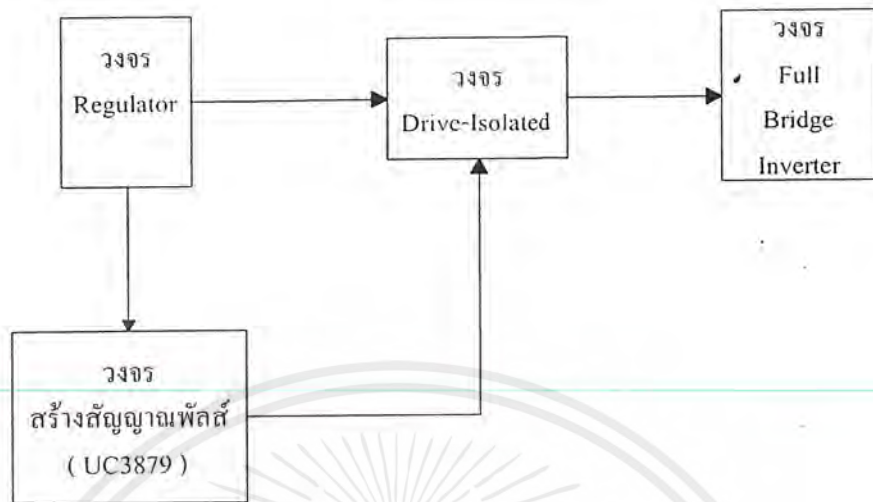
1. การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์
2. การกำหนดช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air gap) ซึ่งช่วยป้องกันการอิ่มตัวของแกนและช่วยให้การสะสมพลังงานของขดลวดมีค่ามากขึ้น ทำให้กำลังของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น แต่อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวน EMI ออกมาและอาจรบกวนอุปกรณ์ภายนอกได้เช่นกัน
3. การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ให้เหมาะสม เพราะถ้าแกนมีขนาดใหญ่เกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แต่ถ้าแกนมีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน

### 3.3.1.2 ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์

ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งทำให้แกนร้อน มีสาเหตุมาจากการสูญเสียที่เกิดจากลักษณะของฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียจากการเดินกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) ซึ่งความสูญเสียจะมีค่าขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่การใช้งาน และอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์

## 3.4 วงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลัง

วงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังจะมีหน้าที่ในการทำให้มอเตอร์กำลังทำงานเป็นสวิตช์เปิดเพื่อทำให้เกิดความถี่สูงที่โหลด วงจรส่วนเพาเวอร์เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพราะฉะนั้นจึงต้องสร้างวงจรขับเคลื่อนมา 4 ชุดสัญญาณ เพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์กำลังให้สลับกันทำงานเป็นคู่ โดย 2 สัญญาณแรกมีเฟสตรงกันและสามารถปรับเลื่อนเฟสให้ต่างกันได้ และอีก 2 สัญญาณก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่จะมีเฟสตรงข้ามกันกับชุดแรก เพื่อให้สามารถควบคุมกำลังได้โดยการปรับเฟส (Phase Controlled) ด้วย ซึ่งวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ได้จาก IC เบอร์ UC3879 โดยมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนของวงจรควบคุม

#### 3.4.1 วงจรเรกูเลเตอร์ (Regulator)

เป็นวงจรที่จ่ายแรงดันไฟตรงให้กับวงจรสร้างสัญญาณพัลส์และวงจรขับเคลื่อนขาเกท ซึ่งใช้ IC Regulator เบอร์ 7812 รักษาแรงดันไฟตรงค่าบวกขนาด 12 V. ให้คงที่

#### 3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์

เป็นวงจรทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความถี่และสามารถปรับเฟสของสัญญาณเอาต์พุตได้ ซึ่งใช้ IC เบอร์ UC3879

##### 3.4.2.1 ไอซีเบอร์ UC3879

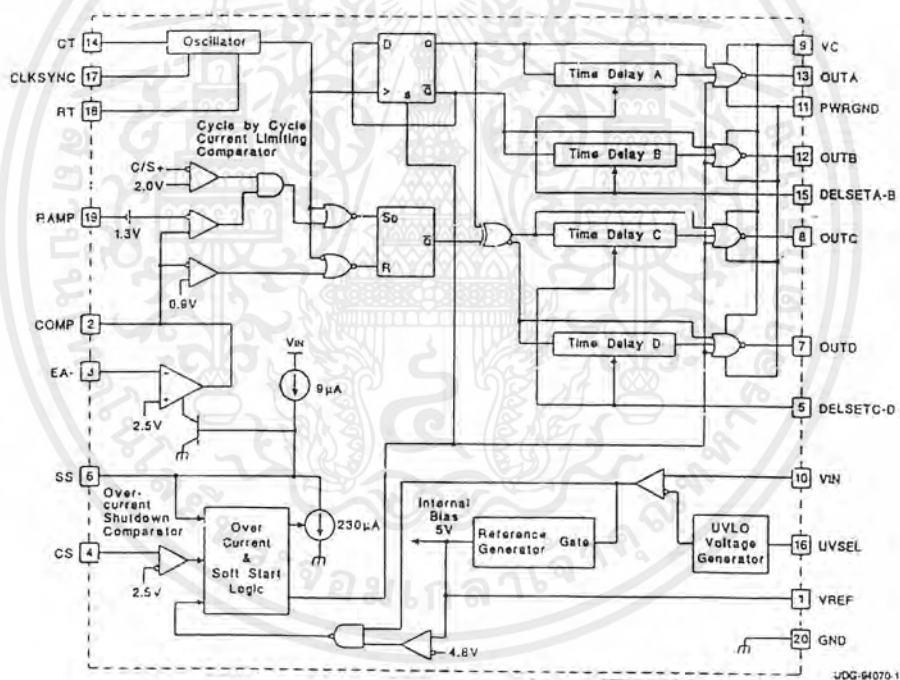
UC 3879 เป็นไอซี 20 ขา ที่สามารถนำมาใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งสามารถเลือกโหมดการทำงานได้ คือ เป็นโหมดแรงดันควบคุมและโหมดกระแสควบคุม โดยจะให้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมออกมา 2 ชุด ที่มีเฟสตรงกันข้ามกัน ซึ่งในแต่ละคู่ชุดสัญญาณมีคุณสมบัติที่สามารถปรับเลื่อนเฟสได้

1. ที่ RAMP (ขาที่ 19) เป็นขาอินพุตของ PWM Comparator เมื่อเราต้องการให้ไอซีทำงานในโหมดแรงดัน (voltage mode control) ก็คือต้องต่อขานี้เข้ากับ  $C_T$  (ขา 14) แต่เมื่อเราต้องการโหมดกระแส (current mode control) ในการทำงานก็ต้องต่อขานี้เข้ากับ  $C_s$  (ขา 4)

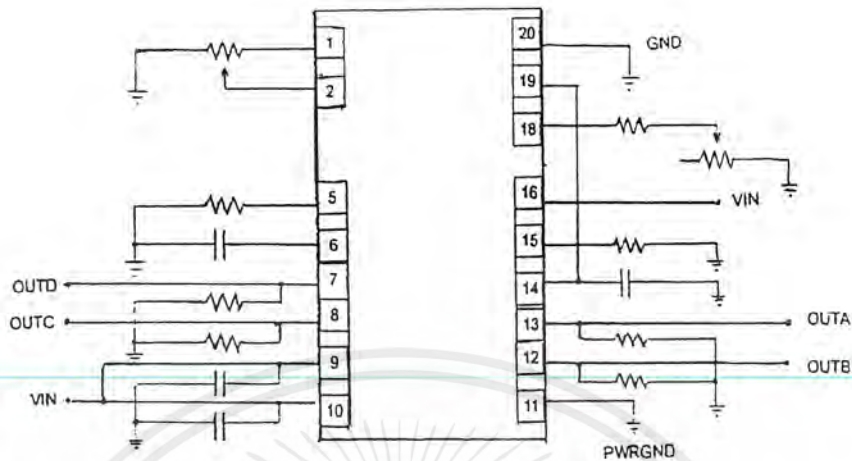
2. ที่ SS (ขาที่ 6) เป็นขาที่ใช้กำหนดเวลาในการชอทฟัสตาร์ท (soft start) คือ เมื่อนำตัว

เก็บประจุมาต่อที่ขาขึ้นลงไปยังกราวด์ จะเป็นการกำหนดช่วงเวลาในการชอท์ฟสตาร์ท โวลต์เตจที่ขาขึ้นจะมีค่าใกล้ 0 มากเมื่อ VIN ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่า UVLO (Undervoltage Lockout) โดยในภาวะที่ VIN และ VREF เริ่มเข้าสู่ภาวะที่ถูกต้องหรือเข้าที่แล้ว ค่าชอท์ฟสตาร์ทจะอยู่ที่ประมาณ 4.8 โวลต์ 9  $\mu\text{A}$  แต่เมื่อเกิดกระแสบกพร่อง (current fault) ขา SS นี้ก็จะผ่านทางผ่านของกระแสบกพร่องนี้ลงกราวด์

3. สัญญาณเอาต์พุต ที่ขา OUTA(ขาที่ 13) OUTB(ขาที่ 12) จะทำงานในครึ่งบริดจ์แรกของอินเวอร์เตอร์ (half-bridge) และ OUTC(ขาที่ 8) OUTD(ขาที่ 7) ก็จะทำงานในอีกครึ่งบริดจ์ที่เหลือสลับกันไป โดยที่ OUTC และ OUTD จะเป็นตัวที่สามารถเลื่อนเฟสได้โดยยึด OUTA และ OUTB



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ UC3879



รูปที่ 3.10 แสดงการต่อวงจรที่ขาไอซีเบอร์ UC3879

#### 3.4.2.2 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของ UC3879 เป็นวงจรที่สร้างพัลส์สัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่ โดยคาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์สามารถกำหนดได้โดยค่าของ  $C_T$  และ  $R_T$  ดังนี้

$$C_T = D_{lin} / (1.08 * R_T * f) \quad (3.5)$$

$$R_T = 2.5 / [i_{10mA} * (1 - D_{lin})] \quad (3.6)$$

เมื่อ  $D_{line}$  : linear duty cycle range

ซึ่งค่าน้อยที่สุดของ  $C_T$  ควรจะเป็น 200 pF โดยออสซิลเลเตอร์ (oscillator) และ PWM ได้ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ถึง 600 กิโลเฮิรตซ์

#### 3.4.2.3 การปรับเลื่อนเฟส

การปรับเลื่อนเฟสสามารถควบคุมได้โดยการทำงานของ COMP (ขาที่ 2) ซึ่งเป็นเอาต์พุตมาจากการเปรียบเทียบ Error Amplifier ถ้าระดับเอาต์พุตโวลต์เดจของ Error Amplifier ต่ำกว่า 0.9 โวลต์ จะมีผลทำให้เป็น Zero phase shift นั่นคือไม่มีการเลื่อนเฟส

### 3.4.2.4 การปรับค่าเวลาเพื่อ Delay time

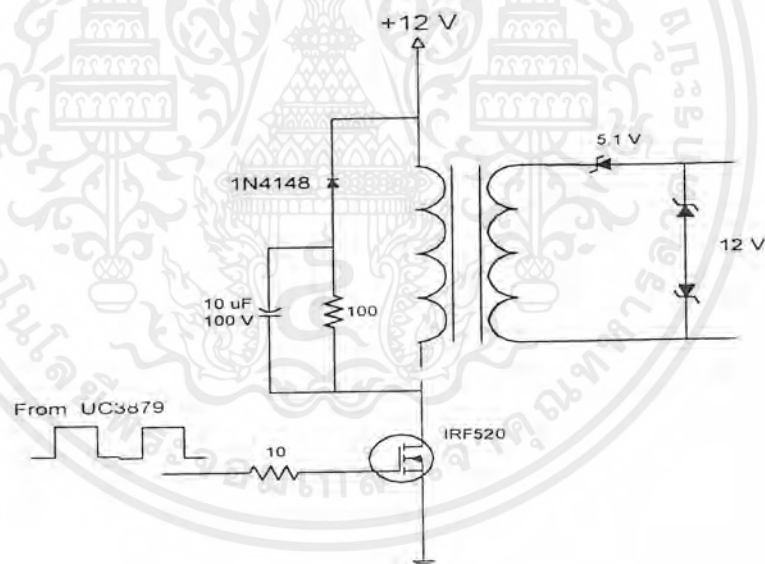
สามารถควบคุมค่าเวลาเพื่อได้โดยDELSETA-B และ DELSETC-D (ขาที่ 5,15) โดยคุมกระแสที่ผ่านทางขานี้ลงกราวน์ ด้วยการเลือกใช้ค่าต้านทาน Rdelay มาต่อ โดย

$$\text{ค่าเวลาเพื่อ Delay Time} = (0.89 * 10^{-10} * R_{\text{delay}}) \quad \text{วินาที(sec)} \quad (3.7)$$

ค่า Rdelay โดยปกติควรจะอยู่ในช่วง 1.9k ถึง 10k โอห์ม

### 3.4.3 วงจรแยกกราวน์

วงจรนี้จะมีหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากขา 7,8 และขา 12,13 ของ UC3879 แล้วทำการ isolate หรือแยกกราวน์ออกจากกัน จากนั้นจึงสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของวงจร full bridge inverter ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการลัดวงจรถึงกันของมอสเฟตกำลังในอินเวอร์เตอร์ โดยที่วงจรนี้มีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แสดงวงจร isolate

ในการใช้งานนั้นเราจะใช้หม้อแปลงความถี่สูงที่มี turn ratio เท่ากับ 1:1 จำนวน 4 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีขดทุติยภูมิจำนวน 1 ขดทั้งนี้ก็เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่สามารถเลื่อนเฟสให้แต่ละสัญญาณเลื่อนเฟสตัดกันไปได้แตกต่างกัน และมีการวนด์แยกกันสำหรับใช้ควบคุมเพาเวอร์มอสเฟตของวงจร full bridge inverter ให้สามารถทำงานพร้อมกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าในวงจรจะมีวงจรสับเบอร์ต้อยู่ทางด้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงทั้งสองทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันแรงดันเกินหรือแรงดันสไปค์ที่เกิดขึ้นขณะที่ Q1, Q2, Q3 และ Q4 หยุดนำกระแส (OFF) ไม่ให้เกินค่าปลอดภัยของตัวมันโดยที่จะมีหลักการทำงานดังนี้ ในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส นั้น ตัวเก็บประจุ C จะถูกชาร์จประจุด้วยค่าแรงดันสไปค์ซึ่งเป็นผลรวมของแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงกับพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำแปลงของหม้อแปลงขณะนำกระแสรวมกัน โดยที่ตัวต้านทาน R ที่ต่อขนานกับ C จะทำให้แรงดันตกคร่อม C มีค่าต่ำกว่าแรงดันสไปค์ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันสไปค์ที่ตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะหยุดนำกระแสถูกกั้นไว้ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมตัว C และเมื่อแรงดันสไปค์มีค่าลดลงตัว C ก็จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R เพราะฉะนั้นแรงดันสไปค์ที่ตกคร่อมตัวเพาเวอร์มอสเฟตขณะเริ่มหยุดนำกระแสจึงมีค่าลดลงจนเกือบเท่าแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลง นอกจากนี้ยังสามารถต่อวงจรสับเบอร์ต้อยที่ตัวเพาเวอร์มอสเฟตเพื่อลดกำลังสูญเสียในรูปความร้อนขณะเปลี่ยนสถานะโดยเฉพาะขณะเริ่มหยุดนำกระแส โดยจะควบคุมแรงดัน  $V_{DS}$  ของตัวเพาเวอร์มอสเฟตให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านตัวมันลดลงได้ทันกัน เพราะฉะนั้นจึงทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง แต่เนื่องจากในวงจรดังรูป 3.11 ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวเพาเวอร์มอสเฟตขณะเปลี่ยนสถานะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องต่อวงจร สับเบอร์ต้อยที่ตัวเพาเวอร์มอสเฟต

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

วงจรโดยรวมของการหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

#### 4.1 ผลการเปลี่ยนความถี่กับการดึงกำลังไฟฟ้าของโหลด

##### วัตถุประสงค์

1. เพื่อพิสูจน์ว่าที่จูลรีโซแนนซ์โหลดสามารถดึงพลังงานได้สูงสุด
2. เพื่อศึกษาผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ต่างๆ ที่ไม่ใช่จูลรีโซแนนซ์

##### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ก.
2. Variac 260 V 15 A 1 ตัว
3. Digital Meter 1 เครื่อง
4. Storage Scope 1 เครื่อง
5. ตัวเก็บประจุ (C wima) ขนาด 6  $\mu\text{F}$  , 5.13  $\mu\text{F}$  , 4.8  $\mu\text{F}$
6. สถานะ โหลดเป็นเบ้าหลอมพันขดลวด 13 รอบ และไม่มีชิ้นงาน

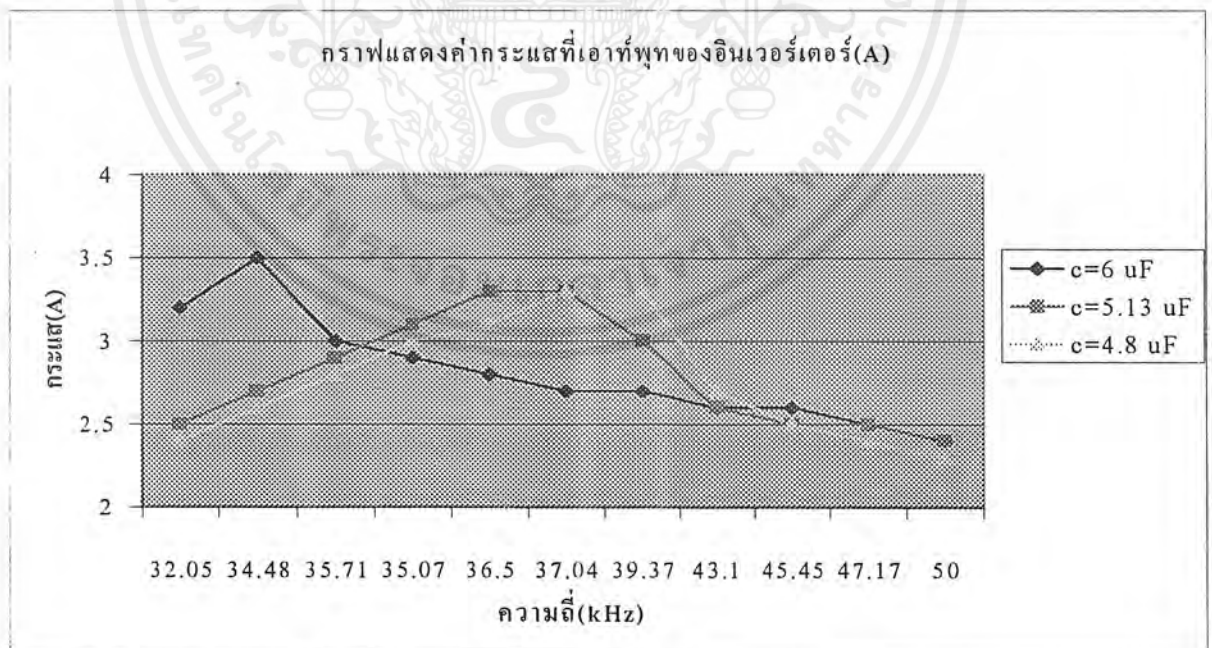
##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อตัวเก็บประจุขนาด 6  $\mu\text{F}$
2. ปรับแรงดันอินพุตของ 80 V เปลี่ยนความถี่จากต่ำสุดไปยังสูงสุด บันทึกผลการดึงกระแสของโหลดทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
3. สังเกตผลที่เกิดขึ้นกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุต
4. เปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุอนุกรมขนาด 5.13 และ 4.8  $\mu\text{F}$  ตามลำดับ ทำการทดลองข้อ 2-3

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 การคั้งกระแสของโหลดโดยมีการปรับความถี่ ที่จูดรีโซแนนซ์แตกต่างกัน

| f(kHz) | ค่ากระแสที่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์(A) |            |           |
|--------|----------------------------------------|------------|-----------|
|        | c = 6.00uF                             | c = 5.13uF | c = 4.8uF |
| 32.05  | 3.20                                   | 2.50       | 2.40      |
| 34.48  | 3.50                                   | 2.70       | 2.60      |
| 35.71  | 3.00                                   | 2.90       | 2.80      |
| 35.07  | 2.90                                   | 3.10       | 3.00      |
| 36.50  | 2.80                                   | 3.30       | 3.10      |
| 37.04  | 2.70                                   | 3.30       | 3.30      |
| 39.37  | 2.70                                   | 3.00       | 3.30      |
| 43.10  | 2.60                                   | 2.60       | 2.70      |
| 45.45  | 2.60                                   | 2.50       | 2.50      |
| 47.17  | 2.50                                   | 2.50       | 2.40      |
| 50.00  | 2.40                                   | 2.40       | 2.30      |



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่ากระแสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์โดยมีการปรับความถี่ที่จูดรีโซแนนซ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่า ที่ความถี่ ณ จุดรีโซแนนซ์ โหลดมีการดึงกระแสได้สูงสุดจริง เนื่องจากที่สภาวะนี้อิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าต่ำสุด จึงทำให้โหลดสามารถดึงพลังงานได้สูงสุด ดังนั้นที่สภาวะรีโซแนนซ์จึงเหมาะต่อการใช้งานและความถี่ที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าที่ความถี่รีโซแนนซ์ จะเห็นว่า กระแสจะไหลผ่านโหลดได้น้อยลง ดังนั้น พลังงานที่ถ่ายเทไปยังโหลดก็น้อยลง ทั้งนี้ ด้วยผลของค่า Quality Factor ของโหลดจึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้งาน

## 4.2 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา

### วัตถุประสงค์

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยเทียบกับเวลา

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.
2. Variac 260 V 15 A 1 ตัว
3. Digital Meter 1 เครื่อง
4. Storage Scope 1 เครื่อง
5. อะลูมิเนียมหลอดกลมเหลวประมาณ 630 องศาเซลเซียส ขนาด 100 กรัม เป็นโหลดในเบ้าหลอมที่มีขดลวดพัน 13 รอบ
6. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermo – Hunter) 1 ตัว
7. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน

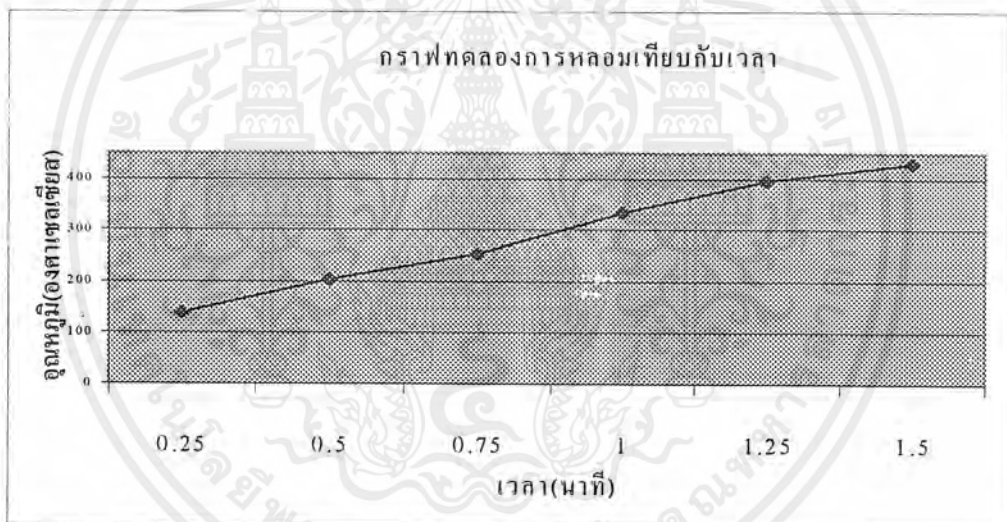
### ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันอินพุตคงที่ 220 V ที่ความถี่ 49.5 kHz โดยใช้อะลูมิเนียมน้ำหนัก 100 กรัม
2. บันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที จนกระทั่งชิ้นงานหลอมได้

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา

| เวลา (นาที) | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |
|-------------|-------------------------|
| 0.25        | 138                     |
| 0.5         | 203                     |
| 0.75        | 253                     |
| 1           | 333                     |
| 1.25        | 396                     |
| 1.5         | 430                     |



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการทดลองการหลอมเทียบกับเวลา

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เบ้าหลอมและชิ้นงาน เป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นลดลง เป็นเพราะในช่วงแรกส่วนของโหลดเพิ่งได้รับพลังงานเข้ามา จึงทำให้อัตราในการเพิ่มของอุณหภูมิก่อนข้างสูง จนกระทั่งโหลดได้รับพลังงานเพียงพอกับปริมาณพลังงานที่สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง จึงเป็นผลให้แนวโน้มของอุณหภูมิก่อนข้างมีการเพิ่มขึ้นช้าลง หรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานที่จ่ายเข้าไปเริ่มที่จะถึงจุดที่เรียกได้

ว่าเป็นจุดที่เกิดสมมูลทางพลังงาน แต่สังเกตเห็นว่า ชีงงานเริ่มหลอมที่เวลาผ่านไป 5 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของชีงงานคือประมาณ 630 องศาเซลเซียส  
หมายเหตุ เครื่องมือวัดอุณหภูมิมีขีดจำกัดสามารถวัดได้เพียง 430 องศาเซลเซียส

#### 4.3 ผลของการเปลี่ยนมุมเฟสกับการดึงกระแสของโหลด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดโดยการปรับเปลี่ยนมุมเฟส
2. เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเฟสต่างๆ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.
2. Variac 260 V 15 A 1 ตัว
3. Digital Meter 1 เครื่อง
4. Storage Scope 1 เครื่อง
5. สถานะ โหลดเป็นเบ้าหลอมพ่นขดลวด 13 รอบ และไม่มีชีงงาน

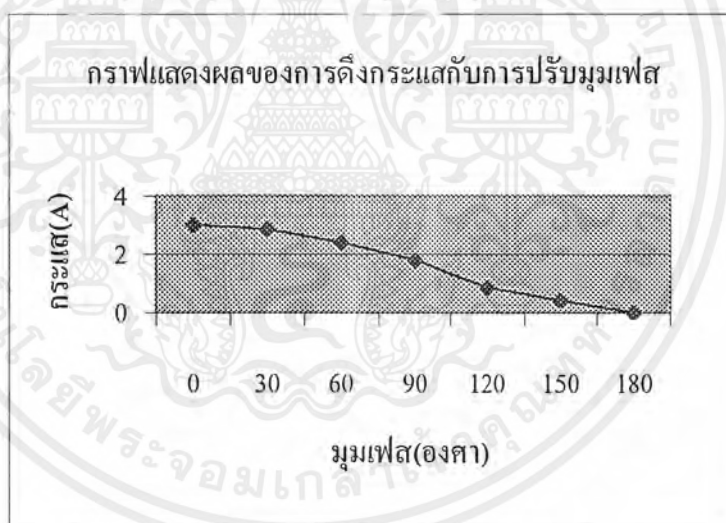
ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันอินพุตคงที่ที่ 80 V ที่ความถี่ 50 Hz
2. ปรับมุมเฟสที่ 0 องศา (หรือไม่มีการเลื่อนเฟส) และบันทึกค่ากระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์
3. สังเกตผลที่เกิดขึ้นกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์
4. ปรับเปลี่ยนค่ามุมเฟสเป็น 30 , 60 , 90 , 120 , 150 และ 180 องศา ตามลำดับทำการทดลองตามข้อ 2-3

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนมุมเฟสกับการดึงกระแสโหลด

| มุมเฟส (องศา) | กระแสอินพุต (A) |
|---------------|-----------------|
| 0             | 3.00            |
| 30            | 2.86            |
| 60            | 2.40            |
| 90            | 1.80            |
| 120           | 0.86            |
| 150           | 0.42            |
| 180           | 0.00            |



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของการดึงกระแสกับการปรับมุมเฟส

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่มุมเฟสเท่ากับ 0 หรือ ไม่มีการเลื่อนมุมเฟส โหลดสามารถดึงกระแสได้สูงสุด และที่มุมเฟสเพิ่มมากขึ้น การดึงกระแสของโหลดจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เพราะเวลาในการนำกระแสในช่วงคาบเวลาการทำงานมีค่าลดลง เนื่องจากมุมทริกเพิ่มขึ้น ก็ไปจำกัดช่วงเวลาในการนำกระแสให้น้อยลง มีผลทำให้ค่าเฉลี่ยของกระแสมีค่าลดลง นั่นคือจะส่งผลให้กำลังไฟ

ฟ้าที่ส่งถ่ายไปยังโหลดมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้โดยวิธีการควบคุมเฟส (Phase Controlled)

#### 4.4 การหาประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์

##### วัตถุประสงค์

เพื่อหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

##### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.
2. Variac 260 V 15 A 1 ตัว
3. Digital Meter 1 เครื่อง
4. Storage Scope 1 เครื่อง
5. สถานะโหลดเป็นบ้าหลอมพันขดลวด 13 รอบ และไม่มีชิ้นงาน

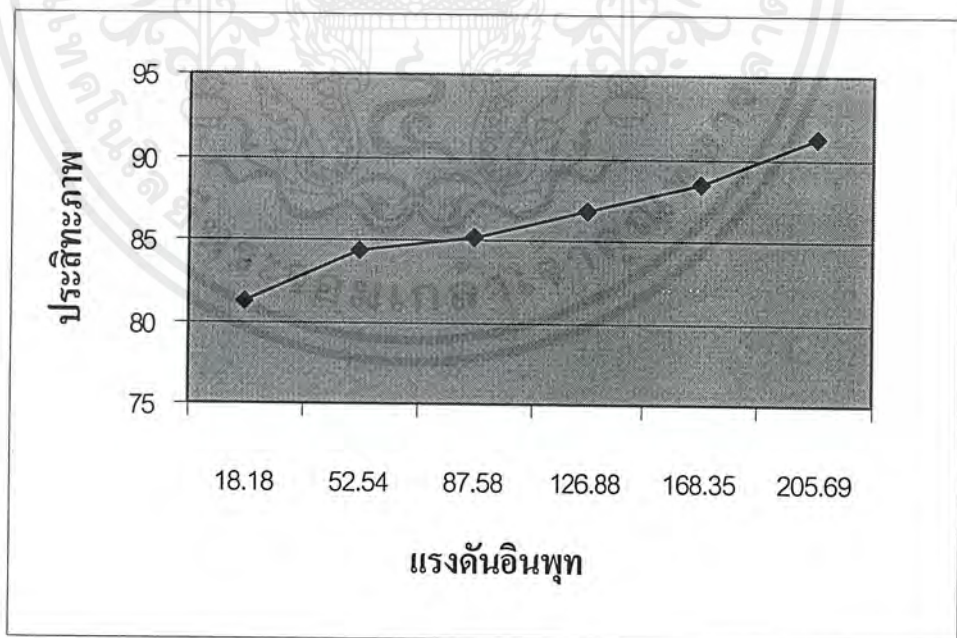
##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนแรงดันอินพุต AC เพิ่มขึ้นทีละ 40 V จนถึงที่พิกัด 220 V
2. ทำการบันทึกสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตเรกติไฟเออร์และ เอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ แล้วไปทำการวิเคราะห์ทางฟูรีเยร์จากโปรแกรม Matlab เพื่อหาค่าแรงดันและกระแส Fundamental รวมทั้งค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์
3. คำนวณค่า  $P_{in}$ ,  $P_{out}$  และ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลอง

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 แสดงการหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

| อินพุตเรกติไฟเออร์ |       | p.f. | Pin (w) | เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ |      | p.f. | Pout (w) | Efficiency |
|--------------------|-------|------|---------|-----------------------|------|------|----------|------------|
| Vac                | Iin   |      |         | Vout                  | Iout |      |          |            |
| 18.18              | 1.23  | 0.69 | 15.42   | 22.20                 | 0.57 | 0.99 | 12.52    | 81.19      |
| 52.54              | 3.52  | 0.71 | 131.08  | 68.25                 | 1.67 | 0.97 | 110.55   | 84.33      |
| 87.58              | 5.87  | 0.72 | 370.15  | 118.20                | 2.78 | 0.96 | 315.45   | 85.22      |
| 126.88             | 8.25  | 0.74 | 774.60  | 165.25                | 4.42 | 0.92 | 671.97   | 86.75      |
| 168.35             | 10.78 | 0.78 | 1415.55 | 205.10                | 6.78 | 0.90 | 1251.52  | 88.41      |
| 205.69             | 12.88 | 0.79 | 2092.94 | 265.20                | 8.18 | 0.88 | 1909.01  | 91.21      |



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องหลอมมีค่าสูงถึง 91.21 % ที่แรงดันพิกัด 220 Vac และกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ 8.18 A และนอกจากนี้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับแรงดันของอินพุตที่ป้อนให้

## 4.5 ผลของการเปลี่ยนรอบของขดลวดรอบเบ้าหลอม

### 4.5.1 ผลของการเปลี่ยนรอบกับการดึงกระแสของโหลด

#### วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงการดึงกระแสของโหลดที่จำนวนรอบต่างๆกันของขดลวดรอบเบ้าหลอม

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจร โดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.
2. Variac 260 V 15 A 1 ตัว
3. Digital Meter 1 เครื่อง
4. Storage Scope 1 เครื่อง
5. สถานะ โหลดเป็นเบ้าหลอมพันขดลวด 5 รอบ , 13 รอบ และ 17 รอบ ไม่มีชิ้นงาน

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อขดลวดรอบเบ้าหลอมจำนวน 5 รอบ เข้ากับวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม
2. ทำการปรับแรงดันอินพุตอยู่ที่ 80 V บันทึกค่ากระแสอินพุตอินเวอร์เตอร์
3. เปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดรอบเบ้าหลอมเป็น 13 และ 17 รอบ ตามลำดับ ทดลองตามข้อ 1-2

#### ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5.1 แสดงผลของการเปลี่ยนรอบกับการดึงกระแสของโหลด

| จำนวนรอบ | ขนาดของกระแสอินพุต (A) |
|----------|------------------------|
| 5        | 5.85                   |
| 13       | 2.54                   |
| 17       | 2.36                   |

### สรุปผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่า ที่จำนวนรอบต่างๆ กันของขดลวดรอบเบ้าหลอมจะมีการดึงค่ากระแสที่ต่างกัน โดยที่ขดลวดรอบเบ้าหลอมจำนวน 5 รอบ ขนาดของกระแสอินพุทจะมีค่ามากกว่า ขนาดกระแสอินพุทของจำนวนรอบอื่นๆ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของโหลดมีค่าต่ำกว่า จึงทำให้กระแสไหลผ่านได้มากกว่า จากการที่จำนวนรอบน้อยกว่า จึงเป็นผลให้ในการส่งผ่านอิมพีแดนซ์ด้วยการคำนวณอัตรารอบของขดลวด(turn ratio) มีค่าน้อยกว่า

#### 4.5.2 ผลของการเปลี่ยนรอบกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เบ้าหลอมวัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่จำนวนรอบต่างๆ กัน ของขดลวดรอบเบ้าหลอมเทียบกับเวลา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.
2. Variac 260 V 15 A 1 ตัว
3. Digital Meter 1 เครื่อง
4. Storage Scope 1 เครื่อง
5. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermo – Hunter) 1 เครื่อง
6. สถานะโหลดเป็นเบ้าหลอมพันขดลวด 5 รอบ , 13 รอบ และ 17 รอบ ไม่มีชิ้นงาน

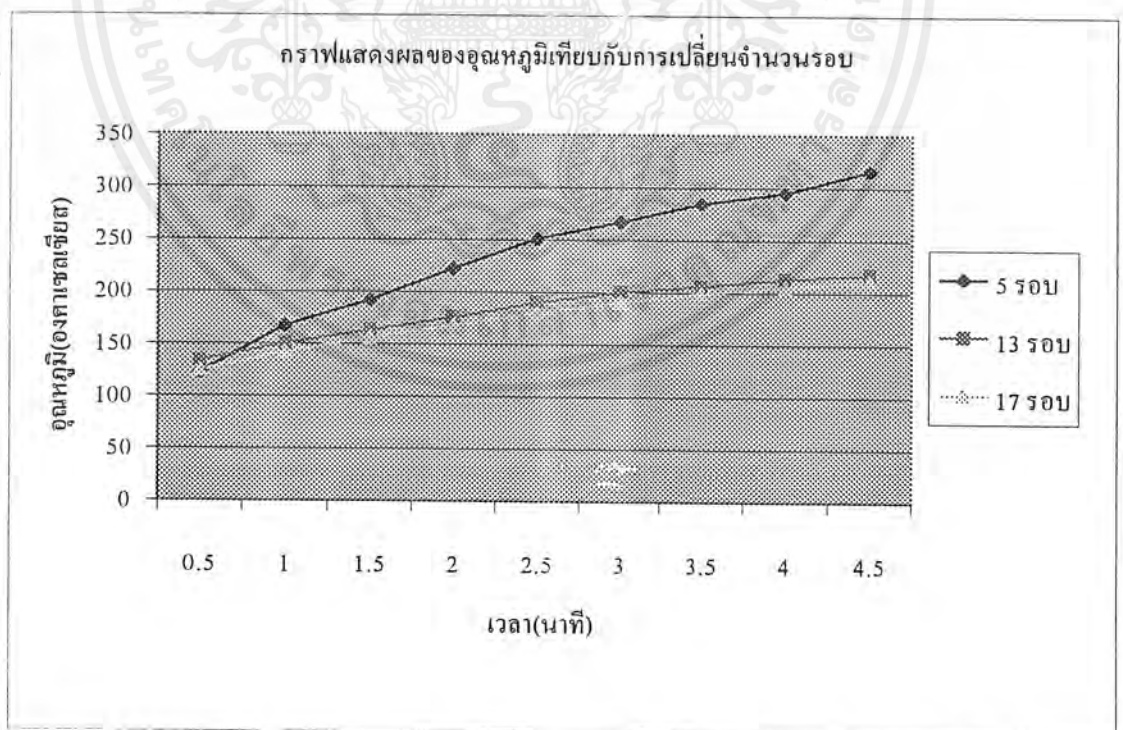
#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อขดลวดรอบเบ้าหลอมจำนวน 5 รอบ เข้ากับวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม
2. ทำการปรับแรงดันอินพุตคงที่ 80 V บันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที
3. เปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดรอบเบ้าหลอมเป็น 13 และ 17 รอบ ตามลำดับ ทดลองตามข้อ 1-2

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5.2 แสดงผลของการเปลี่ยนรอบกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เบ้าหลอม

| เวลา<br>(นาทีก) | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |        |        |
|-----------------|-------------------------|--------|--------|
|                 | 5 รอบ                   | 13 รอบ | 17 รอบ |
| 0.50            | 122                     | 133    | 124    |
| 1.00            | 167                     | 150    | 142    |
| 1.50            | 192                     | 163    | 156    |
| 2.00            | 222                     | 175    | 168    |
| 2.50            | 251                     | 190    | 180    |
| 3.00            | 267                     | 200    | 190    |
| 3.50            | 285                     | 206    | 199    |
| 4.00            | 290                     | 213    | 205    |
| 4.50            | 316                     | 217    | 211    |



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิเทียบกับการเปลี่ยนจำนวนรอบขดลวดรอบเบ้าหลอม

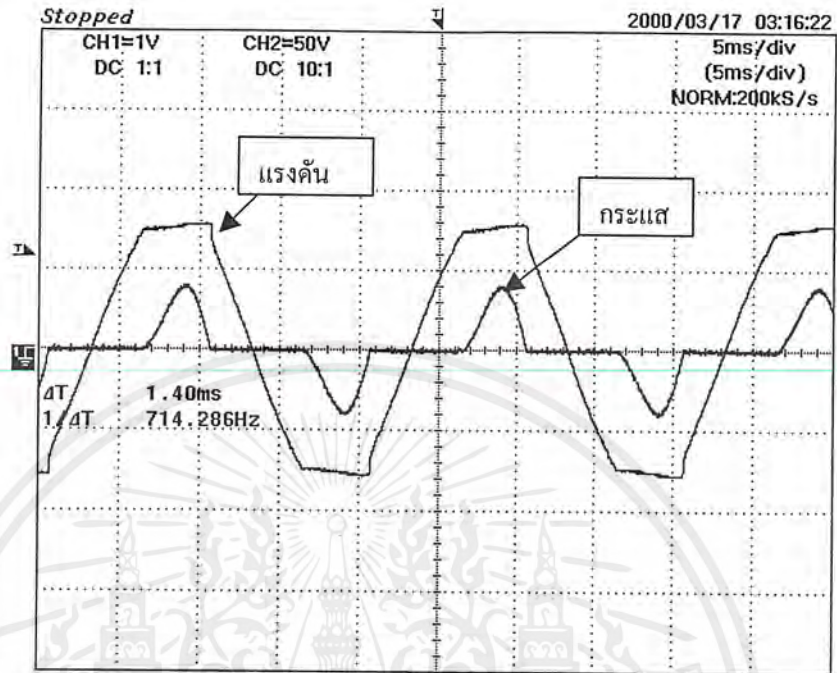
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการทดลอง

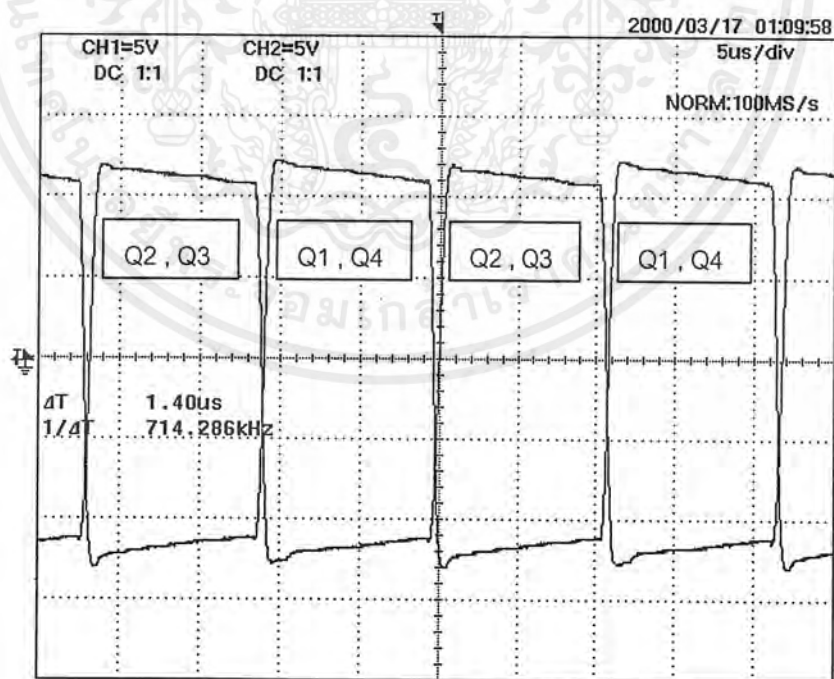
จะเห็นได้ว่า ที่ขดลวดรอบเบ้าหลอมจำนวน 5 รอบ จะมีค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่มากกว่าจำนวนรอบอื่นๆ เนื่องจากมีการดิงกระแสมากกว่า จึงทำให้กำลังไฟฟ้าสามารถถ่ายเทไปเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่า ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าเราดูในรูปของผลของกำลังงานที่โหลดได้รับโดยตรงแล้ว จะมีผลมากกว่าถึงแม้ว่าที่จำนวนของขดลวด 5 รอบ จะมีการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กออกมา น้อยกว่าก็ตาม



#### 4.6 ภาพสัญญาณต่างๆ

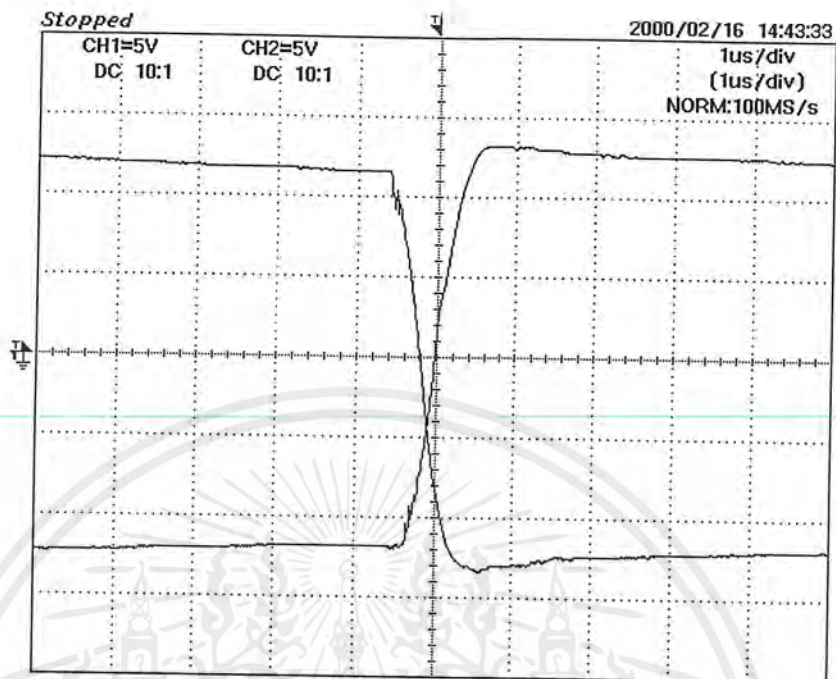


รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันและกระแสด้านอินพุท

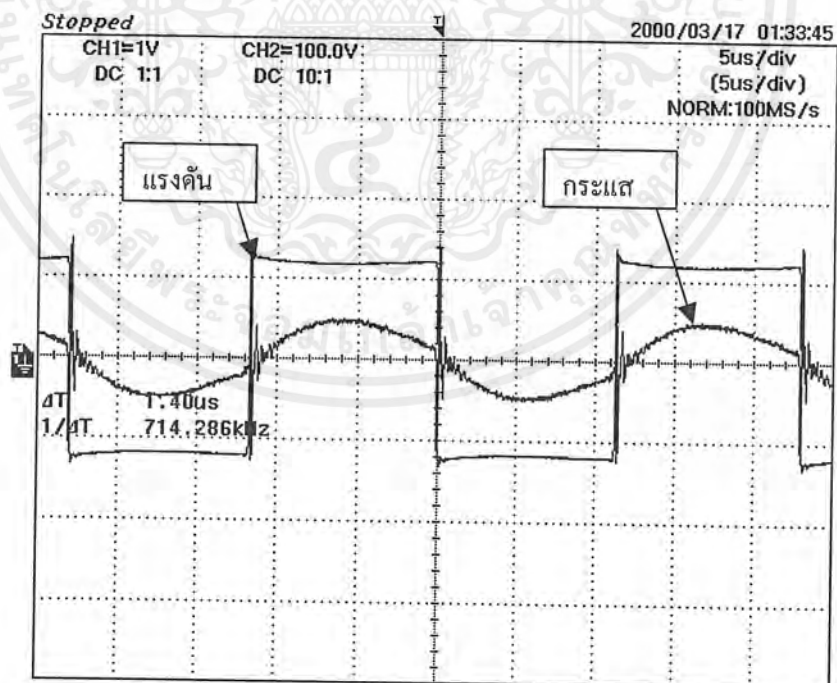


รูปที่ 4.7 สัญญาณขับมอสเฟตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

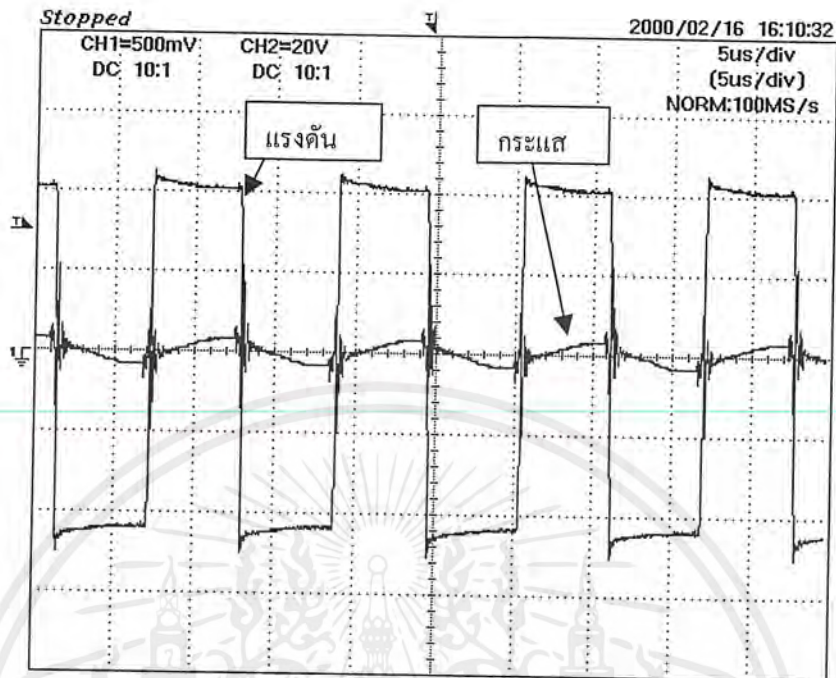


รูปที่ 4.8 แสดง Dead time ของสัญญาณขับมอสเฟต

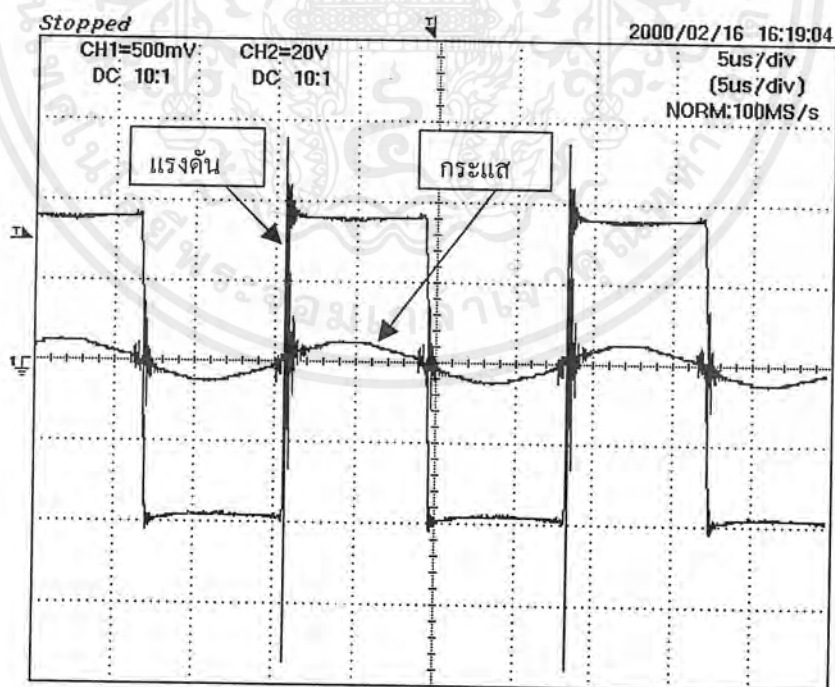


รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันและกระแสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานที่ความถี่ 714.286kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

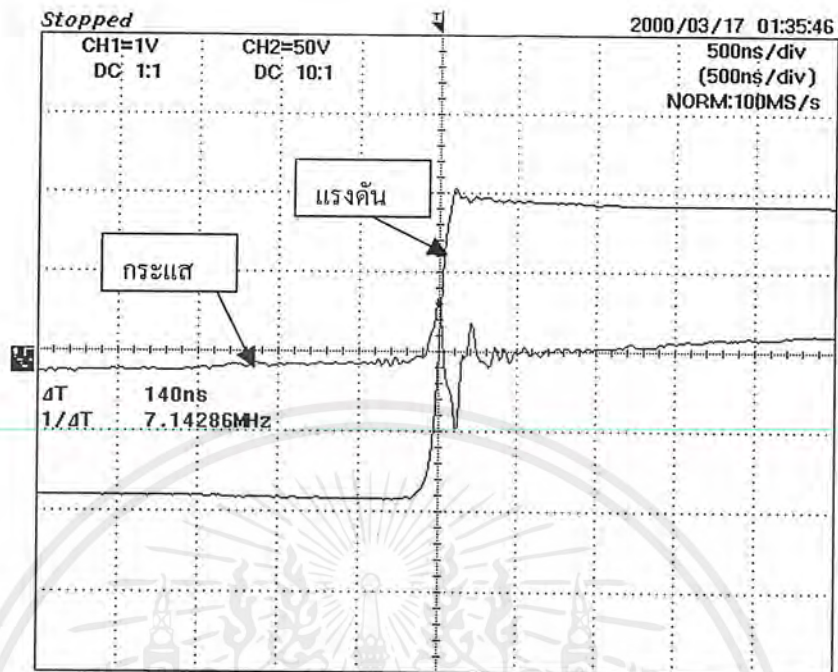


รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์  
ขณะทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่โซ่เนนซ์

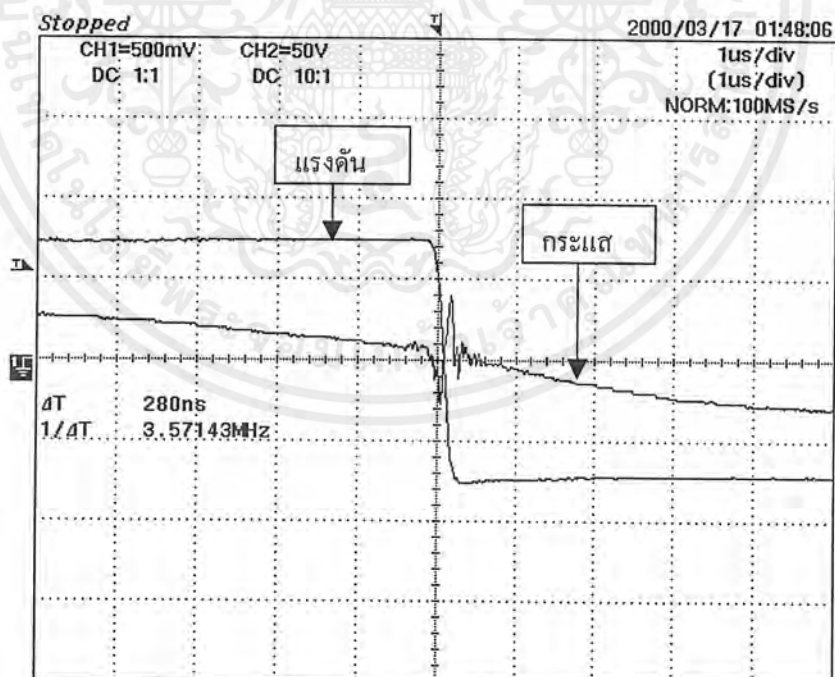


รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์  
ขณะทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่โซ่เนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณด้านขาขึ้นของกระแสและแรงดันที่ความถี่รีโซแนนซ์



รูปที่ 14.13 แสดงสัญญาณด้านขาลงของกระแสและแรงดันที่ความถี่รีโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุป

หลักการของการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กที่นำมาใช้ประยุกต์สำหรับเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ จะให้ความร้อนแก่เบ้าหลอมได้อย่างรวดเร็วสามารถควบคุมอุณหภูมิในการหลอมได้ง่ายและสะดวก

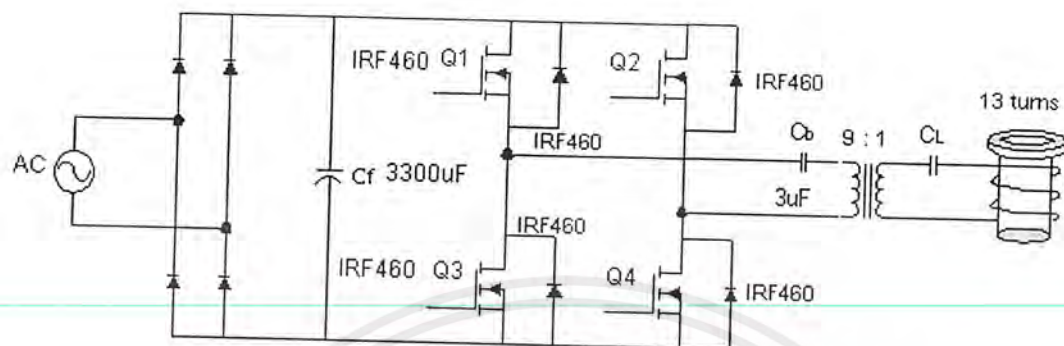
จากโครงการนี้ได้สร้างเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ โดยทำงานที่ความถี่สูง 30-50 kHz ได้ทำการทดลองการหลอมได้ที่ประมาณ 2.3 kW ที่พิกัดแรงดัน 220 V ที่ความถี่ 33.25 kHz ซึ่งเป็นการทำงานที่ความถี่ที่จุดรีโซแนนซ์ เพื่อให้โหลดได้รับกำลังงานได้สูงสุด โดยชิ้นงานที่ทำการหลอมเป็นอลูมิเนียมขนาด 100 กรัม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 630 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการหลอมประมาณ 5 นาที โดยเราสามารถควบคุมกำลังงานที่จ่ายไปยังเบ้าหลอมได้โดยการควบคุมมมเฟส (Phase controlled) ซึ่งสามารถช่วยให้การควบคุมการหลอมเป็นไปได้อย่างสะดวก

ข้อดีที่เห็นได้อย่างชัดเจนของเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนี้ ได้แก่

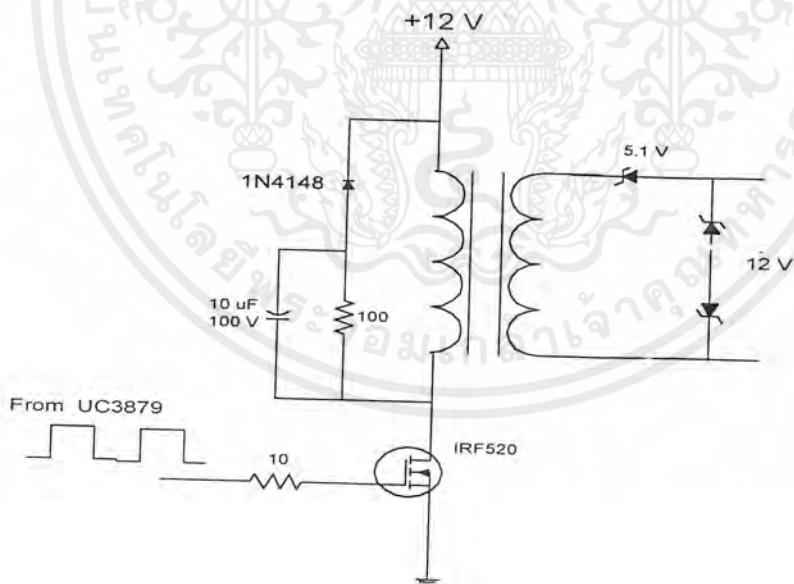
1. ขนาดของตัวเครื่องที่เล็ก ไม่ใช้พื้นที่มาก น้ำหนักเบา เนื่องจากใช้ความถี่สูงในการทำงาน
2. ไม่มีผลของมลภาวะขณะทำการหลอม
3. มีการควบคุมการทำงานที่ง่ายและสะดวก

แนวทางในการแก้ไขและพัฒนาต่อไป จะต้องทำการเพิ่มพิกัดกำลังของตัวเครื่องให้สูงขึ้น เพื่อที่จะสามารถหลอมวัสดุได้หลายชนิด ที่จุดหลอมเหลวที่สูงขึ้น และหาเบ้าหลอมที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งพัฒนาระบบระบายความร้อน Cooling ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น





รูปวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปวงจรIsolate นำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์

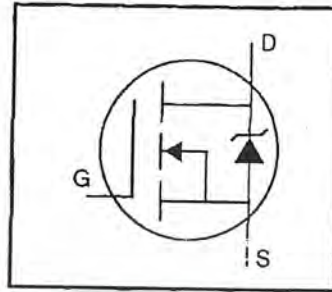
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 500V$$

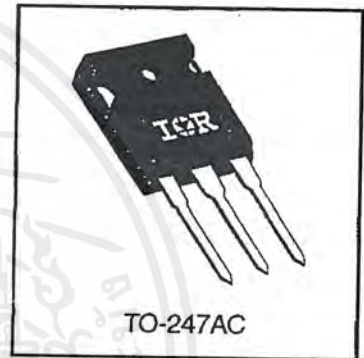
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

### Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



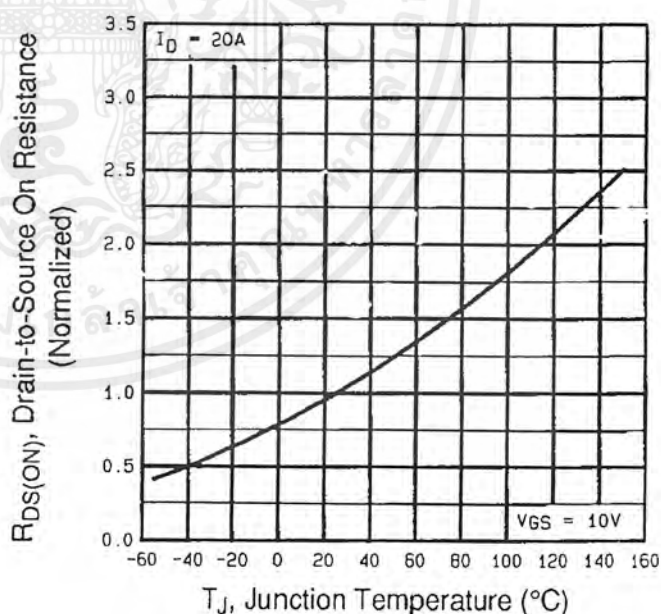
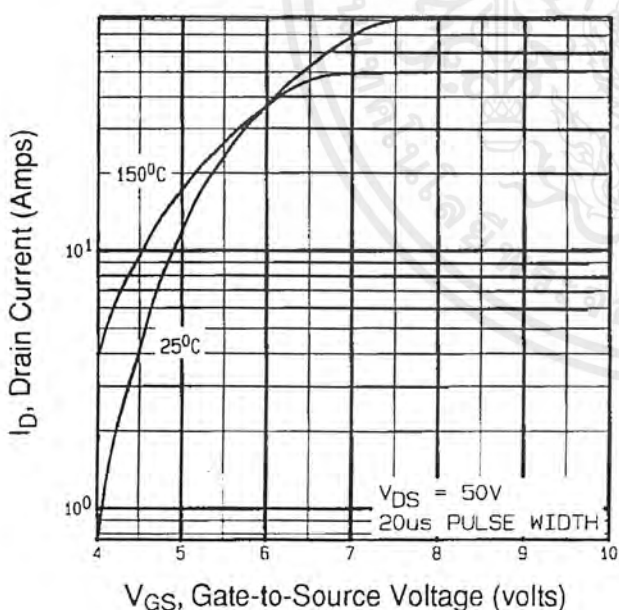
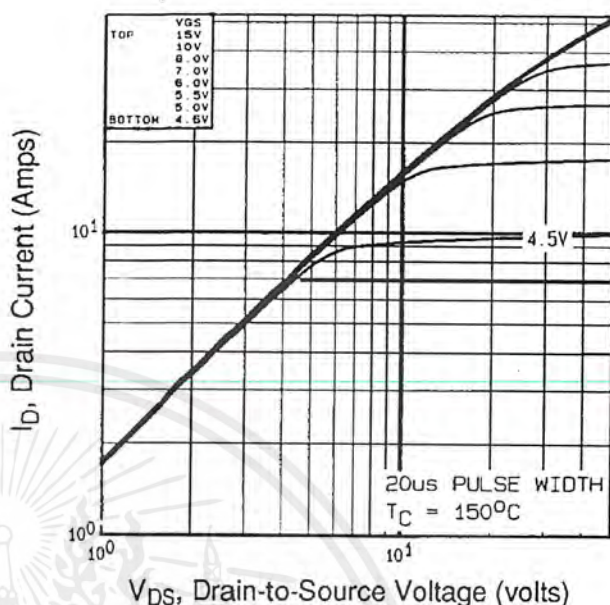
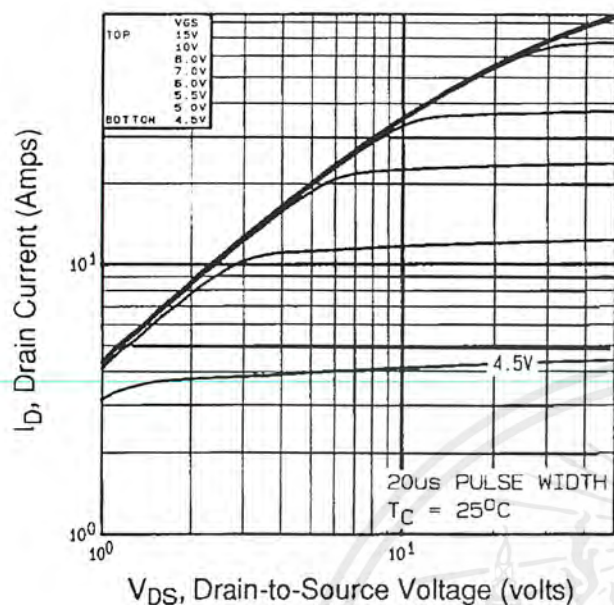
DATA SHEETS

### Absolute Maximum Ratings

|                             | Parameter                                 | Max.                                         | Units |
|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|
| $I_D$ @ $T_C = 25^\circ C$  | Continuous Drain Current, $V_{GS}$ @ 10 V | 20                                           | A     |
| $I_D$ @ $T_C = 100^\circ C$ | Continuous Drain Current, $V_{GS}$ @ 10 V | 13                                           |       |
| $I_{DM}$                    | Pulsed Drain Current ①                    | 80                                           |       |
| $P_D$ @ $T_C = 25^\circ C$  | Power Dissipation                         | 280                                          | W     |
|                             | Linear Derating Factor                    | 2.2                                          | W/°C  |
| $V_{GS}$                    | Gate-to-Source Voltage                    | ±20                                          | V     |
| $E_{AS}$                    | Single Pulse Avalanche Energy ②           | 960                                          | mJ    |
| $I_{AR}$                    | Avalanche Current ①                       | 20                                           | A     |
| $E_{AR}$                    | Repetitive Avalanche Energy ①             | 28                                           | mJ    |
| dv/dt                       | Peak Diode Recovery dv/dt ③               | 3.5                                          | V/ns  |
| $T_J$                       | Operating Junction and                    | -55 to +150                                  | °C    |
| $T_{STG}$                   | Storage Temperature Range                 |                                              |       |
|                             | Soldering Temperature, for 10 seconds     |                                              |       |
|                             | Mounting Torque, 6-32 or M3 screw         | 300 (1.6mm from case)<br>10 lbf·in (1.1 N·m) |       |

### Thermal Resistance

|                 | Parameter                           | Min. | Typ. | Max. | Units |
|-----------------|-------------------------------------|------|------|------|-------|
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case                    | —    | —    | 0.45 | °C/W  |
| $R_{\theta CS}$ | Case-to-Sink, Flat, Greased Surface | —    | 0.24 | —    |       |
| $R_{\theta JA}$ | Junction-to-Ambient                 | —    | —    | 40   |       |



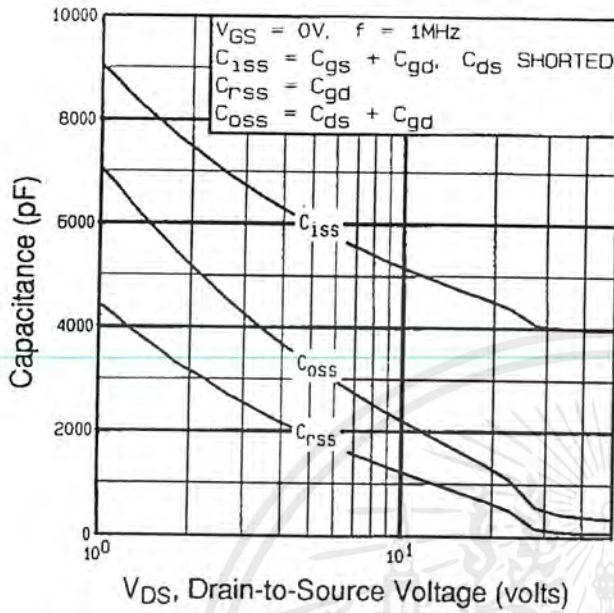


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

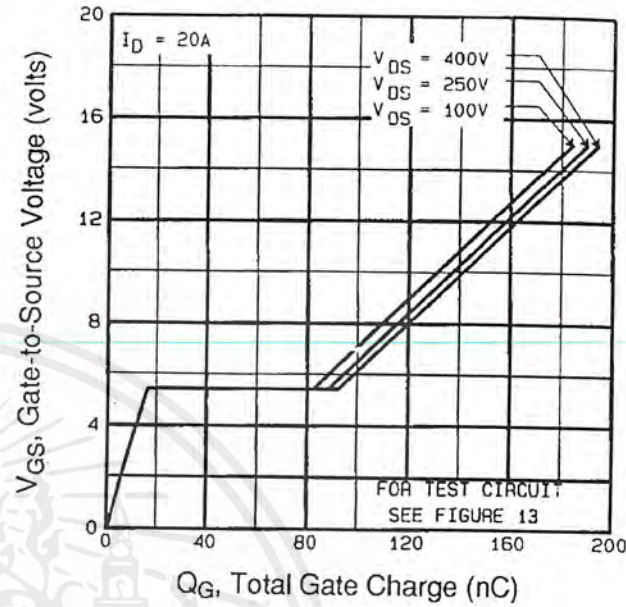


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

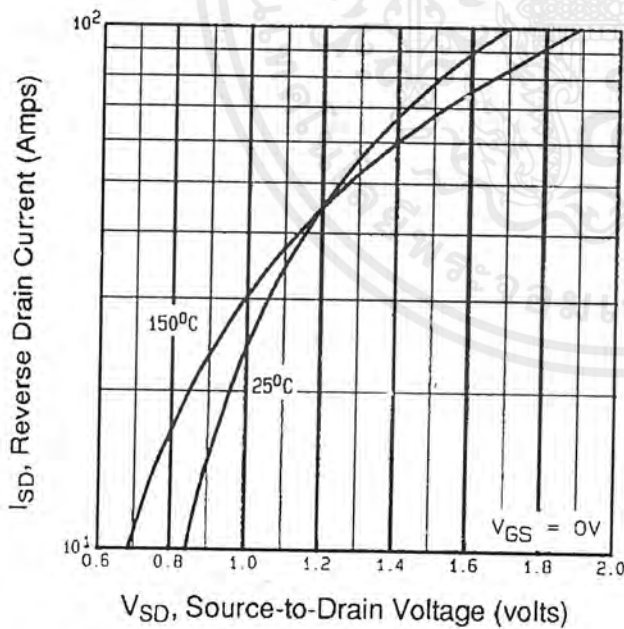


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

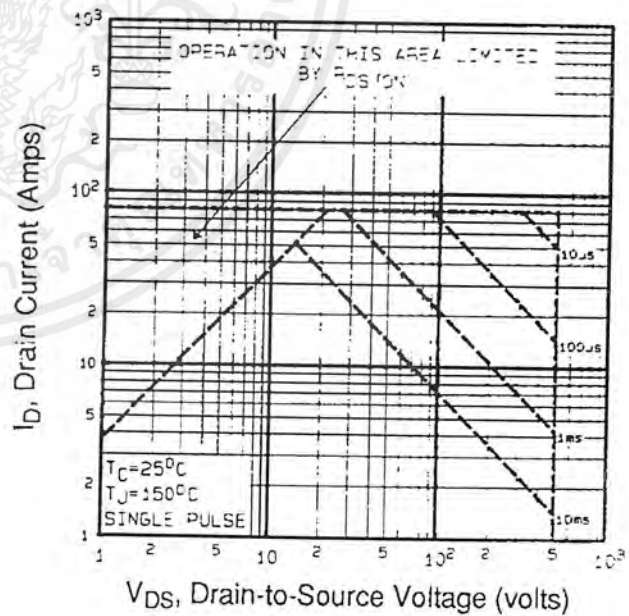


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

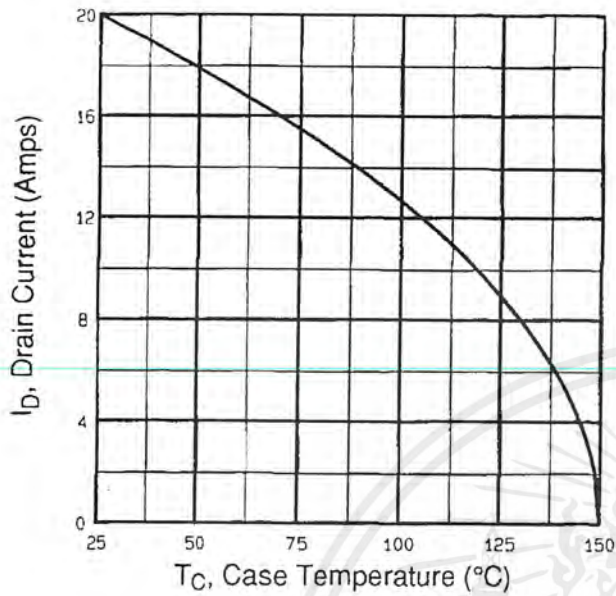


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

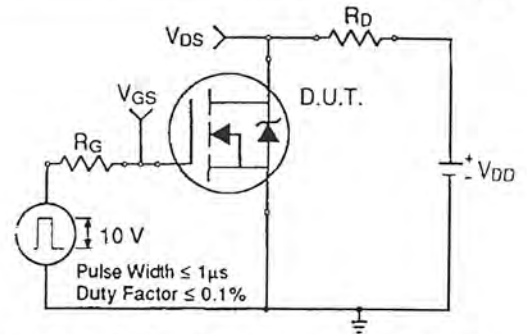


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

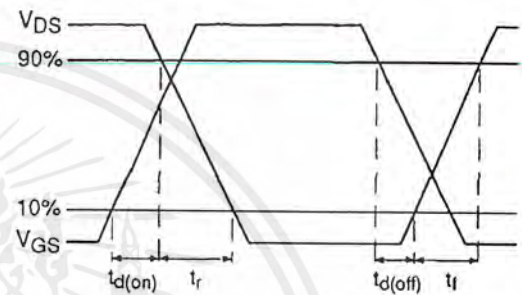


Fig 10b. Switching Time Waveforms

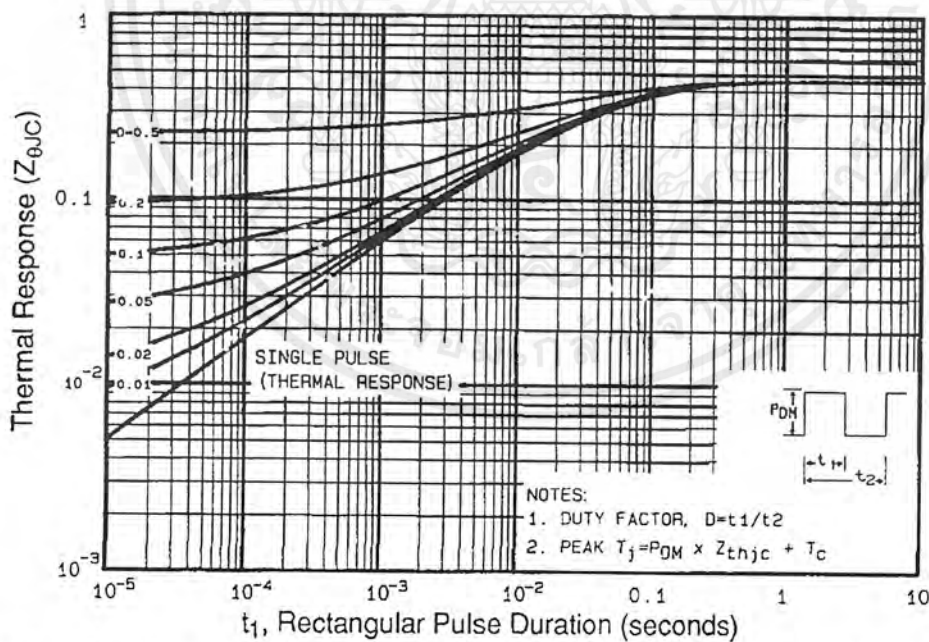


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

|                                                                        |                              |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Supply Voltage (VC, VIN)                                               | 20V                          |
| Output Current, Source or Sink, DC                                     | 20mA                         |
| Analog I/Os<br>(Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 17, 18, 19)<br>(Pin 16) | -0.3 to 5.3V<br>-0.3V to VIN |
| Storage Temperature Range                                              | -65°C to +150°C              |
| Junction Temperature                                                   | -55°C to +150°C              |
| Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)                                  | +300°C                       |

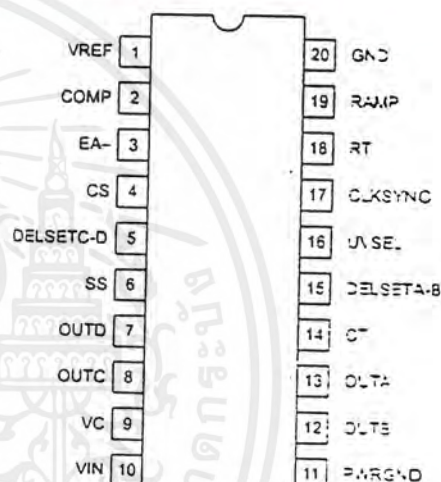
**Notes:** Pin references are to 20 pin DIL and SOIC packages.  
All voltages are with respect to ground unless otherwise stated.  
Currents are positive into, negative out of the specified terminal.  
Consult Packaging Section of Databook for thermal limitations and considerations of packages.

Table 1. Product Selection Guide

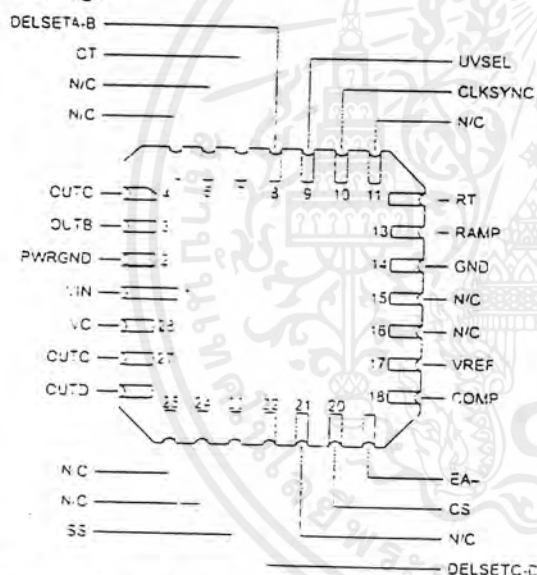
|         | TEMPERATURE RANGE | AVAILABLE PACKAGES |
|---------|-------------------|--------------------|
| UCC1879 | -55°C to +125°C   | J, L               |
| UCC2879 | -40°C to +85°C    | N, DW, Q, J, L     |
| UCC3879 | 0°C to +70°C      | N, DW, Q           |

## CONNECTION DIAGRAMS

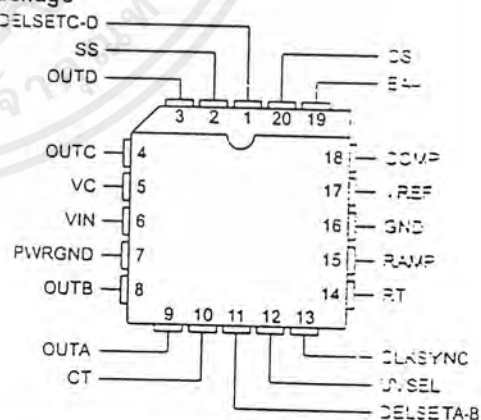
DIL-20, SOIC-20 (Top View)  
J or N Package, DW Package



CLCC-28 (Top View)  
L Package



PLCC-20 (Top View)  
Q Package



#### IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards:

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. วิริยะ พิเศษฐจำเริญ  
ดร. วิจิตร กิณเรศ  
อ. สุรินทร์ คำฝอย  
พี่ ໂໂໂ ธรรมาธิฐาน สำหรับคำแนะนำและอุปกรณ์ที่ขาดเหลือต่างๆ  
พี่ ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] John Davics & Peter Simpson , “Induction Heating Handbook” , McGraw-Hill , New York , 1979
- [2] GEORGE C. CHRYSIS “High Frequency Switching Power Supply Theory And Design” second edition McGraw-Hill , New York 1990
- [3] S. Zinn and S. L. Semiatin. "**Elements of Induction Heating Design , Control, and Application.**" ASM International : Ohio, 1991.
- [4] Rashid, Muhammad H. "**Power Electronics Circuit, Device, and Applications.**" Prentice Hall : New Jersey, 1993, Page 439-454.
- [5] สุวัฒน์ คั่น , “เทคนิคและการออกแบบสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย, บริษัท เอนเทคไทย จำกัด, 2537