

การประยุกต์เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุกับการชุบผิวแข็งวัสดุ  
THE RADIO FREQUENCY SIGNAL GENERATOR  
FOR THE SURFACE HARDENING  
APPLICATIONS



นายณัฐพร ฤทธิ์น่ม

MR. NUTTAPORN RITNUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-622-036-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 29090  
วัน, เดือน, ปี..... 18 พ.ย. 2540

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**THE RADIO FREQUENCY SIGNAL GENERATOR  
FOR THE SURFACE HARDENING  
APPLICATIONS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1997**

**ISBN 974-622-036-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุกับการ  
ชุบผิวแข็งวัสดุ

นักศึกษา

นายณัฐพร ฤทธิ์นุ่ม

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

อาจารย์พิชิต ถ้ายอง

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2540

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุกับการชุบผิวแข็งวัสดุ โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งมีบทบาทในการแปลงกำลังงาน ไฟฟ้ากระแสตรง ไปอยู่ในรูปกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะถูกประยุกต์เป็นอุปกรณ์ชุบผิวแข็งวัสดุ การทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก ส่วนแรกคือวงจรออสซิลเลเตอร์และส่วนที่สองคือวงจรขยายกำลัง ส่วนของวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นอาศัยการทำงานของวงจรแท่งกึ่งการออสซิลเลตสัญญาณความถี่ย่านวิทยุเพื่อถ่ายโอนให้กับขดลวดให้ความร้อนผ่านหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งอยู่ในบทบาทของอุปกรณ์แม่ทึง ซึ่งจากการแม่ทึง กำลังงานจะถูกรวมไปที่ขดลวดให้ความร้อนเพื่อถ่ายเทให้กับวัสดุชุบผิวแข็งต่อไป ในส่วนของวงจรขยายกำลัง หลอดไตรโอดได้นำมาใช้ในวงจรขยายกำลังชั้นซีเพื่อจ่ายกำลังงานให้กับวงจรแท่งกึ่งสำหรับการชดเชยความสูญเสียซึ่งนอกจากจะเป็นความสูญเสียที่แฝงอยู่กับตัวนำแล้วยังมีค่าความสูญเสียอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นผลจากการถ่ายโอนกำลังงานสู่โหลดซึ่งความสูญเสียทั้งสองส่วนนี้ต้องได้รับการชดเชยเพื่อการดำรงสภาพออสซิลเลตของวงจรแท่งกึ่ง และเพื่อเสถียรภาพของระบบ แรงดันส่วนหนึ่งจากสัญญาณออสซิลเลตจะถูกแบ่งโดยขดลวดในวงจรแท่งกึ่งเพื่อป้อนกลับไปขับกริดผ่านหม้อแปลงกระตุ้นด้วยรูปแบบ “การไบแอสโดยกระแสกริดรั่วไหล” ซึ่งเป็นเทคนิคการสร้างแรงดันไบแอสกริดโดยกระแสกริดที่เกิดในช่วงสูงสุดของสัญญาณขับกริด ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะเห็นว่าเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงทำงานบนพื้นฐาน “การออสซิลเลตโดยการค้ำจุนในตัว” โดยกำลังงานส่วนหนึ่งที่จ่ายออกจากวงจรขยายกำลังจะถูกป้อนกลับมาขับระบบให้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

<b>Thesis Title</b>	The Radio Frequency Signal Generator for the Surface Hardening Applications
<b>Student</b>	Mr.Nuttaporn Ritnum
<b>Thesis Advisor</b>	Mr.Pichit Lumyong
<b>Level of Study</b>	Master of Engineering in Electrical Engineering
<b>Department</b>	Electrical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Year</b>	1997

## Abstract

In this thesis, we have presented our research on the radio frequency signal generator. The function of it is to convert DC power to the high frequency power in order to apply it as the surface hardening equipment. This radio frequency signal generator composes of two main parts. The first is the oscillating part and the second is the power amplifier. The oscillating part employed the tank circuit as the oscillator to oscillate the radio frequency signal which will be transferred to the heating coil via the air-core transformer of which its function is as the matching device. The result of this, the power will be confined on to the heating coil, in order for the surface hardening purpose. In the power amplifier part, the triodes will be operated base on the class C power amplifier. The high frequency power from the triodes will be drawn by the tank circuit to compensate the losses in the tank circuit ,of which besides the stray loss in the conductor. One part of these losses occur due to the power loading. So, both of these losses must be compensated in order to maintain the tank circuit go on oscillating. In order for the system to go on stability, the oscillating signal will be divided by the tank coils and then fed back via the exciting transformer to drive grid on the base of "Grid-leak Bias" which the grid bias can be obtained from the current flow through grid in the peak portion of the driving signal. From this point, we see, one part of the power supplied by the power amplifier will be fed back on the base of "Self-sustained Oscillation" in order for the system to go on.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจากท่าน  
อาจารย์พิชิต ถ้ำทอง ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุ  
เคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ, คุณพ่อ, คุณแม่ ที่เคารพรักยิ่งตลอดจนถึงน้องๆ ทั้งสองที่ให้การ  
สนับสนุนรวมทั้งมิตรสหายที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐพร ฤทธิ์น่วม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	3
ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	5
วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	5
2. หลอดไตร โอด.....	6
กริดควบคุม.....	6
พารามิเตอร์ของหลอดไตร โอด.....	8
วงจรสมมูลย์ของหลอดไตร โอด.....	14
เทคนิคกริดลึกลับไบแอส.....	18
3. คุณลักษณะของออสซิลเลเตอร์.....	23
องค์ประกอบและคุณลักษณะทั่วไปของออสซิลเลเตอร์.....	23
วงจรเรโซแนนซ์เทงก์แบบขนาน L-C.....	25
ความสูญเสียที่แฝงอยู่ในวงจรเทงก์.....	26
คุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์เทงก์แบบขนาน.....	29
กำลังงานลบ.....	30

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

คุณสมบัติในทางอุณหพลศาสตร์ของวงจรเรโซแนนซ์เทงก์แบบขนาน.....	32
ลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ของวงจรเทงก์แบบขนาน.....	33
ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุสำหรับการออสซิลเลตที่ความถี่เรโซแนนซ์.....	34
ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรเทงก์ในทางปฏิบัติกับค่าความสูญเสีย.....	35
ตัวประกอบ Q.....	36
อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลของวงจรเทงก์.....	39
คุณลักษณะทางเฟสของวงจรเทงก์.....	39
4. การถ่ายโอนกำลังงานโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	42
ความเหนี่ยวนำร่วม.....	44
รีแอกแตนซ์ร่วม.....	46
สัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนกำลังงานทางสนามแม่เหล็ก.....	48
การพิจารณาเครื่องหมายค่าความเหนี่ยวนำร่วมของการถ่ายโอนกำลังงานทางสนามแม่เหล็ก.....	49
หม้อแปลงแกนอากาศ.....	52
5. การประยุกต์เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุกับงานชุบผิวแข็งวัสดุ.....	59
หลักพื้นฐานของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุประยุกต์กับงานชุบผิวแข็งวัสดุ.....	59
การพิจารณาวงจรส่วนจ่ายกำลังงานออกเพื่อเม็ทซิ่งให้เข้ากับโหลด.....	68
แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับ ไบแอสแอโนด.....	76
การประยุกต์วงจรขยายกำลังชั้นซีสำหรับการชุบผิวแข็งวัสดุความถี่ย่านวิทยุ.....	78
6. การชุบผิวแข็งวัสดุโดยประยุกต์การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	94
การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกับวัสดุแผ่นความหนา กิ่งอนันต์.....	94
กำลังงานและฟลักซ์กับวัสดุแผ่นความหนา กิ่งอนันต์.....	102
กำลังงานและฟลักซ์เหนี่ยวนำภายในวัสดุแผ่นทรงสี่เหลี่ยมบาง.....	107
7. การวิเคราะห์ระบบและผลการทดสอบ.....	112

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
แนวทางการทำงานของอุปกรณ์และกราฟกระแสคงที่.....	113
แนวทางกำหนดค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบอยู่ในวงจรเทงก์ .....	117
กำลังงานสัมพันธ์.....	130
8. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	134
บรรณานุกรม .....	138
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก ข้อมูลพื้นฐานของหลอดไครโอค TB5/2500 (PHILIPS).....	140
ประวัติผู้เขียน.....	149



# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบ Q ที่เรโซแนนซ์, "Q<sub>o</sub>" ของวงจรแท่งกัมแบบขนาน L-C .....37
2. แสดงพารามิเตอร์สัมพันธ์ของวงจรแท่งกัมแบบขนาน L-C ที่เรโซแนนซ์ .....38
3. แสดงพารามิเตอร์สัมพันธ์ต่างๆ ของวงจรแท่งกัมแบบขนาน L-C .....40
4. แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟกระแสแรงดันของหลอดไตรโอด TB 5/2500 (PHILIPS) ที่ได้กำหนดแนวเส้นทำงานบนกราฟกระแสแรงดันที่ในภาพที่ 51 .....115

# สารบัญภาพ

หน้า

1. แสดงกระแสสัญญาณ, กระแสแอมป์, กระแสกริด ในรูปฟังก์ชันของแรงดันกริดโดยพิจารณาที่ระดับแรงดันแอมป์คงที่.....	7
2. แสดงกราฟคุณลักษณะของแอมป์.....	9
3. แสดงคุณลักษณะการถ่ายโอนของหลอดไตรโอด .....	10
4. แสดงคุณลักษณะกระแสที่ของหลอดไตรโอด .....	11
5. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของหลอดไตรโอด 6C5 ในรูปฟังก์ชันของกระแสแอมป์ .....	13
6. แสดงสัญลักษณ์ของหลอดไตรโอดรวมทั้งสัญลักษณ์แทนปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลง .....	15
7. แสดงวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอดในภาพที่ 6 ในโหมดของแรงดันรวมทั้งปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงจากจุดไบแอสหรือจุดหยุดนิ่ง.....	16
8. แสดงวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอดในภาพที่ 6 ในโหมดของกระแสรวมทั้งปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงจากจุดไบแอสหรือจุดหยุดนิ่ง.....	17
9. แสดงวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอดที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขั้ว .....	18
10. แสดงรูปแบบสัญญาณขับและแรงดันกริดไบแอสที่เกิดขึ้นสำหรับเทคนิคกริดไบแอสแบบกริดลิกไบแอส.....	19
11. แสดงวงจรขยายกำลังโดยหลอดไตรโอดที่ประยุกต์เทคนิคกริดไบแอสแบบกริดลิกไบแอส .....	20
12. แสดงอีกรูปแบบหนึ่งของวงจรในภาพที่ 11 สำหรับการประยุกต์เทคนิคกริดไบแอสแบบกริดลิกไบแอส.....	21
13. แสดงค่าความสูญเสียต่างๆ ที่แฝงอยู่ในวงจรแท่ง.....	23
14. แสดงความสูญเสียที่ปรากฏภายในวงจรแท่งแบบขนาน L-C ในรูปตัวต้านทานอนุกรม $R_L$ และ $R_C$ .....	24
15. แสดงความสูญเสียที่ปรากฏภายในวงจรแท่งแบบขนาน L-C ในรูปตัวต้านทานขนาน $R_p$ .....	24

## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
16. แสดงลักษณะการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสภายในตัวนำขณะนำกระแส.....	25
17. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, แรงดัน และกำลังงานในตัวเหนี่ยวนำอุดมคติ .....	26
18. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, แรงดัน และกำลังงานในตัวเก็บประจุอุดมคติ .....	27
19. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, แรงดัน และกำลังงานในตัวต้านทานอุดมคติ .....	28
20. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำกับความถี่.....	29
21. แสดงการตอบสนองของวงจรแท่งก่แบบขนาน L-C ทั้งในแบบอุดมคติและในทางปฏิบัติ ...	31
22. แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวประกอบ Q ของวงจรแท่งก่แบบขนาน L-C, " $Q_0$ " .....	35
23. แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของความต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันของวงจร แท่งก่แบบขนาน L-C.....	41
24. แสดงวงจรถ่ายโอนกำลังงานทางสนามแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วยฟลักซ์แม่เหล็กของค ประกอบทั้งสองส่วนที่เกิดจากกระแสภายในวงจรทั้งสอง .....	42
25. แสดงรูปแบบการกำหนดจุดแสดงระดับแรงดันเพื่อป้องกันถึงระดับแรงดันสัมพันธ์ ระหว่างขดลวดทั้งสอง.....	50
26. แสดงรูปแบบการกำหนดจุดมาร์กเพื่อป้องกันทิศทางการนำกระแสระหว่างขดลวด.....	51
27. แสดงรูปแบบการกำหนดจุดแสดงระดับแรงดันเพื่อป้องกันถึงระดับแรงดันสัมพันธ์ ระหว่างขดลวดโดยวิธีทั่วไป.....	52
28. แสดงวงจรสมมูลย์หมีแปลงแกนอากาศ .....	53
29. แสดงวงจรสมมูลย์ของหมีแปลงแกนอากาศในบทบาทของอุปกรณ์แม่เหล็ก.....	57
30. แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบชุปผิวแข็งวัสดุความถี่ย่านวิทยุ.....	60
31. (a) แสดงวงจรจริงของขดลวดให้ความร้อน, (b) แสดงวงจรสมมูลย์ขดลวดให้ความร้อน, (c) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของขดลวดให้ความร้อน, (d) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม ของขดลวดให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้ $R_0$ มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ $\omega L_0$ .....	61
32. แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดสัญญาณ .....	62
33. แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดสัญญาณ .....	66
34. แสดงวงจรสมมูลย์ของหมีแปลงแกนอากาศ.....	69
35. แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรในภาพที่ 34.....	69

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

36. แสดงกราฟการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการ (5.10) .....	72
37. แสดงกราฟการถ่ายโอนระดับ kVA ของหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการ (5.17) .....	74
38. แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับ ไบแอสแอ โนด .....	77
39. แสดงรูปแบบสัญญาณกริดและสัญญาณแอ โนดของวงจรขยายกำลังชั้นซีโดยหลอดไตรโอดในบทบาทอุปกรณ์แอกทีฟ.....	79
40. แสดงกราฟคุณลักษณะของหลอดไตร โอดในวงจรขยายกำลังชั้นซีและรูปปลั๊กกระแสแอ โนด .....	80
41. แสดงกราฟคุณลักษณะที่ใช้พิจารณาประกอบกับสมการวิเคราะห์.....	82
42. แสดงการวางแผนเส้นทำงานของหลอดไตร โอดบนกราฟกระแสกึ่ง.....	84
43. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแนวเส้นทำงานกับสัญญาณกริดและสัญญาณแอ โนดของหลอดไตรโอด.....	86
44. แสดงภาพตัดขวางตามแนวยาวของขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุแผ่นความหนาที่งอแน่นที่สุดในภาพที่ 44(a) ส่วนภาพที่ 44(b) แสดงภาพตัดขวางของขดลวดในภาพที่ 44(a) เมื่อกำหนดขนาด.....	95
45. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก, H, โดยเทียบกับระดับความลึกจากผิววัสดุของกระแสไหลวน, $\delta$ , ซึ่งมีค่าดังสมการ (6.5).....	98
46. แสดงการกระจายกำลังงานสูญเสียตามระดับความลึกจากผิววัสดุ.....	103
47. (a) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแผ่นวัสดุในทางอุดมคติ, (b) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมที่พิจารณา รวมทั้งค่าความต้านทานแผ่งของขดลวดให้ความร้อนและรีแอกแตนซ์รั่วไหล ....	105
48. แสดงวงจรสมมูลย์การให้ความร้อนแก่วัสดุเพื่อการชุบผิวแข็ง โดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	106
49. แสดงแผ่นวัสดุบางและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแส .....	107
50. แสดงฟังก์ชันของ p และ q สำหรับการพิจารณาวัสดุแผ่นบาง เมื่อ $b/\delta > 8, p = q = 1/(b/\delta)$ .....	111

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

51. แสดงการวางตัวของแนวเส้นทำงานของหลอดไดรไอโอด TB 5/2500 (PHILIPS) บนกราฟกระแสคงที่.....	114
52. แสดงพัลส์กระแสแอม โนดและพัลส์กระแสกริดที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟกระแสคงที่ในภาพที่ 51.....	116
53. แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ.....	120
54. แสดงหม้อแปลงแกนอากาศที่ใช้ในการทดสอบ.....	121
55. แสดงขดลวดให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ.....	122
56. แสดงสัญญาณจุด 2 เทียบกราวนด์: 0.2 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load..	123
57. แสดงสัญญาณจุด 3 เทียบกราวนด์: 1 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load.....	123
58. แสดงสัญญาณจุด 4 เทียบกราวนด์: 1 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load.....	124
59. แสดงสัญญาณจุด 5 เทียบกราวนด์: 1 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load.....	124
60. แสดงสัญญาณจุด 6 เทียบกราวนด์: 0.2 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load..	125
61. แสดงสัญญาณจุด 7 เทียบกราวนด์: 0.2 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load..	125
62. แสดงสัญญาณจุด 8 เทียบกราวนด์: 0.1 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:No Load..	126
63. แสดงสัญญาณพร้อมขดลวดให้ความร้อน: 20 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.:No Load.....	126
64. แสดงสัญญาณจุด 2 เทียบกราวนด์: 0.2 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:On Load..	127
65. แสดงสัญญาณจุด 3 เทียบกราวนด์: 1 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:On Load.....	127
66. แสดงสัญญาณจุด 4 เทียบกราวนด์: 1 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:On Load.....	128
67. แสดงสัญญาณจุด 5 เทียบกราวนด์: 0.5 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:On Load..	128
68. แสดงสัญญาณจุด 6 เทียบกราวนด์: 0.2 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.: $\times 1,000$ Probe.:On Load..	129
69. แสดงสัญญาณพร้อมขดลวดให้ความร้อน: 20 V/Div., 0.5 $\mu$ Sec./Div.:On Load.....	129
70. แสดงการวัดปริมาณกำลังงานที่ระบบถ่ายโอนสู่หลอดสุญญากาศเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ไหลผ่านท่อหลอด.....	132
71. แสดงผลการวัดอุณหภูมิที่ไหลผ่านท่อหลอดจากภาพที่ 70.....	133
72. แสดงภาพตัดขวางของแท่งหลอดขณะได้รับความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	136

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การชุบผิวแข็งวัสดุ (Surface Hardening); เป็นกระบวนการเพื่อการแปลงคุณสมบัติของวัสดุ, ซึ่งส่วนใหญ่จะอ้างอิงถึงการชุบผิวแข็งเหล็ก, จากวัสดุที่โครงสร้างมีความเหนียวและความแข็งในระดับหนึ่งให้กลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่งมากขึ้น โดยแปลง โครงสร้างของวัสดุที่บริเวณผิวให้เป็น โครงสร้างที่ประกอบด้วยความแข็งมากขึ้น ส่วนเนื้อวัสดุภายใต้ผิวแข็งจนถึงบริเวณส่วนกลางยังคง โครงสร้างเดิมหรือมีการแปรเปลี่ยนน้อยมากเพื่อคงคุณสมบัติความเหนียว

วัตถุประสงค์ในการแปลงคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวก็เพื่อต้องการให้วัสดุมีความทนทานต่อการสึกหรอ ทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้โดยไม่แตกหัก กรรมวิธีในการชุบผิวแข็งวัสดุที่นำมาพิจารณานี้จะอยู่ในส่วนของการอบความร้อนซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในกรรมวิธีชุบผิวแข็งวัสดุที่ประกอบด้วยสองกระบวนการย่อยดังนี้;

1. การอบความร้อน (Heat Treatment); คือกระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการควบคุมความร้อนที่ให้กับวัสดุ อุณหภูมิที่ให้กับวัสดุบริเวณที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโดยเฉพาะเหล็กนั้นจะอยู่ในช่วงประมาณ 730 องศาเซลเซียส, วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่อบความร้อนวัสดุโดยประยุกต์หลักการเหนียวนำสนามแม่เหล็ก

2. การหล่อเย็น (Quenching); ในกระบวนการหล่อเย็นโดยทั่วไป สิ่งที่ต้องตระหนักก็คือ อัตราเย็นตัวของวัสดุบริเวณที่ทำการอบความร้อนที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งต้องมีค่าสูงกว่าอัตราเย็นตัววิกฤต มิฉะนั้น โครงสร้างของวัสดุที่ได้รับความร้อนจนแปร โครงสร้างไปจะแปรสภาพกลับสู่โครงสร้างเดิมหากอัตราเย็นตัวของวัสดุไม่เร็วพอ ของเหลวที่นิยมใช้เป็นตัว

หล่อเย็นสำหรับกรรมวิธีหล่อเย็นโดยทั่วไปได้แก่ น้ำ, น้ำเกลือ, น้ำค้าง, น้ำมัน, เกลือละลาย, และอากาศ

สำหรับการชุบผิวแข็งวัสดุ โดยประยุกต์การเหนียวนาสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ในบางวัตถุประสงค์นั้นต้องการระดับความลึกโครงสร้างแข็งของวัสดุไม่มาก เช่นในกรณีที่ต้องการชุบผิวแข็งในระดับความลึกโครงสร้างแข็งไม่เกิน 1.25 มิลลิเมตร ซึ่งต้องอาศัยการชุบผิววัสดุโดยกระแสเหนียวนาความถี่ย่านวิทยุหรือตั้งแต่ 500 กิโลเฮิรซ์ขึ้นไป และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อประยุกต์ใช้ในระดับกำลังงานที่ค่อนข้างสูงในลำดับกิโลวัตต์ ในบางครั้งนั้นจะพบว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ประยุกต์เป็นอุปกรณ์แอกทีฟในปัจจุบัน ไม่สามารถตอบสนองต่อการใช้งานดังกล่าวได้เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์แอกทีฟที่เป็นสารกึ่งตัวนำเหล่านี้คือประกอบด้วยค่าความจุแฝงระหว่างขั้วที่ค่อนข้างสูงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ โดยเฉพาะในย่านความถี่ใช้งานที่ค่อนข้างสูงจนเป็นผลให้สมรรถนะในการจ่ายกำลังงานของอุปกรณ์แอกทีฟชนิดนี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ระบบที่ประยุกต์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอุปกรณ์แอกทีฟ มักจะประสบปัญหาอย่างหนึ่งคือ ระบบจะประกอบด้วยวงจรสนับสนุนต่างๆ อันอาจส่งผลให้อุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ในระบบมีจำนวนค่อนข้างมากจนในที่สุดเป็นผลให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง ในส่วนของการบำรุงรักษาโดยเฉพาะการตรวจสอบเมื่ออุปกรณ์มีการชำรุดเสียหายก็เป็นที่แน่ชัดว่าระบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์จำนวนมากก็ย่อมจะทำการตรวจสอบได้ยาก

## ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาก็คือการหาแนวทางเพื่อขจัดปัญหาขีดจำกัดทางด้านความถี่ผนวกกับกำลังงานที่จ่ายออกของระบบชุบผิวแข็งวัสดุที่ประยุกต์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอุปกรณ์แอกทีฟ โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอรูปแบบการประยุกต์อุปกรณ์ทดแทน นอกจากนี้ในเรื่องความคงทนที่ระบบจะไม่เกิดปัญหาระหว่างการใช้งาน รูปแบบของระบบที่ประยุกต์นี้ก็สามารรถแก้ปัญหาได้อันเนื่องจากระบบมีส่วนประกอบค่อนข้างน้อย โอกาสของปัญหาอันอาจเกิดจากความผิดปกติของอุปกรณ์ส่วนประกอบจึงน้อยกว่า รูปแบบที่นำเสนอนี้จะทำการศึกษาในแง่ของพฤติกรรมของระบบตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ กับพฤติกรรมระบบเพื่อที่ที่สุดแล้วสามารถหาแนวทางในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมตามข้อจำกัดของอุปกรณ์และขนาดของระบบที่ต้องการสำหรับแต่ละความมุ่งหมายใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาที่ตั้งไว้ก็คือการประยุกต์อุปกรณ์แอททิฟแบบอื่นทดแทนอุปกรณ์แอททิฟจำพวกสารกึ่งตัวนำเพื่อขจัดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดของระบบทางด้านความถี่เมื่อประยุกต์ในระดับกำลังงานที่ค่อนข้างสูง อุปกรณ์แอททิฟที่นำมาประยุกต์ทดแทนก็คือหลอดไตรโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์แอททิฟในตระกูลหลอดสุญญากาศที่สามารถให้การตอบสนองความถี่ได้ถึงย่านความถี่วิทยุตลอดจนสามารถให้การตอบสนองในระดับกำลังงานที่ค่อนข้างสูงในลำดับหลายๆ กิโลวัตต์ เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของตัวหลอดซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุแผ่นระหว่งขั้วที่มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าตัวเก็บประจุแผ่นภายในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ หลอดไตรโอดจะถูกนำมาประยุกต์ในบทบาทของอุปกรณ์แอททิฟในวงจรขยายกำลังชั้นซีเพื่อขยายสัญญาณตลอดจนการป้อนกลับสัญญาณที่ขยายในรูปสัญญาณขับเพื่อให้ระบบสามารถกำเนิดสัญญาณได้ในรูปของออสซิลเลเตอร์ สัญญาณขยายอีกส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายโอนไปใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเพื่อประยุกต์กับการอบความร้อนวัสดุที่ต้องการชุบผิวแข็ง

ระบบชุบผิวแข็งวัสดุที่ประยุกต์วงจรขยายกำลังชั้นซีโดยมีหลอดไตรโอดเป็นอุปกรณ์แอททิฟนั้น อุปกรณ์ประกอบภายในระบบจะมีจำนวนค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระบบที่ประยุกต์อุปกรณ์แอททิฟจำพวกสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงส่งผลให้ระบบชุบผิวแข็งที่ประกอบขึ้นจากอุปกรณ์จำพวกหลอดสุญญากาศมีโอกาสในการเกิดปัญหาน้อยกว่า นอกจากนี้ในแง่ของการบำรุงรักษาโดยเฉพาะการตรวจสอบเมื่ออุปกรณ์ชำรุดเสียหายก็สามารถกระทำได้ค่อนข้างสะดวกกว่า

## ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ประยุกต์กับงานวิจัยชิ้นนี้ก็คือการประยุกต์วงจรเทงก์ออสซิลเลเตอร์ในรูปของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณไซน์เพื่อนำสัญญาณไซน์ที่ได้นี้ถ่ายโอนสู่ขดลวดให้ความร้อนสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กที่จะถูกควบคุมให้ผ่านชิ้นวัสดุที่ต้องการชุบผิวแข็งโดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดกระแสไหลวนภายในชิ้นวัสดุจนในที่สุดเป็นผลให้เกิดความร้อนอันเนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยความต้านทานแฝง สัญญาณไซน์ที่กำเนิดโดยวงจรเทงก์จะถูกถ่ายโอนสู่วัสดุชุบผิวแข็งโดยผ่านหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งเป็นอุปกรณ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำค้ำยันทำหน้าที่แม่พิมพ์อิมพีแคนซ์ที่แตกต่างกันระหว่างขดลวดให้ความร้อนซึ่งเป็นขดลวดอิมพีแคนซ์ต่ำกับอิมพีแคนซ์ของวงจรแท่งกึ่งซึ่งมีค่าอิมพีแคนซ์ที่ค่อนข้างสูงทำให้แอมโคโนสามารถมองอิมพีแคนซ์ที่ค่อนข้างต่ำของขดลวดให้ความร้อนเป็นอิมพีแคนซ์ที่ค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับแอมโคโนสัญญาณไซน์อีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการออสซิลเลตของวงจรแท่งกึ่งจะถูกดึงจากวงจรแท่งกึ่งโดยค้ำปลั่งผ่านขดลวดค้ำปลั่งเพื่อถ่ายโอนสัญญาณส่วนนี้ไปอยู่ในรูปสัญญาณขับในรูปของการป้อนกลับแบบบวกโดยจะทำการกลับเฟสสัญญาณที่ส่วนของขดลวดค้ำปลั่งเสียก่อน 180 องศา นอกจากการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแท่งกึ่งตัวสุดท้ายที่เป็นภาระของวงจรแท่งกึ่งแล้ว ก็ยังมีค่าความสูญเสียที่แฝงอยู่ภายในวงจรแท่งกึ่งซึ่งทั้งสองสิ่งนี้จะป็นปัจจัยที่ทำให้การออสซิลเลตของวงจรแท่งกึ่งถูกหน่วงจนในที่สุดการออสซิลเลตอาจสิ้นสุดลง ดังนั้นวงจรแท่งกึ่งจึงไม่สามารถออสซิลเลตสัญญาณได้โดยปราศจากวงจรจ่ายกำลังงานที่ทำหน้าที่เสริมกำลังงานให้กับวงจรแท่งกึ่ง วงจรที่ทำหน้าที่เสริมกำลังงานให้กับวงจรแท่งกึ่งในการออสซิลเลตสัญญาณที่นำมาประยุกต์นี้อยู่ในรูปของวงจรขยายกำลังชั้นซี โดยมีหลอดไตรโอดเป็นอุปกรณ์แอกทีฟซึ่งจะรับแรงดันไบแอสจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง หลอดไตรโอดในรูปอุปกรณ์แอกทีฟของวงจรขยายกำลังชั้นซีจะขยายสัญญาณเฉพาะในช่วงมุมนำกระแสช่วงหนึ่งซึ่งไม่ถึง 180 องศา ของสัญญาณขับยังผลให้เกิดกระแสแอมโคโนในรูปของพัลส์กระแสซึ่งประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกในลำดับต่างๆ แต่เนื่องจากคุณลักษณะของวงจรแท่งกึ่งที่ออสซิลเลตสัญญาณด้วยความถี่คงค่าระดับหนึ่งซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับความสูญเสียแฝงในวงจรแท่งกึ่งก็คือความถี่ออสซิลเลตที่มีระดับใกล้เคียงความถี่โชนแนนซ์ของวงจรแท่งกึ่ง ดังนั้นกระแสความถี่มูลฐานที่ประกอบอยู่ในลำดับฮาร์โมนิกเท่านั้นที่จะถูกถ่ายโอนสู่วงจรแท่งกึ่งด้วยระดับกำลังงานเพียงพอที่สามารถรองรับภาระในการจ่ายกำลังงานเพื่อการขับตัวแข็งตัวคู่พร้อมกับขดลวดค่าความสูญเสียต่างๆ ส่วนกระแสฮาร์โมนิกในลำดับสูงขึ้นไปที่ไม่สามารถคงสภาพเพื่อรองรับการจ่ายกำลังงานสู่วงจรแท่งกึ่งก็จะผ่านวงจรแท่งกึ่งลงกราวด์ไป ในส่วนของวงจรกริดนั้น ได้ประยุกต์เทคนิคไบแอสแบบ "กริดลิก ไบแอส" ซึ่งเป็นเทคนิคการไบแอสกริดโดยอาศัยกระแสกริดในช่วงสูงสุดของสัญญาณขับที่มีระดับสูงกว่ากราวด์เข้าไปชาร์จตัวเก็บประจุหลังจากนั้นดิสชาร์จกระแสผ่านตัวต้านทาน เกิดเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งจะส่งผลให้เกิดระดับแรงดันลบไบแอสกริดตามรูปแบบของวงจรขยายกำลังชั้นซีคือสัญญาณขับจะส่งผลให้อุปกรณ์แอกทีฟนำกระแสในช่วงไม่ถึง 180 องศาใน 1 โชนเกิด ระดับแรงดันสัญญาณกริดไบแอสที่เกิดขึ้นนี้จะปรับระดับได้ตามปริมาณกระแสกริดซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามระดับแรงดันสัญญาณขับ ดังนั้นเทคนิคการไบแอสแบบนี้จึงเป็นเทคนิคที่สามารถควบคุมระดับแรงดันกริดไบแอสได้ในตัวซึ่งจะเป็นข้อได้เปรียบในแง่ของการป้องกันมิให้อุปกรณ์แอกทีฟตกอยู่ภายใต้สภาวะที่ถูกขับด้วยปริมาณกระแสที่สูงเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยชิ้นนี้ก็คือการพิจารณาหาแนวทางในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ซึ่งได้ทำการทดสอบในรูปของเครื่องชุปผิวแข็งวัสดุทำงานในย่านความถี่วิทยุ โดยกำหนดให้ทำงานในช่วงความถี่ระหว่าง 500 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ทำการชุปผิวแข็งวัสดุซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นที่การประยุกต์ใช้เหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอน (Carbon Steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 ถึง 2.0 เซนติเมตร ชุปผิวแข็งในระดับความลึกของโครงสร้างแข็งไม่เกิน 1.25 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้อุปกรณ์สามารถจ่ายกำลังงานสู่วัสดุชุปผิวแข็งได้ประมาณ 1 กิโลวัตต์

## วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล; งานวิจัยชิ้นนี้เก็บรวบรวมข้อมูลจากอุปกรณ์ชุดทดสอบที่ได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ในส่วนสำคัญ จากนั้นทำการทดสอบโดยวัดสัญญาณแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ โดยอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันสูง (High Voltage & High Frequency Probe) ของวงจรทั้งในสภาวะรับโหลดและในสภาวะปราศจากโหลด ในส่วนของกระแสระดับความถี่สูงนั้นจะทำการตรวจวัดโดยวิเคราะห์จากกราฟกระแสคงที่ของหลอดไดร ไอคเนื่องจากระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบมีค่าค่อนข้างสูง การตรวจวัดโดยอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสโดยตรงจะค่อนข้างทำได้ลำบากและเสี่ยงต่อความเสียหาย สำหรับกำลังงานที่อุปกรณ์ถ่ายโอนสู่โหลดนั้นได้ทำการตรวจวัดโดยคำนวณจากกำลังงานที่นำได้รับจากการไหลเวียนนำผ่านท่อโลหะกลวงในสภาพของโหลดสมมติ โดยเก็บข้อมูลในรูปของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

2. การวิเคราะห์ข้อมูล; ระดับแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดทั้งในสภาวะที่อุปกรณ์อยู่ในสภาวะรับโหลดและในสภาวะปราศจากโหลดด้วยวิธีการดังที่อธิบายในหัวข้อแรกส่วนหนึ่งจะเป็นข้อมูลดิบที่จะนำมาประยุกต์กับกราฟกระแสคงที่ของหลอดไดร ไอคซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณกระแสทั้งในส่วนของวงจรแอนโอดและวงจรกริด และจากระดับแรงดันสัญญาณทั้งในส่วนของแอนโอดและกริดผนวกกับข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณกระแสในที่สุดจะสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับกำลังงานสัมพัทธ์ของอุปกรณ์ได้

## บทที่ 2

### หลอดไตรโอด

หลอดไตรโอด (Triode Tubes) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่รวมอยู่ในอุปกรณ์ตระกูลหลอดสูญญากาศที่มีส่วนประกอบ 3 ส่วนที่สำคัญคือ แอโนดซึ่งเชื่อมต่อกับโพลทําหน้าที่ถ่ายโอนกำลังงานสู่โหลด โดยรับแรงดันไบแอสจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, กริดหรือกริดควบคุมทําหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสของหลอดไตรโอดและแคโทดทําหน้าที่ให้กำเนิดกระแสอิเล็กตรอน โดยอาศัยกำลังงานความร้อนที่ให้กับแคโทด หลอดไตรโอดเป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสูญญากาศจากแคโทด ไปสู่แอโนดทำให้เกิดกระแสสูญญากาศซึ่งสามารถควบคุมปริมาณได้จากระดับแรงดันที่จ่ายสู่กริดในรูปของสัญญาณขับ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่นเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรขยายกำลัง, เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรออสซิลเลเตอร์, ฯลฯ รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างทางกายภาพ, คุณสมบัติทางไฟฟ้า, รูปแบบการทำงาน, สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้คือ<sup>[6]</sup>

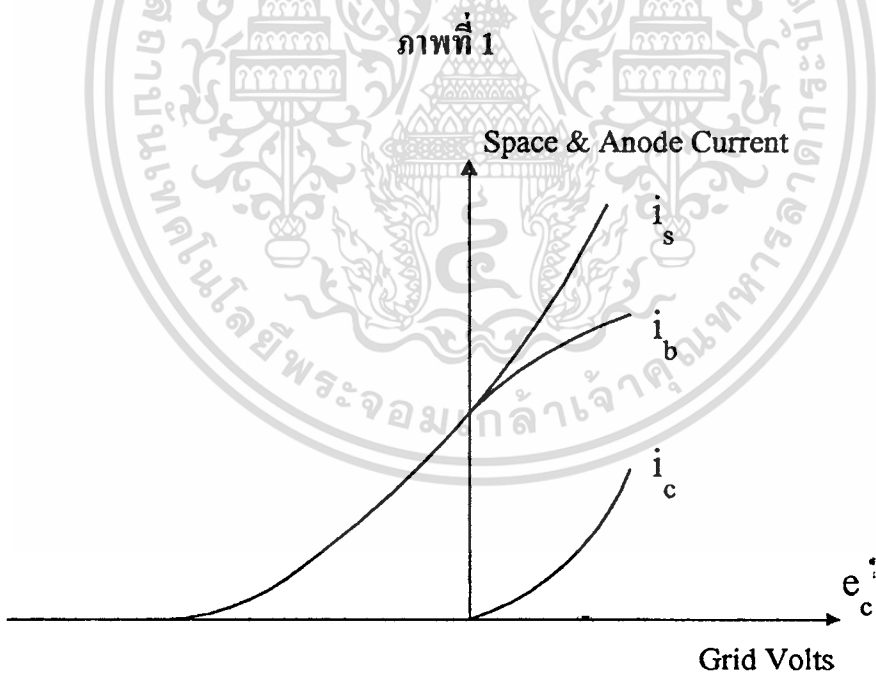
#### กริดควบคุม

กริดควบคุม (Control Grid) หรือกริด โครงสร้างทางกายภาพของกริดก็คือตาข่ายดัวหน้าที่ติดตั้งใกล้กับแคโทดและล้อมรอบแคโทด ระดับแรงดันที่ประยุกต์กับกริดส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นลบค่อนข้างมาก, เมื่อพิจารณาโดยอ้างอิงระดับแรงดันกับแคโทด, ในขณะที่ระดับแรงดันที่ประยุกต์กับแอโนดเป็นระดับแรงดันบวกที่มีค่าสูงมากในระดับหลายร้อยโวลต์จนถึงระดับพันโวลต์ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรง

ดันกริดจะก่อให้เกิดกลุ่มประจุในสูญญากาศในขณะที่สนามไฟฟ้าที่แอโนดจะต้านการเกิดกลุ่มประจุนี้ แต่เนื่องจากโครงสร้างของกริดที่อยู่ใกล้กับแคโทดมากกว่าแอโนด ดังนั้นระดับแรงดันที่กริดจึงมีอิทธิพลต่อกลุ่มประจุในสูญญากาศมากกว่าระดับแรงดันที่แอโนด เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดันเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงดันที่กริดและระดับแรงดันที่แอโนดที่มีผลต่อปริมาณกระแสแอโนดสามารถอธิบายในรูปสมการได้ดังนี้

$$i_b = k \left( e_c + \frac{e_b}{\mu} \right)^{3/2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $e_b$  คือระดับแรงดันที่แอโนดโดยเทียบกับคาโทด,  $e_c$  คือระดับแรงดันที่กริดโดยเทียบกับคาโทด และแฟกเตอร์  $\mu$  คือ แฟกเตอร์อัตราขยายแรงดันของหลอดไตรโอด ซึ่งเป็นตัวเลขที่แทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกริดโดยเทียบกับแรงดันแอโนดที่ส่งผลต่อการทำงานของหลอดไตรโอด



แสดงกระแสสูญญากาศ,  $i_s$ , กระแสแอโนด,  $i_b$ , กระแสกริด,  $i_c$ , ในรูปฟังก์ชันของแรงดันกริด โดยพิจารณาที่ระดับแรงดันแอโนดคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อประจุที่ระดับแรงดันลบโดยอ้างอิงกับแคโทดให้กับกริด แรงดันลบที่กริดจะผลักดันอิเล็กตรอนที่เกิดจากแคโทดนอกจากนี้ยังหักล้างสนามไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดจากแรงดันแอโนด ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณกระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากแคโทดไปสู่แอโนดลดลงบางส่วน แต่ถ้าหากประจุที่ระดับแรงดันบวกโดยอ้างอิงกับแคโทดให้กับกริด ปริมาณกระแสอิเล็กตรอนจะยังเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของแรงดึงจากแรงดันไฟฟ้าร่วมกันระหว่างแอโนดกับกริด แรงดันบวกที่ปรากฏกับกริดจะทำให้กริดดึงอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ในสูญญากาศเป็นผลให้เกิดกระแสกริดในวงจรกริด ดังนั้นในการใช้งานที่มีการประจุที่ระดับแรงดันบวกกับกริดจึงมีสิ่งที่จะต้องควบคุมคือกำลังงานสูญเสียที่กริดซึ่งถ้าหากปล่อยให้ปริมาณมากเกินไปก็อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายกับกริดได้ ดังนั้นโดยทั่วไปในการใช้งานแรงดันที่ประจุที่กับกริดจะถูกควบคุมให้มีขอบเขตส่วนใหญ่อยู่ในย่านที่มีระดับแรงดันเป็นลบ

การเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสกริดและกระแสแอโนดตามระดับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันกริดแสดงให้เห็นดังภาพที่ 1 โดยกำหนดให้ระดับแรงดันแอโนดมีค่าคงที่ เมื่อระดับแรงดันกริดมีค่าเป็นลบถึงระดับหนึ่งปริมาณกระแสแอโนดจะเป็นศูนย์ซึ่งจุดนี้ก็คือจุดคัทออฟของกระแสแอโนดและเมื่อระดับแรงดันกริดมีค่าเป็นลบน้อยลงจนต่ำกว่าระดับคัทออฟ ปริมาณกระแสแอโนดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.1) เมื่อระดับแรงดันกริดมีค่าเป็นบวก กระแสกริดจะเกิดขึ้นและเพิ่มปริมาณตามระดับแรงดันดังแสดงในภาพที่ 1

เมื่อระดับแรงดันกริดมีค่าเป็นบวกพร้อมกับการปรากฏของกระแสกริด สมการ (2.1) จะไม่สามารถแทนการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอโนดได้อีกต่อไป แต่จะเป็นรูปสมการที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสแคโทด ในช่วงที่ระดับแรงดันกริดมีค่าเป็นบวก กระแสกริดจะปรากฏขึ้นพร้อมกับเพิ่มปริมาณตามระดับแรงดันกริดในขณะที่กระแสแอโนดจะลดอัตราการเพิ่มลง

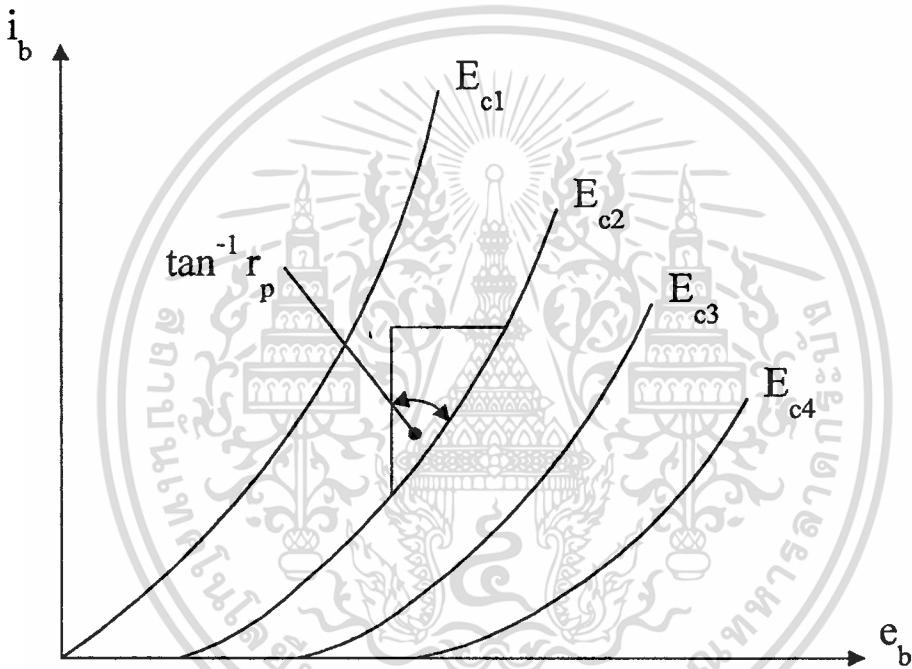
## พารามิเตอร์ของหลอดไตรโอด

เมื่อพิจารณารูปสมการ 2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสแอโนดตามระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันกริดและแรงดันแอโนดสามารถอธิบายในรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$i_b = f(e_b, e_c) \quad (2.2)$$

นอกจากนี้ปริมาณกระแสแอนโตนจะขึ้นกับอุณหภูมิของแคโทด แต่ในการพิจารณานี้ได้นำแฟกเตอร์ตัวนี้มาร่วมในรูปความสัมพันธ์ เมื่อนำสมการ (2.2) มาพล็อตในระนาบสามมิติจะได้สเปซไดอะแกรมที่อธิบายความสัมพันธ์  $f(i_b, e_b, e_c) = 0$  และเมื่อแยกแต่ละระนาบความสัมพันธ์จากสเปซไดอะแกรมจะได้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในแต่ละระนาบดังภาพที่ 2 ถึงภาพที่ 4 ดังนี้

ภาพที่ 2



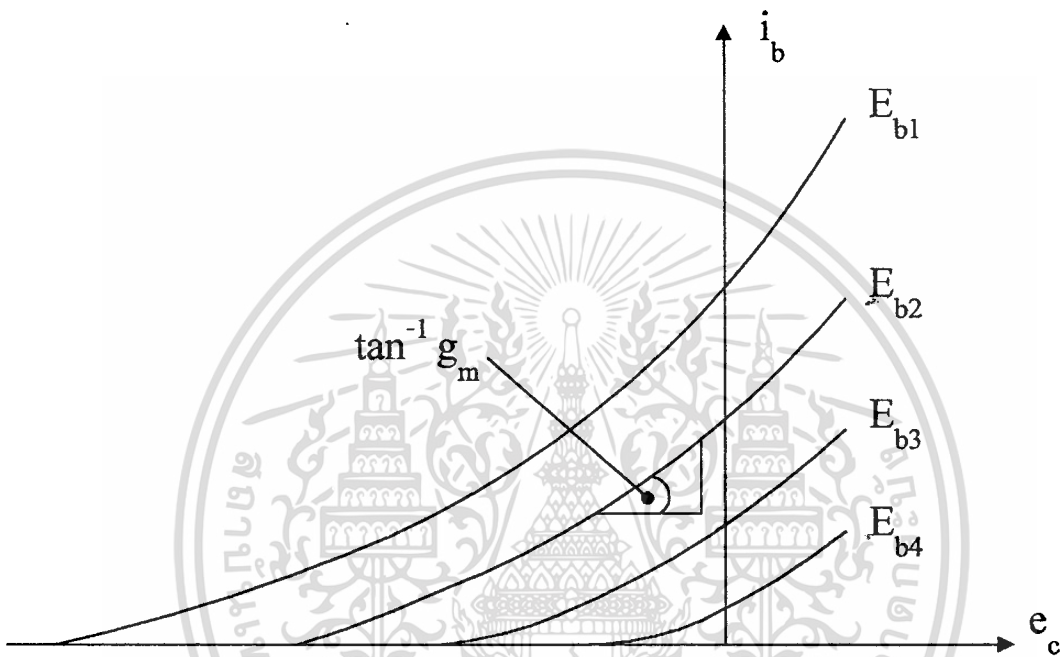
แสดงกราฟคุณลักษณะของแอนโตน

กราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 2 ก็คือ ไดอะแกรมแสดงคุณลักษณะของแอนโตนเนื่องจาก ไดอะแกรมแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอนโตนตามระดับแรงดันแอนโตนในแต่ละระดับแรงดันกริดไบแอส,  $E_{c1}$  เป็นระดับแรงดันกริดที่มีค่าสูงที่สุดเรียงลำดับไปจนถึง  $E_{c4}$  ซึ่งเป็นระดับแรงดันกริดที่มีค่าต่ำที่สุด

เมื่อกำหนดให้แรงดันกริดเป็นตัวแปรอิสระ เพราะฉะนั้นจะได้คุณลักษณะการถ่ายโอนดังภาพที่

3. เมื่อ  $E_{b1}$  เป็นระดับแรงดันแวนโตนที่มีค่ามากที่สุดเรียงลำดับไปจนถึง  $E_{b4}$  ซึ่งเป็นระดับแรงดันแวนโตนที่มีค่าต่ำที่สุด

ภาพที่ 3



แสดงคุณลักษณะการถ่ายโอนของหลอดไตรโอด

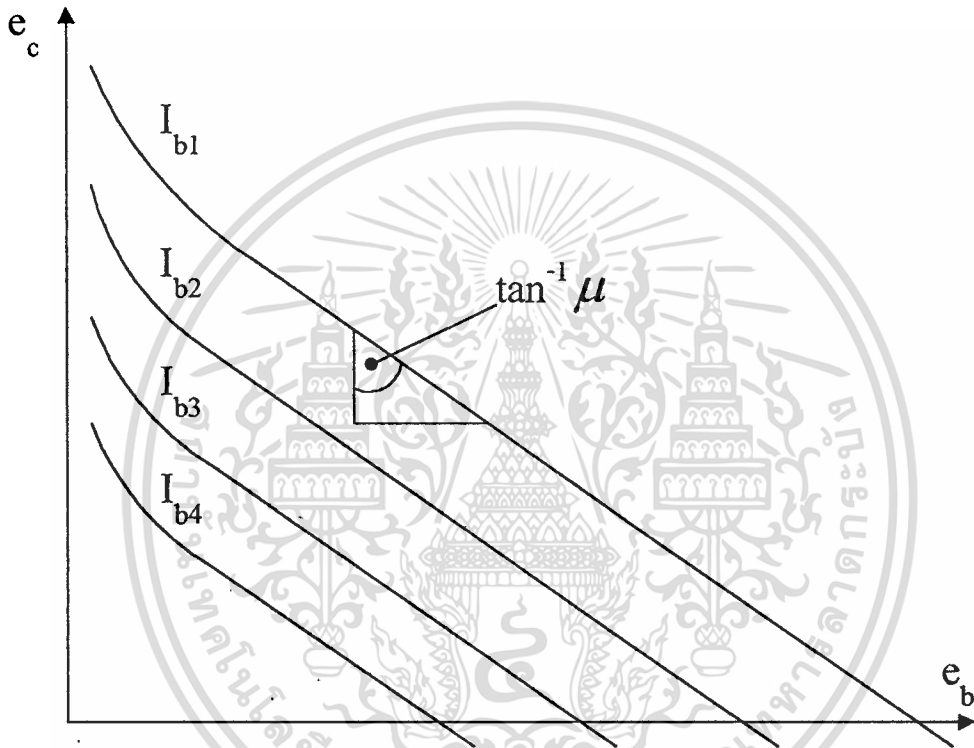
การอธิบายผลการเปลี่ยนแปลงในเวลาเดียวกันของระดับแรงดันกริดและระดับแรงดันแวนโตนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสแวนโตนในรูปแบบกราฟที่แสดงให้ห็นดังภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ที่แสดงนี้สามารถแทนด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่าแฟกเตอร์อัตราขยาย (Amplification Factor,  $\mu$ ) ซึ่งก็คือปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแวนโตนเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันกริดเมื่อพิจารณาขณะกระแสแวนโตนคงที่ อัตราขยายดังกล่าวนี้สามารถอธิบายในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mu = -\left(\frac{\partial e_b}{\partial e_c}\right)_{I_b} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายลบที่แสดงหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันกริดกับแรงดันแอโนดจะมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ในการใช้งานที่สภาวะปกติการลดลงของระดับแรงดันกริดจะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันแอโนด เมื่อกำหนดให้ปริมาณกระแสแอโนดคงที่

ภาพที่ 4



แสดงคุณลักษณะกระแสที่ของหลอดไตรโอด

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอโนดจากสมการ (2.2) ทำการแจกแจงรูปสมการจะได้รูปสมการการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอโนด,  $\Delta i_b$ , ดังสมการ (2.4)

$$\Delta i_b = \left( \frac{\partial i_b}{\partial e_b} \right)_{E_c} \Delta e_b + \left( \frac{\partial i_b}{\partial e_c} \right)_{E_b} \Delta e_c \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.4) ที่แสดงนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าทั้งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแอโนด,  $\Delta e_b$ , และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันกริด,  $\Delta e_c$ , ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสแอโนด

ปริมาณ  $(\partial e_b / \partial i_b)_{E_c}$  แสดงถึงอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของแรงดันแอโนดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอโนดโดยกำหนดให้ระดับแรงดันกริด,  $E_c$ , คงที่ ความสัมพันธ์ที่ได้นี้ก็คือค่าความต้านทานของแอโนด (Anode Resistance,  $r_p$ ) หรืออีกนัยหนึ่ง ความสัมพันธ์นี้ก็คือส่วนกลับของกราฟคุณลักษณะในภาพที่ 2

ปริมาณ  $(\partial i_b / \partial e_c)_{E_b}$  แสดงถึงอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของกระแสแอโนดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันกริดโดยกำหนดให้แรงดันแอโนด,  $E_b$ , คงที่ ความสัมพันธ์ที่ได้นี้ก็คือความนำถ่ายไอออนของกริด (Grid Transconductance,  $g_m$ ) ค่าความนำถ่ายไอออนนี้สามารถอธิบายในรูปความชันของกราฟได้ดังกราฟคุณลักษณะในภาพที่ 3

รูปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ของไตรโอดสามารถแสดงได้ดังนี้<sup>[17]</sup>

$$\left(\frac{\partial e_b}{\partial i_b}\right)_{E_c} \equiv r_p \quad \text{ความต้านทานแอโนด} \quad (2.5a)$$

$$\left(\frac{\partial i_b}{\partial e_c}\right)_{E_b} \equiv g_m \quad \text{ความนำถ่ายไอออน} \quad (2.5b)$$

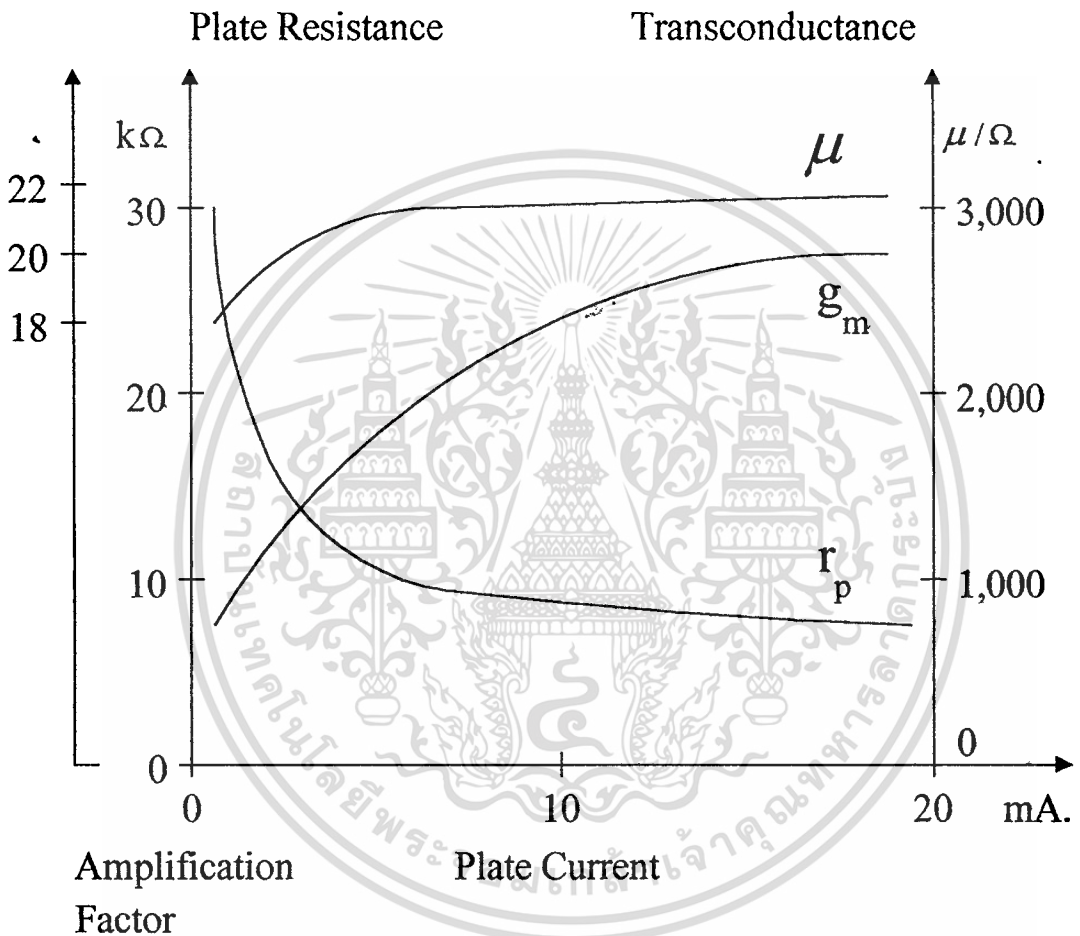
$$\left(\frac{\partial e_b}{\partial e_c}\right)_{I_b} \equiv \mu \quad \text{แฟกเตอร์อัตราขยายแรงดัน} \quad (2.5c)$$

จากความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการ (2.5) เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า  $\mu$  มีความสัมพันธ์กับ  $g_m$  และ  $r_p$  ดังสามารถอธิบายในรูปสมการได้ดังนี้

$$\mu = g_m r_p \quad (2.6)$$

ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการแทนค่า  $\Delta i_p = 0$  ในสมการ (2.4) จากนั้นนำผลที่ได้มาพิจารณาประกอบกับสมการ (2.5)

ภาพที่ 5



แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของหลอดไตรโอดในรูปฟังก์ชันของกระแสแอโนด

การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของหลอดไตรโอด 6C5 เมื่อกำหนดให้ระดับแรงดันแอโนดคงที่แสดงให้เห็นดังภาพที่ 5 จากภาพจะเห็นว่าความต้านทานแอโนดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง โดยจะมีค่าสูงในช่วงที่ปริมาณกระแสแอโนดมีค่าต่ำ เมื่อปริมาณกระแสแอโนดเพิ่มขึ้นค่า

ความต้านทานแอมป์จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อปริมาณกระแสแอมป์มีค่าสูง ในทางกลับกันค่าความนำถ่ายโอนจะเปลี่ยนแปลงจากน้อยเมื่อปริมาณกระแสแอมป์มีค่าต่ำจากนั้นจะเปลี่ยนแปลงในทิศทางเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อปริมาณกระแสแอมป์มีค่าสูงขึ้น ส่วนอัตราขยายแรงดันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการใช้งานแม้ในขณะที่ปริมาณกระแสแอมป์มีค่าต่ำ อัตราขยายแรงดันจะลดลงเล็กน้อย

### วงจรมุมลู่ของหลอดไตรโอด

จากสมการ 2.2 ที่ได้พิจารณาในตอนต้นดังนี้

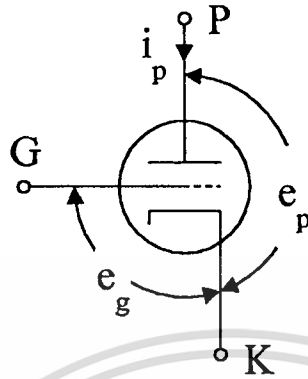
$$i_b = f(e_b, e_c)$$

เมื่อพิจารณาภาพที่ 6 , วงจรมุมลู่ของหลอดไตรโอดที่กำหนดขึ้นนี้ก็คือวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่ให้ผลการทำงานเสมือนหลอดไตรโอดเมื่อนำมาต่อเชื่อมระหว่างขั้ว G, P และ K แทนหลอดไตรโอดดังกล่าว

วงจรมุมลู่ของหลอดไตรโอดจะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวงจรโดยพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงจากจุดหยุดนิ่งหรือจากจุดไบแอส ดังนั้นจึงไม่นำส่วนที่เป็นกระแสตรงมาพิจารณาร่วมในวงจรมุมลู่แต่จะพิจารณาเฉพาะส่วนของสัญญาณเท่านั้น จากภาพที่ 7 เมื่อกำหนดให้  $\Delta e_c$  คือผลต่างของการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่กริดโดยอ้างอิงกับแคโทดซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแอมป์,  $\Delta e_b$ , และกระแสแอมป์,  $\Delta i_b$ , การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ตามรูปแบบสมการ (2.4) ดังนี้คือ

$$\Delta i_b = \left( \frac{\partial i_b}{\partial e_b} \right)_{E_c} \Delta e_b + \left( \frac{\partial i_b}{\partial e_c} \right)_{E_b} \Delta e_c$$

ภาพที่ 6



แสดงสัญลักษณ์ของหลอดไตรโอดรวมทั้งสัญลักษณ์แทนปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลง

กำหนดให้แรงดันเปลี่ยนแปลงที่พิจารณาแทนด้วย

$$\Delta i_b \equiv i_p, \Delta e_b \equiv e_p, \Delta e_c \equiv e_g \quad (2.7)$$

แทนสมการ (2.7) ในสมการ (2.4) เพราะฉะนั้นจะได้

$$i_p = g_m e_g + \frac{e_p}{r_p} \quad (2.8)$$

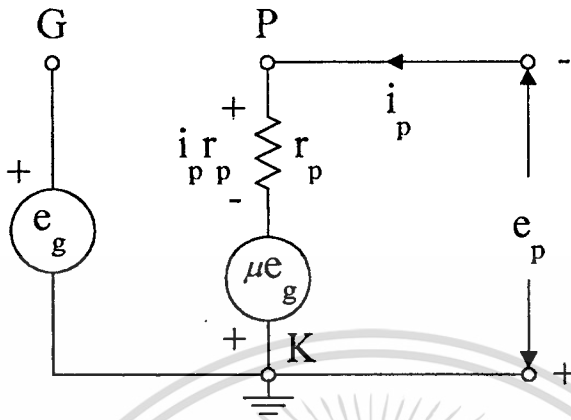
เมื่อ  $r_p$  และ  $g_m$  สามารถอธิบายได้ดังรูปสมการ (2.5), ทำการจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$i_p r_p - \mu e_g = e_p \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\mu = g_m r_p$  ดังสมการ (2.6)

สมการ (2.9) จะให้เห็นถึงบทบาทสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ ของหลอดไตรโอดและปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกริดกับแคโทดและระหว่างแอโนดกับแคโทด สมการ (2.6)

ภาพที่ 7



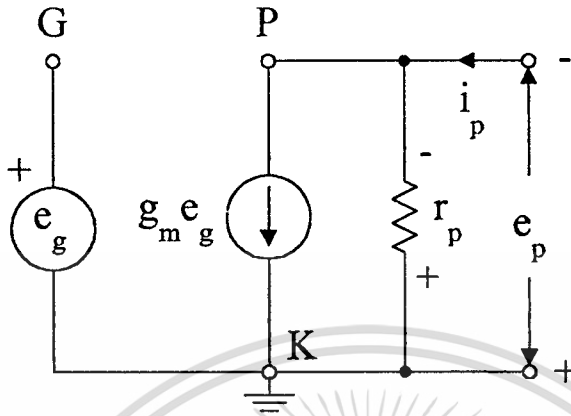
แสดงวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอดในภาพที่ 6 ในโหมดของแรงดันรวมทั้งปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงจากจุดไบแอสหรือจุดหยุดนิ่ง

สามารถอธิบายในรูปวงจร ได้ดังภาพที่ 7 ซึ่งก็คือวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอด<sup>[3]</sup>

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ระหว่างกริดกับคาโทดของหลอดไตรโอดมีค่าค่อนข้างสูงและการใช้งานส่วนใหญ่จะประยุกต์ระดับแรงดันลบกับกริดซึ่งไม่ก่อให้เกิดกระแสกริด ดังนั้นวงจรสมมูลย์ในส่วนของกริดจึงสามารถอธิบายได้ดังภาพคือ โครงสร้างของกริดจะปราศจากการเชื่อมต่อกับส่วนอื่นของหลอดไตรโอดเมื่อใช้งานในระดับความถี่ที่ไม่สูงมากนัก เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงดันแอโนดที่มีการเปลี่ยนแปลง,  $e_p$ , ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อระดับแรงดันที่ขั้วบนจากภาพสูงกว่าระดับแรงดันที่จุดหยุดนิ่งหรือจุดไบแอส,  $i_p$  ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อไหลสู่ขั้ว P ดังนั้นจากภาพที่ 7 เมื่อ  $i_p$  ไหลจากขั้ว P สู่ขั้ว K สิ่งที่จะเกิดขึ้นก็คือระดับแรงดันตกคร่อม  $i_p r_p$ , ระดับแรงดัน  $\mu e_g$ , ก็คือแรงดันที่หลอดไตรโอดให้กำเนิดโดยจะสอดคล้องกับ  $e_p$  ในทิศทางกันข้าม ดังนั้นเมื่อกริดถูกขับโดยระดับแรงดัน  $e_g$  ในทิศทางบวก ระดับแรงดันแอโนดจะลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันแอโนด,  $e_p$ , เป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับ  $e_g$ , ระดับแรงดันต่างๆ ที่กล่าวมานี้พิจารณาโดยกำหนดให้ขั้ว K เป็นขั้วแรงดันอ้างอิง

ภาพที่ 8 แสดงวงจรสมมูลย์ของหลอดไตรโอดในภาพที่ 6 โดยแทนแหล่งกำเนิดแรงดันระ

ภาพที่ 8



แสดงวงจรสมมูลของหลอดไตรโอดในภาพที่ 6 ในโหมคของกระแสรวมทั้งปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงจากจุดไบแอสหรือจุดหยุดนิ่ง

หว่างขั้ว P-K ด้วยแหล่งกำเนิดกระแส ปริมาณกระแสที่ให้แก่เกิดสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์

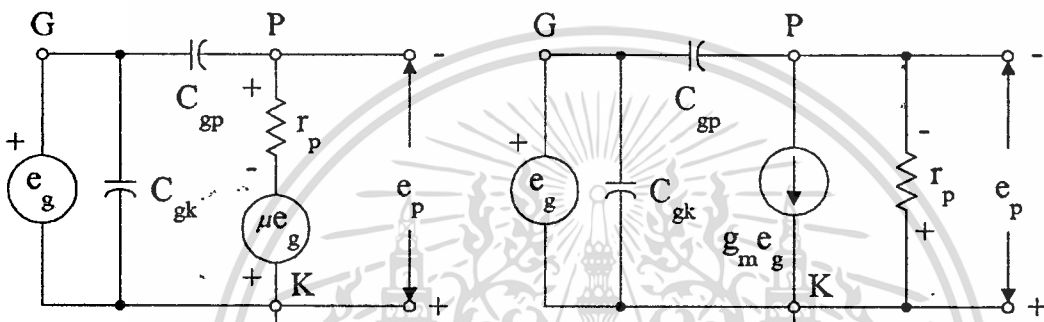
$$\left(\frac{\mu}{r_p}\right)e_g = g_m e_g$$

เมื่อพิจารณาการใช้งานหลอดไตรโอดที่ความถี่สูงโดยเฉพาะในระดับที่สูงกว่า 30 เม็กกะเฮิรตซ์ รูปแบบวงจรสมมูลจะแสดงให้เห็นตัวเก็บประจุเสมือนที่แฝงอยู่ระหว่างขั้วหลอดอันเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของขั้วหลอดซึ่งก็คือตัวนำชนิดหนึ่งที่ถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวน สำหรับกรณีของหลอดไตรโอดฉนวนดังกล่าวก็คือสุญญากาศ ตัวเก็บประจุเสมือนที่แฝงอยู่ในหลอดไตรโอดมีดังต่อไปนี้คือ  $C_{gp}$  แฝงอยู่ระหว่างกริดกับแอโนด,  $C_{gk}$  แฝงอยู่ระหว่างกริดกับแคโทด และ  $C_{pk}$  แฝงอยู่ระหว่างแอโนดกับแคโทด โดยปกติ  $C_{pk}$  จะมีค่าน้อยมากเนื่องจากผลของการชิลด์สายตัวนำกริด ดังนั้นในบางครั้งจึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา โดยทั่วไปหน่วยของ  $C_{gp}$  และ  $C_{gk}$  จะอยู่ในช่วงพิโกฟารัด ซึ่งก็ยิ่งถือว่ามีค่าต่ำมาก

รูปแบบสมมูลของวงจรสมมูลหลอดไตรโอดแสดงให้เห็นดังภาพที่ 9 ตัวเก็บประจุ  $C_{gp}$  ที่

อยู่ระหว่างขั้ว G-P อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการออสซิลเลตแ่งและการลดทอนอัตราขยายเมื่อใช้งานใน วงจรขยายอันเนื่องจากการป้อนกลับของสัญญาณแอนโอดสู่กริดผ่าน  $C_{gp}$  ดังนั้นเมื่อพิจารณาการทำงานของ หลอดไตรโอดประกอบกับพารามิเตอร์แ่งเหล่านี้จะพบว่าปริมาณกระแสกริดจะไม่เป็นศูนย์อีกต่อไป แต่จะมีค่าเท่ากับปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน  $C_{gp}$

ภาพที่ 9



แสดงวงจรสมมูลย์ของหลอด ไตร โอดที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุแ่งระหว่างขั้ว

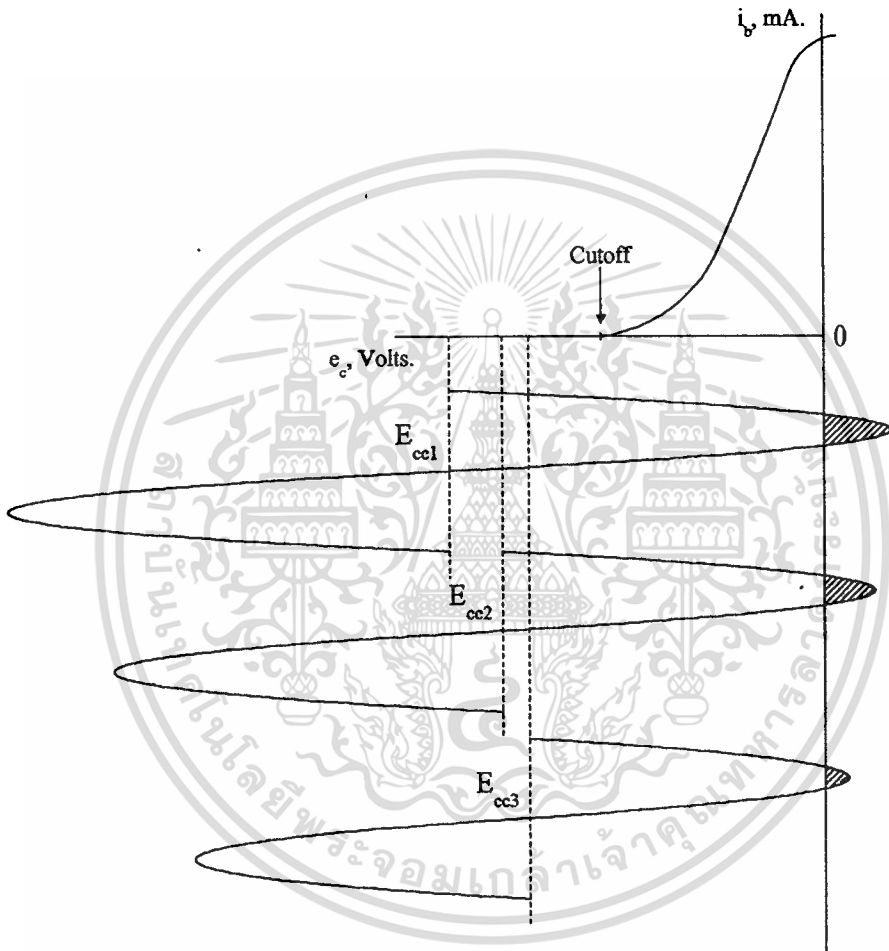
**เทคนิคกริดลึกลับไบแอส**

เทคนิคการไบแอสแบบกริดลึกลับไบแอส (Grid-leak Bias) หรือการไบแอสโดยกระแสกริดรั่วไหลเป็นเทคนิคการไบแอสที่นำมาประยุกต์กับหลอดไตรโอดโดยเฉพาะในวงจรขยายกำลังชั้นซี แรงดันกริดไบแอสที่ประยุกต์กับหลอดไตรโอดก็คือแรงดันที่ได้จากการไหลของกระแสกริดที่เกิดจากสัญญาณขับเคลื่อนภาพที่ 10

จากภาพ วงจรขยายกำลังจะจ่ายกำลังงานในช่วงซีกบวกของสัญญาณขับ โดยระดับแรงดันบวกที่ปรากฏกับกริดจะส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนจากกริดไปสู่แคโทดโดยผ่านตัวต้านทานกริดและกลับไปสู่กริด กระแสกริดที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากระดับแรงดันบวกของสัญญาณขับที่

ปรากฏกับกริดในช่วงนำกระแสไม่ถึง 180 องศา โดยองค์ประกอบในส่วนกระแสตรงที่ไม่สามารถผ่านตัวเก็บประจุจะผ่านตัวต้านทานจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวต้านทานในลักษณะที่กริดจะมีระดับแรงดันเป็นลบเมื่อเทียบกับแคโทด

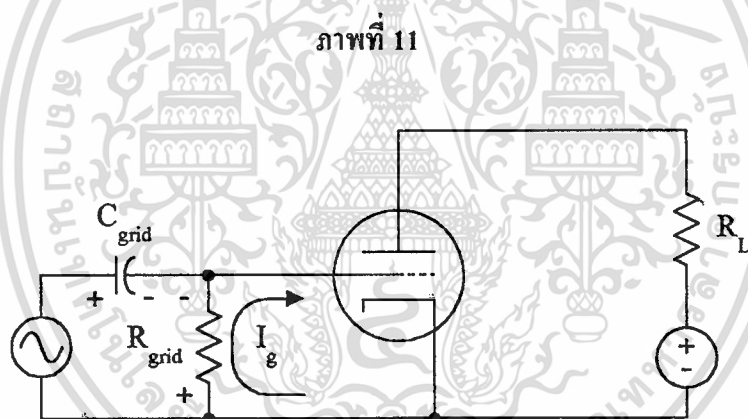
ภาพที่ 10



แสดงรูปแบบสัญญาณขับและแรงดันกริดไบแอสที่เกิดขึ้นสำหรับเทคนิคการไบแอสแบบกริดลิกไบแอส

กระแสกริดที่ไหลผ่านตัวต้านทานกริดจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวต้านทานกริด,  $E_{cc}$ , โดยระดับแรงดันที่กริดจะเป็นลบเมื่อเทียบกับแคโทดดังภาพที่ 10 และภาพที่ 11 แรงดัน

ที่เกิดขึ้นนี้จะซาร์จตัวเก็บประจุคัปปลิงจนกระทั่งระดับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่าระดับคัทออฟของหลอดไครโอดส่งผลให้หลอดไครโอดอยู่ในสภาวะคัทออฟ ค่าคงที่ทางเวลาของตัวเก็บประจุคัปปลิงและตัวต้านทานกริดจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการดีสซาร์จของตัวเก็บประจุ การดีสซาร์จจะส่งผลให้ระดับแรงดันกริดไบแอสที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวต้านทานกริดลดระดับลงเรื่อยๆ หลอดไครโอดก็จะอยู่ในสภาวะคัทออฟจนกระทั่งหนึ่งในสองประการนี้เกิดขึ้นคือ ตัวเก็บประจุคัปปลิงดีสซาร์จจนกระทั่งระดับแรงดันกริดไบแอสลดลงต่ำกว่าระดับคัทออฟ ในที่สุดเกิดกระแสกริด ประการที่สอง ระดับแรงดันช่วงสูงสุดของสัญญาณขับในไซเคิลต่อไปสามารถเอาชนะแรงดันกริดไบแอสที่กำลังลดระดับลงได้ ค่าคงที่ทางเวลาที่กำหนดขึ้นจะมีค่ามากกว่าหนึ่งช่วงคาบความถี่ของวงจร ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะเห็นว่าสัญญาณขับจะเป็นตัวควบคุมระดับแรงดันกริดไบแอส ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุคัปปลิงจะถูกกำหนดให้มีค่าที่ค่อนข้างต่ำส่งผลให้สัญญาณขับคัปปลิงไปสู่กริดได้ง่าย

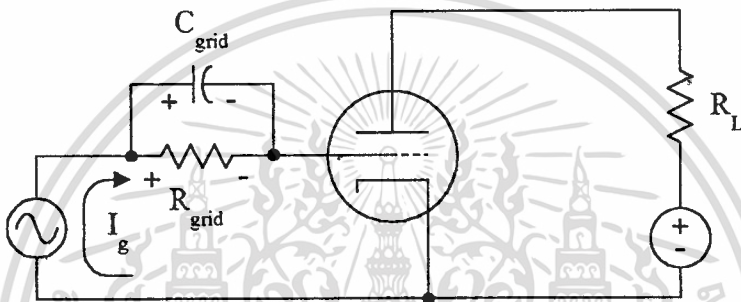


แสดงวงจรขยายกำลัง โดยหลอดไครโอดที่ประยุกต์เทคนิคกริดไบแอสแบบกริดลิกไบแอส

ลักษณะการไบแอสในทำนองเดียวกันแสดงให้เห็นดังภาพที่ 12 ซึ่งเป็นลักษณะการไบแอสที่มีเทคนิคพื้นฐานคล้ายคลึงกัน ตัวต้านทานกริดที่ปรากฏในวงจรจะสะท้อนค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงไปสู่แหล่งกำเนิดสัญญาณขับ ดังนั้นสัญญาณขับจึงถูกจ่ายสู่กริดผ่านทางตัวเก็บประจุ ในช่วงสูงสุดของซีกบวกสัญญาณขับระดับแรงดันที่กริดจะมีค่าเป็นบวกซึ่งก่อให้เกิดกระแสกริด โดยองค์ประกอบในส่วนที่เป็นกระแสตรงนั้นไม่สามารถผ่านตัวเก็บประจุได้ ดังนั้นจึงผ่านตัวต้านทาน เกิดเป็นระดับแรงดันตก

คร่อมซึ่งจะชาร์จตัวเก็บประจุจนระดับแรงดันตกคร่อมมีค่าสูงพอที่จะทำให้หลอดไดโอดอยู่ในสภาวะคัทออฟ หลังจากนั้นตัวเก็บประจุจะเริ่มคายประจุผ่านตัวต้านทาน ก่อนที่ประจุจะถูกคายทิ้งทั้งหมด สัญญาณขับไซเคิลต่อไปจะผ่านเข้ามาทางตัวเก็บประจุ ระดับแรงดันสัญญาณขับมีค่าสูงพอที่จะสามารถเอาชนะประจุลบที่หลงเหลืออยู่ได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดกระแสกริดขึ้นอีกครั้ง เป็นการรักษาระดับแรงดันกริดไบแอสสำหรับไซเคิลต่อไป

ภาพที่ 12



แสดงอีกรูปแบบหนึ่งของวงจรในภาพที่ 11 สำหรับการประยุกต์เทคนิคกริดไบแอสแบบ กริด ลิกไบแอส

เทคนิคการไบแอสแบบนี้มีข้อได้เปรียบคือ ระดับแรงดันกริดไบแอสจะสามารถปรับเปลี่ยนระดับได้โดยอัตโนมัติตามระดับแรงดันสัญญาณขับที่กริด เพราะฉะนั้นจึงอาจเรียกเทคนิคการไบแอสแบบนี้ได้ว่าเทคนิคการไบแอสแบบปรับระดับแรงดันไบแอสในตัว (Self-adjusting Bias) การลดลงของระดับแรงดันสัญญาณขับจะส่งผลให้ปริมาณกระแสกริดลดลงจนในที่สุดระดับแรงดันกริดไบแอสจะลดลงตามการลดลงของปริมาณกระแสกริด ในทางตรงกันข้ามหากระดับแรงดันสัญญาณขับเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสกริดก็จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดเป็นผลให้ระดับแรงดันไบแอสที่กริดเป็นลบมากยิ่งขึ้นจากผลการเพิ่มของปริมาณกระแสกริดซึ่งจะเป็นการป้องกันปริมาณกระแสแอโนดมีค่าสูงเกินไป

ข้อเสียและข้อควรระวังสำหรับเทคนิคการไบแอสแบบนี้มีดังนี้คือ ในทุกๆ ไซเคิลของสัญญาณขับจะต้องมีกระแสกริดเกิดขึ้น ถ้าหากกระแสไม่เกิดขึ้น ระดับแรงดันกริดไบแอสก็จะค้างอยู่ไม่ได้ ส่งผลให้ระบบหยุดทำงานในที่สุด และอีกประการหนึ่งคือ ในการประยุกต์เทคนิคนี้กับวงจรขยายกำลัง

งานสูง ถ้าหากไซเคิลโคสัญญาณซับซ้อนไป เมื่อสัญญาณซับซ้อนปริมาณกระแสกริดก็จะไม่เกิดขึ้นในที่สุดเป็นผลให้ระดับแรงดันกริดไบแอสหายไป เมื่อปราศจากระดับแรงดันกริดไบแอสในขณะที่ระดับแรงดันไบแอสที่แอโนดยังคงอยู่ปริมาณกระแสแอโนดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งถ้าหากไม่มีการป้องกัน ปริมาณกระแสแอโนดที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้หลอดไตรโอดเสียหายได้ ดังนั้นการใช้งานที่ประยุกต์เทคนิคกริดไบแอสแบบนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในวงจรแอโนดเพื่อป้องกันผลเสียหายอันอาจเกิดจากสาเหตุที่กล่าวมานี้หรือสาเหตุอื่นใดก็ตามที่ส่งผลให้ระบบไม่สามารถรักษาระดับแรงดันกริดไบแอสไว้ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

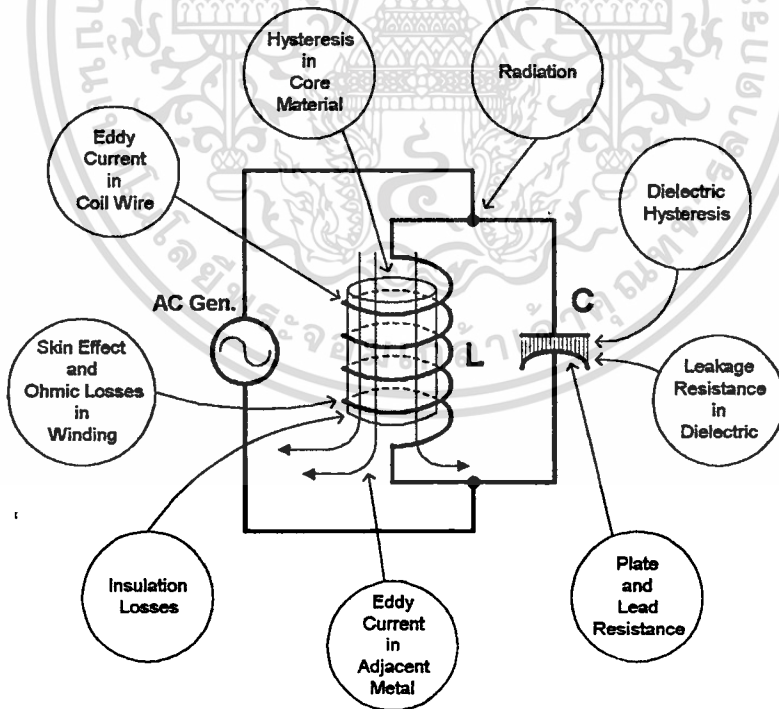
# บทที่ 3

## คุณลักษณะของออสซิลเลเตอร์

### องค์ประกอบและคุณลักษณะทั่วไปของออสซิลเลเตอร์

เช่นเดียวกับการแกว่งเชิงกล การแกว่งหรือการออสซิลเลตทางไฟฟ้า ก็ต้องอาศัยตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลต ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดการแกว่งของกำลังงาน

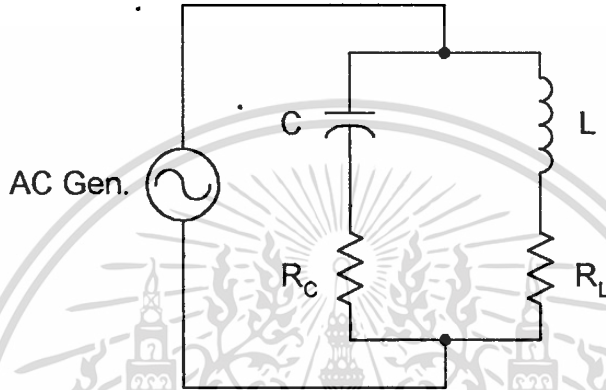
ภาพที่ 13



แสดงค่าความสูญเสียต่างๆ ที่แฝงอยู่ในวงจรแกงค์

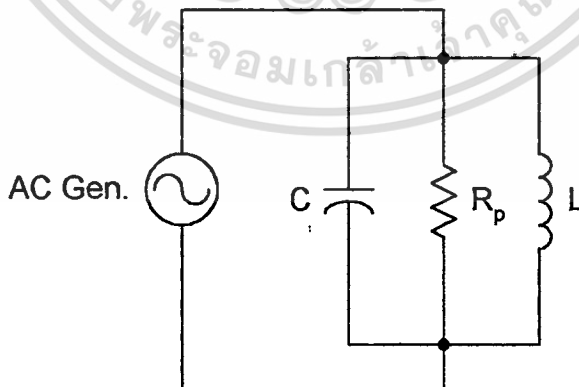
อย่างสม่ำเสมอในตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลต ดังนั้นการพิจารณาการออสซิลเลตทางไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลตซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีบทบาทในการกระตุ้นให้เกิดการออสซิลเลตและคำนวณให้การออสซิลเลตดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง<sup>[4]</sup>

ภาพที่ 14



แสดงความสูญเสียที่ปรากฏภายในวงจรเทงก์แบบขนาน L-C ในรูปตัวต้านทานอนุกรม  $R_L$  และ  $R_C$

ภาพที่ 15

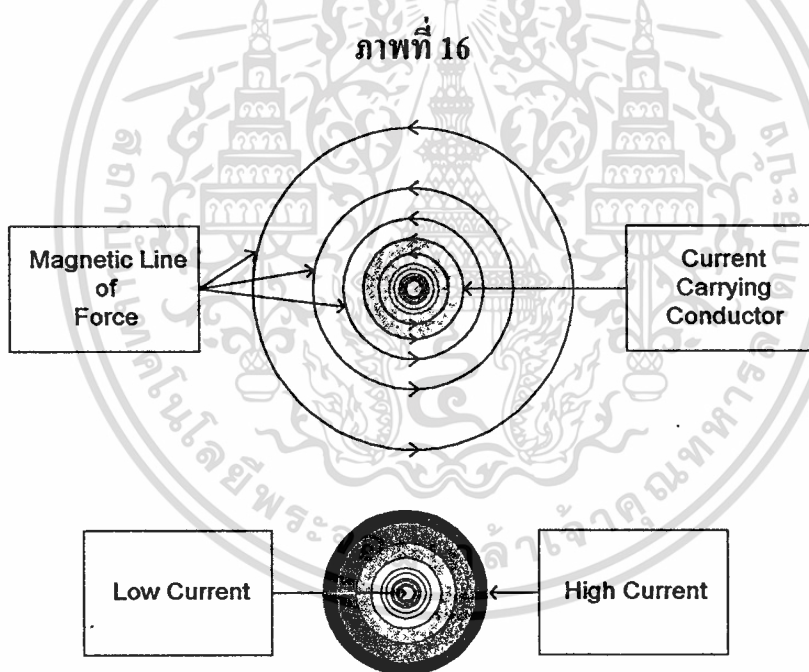


แสดงความสูญเสียที่ปรากฏภายในวงจรเทงก์แบบขนาน L-C ในรูปตัวต้านทานขนาน  $R_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วงจรเรโซแนนซ์แท่งแบบขนาน L-C

วงจรเรโซแนนซ์แท่งแบบขนาน L-C (ตัวเหนี่ยวนำ-ตัวเก็บประจุ) เป็นรูปแบบหนึ่งของวงจรกำเนิดสัญญาณออสซิลเลตที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ โดยจัดวางตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในลักษณะขนานเข้าด้วยกันหรือในรูปแบบที่เรียกว่าวงจรแท่งแบบขนาน (Parallel-resonant Tank) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างง่ายๆ เพียงแค่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพียงอย่างละตัวประกอบกันโดยสมมุติให้อุปกรณ์ทั้งสองปราศจากความสูญเสียโดยสิ้นเชิง วงจรแท่งก็สามารถให้กำเนิดสัญญาณออสซิลเลตได้อย่างสมบูรณ์และมีเสถียรภาพ แต่เนื่องจากในสภาวะจริงนั้นเป็นไปได้ที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าใดใดจะปราศจากความสูญเสียโดยสมบูรณ์ ดังนั้นนอกจากตัวเหนี่ยวนำ



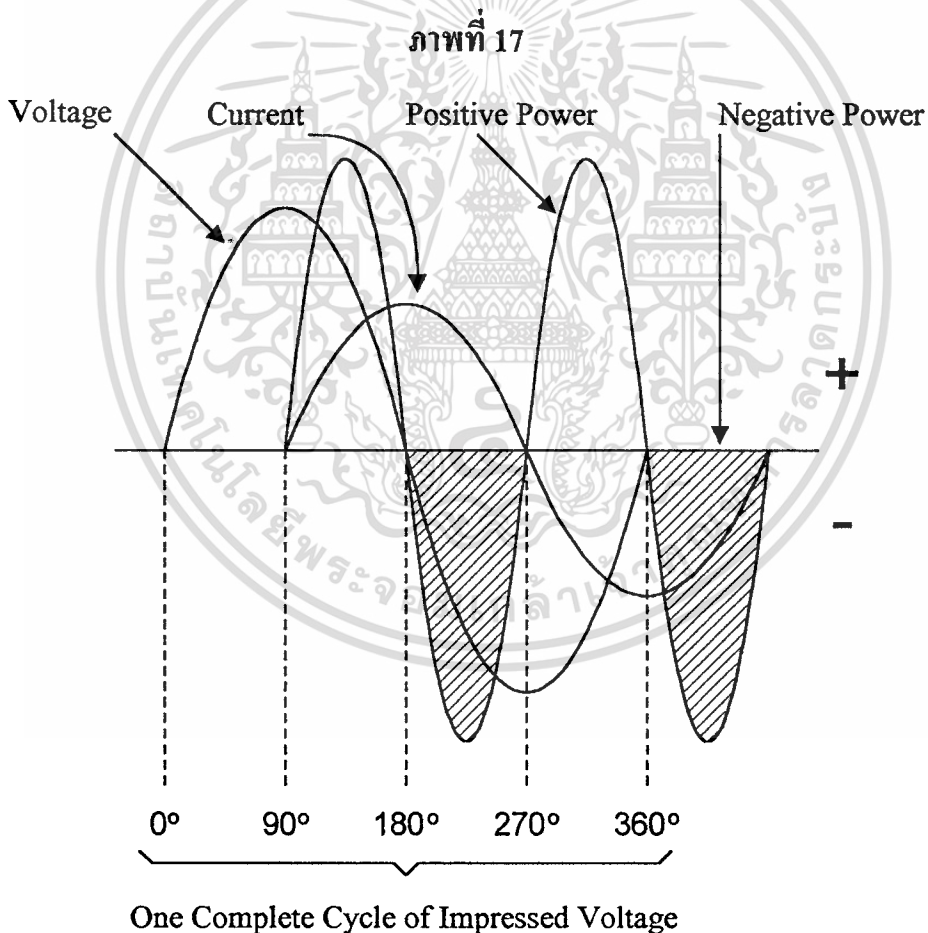
แสดงลักษณะการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสภายในตัวนำขณะนำกระแส

นำและตัวเก็บประจุที่เป็นส่วนประกอบหลักแล้วยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่อยู่ในฐานะของอุปกรณ์เสมือน นั่นก็คือความสูญเสียที่มีอาจหลีกเลี่ยงได้ในอุปกรณ์ใดใดดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 13 ความสูญเสียที่

กล่าวถึงนี้ สามารถอธิบายในรูปตัวต้านทานเสมือน (Equivalent Resistance) ได้อย่างชัดเจนดังภาพที่ 14 และ 15

### ความสูญเสียที่แฝงอยู่ในวงจรเทงก์

ความสูญเสียชนิดต่างๆ ที่แฝงอยู่ในวงจรเทงก์นั้นจะส่งผลกระทบต่อสถานการณ์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น ความสูญเสียจากการแผ่รังสีคลื่น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานที่ความถี่สูง, ความ

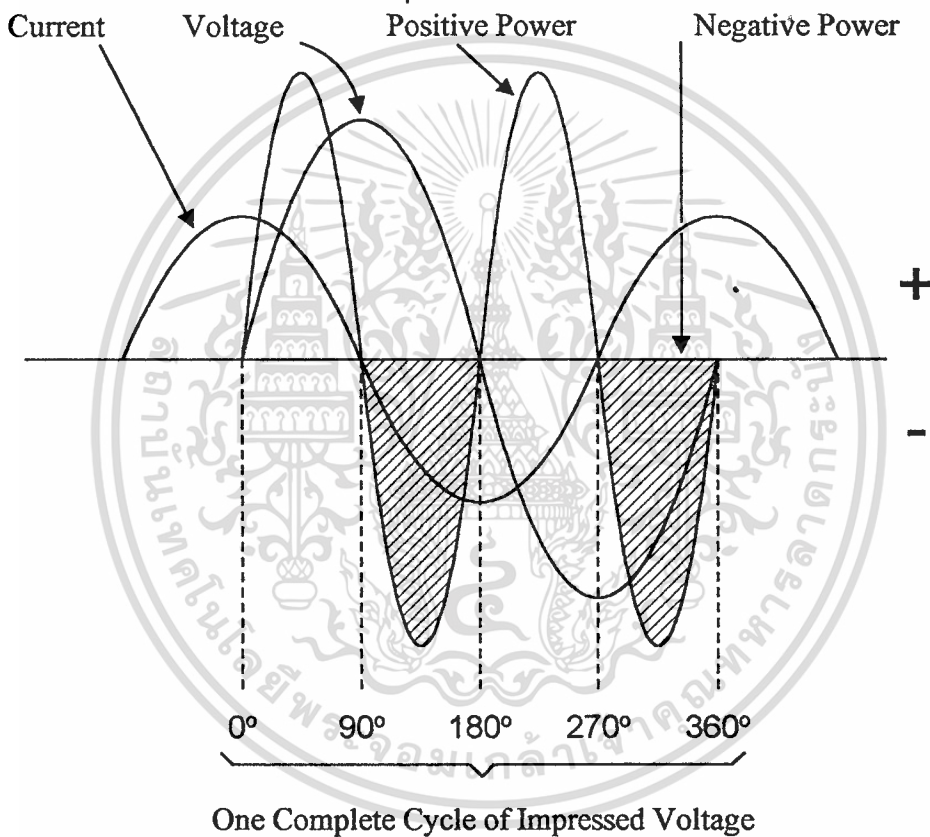


แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, แรงดัน และกำลังงานในตัวเหนี่ยวนำอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียฮิสเตอร์ซิซของวัสดุสารแม่เหล็กซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้วัสดุสารแม่เหล็กเป็นแกนของตัวเหนี่ยวนำ, ความสูญเสียเนื่องจากการเกิดกระแสไหลวนกับวัสดุที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งได้รับอิทธิพลจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำในวงจรแท่ง, ความสูญเสียเนื่องจากการเกิดกระแสไหลวนภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแท่ง, ความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์การกระจายของกระแสภายในตัวนำไม่สม่ำเสมอ โดยการเคลื่อนที่ของกระแสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณผิวตัวนำหรือ "สกินเอฟเฟ็ก"

ภาพที่ 18

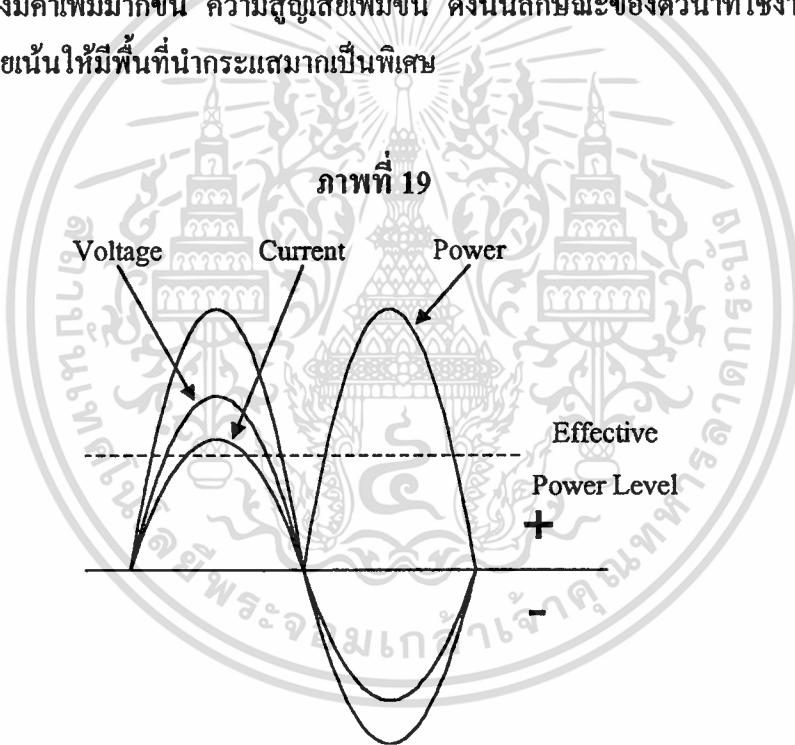


แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, แรงดัน และกำลังงานในตัวเก็บประจุอุดมคติ

(Skin Effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการใช้งานที่ความถี่สูงและจะส่งผลมากขึ้นควบคู่กับระดับความถี่ใช้งานที่สูงขึ้น สาเหตุการกระจายของกระแสในตัวนำไม่สม่ำเสมอก็คือในขณะที่มีกระแสไหล บริเวณส่วนกลางของตัวนำจะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่าบริเวณผิวของตัวนำดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

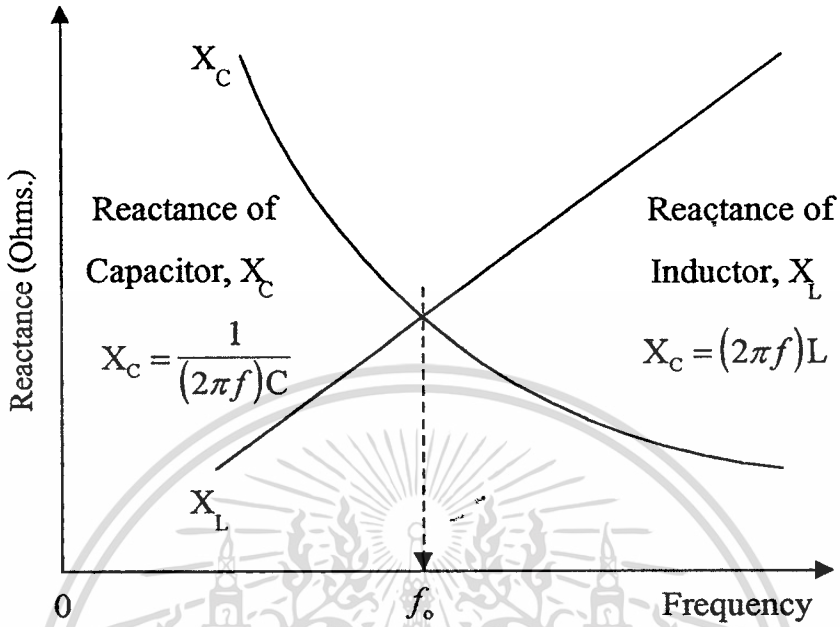
แสดงในภาพที่ 16 ดังนั้นบริเวณส่วนกลางของตัวนำจึงมีค่าความเหนี่ยวนำสูงกว่าบริเวณผิวของตัวนำ โดยค่าความเหนี่ยวนำจะลดลงตามระยะห่างจากบริเวณส่วนกลางของตัวนำ ส่งผลให้ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำบริเวณที่อยู่ใกล้ส่วนกลางของตัวนำมีค่าสูงกว่าบริเวณผิวของตัวนำหรือบริเวณที่อยู่ห่างออกไป เป็นผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอโดยกระแสส่วนใหญ่จะรวมตัวอยู่บริเวณผิวของตัวนำหรือบริเวณที่อยู่ห่างออกไปในแนวรัศมี ผลที่เกิดจากปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของกระแสบริเวณผิวตัวนำจะยิ่งเด่นชัดมากขึ้นในกรณีที่ใช้งานอุปกรณ์ที่ความถี่สูงมากยิ่งขึ้น ปริมาณกระแสรวมตัวอยู่บริเวณผิวตัวนำมากยิ่งขึ้นซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (Effective Cross-sectional Area) ของตัวนำลดลง ดังนั้นความต้านทานที่ปรากฏกับกระแสความถี่สูงจึงส่งผลมากกว่าความต้านทานกระแสตรงซึ่งมีค่าคงที่ ยิ่งค่าความถี่ใช้งานสูงขึ้น ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับก็จะยิ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้น ความสูญเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นลักษณะของตัวนำที่ใช้งานที่ความถี่สูง จึงถูกออกแบบโดยเน้นให้มีพื้นที่นำกระแสมากเป็นพิเศษ



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, แรงดัน และกำลังงานในตัวต้านทานอุดมคติ

ความสูญเสียไดอิเล็กตริกฮิสเทอรีซิส (Dielectric Hysteresis Loss) ที่เกิดขึ้นกับวัสดุฉนวนเป็นความสูญเสียอีกรูปแบบหนึ่งเปรียบเสมือนกับความสูญเสียฮิสเทอรีซิสของวัสดุสารแม่เหล็ก ความสูญเสียชนิดนี้ เกิดจากการเคลื่อนที่เสียดสีระหว่างโมเลกุลที่ถูกบังคับให้มีการเคลื่อนที่เพื่อให้มีการจัดเรียง

ภาพที่ 20



แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำกับความถี่

ตัวในทิศทางสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจาก โมเลกุลเหล่านี้ถูกเปลี่ยนแปลงประจุภายในซึ่งเป็นผลมาจาก สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงสลับกัน ไปมาจากอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าความสูญเสียชนิด นี้เป็นค่าความสูญเสียที่พบบ่อยและควร ได้ตระหนักถึงในการประยุกต์ใช้งาน นอกจากค่าความสูญเสีย ที่ได้กล่าวมานี้แล้ว ยังมีค่าความสูญเสียในกรณีอื่นๆ แต่เนื่องจากเป็นค่าความสูญเสียที่ส่งผลต่อการทำงาน เพียงเล็กน้อยดังนั้นจึงยังไม่นำมาพิจารณาในที่นี้ ดังเช่นค่าความสูญเสียที่ก่อกำเนิดขึ้นจากตัวเก็บประจุในวง จรพ่วงที่ส่งผลต่อการทำงานของวงจรพ่วงที่เพียงเล็กน้อย

คุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์เทงก์แบบขนาน

การพิจารณาคูสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์เทงก์แบบขนาน หรือวงจรพ่วง จะเริ่มพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

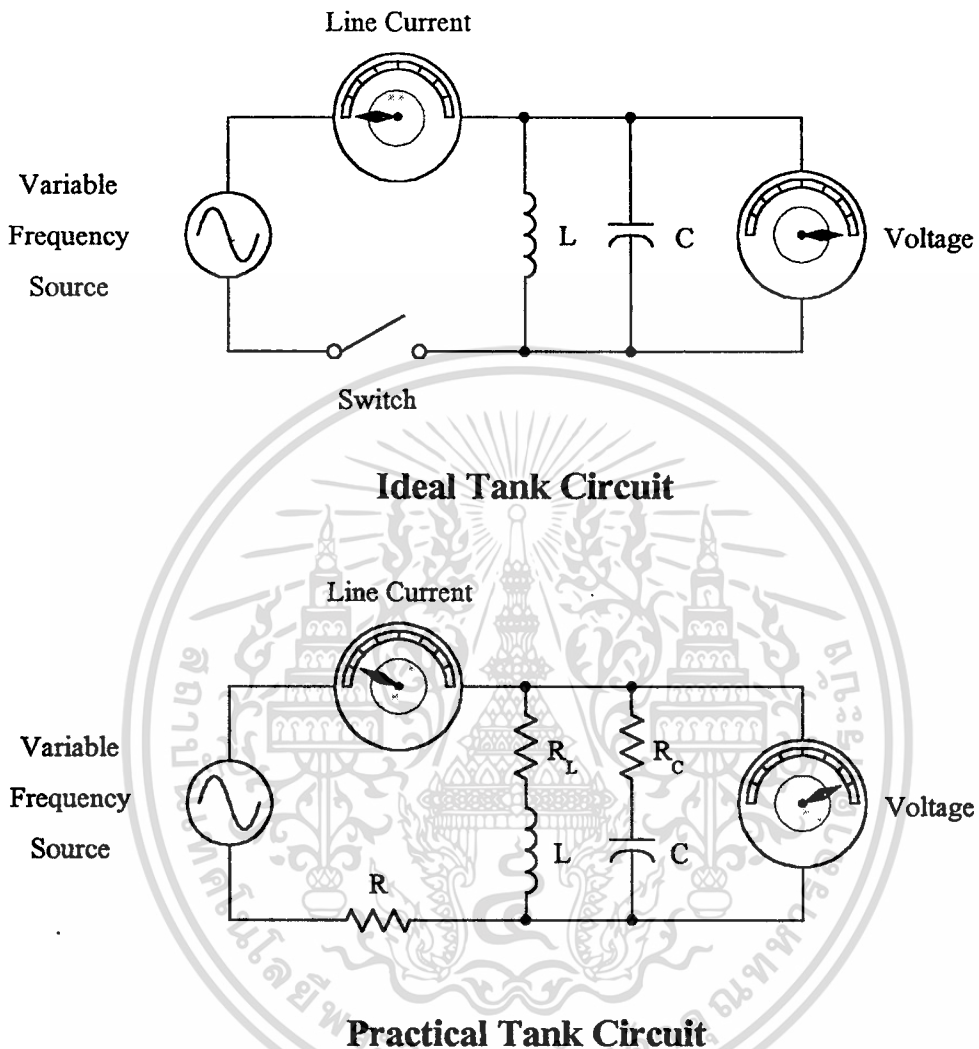
จากกรณีอุคมคติหรือกรณีที่ปราศจากความสูญเสียก่อนที่จะพิจารณาในสภาวะจริงซึ่งแฝงด้วยความสูญเสียต่างๆ ดังที่ทราบมาแล้วว่าวงจรแท่งกึ่งในอุคมคติประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบหลักเพียงสองตัวคือ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุชนิดที่ปราศจากความสูญเสีย ภาพที่ 17 แสดงให้เห็นคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำในอุคมคติเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์แต่ปราศจากกำลังสูญเสียอันเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์กับกระแสที่ไหลผ่านมีความต่างเฟส 90 องศาซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ 17 สำหรับตัวเหนี่ยวนำในอุคมคติและภาพที่ 18 สำหรับตัวเก็บประจุในอุคมคติ

สำหรับทั้งสองกรณีนั้น กำลังงานจะถูกดึงจากแหล่งกำเนิดกำลังงานในช่วง 1 ใน 4 ของไซเคิล และถูกจ่ายกลับสู่แหล่งกำเนิดกำลังงานในช่วง 1 ใน 4 ของไซเคิลต่อมา ส่งผลให้ความถี่ของรูปคลื่นกำลังมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ของแรงดันและกระแส จากภาพที่ 17 และ 18 รูปคลื่นของกำลังในซีกลบแสดงถึงกำลังงานลบ (Negative Power) ที่อุปกรณ์จ่ายคืนกลับสู่แหล่งกำเนิดกำลังงาน ในทางกลับกันรูปคลื่นสำหรับวงจรความต้านทานในภาพที่ 19 นั้นไม่ปรากฏรูปคลื่นกำลังในซีกลบซึ่งก็หมายความว่ากำลังทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูญเสียไปกับค่าความต้านทานโดยไม่มีการคืนกำลังกลับสู่แหล่งกำเนิดกำลังงานดังกล่าวของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุซึ่งมีทั้งการรับและการจ่ายคืนกำลังงานสู่แหล่งกำเนิดกำลังงาน

### กำลังงานลบ

จากภาพที่ 17 และ 18 จะเห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันในบางช่วงนั้นมีค่าเป็นบวกในขณะที่กระแสมีค่าเป็นลบซึ่งตามหลักทางพีชคณิตเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแง่ของกำลังงานแล้ว จะได้กำลังงานที่มีรูปคลื่นปรากฏอยู่ในย่านลบ และทุกครั้งไม่ว่าจะเป็นรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแส เมื่อรูปคลื่นตัดแกนนอน รูปคลื่นของกำลังก็จะตัดแกนนอนด้วย ดังนั้นจึงปรากฏให้เห็นความถี่ของรูปคลื่นกำลังมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่รูปคลื่นแรงดันหรือกระแส โดยปกติค่าของกำลังงานที่ปรากฏบนรูปคลื่นในตำแหน่งต่างๆ ก็คือผลคูณระหว่างค่าแรงดันชั่วขณะกับปริมาณกระแสชั่วขณะซึ่งกำลังงานค่าบวกที่ปรากฏก็คือกำลังงานที่แหล่งกำเนิดกำลังงานจ่ายให้กับอุปกรณ์ ในทางกลับกันกำลังงานค่าลบที่ปรากฏก็คือกำลังงานที่อุปกรณ์จ่ายคืนสู่แหล่งกำเนิดกำลังงาน

ภาพที่ 21



แสดงการตอบสนองของวงจรแทงก์แบบขนาน L-C ทั้งในแบบอุดมคติและในทางปฏิบัติ

ในทางอุดมคติแม้ว่าจะไม่ปรากฏกำลังงานสูญเสียภายในตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตาม ตัวนำที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสก็ยังคงปรากฏค่าความต้านทานแฝงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของกำลังสูญเสีย นอกจากนี้ค่าความต้านทานแฝงก็ยังคงปรากฏในแหล่งกำเนิดกำลังงาน ดังนั้นแม้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้จะปราศจากค่าความสูญเสียโดยสิ้นเชิง ระบบก็ยังคงไม่พ้นความสูญเสียจากการนำอุปกรณ์เหล่านี้ไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ

## คุณสมบัติในทางอุดมคติของวงจรเรโซแนนซ์เทงก์แบบขนาน

หัวข้อนี้จะพิจารณาคุณสมบัติในทางอุดมคติของวงจรเทงก์แบบขนานซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อแบบขนานระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุคงภาพที่ 21 โดยสมมติให้แหล่งกำเนิดกำลังงานจ่ายกำลังในระดับความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเทงก์ซึ่งก็คือค่าความถี่ที่ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม และจากคุณสมบัติทางอุดมคติของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้กล่าวในตอนต้น ทำให้สามารถประมาณการได้ว่าในขณะที่วงจรเทงก์ออสซิลเลตที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้น วงจรเทงก์จะไม่ดึงกำลังงานจากแหล่งกำเนิดกำลังงาน ดังนั้นตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรเทงก์กับแหล่งกำเนิดกำลังงานจึงปราศจากการไหลของกระแส จากผลที่เกิดขึ้นนี้จึงทำให้ดูเหมือนว่า แหล่งกำเนิดกำลังงานไม่มีความจำเป็นต่อวงจรเทงก์ในขณะออสซิลเลตที่ความถี่เรโซแนนซ์อีกต่อไป

จากภาพที่ 21 เมื่อพิจารณาในกรณีที่ทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นไปในทางอุดมคติแล้ว ในขณะที่วงจรเทงก์ออสซิลเลตที่ความถี่เรโซแนนซ์ สวิตช์ที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดกำลังงานกับวงจรเทงก์จะสามารถอยู่ในตำแหน่งเปิดได้และในขณะที่เดียวกันก็จะพบว่ามีการสลับปริมาณมหาศาลไหลเวียนอยู่ภายในวงจรเทงก์ถ่ายเทกลับไปมาระหว่างตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับวงจรเทงก์เช่นนี้เรียกว่า การออสซิลเลตในตัว (Self-sustained Oscillation) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ส่วนในสภาพการใช้งานจริงถึงแม้จะไม่มี การจ่ายกำลังงานออกจากวงจรเทงก์ก็ตาม ค่าความต้านทานแฝงในอุปกรณ์และตัวนำต่างๆ ก็ยังคงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้วงจรเทงก์มีลักษณะการทำงานแปรเปลี่ยนไปจากลักษณะทางอุดมคติโดยวงจรเทงก์จะดูดกลืนกำลังงานส่วนหนึ่งจากกำลังงานที่ออสซิลเลตในวงจรเทงก์เพื่อนำกำลังงานส่วนนี้ไปชดเชยความสูญเสียต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ภายในวงจรเทงก์ ดังนั้นกำลังงานที่ออสซิลเลตอยู่ในวงจรเทงก์จึงถูกลดทอนไปเรื่อยๆ จากความสูญเสียที่แฝงอยู่เหล่านี้จนกระทั่งในที่สุดวงจรเทงก์ไม่เหลือกำลังงานเพียงพอสำหรับการดำรงสภาพออสซิลเลต การออสซิลเลตจึงสิ้นสุดลง

## ลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ของวงจรแท่งกึ่งแบบขนาน

จากภาพที่ 17 จะเห็นว่าเฟสของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติจะตาม (Lag) เฟสของรูปคลื่นแรงดันด้วยมุม 90 องศา หรือ 1 ใน 4 ของไซเคิล ส่วนภาพที่ 18 เฟสของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะนำ (Lead) เฟสของรูปคลื่นแรงดันด้วยมุม 90 องศา เช่นเดียวกันและเมื่อนำอุปกรณ์ทั้งสองนี้มาต่อเชื่อมกันอย่างขนานในรูปของวงจรแท่งกึ่งแล้วเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกำลังงานเพื่อจ่ายกำลังงานที่ระดับความถี่ต่างๆ จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่ง เฟสของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดกำลังงานกับวงจรแท่งกึ่งจะตรงกับเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรแท่งกึ่ง ในขณะที่เดียวกันค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดขึ้นกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม ความถี่ที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้กับวงจรแท่งกึ่งก็คือความถี่เรโซแนนซ์ และเมื่อความถี่ของระบบมีขยับไปจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ สิ่งที่จะปรากฏก็คือความต่างเฟสระหว่างเฟสของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดกำลังงานกับวงจรแท่งกึ่งกับเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรแท่งกึ่งจะมีความมากกว่าความต่างเฟสเมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์

จากที่กล่าวมาเราสามารถอธิบายได้ว่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีการถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันสลับไปมาระหว่างไซเคิลการจ่ายและไซเคิลการรับกำลังงานก่อให้เกิดการหักล้างของกำลังงานอย่างสมดุล ส่งผลให้เฟสของรูปคลื่นกระแสกับแรงดันตรงกัน ในขณะที่ความถี่ของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ( $X_L = 2\pi fL$ ) จะเพิ่มขึ้นพร้อมกับการลดลงของรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $X_C = 1/2\pi fC$ ) ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์จึงเป็นค่าความถี่ที่ทำให้รีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมาบรรจบกันมีค่าเท่าเทียมกันที่ระดับหนึ่งบนกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุดังภาพที่ 20

โดยสรุปแล้วไม่ว่าอุปกรณ์พื้นฐานทั้งสองจะมีเฟสของรูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างกันเท่าใดก็ตาม เมื่อความต่างเฟสนี้ได้รับการหักล้างหรือชดเชยโดยให้อุปกรณ์ทั้งสองมีการถ่ายโอนกำลังงานซึ่งกันและกันในวงจรแท่งกึ่งขณะออกสวิตช์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรแท่งกึ่งจะไม่แสดงคุณลักษณะเสมือนรีแอกแตนซ์อีกต่อไปแต่จะมีคุณสมบัติเสมือนตัวต้านทานตัวหนึ่งซึ่งถ้าพิจารณาในทางอุดมคติหรือกรณีที่อุปกรณ์และตัวนำปราศจากความสูญเสียจะพบว่าความต้านทานที่วงจรแท่งกึ่งแสดงออกมานี้จะมีค่าเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติความต้านทานที่วงจรแท่งกึ่งแสดงออกมานี้จะมีค่าจำกัดในระดับหนึ่งซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าของตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานที่

แฝงอยู่ในวงจรแท่งก

## ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุสำหรับการออกซิเลตที่ความถี่เรโซแนนซ์

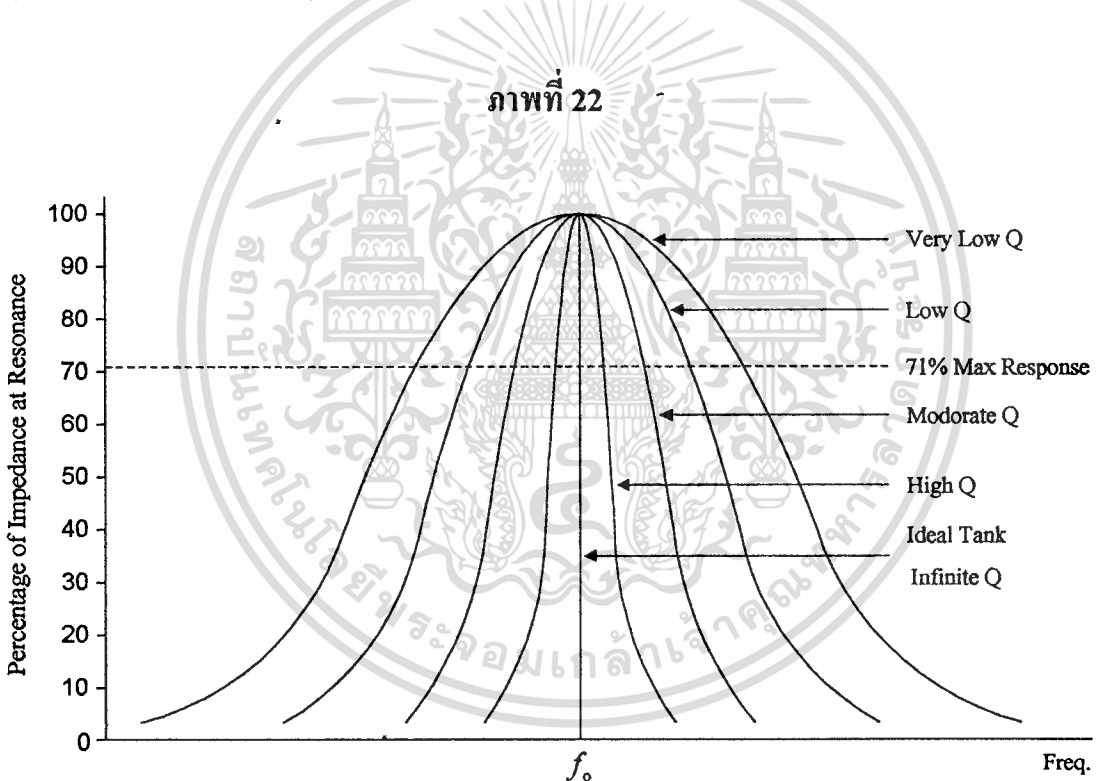
จากที่ทราบมาแล้วว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ,  $X_L$ , และตัวเก็บประจุ,  $X_C$ , มีค่าเท่ากัน จึงได้รูปแบบความสัมพันธ์คือ  $2\pi fL = 1/(2\pi fC)$  ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรแท่งกคือ  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$  จากความสัมพันธ์ที่ได้นี้จะพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ค่าหนึ่งๆ สามารถเกิดขึ้นได้โดยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีค่าในระดับต่างๆ สอดคล้องตามสมการความสัมพันธ์ เช่นอาจใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงควบคู่กับตัวเก็บประจุค่าต่ำ หรือตัวเก็บประจุค่าสูงกับตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำ เมื่อความถี่ที่ประยุกต์กับวงจรแท่งกเบี่ยงเบนไปจากความถี่เรโซแนนซ์ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะไม่สมดุลกันส่งผลให้วงจรแท่งกแสดงคุณลักษณะของรีแอกแตนซ์มากขึ้น โดยขณะที่ความถี่ของวงจรแท่งกมีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ วงจรแท่งกจะแสดงคุณลักษณะเบี่ยงเบนไปทางคุณลักษณะของตัวเก็บประจุ ส่วนที่ค่าความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์วงจรแท่งกจะแสดงคุณลักษณะเบี่ยงเบนไปทางคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ

คุณลักษณะสำคัญของวงจรแท่งกที่เห็น ได้อย่างเด่นชัดคือค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรแท่งกซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์และจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ที่ประยุกต์จากแหล่งกำเนิดกำลังงานมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ไม่ว่าจะเบี่ยงเบนไปในลักษณะที่สูงขึ้นหรือลดต่ำลง ซึ่งก็หมายความว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ แรงดันที่ตกคร่อมวงจรแท่งกจะมีค่าสูงสุดและจะถูกหน่วงลงเมื่อความถี่ที่ประยุกต์จากแหล่งกำเนิดกำลังงานมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ประสิทธิผลของวงจรแท่งกที่ลดต่ำลง ในทางอุดมคติความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นความถี่ที่วงจรแท่งกสามารถดำรงสภาพออกซิเลตได้อย่างอิสระควบคู่กับอิมพีแดนซ์ประสิทธิผลของวงจรแท่งกที่อยู่ในรูปของความต้านทานบริสุทธิ์ซึ่งมีค่าสูงอย่างไม่มีขอบเขตจำกัด การเบี่ยงเบนความถี่ของวงจรแท่งกจากค่าความถี่เรโซแนนซ์เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลให้วงจรแท่งกอยู่ในสภาพเสมือนลัดวงจรได้ทันที แต่เมื่อพิจารณาในทางปฏิบัติจะพบว่า การเบี่ยงเบนความถี่จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรแท่งก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์จะไม่เป็น ไปอย่างฉับพลันแต่จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามลักษณะที่

แสดงไว้ดังภาพที่ 22 ความชันของกราฟการเปลี่ยนแปลงจะเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญถึงคุณสมบัติของวงจร  
แท่งก่

### ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรแท่งก่ในทางปฏิบัติกับค่าความสูญเสีย

ในตอนต้นนั้นได้พิจารณาวงจรแท่งก่ในทางอุดมคติหรือกรณีปราศจากค่าความสูญเสียที่จะเป็น  
พื้นฐานการพิจารณาในทางปฏิบัติ ซึ่งทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ประกอบอยู่ภายในวงจรแท่งก่



แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวประกอบ Q ของวงจรแท่งก่แบบขนาน L-C, "Q<sub>o</sub>"

รวมทั้งตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์เหล่านี้ต่างแฝงด้วยค่าความสูญเสียที่ส่งผลต่อการทำงานของวง  
จรแท่งก่ดังนี้คือ ปริมาณกระแสในตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดกำลังงานกับวงจรแท่งก่จะไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเป็นศูนย์อีกต่อไป แต่จะมีค่าต่ำสุดเมื่อวงจรเทงก์ทำงานในย่านความถี่ที่ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ค่าความถี่ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลของวงจรเทงก์จะมีค่าในขอบเขตจำกัดซึ่งมิได้เป็นอนันต์ดังในทางอุดมคติ ดังนั้นค่าความสูญเสียที่แฝงอยู่กับอุปกรณ์เหล่านี้จึงเป็นตัวบ่งชี้คุณลักษณะที่สำคัญของวงจรเทงก์ รูปความสัมพันธ์แบบหนึ่งที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวก็คือรูปความสัมพันธ์คาร์แอกแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุเทียบกับค่าความต้านทานที่แฝงอยู่ภายในวงจรเทงก์โดยพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถแสดงในรูปตัวประกอบ Q ดังนี้

### ตัวประกอบ Q

ตัวประกอบ Q, Q Factor, เป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะของวงจรเทงก์ในรูปอัตราส่วนกำลังงานที่เก็บสะสมใน 1 ไซเคิลของสัญญาณเทียบกับกำลังงานที่สูญเสียใน 1 ไซเคิลของสัญญาณ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในทางอุดมคติจะพบว่าตัวประกอบ Q หรือค่า Q ของวงจรเทงก์จะมีค่าเป็นอนันต์เนื่องจากปราศจากกำลังงานสูญเสีย นอกจากนี้ตัวประกอบ Q ยังสามารถเป็นข้อมูลบ่งชี้แบนด์วิดท์ความถี่ใช้งานเนื่องจากตัวประกอบ Q ในระดับต่างๆ จะให้แบนด์วิดท์สัญญาณที่แตกต่างกันไปดังภาพที่ 22 ซึ่งความแตกต่างนี้จะบ่งบอกถึงขีดความสามารถของวงจรเทงก์ในการกำจัดฮาร์มอนิกลำดับสูงขึ้นไป ในการพิจารณาโดยทั่วไปจะกำหนดให้ตัวประกอบ Q มีค่าสูงกว่า 10 ซึ่งเป็นระดับที่วงจรเทงก์สามารถดำรงสภาพออสซิลเลตได้อย่างต่อเนื่องและเพื่อให้ผลการพิจารณาใกล้เคียงกับสภาพความจริง

การพิจารณาส่วนใหญ่จะอ้างอิงตัวประกอบ Q ในสภาวะเรโซแนนซ์ซึ่งที่จุดนี้จะแทนด้วย “ $Q_0$ ” ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบ  $Q_0$  กับพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรเทงก์

## ตารางที่ 1

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบ Q ที่เรโซแนนซ์, "Q<sub>o</sub>"

ของวงจรเทงก์แบบขนาน L-C

- (1)  $Q_o = \frac{R_o}{(2\pi f_o)L}$       เมื่อ R<sub>o</sub> คือค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเทงก์ที่ความถี่เรโซแนนซ์, f<sub>o</sub>
- (2)  $Q_o = R_o(2\pi f_o)C$       เมื่ออธิบายในรูปของค่า C ที่ประกอบอยู่ในวงจรเทงก์
- (3)  $Q_o = \frac{1}{(2\pi f_o)CR_s}$       เมื่อ R<sub>s</sub> คือผลรวมของค่าความสูญเสียที่แบ่งอยู่กับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุซึ่งจะอยู่ในรูปของความต้านทานอนุกรม, R<sub>s</sub> = R<sub>L</sub> + R<sub>C</sub>, โดยทั่วไป R<sub>s</sub> = R<sub>L</sub> เนื่องจาก R<sub>C</sub> มีค่าต่ำมาก
- (4)  $Q_o = \frac{1}{(2\pi f_o)CR_L}$       เมื่อไม่นำ R<sub>C</sub> มาพิจารณาจากเหตุผลข้างต้น
- (5)  $Q_o = \frac{(2\pi f_o)L}{R_L}$       ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า Q = (2πf)L / R<sub>L</sub> ซึ่งก็คือค่าตัวประกอบ Q ของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ใดๆ ค่า R<sub>L</sub> อาจมีการเปลี่ยนแปลงหากความถี่ใช้งาน, f, มีความแตกต่างจาก f<sub>o</sub>
- (6)  $Q_o = \frac{0.5f_o}{f_o - f_x}$       เมื่อ f<sub>x</sub> คือความถี่ที่มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเทงก์ลดเหลือเพียง 71 เปอร์เซ็นต์
- (7)  $Q_o = \frac{\text{Energy Stored per Cycle}}{\text{Energy Dissipated per Cycle}}$       ซึ่งสามารถอธิบายในรูปสมการ

### ตารางที่ 1 (ต่อ)

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบ Q ที่เรโซแนนซ์, "Q<sub>o</sub>"

ของวงจรเทงก์แบบขนาน L-C

$$Q_o = \frac{\text{Volts - amperes}}{\text{Watts}}$$

$$(8) Q_o = \frac{I_L}{I_{\text{Line}}} = \frac{I_C}{I_{\text{Line}}} \quad \text{เมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์}$$

### ตารางที่ 2

แสดงพารามิเตอร์สัมพันธ์ของวงจรเทงก์แบบขนาน L-C ที่เรโซแนนซ์

$$(1) R_o = Q_o(2\pi f_o)L \qquad (6) R_s = \frac{(2\pi f_o)L}{Q_o}$$

$$(2) R_o = \frac{Q_o}{(2\pi f_o)C} \qquad (7) L = \frac{Q_o R_s}{(2\pi f_o)}$$

$$(3) L = \frac{R_o}{Q_o(2\pi f_o)} \qquad (8) R_L = \frac{(2\pi f_o)L}{Q_o}^*$$

$$(4) C = \frac{1}{Q_o R_s(2\pi f_o)} \qquad (9) L = \frac{Q_o R_L}{(2\pi f_o)}^*$$

$$(5) C = \frac{1}{Q_o R_L(2\pi f_o)}^* \qquad (10) I_L = I_C = Q_o(I_{\text{Line}})$$

\* เมื่อค่าความสูญเสียแฝงในตัวเก็บประจุมีค่าน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลของวงจรแท่งกึ่ง

อิมพีแดนซ์ประสิทธิผล (Effective Impedance) ของวงจรแท่งกึ่ง,  $R_o$ , เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่วงจรแท่งกึ่งแสดงกับแหล่งกำเนิดกำลังงานในขณะวงจรแท่งกึ่งออสซิลเลตที่ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อพิจารณาในทางอุดมคติ อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลของวงจรแท่งกึ่งในขณะออสซิลเลตจะแสดงคุณลักษณะเสมือนหรือใกล้เคียงตัวต้านทานบริสุทธิ์ซึ่งค่าของความต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่ารีเอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ประกอบอยู่ภายในวงจรแท่งกึ่งดังนี้

$$R_o = Q_o(2\pi f_o L) = \frac{Q_o}{2\pi f_o C}$$

เมื่อ  $2\pi f_o L$  คือค่ารีเอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์,  $f_o$ , และ  $1/(2\pi f_o C)$  คือค่ารีเอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์

ตารางที่ 2 แสดงสมการความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่าตัวประกอบ  $Q_o$  ของวงจรแท่งกึ่ง ตารางที่ 3 แสดงสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ในวงจรแท่งกึ่ง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางมีหน่วยดังนี้คือ ค่าความต้านทานและค่ารีเอกแตนซ์มีหน่วยเป็นโอห์ม ค่าความถี่และแบนด์วิดท์มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี่ และค่าตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด

## คุณลักษณะทางเฟสของวงจรแท่งกึ่ง

ภาพที่ 23 แสดงผลการตอบสนองต่อผลต่างเฟสระหว่างเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรแท่งกึ่งกับเฟสของกระแส จากกราฟจะเห็นว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าความต่างเฟสจะเป็นศูนย์ส่วนโนย่านความถี่ที่ต่ำกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ วงจรแท่งกึ่งจะแสดงคุณลักษณะเบี่ยงเบนไปทางคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานและยิ่งในย่านความถี่ต่ำลงไป ผลของความเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นควบคู่กับการลดลงของผลจากความต้านทาน ส่วนในระดับความถี่ที่ต่ำจนกระทั่งความต่างเฟส

### ตารางที่ 3

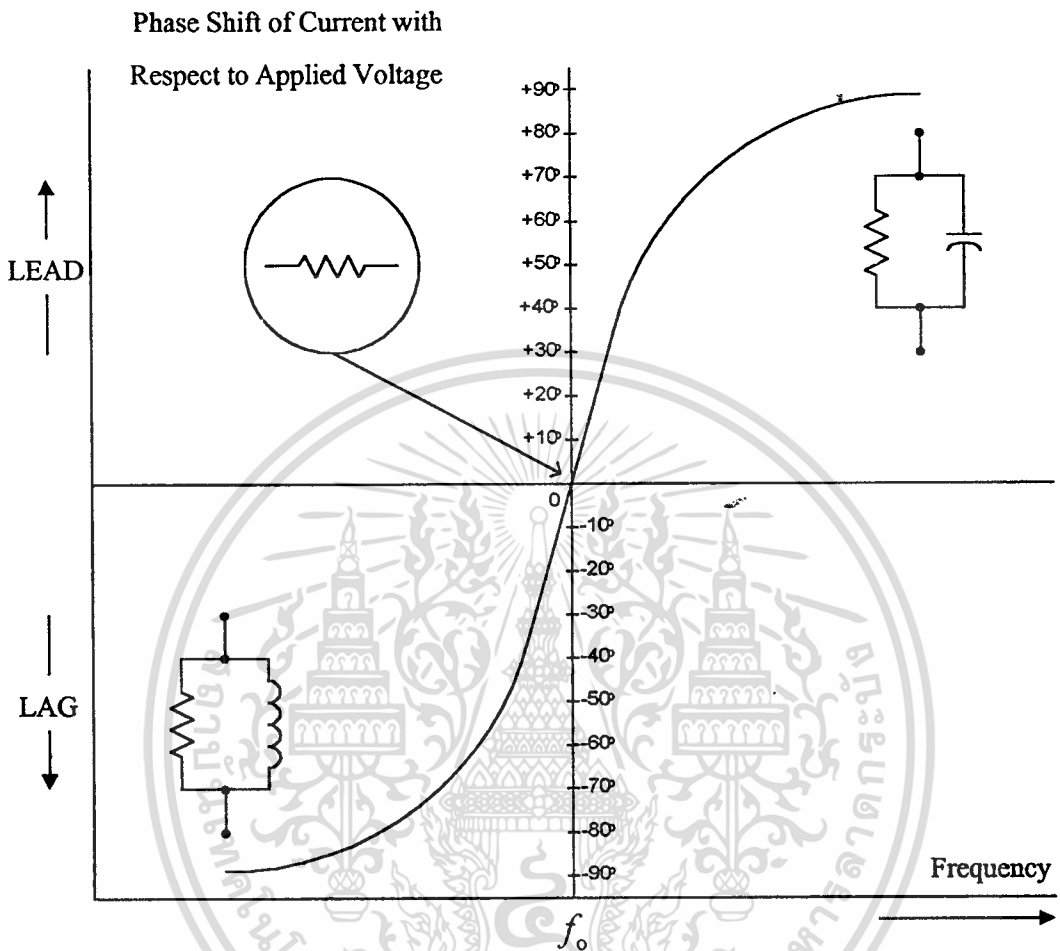
แสดงพารามิเตอร์สัมพันธ์ต่างๆ ของวงจรเทงก์แบบขนาน L-C

- (1)  $X_L = X_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$  เมื่อพิจารณาที่ความถี่เรโซแนนซ์
- (2)  $BW = \frac{1}{(2\pi)R_oC}$  สมการคำนวณค่าแบนด์วิดท์ สำหรับวงจรเทงก์แบบขนาน L-C เมื่อ BW คือค่าแบนด์วิดท์ซึ่งพิจารณาในตำแหน่งที่ค่าอิมพีแดนซ์หรือแรงดันมีค่าเป็น 71% ของค่าอิมพีแดนซ์ที่เรโซแนนซ์
- (3)  $BW = \frac{R_s}{(2\pi)L}$
- (4)  $X_L = (2\pi f)L$  เมื่อ  $X_L$  คือค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่  $f$
- (5)  $X_C = \frac{1}{(2\pi f)C}$  เมื่อ  $X_C$  คือค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่  $f$
- (6)  $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- (7)  $R_o = \frac{L}{R_sC}$

ห้วงเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรเทงก์กับเฟสของกระแสที่ไหลผ่านวงจรเทงก์ใกล้เคียง 90 องศา วงจรเทงก์แสดงคุณลักษณะใกล้เคียงกับคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำดีเยี่ยมมากที่สุด ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาในระดับความถี่ที่สูงกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ วงจรเทงก์จะแสดงคุณลักษณะเบี่ยงเบนไปทางคุณลักษณะของตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทาน ยิ่งระดับความถี่สูงมากขึ้นผลของตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 23



แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของความต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันของวงจรแทรกซ์แบบขนาน L-C

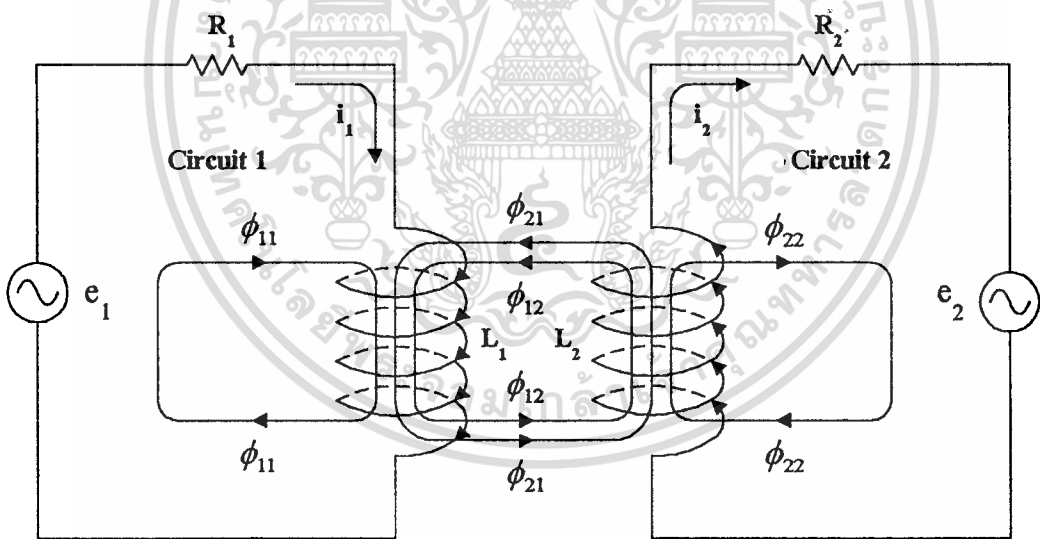
ประจักษ์จะยิ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรแทรกซ์มากขึ้นควบคู่กับการลดลงของผลจากตัวต้านทาน จนในที่สุดที่ระดับความถี่สูงจนกระทั่งความต่างเฟสระหว่างเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรแทรกซ์กับเฟสของกระแสที่ไหลผ่านวงจรแทรกซ์มีค่าใกล้เคียง  $90$  องศา ที่จุดนี้วงจรแทรกซ์จะแสดงคุณลักษณะเสมือนตัวเก็บประจุเต็ม

## บทที่ 4

### การถ่ายโอนกำลังงานโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

การถ่ายโอนกำลังงานโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กหรือการคับปลิงทางสนามแม่เหล็ก คือปรากฏการณ์ที่ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากวงจรหนึ่งส่งผลกระทบต่ออีกวงจรหนึ่ง เป็นผลให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานจากวงจรหนึ่ง ไปสู่อีกวงจรหนึ่ง โดยมีสนามแม่เหล็กเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนกำลังงานระหว่างวงจรทั้งสอง<sup>[2]</sup>

ภาพที่ 24



แสดงวงจรถ่ายโอนกำลังงานทางสนามแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วยฟลักซ์แม่เหล็กองค์ประกอบทั้งสี่ส่วนที่เกิดจากกระแสภายในวงจรทั้งสอง

ภาพที่ 24 แสดงฟลักซ์แม่เหล็กของวงจรสองวงจรที่มีการถ่ายโอนกำลังงานทางสนามแม่เหล็กโดยส่วนประกอบของฟลักซ์แม่เหล็กสามารถอธิบายในรูปองค์ประกอบสมมติดังนี้; ฟลักซ์รวมที่เกิดจากกระแส  $i_1$ , แทนด้วย  $\phi_1$ , สามารถแบ่งเป็นสององค์ประกอบย่อย องค์ประกอบแรกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นฟลักซ์องค์ประกอบที่คล้องเฉพาะวงจรที่ 1 แทนด้วย  $\phi_{11}$ , องค์ประกอบที่สองเป็นฟลักซ์องค์ประกอบที่คล้องทั้งวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 แทนด้วย  $\phi_{21}$ , ในทำนองเดียวกันฟลักซ์รวมที่เกิดจากกระแส  $i_2$ , ซึ่งแทนด้วย  $\phi_2$ , ก็ประกอบไปด้วยฟลักซ์องค์ประกอบสององค์ประกอบย่อยเช่นเดียวกัน องค์ประกอบแรกเป็นฟลักซ์องค์ประกอบที่คล้องเฉพาะวงจรที่ 2 แทนด้วย  $\phi_{22}$ , องค์ประกอบที่สองเป็นฟลักซ์องค์ประกอบที่คล้องทั้งวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 แทนด้วย  $\phi_{12}$ , ฟลักซ์รวมที่เกิดจากกระแสในวงจรทั้งสองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (4.1) และ (4.2) ดังนี้

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12} \quad (4.1)$$

$$\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21} \quad (4.2)$$

จากภาพที่ 24 ฟลักซ์แม่เหล็กองค์ประกอบที่แสดงมีความหมายเฉพาะในแต่ละส่วนดังสามารถอธิบายได้คือ;

$\phi_{11}$  คือส่วนของ  $\phi_1$  ซึ่งคล้องเฉพาะขดลวดของวงจรที่ 1 ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนนี้คือฟลักซ์รั่วไหลของวงจรที่ 1 เมื่อพิจารณาอ้างอิงกับวงจรที่ 2, ซึ่งเกิดจากกระแส  $i_1$

$\phi_{21}$  คือส่วนของ  $\phi_1$  ซึ่งคล้องทั้งขดลวดของวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนนี้คือฟลักซ์ร่วมระหว่างวงจรที่ 1 กับวงจรที่ 2, ซึ่งเกิดจากกระแส  $i_1$

$\phi_{22}$  คือส่วนของ  $\phi_2$  ซึ่งคล้องเฉพาะขดลวดของวงจรที่ 2 ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนนี้คือฟลักซ์รั่วไหลของวงจรที่ 2 เมื่อพิจารณาอ้างอิงกับวงจรที่ 1, ซึ่งเกิดจากกระแส  $i_2$

$\phi_{12}$  คือส่วนของ  $\phi_2$  ซึ่งคล้องทั้งขดลวดของวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนนี้คือฟลักซ์ร่วมระหว่างวงจรที่ 1 กับวงจรที่ 2, ซึ่งเกิดจากกระแส  $i_2$

เมื่อพิจารณาการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กในภาพที่ 24 ตามสภาพความจริงนั้น การกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจาก  $i_1$  หรือ  $i_2$  มิได้เป็นไปตามรูปแบบที่แสดงไว้ดังภาพทั้งหมด ฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนของ  $\phi_{11}$  จะคล้องเฉพาะบารอบของขดลวดในวงจรที่ 1 หรือขดลวด  $L_1$  เท่านั้น ในทำนองเดียวกันฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนของ  $\phi_{21}$  ก็จะต้องเฉพาะบารอบของขดลวดใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่ 2 หรือขดลวด  $L_2$  เท่านั้น ในการพิจารณาเพื่อให้เกิดความสะดวกและไม่ยุ่งยาก  $\phi_{11}$  จะถูกสมมติให้เป็นภาพรวมของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจาก  $L_1$  และทุกส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กจะคล้อยทุกรอบของขดลวดในวงจรที่ 1 ซึ่งก็ได้นำมาใช้ในทำนองเดียวกันสำหรับฟลักซ์แม่เหล็กในสามองค์ประกอบถัดมา สิ่งสำคัญคือฟลักซ์องค์ประกอบทุกส่วนที่เกิดขึ้นนี้จะมีความเกี่ยวข้องกับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรทั้งสอง

### ความเหนี่ยวนำร่วม

การพิจารณาในเรื่องเกี่ยวกับการกระทำระหว่างสนามแม่เหล็กนั้น จะมีตัวแปรหนึ่งเข้ามาเกี่ยวข้องคือ สัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำร่วมหรือความเหนี่ยวนำร่วม (Coefficient of Mutual Inductance หรือ Mutual Inductance,  $M$ ) ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มีทิศทางเช่นเดียวกับค่าความเหนี่ยวนำในตัว (Self Inductance,  $L$ ) จากภาพที่ 24 เมื่อพิจารณาจะสามารถอธิบายถึงที่มาของค่าความเหนี่ยวนำในตัวและค่าความเหนี่ยวนำร่วมซึ่งมีความคล้ายคลึงกันจากสมการดังนี้;

$$L_1 = \frac{N_1 \phi_{11}}{i_1} \quad \text{[ฟลักซ์แม่เหล็กคล้อยขดลวดในวงจรที่ 1 เมื่อเทียบกับ 1 หน่วยกระแสในวงจรที่ 1]} \dots\dots\dots (4.3)$$

$$M_{21} = \frac{N_2 \phi_{21}}{i_1} \quad \text{[ฟลักซ์แม่เหล็กคล้อยขดลวดในวงจรที่ 2 เมื่อเทียบกับ 1 หน่วยกระแสในวงจรที่ 1]} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$L_2 = \frac{N_2 \phi_{22}}{i_2} \quad \text{[ฟลักซ์แม่เหล็กคล้อยขดลวดในวงจรที่ 2 เมื่อเทียบกับ 1 หน่วยกระแสในวงจรที่ 2]} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$M_{12} = \frac{N_1 \phi_{12}}{i_2} \quad \text{[ฟลักซ์แม่เหล็กคล้อยขดลวดในวงจรที่ 1 เมื่อเทียบกับ 1 หน่วยกระแสในวงจรที่ 2]} \dots\dots\dots (4.6)$$

หากความสัมพันธ์  $\phi/i$  ในสมการ (4.3), (4.4), (4.5) และ (4.6) มีคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะฉะนั้น  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M_{21}$  และ  $M_{12}$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าไม่คงที่ซึ่งสามารถอธิบายในรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$L_1 = N_1 \frac{d\phi_{11}}{di_1} \quad (4.7)$$

$$M_{21} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{di_1} \quad (4.8)$$

$$L_2 = N_2 \frac{d\phi_{22}}{di_2} \quad (4.9)$$

$$M_{12} = N_1 \frac{d\phi_{12}}{di_2} \quad (4.10)$$

แต่ถ้าหากฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับกระแส (กรณีที่ว่าพอมือบิลิตีของทางเดินสนามแม่เหล็กของขดลวดคงที่) ทั้งค่าความเหนี่ยวนำในตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมในสมการ (4.7), (4.8), (4.9) และ (4.10) จะเป็นค่าคงที่

ภายใต้สภาวะที่ค่าพอมือบิลิตีคงที่ ค่ารีลักแตนซ์ของทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (Mutual Flux Path),  $\mathcal{R}_{21}$ ,  $\mathcal{R}_{12}$  จะเป็นค่าคงที่ นอกจากนี้  $\mathcal{R}_{21} = \mathcal{R}_{12}$  ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังนี้

$$M_{21} = N_2 \frac{\phi_{21}}{i_1} = K \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_{21}} \quad (4.11)$$

$$M_{12} = N_1 \frac{\phi_{12}}{i_2} = K \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_{12}} \quad (4.12)$$

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่ซึ่งจากสมการ (4.11) และ (4.12) สามารถอธิบายในรูปความสัมพันธ์  $\phi = KNi/\mathcal{R}$  ดังนั้นถ้าค่าพอมือบิลิตีของทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กร่วมมีค่าคงที่  $M_{21}$  และ  $M_{12}$  จะมีค่าคงที่และ  $M_{21} = M_{12} = M$

ทำการแก้สมการที่ (4.34) และ (4.35) ได้ค่า  $I_1$  และ  $I_2$  ดังนี้

$$I_1 = \frac{V_1(Z_2 + Z)}{Z_1(Z_2 + Z) - Z_M^2} \quad (4.36)$$

$$I_2 = \frac{-V_1 Z_M}{Z_1(Z_2 + Z) - Z_M^2} \quad (4.37)$$

จากการพิจารณาสมการ (4.36) ควบคู่กับสมการ (4.37) จะได้ค่ากระแส  $I_2$  ดังสมการ (4.38)

$$I_2 = \frac{-Z_M I_1}{(Z_2 + Z)} \quad (4.38)$$

ดังนั้นระดับแรงดันตกคร่อมโหลด,  $V_2$ , จึงสามารถอธิบายในรูปสมการได้ดังนี้

$$V_2 = Z I_2 = -Z_M I_1 - Z_2 I_2 \quad (4.39)$$

จากสมการ (4.39) จะเห็นว่าระดับแรงดัน  $V_2$  ก็คือผลต่างระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิ,  $Z_2 I_2$ , ของหม้อแปลงแกนอากาศกับแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำร่วม,  $-Z_M I_1$

2. อิมพีแดนซ์สมมูลย์ (Equivalent Impedance); โดยพิจารณาจากภาพที่ 28 อิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงแกนอากาศที่เกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงทางด้านปฐมภูมิก็คืออัตราส่วนของแรงดันต่อปริมาณกระแสทางด้านปฐมภูมิซึ่งจากสมการ (4.34) สามารถจัดรูปสมการเพื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงได้ดังนี้

$$Z_{e1} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{Z_1(Z_2 + Z) - Z_M^2}{Z_2 + Z} = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{(Z_2 + Z)} \quad (4.40)$$

$$Z_{e1} = Z_1 - \frac{Z_M^2}{Z_2 + Z} = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{(Z_2 + Z)} \quad (4.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศนั้น เพื่อที่จะให้เกิดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุด ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ,  $L_s$ , ควรมีค่าใกล้เคียงกับ  $L_o$  ส่วนการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมินั้นในขั้นแรกต้องทราบค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้งานในวงจรแทงก์,  $C_T$  และค่าความถี่ที่ต้องการให้วงจรแทงก์ออสซิลเลต,  $\omega_o$  จากนั้นจึงจะสามารถกำหนดค่า  $L'_T$  ได้จากสมการที่ (4.47) ดังนี้

$$L'_T = \frac{1}{\omega_o^2 C_T} \quad (4.47)$$

เมื่อกำหนดให้ผลกระทบจากพารามิเตอร์ถ่ายโอนของหม้อแปลงกระตุ้นน้อยจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นจึงสามารถกำหนดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ,  $L_p$ , ของหม้อแปลงแกนอากาศได้จากสมการ (4.48) (เมื่อ  $\omega = \omega_o$ )

$$L_p = \frac{L'_T}{1 - \left[ \frac{k^2 L_s \omega^2 (L_s + L_o)}{(R_s + R_o)^2 + \omega^2 (L_s + L_o)^2} \right]} \quad (4.48)$$

เมื่อกำหนดให้  $R_s$  และ  $R_o$  มีค่าน้อยมาก, ดังนั้นจึงได้รูปสมการสำหรับกำหนดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศดังสมการ (4.49)

$$L_p = \frac{L'_T}{1 - \left( \frac{k^2}{1 + \chi} \right)} \quad (4.49)$$

เมื่อ  $\chi = L_o/L_s$ ,

ทั้งสมการ (4.47), (4.48) และ (4.49) ที่แสดงนี้จะป็นสมการพื้นฐานที่สำคัญในการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งจะได้นำมาใช้ในการพิจารณาต่อไป

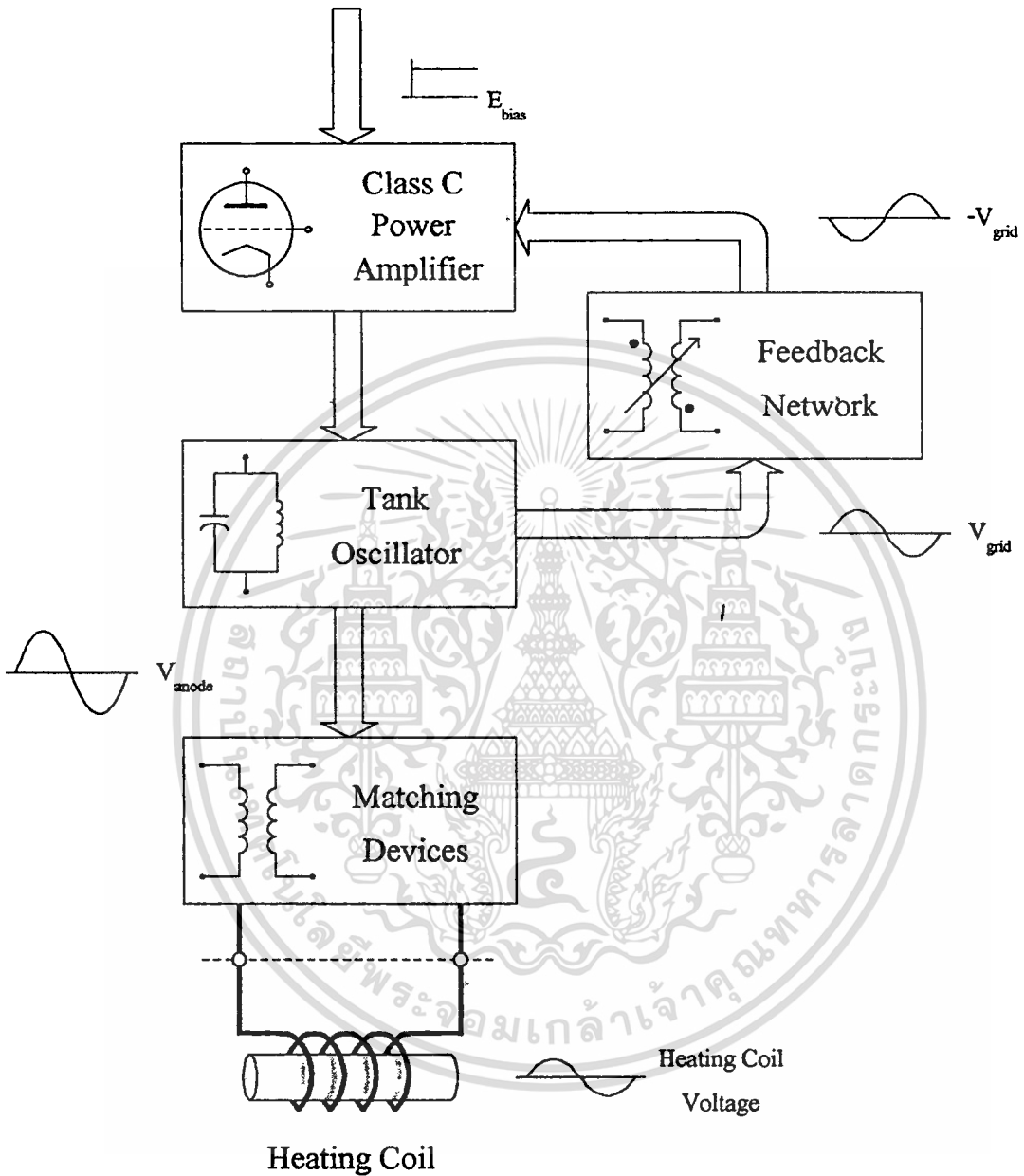
## บทที่ 5

### การประยุกต์เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุกับการชุบผิวแข็งวัสดุ

#### หลักพื้นฐานของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุประยุกต์กับการชุบผิวแข็งวัสดุ

วัตถุประสงค์ของการแปลงความถี่สัญญาณจากแหล่งจ่ายกำลังงานในระดับ 50 หรือ 60 เฮิรซ์ไปสู่ระดับความถี่ย่านวิทยุนั้นก็เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปประยุกต์กับกระบวนการให้ความร้อนในการชุบผิวแข็งวัสดุในลักษณะที่พลังงานความร้อนส่วนใหญ่จะถูกควบคุมให้อยู่บริเวณผิวและมีการแพร่กระจายเข้าสู่วัสดุที่จะทำการชุบผิวแข็งในระดับความถี่ต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้เกิดความเข้มของกำลังงานสูงเนื่องจากปริมาณกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะรวมตัวอยู่บริเวณผิวของวัสดุยังประโยชน์ให้ความร้อนเกิดขึ้นบริเวณผิววัสดุเป็นส่วนใหญ่และในระยะเวลาสั้น นอกจากนี้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุยังสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุในแบบจำกัดบริเวณได้เช่น ใช้กับงานประสานโลหะและงานบัดกรี ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งสำหรับการชุบผิวแข็งวัสดุด้วยความถี่ย่านวิทยุก็คือ กำลังงานสามารถถ่ายเทลงบนผิววัสดุด้วยประสิทธิภาพสูงอันเนื่องมาจากกำลังงานที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับความถี่ นอกจากการชุบผิวแข็งวัสดุด้วยความถี่ย่านวิทยุจะช่วยให้เกิดความเข้มของกำลังงานที่ผิววัสดุสูงแล้ว กรณีที่การคับปลิงทางสนามแม่เหล็ก (Magnetic Coupling) ระหว่างขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุชุบผิวแข็งไม่คืนกเช่น การมีฉนวนกันหรือช่องว่างที่ค่อนข้างมากระหว่างวัสดุชุบผิวแข็งกับขดลวดให้ความร้อนซึ่งช่องว่างนี้จะยังประโยชน์ในการป้องกันการสัมผัสระหว่างวัสดุชุบผิวแข็งกับขดลวดให้ความร้อนแต่มีข้อเสียคือจะส่งผลให้ตัวประกอบกำลังประสิทธิภาพ (Effective Power Factor) ของขดลวดให้ความร้อนมีค่าค่อนข้างต่ำ เพื่อเป็นการขจัดปัญหาดังนั้นจึงต้องเพิ่มระดับ kVA ให้สูงขึ้นเพื่อชดเชยอุปกรณ์ให้สามารถจ่ายกำลังงานได้ในระดับที่ต้องการ แต่สำหรับกรณีใช้ความถี่ย่านวิทยุในการชุบผิวแข็ง ความถี่สูงจะเป็นปัจจัยช่วยในการถ่ายเทกำลังงานลงบนผิววัสดุนอกเหนือจากการเพิ่มระดับ kVA ภาพที่ 30 แสดงระบบชุบผิวแข็งวัสดุความถี่ย่านวิทยุ<sup>[5]</sup>

ภาพที่ 30

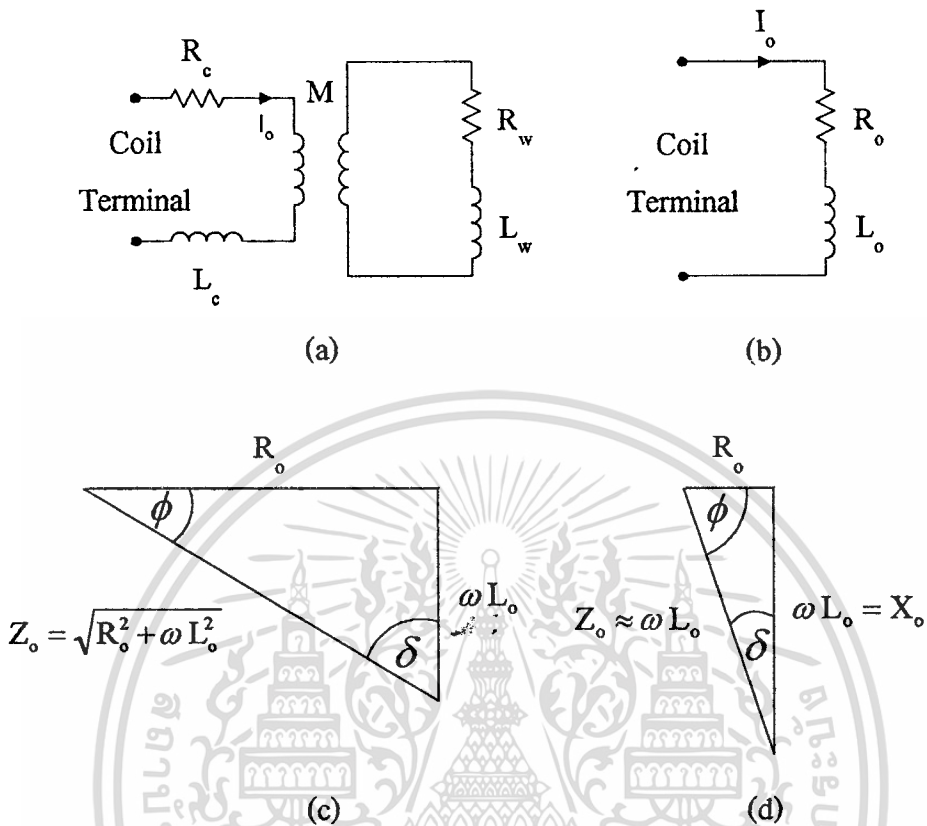


แสดงบล็อก ไดอะแกรมระบบขั้วผิวแข็งวัสดุความถี่ย่านวิทยุ

เริ่มต้นที่ด้านจ่ายกำลังงานออกของระบบ การคับปลิงทางสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุขั้วผิวแข็งจะก่อให้เกิดตัวประกอบ  $Q$  กับขั้วด้านจ่ายกำลังงานออกของระบบดังภาพที่ 31 ซึ่งแสดงให้เห็นที่มาของตัวประกอบ  $Q$  สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำแผ่ความต้านทานโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 31



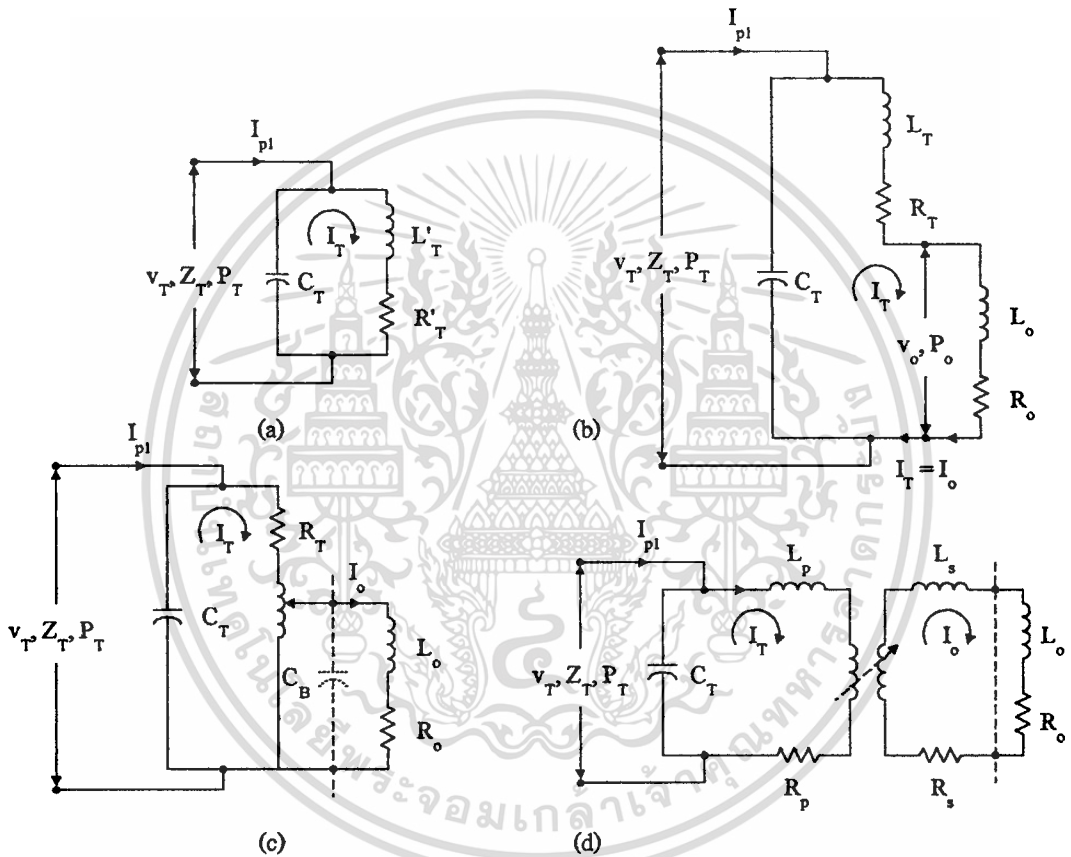
(a) แสดงวงจรจริงของขดลวดให้ความร้อน, (b) แสดงวงจรสมมูลขดลวดให้ความร้อน, (c) แสดงเฟสเซอร์ไคอะแกรมของขดลวดให้ความร้อน, (d) แสดงเฟสเซอร์ไคอะแกรมของขดลวดให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้  $R_o$  มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ  $\omega L_o$

ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่ขดลวดให้ความร้อน ตัวห้อยศูนย์แสดงถึงขดลวดให้ความร้อนในสภาวะที่ กำลังรับ โหลดหรือกำลังให้ความร้อนกับวัสดุซึ่งถูกมอง โดยแหล่งกำเนิดสัญญาณจากขั้วจ่ายกำลังงาน พารามิเตอร์ที่ปรากฏกับแหล่งกำเนิดสัญญาณคือค่าความเหนี่ยวนำและค่าความสูญเสียในรูป ความต้านทานทั้งในส่วนที่เกิดจากการจ่ายกำลังสู่วัสดุขดลวดแข็งและในส่วนที่เป็นเป็นความสูญเสียของขดลวดให้ความร้อนซึ่งค่าความต้านทานทั้งสองส่วนนี้จะแฝงอยู่ในขดลวดให้ความร้อนและถูกถ่ายโอนเข้าสู่แหล่งกำเนิดสัญญาณขณะจ่ายกำลังงาน ตัวประกอบ  $Q$  ของขดลวดให้ความร้อนในสภาวะจ่ายกำลังงาน,  $Q_o$ , โดยพิจารณาประกอบกับโหลดที่ใช้งานในย่านความถี่วิทยุ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 15 ในกรณีที่วัสดุขดลวดแข็งเป็นโลหะชนิดที่ประกอบด้วยธาตุเหล็ก (Ferrous Material) และจะมีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 25 ในกรณีที่วัสดุขดลวดแข็งเป็นโลหะชนิดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ประกอบด้วยธาตุเหล็ก (Non-ferrous Material) ในบางครั้ง  $Q_0$  อาจมีค่าสูงถึง 100 ในกรณีที่มีการ  
 คัปปลิงทางสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุชุบผิวแข็งไม่คืนึงประกอบกับวัสดุ  
 ชุบผิวแข็งที่ใช้เป็นวัสดุชนิดที่ไม่ประกอบด้วยธาตุเหล็ก

ภาพที่ 32



แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดสัญญาณ

ภาพที่ 32 แสดงให้เห็นแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุสำหรับจ่ายให้ขดลวดให้ความ  
 ร้อน โดยแหล่งกำเนิดสัญญาณดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของวงจรเทงก์ซึ่งประกอบด้วยตัว  
 เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อกันอย่างขนานเพื่อออสซิลเลตสัญญาณ ไซน์จ่ายให้กับขดลวดให้  
 ความร้อน ค่าความถี่ที่วงจรเทงก์ออสซิลเลตนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวเก็บ  
 ประจุที่ต่อขนานอยู่ในวงจรเทงก์

วิธีในการกำหนดค่า  $Q_o$  ของขดลวดให้ความร้อนสามารถพิจารณาได้จากสมการกำลังสองของกระแสดังนี้

$$Q_o = \frac{\omega L_o}{R_o} = \frac{I_o^2 \omega L_o}{I_o^2 R_o} = \frac{kVA_o}{P_o} \quad (5.1)$$

จากสมการ (5.1) จะเห็นว่าค่า kVA ด้านจ่ายกำลังออก,  $kVA_o$ , นั่นก็คือผลคูณระหว่างกำลังงานที่จ่ายออกที่ขดลวดให้ความร้อนกับค่า  $Q_o$  ซึ่งเป็นผลจากการถ่ายโอนพารามิเตอร์จากการจ่ายกำลังงานสู่วัสดุชุบผิวแข็ง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของขดลวดให้ความร้อนสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\cos \phi = \frac{R_o}{Z_o}, \tan \delta = \frac{R_o}{\omega L_o}; \text{ ดังนั้น, } Q_o = \frac{\omega L_o}{R_o} = \frac{1}{\tan \delta}$$

เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงหรือที่  $\phi \gg \delta$  จะพบว่า

$$\cos \phi \approx \frac{R_o}{\omega L_o}; \text{ ดังนั้น } Q_o \approx \frac{1}{\cos \phi}$$

สิ่งสำคัญคือค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแฝงในตัวนำโดยเฉพาะในวงจรเทงก์ ควรควบคุมให้น้อยที่สุด ยิ่งการใช้งานในระดับความถี่ย่านวิทยุ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงในวงจรเทงก์ไม่ควรมีค่าเกิน 5 % ของค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในวงจรเทงก์

อิมพีแดนซ์พลวัต (Dynamic Impedance) ของวงจรเทงก์สามารถแสดงในรูปสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Z_T = \frac{L'_T}{R'_T C_T} = \frac{Q_T}{\omega C_T} = Q_T \omega L'_T \quad (5.2)$$

เมื่อ  $\omega = 2\pi f$  ซึ่ง  $f$  ก็คือค่าความถี่ที่เกิดจากการออสซิลเลตของวงจรเทงก์

ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance, M) ของหม้อแปลงแกนอากาศความถี่ย่านวิทยุ ในบทบาทของหม้อแปลงคัปปลิงสนามแม่เหล็กหรือหม้อแปลงแม่เหล็กซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (5.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = k\sqrt{\{L_p L_s\}} \quad (5.3)$$

เมื่อ  $k$  คือสัมประสิทธิ์การคับปลิ่งสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ หม้อแปลงแกนอากาศที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่จะมีค่า  $k$  ไม่เกิน 0.85 ในขณะที่หม้อแปลงแกนเหล็กจะมีค่า  $k$  อยู่ในช่วงระหว่าง 0.85 ถึง 0.9

ชนิดของวงจรแท่งที่ใช้งานจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานซึ่งลักษณะของขดลวดให้ความร้อนก็จะแตกต่างกันออกไปเช่นกัน อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การคับปลิ่งสนามแม่เหล็ก,  $k$ , ระหว่างขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุหุ้มฉนวนแข็งก็ไม่ควรต่ำเกินไปและค่า  $Q_o$  ก็ไม่ควรสูงเกินไป ภาพที่ 32(d) เป็นรูปแบบการถ่ายโอนกำลังงานจากวงจรขยายกำลังสู่ขดลวดให้ความร้อนโดยใช้หม้อแปลงแกนอากาศเป็นตัวกลาง ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดให้ความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนลักษณะของวัสดุหุ้มฉนวนแข็ง หม้อแปลงแกนอากาศที่ใช้งานก็ควรอยู่ในลักษณะที่สามารถปรับระดับการคับปลิ่งสนามแม่เหล็กหรือค่า  $k$  ของหม้อแปลงแกนอากาศได้เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์จากวงจรด้านจ่ายกำลังออกซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จากขดลวดให้ความร้อนและวัสดุหุ้มฉนวนแข็งถ่ายโอนเข้ามาในวงจรแท่งด้วยค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยปกติค่าอิมพีแดนซ์และค่า  $Q_o$  ของขดลวดให้ความร้อนจะมีค่าค่อนข้างต่ำซึ่งก็หมายความว่า  $I_o$  จะมีค่ามากกว่า  $I_T$  เสมอ ด้วยเหตุนี้จากสมการ (5.1) จึงทำให้มองเห็นว่า  $kVA$  ของขดลวดให้ความร้อน,  $kVA_o$ , จะมีค่าไม่สูงไปกว่า  $kVA$  ของวงจรแท่ง ดังนั้นส่วนจ่ายกำลังออกหรือบริเวณขดลวดให้ความร้อนของวงจรกำเนิดสัญญาณชนิดนี้จึงมีลักษณะสำคัญคือมีค่าอิมพีแดนซ์และ  $kVA_o$  ค่อนข้างน้อย

ภาพที่ 32(b) แสดงส่วนของวงจรจ่ายกำลังออกในลักษณะที่ขดลวดให้ความร้อนแยกตัวออกจากขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำของวงจรแท่ง ขดลวดให้ความร้อนชนิดนี้เป็นขดลวดที่มีค่า  $kVA_o$  ค่อนข้างสูงซึ่งจะมีจำนวนรอบของขดลวดมากกว่าขดลวดที่มีค่า  $kVA_o$  ต่ำ นอกจากนี้ขดลวดชนิดนี้ยังประกอบด้วยอิมพีแดนซ์และตัวประกอบ  $Q_o$  ที่มีค่าสูงกว่า โดยทั่วไปขดลวดชนิดนี้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นตัวเหนี่ยวนำตัวหนึ่งในวงจรแท่ง ดังนั้นลักษณะสำคัญของขดลวดชนิดนี้คือเป็นขดลวดให้ความร้อนที่มีค่า  $kVA_o$  และค่าอิมพีแดนซ์ค่อนข้างสูงซึ่งจะยังประโยชน์ในการใช้งานในกรณีที่สัมประสิทธิ์การคับปลิ่งสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุหุ้มฉนวนแข็งมีค่าค่อนข้างต่ำดังเช่นในกรณีที่ช่วงห่างระหว่างขดลวดให้ความร้อนกับผิวของวัสดุหุ้มฉนวนแข็งค่อนข้างมากตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีฉนวนคั้น

ภาพที่ 32(c) เป็นรูปแบบผสมระหว่างขดลวดให้ความร้อนชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์หรือค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$kVA_0$  ค่อนข้างสูงกับชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์หรือค่า  $kVA_0$  ค่อนข้างต่ำ ประโยชน์ของวงจรถ่ายกำลัง ออกที่ประกอบด้วยขดลวดให้ความร้อนชนิดนี้คือสามารถเม็ทซึ่งได้โดยเฉพาะเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่ ถ่ายโอนเข้าสู่วงจรแทรกก็มีการเปลี่ยนแปลง ค่าอิมพีแดนซ์ที่ถ่ายโอนเข้าสู่วงจรแทรกก็สามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนจุดแท็บบนตัวเหนี่ยวนำของวงจรแทรก

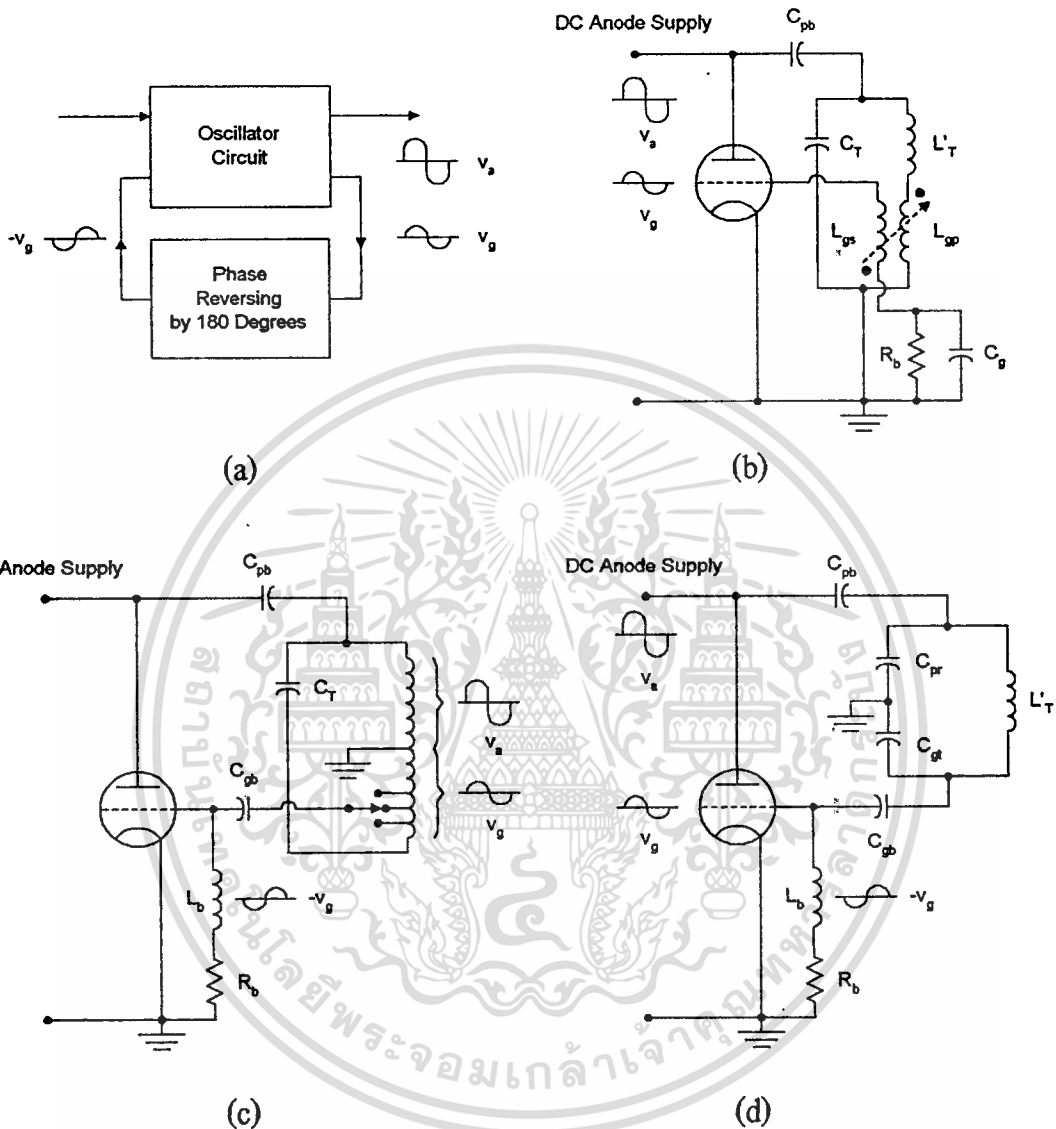
กำลังงานที่จ่ายออกจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่า  $Q_0$  ของขดลวดให้ความร้อน, ค่า  $k$  ของ หม้อแปลงแกนอากาศและความสูญเสียที่แฝงอยู่ในอุปกรณ์และตัวนำต่างๆ ลักษณะการถ่าย โอนกำลังงานจากวงจรกำเนิดสัญญาณสู่ขดลวดให้ความร้อนซึ่งเป็นที่นิยมมากที่สุดคือลักษณะดัง ที่แสดงในภาพที่ 32(d) โดยปกติประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศ จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่า  $Q_0$  ของขดลวดให้ความร้อนด้วยดังเช่น ในกรณีที่  $Q_0$  ของขดลวดให้ ความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงจะอยู่ใน ช่วง 75 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และในกรณีที่  $Q_0$  ของขดลวดให้ความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 15 ถึง 20 ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงจะอยู่ในช่วง 65 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวงจร แทรกในลักษณะที่ขดลวดให้ความร้อนอยู่ในรูปของตัวเหนี่ยวนำตัวหนึ่งของวงจรแทรกดังภาพที่ 32(b) ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานจะอยู่ในช่วง 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

สิ่งสำคัญคือในการใช้งานที่ระดับ  $kVA$  สูงๆ และที่ระดับความถี่สูงๆ นั้น ค่าความเหนี่ยวนำ แฝงในตัวนำต่างๆ จะเป็นสาเหตุให้เกิดความสูญเสียของกระแสซึ่งก่อให้เกิดการลดทอนของค่า  $kVA$  ประสิทธิภาพ (Effective  $kVA$ ) และกำลังงานประสิทธิผล (Effective Power) ของขดลวด ดัง นั้นในการใช้งานควรควบคุมความยาวของตัวนำที่เชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ มิให้มีขนาดยาว เกินความจำเป็น เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดจากพารามิเตอร์แฝงซึ่งรวมทั้งค่าความต้านทานแฝง ในตัวนำและอุปกรณ์ด้วย

ถ้าวงจรแทรกปราศจากความต้านทานสูญเสียใดๆ การกระตุ้นเพื่อให้เกิดการออสซิลเลต เพียงครั้งเดียวด้วยสัญญาณกระตุ้นทางไฟฟ้าก็สามารถทำให้วงจรแทรกเกิดการออสซิลเลตและ ดำรงสภาพออสซิลเลตอย่างต่อเนื่องได้ แต่ในสภาพการใช้งานจริงเนื่องจากต้องมีการจ่ายกำลังงาน ในรูปของพลังงานความร้อนให้กับวัสดุที่จะทำการชุบผิวแข็งซึ่งผลจากการถ่ายโอนกำลังงานสู่ วัสดุชุบผิวแข็งโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้เองจะเป็นผลให้เกิดการถ่ายโอนค่าความต้านทาน ที่เกิดจากการแปลงรูปกำลังงานสนามแม่เหล็กไปอยู่ในรูปกระแสไหลวนเข้ามาแฝงอยู่ในวงจร แทรก ความต้านทานที่ถ่ายโอนเข้ามานี้จะอยู่ในรูปเสมือนความต้านทานสูญเสียของวงจรแทรกซึ่ง กำลังงานส่วนหนึ่งที่เกิดจากการออสซิลเลตของวงจรแทรกจะต้องถูกดึงมาชดเชยเพื่อการดำรง สภาพออสซิลเลตอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากกำลังงานที่คำนวณให้สภาพการออสซิลเลตดำเนินอย่าง ต่อเนื่องมีปริมาณจำกัด ดังนั้นการออสซิลเลตของวงจรแทรกจึงถูกลดทอนไปเรื่อยๆ จนในที่สุดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 33



แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดสัญญาณ

ออสซิลเลเตอร์จะดีที่สุดในที่สุด ด้วยเหตุนี้, เพื่อให้การออสซิลเลเตอร์ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องแม้ในสภาวะที่วงจรแตกก็ประกอบไปด้วยความต้านทานสูญเสียและจากการจ่ายกำลังงานสู่วัสดุ, จึงต้องมีการจ่ายกำลังงานเสริมให้กับวงจรแตกโดยวงจรที่พิจารณาอยู่ในรูปวงจรจ่ายกำลังงานที่ประยุกต์หลอดไตรโอดในบทบาทอุปกรณ์แยกที่ฟของวงจรขยายกำลังซึ่งจะแปลงกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไปอยู่ในรูปกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ย่านวิทยุจ่ายให้กับวงจรแตก การทำงานวงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังจะถูกควบคุมจากสัญญาณส่วนหนึ่งที่เกิดจากการออสซิลเลตของวงจรเทงก์โดยสัญญาณนี้จะถูกถ่ายโอนจากวงจรเทงก์โดยผ่านการคับปลิงทางสนามแม่เหล็ก จากนั้นจะถูกกลับเฟส 180 องศาแล้วจ่ายไปขับหลอดไตรโอดทางขาริตเพื่อให้หลอดไตรโอดสามารถจ่ายกำลังงานสำหรับไซเคิลต่อไปได้อย่างต่อเนื่องตามรูปแบบการทำงานของวงจรออสซิลเลตในตัวเอง (Self-sustained Oscillation) นอกเหนือจากกำลังงานที่ป้อนกลับในรูปสัญญาณขับที่กล่าวนี้ กำลังงานอีกส่วนที่สำคัญก็คือกำลังงานจากการออสซิลเลตซึ่งจะถูกจ่ายสู่ขดลวดให้ความร้อนผ่านอุปกรณ์แม่ทิงซึ่งให้ความร้อนกับวัสดุสำหรับการชุบผิวแข็ง อย่างไรก็ตาม ส่วนหนึ่งของกำลังงานจากการออสซิลเลตเหล่านี้จะถูกใช้ในการชดเชยความสูญเสียในที่แฝงอยู่กับตัวนำและอุปกรณ์ภายในระบบ

ภาพที่ 33 แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุจากพื้นฐานการออสซิลเลตในตัวเอง วงจรคับปลิงเพื่อการป้อนกลับสัญญาณกลับเฟส 180 องศาในภาพที่ 33(b) จะทำหน้าที่ถ่ายโอนกำลังงานส่วนหนึ่งจากวงจรเทงก์เพื่อนำกำลังงานส่วนนี้ไปควบคุมการจ่ายกำลังงานของหลอดไตรโอด โดยกำลังงานส่วนนี้จะถูกจ่ายจากขดลวดคัพติวิตี,  $L_{gp}$  ของหม้อแปลงกระตุ้น ข้อได้เปรียบของวงจรออสซิลเลตในภาพที่ 33(b) ก็คือระดับการคับปลิงทางสนามแม่เหล็ก (Coupling Factor,  $k$ ) ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ,  $L_{gp}$  กับขดลวดทุติยภูมินั้นสามารถปรับให้มีระดับเปลี่ยนแปลงได้เพื่อการแม่ทิง,  $C_{pb}$  ที่เชื่อมต่อระหว่างแอนโอดกับวงจรเทงก์ก็คือตัวเก็บประจุบล็อกรก (Blocking Capacitor) ซึ่งทำหน้าที่ในการป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงที่แอนโอดซึ่งได้รับจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลัดวงจรผ่านวงจรเทงก์ลงสู่กราวด์ทางตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ  $C_g$  ทำหน้าที่ผ่านกระแสความถี่ย่านวิทยุลงสู่กราวด์ ส่วนในภาพที่ 33(c) และ 33(d) นั้น,  $C_{gb}$  จะทำหน้าที่ดิสชาร์จกระแสผ่านตัวต้านทานไบแอส,  $R_b$  เพื่อทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไบแอสกริตตามเทคนิคไบแอสแบบกริตลิก ไบแอสซึ่งเป็นเทคนิคการสร้างแรงดันกริตไบแอสโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก นอกจากนี้แรงดันไบแอสที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถแปรเปลี่ยนระดับให้เป็นไปอย่างเหมาะสมตามระดับแรงดันสัญญาณกระตุ้นที่กริตส่วนไอ้ก,  $L_p$  ที่ปรากฏในวงจรกริตจะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณความถี่ย่านวิทยุผ่านตัวต้านทานกริตไบแอสลงสู่กราวด์

วงจรในภาพที่ 33(c) เป็นรูปแบบหนึ่งของวงจรออสซิลเลตในตัวเองซึ่งถ่ายโอนกำลังงานสู่วัสดุผ่านหม้อแปลงแม่ทิง สัญญาณขับกริตจะถูกแท็บจากตัวเหนี่ยวนำในวงจรเทงก์โดยกลับเฟสสัญญาณ 180 องศาเสียก่อนที่จะอยู่ในรูปสัญญาณขับ แรงดันสัญญาณขับที่แท็บจากตัวเหนี่ยวนำควรควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมคือไม่ขับหลอดไตรโอดด้วยกำลังที่สูงหรือต่ำจนเกินไป กรณีนี้จะแตกต่างกับกรณีในภาพที่ 33(b) คือสัญญาณขับจะถูกแท็บจากตัวเหนี่ยวนำโดยตรงโดย

ไม่ผ่านหม้อแปลงกระตุ้น ดังนั้นจึงต้องมีตัวเก็บประจุคั่นอยู่ระหว่างจุดที่บัสสัญญาณกับกริดเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไบแอสกริดลัดวงจรผ่านตัวเหนี่ยวนำลงสู่กราวนด์ ส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไบแอสกริดนั้นเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่าง  $C_{gb}$  กับ  $R_b$

ภาพที่ 33(d) แสดงวงจรออสซิลเลตในตัวในรูปแบบที่สามารถสร้างสัญญาณขับกริดโดยอาศัยแรงดันที่เท็บจากตัวเก็บประจุแทนการเท็บแรงดันจากตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นข้อเสียของวงจรในรูปแบบนี้ก็คือนำตัวเก็บประจุที่ใช้งานในวงจรนั้น อย่างน้อยต้องมีถึงสองส่วนเพื่อสามารถเท็บแรงดันสำหรับสร้างสัญญาณขับซึ่งก่อนที่จะอยู่ในรูปสัญญาณขับจะต้องถูกกลับเฟสเสียก่อน 180 องศา ข้อดีของวงจรรูปแบบนี้ก็คือนำของสัญญาณขับกับเฟสของสัญญาณออสซิลเลตในวงจรแทรกก็จะต่างเฟสใกล้เคียง 180 องศา มากกว่าวงจรในสองรูปแบบแรกซึ่งความต่างเฟสของสัญญาณจะใกล้เคียง 180 องศา มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับผลของค่าความต้านทานที่แฝงอยู่กับตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าสูงกว่าความต้านทานที่แฝงอยู่ในตัวเก็บประจุ นอกจากนี้รูปแบบวงจรแบบนี้ผลกระทบที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำแฝงภายในตัวนำยังมีค่าต่ำกว่าวงจรในรูปแบบแรก ดังนั้นผลจากการออสซิลเลตปรสิตจากตัวเหนี่ยวนำแฝงเหล่านี้เรโซแนนซ์กับตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขั้วจึงน้อยกว่าวงจรสองรูปแบบแรก

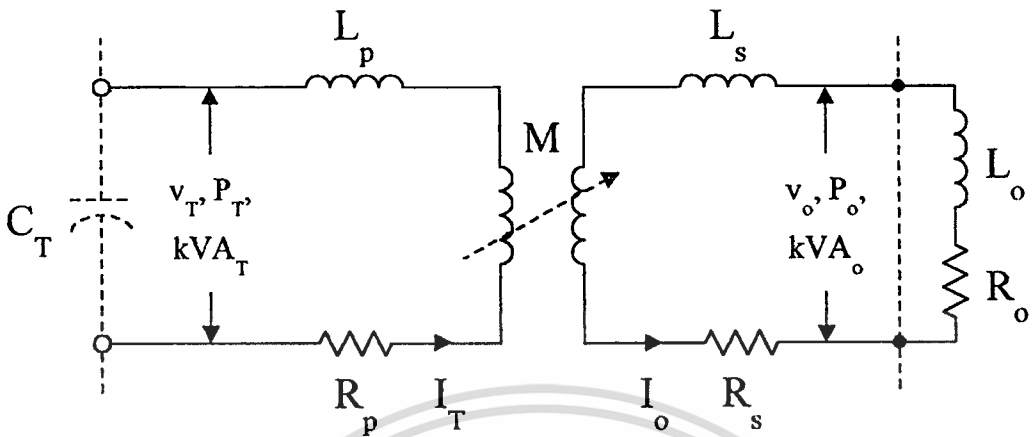
### การพิจารณาวงจรส่วนจ่ายกำลังงานออกเพื่อแม่ทซึ่งให้เข้ากับโหลด

การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเพื่อการให้ความร้อนในกระบวนการชุบผิวแข็งวัสดุ นั้น ส่วนใหญ่จะประยุกต์กับขดลวดให้ความร้อนที่มีค่าอิมพีแดนซ์ค่อนข้างต่ำ แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดมีค่าต่ำในขณะที่ปริมาณกระแสไหลผ่านขดลวดมีค่าสูง บางครั้งอิมพีแดนซ์ของขดลวดให้ความร้อนที่ปรากฏอาจมีค่าประมาณ 5 โอห์ม ซึ่งจะต้องแม่ทซึ่งให้เข้ากับอิมพีแดนซ์พลวัตของหลอดไดรูดที่อาจมีค่าสูงถึง 5,000 โอห์ม ดังนั้นอุปกรณ์แม่ทซึ่งที่มีความเหมาะสมก็คงไม่พ้นการประยุกต์หม้อแปลงแกนอากาศในรูปของหม้อแปลงแม่ทซึ่งซึ่งสามารถใช้งานกับสัญญาณในระดับความถี่ย่านวิทยุควบคู่กับระดับแรงดันสัญญาณสูงๆ ในหน่วยกิโลโวลต์

ภาพที่ 34 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแกนอากาศจากภาพที่ 32(d) ซึ่งในรูปมิได้แสดงให้เห็นตัวต้านทานที่แฝงอยู่ในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของการใช้งานที่ระดับกำลังงานสูงๆ และในระดับความถี่สูงกว่า 500 กิโลเฮิรซ์ ตัวต้านทานแฝงภายในขดลวดเหล่านี้จึงจำเป็นต้องถูกนำมาพิจารณาด้วยดังภาพที่ 34

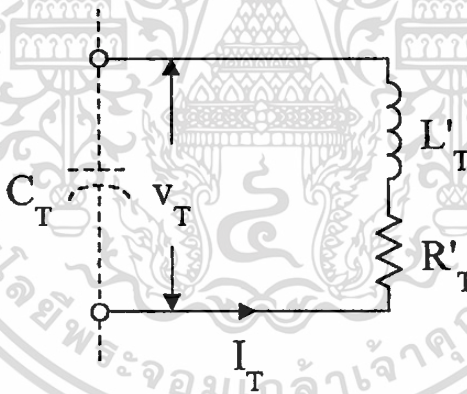
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 34



แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงแกนอากาศ

ภาพที่ 35



แสดงวงจรสมมูลของวงจรในภาพที่ 34

จากการพิจารณาโครงสร้างทางไฟฟ้าของหม้อแปลงแกนอากาศ ได้ผลการพิจารณาแสดงในรูปของพารามิเตอร์พลวัตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความถี่ใช้งาน, ตัวประกอบการดับปลัดของหม้อแปลงแกนอากาศ,  $k$ , ฯลฯ ดังนี้

$$R'_T = R_p + (R_s + R_o) \left[ \frac{k^2 L_p L_s \omega^2}{(R_s + R_o)^2 + \omega^2 (L_s + L_o)^2} \right] \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L'_T = L_p - (L_s + L_o) \left[ \frac{k^2 L_p L_s \omega^2}{(R_s + R_o)^2 + \omega^2 (L_s + L_o)^2} \right] \quad (5.5)$$

ตัวประกอบค้ำปลั่ง,  $k$ , ของหม้อแปลงแกนอากาศ สามารถอธิบายในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเทงก์ขณะเปิดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศดังนี้

$$k = \sqrt{1 - \frac{f_{oc}^2}{f_{sc}^2}}$$

เมื่อ  $f_{oc}$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเทงก์ขณะเปิดวงจรด้านทุติยภูมิ

$f_{sc}$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเทงก์ขณะลัดวงจรด้านทุติยภูมิ

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศ,  $\eta$ , สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\eta_T = \frac{P_o}{P_T} = \frac{I_o^2 R_o}{I_T^2 R'_T} \quad (5.6)$$

วงจรในภาพที่ 34 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์

$$\frac{I_o}{I_T} = \frac{\omega k \sqrt{L_p L_s}}{\sqrt{\{(R_s + R_o)^2 + \omega^2 (L_s + L_o)^2\}}} \quad (5.7)$$

แทนค่าสมการ (5.7) ลงในสมการ (5.6) จะได้รูปแบบสมการประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศดังสมการ (5.8)

$$\eta_T = \frac{Q_p}{Q_p + \frac{Q_p R_s}{R_o} + \frac{1}{k^2} \left[ \frac{(R_s + R_o)^2 + \omega^2 (L_s + L_o)^2}{\omega^2 L_s R_o} \right]} \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

$$Q_p = \frac{\omega L_p}{R_p} \quad (5.9)$$

สมการ (5.8) เป็นรูปแบบสมการประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ จำนวนมากเช่น ค่าความต้านทาน, ค่ารีแอกแตนซ์ ที่ค่อนข้างยุ่งยากในการนำไปใช้ ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงทำการลดรูปได้ดังสมการ (5.10)

$$\eta_T = \frac{P_o}{P_T} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\chi} \left[ \frac{Q_o}{Q_s} \right] + \frac{1}{k^2} \left[ \frac{Q_o}{Q_p} \right] \left[ \frac{(1+\chi)^2}{\chi} \right]} \quad (5.10)$$

เมื่อ

$$Q_s = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (5.11)$$

$$Q_o = \frac{\omega L_o}{R_o} \quad (5.12)$$

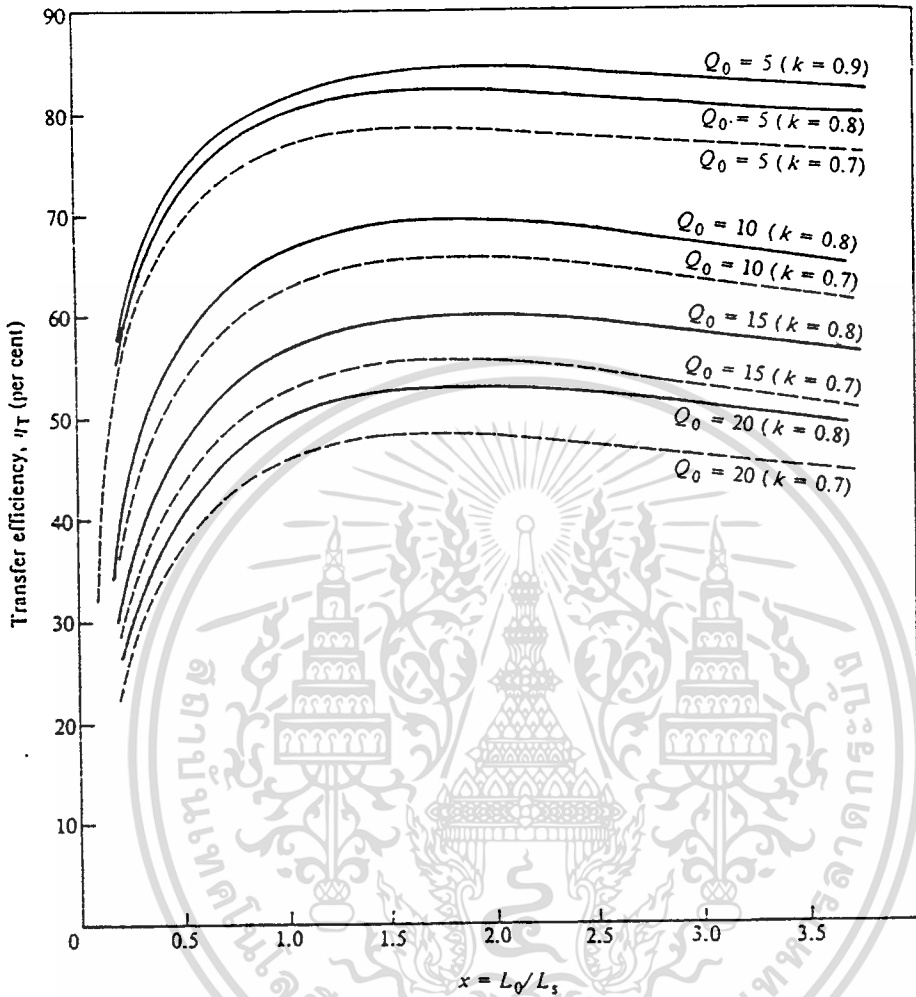
$$\chi = \frac{L_o}{L_s} \quad (5.13)$$

ค่าของ  $\chi$  หรือ  $L_o/L_s$  ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดสามารถพิจารณาได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) โดยกำหนดให้สมการมีค่าเป็นศูนย์ ได้ผลซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (5.14)

$$\chi_{\eta_T \max} = \frac{L_o}{L_{s(\eta_T \max)}} = \sqrt{\left\{ 1 + \frac{k^2 Q_p}{Q_s} \right\}} \quad (5.14)$$

สำหรับหม้อแปลงแกนอากาศที่คงค่าหรือไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่า  $k$  นั้น ขดลวดทุกขดขมี้จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 36



แสดงกราฟการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการ (5.10)

ลักษณะเป็นแผ่นกระแส ซึ่งมีจำนวนรอบเพียง 1 รอบ ล้อมรอบขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นจึงสามารถประมาณการได้ว่าขดลวดทุติยภูมิจะมีค่าตัวประกอบ  $Q$  ของขดลวดค่อนข้างสูง ดังนั้นสมการ (5.14) จึงสามารถอธิบายด้วยสมการ (5.15) ดังนี้

$$\frac{L_0}{L_{s(\eta_T \max)}} = 1 \quad (5.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ (5.15) จะเห็นว่า เพื่อที่จะให้เกิดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดนั้น ค่าความเหนี่ยวนำที่ถ่ายโอนมาจากส่วนของขดลวดให้ความร้อนซึ่งพิจารณาขณะที่กำลังถ่ายโอนกำลังงานสนามแม่เหล็กสู่วัสดุหุ้มผิวแข็ง,  $L_o$ , ควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ทดพิชภูมิ และเมื่อพิจารณาสมการ (5.11) และ (5.12) ค่าตัวประกอบ  $Q_{(s+o)}$  สามารถอธิบายได้ดัง สมการ (5.16) ดังนี้

$$Q_{(s+o)} = \frac{\omega (L_s + L_o)}{(R_s + R_o)} \quad (5.16)$$

ภาพที่ 36 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สามารถอธิบายโดยสมการ (5.10) สำหรับค่าโดยทั่วไปของ  $Q_s$  และ  $Q_p$  การลดลงของประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงแกนอากาศจะเป็น ไปโดยควบคู่กับการเพิ่มขึ้นของค่า  $Q_o$

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่สำคัญคือประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA ของหม้อแปลง แกนอากาศ,  $\epsilon_T$  ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับ kVA ของวงจรแท่งกึ่งและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สำหรับการใช้งานในวงจรแท่งกึ่ง ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA สามารถอธิบายในรูป สมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\epsilon_T = \frac{kVA_o}{kVA_T} = \frac{k^2 \chi}{(1 + \chi^2) - k^2(1 + \chi)} \quad (5.17)$$

เมื่อ  $kVA_o = v_o I_o$  (ค่า kVA ของขดลวดให้ความร้อนขณะถ่ายโอนกำลังงานสนามแม่เหล็ก)

$kVA_T = v_T I_T$  (ค่า kVA ของวงจรแท่งกึ่ง)

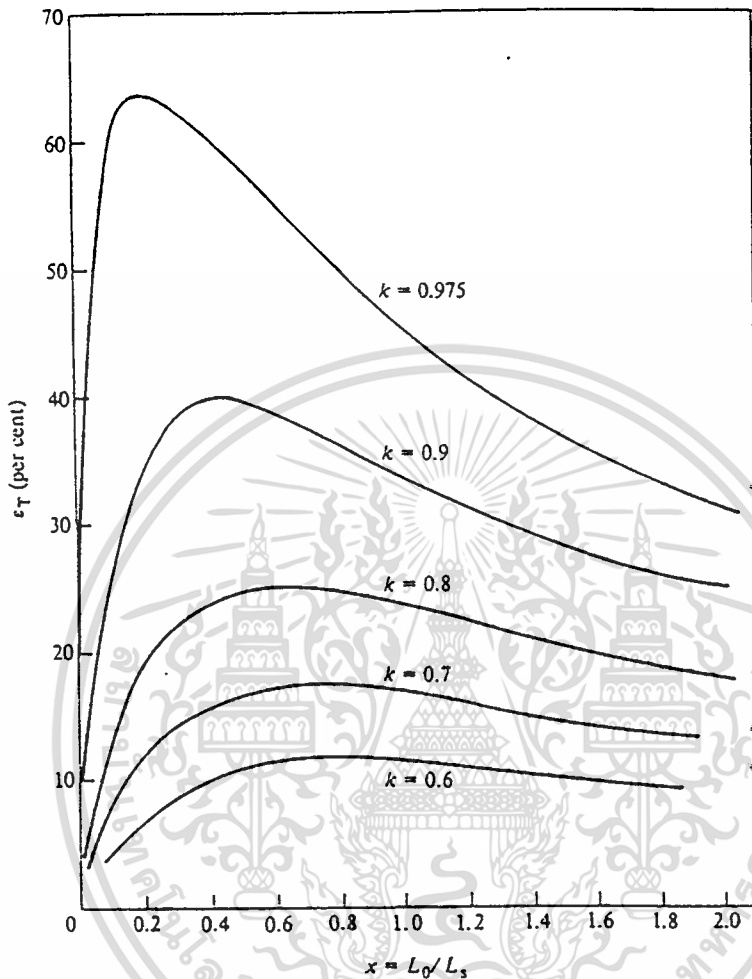
ดังนั้นตัวประกอบ Q ประสิทธิภาพ (Effective Q-factor) ของวงจรแท่งกึ่ง,  $Q_T$  จึงสามารถอธิบายได้ ดังสมการ (5.18)

$$Q_T = \frac{kVA_T}{P_T} \quad (5.18)$$

รูปสมการการถ่ายโอนระดับ kVA สามารถสร้างได้ในทำนองเดียวกับรูปสมการการถ่ายโอนกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 37



แสดงกราฟการถ่ายโอนระดับ kVA ของหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (5.17)

งานของหม้อแปลงแกนอากาศซึ่งได้จากการพิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงแกนอากาศในภาพที่ 35 รูปสมการสำเร็จของสมการถ่ายโอนระดับ kVA (สมการ (5.17)) สามารถนำมาวิเคราะห์ในรูปสมการผลต่างแล้วกำหนดให้ผลลัพธ์มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในที่สุดจะได้รูปแบบสมการสำหรับกำหนดค่า  $\chi$  หรือ  $L_0/L_s$  ที่ทำให้หม้อแปลงแกนอากาศมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA สูงสุดดังสมการ (5.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\chi_{(\varepsilon_T \max)} = \frac{L_0}{L_{s(\varepsilon_T \max)}} = \sqrt{\{1 - k^2\}} \quad (5.19)$$

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA ,  $\varepsilon_T$ , เทียบกับค่าตัวประกอบคัปปลิงของหม้อแปลงแกนอากาศ, k, แสดงดังภาพที่ 37 ซึ่งจากภาพ การเปลี่ยนแปลงค่า k ของหม้อแปลงแกนอากาศจะส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA โดยจากกราฟการเปลี่ยนแปลงจะพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากในช่วงที่ค่า k ของหม้อแปลงแกนอากาศอยู่ระหว่าง 0.65 ถึง 0.9 โดยประสิทธิภาพจะอยู่ระหว่าง 15 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA สูงสุด,  $\varepsilon_{T \max}$  สามารถประเมินได้โดยแทนค่าสมการ (5.19) ลงในสมการ (5.17) ซึ่งสามารถอธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงได้ดังกราฟการเปลี่ยนแปลงในภาพที่ 37 ซึ่งเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA เทียบกับอัตราส่วนค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดให้ความร้อนโดยเทียบกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศ

กราฟการเปลี่ยนแปลงในภาพที่ 36 เป็นกราฟซึ่งโดยทั่วไปจะใช้พิจารณาหม้อแปลงแกนอากาศที่สามารถปรับค่า k และกับการใช้งานในกรณีที่ขดลวดให้ความร้อนมีจำนวนรอบมากกว่า 1 รอบ สำหรับขดลวดให้ความร้อนที่มีจำนวนรอบเพียง 1 รอบ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดค่อนข้างต่ำนั้น จะนิยมมีที่เข้ากับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศที่มีจำนวนรอบเพียง 1 รอบ และอยู่ในลักษณะของแผ่นกระแสดังกล่าวซึ่งไม่สามารถปรับค่า k ของหม้อแปลงแกนอากาศได้ ดังนั้นขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศจึงมีค่า  $Q_s$  ค่อนข้างสูง ส่งผลให้หม้อแปลงแกนอากาศมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานสูงประกอบกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดให้ความร้อนมีปริมาณมากอันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ของขดลวดให้ความร้อนและขดลวดทุติยภูมิมีค่าค่อนข้างต่ำ ข้อเสียของหม้อแปลงแกนอากาศแบบคงค่าตัวประกอบ k ก็คือการปรับระดับค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวประกอบ  $Q_0$  ของขดลวดให้ความร้อนเพื่อที่จะให้แม่เหล็กกับแหล่งกำเนิดสัญญาณค่อนข้างจะกระทำได้ในวงจำกัด ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นข้อดีของหม้อแปลงแกนอากาศชนิดที่สามารถปรับค่าตัวประกอบ k ได้ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังต่ำกว่า แต่สามารถควบคุมการถ่ายกำลังงานได้ดีกว่า การเลื่อนระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิให้ห่างกันออกไปจะส่งผลให้ค่า k ของหม้อแปลงแกนอากาศลดลงควบคู่กับการลดลงของประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานและประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระดับ kVA ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับไบแอสแอโนด

ส่วนประกอบหลักของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับไบแอสแอโนดที่พิจารณาจะมีความคล้ายคลึงกับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปก็คือประกอบด้วยหม้อแปลงแรงดันสูงและวงจรเรียงกระแสดังภาพที่ 38 ซึ่งแสดงให้เห็นรูปแบบของแหล่งจ่ายกำลังที่นิยมใช้ 4 แบบ ภาพที่ 38(a) และ 38(b) แสดงให้เห็นลักษณะของหม้อแปลงแรงดันสูงแบบเฟสเดียวที่สามารถจ่ายกำลังให้กับอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณในรูปแบบเต็มคลื่น ในบางครั้งวงจรกำเนิดแรงดันเหล่านี้อาจต้องมีการควบคุมระดับความราบเรียบของแรงดันไบแอสแอโนดโดยการเพิ่มตัวเก็บประจุกรองแรงดันเพื่อมิให้แรงดันริพเพิลสูงเกินไปอันอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุได้

สำหรับเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุใช้งานควบคู่กับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ประยุกต์หม้อแปลงแรงดันสามเฟสดังภาพที่ 38(c) และ 38(d) จะมีข้อได้เปรียบแหล่งกำเนิดแรงดันที่ประยุกต์หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสเดียวคือระดับแรงดันกระแสที่เพิ่มจะต่ำกว่า ดังนั้นจึงอาจไม่มีความจำเป็นต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์อื่นใดเพื่อเพิ่มความราบเรียบของระดับแรงดัน

โดยปกติเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุจะประยุกต์ไดโอดชนิดสารกึ่งตัวนำซิลิกอนต่อกันอย่างอนุกรมในลักษณะของโมดูล ระบายความร้อนโดยกระบวนการพาความร้อนตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าไดโอดชนิดสารกึ่งตัวนำสามารถใช้งานแทนไดโอดชนิดหลอดสุญญากาศได้โดยสมบูรณ์

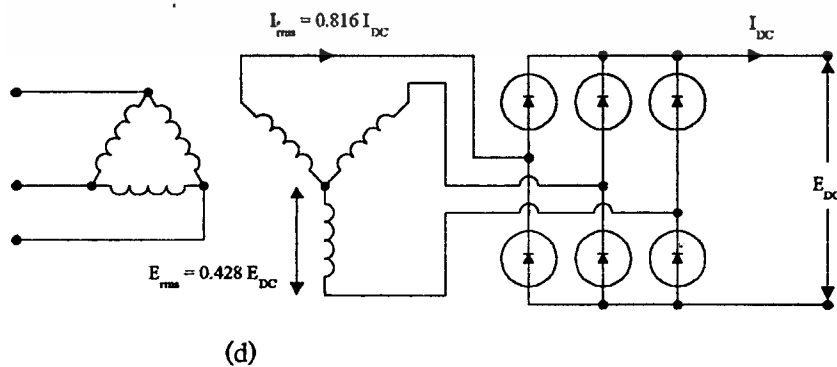
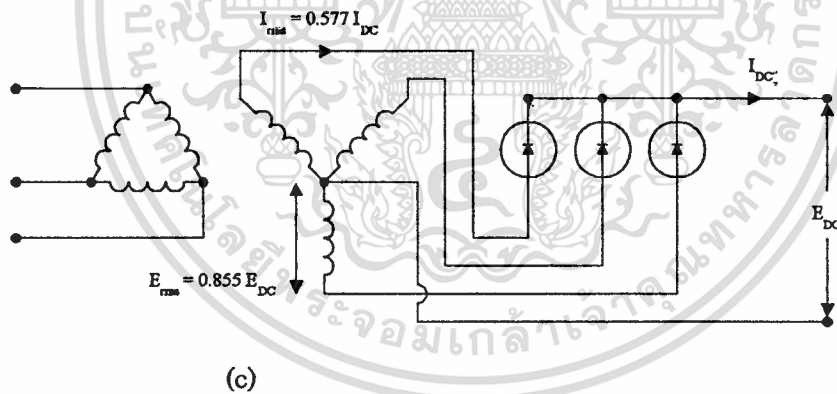
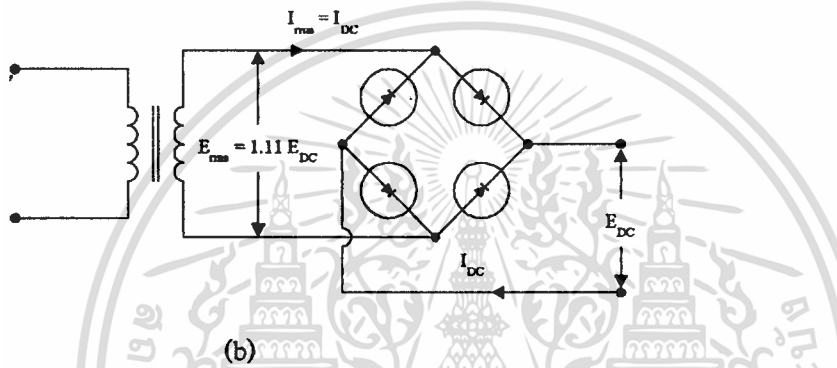
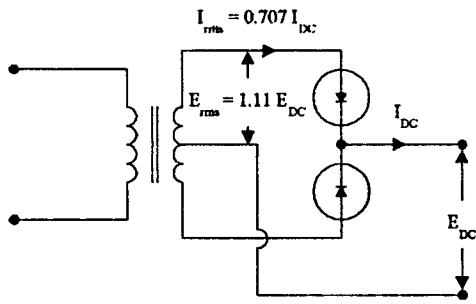
ข้อได้เปรียบของไดโอดสารกึ่งตัวนำสำหรับการใช้งานในรูปแบบของอุปกรณ์เรียงกระแสสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้;

- 1) ไดโอดสารกึ่งตัวนำมีความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า สำหรับอุปกรณ์ป้องกันนั้น เพียงแต่อุปกรณ์ช่วยในการแบ่งระดับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดแต่ละตัวให้สม่ำเสมอและอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินเท่านั้นก็เพียงพอ
- 2) เนื่องจากโครงสร้างของไดโอดสารกึ่งตัวนำปราศจากแคโทด ดังนั้นประสิทธิภาพของไดโอดสารกึ่งตัวนำจึงสูงกว่า
- 3) ไดโอดสารกึ่งตัวนำไม่เปลืองเนื้อที่ในการติดตั้งเนื่องจากตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่า
- 4) ไดโอดสารกึ่งตัวนำปราศจากความยุ่งยากในการระบายความร้อน

ภาพที่ 38 แสดงให้เห็นระดับแรงดันและกระแสในบริเวณต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสที่จ่ายออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 38



แสดงรูปแบบต่างๆ ของวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับไบแอสแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

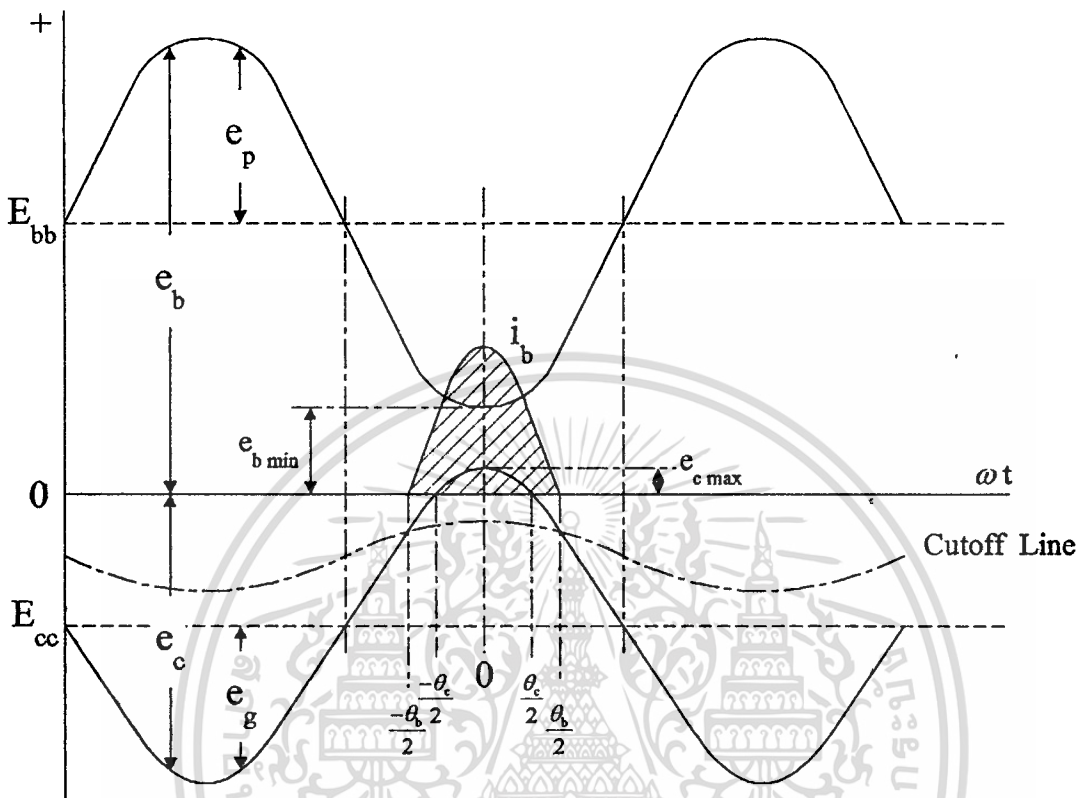
## การประยุกต์วงจรมายกกำลังชั้นซีสำหรับการขับผิวแข็งวัสดุความถี่ย่านวิทยุ

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุเพื่อประยุกต์กับงานขับผิวแข็งวัสดุที่พิจารณาในหัวข้อนี้เป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่ประยุกต์วงจรมายกกำลังชั้นซี โดยมีหลอดไตรโอดอยู่ในบทบาทของอุปกรณ์แอททิฟที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณในระดับกำลังงานที่ค่อนข้างสูงควบคู่กับความถี่สัญญาณตั้งแต่ระดับไม่กี่เฮิรตซ์จนกระทั่งถึงระดับความถี่หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์ ตามรูปแบบวงจรมายกกำลังชั้นซี หลอดไตรโอดที่ประยุกต์นี้จะได้รับการไบแอสด้วยระดับแรงดันที่ค่อนข้างสูงเพื่อแปลงกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากที่ที่ได้รับการไบแอสให้อยู่ในรูปกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ดังนั้นหลอดไตรโอดจึงอยู่ในบทบาทเสมือนสวิทช์สัมพันธ์ที่จะเป็นศูนย์กลางในการถ่ายโอนกำลังงานจากแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่วงจรเรโซแนนซ์เทงก์ที่ทำหน้าที่เป็นแอททิฟโหลดในรูปของออสซิลเลเตอร์ กำลังงานที่ถ่ายโอนจากแหล่งกำเนิดแรงดันไบแอสสู่วงจรถูกกำเนิดจะอยู่ในรูปพัลส์กระแสที่มีมุนนาคะแสไม่เกิน 180 องศาในหนึ่งไซเคิลซึ่งแม้กำลังงานที่ถ่ายโอนนี้จะอยู่ในรูปของพัลส์กระแสที่ไม่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามรูปแบบการถ่ายโอนกำลังโดยวงจรมายกกำลังชั้นซีที่ประยุกต์นี้ก็ยังสามารถส่งผลให้เรโซแนนซ์โหลดดำรงสภาพออสซิลเลตอย่างต่อเนื่องตลอดไซเคิลทั้งในช่วงที่หลอดไตรโอดหรืออุปกรณ์แอททิฟจ่ายพัลส์กระแสและช่วงหยุดจ่ายพัลส์กระแสหรือช่วงคัทออฟ

1. รูปแบบสัญญาณของวงจรมายกกำลังชั้นซี; รูปแบบการทำงานของวงจรมายกกำลังชั้นซีโดยประยุกต์หลอดไตรโอดเป็นอุปกรณ์แอททิฟนั้น อุปกรณ์แอททิฟจะถูกไบแอสด้วยระดับแรงดันเป็นสองเท่าของระดับคัทออฟของอุปกรณ์แอททิฟหรือมากกว่าโดยมีวงจรถูกเรโซแนนซ์เทงก์หรือวงจรถูกเทงก์ที่มีค่าความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับความถี่ของสัญญาณขับกริดเป็นส่วนหนึ่งของวงจรถูกจ่ายกำลังงานออกหรือเป็นโหลดของวงจรมายกกำลัง ในขณะที่ระดับแรงดันไบแอสกริดต่ำกว่าระดับคัทออฟ สัญญาณขับกริดหรือสัญญาณกริดซีกบวกในช่วงมุนนาคะแส (ระดับแรงดันของสัญญาณกริดช่วงที่มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับกราวนด์) จะขับหลอดไตรโอดให้นำกระแสในช่วงมุนนาคะแสไม่เกิน 180 องศา ดังภาพที่ 39 ซึ่งได้แสดงไว้ในช่วง  $-\theta_p/2$  ถึง  $\theta_p/2$

รูปคลื่นแรงดันและกระแสของแอดโนดและกริดพร้อมทั้งความสัมพันธ์ทางเฟสแสดงให้เห็นดังภาพที่ 39 ในภาพ เมื่อ  $e_p$  แทนระดับแรงดันช่วงมุนนาคะแสของแอดโนดเมื่ออ้างอิงกับกราวนด์ซึ่งเกิดจากแรงดันไบแอส,  $E_{pb}$ , และสัญญาณไซนัสที่เกิดจากเรโซแนนซ์โหลด การวางตัวตลอดไซเคิลของ

ภาพที่ 39



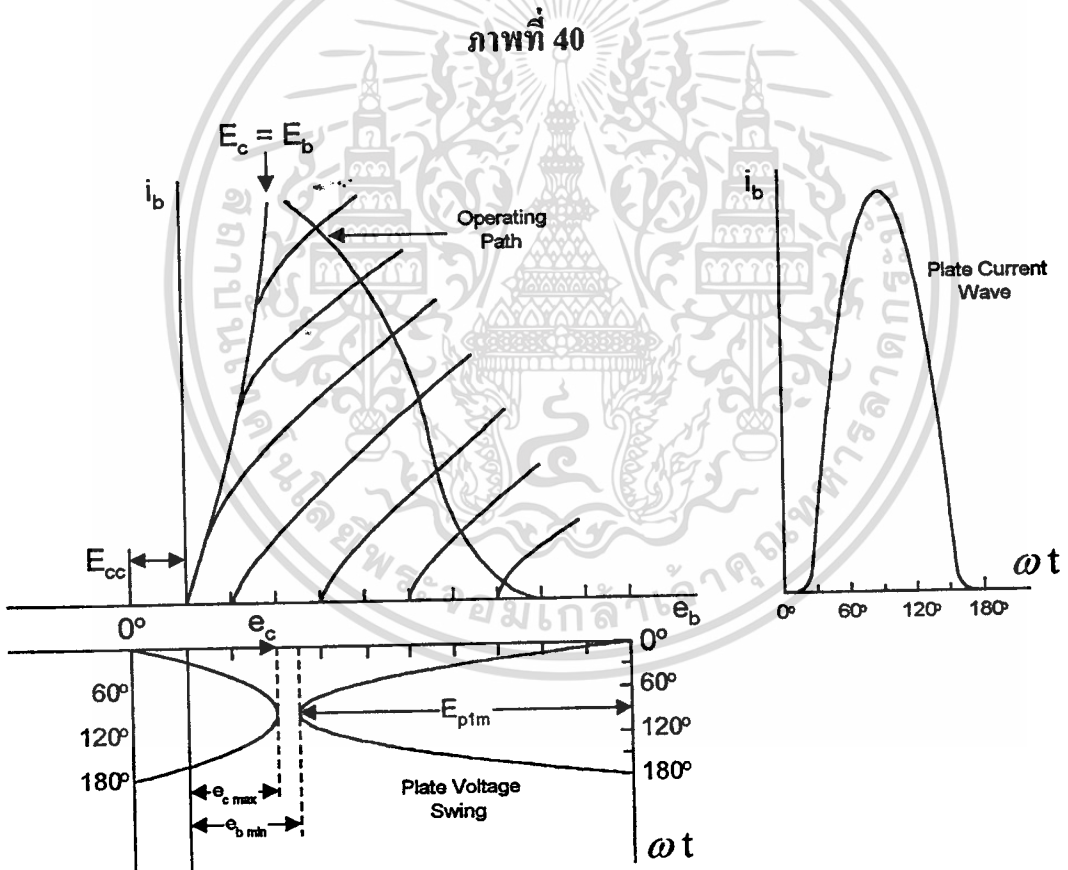
แสดงรูปแบบสัญญาณกริดและสัญญาณแอนโอดของวงจรขยายกำลังชั้นซีโดยหลอดไตรโอดในบทบาทอุปกรณ์แอกทิฟ

แนวเส้นคัทออฟของกริดสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์,  $e_b/\mu$ , (สำหรับหลอดไตรโอด) และมีการวางตัวในลักษณะของรูปคลื่นไซน์ที่สอดคล้องกับสัญญาณแอนโอด แรงดันสัญญาณกริด,  $e_g$ , เป็นแรงดันที่ทำให้ขั้วกระแสแอนโอดเมื่อแรงดันสัญญาณกริดสูงกว่าระดับคัทออฟที่  $-\theta_b/2$  จนกระทั่งแรงดันสัญญาณต่ำกว่าระดับคัทออฟที่  $\theta_b/2$  โดยในช่วงนี้จะเกิดพัลส์กระแสแอนโอดในขณะที่ระดับแรงดันสัญญาณกริดสูงกว่าระดับคัทออฟ และช่วงที่ระดับแรงดันสัญญาณกริดสูงกว่ากราวนด์จะปรากฏพัลส์กระแสกริดควบคู่กับพัลส์กระแสแอนโอด

หลอดไตรโอดในบทบาทของสวิตช์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนกำลังงานจากแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรง,  $E_{bb}$ , ไปสู่รีโซแนนซ์โหลดในช่วง  $\theta_b$  ซึ่งเพียงพอสำหรับการถ่ายโอนกำลังเพื่อจ่ายออกไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ และสำหรับขดเชยความสูญเสียของอุปกรณ์

และตัวนำที่ประกอบอยู่ภายในวงจรเทงก์เพื่อให้วงจรเทงก์สามารถดำรงสภาพออสซิลเลชันถึง  
ไซเคิลต่อไปของสัญญาณขับ

ความสูญเสียส่วนใหญ่ในระบบจะปรากฏที่โหลดไตรโอดซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะ  
สอดคล้องกับความสัมพัทธ์  $e_b i_b$  ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้สามารถควบคุมได้โดยการผ่านกระแส  
แอโนดในรูปพัลส์กระแสแบบสูงแคบ (Short High-amplitude Pulse) การเพิ่มระดับแรงดันไบ  
แอตกริดจะส่งผลให้มูมนำกระแสของพัลส์กระแสแอโนดแคบในช่วงขีดสูงสุดของสัญญาณขับใน  
ขณะที่แรงดันสัญญาณแอโนดมีค่าต่ำสุดซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในแง่ที่จะช่วยให้ประสิทธิภาพของ  
วงจรแอโนดสูงชันแต่มีข้อเสียคือระดับสัญญาณขับต้องสูงพอสมควรซึ่งจะส่งผลให้กริดต้องรับ  
ภาระกำลังงานเพิ่มขึ้น



แสดงกราฟคุณลักษณะของหลอดไตรโอดในวงจรขยายกำลังชั้นซีและรูปพัลส์กระแส  
แอโนด

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ การจ่ายกำลังงานสู่โหลดหรือวัตต์คูณพิวแฉ่งของวงจรเทงก์จะส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนออกมาในสภาพที่เสมือนมีค่าความต้านทานสะท้อนเข้ามาแฝงอยู่ในวงจรเทงก์ซึ่งขณะเดียวกันจะเป็นสิ่งหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนกำลังงานจากวงจรเทงก์สู่ตัวสวิตช์พิวแมงโดยจะปรากฏผลตามมาคือค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเทงก์จะลดลง ค่าความต้านทานที่สะท้อนมานี้สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์  $Q = \omega L/R$  ดังนั้นประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรเทงก์จึงสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์หรือเรโซแนนซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรเทงก์ซึ่งขณะเดียวกันจะส่งผลให้ระดับแรงดันสัญญาณต่ำสุดของแอมโหนด,  $e_{b\min}$ , ในช่วงที่เกิดกระแสแอมโหนดลดลง และหากปล่อยให้ระดับแรงดันสัญญาณต่ำสุดของแอมโหนดลดลงจนกระทั่งต่ำกว่าระดับแรงดันสัญญาณสูงสุดของกริด,  $e_{c\max}$ , สิ่งที่จะตามมาก็คือเมื่อวงจรทำงานจนถึงสภาวะที่ระดับแรงดันสัญญาณแอมโหนดมีค่าต่ำสุด ปริมาณกระแสกริดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและหากปล่อยให้อยู่ในสภาวะเช่นนี้ ระดับแรงดันสัญญาณกริดซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันสัญญาณแอมโหนดจะดึงอิเล็กตรอนจากแอมโหนด ส่งผลให้ปริมาณกระแสแอมโหนดลดลงจนในที่สุดส่งผลให้ปริมาณกำลังงานที่จ่ายสู่โหลดและประสิทธิภาพของวงจรแอมโหนดต่ำลง ดังนั้นประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรแอมโหนดจึงได้ถูกกำหนดไว้ที่  $e_{b\min} = e_{c\max}$  เพื่อเป็นการป้องกันปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ด้วย

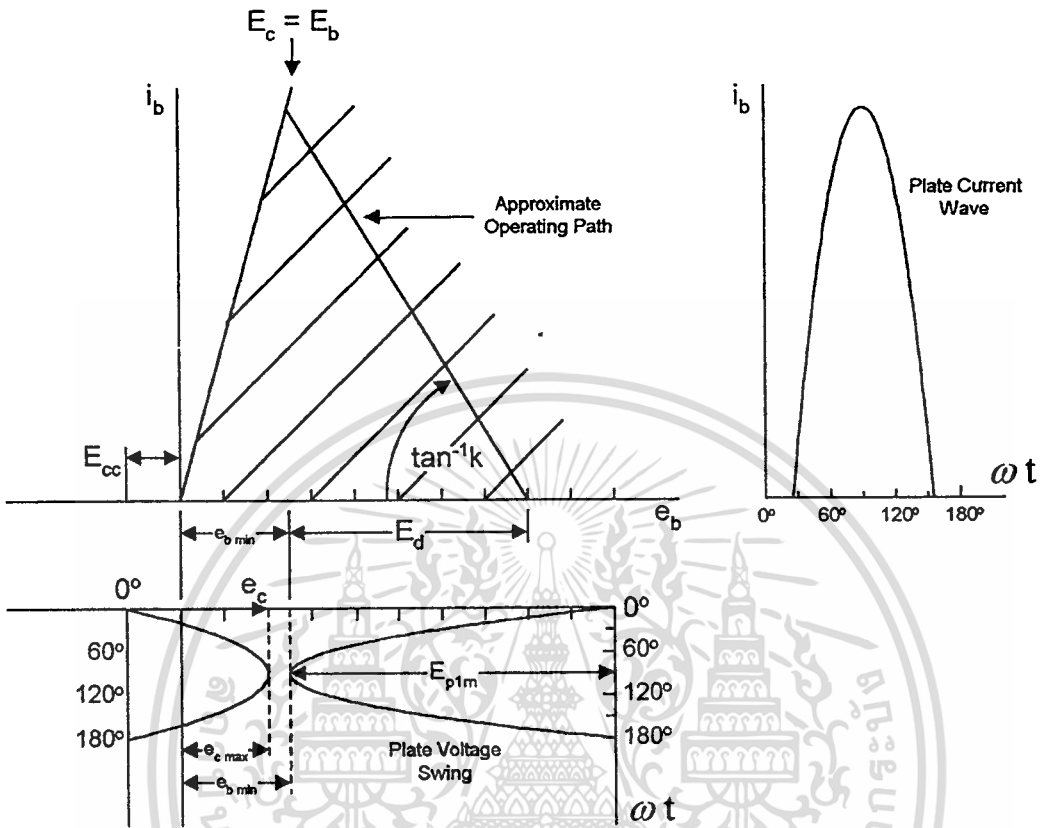
2. การพิจารณาขยายกำลังขั้นซีโดยประยุกต์หลอดไตรโอด; การพิจารณาขยายกำลังขั้นซีสามารถทำได้บนพื้นฐานสมมติฐานการทำงานอย่างเป็นเชิงเส้นของหลอดไตรโอด ตามรูปแบบการไบแอสโดยวิธีนี้แรงดันไบแอสที่กริดหรือกริดไบแอส,  $E_{cc}$ , จะไม่ถูกกำหนดให้อยู่ในระดับใดระดับหนึ่งคงที่แต่จะเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระดับสัญญาณขับ ภาพที่ 40 แสดงกราฟคุณลักษณะของวงจรขยายกำลังขั้นซีซึ่งกระแสแอมโหนดมีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีช่วงนำกระแสไม่เกิน 180 องศา ภาพที่ 41 เป็นกราฟคุณลักษณะที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะในภาพที่ 40 ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$i_b = k[E_{p1m} \cos \omega t - (E_{p1m} - E_d)] \quad \text{สำหรับ } i_b > 0 \quad (5.20)$$

เมื่อพิจารณาในสภาวะที่กระแสแอมโหนดมีค่าเป็นศูนย์ จะได้

$$\frac{\theta_b}{2} = \omega t_b = \cos^{-1} \frac{E_{p1m} - E_d}{E_{p1m}} = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{E_d}{E_{p1m}} \right) \quad (5.21)$$

ภาพที่ 41



แสดงกราฟคุณลักษณะที่ใช้พิจารณาประกอบกับสมการวิเคราะห์

เมื่อปริมาณกระแสแอโนดสูงสุดคือ

$$I_{b \max} = kE_d \quad (5.22)$$

จากรูปพลัสกระแสแอโนดจะ ได้สมการกระแสแอโนด

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

แทนค่า  $i_b$  จากสมการ (5.20) เพราะฉะนั้นจึงได้

$$I_b = \frac{k}{\pi} \int_0^{2\pi} [E_{p1m} \cos \omega t - (E_{p1m} - E_d)] d(\omega t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการอินทิเกรต ได้ผลดังสมการ (5.23) ดังนี้

$$I_b = \frac{k}{\pi} \left[ E_{p1m} \sin \frac{\theta_b}{2} - (E_{p1m} - E_d) \frac{\theta_b}{2} \right] \quad (5.23)$$

แอมพลิจูดของกระแสแอม โนดความถี่มูลฐานสามารถอธิบายในรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_{p1m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_b \cos \omega t d(\omega t)$$

จากนั้นแทนค่า  $i_b$  จากสมการ (5.20) จะได้

$$I_{p1m} = \frac{2k}{\pi} \int_0^{\theta_b/2} E_{p1m} \cos \omega t - (E_{p1m} - E_d) \cos \omega t d(\omega t)$$

ทำการอินทิเกรต ได้ผลดังสมการ

$$I_{p1m} = \frac{2k}{\pi} \left[ \frac{E_{p1m}}{4} (\theta_b + \sin \theta_b) - (E_{p1m} - E_d) \sin \frac{\theta_b}{2} \right] \quad (5.24)$$

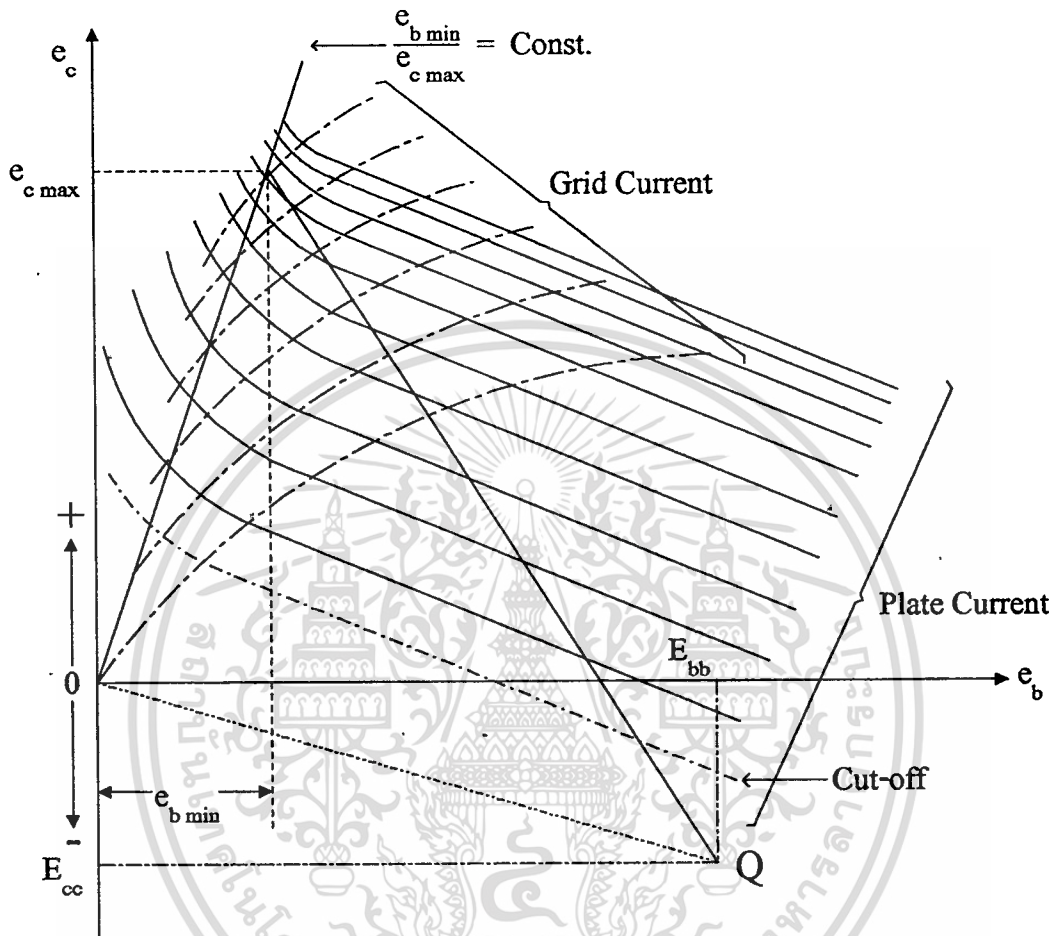
3. การวิเคราะห์ด้วยกราฟกระแสตกที่สำหรับวงจรรขยายกำลังขึ้นๆ; กราฟความสัมพันธ์กระแสตกที่ (Constant-current Characteristics Curve) ของหลอดไตรโอดสามารถแสดงแนวทางการทำงานของอุปกรณ์ด้วยแนวเส้นการทำงาน (Operating Line) ที่เป็นเส้นตรงซึ่งก่อให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ความเป็นเชิงเส้นของแนวเส้นการทำงานของหลอดไตรโอดสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} e_c &= E_{cc} + E_{gm} \cos \omega t \\ e_b &= E_{bb} - E_{p1m} \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

จัดสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปอัตราส่วน เพราะฉะนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 42



แสดงการวางแนวเส้นทำงานของหลอดไตรโอดบนกราฟกระแสตรงที่

$$\frac{e_c}{E_{gm}} = \frac{E_{cc}}{E_{gm}} + \cos \omega t$$

$$\frac{e_b}{E_{p1m}} = \frac{E_{bb}}{E_{p1m}} - \cos \omega t$$

รวมสมการทั้งสองเข้าด้วยกัน ได้ผลดังนี้

$$\frac{e_c}{E_{gm}} + \frac{e_b}{E_{p1m}} = \frac{E_{cc}}{E_{gm}} + \frac{E_{bb}}{E_{p1m}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการที่ได้เพื่ออธิบายในรูปแบบสมการเชิงเส้น ได้ดังสมการ (5.26)

$$e_c = -\frac{E_{gm}}{E_{p1m}} e_b + E_{cc} + \frac{E_{gm}}{E_{p1m}} E_{bb} \quad (5.26)$$

สมการที่ได้นี้อยู่ในลักษณะของสมการเชิงเส้นตัดแกนแนวตั้งซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 42

การกำหนดแนวทางการทำงานของหลอดไตรโอดนั้น ขั้นแรกจะต้องกำหนดขอบเขตการทำงานเพื่อที่จะให้ขอบเขตการทำงานเป็นตัวควบคุมย่านการทำงานของหลอดไตรโอดโดยตัวกำหนดขอบเขตการทำงานของหลอดไตรโอดถูกกำหนดขึ้นด้วยพารามิเตอร์ต่อไปนี้คือ  $E_{bb}$ ,  $E_{cc}$ ,  $e_{b \min}$  และ  $e_{c \max}$  เมื่อพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกกำหนดขึ้นแล้วก็จะพอทำให้ทราบแนวทางการทำงานของวงจรขยายกำลังซึ่งสามารถอธิบายในรูปกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 43

4. กระแสกริดและกระแสแอโนดของวงจรขยายกำลังชั้นซี; ค่าเฉลี่ยและค่า rms ของกระแสกริดและกระแสแอโนดสามารถสรุปได้จากรูปพัลส์กระแสแอโนดและกระแสกริดที่ได้จากกราฟกระแสคองที่ จากภาพที่ 40 จะพบว่า พัลส์กระแสแอโนดและกระแสกริดจะมีคุณลักษณะสมมาตรตามแนวแกน Y ซึ่งสามารถอธิบายในรูปลำดับฟูรีเยร์ในทอมโคไซน์ดังสมการ (5.27)

$$\left. \begin{aligned} i_b &= I_b + I_{p1m} \cos \omega t + I_{p2m} \cos 2\omega t + \dots \\ i_c &= I_c + I_{g1m} \cos \omega t + I_{g2m} \cos 2\omega t + \dots \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

กระแสแอโนดในส่วนกระแสตรงสามารถอธิบายในรูปความสัมพันธ์

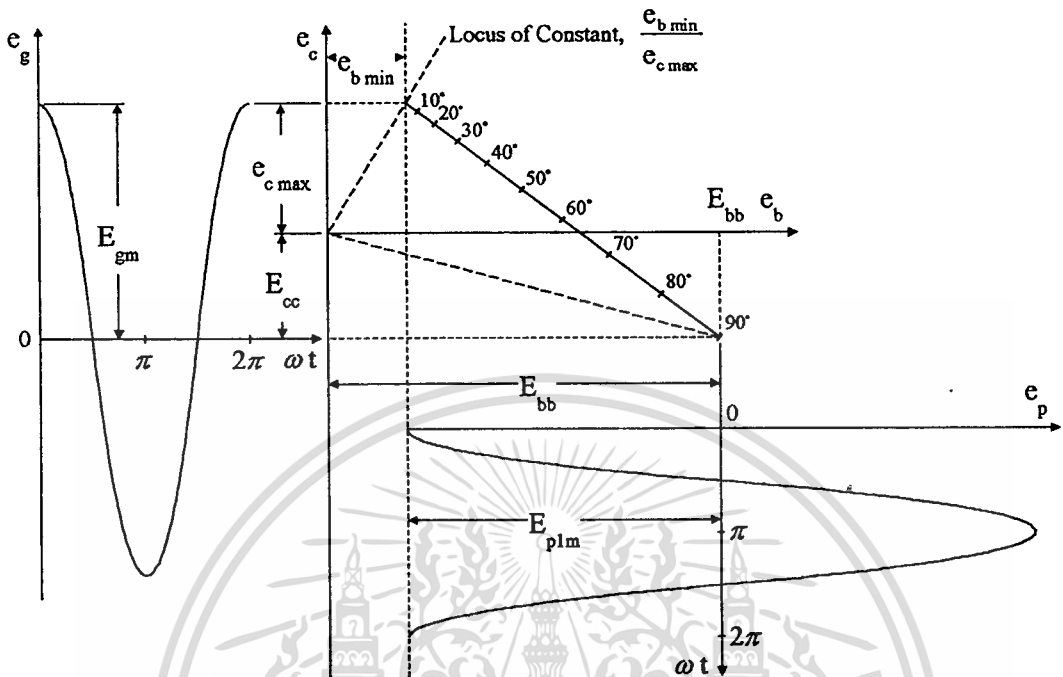
$$I_b = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_b d(\omega t)$$

จากคุณลักษณะสมมาตรตามแนวแกน Y ของพัลส์กระแสแอโนดและพัลส์กระแสกริดในช่วงมุมนำกระแส  $\theta_b$  เพราะฉะนั้นจึงได้รูปความสัมพันธ์

$$I_b = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_b} i_b d(\omega t) \quad (5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 43



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแนวเส้นทำงานกับสัญญาณกริดและสัญญาณแอโนดของหลอดไตรโอด

สมการ (5.28) ที่ได้นี้ เป็นการอินทิเกรตได้รูปพัลส์กระแสแอโนดซึ่งได้ผลการอินทิเกรตดังนี้

$$I_b = \frac{1}{n} \left[ \frac{i_b(0)}{2} + \sum_{k=1,2,3,\dots} i_b \left( \frac{k\pi}{n} \right) \right] \quad (5.29)$$

เมื่อ  $i_b(k\pi/n)$  คือปริมาณกระแสแอโนดที่มุม  $k\pi/n$

กระแสกริดในส่วนกระแสตรงก็สามารถประเมินได้จากกราฟของพัลส์กระแสกริดดังนี้

$$I_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_c d(\omega t)$$

จากคุณลักษณะสมมาตรตามแนวแกน Y ของพัลส์กระแสกริดและพัลส์กระแสเกิดในช่วงมุนนำกระแส  $\theta_c$  ซึ่งจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_c = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_c d(\omega t) \quad (5.30)$$

เพราะฉะนั้นจึงได้

$$I_c = \frac{1}{n} \left[ \frac{i_c(0)}{2} + \sum_{k=1,2,3,\dots} i_c \left( \frac{k\pi}{n} \right) \right] \quad (5.31)$$

แอมพลิจูดของกระแสแอนโอดที่ความถี่มูลฐานสามารถพิจารณาได้จากสมการลำดับฟูรีเยร์ของกระแสคังสมการ

$$I_{p1m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_b \cos \omega t d(\omega t)$$

เนื่องจากคุณสมบัติสมมาตรตามแนวแกน Y ของสมการ ดังนั้น

$$I_{p1m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_b \cos \omega t d(\omega t) \quad (5.32)$$

รูปสมการอินทิกรัลที่ได้นี้ สามารถอธิบายในรูปแบบสมการผลรวมโดยวิธีการที่ได้พิจารณาไปแล้วข้างต้นดังนี้

$$I_{p1m} = \frac{2}{n} \left[ \frac{i_b(0) \cos 0}{2} + \sum_{k=1,2,3,\dots} i_b \left( \frac{k\pi}{n} \right) \cos \frac{k\pi}{n} \right] \quad (5.33)$$

แอมพลิจูดของกระแสกริดที่ความถี่มูลฐานสามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกับกระแสแอนโอดที่ความถี่มูลฐาน

$$I_{g1m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_c \cos \omega t d(\omega t)$$

จากคุณสมบัติสมมาตรตามแนวแกน Y ของสมการ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{g1m} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\theta_v/2} i_c \cos \omega t d(\omega t) \quad (5.34)$$

เนื่องจากกระแสกริดเกิดขึ้นในช่วงแคบๆ ของไซเคิล ดังนั้นจึงส่งผลให้  $\cos \omega t$  มีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้นสมการ (5.34) จึงสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$I_{g1m} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\theta_v/2} i_c d(\omega t)$$

ดังนั้นจึงได้รูปสมการกระแสกริดที่ความถี่มูลฐาน

$$I_{g1m} = 2I_c \quad (5.35)$$

5. การพิจารณาด้านกำลังงานของวงจรขยายกำลังชั้นซี; กำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายจากแหล่งกำเนิดตัววงจรแอนโอดจะมีค่าเท่ากับกำลังงานเฉลี่ยที่วงจรแอนโอดจ่ายให้กับระบบเมื่อไม่คิดค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานแฝงที่แอนโอดคงความสัมพันธ์

$$P_{bb} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{bb} i_b d(\omega t) = E_{bb} i_b \quad (5.36)$$

กำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายจากวงจรแอนโอดในส่วนที่เป็นกระแสความถี่มูลฐานสามารถอธิบายได้ดังความสัมพันธ์

$$P_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_p i_p d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{p1m} \cos \omega t I_{p1m} \cos \omega t d(\omega t)$$

เพราะฉะนั้นจึงได้

$$P_L = \frac{E_{p1m} I_{p1m}}{2} = E_{p1} I_{p1} \quad (5.37)$$

เมื่อ  $E_{p1}$  คือค่า rms. ของ  $E_{p1m}$

ดังนั้นประสิทธิภาพของวงจรแอมโพลีสามารถอธิบายได้ดังสมการ (5.38)

$$\eta_p = \frac{P_L}{P_{bb}} \times 100\% = \frac{E_{p1} I_{p1}}{E_{bb} I_b} \times 100\% \quad (5.38)$$

จากความสัมพันธ์ จะเห็นว่าประสิทธิภาพของวงจรแอมโพลีจะขึ้นอยู่กับค่า  $e_{b \min}$  เนื่องจาก  $E_{bb}$  และ

$E_{p1m}$  มีความสัมพันธ์กับ  $e_{b \min}$

กำลังงานสูญเสียที่แอมโพลี สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$P_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_b i_b d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (E_{bb} - e_p) i_b d(\omega t)$$

ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (5.39)

$$P_p = E_{bb} I_b - E_{p1} I_{p1} = P_{bb} - P_L \quad (5.39)$$

แทนค่าสมการที่ได้นี้เข้ากับสมการ (5.38) เพราะฉะนั้นจึงได้

$$P_p = (1 - \eta_p) P_{bb} \quad (5.40)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (5.40) จะพบว่ากำลังงานสูญเสียที่แอมโพลีจะลดลงในขณะที่กำลังงานที่จ่ายออกสู่โหลดเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณกำลังงานจ่ายเข้าสู่แอมโพลีระดับหนึ่ง

กำลังงานเฉลี่ยที่จ่ายสู่กริดจากแหล่งจ่าย สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$P_g = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_g i_c d(\omega t)$$

เนื่องจากกระแสกริดจะเกิดขึ้นในช่วงที่ระดับแรงดันขั้วขั้วของกริดมีค่าสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถอธิบายสมการข้างต้นได้ดังนี้

$$P_g = E_{gm} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_c d(\omega t)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$P_g = E_{gm} i_c \quad (5.41)$$

กำลังงานสูญเสียเฉลี่ยที่กริด สามารถอธิบายได้ในรูปความสัมพันธ์

$$P_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_c i_c d(\omega t)$$

ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปความสัมพันธ์

$$P_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (E_{cc} + e_g) i_c d(\omega t) = E_{cc} I_c + E_{gm} I_c \quad (5.42)$$

จากสมการ (5.42) เนื่องจากเทอมแรกเป็นค่ากำลังงานสูญเสียกับอุปกรณ์สร้างแรงดันไบแอสกริด และเนื่องจาก

$$P_{cc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{cc} i_c d(\omega t) = E_{cc} i_c \quad (5.43)$$

เนื่องจาก  $E_{cc}$  มีค่าเป็นลบ ดังนั้นสมการกำลังงานสูญเสียที่กริดจึงสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$P_c = P_g - |P_{cc}| \quad (5.44)$$

6. สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบวงจรขยายกำลังชั้นซีโดยไตรโอด; วิธีการพิจารณาที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นนี้เป็นการพิจารณาที่กระทำหลังจากโลคัสหรือแนวทางการทำงานของวงจรขยายกำลังได้ถูกกำหนดไว้แล้ว ในสภาพการใช้งานจริง การออกแบบระบบนั้นจะต้องถูกควบคุมด้วยข้อจำกัดซึ่งต้องพิจารณาในรูปของทางเลือกทั้งในเรื่องของขนาดอุปกรณ์แอททีฟที่ใช้และในเรื่องที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวกับสถานะของระบบซึ่งจะเป็นตัวควบคุม โลกซ์ที่จะกำหนดขึ้นเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่ต้องการ เช่น ประสิทธิภาพของวงจรแอมป์ ดั้งนั้นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบจำนวนหนึ่งจึงต้องถูกนำมาพิจารณาดังต่อไปนี้;

1) กระแสสูญญากาศ (Space Current) หรือกระแสแคโอดสูงสุด ซึ่งจะต้องควบคุมมิให้ใช้งานเกินพิสัยของหลอดไตรโอด โดยปกติปริมาณกระแสแคโอดจะถูกควบคุมโดยค่า  $e_{b \min}$  และ  $e_{c \max}$  ดังความสัมพันธ์ของกระแสแคโอดดังนี้;

$$I_{s \max} = I_{b \min} + I_{c \max}$$

$$= f(e_{b \min}, e_{c \max})$$

2) แรงดันสัญญาณต่ำสุดของแอมป์,  $e_{b \min}$

3) แรงดันสัญญาณสูงสุดของกริด,  $e_{c \max}$

4) มุมนำกระแสของแอมป์,  $\theta_b$

5) มุมนำกระแสของกริด,  $\theta_c$

6) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไบแอสแอมป์,  $E_{bb}$

หัวข้อที่ 1 การใช้งานหลอดไตรโอดในรูปอุปกรณ์แอมป์ การดึงกระแสจากแอมป์จะถูกควบคุมให้อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยโดยอัตโนมัติเนื่องจากแคโอดจะให้กำเนิดกระแสสูญญากาศในปริมาณจำกัด อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานแม้บางครั้งอาจดึงกระแสจากแคโอดได้จนถึงจุดอิ่มตัว แต่ก็เป็นไปได้เฉพาะหลอดไตรโอดที่แคโอดผลิตจากทั้งเสตนบริสุทธิ์เท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบจึงควรคำนึงถึงชนิดของแคโอดที่เป็นส่วนประกอบของตัวอุปกรณ์ด้วย

หัวข้อที่ 2 และ 3 ค่าต่ำสุดของระดับแรงดันสัญญาณแอมป์,  $e_{b \min}$  และค่าสูงสุดของระดับแรงดันสัญญาณกริด,  $e_{c \max}$  จะมีบทบาทในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 1 คือจะส่งผลต่อปริมาณกระแสแคโอดซึ่งจะต้องควบคุมมิให้เกินพิสัย ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณกระแสแคโอดสูงสุดจะต้องเกิดขึ้นที่  $\omega t = 0$  ซึ่งหมายความว่า จะต้องระมัดระวังมิให้ระดับแรงดันสัญญาณขับมีค่าสูงเกินจนกระทั่งส่งผลให้กระแสแคโอดลดลงอย่างรวดเร็วที่  $\omega t = 0$  ปรัชญาการเช่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยควบคุมให้  $e_{b \min} > e_{c \max}$  โดยส่วนใหญ่อัตราส่วน  $e_{b \min}/e_{c \max}$  จะถูกกำหนดในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อที่ 4 ช่ว่นำกระแสของแอมโพลีหรือมุมนำกระแสของแอมโพลี,  $\theta_b$ , ซึ่งจะมีอิทธิพลกับทั้งปริมาณกระแสแอมโพลี,  $I_b$ , และแอมพลิจูดของกระแสแอมโพลีที่ความถี่มูลฐาน,  $I_{p1m}$ , เมื่อ  $\theta_b$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แอมพลิจูดของกระแสแอมโพลีที่ความถี่มูลฐานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในแง่ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแอมโพลีจะพบว่า  $\theta_b$  ยังมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแอมโพลีลดลง ดังนั้นในการพิจารณาค่ามุมนำกระแสของแอมโพลีจึงต้องพิจารณาควบคู่กันระหว่างกำลังงานที่จ่ายออกและประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแอมโพลี โดยทั่วไปค่ามุมนำกระแสของแอมโพลีที่นิยมสำหรับวงจรขยายกำลังซึ่งจะอยู่ในช่วง 120 ถึง 150 องศา ซึ่งจะสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแอมโพลีในช่วง 60 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพารามิเตอร์ที่เป็นทางเลือกเช่น  $I_s$ ,  $e_{b\min}$ ,  $e_{c\max}$  และ  $\theta_b$  ได้ถูกกำหนดขึ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการพิจารณาในส่วนของวงจรกริดโดยการพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์ของระดับแรงดันกริดไบแอส,  $E_{cc}$ , และมุมนำกระแสของกริด,  $\theta_c$ , ในเทอมของพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้แล้ว ในส่วนของการพิจารณาสมการความสัมพันธ์ของแรงดันกริดไบแอสนั้น ในขั้นแรกจะพิจารณาในประเด็นที่กระแสแอมโพลีมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ  $\omega t = \theta_b/2$  ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ของสัญญาณกริดดังสมการ (5.45)

$$e_g = E_{gm} \cos \omega t = E_{gm} \cos \frac{\theta_b}{2} \quad (5.45)$$

นอกจากนี้ ที่จุดนี้ยังสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์  $e_c + e_b/\mu = 0$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณกระแสแอมโพลียังสามารถอธิบายได้ในรูปฟังก์ชัน  $i_b = f(e_c + e_b/\mu)$  และที่  $i_b$  มีค่าเป็นศูนย์,  $e_c + e_b/\mu$  ก็ต้องมีค่าเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$E_{gm} \cos \frac{\theta_b}{2} + E_{cc} + \frac{1}{\mu} \left( E_{bb} - E_{p1m} \cos \frac{\theta_b}{2} \right) = 0$$

เมื่อกำหนดให้

$$e_{c\max} = E_{cc} + E_{gm}$$

$$e_{b \min} = E_{bb} - E_{p1m}$$

แทนค่าลงในสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$(e_{c \max} - E_{cc}) \cos \frac{\theta_b}{2} + E_{cc} + \frac{1}{\mu} \left[ E_{bb} - (E_{bb} - e_{b \min}) \cos \frac{\theta_b}{2} \right] = 0$$

ดังนั้น จึงได้รูปสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไบแอสกริดดังสมการ (5.46)

$$E_{cc} = \frac{-E_{bb}}{\mu} + \left( e_{c \max} + \frac{e_{b \min}}{\mu} \right) \frac{\cos(\theta_b/2)}{\cos(\theta_b/2) - 1} \quad (5.46)$$

เมื่อพิจารณาในส่วนของมุนำกระแสของกริด โดยพิจารณาจากหลักการที่ว่ากระแสกริดจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ  $\omega t = \theta_c/2$  ดังนั้น จึงได้รูปสมการความสัมพันธ์

$$e_c = E_{gm} \cos \frac{\theta_c}{2} + E_{cc} = 0$$

ในที่สุด จะได้รูปแบบสมการความสัมพันธ์ของมุนำกระแสกริดดังสมการ (67)

$$\cos \frac{\theta_c}{2} = -\frac{E_{cc}}{E_{gm}} \quad (5.47)$$

เมื่อ  $E_{cc}$  ได้จากสมการ (5.46)

## บทที่ 6

### การชุบผิวแข็งวัสดุโดยประยุกต์การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

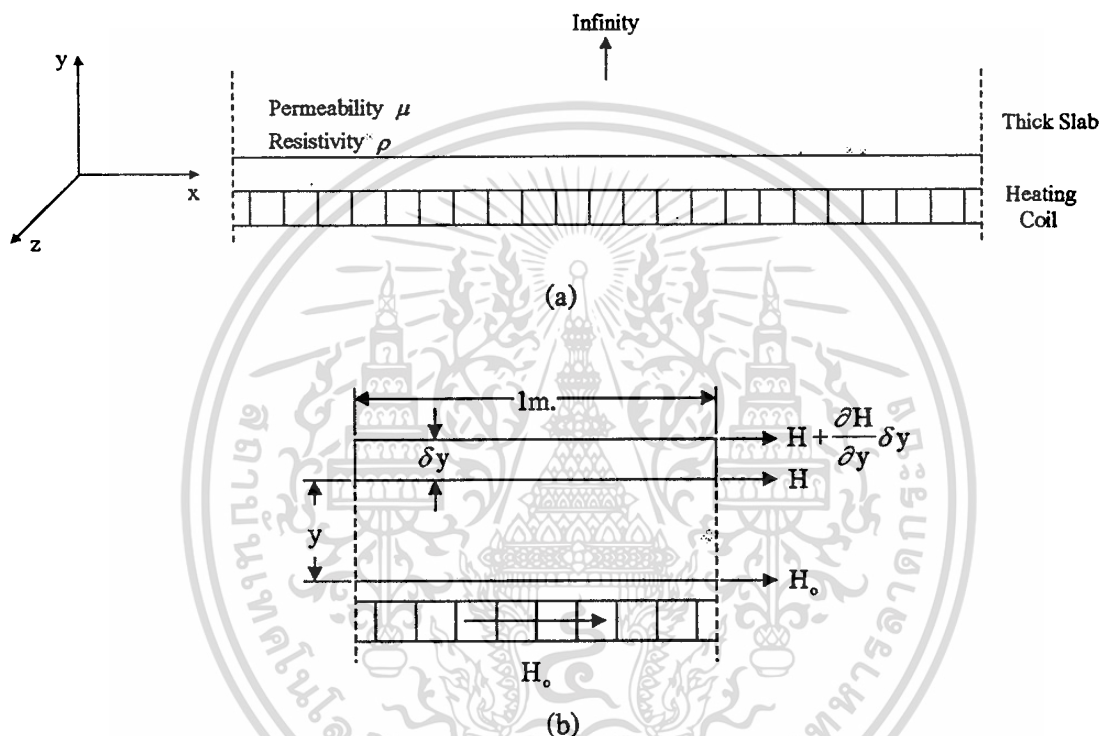
เนื้อหาในบทนี้จะพิจารณาเกี่ยวกับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) เพื่อการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้เกิดความร้อนสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการชุบผิวแข็งวัสดุ โดยจะกล่าวถึงผลจากสนามแม่เหล็กกับวัสดุชุบผิวแข็งดังนี้คือ, การกระจายของฟลักซ์แม่เหล็ก, กระแสไหลวนที่เกิดจากอิทธิพลสนามแม่เหล็กและการกระจายกำลังงาน โดยจะพิจารณาในหลักการควบคู่กับสมการคณิตศาสตร์อ้างอิงกับรูปทรงวัสดุแบบแผ่นความหนากิ่งอนันต์ สมการประกอบการพิจารณาจะอธิบายในรูปฟังก์ชันไซน์และรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ความเข้าใจในสมการคณิตศาสตร์พื้นฐานในรูปแบบที่ใช้กับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์จะเป็นพื้นฐานสำหรับการพิจารณากับวัสดุรูปทรงอื่นๆ นอกเหนือจากรูปทรงแบบแผ่นความหนากิ่งอนันต์<sup>[5]</sup>

#### การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์

1. ปรากฏการณ์ "สกินเอฟเฟ็กต์" (Skin Effect) กับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์; ปรากฏการณ์ทางสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะพิจารณาอ้างอิงกับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์โดยมองให้อยู่ในลักษณะของทรงกระบอกที่มีคาร์ซีมีมากๆ เหตุผลประการหนึ่งสำหรับการพิจารณาโดยอ้างอิงกับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์ก็คืออ้างอิงกับวัสดุบาง (Thin Slab) กระแสที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นวัสดุจะส่งผลกระทบซึ่งและกันส่งผลให้ผลการคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการพิจารณาอ้างอิงกับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์จึงมีความเหมาะสมกว่า นอกจากนี้ความหนาของวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์ยังสามารถสมมติให้มีค่ามากกว่าความลึกจากผิวที่กระแสไหลวนใช้ในการไหล (Skin Depth) มากๆ ได้เพื่อความสมบูรณ์ในการพิจารณา ภาพที่ 44 เป็นภาพของวัสดุชุบผิวแข็งที่ถูกสมมติให้วางตัวใกล้กับผิวของขดลวดให้ความร้อนมาก และจากที่กล่าว

ในตอนแรก ลักษณะการวางตัวของวัสดุแผ่นนี้สามารถแทนพื้นผิวทรงกระบอกที่มีรัศมีมากๆ ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยขดลวดให้ความร้อนดังภาพที่ 44(a) จากภาพ ระยะในแนวแกน X ยังไม่มีความสำคัญต่อการพิจารณา ส่วนภาพที่ 44(b) ได้พิจารณาโดยกำหนดให้ระยะในแนวแกน X ของขดลวดให้ความร้อนและวัสดุแผ่นมีค่าเท่ากันคือ 1 เมตร

ภาพที่ 44



แสดงภาพตัดขวางตามแนวยาวของขดลวดให้ความร้อนกับวัสดุแผ่นความหนาที่อนันต์ ในภาพที่ 44(a) ส่วนภาพที่ 44(b) แสดงภาพตัดขวางของขดลวดในภาพที่ 44(a) เมื่อกำหนดขนาด

ขดลวดให้ความร้อนจะทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ผิวของวัสดุแผ่น ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกับวัสดุแผ่น สิ่งที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำก็คือระดับแรงดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนขดลวดให้ความร้อน จากภาพที่ 44 การพิจารณาจะสมมติให้ขดลวดให้ความร้อนถูกวางชิดกับผิวของวัสดุแผ่นมาก ดังนั้นในการพิจารณาจึงอาจสมมติได้ว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดให้ความร้อนมีค่าเท่ากับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวของวัสดุแผ่น

ภาพที่ 44 สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน X จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน Z

สมการสนามแม่เหล็ก,  $H$ , จากภาพที่ 44 สามารถอธิบายได้ดังสมการ (6.1) ดังนี้

$$H_{x(y=0)} = H_{om} \cos \omega t \quad (6.1a)$$

$$\left. \begin{array}{l} H_y \\ H_z \end{array} \right\} = 0 \quad \text{ในทุกบริเวณ} \quad (6.1b)$$

เมื่อ  $H_{om}$  คือค่าสูงสุดของ  $H_x$  ที่บริเวณผิวของวัสดุแผ่น ( $y = 0$ )

การกระจายของสนามแม่เหล็ก, ( $H$ ), สนามไฟฟ้า, ( $E$ ), และความเข้มกระแส, ( $J$ ), ในวัสดุที่ความถี่ต่ำ สามารถอธิบายในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลดังนี้

$$\nabla^2 H = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H}{\partial t}; \quad \nabla^2 E = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t}; \quad \nabla^2 J = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial J}{\partial t} \quad (6.2)$$

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

เมื่อ  $H_y = H_z = 0$ , ดังนั้น  $H = H_x$  เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน X และแกน Z, จาก  $\nabla^2 H = \partial^2 H_x / \partial y^2$  จะได้

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (6.3)$$

ทำการแก้สมการ (6.3) จะได้  $H_x = H_x(y) \cos \omega t$ , เมื่อ  $H_x(y)$  คือฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของ  $H_x$  ตามระดับความลึกจากผิววัสดุในแนวแกน Y ซึ่งสามารถอธิบายในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียลโดยนำส่วนจริงของ  $H_x(y) \exp(j\omega t)$  มาพิจารณาแล้วแทนค่าในสมการ (6.2)

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} - \frac{\mu}{\rho} j\omega H_x = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - k^2 H_x = 0$$

เมื่อกำหนดให้  $k^2 = 2j\alpha^2$ , จากนั้นทำการแก้สมการ ได้ค่า  $H_x$  ดังนี้

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

ค่า  $A_1$  และ  $A_2$  สามารถหาได้โดยเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition), เมื่อ  $y = \infty$ ,  $H_x$  มีค่าจำกัดที่ระดับหนึ่งและ  $A_1 = 0$  เมื่อ  $y = 0$ ,  $H_x = H_{om} \exp(j\omega t)$  จะได้

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

เมื่อ  $\sqrt{2j} = 1+j$ , ดังนั้น

$$\begin{aligned} H_x(y) &= H_{om} \exp[-(1+j)\alpha y + j\omega t] \\ &= H_{om} \exp(-\alpha y) \exp[j(\omega t - \alpha y)] \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนจริงของสมการ

$$H_x(y) = H_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (6.4)$$

สมการที่ได้นี้เป็นสมการพื้นฐานที่สำคัญที่จะนำไปพิจารณาต่อไป

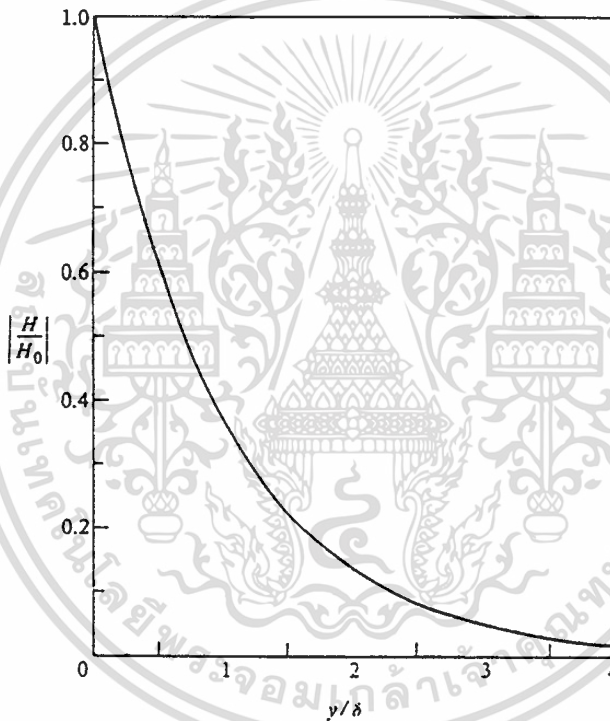
ในส่วนองระดับความลึกจากผิววัสดุที่กระแสไหลวนไหล (Skin Depth) สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่ก่อให้เกิดกระแสไหลวนบริเวณผิวตัวนำมีลักษณะสำคัญ 2 ประการคือ

1. ที่ผิวของตัวนำหรือที่  $y = 0$ ,  $H_x = H_{om} \cos \omega t$ , ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการ (6.1)
2. ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิววัสดุ ขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กจะลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลส่วนความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ระดับความลึกต่างๆ จะคงไว้ที่ระดับเดียวกับที่ผิววัสดุ แต่จะตามเฟสสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุด้วยมุม  $\alpha y$

ภาพที่ 45



แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก,  $H$ , โดยเทียบกับระดับความลึกจากผิววัสดุของกระแสไหลวน,  $\delta$ , ซึ่งมีค่าดังสมการ (6.5)

ที่  $y = 1/\alpha$  ขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กจะลดลงเป็น  $e^{-1}$  ของขนาดผิววัสดุ ในขณะที่เดียวกันเฟสของสนามแม่เหล็กจะต่างเฟสกับเฟสของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุ 1 เรเดียน ที่ระดับความลึกจากผิวซึ่งมีขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็น  $1/e$  หรือเท่ากับ 0.368 เท่าของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุ ระดับความลึกระดับนี้มีชื่อว่า “ระดับความลึกสำหรับการไหลของกระแสบริเวณผิวตัวนำ” (Skin Depth หรือ Depth Of Penetration,  $\delta$ ) หรืออาจเรียกว่าค่าความลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส ส่วนที่ความลึกจากผิวในระดับต่างๆ นั้นค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลดังในภาพที่ 45 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิววัสดุเทียบกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุที่ระดับความลึกจากผิวในรูปต่อหน่วยของค่าความลึกกระแส

เมื่อกำหนดให้  $\alpha^2 = \mu\omega/2\rho$  ดังนั้น

$$\text{Skin Depth หรือ Depth Of Penetration, } \delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (6.5)$$

เมื่อ  $\mu = \mu_r \mu_0$

ดังนั้นค่าความลึกกระแสจึงแปรผันตรงกับ  $\sqrt{\text{resistivity}}$ ,  $1/\sqrt{\text{permeability}}$  และ  $1/\sqrt{f}$

2. ความหนาแน่นกระแส (Current Density,  $J$ ), ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux Density,  $B$ ) และสนามไฟฟ้า (Electric Field,  $E$ ); จากสมการ (6.4) และรูปแบบความสัมพันธ์พื้นฐานของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก,  $B = \mu H$ , สมมติให้เนื้อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นทางแม่เหล็ก ดังนั้น

$$B_x(y) = B_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (6.6)$$

ความสัมพันธ์,  $J = \text{curl } H$ , สามารถนำมาพิจารณาค่าความเข้มกระแสที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวของวัสดุแผ่นได้โดยพิจารณาประกอบกับดิฟเฟอเรนเชียลของความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  ดังนี้

i	j	k
$\frac{\partial}{\partial x}$	$\frac{\partial}{\partial y}$	$\frac{\partial}{\partial z}$
$H_x$	$H_y$	$H_z$

เมื่อพิจารณาภาพที่ 44 จะพบว่าวัสดุแผ่นปราศจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในแนวแกน X และ Z หรือ  $H_x = H_z = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_z = \text{curl } H = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$J_z = -k \frac{\partial H_x}{\partial y} = k \left\{ -\exp(j\omega t) \left[ \frac{\partial}{\partial y} \exp(-\alpha y \sqrt{2j}) \right] \right\} H_{om} \quad (\text{ส่วนจริง})$$

$$= k \left[ \alpha \sqrt{2j} \exp(-\alpha y \sqrt{2j} + j\omega t) \right] H_{om} \quad (\text{ส่วนจริง})$$

แต่  $\sqrt{2j} = 1+j = \sqrt{2} \exp(j\pi/4)$ , ดังนั้น

$$\begin{aligned} J_z &= k \left\{ \alpha \sqrt{2} \exp[-\alpha y(1+j) + j\omega t + j\pi/4] \right\} H_{om} \\ &= k\alpha \sqrt{2} H_{om} \left[ \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y + \pi/4) \right] \end{aligned} \quad (6.7)$$

จากสมการ (6.7) จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านแผ่นวัสดุจะมีทิศตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กแต่จะต่างเฟสกับเฟสของสนามแม่เหล็ก 45 องศา  
เมื่อพิจารณาที่ผิวของวัสดุแผ่นหรือที่ตำแหน่ง  $y=0$ , จะได้

$$J_{zo} = \sqrt{2} H_{om} \alpha \exp[j(\omega t + \pi/4)] = \sqrt{2} H_{xo} \alpha \exp(j\pi/4)$$

จากนั้นพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มกระแสตามแนวแกน Y, ซึ่งจะได้ผลดังสมการ (6.8)

$$J_z(y) = J_{om} \exp(j\omega t - \alpha y \sqrt{2j}) = J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (6.8)$$

สมการ (6.8) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนของค่าความเข้มกระแสก็คล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่ปรากฏที่ผิวของวัสดุแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบความสัมพันธ์  $E = \rho J$ , ดังนั้น

$$E_z = \rho J_z = \rho J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) \quad (6.9)$$

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด (H, B, J และ E) จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามปรากฏการณ์สกินเอฟเฟ็กต์โดยการพิจารณานั้นจะเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จากนั้นนำไปสู่ความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ

3. กระแสรวม; การหาปริมาณกระแสโดยรวมหรือกระแสรวมในระยะ 1 เมตร ตามแนวแกน X ของแผ่นวัสดุเมื่ออ้างอิงกับภาพที่ 44(a) สามารถทำได้โดยอินทิเกรตความเข้มกระแสดตามความหนาของแผ่นวัสดุดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกระแสในช่วงความกว้าง 1 เมตรของวัสดุแผ่น} &= \int_0^{\infty} J_z dy (\times 1) \\ &= \int_0^{\infty} J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) dy \\ &= J_{om} \text{ Real part of } \int_0^{\infty} \exp[j\omega t - (1+j)\alpha y] dy \\ &= J_{om} \text{ Real part of } \left[ \frac{\exp[j\omega t - (1+j)\alpha y]}{-(1+j)\alpha} \right]_{y=0}^{y=\infty} \\ &= J_{om} \text{ Real part of } \frac{\exp(j\omega t)}{(1+j)\alpha} = \frac{J_{om}}{\alpha} \frac{\exp(j\omega t)}{\sqrt{2} \exp(j\pi/4)} \\ &= \frac{J_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cos(\omega t - \pi/4) \end{aligned} \quad (6.10)$$

ซึ่งจะเห็นได้จากสมการว่ากระแสโดยรวมต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของวัสดุแผ่นจะตามเฟสของความเข้มกระแสที่ผิววัสดุแผ่นเป็นมุม 45 องศา แต่จากสมการ (6.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ปริมาณกระแสรวมต่อหน่วยความกว้างของวัสดุแผ่น

$$\begin{aligned} &= (\sqrt{2}H_{om}\alpha \exp j(\pi/4)) \frac{\exp(\omega t - j\pi/4)}{\sqrt{2}\alpha} \\ &= H_{om} \exp(j\omega t) \end{aligned} \quad (6.11)$$

จากสมการ (6.11) จะเห็นว่าปริมาณกระแสต่อหน่วยความกว้างของวัสดุแผ่นมีค่าเท่ากับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุแผ่น  $|I| = |H_{om}|$  เมื่อ  $I$  แทนปริมาณกระแสโดยรวมต่อหน่วยความกว้างของแผ่นวัสดุ ขณะเดียวกันเฟสของปริมาณทั้งสองนี้ยังตรงกันอีกด้วย

### กำลังงานและฟลักซ์กับวัสดุแผ่นความหนาถึงอนันต์

1. กำลังงานสูญเสีย; ปริมาณกำลังงานสูญเสียต่อตารางเมตรของพื้นที่ผิววัสดุ,  $\mathcal{P}$ , ที่เป็นตัวนำใดๆ สามารถประเมินได้จากการอินทิเกรต  $\rho J^2$  ทั่วทั้งปริมาตรในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

$$\mathcal{P} = \int_0^{\infty} \rho J^2 dy (\times 1 \times 1)$$

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

ในส่วนของการอินทิเกรตเทอม  $(\cos^2)$  นั้น สามารถแทนด้วยการประเมินค่าตามหลักความจริงที่ว่าค่ากลางของฟังก์ชันไซน์ยกกำลังสองมีค่าเป็น  $1/2$  ที่ค่า  $y$  ใดๆ โดยที่  $\alpha y$  แทนระดับการเปลี่ยนแปลงเฟสและไม่ส่งผลกระทบต่อผลอินทิเกรตได้ ดังนั้นกำลังงานสูญเสียต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตรของวัสดุแผ่นจึงสามารถอธิบายได้ดังนี้

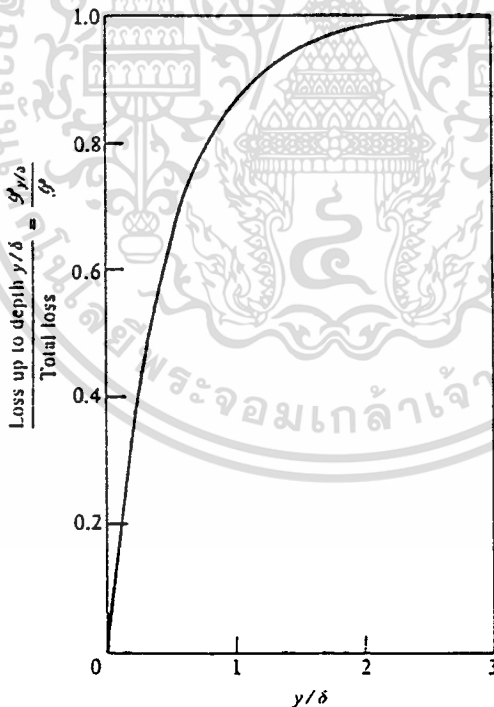
$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\rho J_{om}^2}{2} \int_0^{\infty} \exp(-2\alpha y) dy \\ &= \frac{\rho J_{om}^2}{4\alpha} = \frac{\rho J_{om}^2 \delta}{4}\end{aligned}\quad (6.12)$$

เนื่องจาก  $|J_{om}| = \sqrt{2}|H_{om}|\alpha = \sqrt{2}|H_{om}|/\delta$ , ดังนั้น

$$\phi = \frac{\rho H_{om}^2}{2\delta} = \frac{\rho H_o^2}{\delta}\quad (6.13)$$

เมื่อ  $H_o$  คือค่า r.m.s. ของ  $H$  ที่ผิววัสดุแผ่น

ภาพที่ 46



แสดงการกระจายกำลังงานสูญเสียตามระดับความลึกจากผิววัสดุ

การกระจายปริมาณกำลังงานสูญเสียตามระดับความลึกจากผิววัสดุแผ่น จะเป็นไปอย่างไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สม่ำเสมอ ดังนั้นการประเมินปริมาณกำลังงานสูญเสียต่อหน่วยจึงสามารถทำได้โดยการเทียบปริมาณกำลังงานสูญเสียที่ต้องการประเมินจากผิววัสดุถึงระดับความลึกใดๆ กับปริมาณกำลังงานสูญเสียมากที่สุดซึ่งประเมินจากผิววัสดุแผ่นถึงระดับความลึกเป็นอนันต์ดังนี้

$$\frac{P_y}{P} = \frac{\text{Loss up to depth } y}{\text{Total loss}} = \frac{\left[ \exp(-2\alpha y) \right]_0^y}{\left[ \exp(-2\alpha y) \right]_0^\infty} = \frac{\exp(-2\alpha y) - 1}{0 - 1} = 1 - \exp(-2\alpha y) \quad (6.14)$$

ที่  $y = 1/\alpha = \delta$ , ดังนั้น

$$\frac{P_y}{P} = 1 - \exp(-2) = 1 - 0.135 = 0.865$$

และที่  $y = 2/\alpha = 2\delta$ , ดังนั้น

$$\frac{P_y}{P} = 1 - \exp(-4) = 1 - 0.018 = 0.982$$

สมการ (6.14) ที่ได้ทำการพิสูจน์นี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณกำลังงานสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงระยะความลึกกระแสไหลวน (One Skin Depth,  $\delta$ ) และปริมาณกำลังงานสูญเสียเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกิดขึ้นหลังช่วงสองระยะความลึกกระแสไหลวน ( $2\delta$ )

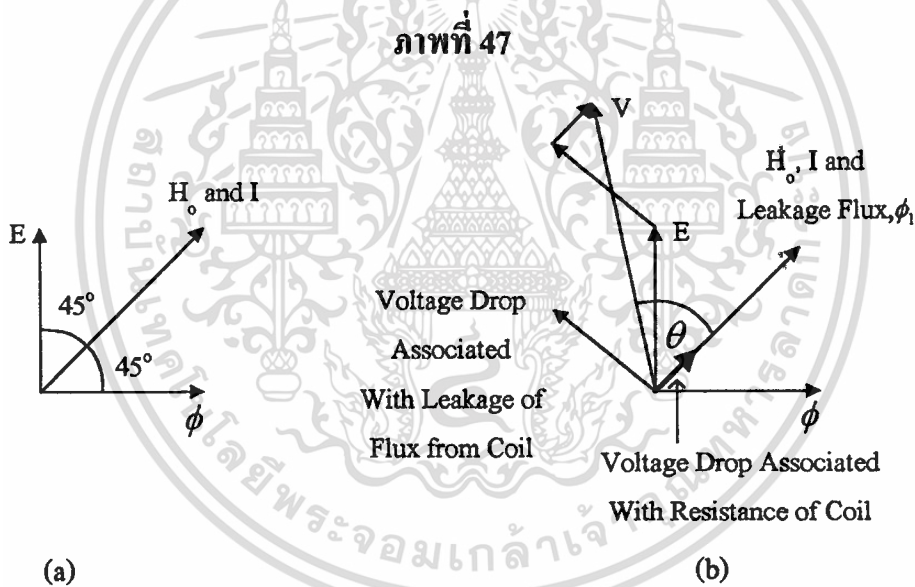
สมการ (6.14) สามารถอธิบายในรูปกราฟการเปลี่ยนแปลงได้ดังภาพที่ 46 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำลังงานสูญเสียในช่วงระยะความลึกใดๆ เทียบกับปริมาณกำลังงานสูญเสียทั้งหมดโดยเทียบกับระยะความลึกจากผิววัสดุในรูปความลึกกระแสไหลวน จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าปริมาณกำลังงานสูญเสียเกือบทั้งหมดจะเกิดขึ้นในระยะความลึกกระแสไหลวน ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในกระบวนการเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อการชุบผิวแข็งกล้าคือ เฉพาะบริเวณผิวของวัสดุเท่านั้นที่จะได้รับความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ส่วนเนื้อวัสดุที่อยู่ลึกเข้าไปภายในชั้นวัสดุจะได้รับความร้อนที่ถ่ายเทจากผิววัสดุโดยกระบวนการนำความร้อน ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์กับกระบวนการชุบผิวแข็งวัสดุซึ่งอาศัยความถี่ของสนามแม่เหล็กที่สูงในการลดระดับความลึกกระแสไหลวน,  $\delta$ , ดังนั้นพลังงานความร้อนส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่บริเวณผิววัสดุ แต่ลักษณะการเหนี่ยวนำแบบนี้จะไม่ค่อยเหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องการให้ความร้อนกระจายอย่างทั่วถึงสำหรับชิ้นวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ฟลักซ์แม่เหล็กรวมและตัวประกอบกำลัง; ฟลักซ์แม่เหล็กรวมก็คือปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในแผ่นวัสดุ,  $\Phi$ , ต่อขนาดความกว้างของแผ่นวัสดุในระยะ 1 เมตร, ตามแนวแกน Z เมื่ออ้างอิงกับภาพที่ 44(a) จะพบว่าปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กรวมสามารถประเมินได้โดยอินทิเกรต  $B_x(y)dy$  ทั่วทั้งแผ่นวัสดุหรือตลอดแนวแกน Y ซึ่งเป็นระยะความหนาของแผ่นวัสดุโดยพิจารณาอ้างอิงภาพที่ 44(a) ดังนั้นจากสมการ (6.6)

$$\Phi = \mu H_{om} \int_0^l \exp[j\omega t - (1+j)\alpha y] (dy \times 1) \quad (\text{ส่วนจริง})$$

$$= \frac{\mu H_{om}}{2\alpha} \cos(\omega t - \pi/4) \quad (6.15)$$



(a) แสดงเฟสเซอร์ไคอะแกรมของแผ่นวัสดุในทางอุดมคติ, (b) แสดงเฟสเซอร์ไคอะแกรมที่พิจารณารวมทั้งค่าความต้านทานแผ่นของขดลวดให้ความร้อนและรีแอกแตนซ์รั่วไหล

จากสมการ (6.15) จะเห็นว่าปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กรวมต่อเมตรจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุ,  $H_{om}$ , และมีเฟสตามเฟสของสนามแม่เหล็กเป็นมุม 45 องศา และจากสมการ (6.11) กระแสรวมจะมีเฟสตรงกับเฟสของสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุ เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ผิววัสดุจะต้องมีเฟสตรงกับเฟสของสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุ ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กรวมจึงมีเฟสตามเฟสของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผิววัสดุ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

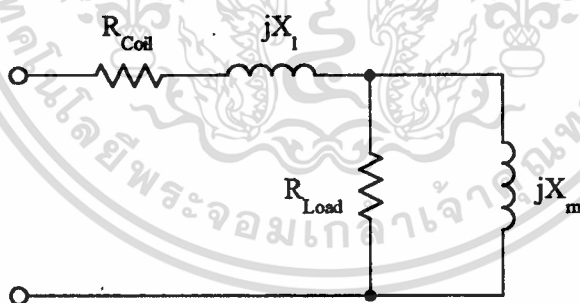
ค่าแรงดัน e.m.f. (Electromotive Force) ที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กจึงสามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับเวลา ดังสมการ (6.16)

$$E = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{-\mu H_{om} N \omega}{\sqrt{2\alpha}} \sin(\omega t - \pi/4) = \frac{\mu H_{om} N \omega}{\sqrt{2\alpha}} \cos(\omega t + \pi/4) \quad (6.16)$$

ตัวประกอบกำลังของวัสดุแผ่นจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน e.m.f. กับกระแสรวมภายในแผ่นวัสดุซึ่งสามารถอธิบายในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 47(a)

จากภาพที่ 47 จะเห็นว่าเฟสของกระแสรวมจะตามเฟสของแรงดัน e.m.f. 45 องศา ดังนั้นตัวประกอบกำลังจึงมีค่า 0.707 ซึ่งก็หมายความว่าค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของโหลดใกล้เคียงกัน ในทางอุดมคติค่าของตัวประกอบกำลังค่านี้จะเป็นค่าตัวประกอบกำลังที่พิจารณาจนถึงขดลวดให้ความร้อนด้วย ในสภาพความจริง ขดลวดให้ความร้อนประกอบไปด้วยค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่จะลดทอนค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนนอกจากนี้ยังประกอบด้วยค่าความต้านทานแฝง ดังนั้นผลที่ได้จึงแสดงให้เห็นดังภาพที่ 47(b) ซึ่งเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมที่พิจารณาควบคู่กับพารามิเตอร์แฝงจากขดลวดให้ความร้อนด้วย

ภาพที่ 48

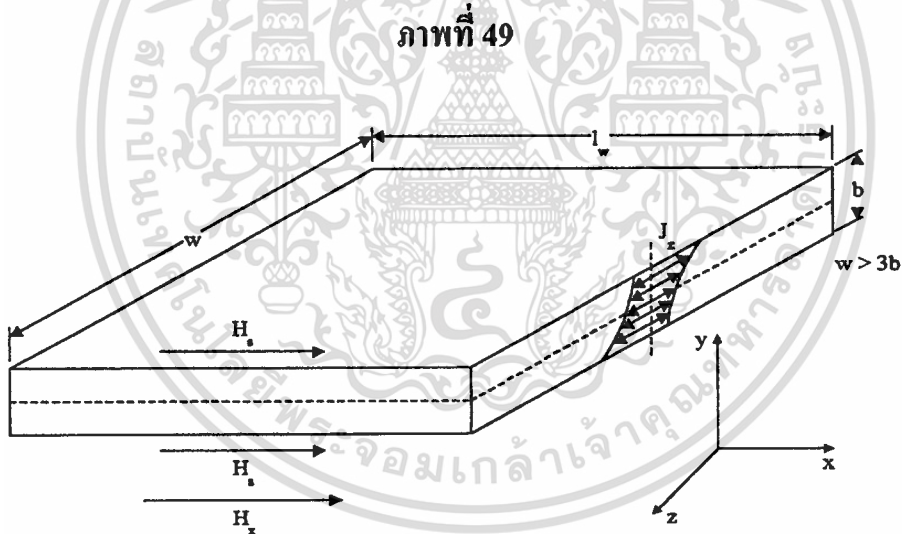


แสดงวงจรสมมูลการให้ความร้อนแก่วัสดุเพื่อการชดเชยเชิงโคจรเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ภาพที่ 48 แสดงให้เห็นวงจรสมมูลของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกับวัสดุแผ่นซึ่งสามารถพิจารณาโดยเปรียบได้กับขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งโหลดมีคุณสมบัติพิเศษคือมีค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์เท่ากัน ฟลักซ์แม่เหล็กที่ส่งผลให้เกิดค่ารีแอกแตนซ์นั้นมีคุณลักษณะเป็นไปตามคุณลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กตามธรรมชาติ

## กำลังงานและฟลักซ์เหนี่ยวนำภายในวัสดุแผ่นทรงสี่เหลี่ยมบาง

พิจารณาในทำนองเดียวกับตอนที่ผ่านมา โดยวิธีการเงื่อนไขขอบเขตซึ่งสามารถหารูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กภายในแผ่นวัสดุบาง สมมติให้แผ่นวัสดุมีความกว้าง,  $w$ , ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับความหนาของแผ่นวัสดุ,  $b$ , ถ้าหากแผ่นวัสดุมีความหนามากๆ การกระจายของกระแสทั้งสองด้านของแผ่นวัสดุจะไม่ส่งผลกระทบต่อกัน แต่ถ้าหากเป็นแผ่นวัสดุที่มีความหนาไม่มากหรือในกรณีที่มีค่า  $b$  มีค่าต่ำ การกระจายของกระแสในแผ่นวัสดุจะเป็นไปในลักษณะดังแสดงในภาพที่ 49 คือสนามแม่เหล็กด้านหนึ่งของแผ่นวัสดุนอกจากจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในแผ่นวัสดุด้านนั้นๆ แล้วยังเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในอีกด้านหนึ่งของแผ่นวัสดุซึ่งจะเป็นกระแสที่ด้านคาร์ไรลของกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในด้านนั้นๆ



แสดงแผ่นวัสดุบางและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแส

จากสมการ (6.3)

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t}$$

ซึ่งจะได้ผลการแก้ปัญหาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการเงื่อนไขขอบเขตและเพื่อความสะดวกในการพิจารณา จึงทำการย้ายแกน  $x$  ไปอยู่บริเวณส่วนกลางความหนาของแผ่นวัสดุและให้  $H_x = H_s$ , เมื่อ  $H_s = H_{sm} \exp(j\omega t)$ , โดยพิจารณาที่ส่วนจริง และจากหลักความจริงที่ว่า  $H_x$  ทั้งสองด้านของแผ่นวัสดุมีค่าเท่ากันที่  $\pm b/2$ , ดังนั้นจึงได้รูปแบบความสัมพันธ์พื้นฐานของความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งสองด้านของแผ่นวัสดุดังนี้

$$H_{b/2} = A_1 \exp(k(b/2)) + A_2 \exp(k(-b/2)) = H_s$$

$$H_{-b/2} = A_1 \exp(k(-b/2)) + A_2 \exp(k(b/2)) = H_s$$

เมื่อ  $A_1 = A_2 = A$ , ดังนั้น  $H_{b/2} = H_{-b/2}$

ที่  $y = 0$ ,  $H_0 = 2A$  ดังนั้น  $H_s = H_0 \cosh k(b/2)$ , และโดยทั่วไปเนื่องจาก  $H = H_0 \cosh ky$ , ดังนั้น

$$\frac{H_x(y)}{H_s} = \frac{\cosh ky}{\cosh k(b/2)} = \frac{\cosh(1+j)\alpha y}{\cosh(1+j)\alpha b/2} \quad (6.17)$$

เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ที่สามารถอธิบายลักษณะการกระจายค่าความหนาแน่นกระแส,  $J$ ; จากสมการเงื่อนไขขอบเขต  $J_{b/2} = J_{-b/2}$ , เมื่อนำไปประยุกต์กับความสัมพันธ์  $J_y = A_1' \exp(ky) + A_2' \exp(-ky)$ , จะได้ผลคือ  $A_1' = -A_2' = A$ , และ  $J_0 = 0$  เพราะฉะนั้น

$$J_s = A' [\exp(kb/2) - \exp(-kb/2)] = 2A' \sinh kb/2$$

$$\frac{J_y(y)}{J_s} = \frac{\sinh ky}{\sinh kb/2} = \frac{\sinh(1+j)\alpha y}{\sinh(1+j)\alpha b/2} \quad (6.18)$$

จาก  $J = \text{curl } H$ , จากรูปแบบการพิจารณาในตอนที่ผ่านมา ดังนั้น

$$J = -k \frac{\partial H_x}{\partial y}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= -kH_s \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\cosh (1+j)\alpha y}{\cosh (1+j)\alpha b/2} \right] \\
 &= -k\alpha H_s(1+j) \left[ \frac{\sinh (1+j)\alpha y}{\cosh (1+j)\alpha b/2} \right] \quad (6.19)
 \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า  $y = b/2$  ในสมการ (6.19) จะได้  $J_s = \sqrt{2} \alpha H_s \tanh (1+j)\alpha b/2$ , และสำหรับกรณี  $(b/2)/\alpha$  มีค่ามากหรือเมื่อแผ่นวัสดุมีความหนามากเมื่อเทียบกับค่าความถี่กระแส เพราะฉะนั้นจะได้  $|J_s| \Rightarrow \sqrt{2} \alpha H_s$ , เป็นผลเช่นเดียวกับสมการ (6.8) ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาวัสดุแผ่นได้ในลักษณะของแผ่นวัสดุอิสระสองแผ่นซึ่งแต่ละแผ่นมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์

1. การกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแผ่นวัสดุบาง; ปริมาณฟลักซ์รวมภายในแผ่นวัสดุ,  $\Phi$ , ต่อระยะความกว้าง 1 เมตร ตามแนวแกน Z ของแผ่นวัสดุเมื่อพิจารณาอ้างอิงกับภาพที่ 49 สามารถประเมินค่าได้จากการอินทิเกรต  $B_x(y)dy$  ตลอดระยะความหนาของแผ่นวัสดุได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \mu H_s \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\cosh (1+j)\alpha y}{\cosh (1+j)\alpha b/2} dy (\times 1) \\
 &= \frac{2\mu H_s}{(1+j)\alpha} \tanh (1+j)\alpha b/2
 \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเวลาร่วมด้วยและ  $(1+j) = \sqrt{2} \exp (j45^\circ)$ , เพราะฉะนั้นจะได้

$$\Phi = \frac{2\mu H_{sm}}{\sqrt{2}\alpha} \tanh (1+j)\frac{\alpha b}{2} \cos (\omega t - \pi/4) \quad (6.20)$$

สมการ (6.20) นี้สามารถนำมาใช้ได้ทั้งสองลักษณะคือสามารถใช้ได้ในกรณีที่  $b > \delta$ , หรือการพิจารณากับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์ และใช้ในกรณีที่แผ่นวัสดุมีความหนาไม่มากซึ่งปริมาณฟลักซ์จะลดลงด้วยค่า  $\tanh (1+j)\alpha b/2$  เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแผ่นความหนากิ่งอนันต์

รูปสมการสมมูลรูปหนึ่งของ  $\tanh (1+j)\alpha b/2$  สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$|\tanh (1+j)\alpha b/2| = \sqrt{\frac{\cosh \alpha b - \cos \alpha b}{\cosh \alpha b + \cos \alpha b}}$$

2. ปริมาณกำลังงานสูญเสีย; ปริมาณกำลังงานสูญเสียต่อตารางเมตรของพื้นผิววัสดุบาง (วัตถุ/ตารางเมตร) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\wp = \frac{1}{2} \int_{-b/2}^{b/2} \rho |J_m|^2 dy (\times 1 \times 1)$$

สมการ (6.19) จึงสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} |J_m|^2 &= 2\alpha^2 H_{sm}^2 \frac{\sinh^2 \alpha y \cos^2 \alpha y + \cosh^2 \alpha y \sin^2 \alpha y}{\cosh^2 \alpha b/2 \cos^2 \alpha b/2 + \sinh^2 \alpha b/2 \sin^2 \alpha b/2} \\ &= 2\alpha^2 H_{sm}^2 \frac{\cosh 2\alpha y - \cos 2\alpha y}{\cosh \alpha b + \cos \alpha b} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\wp = \rho \alpha H_{sm}^2 \frac{\sinh \alpha b - \sin \alpha b}{\cosh \alpha b + \cos \alpha b} \quad (6.21)$$

สำหรับกรณีที่มี  $b$  มีค่ามากๆ หรือเมื่อแผ่นวัสดุมีความหนาเมื่อเทียบกับค่าความถี่กระแส ดังนั้น  $\tanh \alpha b = 1$ , ปริมาณกำลังงานสูญเสียจะมีแนวโน้มเป็นสองเท่าของปริมาณกำลังงานสูญเสียที่เกิดกับวัสดุแผ่นความหนาก่อนนั้น คือจะมีค่าเป็น  $\rho \alpha (H_{sm})^2$ , สำหรับวัสดุแผ่นบางปริมาณกำลังงานสูญเสียสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\wp = \rho \alpha^2 b H_{sm}^2 \frac{1}{\alpha b} \left[ \frac{\sinh \alpha b - \sin \alpha b}{\cosh \alpha b + \cos \alpha b} \right] = \rho \alpha^2 b H_{sm}^2 p$$

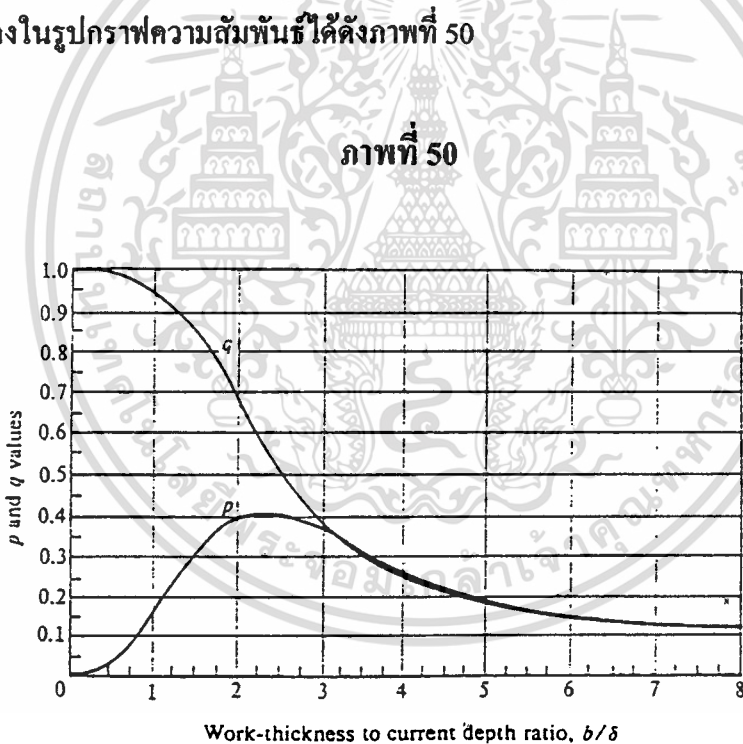
ทำการจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการ (6.22)

$$\begin{aligned}
 P_w &= (l_w wb) \mu f \pi H_{sm}^2 p \\
 &= (l_w A_w) \mu f \pi H_{sm}^2 p
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

คังนั้นค่าของ  $p$  จึงสามารถอธิบายในรูปสมการ ได้ดังนี้

$$p = \frac{1}{\alpha b} \left[ \frac{\sinh \alpha b - \sin \alpha b}{\cosh \alpha b + \cos \alpha b} \right]$$

และนำมาแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 50



แสดงฟังก์ชันของ  $p$  และ  $q$  สำหรับการพิจารณาวัสดุแผ่นบาง เมื่อ  $b/\delta > 8$ ,  $p = q = 1/(b/\delta)$

## บทที่ 7

### การวิเคราะห์ระบบและผลการทดสอบ

รูปแบบของวงจรที่ใช้ในการทดสอบก็คือรูปแบบของวงจรออสซิลเลตในตัวซึ่งสภาพการออสซิลเลตของวงจรดำรงอยู่ได้ด้วยการประยุคต์สัญญาณส่วนหนึ่งจากวงจรแท่งก็เป็นสัญญาณขับกริดด้วยการเหนี่ยวนำสัญญาณจากวงจรแท่งก็ป้อนกลับ ไปขับวงจรขยายกำลังในลักษณะของการป้อนกลับแบบบวก แรงดันกริดไบแอสที่ประยุคต์เกิดจากเทคนิคการไบแอสด้วยกระแสกริดรั่วไหลซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างตัวต้านทานกริดและกริดคาปาซิเตอร์ส่งผลให้ระดับแรงดันกริดไบแอสที่ได้มีค่าเป็นลบ ในส่วนของวงจรขยายกำลังนั้นจะมีวงจรแท่งทำหน้าที่เป็นโพลซึ่งจะได้รับการชดเชยกำลังงานสูญเสียจากวงจรขยายกำลังที่ได้รับแรงดันไบแอสจากแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยกำลังงานจากวงจรขยายกำลังจะถูกถ่ายโอนสู่วงจรแท่งซึ่งจากนั้นจะถ่ายโอนกำลังงานส่วนนี้ไปสู่ขดลวดให้ความร้อนเพื่อถ่ายโอนสู่วัสดุหุ้มผิวแข็งผ่านขดลวดให้ความร้อนซึ่งขดลวดให้ความร้อนที่นำมาประยุคต์นี้เป็นขดลวดอิมพีแดนซ์ต่ำ โดยมีหม้อแปลงแกนอากาศอยู่ในบทบาทที่จะทำให้อัตราการนำเสนีสัญญาณมองขดลวดอิมพีแดนซ์ต่ำเป็นขดลวดอิมพีแดนซ์สูงเพื่อมีทซ์เข้ากับอิมพีแดนซ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณ<sup>[9]</sup>

วัตถุประสงค์ในส่วนตัวอุปกรณ์ของงานวิจัยชิ้นนี้ก็คือการทดสอบเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุเพื่องานหุ้มผิวแข็งวัสดุซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไม่เกิน 0.8 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กคือ 1.4 ถึง 2.0 เซนติเมตร หุ้มแข็งที่ระดับความลึกจากผิวไม่เกิน 1.25 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ระบบทำงานในช่วงความถี่ 500 ถึง 1,000 กิโลเฮิรซ์ และสามารถจ่ายกำลังงานสู่วัสดุหุ้มผิวแข็งได้ประมาณ 1 กิโลวัตต์ ที่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบไปด้วยประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแท่งประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

การพิจารณาเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรกำเนิดสัญญาณนั้น จะคำนวณควบคู่ไปกับการวิเคราะห์กราฟกระแสของหลอดไตรโอดซึ่งเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะการตอบสนองของหลอดไตรโอดต่อแรงดันกริดและแรงดันแอโนดในรูปของกระแสที่ที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะของหลอดไตรโอดในแต่ละขนาดแต่ละระดับพิกัดใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แนวทางการทำงานของอุปกรณ์และกราฟกระแสกที่

ขั้นแรกของการพิจารณาก็คือการกำหนดแนวเส้นทำงาน (Operating Line) ของหลอดไดโอดบนกราฟกระแสกที่ซึ่งแนวเส้นที่กำหนดจะถูกควบคุมด้วยขีดจำกัดดังนี้;

- 1) ปริมาณกระแสแคโอดหรือกระแสเสปซสูงสุด,  $I_{s \max}$
- 2) แนวเส้น  $e_{b \min} = e_{c \max}$  เพื่อป้องกันมิให้ระดับแรงดันชั่วขณะต่ำสุดที่แอโนดต่ำกว่าระดับแรงดันชั่วขณะสูงสุดที่กริด

นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่จะต้องควบคุมให้การทำงานของหลอดไดโอดอยู่ในพิสัยนอกเหนือจากขอบเขตจำกัดดังกล่าวไว้คือ ความถี่สูงสุดในการตอบสนองของอุปกรณ์, กำลังงานสูญเสียที่แอโนดสูงสุด, กำลังงานสูญเสียที่กริดสูงสุด, ระดับแรงดันและปริมาณกระแสสูงสุดที่แอโนด, ระดับแรงดันและปริมาณกระแสสูงสุดที่กริด, กำลังงานสูงสุดที่จ่ายให้กับแอโนดโดยวงจรขยายกำลัง, ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวต้านทานกริด และอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณต่างๆ ของตัวหลอด

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะใช้เป็นองค์ประกอบในการกำหนดแนวเส้นทำงานของหลอดไดโอดนอกเหนือจากการควบคุมขอบเขตจำกัดและพิสัยต่างๆ มีดังต่อไปนี้;

- 1) ระดับแรงดันไบแอสแอโนด,  $E_{bb}$
- 2) ระดับแรงดันไบแอสกริด,  $E_{cc}$
- 3) ระดับแรงดันชั่วขณะต่ำสุดของแอโนด,  $e_{b \min}$
- 4) ระดับแรงดันชั่วขณะสูงสุดของกริด,  $e_{c \max}$

นอกจากพารามิเตอร์หลักเหล่านี้แล้ว ในบางวัตถุประสงค์อาจมีการกำหนดพารามิเตอร์อื่นนอกเหนือจากพารามิเตอร์เหล่านี้เช่น มุมนำกระแสแอโนด,  $\theta_b$  และมุมนำกระแสกริด,  $\theta_c$

ในการทดสอบนั้น ในส่วนของขอบเขตจำกัดได้กำหนดไว้ดังนี้;

- 1) ปริมาณกระแสแคโอดสูงสุด,  $I_{s \max}$ , ได้กำหนดไว้ที่ 2.54 แอมป์ ในขณะที่ปริมาณกระแสแคโอดสูงสุดตามพิสัยที่อุปกรณ์สามารถทนได้อยู่ที่ 4.3 แอมป์
- 2) สัดส่วน  $e_{c \max} / e_{b \min}$  ได้กำหนดไว้ที่ 0.22

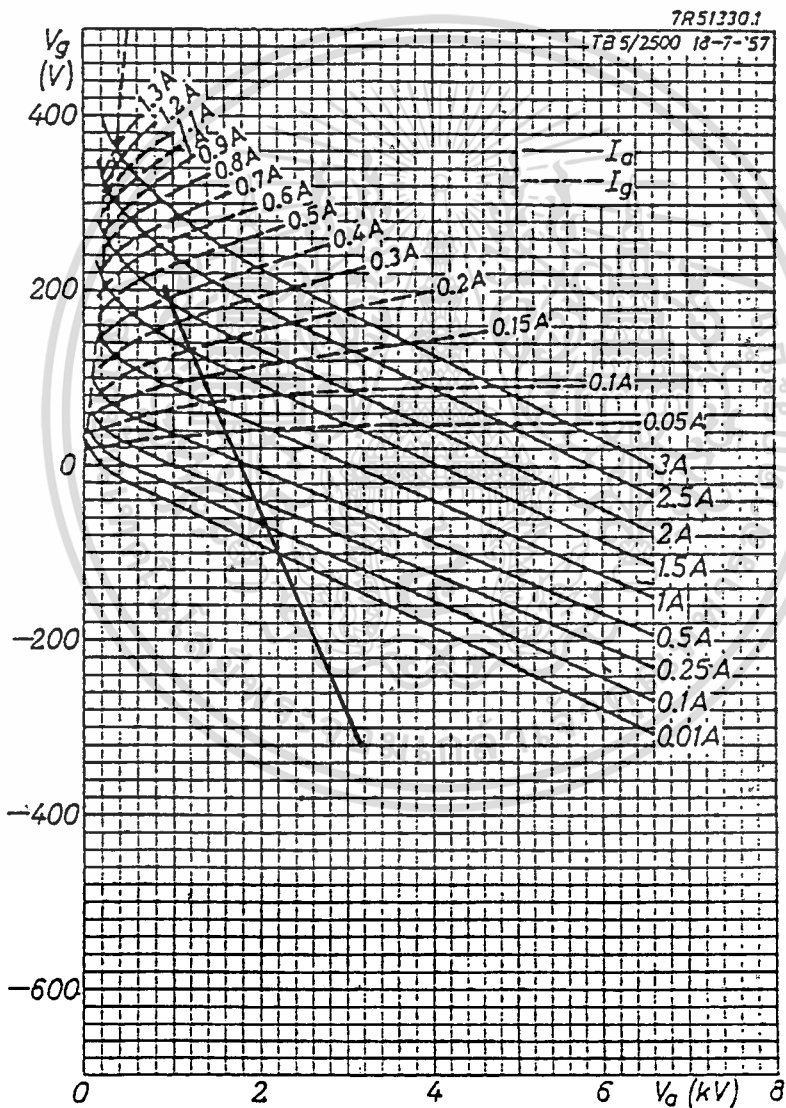
พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดทิศทางของแนวเส้นทำงาน ได้กำหนดค่าไว้ดังนี้;

- 1) ระดับแรงดันแอโนดไบแอส ได้กำหนดไว้ที่ 3,200 โวลต์
- 2) ระดับแรงดันกริดไบแอส ได้กำหนดไว้ที่ 320 โวลต์

- 3) ระดับแรงดันชั่วขณะต่ำสุดของแอโนด ได้กำหนดไว้ที่ 900 โวลต์
- 4) ระดับแรงดันชั่วขณะสูงสุดของกริด ได้กำหนดไว้ที่ 200 โวลต์

ลักษณะการวางตัวของแนวเส้นทำงานของหลอดไตรโอดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 51 โดยตำแหน่งปลายทั้งสองของแนวเส้นถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับประเมินข้อมูลเพื่อการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ต่อไป

ภาพที่ 51



แสดงการวางตัวของแนวเส้นทำงานของหลอดไตรโอด TB5/2500 (PHILIPS) บนกราฟ  
กระแสดังนี้

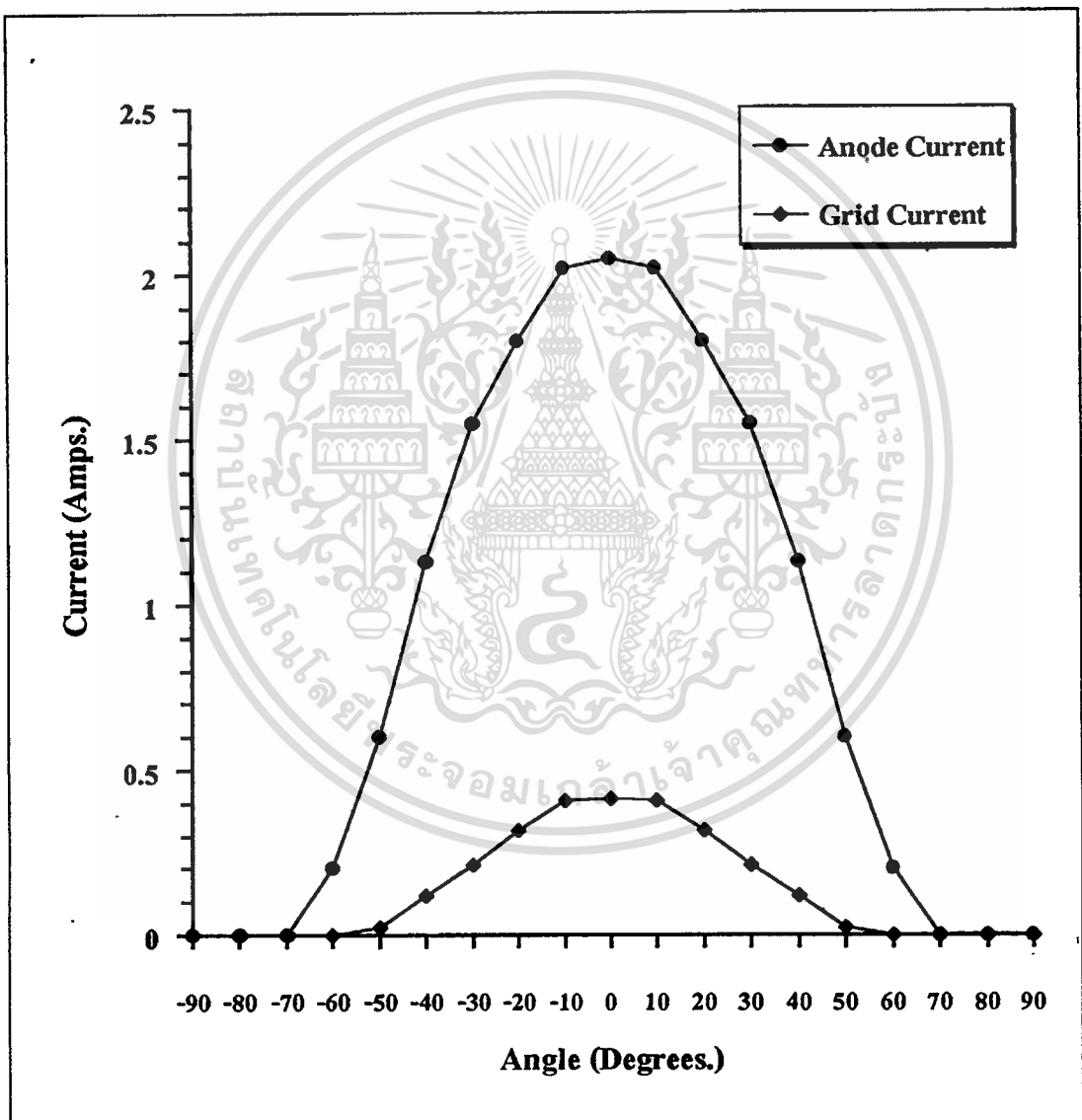
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4**  
**แสดงข้อมูลที่ได้ออกการวิเคราะห์กราฟกระแสของหลอดไตร โอด TB 5/2500 (PHILIPS)**  
**ที่ได้กำหนดแนวเส้นทำงานบนกราฟกระแสแสดงที่ในภาพที่ 51**

	$\theta$ , Degrees									
	0 Deg.	10 Deg.	20 Deg.	30 Deg.	40 Deg.	50 Deg.	60 Deg.	70 Deg.	80 Deg.	90 Deg.
$\cos \theta$	1.000	0.985	0.940	0.866	0.766	0.643	0.500	0.342	0.174	0
$E_{p1m} \cos \theta$ .....(Volts.)	2,300.0	2,265.5	2,162.0	1,991.8	1,761.8	1,478.9	1,150.0	786.6	400.0	0
$(E_{bb} - E_{p1m}) \cos \theta$ .....(Volts.)	900.0	934.5	1,038.0	1,208.2	1,438.2	1,721.1	2,050.0	2,413.4	0	0
$i_b$ .....(Amps.)	2.050	2.020	1.800	1.550	1.130	0.600	0.200	0	0	0
$i_b \cos \theta$ .....(Amps.)	2.050	1.989	1.690	1.342	0.866	0.386	0.100	0	0	0
$i_c$ .....(Amps.)	0.415	0.410	0.315	0.210	0.120	0.025	0	0	0	0

ข้อมูลเกี่ยวกับกระแสแอโนดและกระแสกริดจากกราฟกระแสคงที่ซึ่งได้กำหนดแนวทางการทำงานของหลอดไตรโอดจากพารามิเตอร์และพิกัดควบคุมต่างๆ สามารถนำมาอธิบายได้ดังตารางที่ 4 และเพื่อความชัดเจน ข้อมูลจากตารางสามารถนำมาอธิบายในรูปกราฟการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอโนดและกระแสกริดได้ดังภาพที่ 52

ภาพที่ 52



แสดงพลัสกระแสแอโนดและพลัสกระแสกริดที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟกระแสคงที่ในภาพที่ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แนวทางกำหนดค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบอยู่ในวงจรเทงก์

1. ในส่วนวงจรแอมโพล; แนวทางดังกล่าวนี้จะเป็นวิธีทางในกำหนดค่าตัวอุปกรณ์ที่ต้องประยุกต์ในวงจรเทงก์เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ, เริ่มจากค่าตัวเก็บประจุในวงจรเทงก์  $C_T$  ซึ่งมีสิ่งที่จะต้องทราบเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานคือค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเทงก์, ความถี่ใช้งาน, และค่า  $Q_T$  ของวงจรเทงก์ เมื่อพิจารณาประกอบกับแนวเส้นการทำงานของหลอดไตรโอดในภาพที่ 51 จะพบว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจรเทงก์,  $I_{p1m}$ , โดยพิจารณาประกอบสมการ (5.33) มีค่าเท่ากับ 1.644 แอมป์ ในขณะที่แรงดันสัญญาณออกสเตจเลด,  $E_{p1m}$ , มีค่าประมาณ 2,300 โวลต์ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในขณะออกสเตจเลดสัญญาณของวงจรเทงก์,  $Z_T$ , ที่ความถี่กำหนด 750 กิโลเฮิรซ์ ซึ่งกำหนดให้เป็นความถี่มูลฐานคือ

$$Z_T = \frac{E_{p1m}}{I_{p1m}} = \frac{2,300 \text{ V.}}{1.644 \text{ A.}} = 1,399.027 \Omega \approx 1.4 \text{ k}\Omega$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้สามารถนำมากำหนดค่าตัวเก็บประจุ,  $C_T$ , โดยกำหนดให้,  $Q_T$ , มีค่าประมาณ 40 ที่ความถี่ 750 กิโลเฮิรซ์ดังนี้

$$C_T = \frac{Q_T}{\omega Z_T} = \frac{40}{2\pi \times 750 \text{ kHz.} \times 1,399.027 \Omega} = 6.065 \text{ F.} = 6,065 \text{ pF.}$$

ที่ระดับแรงดันตกคร่อม 3,200 โวลต์, ในการทดสอบ  $C_T$  ที่ใช้ในวงจรเทงก์มีค่าประมาณ 5,550 พิโคฟารัด ซึ่งให้ผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างจากที่กำหนดมากนัก

ส่วน  $L_{Tp}$  สามารถประเมินได้จากตัวเหนี่ยวนำประสิทธิภาพของวงจรเทงก์  $L'_T$  ดังนี้

$$L'_T = \frac{1}{\omega^2 C_T} = \frac{1}{(2\pi \times 750 \text{ kHz.})^2 \times 5,550 \text{ pF.}} = 8.122 \mu\text{H.}$$

กำหนดให้  $L_{gp}$  มีค่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของ  $L'_T$ , ดังนั้น,  $L_{gp} = 0.3 \times 8.122 \mu\text{H.} \approx 2.5 \mu\text{H.}$ ,

กำหนดให้  $L'$  มีความสัมพันธ์ดังนี้,  $L' = L'_T - L_{gp}$ , และเนื่องจาก  $L_{gp}$  ที่ใช้ทดสอบมีค่า 2.7  $\mu\text{H.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น,  $L'$  จึงมีค่า  $5.422 \mu\text{H}$ ., เนื่องจาก  $L_{gp}$  มีค่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของ  $L'_T$  และประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานจากวงจรแท่งกึ่งตัวนำสู่อุปกรณ์เชิงถูกกำหนดไว้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหม้อแปลงแม่เหล็กหรือหม้อแปลงแกนอากาศจึงต้องมีประสิทธิภาพเท่ากับ  $50\%/70\% = 71.43\%$ , ที่ประสิทธิภาพของหม้อแปลงแกนอากาศระดับนี้ เมื่อพิจารณาประกอบกับภาพที่ 36 โดยกำหนดให้  $\chi = L_o/L_s \approx 1$ , ดังนั้นจึงพบว่าตัวประกอบกลับปลิงของหม้อแปลงแกนอากาศ,  $k$ , จะมีค่าประมาณ 0.85 และ  $L_{Tp}$  จะมีค่าประมาณ

$$L_{Tp} = \frac{L'}{1 - [k^2 / (1 + \chi)]} = \frac{5.422 \mu\text{H.}}{1 - [(0.85)^2 / 2]} = 8.5 \mu\text{H.}$$

ตัวเหนี่ยวนำโดยรวมของวงจรแท่งกึ่ง,  $L_T = L_{Tp} + L_{gp}$ , จึงมีค่าเท่ากับ  $11.2 \mu\text{H}$ ..

2. ในส่วนวงจรกริด; จากสมการ (5.31) และข้อมูลในตารางที่ 4 เพราะฉะนั้นจะพบว่า  $I_c$  มีค่า 143 มิลลิแอมป์ ที่ระดับแรงดันกริดไบแอส,  $E_{cc}$ , 320 โวลต์ ดังนั้นตัวต้านทานกริด,  $R_g = E_{cc}/I_c = 2.236$  กิโลโอห์ม

พิจารณาค่า  $C_g$  โดยเริ่มต้นด้วยการกำหนดให้เปอร์เซ็นต์ความไม่ราบเรียบของระดับแรงดันกริดไบแอสอยู่ที่ 93 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น  $C_g$  จึงสามารถประเมินได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\% \text{Reg.}}{100} = \exp(-t/R_g C_g) \quad \text{เมื่อ} \quad t = 1/f_o = 1/(750 \text{ kHz.}) = 1.333 \mu\text{Sec.}$$

เพราะฉะนั้นจึงได้ค่า  $C_g$  เท่ากับ 8.214 นาโนฟารัด

พิจารณาค่า  $L_{gs}$  จาก;

$$L_{gs} = \frac{1}{\omega^2 C_g} = \frac{1}{(2\pi 750 \text{ kHz.})^2 C_g} = 5.478 \mu\text{H.}$$

แนวเส้นทางงานของหลอดไตรโอดที่ได้กำหนดขึ้นดังภาพที่ 51 ประกอบด้วยแนวเส้นกระแสแอโนดคองท์,  $I_p = 0.01 \text{ A.}$ , ซึ่งถูกสมมติให้เป็นแนวเส้นคัทออฟหรือแนวเส้นที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสแอมป์เป็นศูนย์ตัดกับแนวเส้นทำงานของหลอดไตรโอดที่  $e_b = 2,250$  V. โดยกำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็น  $e_{bo}$  เกิดมุนำกระแสแอมป์ซึ่งสามารถประเมินค่าได้ดังนี้

$$\theta_b = 2 \cos^{-1} \left( \frac{E_{bb} - e_{bo}}{E_{p1m}} \right) = 2 \cos^{-1} \left( \frac{3,200 - 2,250}{2,300} \right) = 131.21^\circ$$

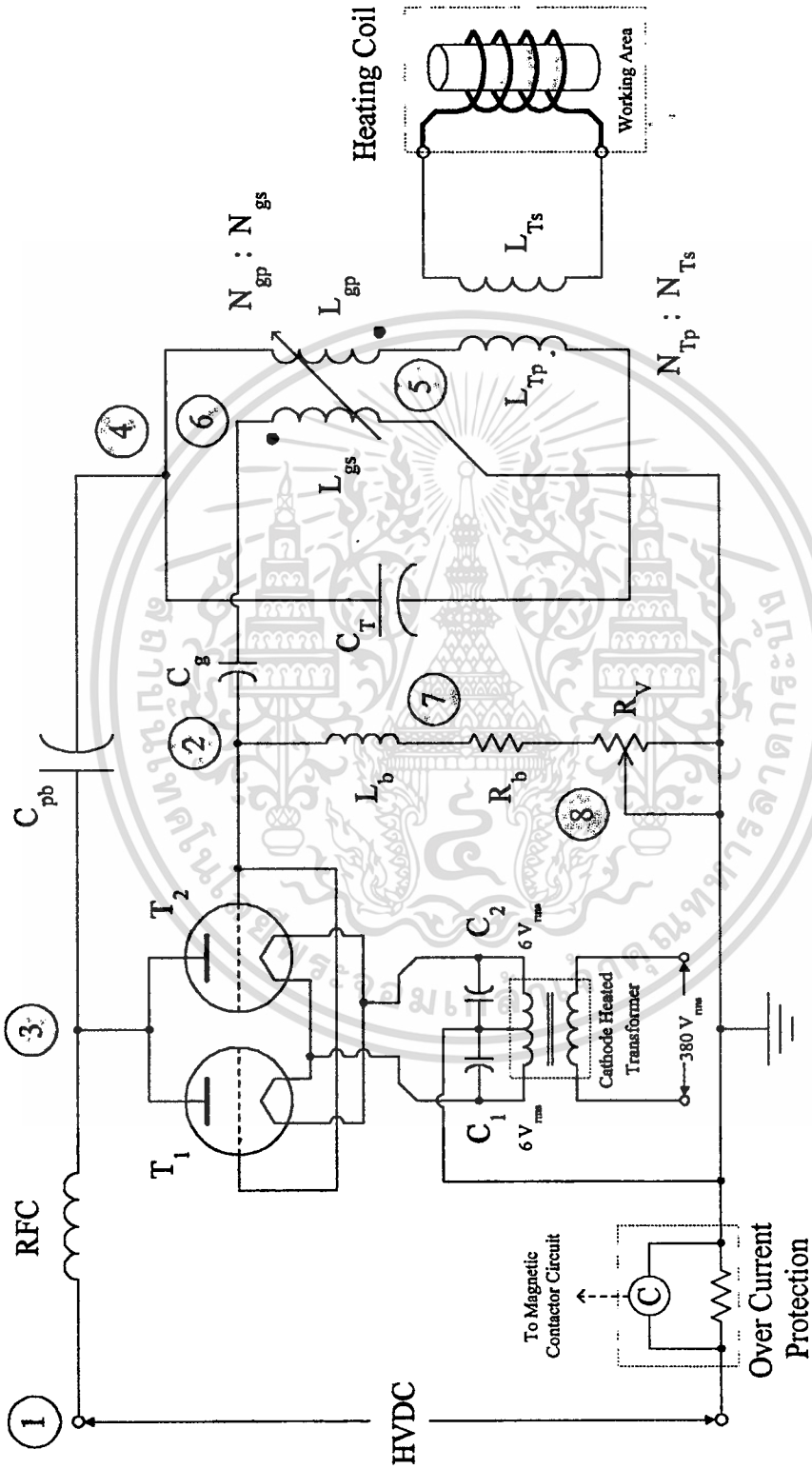
ในทำนองเดียวกัน จะพบว่าปริมาณกระแสกริดมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันขั้วขณะที่กริดมีระดับต่ำกว่าระดับกราวด์ ดังนั้นจุดที่ปริมาณกระแสกริดมีค่าเป็นศูนย์ก็คือจุดที่แนวเส้นทำงานของไตรโอดตัดกับแนวเส้นระดับแรงดันขั้วของกริดซึ่งที่จุดนี้จะตรงกับระดับแรงดันแอโนดที่  $e_b = 1,800$  V. โดยกำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็น  $e_{co}$  เกิดมุนำกระแสกริดซึ่งสามารถประเมินค่าได้ดังนี้

$$\theta_c = 2 \cos^{-1} \left( \frac{E_{bb} - e_{co}}{E_{p1m}} \right) = 2 \cos^{-1} \left( \frac{3,200 - 1,800}{2,300} \right) = 105.01^\circ$$

เมื่อได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบแล้ว ในส่วนของวงจรที่ใช้ในการทดสอบนั้น แสดงให้เห็นดังภาพที่ 53 ซึ่งก็คือวงจรออสซิลเลตในตู้เพื่อการประยุกต์กับงานหุบบิวแจ้งหลัก โดยอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ในวงจร ได้ถูกออกแบบกำหนดค่าไว้ดังนี้: RFC = 1.53 มิลลิเฮนรี่,  $C_{pb} = 6,000$  พิโกฟาร์ด,  $C_T = 5,500$  พิโกฟาร์ด,  $L_{Tp} = 9.0$  ไมโครเฮนรี่,  $L_{Ts} = 0.4$  ไมโครเฮนรี่,  $L_{gp} = 2.7$  ไมโครเฮนรี่,  $L_{gs} = 5.5$  ไมโครเฮนรี่,  $C_g = 3.16$  นาโนฟาร์ด,  $L_b = 1.44$  มิลลิเฮนรี่,  $R_b = 1$  กิโลโอห์ม,  $C_1 = C_2 = 3.16$  นาโนฟาร์ด,  $N_{gp} : N_{gs} = 4:8$ , หลอดไตรโอดที่ใช้งานคือหลอดไตรโอด TB5/2500 (PHILIPS), เมื่อ  $L_{Tp}$  และ  $L_{Ts}$  คือขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศหรือหม้อแปลงแม่เหล็กซึ่งแสดงในภาพที่ 54 ซึ่ง  $N_{Tp} : N_{Ts} = 11:1$ , ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำ 1.2 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขดลวด 15 เซนติเมตร, มีจำนวนรอบ 11 รอบ วางตัวในลักษณะที่ถูกล้อมรอบด้วยขดลวดทุติยภูมิซึ่งเป็นแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.125 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขดลวด 18 เซนติเมตร ขดลวดทั้งสองมีความยาวเท่ากันคือ 20.5 เซนติเมตร ส่วนภาพที่ 55 แสดงขดลวดให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งเป็นขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอก 2.4 เซนติเมตรและ 8.4 ตามลำดับหนา 0.4 เซนติเมตร ขั้วทั้งสองของขดลวดยึดติดกับขั้วทั้งสองของหม้อแปลงแกนอากาศโดยตรงด้วยขดลวดยึดติดกับท่อระบายความร้อนซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 53



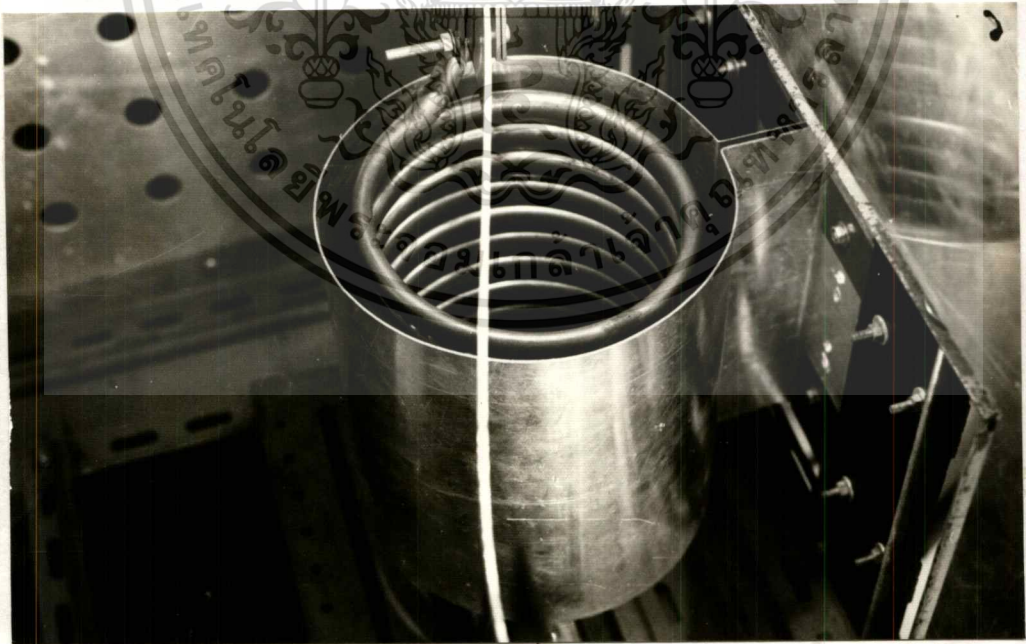
แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวงจรด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดค่าไว้นี้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 56 ถึงภาพที่ 69 ซึ่งก็คือรูปของสัญญาณแรงดันที่จุดต่างๆ ในวงจรโดยในภาพที่ 56 ถึงภาพที่ 61 เป็นการทดสอบวงจรในขณะที่ปราศจากโหลด ส่วนภาพที่ 62 ถึงภาพที่ 69 นั้นเป็นการทดสอบในขณะที่ทำการโหลดหรือมีการให้ความร้อนกับหลอด โหลดที่ใช้เป็นท่อหลอดกลวงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอก 0.75 และ 1.00 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้ในการทดสอบหาปริมาณกำลังงานที่ระบบจ่ายให้กับหลอดโดยการไหลเวียนน้ำผ่านท่อหลอด จากนั้นคำนวณปริมาณกำลังงานที่ท่อหลอดได้รับจากอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลง การทดสอบกำลังงานนี้จะอยู่ในเรื่องกำลังงานสัมพัทธ์ซึ่งอยู่ตอนท้ายของบทนี้

ผลการทดสอบสัญญาณจากภาพที่ 56 ถึงภาพที่ 69 ซึ่งเป็นการทดสอบที่  $C_T = 5,550$  พิโกฟารัด,  $L_T = 11.3$  ไมโครเฮนรี่ ที่ระดับแรงดันแอมโพลไบแอส 3,200 โวลต์ สามารถแสดงให้เห็นดังนี้

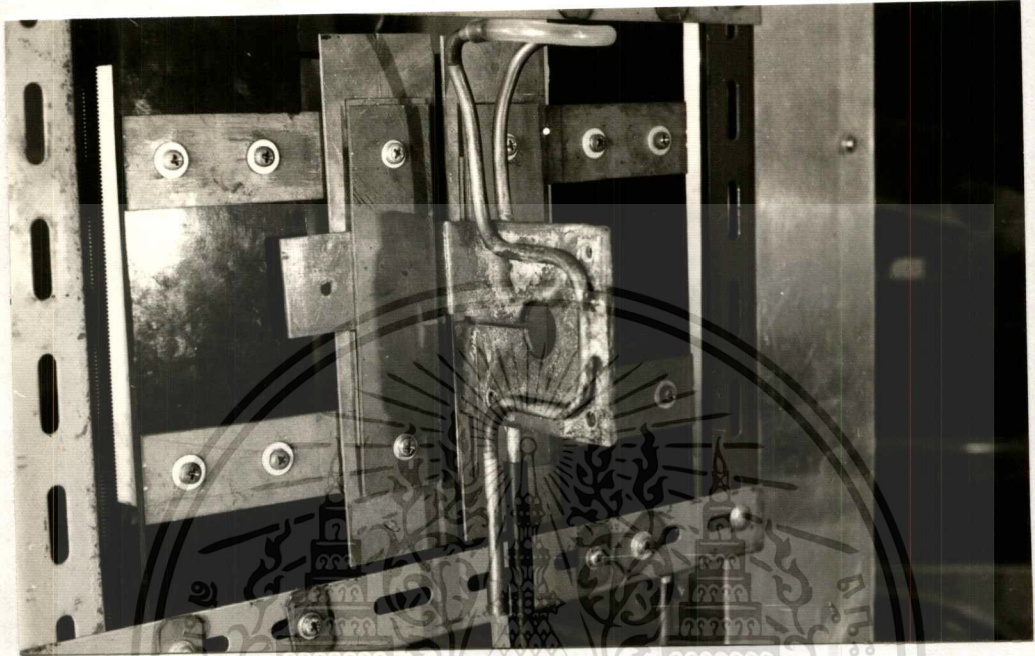
ภาพที่ 54



#### แสดงหม้อแปลงแกนอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

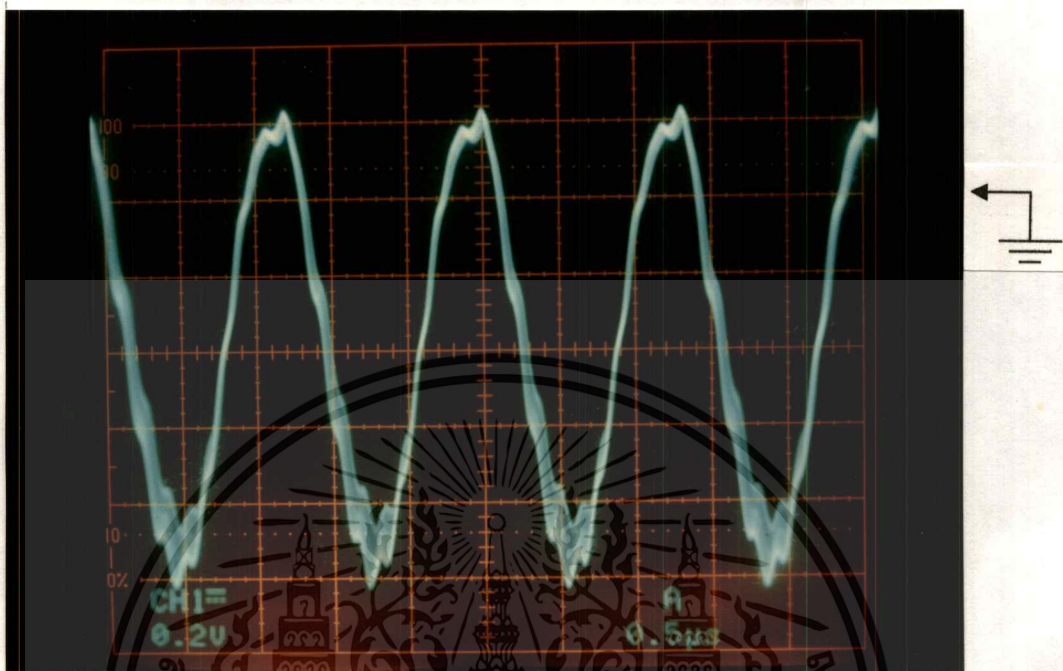
ภาพที่ 55



แสดงขดลวดให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ

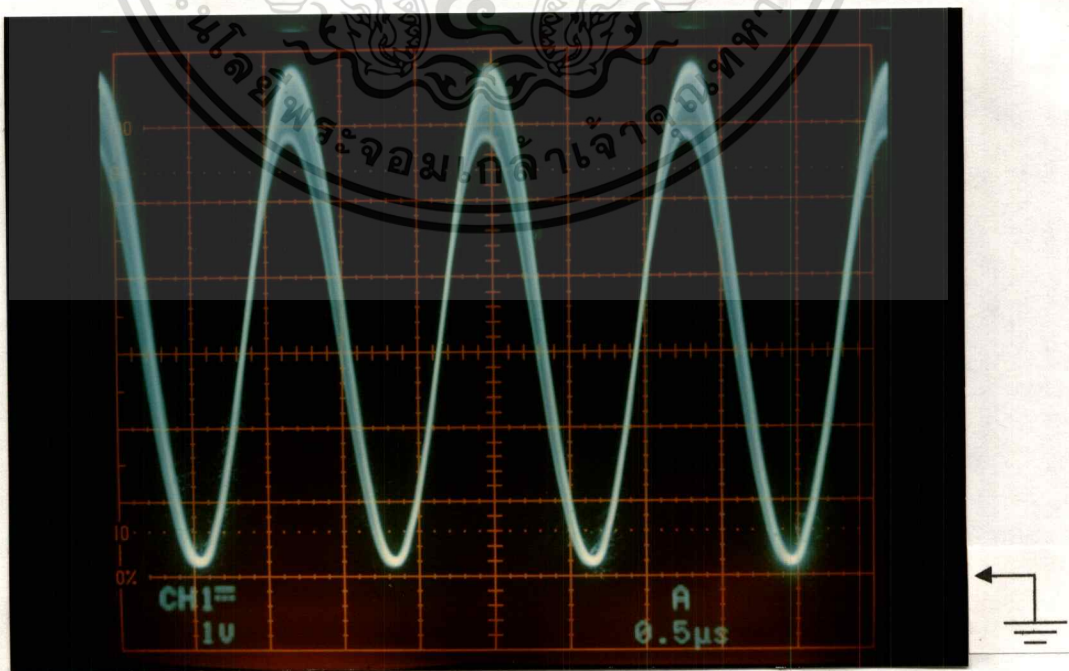
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 56



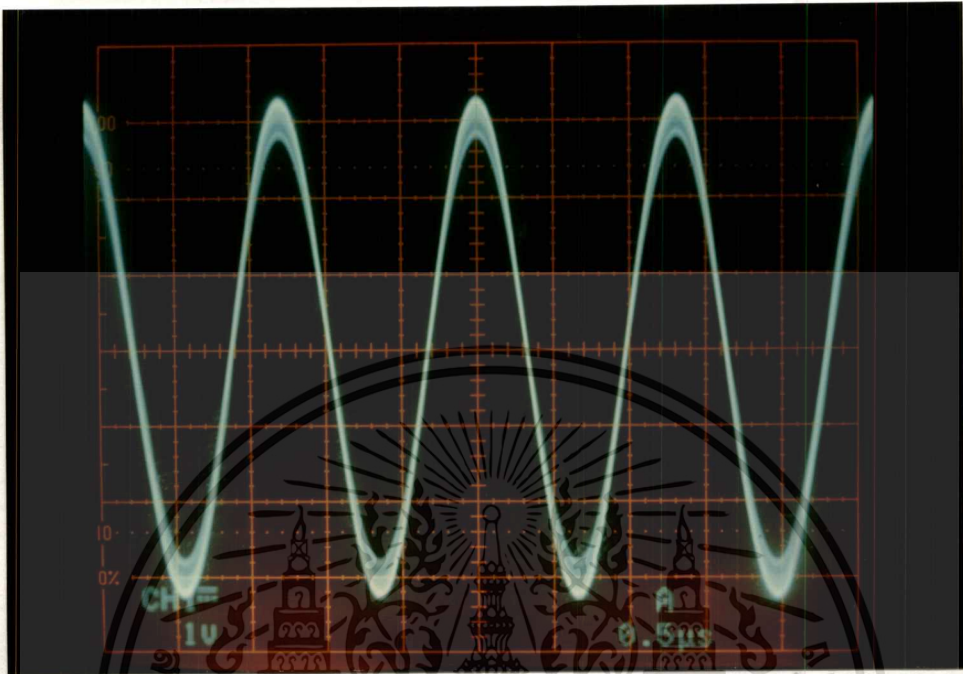
แสดงสัญญาณที่จุด 2 ที่ขั้วกราวนด์: 0.2 V./Div., 0.5  $\mu$ sec./Div.:  $\times 1,000$  Probe.: No Load

ภาพที่ 57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นไปจะบระเฮอร์ชันดานการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 58



แสดงสัญญาณที่จุด 4 เทียบกราวด์: 1 V./Div., 0.5 µsec./Div.: ×1,000 Probe.: No Load

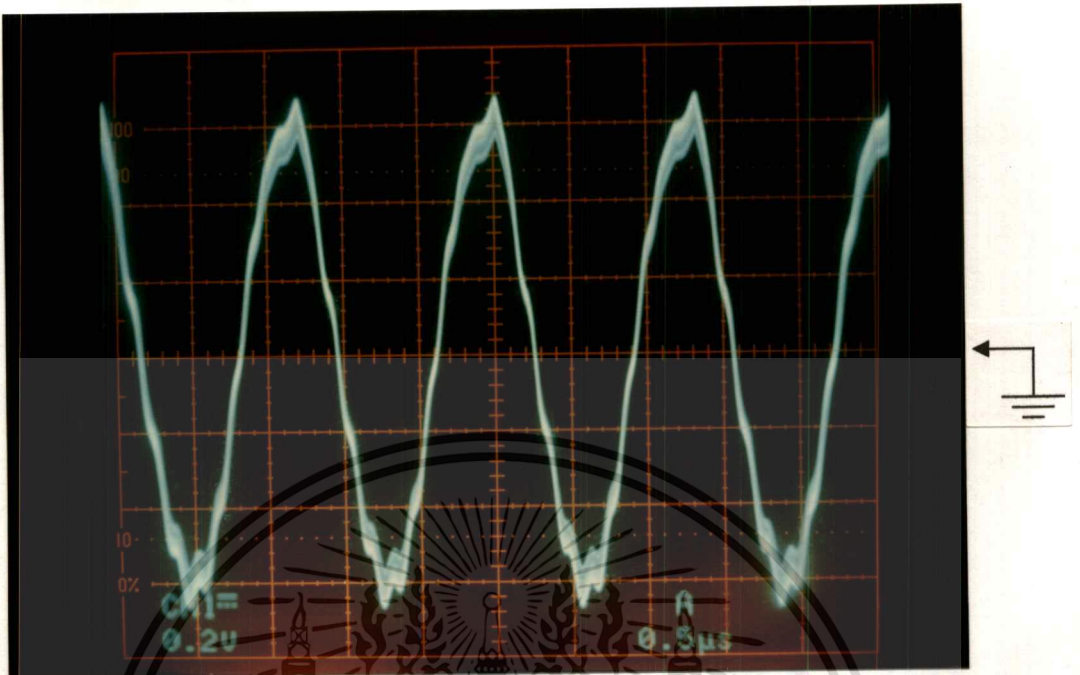
ภาพที่ 59



แสดงสัญญาณจุด 5 เทียบกราวด์: 1 V./Div., 0.5 µsec./Div.: × 1,000 Probe.: No Load

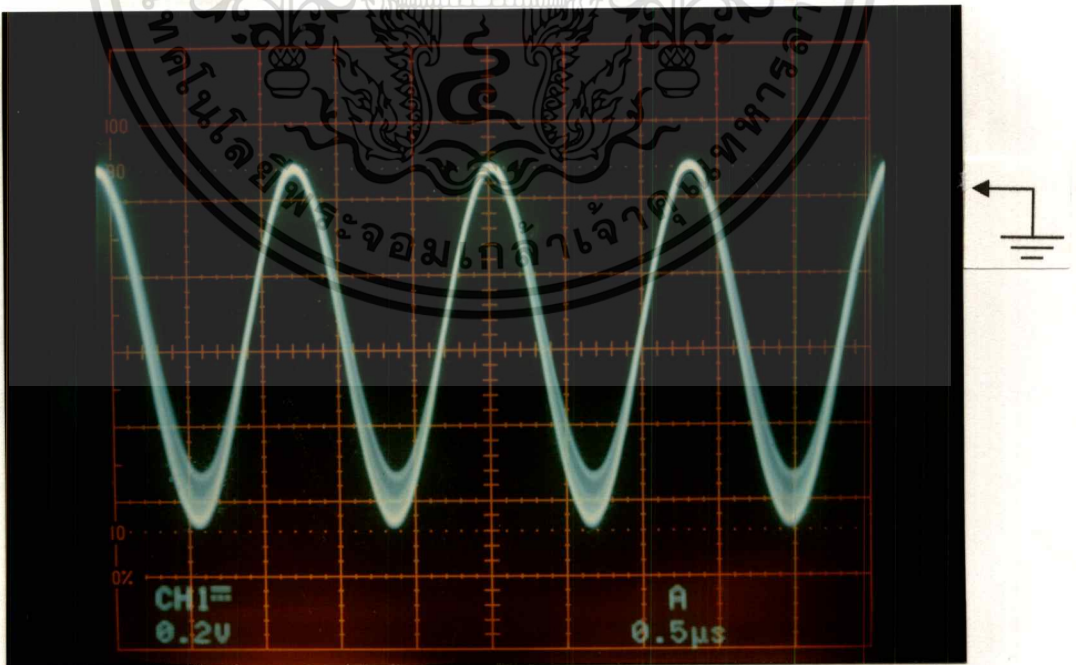
เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชนในเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นแปะชื่อบริษัทในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 60



แสดงสัญญาณที่จุด 6 เทียบกราวนด์: 0.2 V./Div., 0.5  $\mu$ sec./Div.:  $\times 1,000$  Probe.: No Load

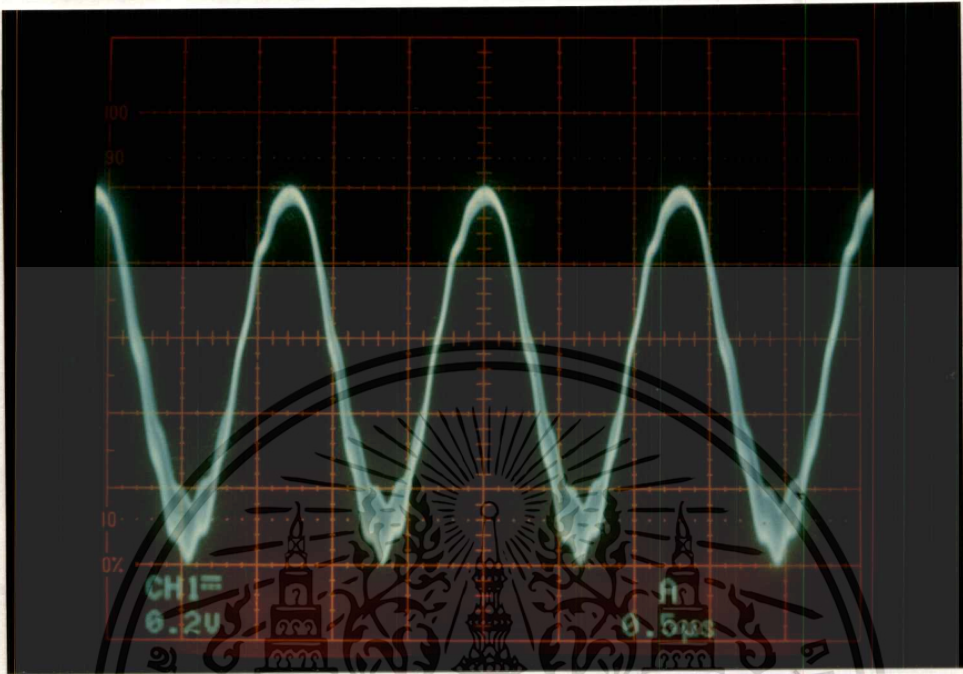
ภาพที่ 61



แสดงสัญญาณที่จุด 7 เทียบกราวนด์: 0.2 V./Div., 0.5  $\mu$ sec./Div.:  $\times 1,000$  Probe.: No Load

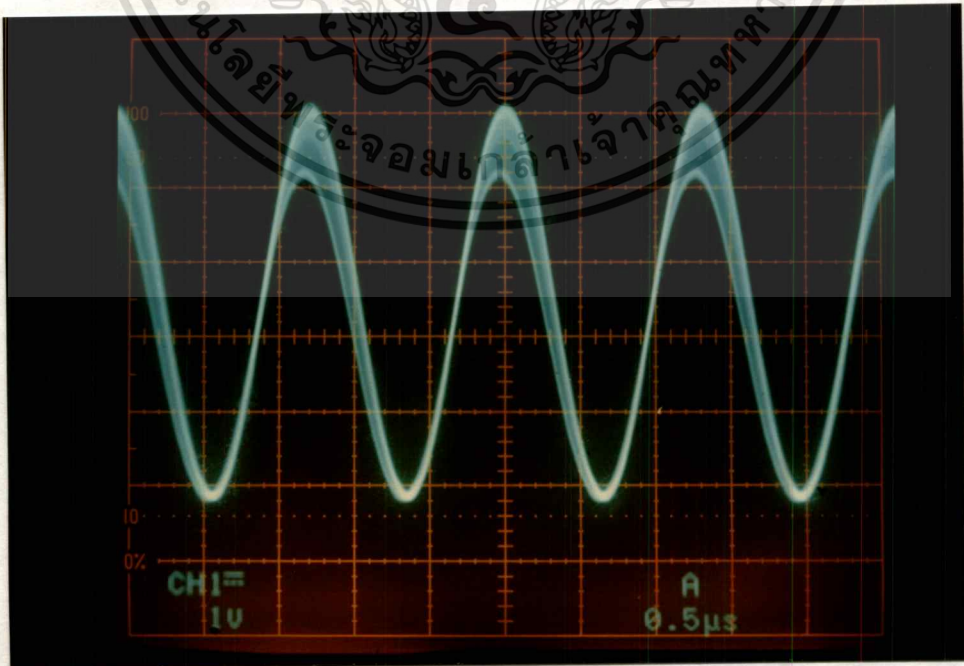
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 64



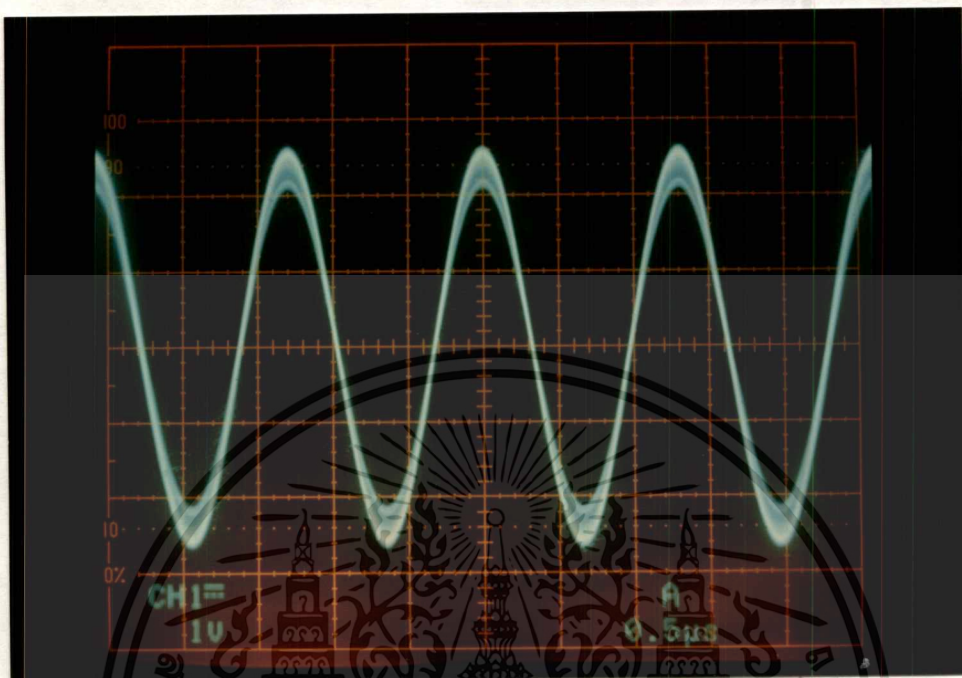
แสดงสัญญาณจุด 2 เทียบกราวด์: 0.2 V./Div., 0.5 μsec./Div.: ×1,000 Probe.: On Load

ภาพที่ 65



เอกสารนี้เป็นเอกสารของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
แสดงสัญญาณจุด 3 เทียบกราวด์: 1 V./Div., 0.5 μsec./Div.: × 1,000 Probe.: On load  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 66



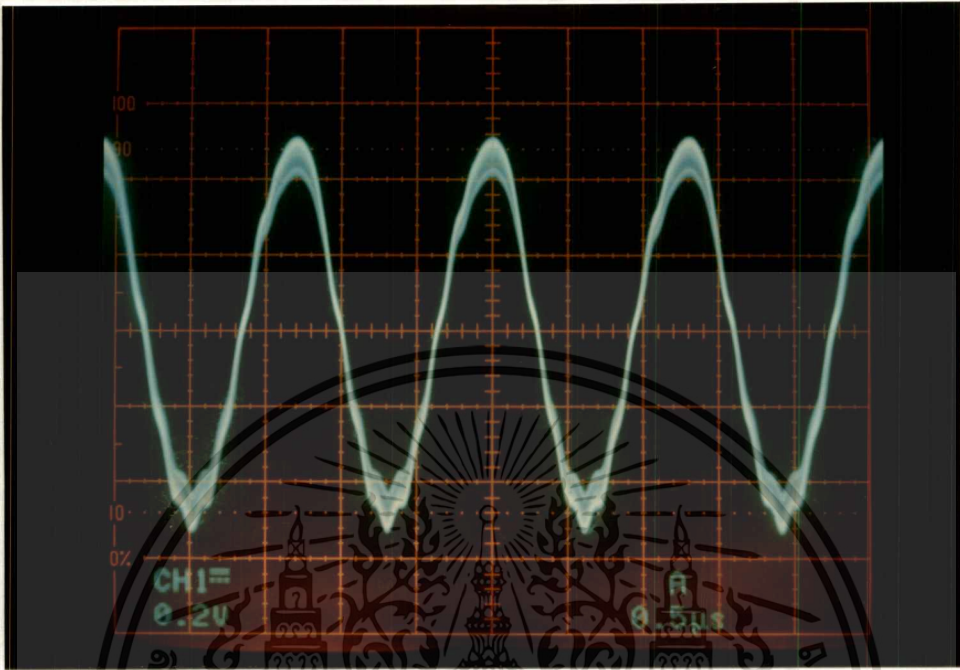
แสดงสัญญาณจุด 4 เทียบกราวด์: 1 V./Div., 0.5  $\mu$ sec./Div.:  $\times 1,000$  Probe.: On Load

ภาพที่ 67



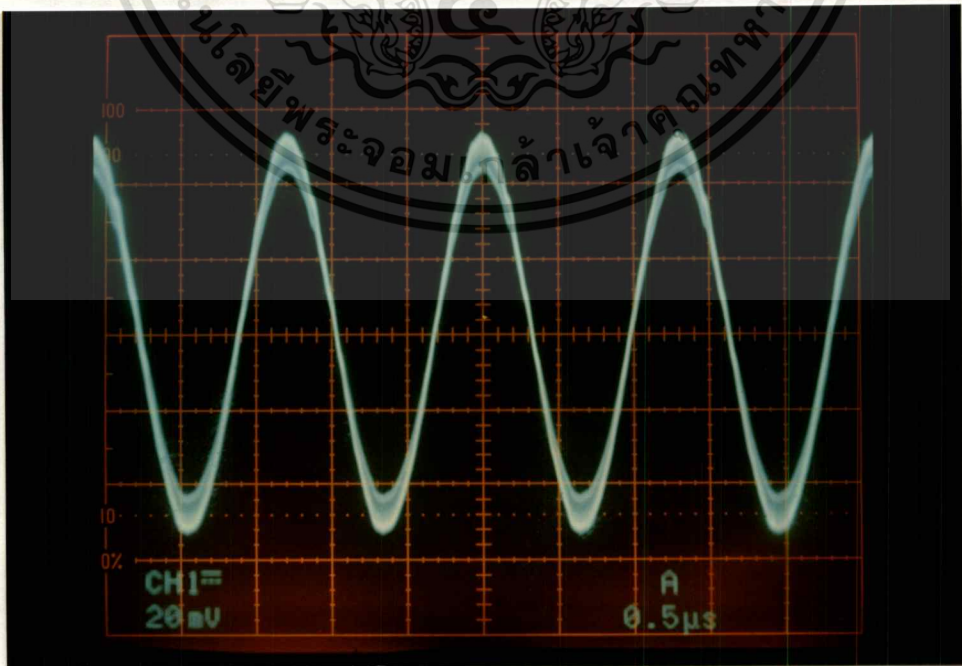
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 68



แสดงสัญญาณจุด 6 เทียบกราวด์: 0.2 V/Div., 0.5  $\mu$ sec./Div.:  $\times 1,000$  Probe.: On Load

ภาพที่ 69



แสดงสัญญาณक्रमขดลวดให้ความร้อน: 20 V/Div., 0.5  $\mu$ sec./Div.: On Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กำลังงานสัมพัทธ์

หัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับกำลังงานและประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบโดยพิจารณาจากผลการทดสอบระบบที่ได้ออกแบบไว้ที่ระดับแรงดันแอนโอดไบออส 3,200 โวลต์ วงจรเทงก์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ,  $C_T$  5,550 พิโกฟารัด และตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำโดยรวม,  $L_T = L_{Tp} + L_{gp}$ , 11.3 ไมโครเฮนรี ผลของสัญญาณแรงดันตามจุดต่างๆ ในวงจรที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นดังภาพที่ 56 ถึงภาพที่ 69

การพิจารณากำลังงานสัมพัทธ์เริ่มจากการพิจารณากำลังงานที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับแอนโอดโดยจ่ายในระดับแรงดัน,  $E_{bb}$ , 3,200 โวลต์ ที่ปริมาณมากระแสแอนโอด,  $I_b$ , ที่วัดได้คือ 0.188 แอมป์ ดังนั้นปริมาณกำลังงานที่จ่ายให้กับแอนโอด,  $P_m$ , เมื่อพิจารณาประกอบสมการ (5.29) คือ <sup>[1]</sup>.

$$P_m = E_{bb} I_b = 3,200 V_{DC} \times 0.188 A. = 2,595.2 W.$$

ปริมาณกำลังงานที่อุปกรณ์แอกทีฟจ่ายให้กับวงจรเทงก์เพื่อให้วงจรเทงก์ดำรงสภาพการออกสวิตช์สามารถพิจารณาได้จากสมการ (5.37) เมื่อกำหนดให้  $E_{p1m}$  มีค่าประมาณ 2,300 โวลต์ และเมื่อพิจารณาสมการ (5.33) ซึ่งเป็นสมการประเมินปริมาณกระแสประกอบด้วยกราฟกระแสคงที่ของหลอดไตรโอดในภาพที่ 51 จะพบว่า  $I_{p1m}$  มีค่า 1.644 แอมป์ ดังนั้นจึงสามารถประเมินปริมาณกำลังงานที่วงจรขยายกำลังจ่ายให้กับวงจรเทงก์,  $P_{out}$  ได้ดังนี้

$$P_{out} = \frac{1}{2} E_{p1m} I_{p1m} = \frac{1}{2} \times 2,300 V \times 1.644 A. = 1,890.6 W.$$

ปริมาณกำลังงานสูญเสียที่แอนโอด (Anode Power Dissipation,  $P_d$ ) จึงมีค่าเป็น

$$P_d = P_m - P_{out} = 2,595.2 W. - 1,890.6 W. = 704.6 W.$$

ดังนั้นประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของวงจรแอนโอดจึงมีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1,890.6 \text{ W.}}{2,595.2 \text{ W.}} \times 100\% = 72.85\%$$

เมื่อพิจารณาในส่วนของวงจรกริด กำลังงานที่ใช้ในการขับกริด,  $P_g$  มีค่าดังนี้

$$P_g = E_{gm} I_c = 520 \text{ V.} \times 145 \text{ mA.} = 75.4 \text{ W.}$$

และกำลังงานที่สูญเสียไปกับตัวต้านทานกริดเพื่อการสร้างแรงดันกริดไบแอส,  $P_{cc}$  มีค่าดังนี้

$$P_{cc} = E_{cc} I_c = 320 \text{ V.} \times 145 \text{ mA.} = 46.4 \text{ W.}$$

ดังนั้นปริมาณกำลังงานสูญเสียให้กับวงจรขับกริด,  $P_o$  จึงมีค่าดังนี้

$$P_o = P_g - |P_{cc}| = 75.4 \text{ W.} - 46.4 \text{ W.} = 29 \text{ W.}$$

ในการประเมินปริมาณกำลังงานที่ระบบจ่ายให้กับโหลดนั้น เนื่องจากวงจรในส่วนจ่ายกำลังงานสู่ โหลดนั้นประกอบไปด้วยวัสดุตัวนำซึ่งประกอบกันเป็นโครงสร้างที่ยากสำหรับการประยุกต์อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแส ดังนั้นการทดสอบวัดปริมาณกำลังงานที่ระบบจ่ายสู่หลอดขุมไฟแข็งนั้นจึงใช้วิธีการตรวจวัดกำลังงานที่ถ่ายโอนจากระบบสู่ของไหลซึ่งก็คือการไหลเวียนน้ำผ่านท่อเหล็กกลวงซึ่งใช้แทนหลอดขุมไฟแข็ง จากนั้นวัดอุณหภูมิน้ำโดยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อนำค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างช่วงระยะเวลาไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณกำลังงานที่น้ำได้รับซึ่งก็คือปริมาณกำลังงานที่หลักได้รับถ่ายเทจากระบบ รูปแบบการตรวจวัดปริมาณกำลังงานแสดงให้เห็นดังภาพที่ 70 พร้อมกับผลการตรวจวัดอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ดังภาพที่ 71 โดยทำการตรวจวัดเป็นเวลา 5 นาที ด้วยปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบ 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง 28.5 องศาเซลเซียส

ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้นี้ สามารถนำมาใช้ในการประเมินปริมาณกำลังงานที่น้ำได้รับหรือปริมาณกำลังงานที่ระบบถ่ายเทให้กับวัสดุขุมไฟแข็งจากสมการ (7.1)<sup>[8]</sup>

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m C_p \Delta T}{\Delta t} \quad (7.1)$$

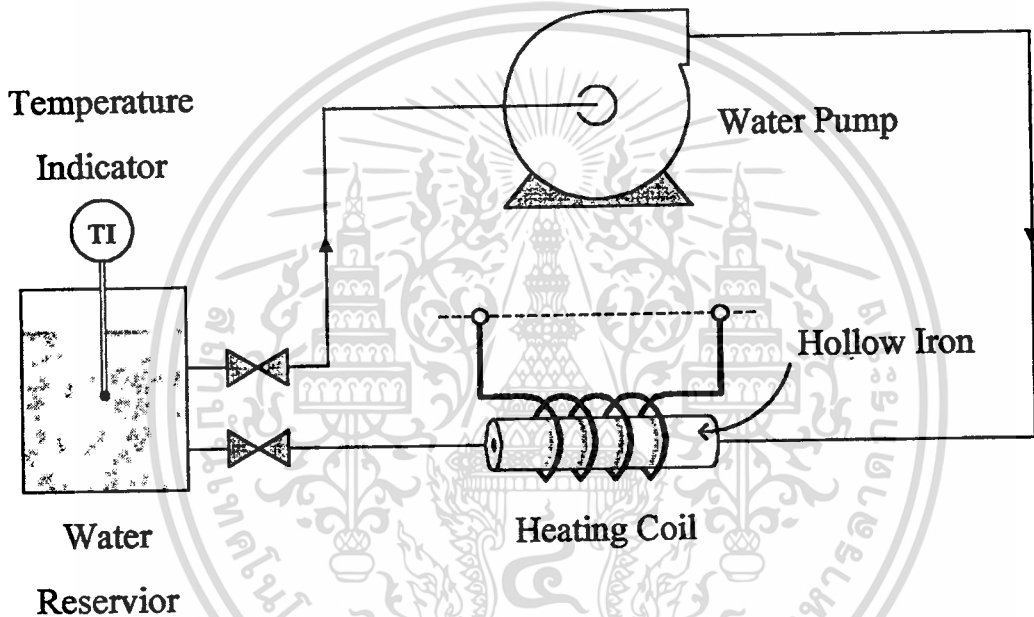
เมื่อ  $m$  คือมวลของน้ำ (กิโลกรัม)

$C_p$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.184 กิโลจูล/กิโลกรัม·เคลวิน)

$\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

$\Delta t$  คือช่วงระยะเวลาที่ของไหลได้รับความร้อน (วินาที)

ภาพที่ 70



แสดงการวัดปริมาณกำลังงานที่ระบบถ่ายโอนสู่เหล็กชุบผิวแข็งจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ไหลผ่านท่อเหล็กกลวง

ผลการทดสอบด้วยปริมาณน้ำ 5 กิโลกรัม เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 28.5 องศาเซลเซียส ได้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำในแต่ละช่วงนาทีโดยเฉลี่ยคือ 2.84 องศาเซลเซียส เมื่อแทนค่าที่ได้ลงในสมการ (7.1) จะได้ปริมาณกำลังงานที่น้ำได้รับคือ 990.21 วัตต์ ซึ่งก็คือปริมาณกำลังงานที่เหล็กชุบผิวแข็งได้รับจากระบบ,  $P_{load}$

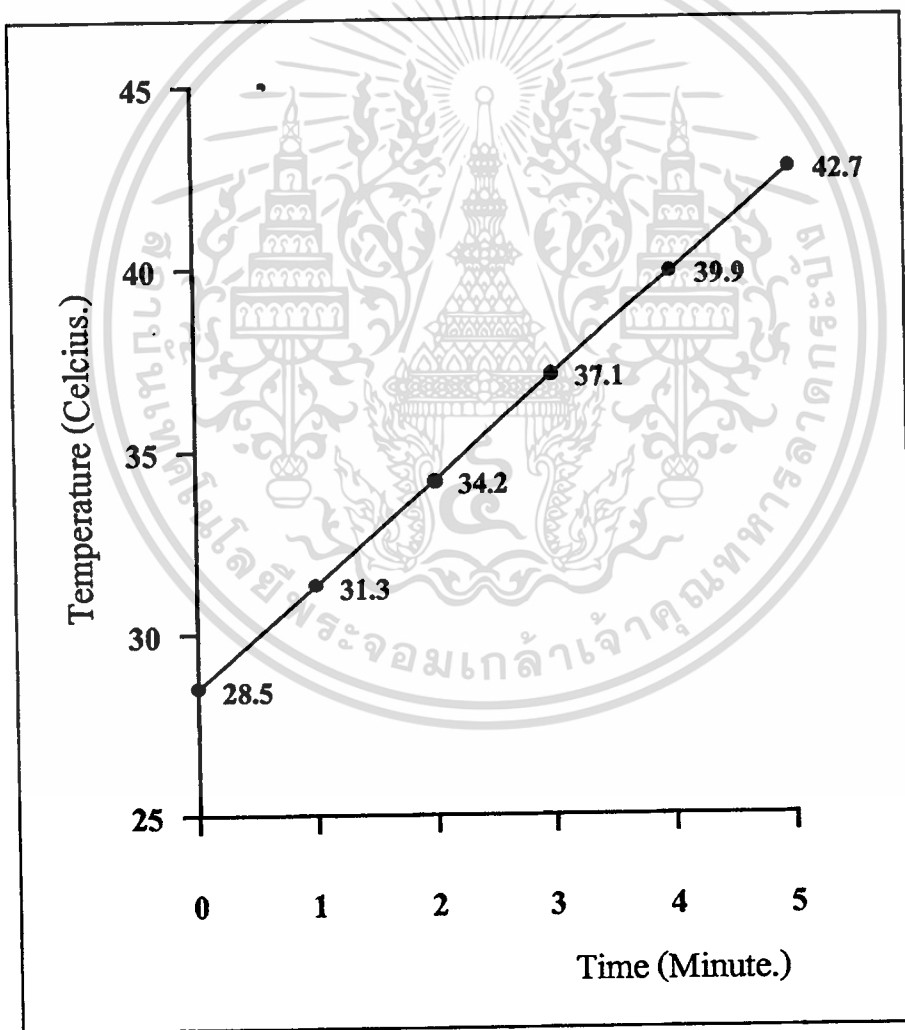
ในขณะที่ปริมาณกำลังงานที่แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับระบบ,  $P_{in}$ , คือ 2,595.21 วัตต์ ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ,  $\eta_{system}$ , คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{\text{system}} = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{990.21 \text{ W.}}{2,595.20 \text{ W.}} \times 100\% = 38.16\%$$

การประเมินปริมาณกำลังงานของระบบที่จ่ายให้กับเหล็กชุบผิวแข็งโดยประเมินจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ไหลผ่านท่อเหล็กกลวงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีที่มีการวัดปริมาณทางไฟฟ้าไม่สามารถกระทำได้ แต่สิ่งที่ควรระวังก็คือการสูญเสียความร้อนจกกระบวนการวัดซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับความแม่นยำในการประเมินปริมาณกำลังงาน

ภาพที่ 71



แสดงผลการวัดอุณหภูมิน้ำที่ไหลผ่านท่อเหล็กกลวงจากภาพที่ 70

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1) วงจรเทงก์ไม่สามารถออกสวิตลิตส์สัญญาณที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ การทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์เป็นเพียงการอธิบายการทำงานของอุปกรณ์ในทางอุดมคติหรือในทางทฤษฎีเท่านั้น ไม่สามารถเกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริงได้เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่ตัวนำและอุปกรณ์ส่วนประกอบภายในวงจรเทงก์จะปราศจากความต้านทานแฝงซึ่งจะปรากฏเป็นความสูญเสียในการออกแบบนั้น ได้กำหนดความถี่ในการใช้งาน,  $\omega_{\text{Design}}$  ไว้ที่

$$\omega_{\text{Design}}^2 = \frac{1}{L_T' C_T} \sqrt{1 + \frac{R_T'}{r_p}}$$

เมื่อ  $R_T'$  คือตัวต้านทานประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในวงจรเทงก์,  $L_T'$  คือตัวเหนี่ยวนำประสิทธิผล,  $C_T$  คือตัวเก็บประจุที่ประกอบอยู่ภายในวงจรเทงก์และ  $r_p$  คือค่าความต้านทานแฝงของแอดโนด ซึ่งในการออกแบบจะควบคุมให้  $R_T'$  มีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ใช้ในการกำหนดค่า  $\omega_{\text{Design}}$  คือ

$$\omega_{\text{Design}}^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{L_T' C_T}$$

เมื่อ  $\omega_0$  คือค่าความถี่เรโซแนนซ์, ผลการออกที่ได้นี้เสมือนการออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งความถี่ที่ได้จะไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ แต่จะเป็นเพียงความถี่ที่ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ความถี่ของระบบที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบคือ 750kHz. แต่ค่าความถี่ที่ปรากฏคือ 769kHz. ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ สาเหตุประการหนึ่งคือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีการเบี่ยงเบนไปจากค่าปกติเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง เช่นค่าความจุของตัวเก็บประจุ, ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดใน

วงจรทางกึ่ง และสาเหตุอีกประการหนึ่งก็คือค่าความสูญเสียต่างๆ ที่แฝงอยู่ในวงจรทางกึ่งซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความถี่ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความถี่ที่เกิดขึ้นนี้ก็ยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และไม่ก่อให้เกิดผลที่แตกต่างกันมากนักในการใช้งาน

2) ในระหว่างการให้ความร้อนกับแท่งเหล็ก ตั้งแต่ช่วงที่แท่งเหล็กเพิ่งถูกนำเข้าไปอยู่บริเวณส่วนกลางของขดลวดให้ความร้อนจนกระทั่งแท่งเหล็กร้อนแดง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระบบคือ ในช่วงที่แท่งเหล็กเพิ่งถูกนำเข้าไปบริเวณส่วนกลางขดลวด อิมพีแดนซ์ของวงจรทางกึ่งจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของระดับแรงดันสัญญาณแอมโวนด์ หลังจากนั้นเมื่อแท่งเหล็กเริ่มร้อนแดง ระดับแรงดันสัญญาณแอมโวนด์จะค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจนในที่สุดระดับแรงดันเกือบเท่ากับระดับแรงดันในขณะปราศจากโหลดหรือมิได้ให้ความร้อนกับแท่งเหล็กซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรทางกึ่ง จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเห็นว่าในขณะที่แท่งเหล็กมีอุณหภูมิปกติหรือขณะเพิ่งเริ่มให้ความร้อนนั้น ความต้านทานของเนื้อเหล็กมีค่าค่อนข้างต่ำส่งผลให้ปริมาณกระแสไหลวนมีค่าสูงสะท้อนผลที่เกิดขึ้นนี้ถึงวงจรทางกึ่งทำให้วงจรทางกึ่งถูกดึงกำลังงานมาก ค่าความต้านทานที่ถ่ายโอนสู่วงจรทางกึ่งจึงมีค่าค่อนข้างสูง ในที่สุดส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของวงจรทางกึ่งมีค่าลดลง และเมื่อแท่งเหล็กเริ่มร้อนแดงความต้านทานเนื้อเหล็กเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสไหลวนลดลง วงจรทางกึ่งจ่ายกำลังงานลดลง ค่าความต้านทานที่ถ่ายโอนสู่วงจรทางกึ่งลดลง อิมพีแดนซ์ของวงจรทางกึ่งจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจนในที่สุดเมื่อเหล็กร้อนแดงจนถึงระดับหนึ่งซึ่งปริมาณกระแสไหลวนบริเวณผิวแท่งเหล็กมีค่าต่ำ ในช่วงนี้วงจรทางกึ่งจะจ่ายกำลังงานต่ำกว่าในช่วงเริ่มต้น อิมพีแดนซ์ของวงจรทางกึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกือบมีระดับเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ในขณะปราศจากโหลดเนื่องจากความต้านทานที่ถ่ายโอนสู่วงจรทางกึ่งมีค่าลดลง สิ่งที่ควรระมัดระวังในช่วงของการเปลี่ยนแปลงโหลดก็คือการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของระดับแรงดันออกสวิตชิ่งซึ่งจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขับหรือสัญญาณป้อนกลับซึ่งถ้าขณะเดียวกันค่าคงที่ทางเวลาที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวต้านทานกริดและกริดคาปาซิเตอร์มีค่าสูงเกินไป การปรับตัวของระดับแรงดันกริดไบแอสจะไม่สามารถสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณขับ ในที่สุดอาจเป็นสาเหตุให้การออกสวิตชิ่งของวงจรทางกึ่งสิ้นสุดลง ดังนั้นในช่วงของการเปลี่ยนแปลงโหลด ค่าคงที่ทางเวลาจึงไม่ควรจะมีค่าสูงเกินไป

3) จากภาพที่ 72 ในการหุบผิวแข็งเหล็กด้วยความถี่ย่านวิทยุ ส่วนที่จะได้รับกำลังงานความร้อนมากเป็นพิเศษก็คือบริเวณผิวเหล็กซึ่งสังเกตได้จากการทดสอบคือเมื่อพิจารณาจากบริเวณหน้าตัดของแท่งเหล็ก จะเห็นว่าแท่งเหล็กจะเริ่มร้อนแดงจากบริเวณพื้นผิวขอบด้านนอก หลังจากนั้นความร้อนแดงของเหล็กจะเริ่มกระจายเข้าสู่บริเวณส่วนกลางแท่งเหล็กซึ่งก็คือการแพร่กระจายของความร้อนจากบริเวณผิวเข้าสู่บริเวณส่วนกลางแท่งเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การไบแอสกริดโดยอาศัยกระแสกริดรั่วไหล ซึ่งเป็นเทคนิคการไบแอสวงจรขยายกำลังชั้นซี โดยมีหลอดไตรโอดเป็นอุปกรณ์แอททิฟ เป็นหัวใจสำคัญของการกำเนิดสัญญาณโดยการอสซิลเลตในตัว นอกจากนี้ยังเป็นรูปแบบการสร้างระดับแรงดันกริดไบแอสโดยมีต้องอาศัยแหล่งจ่ายแรง

ภาพที่ 72



แสดงภาพตัดขวางของแท่งเหล็กขณะได้รับความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

จากภายนอก ระดับแรงดันกริดไบแอสที่เกิดขึ้นนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณขับหรือสัญญาณป้อนกลับโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสกริดที่รั่วเข้ามา ชาร์จกริดคาปาซิเตอร์ในช่วงสูงสุดของสัญญาณขับ อย่างไรก็ตามวิธีการไบแอสแบบนี้ก็ยังคงมีข้อเสียคือถ้าหากการอสซิลเลตของระบบลื่นสุดลงไม่ว่าจะด้วยสาเหตุใดก็ตามในขณะที่แรงดันไบแอสแอนโอดยังคงอยู่ ปริมาณกระแสแคโทดหรือกระแสสัญญาณซึ่งจะเกิดขึ้นค่อนข้างมากในช่วงนี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายกับหลอดไตรโอดเนื่องจากปราศจากแรงดันกริดไบแอสช่วยด้านการไหลของกระแสแคโทด ดังนั้นการไบแอสกริดด้วยวิธีการนี้จึงจำเป็นต้องมีวงจรป้องกันกระแสเกินพิภักและไม่ควรปล่อยให้อุปกรณ์ได้รับการไบแอสในสภาวะที่การอสซิลเลตหยุดลงซึ่งสังเกตได้จากปริมาณกระแสกริดจะมีค่าเป็นศูนย์

5) หม้อแปลงแกนอากาศ เป็นหม้อแปลงชนิดเคียวเท่านั้นที่สามารถนำมาประยุกต์กับการถ่ายโอนกำลังงานในรูปสัญญาณความถี่ในย่านวิทยุจนกว่าระดับแรงดันสัญญาณทางด้านปฐมภูมิและปริมาณกระแสทางด้านทุติยภูมิที่ค่อนข้างสูง อันเนื่องมาจากหม้อแปลงชนิดนี้มีโครงสร้างที่มีอากาศเป็นแกนดังนั้นจึงปราศจากปัญหาในเรื่องความสูญเสียในแกนแม่เหล็กและปราศจากปัญหาการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กส่งผลให้หม้อแปลงมีคุณลักษณะการทำงานเป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามหม้อแปลงชนิดนี้ก็ยังคงมีข้อเสียในแง่ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานของหม้อแปลงซึ่งจะไม่สูงเหมือนหม้อแปลงแกนสารแม่เหล็กโดยทั่วไป นอกจากนี้หม้อแปลงชนิดนี้ยังมีความเหมาะสม

สมกับการใช้งานควบคู่กับขดลวดให้ความร้อนชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ โดยเฉพาะขดลวดที่มีจำนวนรอบเพียงรอบเดียวอย่างขดลวดชนิดที่ให้ความร้อนกับผิวเป็นบริเวณที่ไม่กว้างนัก (Localized Heating) เพราะสามารถมีพีคเข้ากับขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบขดลวดเพียงหนึ่งรอบในลักษณะของแผ่นโลหะซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการค้ำปลั่งสามารถปรับได้จากการปรับระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายโอนพารามิเตอร์จากบริเวณขดลวดให้ความร้อนไปสู่วงจรแท่งกึ่งนำสาร ถ้าระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองไม่มากนักก็จะส่งผลให้วงจรแท่งกึ่งนำสารในการถ่ายโอนกำลังงานค่อนข้างมากรวมไปถึงภาระในการจ่ายกำลังงานของวงจรขยายกำลังที่เพิ่มขึ้นตามกัน อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานที่ถ่ายโอนสู่วงจรแท่งกึ่งนำสารจากการให้ความร้อนกับแท่งเหล็กจะค่อนข้างสูงอันเป็นผลจากสัมประสิทธิ์การค้ำปลั่งของหม้อแปลงที่สูง ในทางตรงกันข้ามหากระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองมีค่ามากกว่า ภาระในการจ่ายกำลังงานของวงจรแท่งกึ่งนำสารจะลดลงรวมไปถึงภาระในการจ่ายกำลังงานของวงจรขยายกำลังซึ่งจะลดลงตามกันอันเนื่องมาจากความต้านทานที่ถ่ายโอนสู่วงจรแท่งกึ่งนำสารเนื่องจากการให้ความร้อนกับแท่งเหล็กมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลจากสัมประสิทธิ์การค้ำปลั่งของหม้อแปลงที่ต่ำกว่า

6) หม้อแปลงแกนอากาศที่ขดลวดทุติยภูมิมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะมีข้อได้เปรียบหม้อแปลงแกนอากาศที่ขดลวดทุติยภูมิมีลักษณะเป็นขดลวดคือสัมประสิทธิ์การค้ำปลั่งของหม้อแปลงจะสูงกว่าส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังงานสูงกว่า ส่วนข้อเสียคือสัมประสิทธิ์การค้ำปลั่งของหม้อแปลงจะคงที่ หากต้องการปรับเปลี่ยนค่านั้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงการมีขงจึงกระทำไม่ได้ยากสำหรับโหลดแต่ละชนิด

7) หลอดสูญญากาศเป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่สามารถให้การตอบสนองต่อความถี่ย่านวิทยุที่ระดับแรงดันสูงควบคู่กับระดับกำลังงานที่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในการชุบผิวแข็งวัสดุได้ สาเหตุประการหนึ่งที่อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถให้การตอบสนองได้ก็เนื่องมาจากค่าความเก็บประจุแฝงระหว่างขั้วที่ค่อนข้างต่ำ ปัญหาที่เกิดจากความเพี้ยนของสัญญาณเมื่อใช้งานที่ความถี่สูงจึงลดลง

8) ความยาวของตัวนำต่างๆ ในระบบควรควบคุมให้มีขนาดสั้นที่สุด มิฉะนั้นพารามิเตอร์แฝงต่างๆ จะส่งผลให้ระดับ kVA ของระบบลดลง

## บรรณานุกรม

1. John D. Ryder. Engineering Electronics with Industrial Applications and Control. New York: McGraw-Hill, 1957.
2. Russel M. Kerchner and George F. corcoran. Alternating-current Circuits. New York: Wiley & Sons, 1960.
3. Karl R. Spangenberg. Fundamental of Electron Devices. New York: McGraw-Hill, 1957.
4. Irving M. Gottlieb. Basic Oscillators. Bombay: Russi J. Taraporevala, 1963.
5. John Davies and Peter Simpson. Induction Heating Handbook. London: McGraw-Hill, 1979.
6. Samuel Seely. Radio Electronics. Tokyo: McGraw-Hill, 1956.
7. D.J. Harris and P.N. Robson. Vacuum and Solid State Electronics. New York: Pergamon, 1963.
8. พิชิต ลำยอง และ ฉัฐพร ฤทธิ์นุ้ม. การออกแบบเครื่องขุมผิววัสดุความถี่ย่าน RF โดยใช้ไดรไอโอด เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ. วิศวกรรมลาดกระบัง หน้า 9 ถึง 18. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 1996.
9. พิชิต ลำยอง และ ฉัฐพร ฤทธิ์นุ้ม. การวิเคราะห์ห้มี้อแปลงแกนอากาศสำหรับเครื่องขุมผิวแข็ง วัสดุความถี่ย่านวิทยุ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 พ.ศ. 2539 หน้า PW-60 ถึง PW-65. ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 1996.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

**ข้อมูลพื้นฐานของหลอดไฟ LED TB5/2500 (PHILIPS)**

TB 5/2500

## RF POWER TRIODE

Radiation cooled triode of glass construction intended for use as an industrial oscillator.

QUICK REFERENCE DATA				
Oscillator output power ( $W_o - W_{\text{fdb}}$ ), typical	$W_{\text{osc}}$	2.73	kW.	
Frequency for full ratings	$f$	max.	50	MHz.

To be read in conjunction with "General Operational Recommendations"

## A. RF CLASS C OSCILLATOR FOR INDUSTRIAL USE

with anode voltage from a three-phase rectifier

OPERATING CONDITIONS, continuous service

frequency	$f$	50	50	50	50	MHz.
Oscillator output power ( $W_o - W_{\text{fdb}}$ )	$W_{\text{osc}}$	3.73	2.61	2.04	1.44	kW.
Anode voltage	$V_a$	6	5	4	3	kV.
Anode current	$I_a$	600	700	700	700	mA.
Anode input power	$W_{\text{in}}$	3,600	3,500	2,800	2,100	W.
Anode dissipation	$W_a$	760	860	640	540	W.
Anode output power	$W_o$	2,840	2,720	2,160	1,560	W.
Anode efficiency	$\eta_a$	79	78	77	74	%
Oscillator efficiency	$\eta_{\text{osc}}$	76	75	73	69	%
Feedback ratio	$V_{\text{gp}}/V_{\text{sp}}$	13	17	20	25	%
Grid resistor	$R_g$	3	2.5	2	1.5	k $\Omega$
Grid current, on load	$I_g$	150	160	180	200	mA.
Grid voltage, negative	$-V_g$	450	400	360	300	V.
Grid dissipation	$W_g$	43	46	55	60	W.
Grid resistor dissipation	$W_{Rg}$	67	64	65	60	W.

Recommended grid blocking capacitor at high frequencies about 100 pF.

at 1 MHz.

about 1,000 pF.

February 1988

TB 5/2500

## LIMITATING VALUES (Absolute max. rating system)

Frequency for full ratings	$f$	up to	50	MHz.
Anode voltage	$V_a$	max.	7	kV.
Anode current	$I_a$	max.	750	mA.
Anode input power	$W_{ia}$	max.	4,000	W.
Anode dissipation	$W_a$	max.	800	W.
Grid voltage	$-V_g$	max.	1,250	V.
Grid current, on load	$I_g$	max.	300	mA.
off load	$I_g$	max.	400	mA.
Grid dissipation	$W_g$	max.	150	W.
Grid circuit resistance	$R_g$	max.	10	k $\Omega$ .
Cathode current, mean	$I_g$	max.	1.2 <sup>max</sup>	A.
peak	$W_{Rg}$	max.	4.3	A.
Envelope temperature	$T_{env}$	max.	350	$^{\circ}\text{C}$
Seal temperature	$t$	max.	220	$^{\circ}\text{C}$

February 1988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TB 5/2500

## B. RF CLASS C OSCILLATOR FOR INDUSTRIAL USE

with anode voltage from a three-phase rectifier

OPERATING CONDITIONS, intermittent service

Frequency	$f$	50	50	MHz.
Oscillator output power ( $W_o - W_{\text{feedb}}$ )	$W_{\text{osc}}$	4.25	3.24	kW.
Anode voltage	$V_a$	6	5	kV.
Anode current	$I_a$	950	900	mA.
Anode input power	$W_{\text{ia}}$	5,700	4,500	W.
Anode dissipation	$W_a$	1,300	1,125	W.
Anode output power	$W_o$	4,400	3,375	W.
Anode efficiency	$\eta_a$	77	75	%
Oscillator efficiency	$\eta_{\text{osc}}$	74	72	%
Feedback ratio	$V_{\text{gp}}/V_{\text{sp}}$	17	20	%
Grid resistor	$R_g$	2.5	2	k $\Omega$ .
Grid current, on load	$I_g$	190	190	mA.
Grid voltage, negative	$-V_g$	475	380	V.
Grid dissipation	$W_g$	63	63	W.
Grid resistor dissipation	$W_{R_g}$	90	72	W.
<b>LIMITING VALUES (Absolute max. rating system)</b>				
Frequency for full ratings	$f$	max.	50	MHz.
Anode voltage	$V_a$	max.	7	kV.
Anode current	$I_a$	max.	1,000	mA.
Anode input power	$W_{\text{ia}}$	max.	7,000	W.
Anode dissipation	$W_a$	max.	See Fig. 2	
Grid voltage	$-V_g$	max.	1,250	V.
Grid current, on load	$I_g$	max.	300	mA.
off load	$I_g$	max.	400	mA.
Grid dissipation	$W_g$	max.	150	W.
Grid circuit resistance	$R_g$	max.	10	k $\Omega$ .
Cathode current, mean	$I_k$	max.	1.4	A.
peak	$I_{\text{kp}}$	max.	4.3	A.
Envelope temperature	$T_{\text{env}}$	max.	350	$^{\circ}\text{C}$
Seal temperature	$t$	max.	220	$^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TB 5/2500

## C. RF CLASS C OSCILLATOR FOR INDUSTRIAL USE

with anode voltage from single-phase rectifier without filter

OPERATING CONDITIONS, continuous service

Frequency	$f$	50	50	MHz.
Oscillator output power ( $W_o - W_{\text{feedb}}$ )	$W_{\text{osc}}$	2,655	2,451	W.
Anode voltage	$V_a$	5.4	4.5	kV.
Anode current	$I_a$	530	600	mA.
Anode input power	$W_{\text{ia}}$	3,520	3,320	W.
Anode dissipation	$W_a$	770	770	W.
Anode output power	$W_o$	2,750	2,550	W.
Anode efficiency	$\eta_a$	78	77	%
Oscillator efficiency	$\eta_{\text{osc}}$	75	74	%
Feedback ratio	$V_{\text{gp}}/V_{\text{sp}}$	13	15.5	%
Grid resistor	$R_g$	3	2.5	k $\Omega$ .
Grid current, on load	$I_g$	140	150	mA.
Grid voltage, negative	$-V_g$	420	375	V.
Grid dissipation	$W_g$	36	43	W.
Grid resistor dissipation	$W_{Rg}$	59	56	W.
<b>LIMITING VALUES (Absolute max. rating system)</b>				
Frequency for full ratings	$f$	Up to	50	MHz.
Anode voltage	$V_a$	max.	6.3	kV.
Anode current	$I_a$	max.	670	mA.
Anode input power	$W_{\text{ia}}$	max.	4,000	W.
Anode dissipation	$W_a$	max.	800	W.
Grid voltage	$-V_g$	max.	1,250	V.
Grid current, on load	$I_g$	max.	270	mA.
off load	$I_g$	max.	400	mA.
Grid dissipation	$W_g$	max.	150	W.
Grid circuit resistance	$R_g$	max.	10	k $\Omega$ .
Cathode current, mean	$I_k$	max.	1.0	A.
peak	$I_{kp}$	max.	3.3	A.
Envelope temperature	$T_{\text{env}}$	max.	350	$^{\circ}\text{C}$
Seal temperature	$t$	max.	220	$^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TB 5/2500

HEATING: direct; filament thoriatedtungsten

Filament voltage	$V_f$	6.3	V.
Filament current	$I_f$	32.5	A.

The filament is designed to accept temporary fluctuations of +5% and -10%.

#### CAPACITANCES

Anode to filament	$C_{af}$	0.25	pF.
Grid to filament	$C_{gf}$	10.5	pF.
Anode to Grid	$C_{ag}$	6.2	pF.

CHARACTERISTICS measured at  $V_a = 4 \text{ kV.}$ ,  $I_a = 190 \text{ mA.}$

Tranconductance	S	5.1	mA./V.
Amplification factor	$\mu$	22	

#### COOLING

In general cooling of the tube is not necessary at matched load. When the tube is mounted in a small cabinet adequate ventilation must be provide.

At non-matched load or at high anode voltages, combined with the highest operating frequencies a low-velocity air flow directed on the tube is necessary. A small fan will suffice; it is recommended to mount the fan underneath the tube socket.

#### ACCESSORIES

Socket	catalogue nr.	2422 511 05001
Anode connector	type	40665

February 1988

MECHANICAL DATA

Mounting positions: vertical

Net weight: approx. 600 g

Dimensions in mm

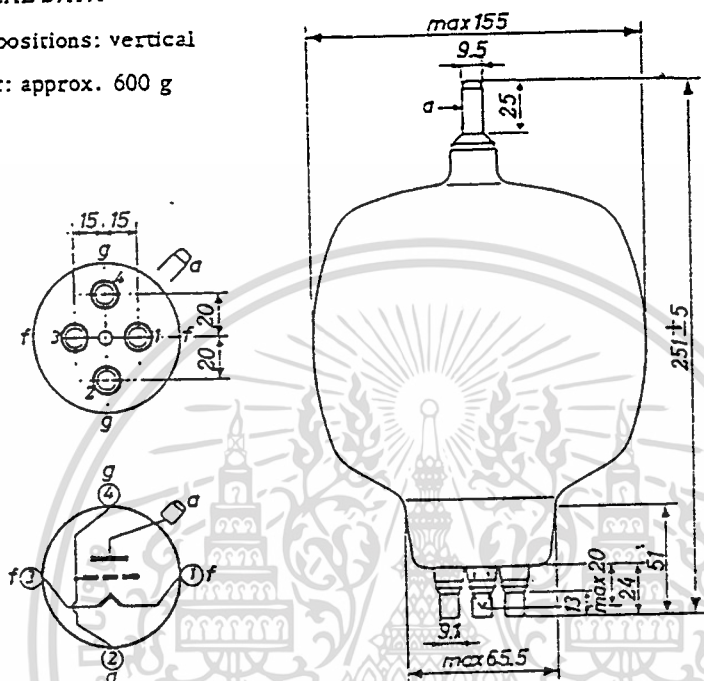


Fig. 1 Mechanical outline.

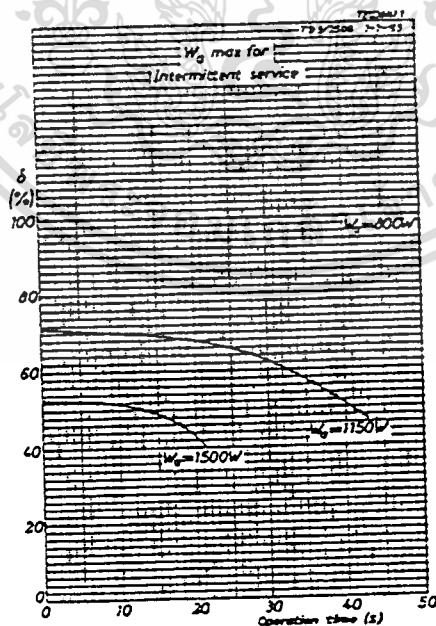


Fig. 2 Intermittent service. Limits of anode dissipation and cooling.

TB 5/2500

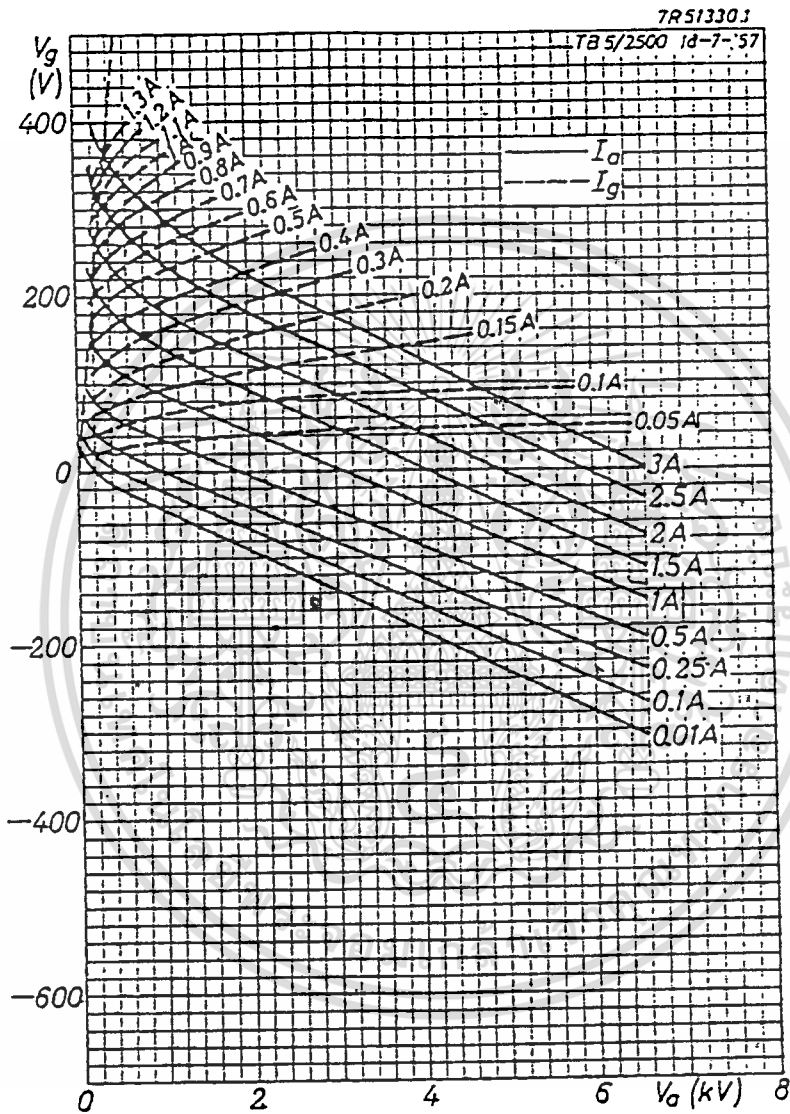


Fig. 3 Constant current characteristics.

February 1988

## ประวัติผู้เขียน

นายฉัฐพร ฤทธิ์นุ่ม เกิดวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 และเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระดับ 3 สังกัดฝ่ายบำรุงรักษา  
โรงไฟฟ้าบางปะกง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2537 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง  
วิศวกรระดับ 4 สังกัดฝ่ายบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าบางปะกง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้