

การประยุกต์ใช้วงจรขยาย คลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์  
สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

A CLASS E RESONANT INVERTER FOR ELECTRONIC  
BALLAST APPLICATIONS



วิเชียร เต็มอนุภาพกุล  
WICHAIN TEMARNUPHAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-217-1

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....30960

วัน, เดือน, ปี..... ๒๕.4 ๐.๐. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A CLASS E RESONANT INVERTER FOR ELECTRONIC  
BALLAST APPLICATIONS**



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

**1998**

**ISBN 974-622-217-1**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1998**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDENTS**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้วงจรขยาย คลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
นักศึกษา	นายวิเชียร เต็มอนุภาพกุล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. วัลลภ สุระกำพลธร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2541

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอ วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่นำวงจรขยาย Class E Resonant Inverter มาประยุกต์ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดประหยัดพลังงาน TL'D 18 W/54 ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าตรงแรงดันต่ำ หลักการที่สำคัญของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ คือ ต้องสามารถให้แรงดันตกคร่อมหลอดที่สูงมากพอ ขณะที่จุดหลอดในสถานะเริ่มต้น และต้องควบคุมกระแสให้พอเหมาะในช่วงที่หลอดทำงานในสถานะปกติ อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีค่าเป็นความต้านทานลบ กล่าวคือ ช่วงก่อนการจุดหลอดค่าความต้านทานหลอดจะมีค่าสูงมาก และจะลดลงเมื่อหลอดทำงาน ทำให้กระแสไหลผ่านหลอดมากขึ้น ทั้งนี้วงจร Class E Resonant Inverter ให้คุณสมบัติในการเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่, ทำงานในช่วงความถี่ที่สูง, ใช้จำนวนอุปกรณ์ค่อนข้างน้อย, การออกแบบที่ค่อนข้างง่าย รวมถึง ประสิทธิภาพที่สูงเนื่องมาจากการสวิตชิ่งจะเกิดในขณะที่แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ และจากการเลือกใช้งาน Parallel loaded Resonant Inverter ทำให้การจุดหลอดสามารถกระทำได้ครบทั้ง 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นแรกเป็นการอุ่นไส้หลอด ขั้นที่สองเป็นการจุดหลอด และ ขั้นสุดท้ายเป็นการทำงานสถานะปกติที่จ่ายกระแสคงที่ให้หลอด รวมถึงการออกแบบวงจรแมทชิ่งที่เหมาะสมผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (matching network or transformer matching) ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับหลอดได้หลายขนาดง่าย นอกจากนี้วงจรจะจ่ายกระแสผ่านหลอดอยู่ในรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากที่ความถี่สูงมากพอตัวหลอดจะมีคุณสมบัติเป็นตัวความต้านทานรีซิสแตนซ์เพียงอย่างเดียว ทำให้อายุการใช้งานหลอดยาวนานมากขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อช่วยในการออกแบบด้วย

<b>Thesis Title</b>	A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications
<b>Student</b>	Mr. Wichain Ternarnuphaphkul
<b>Thesis Advisor</b>	Prof. Dr. Wanlop Surakamponorn
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Electrical Engineering
<b>Year</b>	1998

### ABSTRACT

The low DC power supply class E resonant inverter used as an electronic ballast for 'TL'D 18 W/54 energy-saving fluorescent lamp is presented. Electronic ballast must provide enough open circuit voltage to start the fluorescent lamp and current limiting while the lamp is running. Due to a fluorescent lamp has negative impedance characteristic, the lamp must be driven by a current source or at least by a voltage source with sufficient high source impedance. Based on a class E resonant inverter that operates at high frequency, zero-voltage switching loss, requires low-cost component, simple design and a current source circuit behavior, may be utilized in electronic ballast. The parallel-loaded resonant inverter was selected because of their load-dependent at resonant frequency characteristics. So, all 3 stages of start up fluorescent lamp procedure (preheat, ignition and burning stage) can be achieved. And by the design of optimum matching coupling via transformer, this allows wide transformation ratios of actual lamp impedance into the class E effective load. It means that very simple to adapt all types of fluorescent lamps (lamp impedance) into electronic ballast circuit via matching transformer. Especially the class E circuit provides sinusoidal lamp current by the fact that fluorescent lamp is purely resistance at higher frequency. All the advantages of the class E resonant inverter with optimum matching yield a long tube life. And for this article also include program to help researcher to design electronic ballast easier.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นยอดดี กระผมใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. วัลลภ สุระกำพลธร อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึงกำลังใจในการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ใคร่ขอขอบพระคุณท่านเหล่านี้ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. รศ. ดร.วันชัย วีระจุจา
2. ดร. นนทวัฒน์ จุลเคชะ
3. ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ คมวิริยะ
4. คุณพงศ์พิชญ์ วิชาสุรมณฑล
5. ผศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
6. ดร. สมศักดิ์ ชุมช่วย
7. ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม
8. ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย
9. อ.อนวัชณ์ งามวนิชเลิศ
10. เจ้าหน้าที่วิจัย นิรุช จิรสวรรณกุล
11. นางสาวนพรัตน์ ชำพันธ์
12. เจ้าหน้าที่ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. เจ้าหน้าที่ประชาสัมพันธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. เจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความกรุณา

วิเชียร เต็มอนุภาพกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยสังเขป.....	1
1.2 พื้นฐานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	2
1.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างบัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็กกับ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	6
1.3.1 เปรียบเทียบกับบัลลาสต์แมกเนติกทั่วไป.....	6
1.3.2 เปรียบเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ.....	6
1.4 ความเป็นมา และวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	7
1.5 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	8
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 พื้นฐานวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์และทฤษฎีการทำงาน.....	10
2.1 ส่วนประกอบ และชนิดหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp Construction and Type).....	10
2.2 ขั้นตอนในการจุดหลอดก๊าซดีสชาร์จ.....	12
2.2.1. การเบรกดาวน์ (breakdown) ของก๊าซ.....	12
2.2.2. การโกลว์ (glow).....	13

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3. การเปลี่ยนจากโกลว์ไปสู่อาร์ค (transition to thermionic arc) หรือจีทีเอ (GTA).....	14
2.2.4. การอาร์ค (arc).....	16
2.3 ประเภทของกลไกในการจุดหลอด.....	17
2.3.1 จุดติดยาก (hard mode).....	17
2.3.2 จุดติดง่าย (easy mode).....	18
2.4 สรุปข้อแตกต่างของการจุดหลอดด้วยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับบัลลาสต์แมกเนติก.....	18
2.5 การอุ่นไส้หลอด (พรีฮีต).....	19
2.6 คุณลักษณะที่ดีในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	21
2.7 การหาจุดทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	22
2.8 ผลการทำงานเมื่อหลอดเริ่มเสื่อมคุณภาพ.....	24
2.8.1 หลอดทำงานที่ความถี่ปกติ 50/60 Hz.....	24
2.8.2 หลอดทำงานที่ความถี่สูง.....	25
2.8.3 หลอดทำงานที่ความถี่ต่ำยิ่ง.....	25
2.9 การเลือกความถี่ในการทำงานของหลอดก๊าซชนิดสทาร์จ.....	25
2.10 คุณสมบัติของหลอด.....	27
บทที่ 3 บัลลาสต์.....	29
3.1 หน้าที่ของบัลลาสต์.....	29
3.2 ปัญหาสำคัญในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	31
3.2.1 อะไรคือจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับหลอด?.....	31
3.2.2 ลักษณะด้านออกของวงจรบัลลาสต์ที่เหมาะสมควรเป็นอย่างไร?.....	32
3.3 คุณสมบัติ และประสิทธิภาพการทำงาน(Performance Parameter).....	32
3.3.1 ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจร(System Efficacy).....	32



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	ลักษณะรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านหลอด(Lamp Input Current Wave Shapes).....	32
3.3.3	ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ไหลผ่านหลอด (Lamp Input Voltage Wave Shapes).....	33
3.3.4	ฮาร์โมนิก (Harmonic Content).....	33
3.3.5	การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Conducted Radiated Electromagnetic Energy).....	34
3.3.6	ฟลิกเกอร์ (Flicker).....	34
3.3.7	ค่าความแสงสว่าง (Light Output).....	34
3.3.8	Regulation.....	34
3.3.9	คุณสมบัติการจุดหลอด (Starting Characteristic).....	35
3.3.10	เพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power Factor).....	35
3.3.11	ค่าพลังงานอุ่นไส้ (Filament Power).....	35
บทที่ 4	พื้นฐานวงจรขยาย Class E Resonant Inverter.....	37
4.1	พื้นฐานวงจรขยาย Class E Resonant Inverter.....	37
4.2	การวิเคราะห์วงจรพื้นฐานวงจรขยาย Class E Resonant Inverter.....	42
4.2.1	สมมุติฐานการวิเคราะห์.....	42
4.2.2	ลักษณะรูปคลื่นกระแส และแรงดัน.....	42
4.2.3	ความทนกระแส และแรงดัน ที่มีผลต่ออุปกรณ์ (Voltage and Current Stress).....	45
4.3	สูตรสำเร็จในการออกแบบวงจรขยาย Class E.....	47
4.4	พื้นฐานวงจรเรโซแนนท์.....	48
4.5	การสะท้อนของค่าอิมพีแดนซ์(Reflected Impedance).....	44
4.6	การออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 โปรแกรมออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E.....	58
บทที่ 5 การออกแบบหม้อแปลง และตัวเหนี่ยวนำ.....	69
5.1 พื้นฐานของวงจรแม่เหล็ก.....	69
5.2 ชนิดของสารแม่เหล็ก.....	71
5.3 การสูญเสียภายในแกนสารแม่เหล็ก.....	71
5.3.1 core loss.....	71
5.3.2 ความสูญเสียในขดลวด.....	72
5.4 ลักษณะทางกายภาพของแกนเฟอร์ไรท์.....	72
5.5 วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลงความถี่สูง.....	73
5.5.1 Area Product Ap Approach.....	73
5.5.2 Core geometry Kg Approach.....	73
5.6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง (Lc).....	74
5.6.1 การเลือกอุปกรณ์.....	74
5.6.2 ข้อกำหนด.....	74
5.6.3 จิตจำกัศ.....	74
5.6.4 สมการการออกแบบ โดยวิธีการคำนวณแบบ Core Geometry Kg Approach.....	76
5.6.5 ขั้นตอนในการออกแบบ.....	77
5.7 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ (La,Lb).....	91
5.7.1 การพิสูจน์หาค่า $K_g$ เพื่อนำมาเป็นส่วนหนึ่งในการขนาดแกนเหล็กที่เหมาะสม.....	91
5.7.2 ขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ.....	96

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.8 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับการกรองค่ากระแส ( $L_f$ ).....	104
Gapped Inductor Design using The Core Geometry $K_g$ Approach	
5.8.1 ข้อกำหนด.....	104
<b>บทที่ 6 ผลการทดลอง.....</b>	<b>115</b>
6.1 ค่าของอุปกรณ์ที่ได้จากการคำนวณ และจากการทดลองจริง.....	115
6.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวัดผล.....	116
6.3 ขั้นตอนในการอุ่นไส้ และจุดหลอด (Ignition).....	116
6.4 ขั้นตอนการที่หลอดติดโดยสมบูรณ์.....	119
6.5 ผลการทดลองในขณะถอดหลอด(Open Circuit Test).....	124
6.6 ผลการทดลองในขณะช็อตหลอด(Short Circuit test).....	126
6.7 เปรียบเทียบการทำงานกับการจำลอง โดยใช้โปรแกรม Pspice.....	129
6.8 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หลักการครึ่งคลื่นชนิด เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	130
6.9 ประสิทธิภาพของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E..	132
6.10 ผลการเปรียบเทียบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ.....	133
<b>บทที่ 7 บทสรุป.....</b>	<b>136</b>
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>137</b>
ภาคผนวก ก รายละเอียดคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์.....	139
ภาคผนวก ข รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรม Pspice.....	149
ภาคผนวก ค บทความที่ตีพิมพ์บนวารสารลาดกระบัง.....	155
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>168</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จำแนกหลอดชนิดต่างๆออกได้โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติของแสง.....	11
2.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และค่ากระแส สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ทำงานร่วมกับอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์.....	28
3.1 ความสูญเสียอันเกิดจากบัลลาสต์ชนิดแกนเหล็กที่ใช้งานกับหลอดชนิดต่างๆ.....	30
3.2 เปรียบค่าพลังงานที่ต้องการใช้ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ กับบัลลาสต์ชนิดแกนเหล็ก.....	31
4.1 ตารางการออกแบบวงจรขยาย Class E.....	47
5.1 รายละเอียดขนาด และคุณสมบัติของขดลวด.....	84
5.2 รายละเอียดขนาด และคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์ชนิด EI Laminate.....	85
5.3 แสดงให้เห็นค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุดของแต่ละชนิดสารแม่เหล็ก..	105
6.1 ตารางเปรียบเทียบการทำงานวงจรแบบต่างๆ.....	135

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 พื้นฐานวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	2
1.2 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดบล็อกกิ่งออสซิลเลเตอร์.....	3
1.3 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดพุก-พุก.....	3
1.4 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดครึ่งบริดจ์.....	4
1.5 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มบริดจ์.....	4
1.6 วงจรพื้นฐานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ Class E.....	5
2.1 แสดงให้เห็น โครงสร้าง และส่วนประกอบภายในหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	10
2.2 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในช่วงการจุดหลอดก๊าซคิซาร์จแบบเมทัลฮาไลด์ 100 วัตต์ (GTE Laboratories Inc., Waltham, MA, USA) แสดงขั้นตอนการ จุดหลอด 4 ระยะ (รูปซ้าย สเกลเวลา 0.2 s/Div , รูปขวา สเกลเวลา 20 ms/Div).....	14
2.3 การจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เรปปีดสตาร์ท RS 40W ด้วยบัลลาสต์แมกเนติก กระแสโวลต์ในช่วง 529 mS เท่ากับ 9 mA(rms), ระยะการเปลี่ยนแปลงจาก โวลต์ไปสู่การอาร์ค 46 mS, ระยะเวลาการที่ขั้วเริ่มปล่อยประจุหลอดจุดติด 575 mS, (อยู่ในช่วง 500-700 mS), ค่าแรงดันคาโทดพอลล์(ค่ายอด) เป็น 11.0-14.0 V, ค่าแรงดันฮาโนดพอลล์เป็น 150-170 V, ค่ากระแสผ่านหลอด 0.415 A(rms), ค่าตัวประกอบยอดคลื่น 1.70 (EE.Hammer, 1989).....	15
2.4 การจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เรปปีดสตาร์ท RS 40W ด้วยบัลลาสต์แมกเนติก แบบไม่มีอคติขั้วหนึ่ง ระยะเวลาที่ขั้วเริ่มปล่อยประจุ 200 ถึง 750 mS, กระแสโวลต์(rms)ระหว่างช่วงเวลาจุดหลอดเป็น 15-35 mA, ค่าแรงดัน คาโทดพอลล์ (ค่ายอด) เป็น 11.0-12.5 V, ค่าแรงดันฮาโนดพอลล์เป็น 7.0-9.0 V, ค่ากระแสผ่านหลอด 0.298 A(rms), ค่าตัวประกอบยอดคลื่น 1.45-1.60 (EE.Hammer, 1989).....	15

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.5 การจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์แรปปิดสแตร์ต RS 40W ด้วยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบมอดูเลตยี่ห้อหนึ่ง ระยะเวลาที่ชั่วเริ่มปล่อยประจุ 200 ถึง 750 ms, กระแสโวลต์(rms)ระหว่างช่วงเวลาจุดหลอดเป็น 15-25 mA, ค่าแรงดันคาโทดฟอลต์ (ค่าขอด) เป็น 16.0-18.0 V,ค่าแรงดันเอโนดฟอลต์ เป็น 9.0-12.5 V, ค่ากระแสผ่านหลอด 0.339 A(rms), ค่าตัวประกอบขอดคลื่น 2.15 (EE.Hammer, 1989).....	16
2.6 แรงดันคร่อมหลอดขณะจุดหลอด ตามมาตรฐานสากลสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ T8 ที่ทำงานที่ความถี่สูง (A. Heidemann, 1993).....	19
2.7 ตัวอย่างแรงดันคร่อมหลอดขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ T8 จากผลการทดสอบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อหนึ่ง (Elektronische Vorchaltgerate 93/94).....	20
2.8 กราฟเพื่อใช้หาขอบเขตของค่ากระแสอุ่นไส้ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 26 W.....	21
2.9 การเลือกจุดทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์กับบัลลาสต์ โดยการใช้สมการ $V_{ballast}^2 + V_{lamp}^2 = V^2$ , เพื่อหาจุดทำงานที่มีเสถียรภาพได้จากจุดตัดของกราฟ.....	22
2.10 รูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดก๊าซดิสชาร์จจากการใช้บัลลาสต์แม่กเนติก(ความถี่ 50 Hz) (ก) เปรียบเทียบกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง 22 kHz) (ข).....	23
2.11 แรงดันจุดหลอด (และแรงดันจุดหลอดซ้ำ) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อหลอดมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นจากรูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดที่หลอดเก่ากับหลอดใหม่จะมีพื้นที่ต่างกันประมาณได้จากการอินทิเกรตกราฟเส้นบนจากการใช้บัลลาสต์ความถี่ต่ำ และกราฟเส้นล่างจากการใช้บัลลาสต์ความถี่สูง.....	24

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.12 การเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ทำงานที่ความถี่ต่างๆ Siemens, 1982).....	26
3.1 วงจรพื้นฐานที่ใช้บัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็กในการจุดหลอด.....	29
3.2 กราฟแสดงถึงความส่องสว่างของแสงเทียบกับอุณหภูมิตั้งแต่ของหลอด 40 W F-40 และ หลอด 34 W F40 ที่ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็ก และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	33
3.3 แสดงให้เห็นลักษณะรูปคลื่นที่ไหลผ่านหลอด.....	34
4.1 พื้นฐานวงจรขยาย Class E.....	38
4.2 แสดงรูปคลื่นกระแส $i_r$ และแรงดัน $v_r$ .....	38
4.3 แสดงรูปคลื่นกระแส $i_r$ และแรงดัน $v_r$ (a.) เมื่ออยู่ที่สภาวะเหมาะสม (b.) เมื่อขนานกับ ไดโอด (c.) เมื่ออนุกรมกับ ไดโอด.....	38
4.4 แสดงการต่อ ไดโอดขนาน และอนุกรมอุปกรณ์สวิตติง.....	39
4.5 แสดงขนาดนอมอลไรท์ และเฟสของกระแส $i_o$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $D$ โดย(a) $I_m/I_I$ เทียบกับ $D$ (b) $\phi$ เทียบกับ $D$ .....	43
4.6 แสดงค่านอมอลไรท์ของค่าความต้านทานด้านเข้า $\omega \cdot C_1 \cdot R_{DC}$ ของวงจรขยาย Class E เทียบกับ $D$ .....	45
4.7 แสดงแรงดันยอด และกระแสยอดของอุปกรณ์สวิตติง (a) $\omega \cdot t_{im}$ และ $\omega \cdot t_{vm}$ เทียบกับ $D$ (b) ค่านอมอลไรท์ของกระแส $I_{SM}/I_I$ และค่านอมอลไรท์ของแรงดัน $V_{SM}/V_I$ เทียบกับ $D$ .....	46
4.8 ค่า Power Output Capability $c_p$ เทียบกับ $D$ .....	47
4.9 วงจรพื้นฐานเรโซแนนท์ (a.) แบบอนุกรม (b.) แบบขนาน (c.) แบบอนุกรม-ขนาน....	50
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราขยาย เทียบกับความถี่เรโซแนนท์ โดยมีค่า $Q=1-5$ (a.)แบบอนุกรม (b.) แบบขนาน (c.)แบบอนุกรม-ขนาน.....	51
4.11 วงจรแสดงความสมมูลของหม้อแปลง.....	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 วงจรสมมูลของภาวะ เมื่อมองจากด้านเข้า.....	54
4.13 เมื่อภาวะมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ด้านออกของหม้อแปลง.....	54
4.14 วงจรสมมูลเมื่อมีค่าตัวเก็บประจุต่อขนานกับภาวะเมื่อมองมาจากทางด้านเข้า.....	55
4.15 วงจรที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	56
4.16 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 4.15.....	56
4.17 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 4.15.....	57
5.1 สนามแม่เหล็กรอบขดลวด.....	69
5.2 แสดงกระแสที่มีผลต่อทิศทางสนามแม่เหล็ก.....	69
5.3 ตัวอย่างตัวเหนี่ยวนำช่องอากาศ.....	69
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B H.....	70
5.5 แสดงพื้นฐานอย่างง่ายในการเกิดหม้อแปลง.....	70
5.6 แสดงถึง core loss กับการเพิ่มขึ้นความถี่ใช้งาน.....	71
5.7 แสดงการเกิดค่าความสูญเสียอันเกิดจาก eddy current.....	72
5.8 EI Laminated.....	72
6.1 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำวงจรขยาย Class E มาประยุกต์ใช้.....	116
6.2 ภาพวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยรวม.....	117
6.3 แสดงถึงขั้นตอนในการอุ่นไส้หลอด.....	118
6.4 แสดงการเกิด Ignition ก่อนหลอดจะติดสว่างสมบูรณ์.....	118
6.5 แสดงรูปคลื่น $V_{ds}$ ( 20 V/div ) และ $I_{La}$ ( 500 mA/div ).....	119
6.6 แสดงรูปคลื่น $V_{ds}$ ( 20 V/div ) และ $I_d$ ( 500 mA/div ).....	120
6.7 แสดงรูปคลื่น $I_d$ ( 500 mA/div ).....	120
6.8 แสดงรูปคลื่น $V_{La}$ ( 5 V/div ) และ $I_{La}$ ( 500 mA/div ).....	121
6.9 แสดงรูปคลื่น $V_{La}$ ( 5.67 V/div ) และ $V_{Lb}$ ( 29.8 V/div ).....	121
6.10 แสดงรูปคลื่น $I_{Lb}$ ( 200 mA/div ) และ $V_{Lb}$ ( 50 V/div ).....	122



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.11 แสดงรูปคลื่น $V_{Lb}$ ( 50 V/div ).....	122
6.12 แสดงรูปคลื่น $I_{Lb}$ ( 200 mA/div ).....	123
6.13 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมหลอด ขณะหลอดติดสมบูรณ์ มีแรงดันขอคเป็น 3.6 Vp.....	124
6.14 แสดงรูปคลื่น $V_{ds}$ ( 20 V/div ).....	124
6.15 แสดงรูปคลื่น $V_{ds}$ ( 50 V/div ) และ $I_{La}$ ( 500 mA/div ).....	125
6.16 แสดงรูปคลื่น $I_{Lb}$ ( 500 mA/div ) และ $V_{Lb}$ ( 50 V/div ).....	125
6.17 แสดงรูปคลื่น $V_{ds}$ ( 20 V/div ).....	126
6.18 แสดงรูปคลื่น $I_{La}$ ( 500 mA/div ) และ $V_{ds}$ ( 50 V/div ).....	127
6.19 แสดงรูปคลื่น $I_d$ ( 500 mA/div ) และ $V_{ds}$ ( 50 V/div ).....	127
6.20 แสดงรูปคลื่น $V_{La}$ ( 500 mV/div ).....	128
6.21 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมหลอด โดยแรงดันขอคเป็น 90 Vp.....	130
6.22 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านหลอด.....	131
6.23 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมขั้วคาโทด.....	131
6.24 แสดงเฟสของรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่ผ่านหลอด.....	132
6.25 วงจร Self-Excited Parallel Resonant Electronic Ballast (PREB).....	78
6.26 วงจร Self-Excited Series Resonant Electronic Ballast (SREB).....	78
6.27 วงจร Current-Fed Push-Pull Electronic Ballast (CFPPEB).....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากประสิทธิภาพการส่องสว่าง(Luminous Efficacy) ที่ดีกว่าและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าหลอดไส้(Incandescent Lamp) บัลลาสต์แมกเนติก และสตาร์ทเตอร์เป็นอุปกรณ์ร่วมที่สำคัญที่ใช้ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยทำหน้าที่ในการจุดหลอด, ปรับกระแสและแรงดันให้เหมาะสมกับหลอดในขนาดที่ใช้งานนั้นๆ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่ไม่อาจมองข้ามของการใช้บัลลาสต์แมกเนติก และสตาร์ทเตอร์ คือ การเกิดการกระพริบของหลอด ทำให้สารที่เคลือบขั้วหลอดที่ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนหลุดหายไปมากขึ้น (ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งการกระพริบ) ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของหลอดสั้นลง ข้อเสียอื่นๆ ที่เห็นได้ชัดเจนพอที่สรุปได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวบัลลาสต์แมกเนติกค่อนข้างสูง
2. ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ เป็นผลให้ค่ากระแสที่ใช้สูงเกินความต้องการที่แท้จริงของหลอด
3. เกิดเสียงฮัมรบกวน ในกรณีในตัวบัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็กเริ่มเสื่อมสภาพ
4. เกิดผลสโตรโบสโคปิก (Stroboscopic Effect) ทำให้เห็นภาพวัตถุเคลื่อนที่เบลอ และทำให้สายตา้าได้อย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการทำงานที่ความถี่ต่ำ

### 1.1 คุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยสังเขป

หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่นิยมใช้มักเป็นชนิดขั้วร้อน (Heat-Electrode) โดยมีคุณสมบัติเป็นค่าความต้านทานลบ (Negative-Impedance) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มกระแสให้กับหลอดแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วหลอดจะลดลง เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เสถียรภาพของหลอดบัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดควรเป็นแหล่งจ่ายกระแส (Current Source) หรืออย่างน้อยควรเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage source) ที่มีอิมพีแดนซ์สูงเพียงพอ ในการจุดหลอดแต่ละครั้งจะทำให้ขั้วหลอดเสื่อมลงทีละน้อย เนื่องจากสารเคลือบขั้วหลอดที่ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนจะหลุดหายไปทุกครั้งที่มีการสตาร์ท หรือการจุดหลอด โดยเฉพาะหากมีการจุดหลอดขณะที่ไส้หลอดยังมีอุณหภูมิสูงไม่เพียงพอ จะต้องใช้แรงดันที่ตกคร่อมหลอดสูงมากขึ้นในการจุดหลอด ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับอายุ

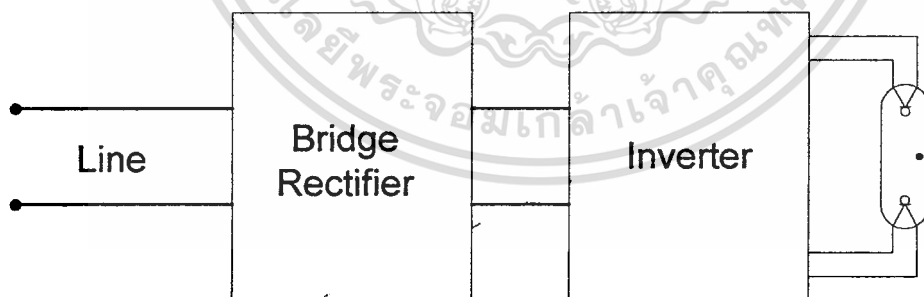
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานหลอดให้ลดลง นอกจากนี้อายุการใช้งานของหลอดยังขึ้นอยู่กับความสมมาตรของรูปคลื่นกระแสสลับที่ไหลผ่านหลอด รวมถึงการจุดหลอดควรให้ดำเนินตามขั้นตอนดังนี้ให้ครบถ้วน

1. การอุ่นไส้หลอดให้อุณหภูมิสูงเพียงพอ (Preheat Stage)
2. การจุดหลอด (Ignition Stage) ขึ้นอยู่กับกระแสอุ่นไส้หลอดที่ต้องสอดคล้องกัน
3. การทำงานสถานะปกติ (Burning Stage)

## 1.2 พื้นฐานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวมาแล้ว โดยทั่วไปแล้วบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะประกอบด้วยวงจรย่อยหลัก 2 วงจร รูปที่ 1.1 วงจรส่วนแรกเป็นวงจรแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC-DC Converter) หรือที่เรียกว่า วงจรเรกติไฟเออร์ (Rectifier) และวงจรส่วนหลังเป็น วงจรแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC-AC Converter) หรือที่เรียกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งวงจรนี้ทำหน้าที่สร้างไฟสลับความถี่สูงเพื่อขจัดเสียงฮัม และขจัดผลของสโตรโบสโคปิกต์ อุปกรณ์ที่จำเป็นของวงจรนี้คือ อุปกรณ์สวิทชิงกำลัง (Power Switching Device) เช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง, มอสเฟตกำลัง เป็นต้น, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยที่ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน ทั้งนี้หากใช้ความถี่ที่สูงขึ้นขนาดตัวอุปกรณ์จะเล็กลง

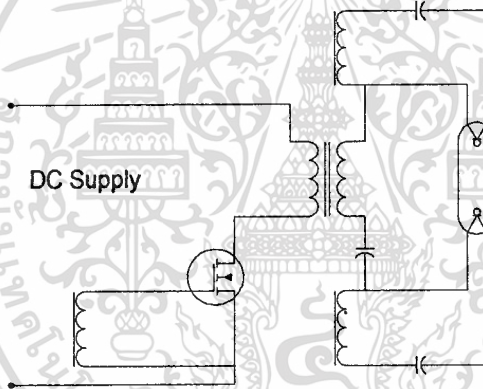


รูปที่ 1.1 พื้นฐานวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

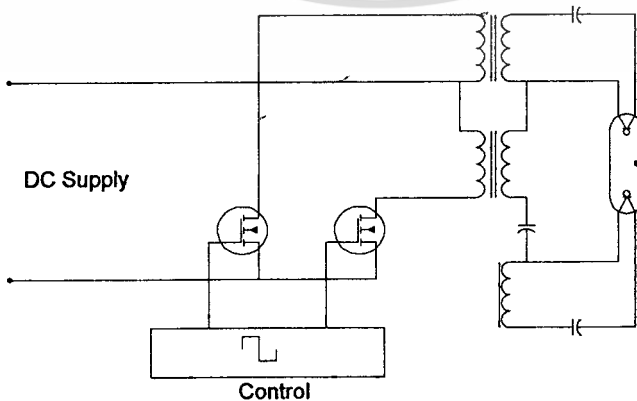
วงจรอินเวอร์เตอร์ที่หลักการง่าย และต้นทุนต่ำ ได้แก่ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด บล็อกกิ้งออสซิลเลเตอร์ (Blocking Oscillator) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 วงจรนี้ใช้อุปกรณ์สวิทชิงกำลังเพียงตัวเดียว และแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิทชิงกำลังค่อนข้างสูง (ไม่ต่ำกว่า 2 เท่าของไฟตรงที่จ่ายให้กับวงจร) จึงเหมาะสำหรับแหล่งจ่ายไฟเข้าแรงดันต่ำ แต่วงจรนี้ให้สัญญาณรูปคลื่นกระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลับในการขับโหลดแบบไม่สมมาตร และบ่อยครั้งที่ขึ้นตอนการจุดหลอด (Ignition) จะเกิดในทิศทางเดียว มีผลให้อายุการใช้งานสั้นลง

เพื่อให้อายุการใช้งานของหลอดยาวนานขึ้น จึงมีการนำเอาวงจรอินเวอร์เตอร์ Class D รูปที่ 1.3 หรือเรียกอีกอย่างว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดพุช-พูล (Push-Pull Inverter) โดยวงจรนี้ให้รูปคลื่นกระแสสลับแก่หลอดในลักษณะสมมาตรทั้งซีกบวก และซีกลบ วงจรนี้ให้แรงดันตกคร่อมตัวสวิทซ์กำลังแต่ละตัวประมาณ 2 เท่าของแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้วงจร จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่แหล่งจ่ายไฟต่ำเช่นกัน อย่างไรก็ตามข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ คือ มีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น เนื่องจากมีการสูญเสียขณะสวิทซ์ (Switching Loss) สูง และการทำงานขึ้นอยู่กับตัวสวิทซ์กำลังทั้ง 2 ตัว หากตัวใดตัวหนึ่งผิดปกติ ก็อาจทำให้ตัวบัลลาสต์เสียหายทันที

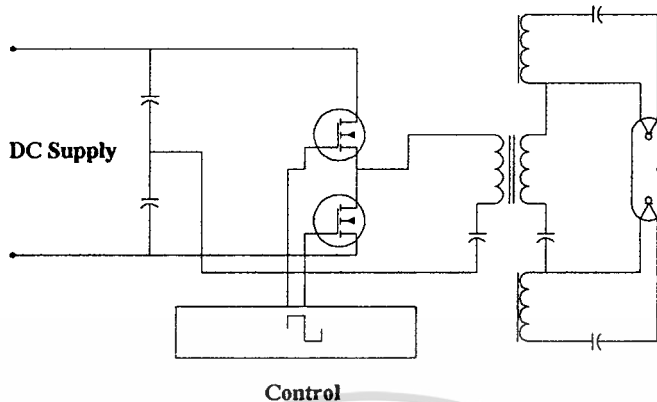


รูปที่ 1.2-วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดบล็อกกิ่งออสซิลเลเตอร์

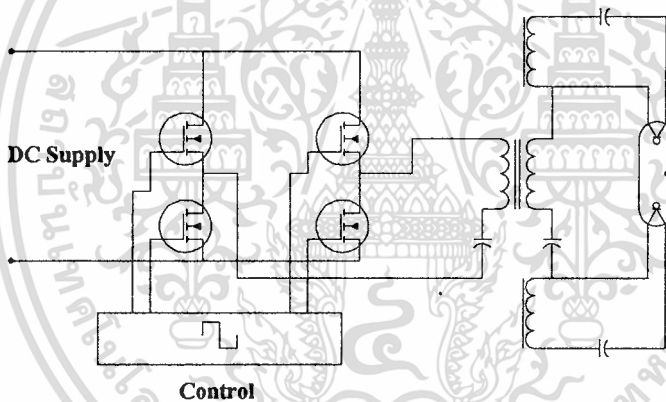


รูปที่ 1.3 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดพุช-พูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดกึ่งบริดจ์



รูปที่ 1.5 วงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มบริดจ์

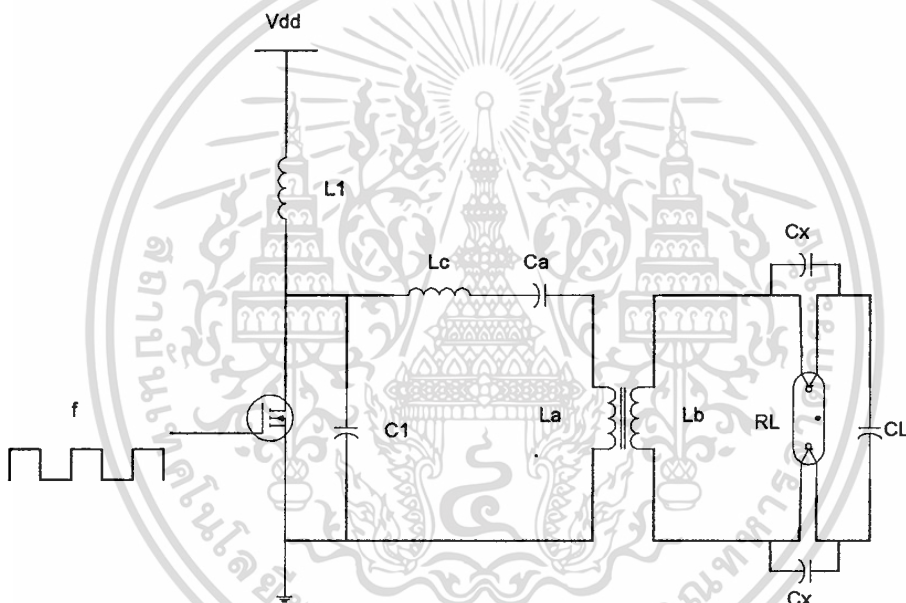
ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแรงดันเข้าสูง ได้แก่ อินเวอร์เตอร์ชนิดกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge) รูปที่ 1.4 และอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มบริดจ์ (Full-Bridge) รูปที่ 1.5 ทั้ง 2 วงจรมีหลักการการทำงาน และมีปัญหาเรื่องอายุการใช้งานใกล้เคียงกับวงจรพุก-พุด

วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิด Class E รูปที่ 1.6 เดิมถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้งานเป็นตัวขยายกำลังที่ความถี่วิทยุ (RF Power Amplifier) หลักการพื้นฐานการทำงาน คือ การจัดรูปคลื่นของแรงดันตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังให้แยกออกจากกันโดยเด็ดขาด (Zero Voltage Switching) กล่าวคือ ขณะอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังหยุดนำกระแส (Turn off) แรงดันตกคร่อมจะไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งกระแสตกลงเป็นศูนย์ และขณะอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังนำกระแส (Turn on)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ที่กำลังจะตกเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสจะค่อยๆเพิ่มขึ้น บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดวงจรรขยาย Class E มีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนดังนี้

1. วงจรแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC-DC Converter)
2. วงจรแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC-AC Converter) (วงจรรขยาย Class E)
3. วงจรแมทซ์ที่เหมาะสม (Matching Network or Matching Transformer) ในที่นี้ใช้หม้อแปลงความถี่สูง
4. วงจรเรโซแนนซ์ชนิด Parallel-loaded Resonant Inverter ซึ่งจะช่วยให้การจุกหลอดให้ครบทั้ง 3 ขั้นตอน



รูปที่ 1.6 วงจรพื้นฐานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ Class E

นอกจากนี้คุณสมบัติของวงจรได้นำตัวเก็บประจุแผ่นที่ตัวทรานซิสเตอร์มาใช้ประโยชน์เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของวงจร ซึ่งโดยปกติจะเป็นตัวที่เกิดความสูญเสียขณะสวิตช์ซึ่ง รวมถึงจะจ่ายกระแสที่เป็นซายน์ (กรณีเลือกค่า  $Q > 7$ ) และสมมาตรให้กับตัวการะ สำหรับแรงดันยอดสูงสุดขณะหยุดนำกระแสมีค่าสูงประมาณ 3.5-4 เท่าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง ดังนั้นจึงเหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้งานที่แหล่งจ่ายไฟต่ำมาก สามารถสรุปคุณสมบัติเด่นของวงจรอินเวอร์เตอร์ Class E เทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นได้ ดังนี้

1. ประสิทธิภาพที่สูงกว่า เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ปิดวงจรในขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จำนวนอุปกรณ์ที่ประกอบเป็นวงจรน้อย
3. ใช้อุปกรณ์สวิทซ์กำลังเพียงตัวเดียว ทำให้สามารถควบคุมได้ง่ายกว่า และน่าเชื่อถือมากกว่า
4. เนื่องจากการเลือกใช้งานที่ความถี่ที่สูง เป็นผลให้ขนาดของอุปกรณ์เล็กลง (สามารถทำงานที่ความถี่เป็น 5-10 เท่าของอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นได้)
5. ความไวต่อความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ต่ำ ผลคือ ยอมให้อุปกรณ์หลักมีค่าความคลาดเคลื่อนได้เล็กน้อย โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของวงจรเปลี่ยนแปลงไป
6. เป็นวงจรชนิดจ่ายกระแสโดยธรรมชาติ แม้มีการลัดวงจรที่ตัวภาระ หรือเปิดวงจรที่ด้านออก เช่นในกรณีขณะทำการเปลี่ยนโหลด ก็ไม่ทำให้วงจรเสียหาย

### 1.3 เปรียบคุณสมบัติระหว่างบัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็กเทียบกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดวงจรถยาย Class E เทียบกับบัลลาสต์แมกเนติก และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบอื่นๆ ได้ดังนี้

#### 1.3.1 เทียบกับบัลลาสต์แมกเนติกทั่วไป

1. ประสิทธิภาพที่สูงกว่า
2. ค่าตัวประกอบกำลังสูงกว่า (ประมาณ 0.95)
3. ไม่เกิดเสียงฮัม
4. ไม่เกิดผลของสโตรโบสโคปิกส์ นั่นคือไม่ทำให้สายตาล้าเร็ว และให้แสงสว่างที่นุ่มนวลกว่า
5. ทำให้หลอดมีอายุการใช้งานนานกว่า
6. ให้แสงสว่างมากกว่า เมื่อเทียบกับกำลังไฟเข้าที่เท่ากัน

#### 1.3.2 เทียบกับอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ

1. ประสิทธิภาพที่สูงกว่าเนื่องจากไม่มีการสูญเสียขณะสวิทซ์ (ZVS)
2. จำนวนอุปกรณ์ที่ประกอบเป็นวงจรน้อย
3. ใช้อุปกรณ์สวิทซ์กำลังเพียงตัวเดียว ทำให้สามารถควบคุมได้ง่ายกว่า และน่าเชื่อถือมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เนื่องจากสามารถเลือกใช้งานที่ความถี่ที่สูง ทำให้ขนาดของอุปกรณ์จะเล็ก (สามารถทำงานที่ความถี่เป็น 5-10 เท่าของอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่นได้)
5. เมื่อนำมาเชื่อมต่อกับวงจรเมทซ์ซิงที่เหมาะสม (Matching Network) ทำให้สามารถต่อกับตัวภาระได้ช่วงค่าความต้านทานที่กว้างมาก โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของวงจรเปลี่ยนแปลงไป
6. กระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดจะเป็นไซน์ และสมมาตร
7. การจุดหลอดที่ครบทั้ง 3 ชั้นตอน เนื่องจากมีวงจรเรโซแนนซ์ชนิด Parallel-loaded Resonant Inverter ช่วยในการจุดหลอด
8. การผลิตที่ง่าย เนื่องจากวงจรใช้อุปกรณ์น้อย และวงจรควบคุมใช้เพียงความถี่เดียว รวมถึงความกว้างของลูกคลื่น (duty cycle) เท่ากับ 0.5

#### 1.4 ความเป็นมา และวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากคุณสมบัติ และข้อดีต่างๆของวงจรขยาย Class E เราได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการจุดหลอด และให้กระแสเลี้ยงหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยเน้นเฉพาะในการใช้กับแหล่งจ่ายไฟต่ำ เช่น แบตเตอรี่ หม้อแปลงไฟแรงต่ำ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้ ในรถยนต์มอเตอร์ไซค์ที่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงใช้หลอดไส้อยู่ แต่ก็ยังมีบางคันที่ใช้เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดบล็อกกิงออสซิลเลเตอร์ (Blocking Oscillator) จากที่ทราบอยู่แล้วเนื่องจากการจ่ายกระแสที่ไม่สมมาตรทำให้อายุการใช้งานหลอดสั้นมาก ซึ่งสังเกตได้ว่าขั้วหลอดจะดำอย่างรวดเร็ว รวมไปถึงตู้โทรศัพท์สาธารณะที่มีแสงไฟสว่างในยามค่ำคืน เนื่องจากข้อกำหนดขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยที่ห้ามใช้แหล่งจ่ายไฟสลับ 220 Vac โดยตรงกับตู้โทรศัพท์ ทั้งนี้หากต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องปรับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแรงดันต่ำก่อนโดยการผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้องกันปัญหาไฟรั่วที่อาจอันตรายกับผู้ใช้โทรศัพท์ แต่เดิมตู้โทรศัพท์ใช้หลอดไส้ที่ให้แสงสว่างน้อยกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ และใช้พลังงานมากกว่า

อย่างไรก็ดีวิทยานิพนธ์นี้จะพยายามเน้นทั้งในแง่การอธิบายทางทฤษฎี การพิสูจน์ รวมถึงการออกแบบวงจรที่สามารถนำไปใช้ได้ทันที โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทุกท่านสามารถเรียนรู้ และปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ในที่นี้จึงได้เลือกใช้ โปรแกรม Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จ Speedsheet ของ Microsoft Office สำหรับการทดลอง และวัดผลนั้น อาจไม่ตรงตามทฤษฎีทั้งหมด อาจเนื่องมาจากการพันหม้อแปลงที่ใช้มือ ซึ่งมีความคาดเคลื่อนค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 1.5 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

แต่เดิมการนำวงจร Class E มาประยุกต์ใช้เป็นบัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์จะใช้งานกับแหล่งแรงดันสูง หรือหากนำมาประยุกต์ใช้กับแหล่งจ่ายไฟต่ำนั้นก็จะใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานกับโหลดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขั้วที่เหมาะสม แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอใช้วงจรขั้ววงจรที่เหมาะสม (Matching Network or Matching Transformer) ที่จะทำการแปลงค่าภาระของโหลดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นค่าภาระที่เหมาะสมแก่วงจรขยาย Class E เพื่อให้อุปกรณ์สวิทช์ปิดวงจรในขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันเป็นศูนย์ (ZVS) นั้นหมายถึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโหลดฟลูออเรสเซนต์ได้หลายขนาดกำลังโดยง่าย นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ยังกล่าวถึงการพิสูจน์และการออกแบบใช้วงจรขั้ววงจรที่เหมาะสม (Matching Network) ที่จำเป็นต้องพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการพันขดลวดครอบแกนแม่เหล็กทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับการทำงานของวงจร โดยเฉพาะเมื่อทำงานที่ความถี่สวิทช์ที่สูงมาก สำหรับทฤษฎี การพิสูจน์ การออกแบบ ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในวิทยานิพนธ์นี้ โดยเฉพาะการออกแบบได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเข้าช่วย เพื่อให้ดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว

## 1.6 รายละเอียดการเสนอเรื่องในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท โดยบทที่ 1 หรือบทนำจะกล่าวถึงความรู้ทั่วไปของโหลดฟลูออเรสเซนต์, บัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์, วงจรขยาย Class E, วัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการวิทยานิพนธ์ ส่วนในบทอื่นๆ จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- บทที่ 2 จะกล่าวถึงพื้นฐานการทำงานของโหลดฟลูออเรสเซนต์ โครงสร้าง ส่วนประกอบ การจุดหลอด การอุ่นไส้ รวมไปถึงคุณสมบัติของหลอด
- บทที่ 3 จะกล่าวถึงพื้นฐานการทำงาน และหน้าที่ของบัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์ การวัดคุณสมบัติ และประสิทธิภาพการทำงานของวงจร
- บทที่ 4 จะกล่าวถึงพื้นฐานการทำงานของวงจรพื้นฐาน Class E และวงจรเรโซแนนท์ การนำวงจรพื้นฐานดังกล่าวทั้งสองมาประยุกต์ใช้เป็นบัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์ ส่วนสุดท้ายจะเป็นการพิสูจน์ และการออกแบบโดยใช้โปรแกรมเข้าช่วย
- บทที่ 5 จะกล่าวถึงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ วงจรแมทชิงที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั้งหมดจะมีการกล่าวถึงพื้นฐานการออกแบบ การพิสูจน์ รวมถึง  
การออกแบบทั้งหมดโดยใช้โปรแกรมเข้าช่วย

- บทที่ 6 จะเป็นผลการทดลอง และการเปรียบเทียบการทำงานกับวงจรรีเลย์  
ทรานซิสต์ลัสตซ์ชนิดอื่นๆ
- บทที่ 7 จะเป็นบทสรุปการทำงาน การออกแบบ รวมไปถึงขั้นตอนในการ  
พัฒนา เพื่อเป็นสินค้าที่สามารถใช้งานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

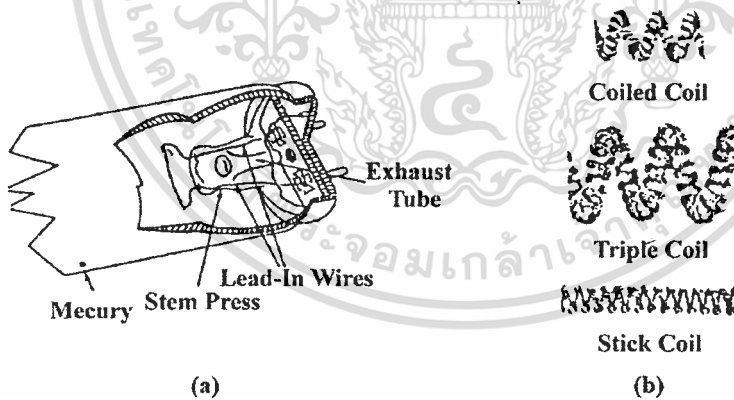
## บทที่ 2

### พื้นฐานวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์และทฤษฎีการทำงาน

บทนี้จะมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกกล่าวถึงโครงสร้างส่วนประกอบ และชนิดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ในส่วนที่สองจะกล่าวถึงหลักการในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ซึ่งเป็นหลอดก๊าซคิซซาร์จอย่างหนึ่ง)

#### 2.1 ส่วนประกอบ และชนิดหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp Construction and Type)

จากภาพตัดขวางดังรูป 2.1(a) แสดงให้เห็น โครงสร้างภายในหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ประกอบไปด้วย หลอดแก้วที่มีไอปรอทความดันต่ำ และก๊าซเฉื่อยอาร์กอน(argon gas)บรรจุอยู่ภายใน และผิวด้านในหลอดแก้วจะมีการเคลือบสารฟอสเฟอร์ ส่วนที่ปลายทั้งสองด้านจะมีไส้หลอดอยู่ดังที่ได้แสดงในรูป 2.1(b) และจะมีวงแหวนป้องกันไส้หลอดจากการพุ่งชนของอิเล็กตรอนที่มากจนเกินไป รวมไปถึงเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ปลายหลอดทั้งข้าง



รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็น โครงสร้าง และส่วนประกอบภายในหลอดฟลูออเรสเซนต์

ในปัจจุบันนี้ในท้องตลาดมีการจำหน่ายหลอดฟลูออเรสเซนต์อยู่หลายขนาดความยาว และกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 4 -215 W รวมไปถึงแสงสีขาวในหลายหลาก และแสงสีอื่นๆ เช่น สีน้ำเงิน สีเขียว สีชมพู สีแดง และสีทอง แต่เราสามารถจำแนกหลอดชนิดต่างออกได้โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติของแสง ดังปรากฏในตารางที่ 2.1 สำหรับอายุการใช้งานจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการจุดหลอดด้วย จากตารางได้ทำการทดสอบโดยการให้มีการจุดหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สัญลักษณ์ที่ใช้ในตาราง 2.1 นั้นหมายถึง

CW	Standard cool white
WW	Standard warm white
CWX	Deluxe cool white
WWX	Deluxe warm white
ES	Energy saving
HO	High output

บริษัทผู้ผลิตได้แยกมาตรฐานหลอดแสงสีขาวออกเป็น 4 ชนิด 2 ชนิดเป็นแบบมาตรฐาน และอีก 2 ชนิดเป็น Deluxe โดยแสงขาวมาตรฐานนั้นจะมีประสิทธิภาพสูง และแถบสีแสงอยู่ในช่วงเฉลี่ย (average color rendition) แต่หลอดสีขาวชนิด Deluxe ประสิทธิภาพจะลดลง แต่ปัจจุบันได้มีบางบริษัทที่สามารถปรับปรุงพัฒนาให้หลอดชนิด Deluxe มีประสิทธิภาพที่สูง และมีแถบสีแสงที่ดีด้วย (high CRI lamp) สำหรับหลอดประหยัดพลังงาน ES มีเป้าหมายที่ต้องการลดการใช้พลังงาน ซึ่งได้มีการปรับปรุงโดยใส่ก๊าซเฉื่อยชนิดอาร์กอน-คริปทอน (argon-krypton mixture gas) แต่ทำให้ความสว่างลดลงด้วย จึงได้มีการพัฒนาใช้สารฟอสเฟอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความสว่างของหลอดให้มากขึ้น

## 2.2 ขั้นตอนในการจุดหลอดก๊าซดิสชาร์จ

กลไกในการจุดหลอดก๊าซดิสชาร์จที่ความซับซ้อน (ซึ่งก็มีผู้ศึกษาไว้มากมาย เช่น บริษัท GE, Phillips, Osram, Siemens แม้แต่ในปัจจุบันก็ยังไม่ข้อมูลทุกด้านแท้จริงนัก) จึงยังคงมีการศึกษากันอยู่[21] เราพอจะแบ่งขั้นตอนการจุดหลอดได้ 4 ระยะดังที่แสดงในรูปที่ 2.2

- 2.2.1. การเบรกดาวน์ (breakdown) ของก๊าซ
- 2.2.2. การโกลว์ (glow)
- 2.2.3. การเปลี่ยนจากโกลว์ไปสู่อาร์ก (transition to thermionic arc) หรือจีทีเอ (GTA)
- 2.2.4. การอาร์ก (arc)

### 2.2.1 ระยะเวลาเบรกดาวน์ก๊าซ

หลอดก๊าซดิสชาร์จได้รับแรงดันสูงในการจุดหลอด จากการป้อนแรงดันกระแสสลับจากบัลลาสต์ เกิดการแตกตัวของก๊าซที่ขั้วอิเล็กโทรด (electrod) หรือไส้หลอด เกิดประจุไอออน และอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งพอจะอธิบายได้ตามกฎของพาสเชน (Paschen's law) กล่าวง่าย ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ เริ่มแรกอิเล็กตรอนอิสระ 1 ตัว ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระตัวที่ 2 และตัวอื่นๆเพิ่มตามมา กลายเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการถล่มของอิเล็กตรอน (electron avalanche) โดยที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์ถล่มจะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าวิกฤต และเมื่อเกิดการชนกันระหว่างไอออนมากพอ ก็เริ่มเกิดการเรืองแสง ทำให้เปลี่ยนจากการเบรกควานเข้าสู่การ โกลว์ (glow)

ระยะเวลาหลังจากที่หลอดได้รับแรงดันสูงในการเริ่มจุดหลอด จนถึงการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซ (ระยะเบรกควาน) หรือที่เรียกว่าช่วงเวลาล่าหลังการทลาย (breakdown lag time) จะนานเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของหลอด ไม่มีค่าคงที่ตายตัว แต่เป็นค่าในเชิงสถิติเพราะเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์พื้นฐาน 2 ขั้นตอน คือ การกำเนิดอิเล็กตรอนตัวแรกของก๊าซในหลอด และอัตราการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

ดังนั้นช่วงเวลาล่าหลังการทลาย (breakdown lag time) จึงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ค่า คือ

1 เวลาล่าหลังเชิงสถิติ (statistical lag time) คือ ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการรอให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระตัวแรก (โดยปกติจะใช้เวลานานกว่าเวลาล่าหลังเมื่อเริ่มก่อตัว (formative lag time) และมีการกระจายค่าทางสถิติกว้าง (wide distribution) คือในบางครั้งต้องใช้เวลานาน บางครั้งต้องใช้เวลานานมาก ในหลอดบางประเภทจะใช้เทคนิคการป้อนพลังงานกระตุ้น ไล่หลอดให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเร็วขึ้น โดยฉายแสง UV หรือ X-ray เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยอิเล็กตรอนด้วยแสง (photoemission) ซึ่งต้องใช้พลังงานไม่ต่ำกว่า 4.6 eV สำหรับโลหะทั้งสแตนบริทซ์, 4.5 eV สำหรับปรอท, 2.7 eV สำหรับ Th-W (Fomenko V, 1966) หรือใช้เทคนิคการอุ่นไล่หลอด จึงทำให้ระยะเวลาล่าหลังเชิงสถิติมีค่าสั้นลง (ความไม่บริสุทธิ์ของก๊าซภายในหลอด เช่นมี ก๊าซไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, ไอน้ำเจือปนก็จะมีผลต่อการจุดหลอดด้วย)

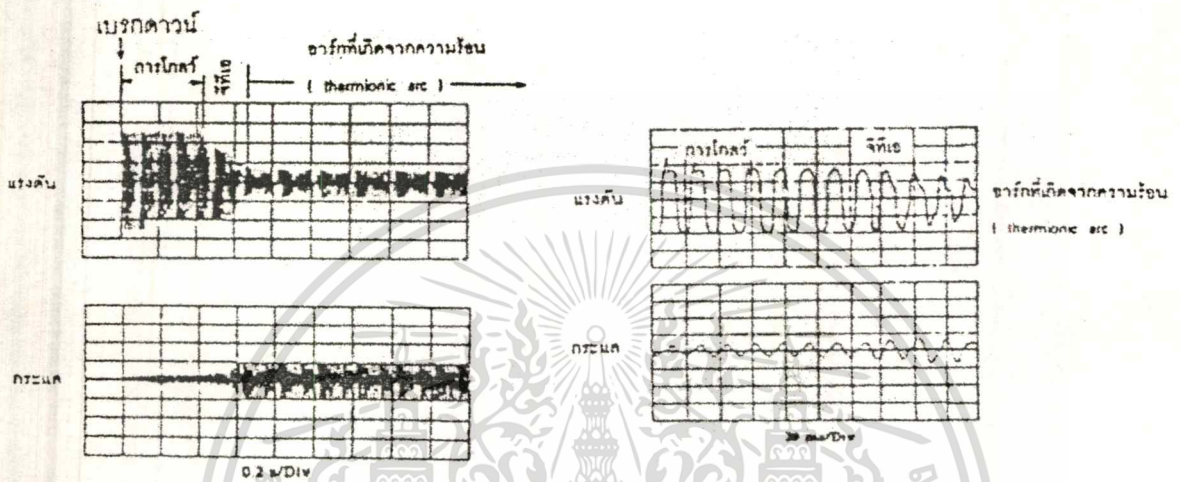
2 เวลาล่าหลังเมื่อเริ่มก่อตัว (formative lag time) คือ ช่วงเวลาที่อิเล็กตรอนเพิ่มความหนาแน่นมากขึ้น มีค่าแปรตามชนิดก๊าซที่บรรจุไว้ภายในหลอด โดยมีการกระจายค่าทางสถิติแคบมาก และสามารถเร่งเวลาให้สั้นลงได้ โดยการป้อนแรงดันสูงมากขึ้น เช่น การใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ป้อนแรงดันสูงให้หลอด

### 2.2.2 ระยะการโกลว์

เมื่อโมเลกุลของก๊าซแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนกับไอออนบวก เกิดการเบรกควาน ทำให้เกิดปรากฏการณ์การโกลว์ตามมา อธิบายได้ด้วยกฎทาวน์เซนด์ (Townsend's law) กล่าวคือ พลังงานจากแหล่งจ่ายจะถ่ายทอดไปอยู่ในรูปของพลาสมา (plasma) ซึ่งทำให้ไล่หลอดร้อนเกิดการเรืองแสงเล็กน้อย ในระยะนี้ค่าความต้านทานของหลอดยังคงมีค่าที่สูงอยู่ จึงทำให้มีแรงดันตก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อมหลอดมีค่าสูง แต่กระแสที่ไหลผ่านหลอดจะมีค่าต่ำ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.2 แต่เมื่อใส่หลอดร้อนถึงอุณหภูมิปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน (thermionic emitting temperature) ความต้านทานของหลอดจะลดลง เป็นการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระยะการเปลี่ยนจากการโกลว์ไปสู่การอาร์ก (glow-to-thermionic arc transition หรือ GTA)

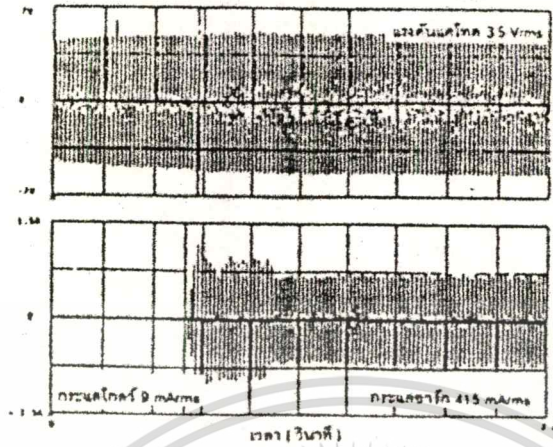


รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสและแรงดันในช่วงการจุดหลอดก๊าซชนิดสารจแบบเมทัลฮาไลด์ 100 วัตต์ (GTE Laboratories Inc., Waltham, MA, USA) แสดงขั้นตอนการจุดหลอด 4 ระยะ (รูปซ้าย สเกลเวลา 0.2 s/Div, รูปขวา สเกลเวลา 20 ms/Div)

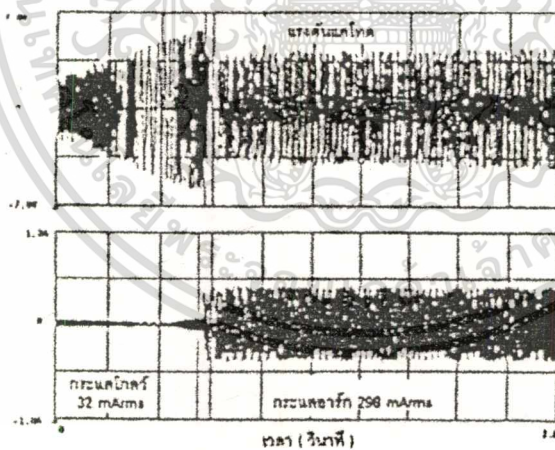
### 2.2.3 ระยะการเปลี่ยนจากการโกลว์ไปสู่การอาร์ก

ช่วงระยะเวลาที่ภาวะของหลอดฟลูออเรสเซนต์เปลี่ยนจากการโกลว์ไปสู่การอาร์ก (arc) หรือที่เรียกสั้นๆว่าระยะจีโอ (GTA) นั้น เป็นระยะที่วิกฤติและยากที่สุดในการออกแบบบัลลาสต์เพราะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่หลอดมาก ดังเช่น รูปที่ 2.3, 2.4, 2.5 ได้แสดงตัวอย่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสในหลอดฟลูออเรสเซนต์ 40 วัตต์ระหว่างที่เปลี่ยนจากการโกลว์ไปสู่การอาร์ก ระยะจีโอนี้เกิดจากการที่หลอดได้รับกระแส และแรงดันคร่อมหลอดที่เพียงพอ เมื่อใส่หลอดร้อนถึงจุดวิกฤติจะทำให้ความต้านทานหลอดลดลง กระแสที่ไหลผ่านใส่หลอดจึงเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันแรงดันคร่อมหลอดระหว่างขั้วทั้ง 2 ขั้วก็จะมีค่าลดลง พลังงานที่กระจายอยู่ในรูปของพลาสมาจะทำให้โมเลกุลของก๊าซภายในหลอดได้รับพลังงาน และเคลื่อนที่เร็วขึ้นภายในหลอด ส่งผลให้ความดันของพลาสมาเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยสนับสนุนให้เกิดการอาร์ก เมื่ออาร์กมีความเข้มมากขึ้นจนพอที่จะนำกระแสระหว่างขั้วหลอดทั้งสองด้านได้ ก็เป็นการเข้าสู่ระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



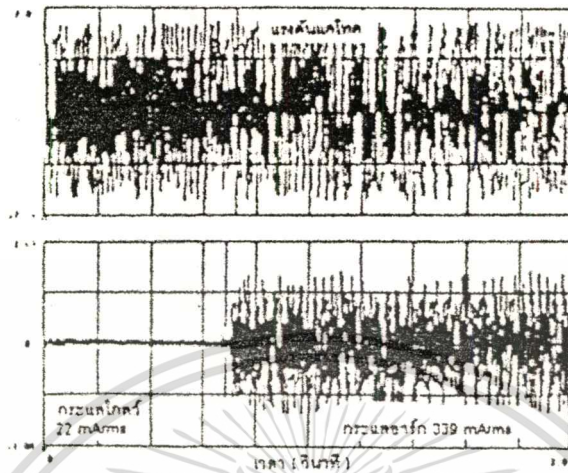
รูปที่ 2.3 การจูดหลอดฟลูออเรสเซนต์เรปปิดสตาร์ท RS 40W ด้วยบัลลาสต์แมกเนติก กระแส โกลว์ในช่วง 529 mS เท่ากับ 9 mA(rms), ระยะการเปลี่ยนแปลงจาก โกลว์ไปสู่การอาร์ก 46 mS, ระยะเวลาการที่ชั่วเริ่มปล่อยประจุหลอดจุดติด 575 mS, (อยู่ในช่วง 500-700 mS), ค่าแรงดันคาโทดพอลล์ (ค่ายอด) เป็น 11.0-14.0 V, ค่าแรงดันฮาโนดพอลล์เป็น 150-170 V, ค่ากระแสผ่านหลอด 0.415 A(rms), ค่าตัวประกอบยอดคลื่น (Crest Factor) 1.70 (EE.Hammer, 1989)



รูปที่ 2.4 การจูดหลอดฟลูออเรสเซนต์เรปปิดสตาร์ท RS 40W ด้วยบัลลาสต์แมกเนติกแบบไม่ มอดูเลตย์หือหนึ่ง ระยะเวลาที่ชั่วเริ่มปล่อยประจุ 200 ถึง 750 mS, กระแส โกลว์(rms) ระหว่างช่วงเวลาจูดหลอดเป็น 15-35 mA, ค่าแรงดันคาโทดพอลล์ (ค่ายอด) เป็น 11.0-12.5 V, ค่าแรงดันฮาโนดพอลล์เป็น 7.0-9.0 V, ค่ากระแสผ่านหลอด 0.298 A(rms), ค่า ตัวประกอบยอดคลื่น 1.45-1.60 (EE.Hammer, 1989)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.5 การจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เรปปิดสตาร์ท RS 40W ด้วยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบมอดูเลตยี่ห้อหนึ่ง ระยะเวลาที่ชั่วเริ่มปล่อยประจุ 200 ถึง 750 mS, กระแส โกวล์(rms) ระหว่างช่วงเวลาจุดหลอดเป็น 15-25 mA, ค่าแรงดันคาโทดพอลล์ (ค่ายอด) เป็น 16.0-18.0 V,ค่าแรงดันเอนโคโนพอลล์เป็น 9.0-12.5 V, ค่ากระแสผ่านหลอด 0.339 A(rms), ค่าตัวประกอบยอดคลื่น 2.15 (EE.Hammer, 1989)

การอาร์ก ในหลอดบางประเภทการทำงานที่ความถี่สูงจะทำให้หลอดมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียง 1 มาก หลอดจึงแสดงคุณสมบัติของตัวต้านทานที่ให้อุปกรณ์กระแส และแรงดันมีเฟสตรงกัน โดยจะมีผลของค่าความเหนี่ยวนำอยู่น้อยกว่าการทำงานที่ความถี่ต่ำมาก

#### 2.2.4 ระยะเวลาการอาร์ก (arc or thermionic arc)

คือ ช่วงระยะเวลาที่กระแสไหลจากไส้หลอดด้านหนึ่งไปยังไส้หลอดอีกด้านหนึ่ง ส่งผลให้เกิดแสงจากการอาร์กที่เราต้องการ (จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มปริมาณของแสงมีค่าสูงสุดในช่วงนี้) ซึ่งถือเป็นการสิ้นสุดขั้นตอนของการจุดหลอด เข้าสู่ระยะการทำงานของหลอด การอาร์กที่ความถี่ต่ำ (50-60 Hz) จะมีทิศทางการอาร์กในทางตรงระหว่างขั้วหลอด และมีลำอาร์กเบี่ยงเบนโค้งขยายออกรอบแนวด้านข้างด้วย แต่ในหลอดที่ทำงานที่ความถี่สูงลำอาร์กส่วนมากจะเป็นลำอาร์กในทางตรงระหว่างขั้วหลอด (ลำอาร์กเบี่ยงเบนโค้งออกด้านข้างมีน้อย) (E.Rasch, E.Statmic, 1991) เป็นเพราะอนุภาคภายในหลอดวิ่งถึงกันระหว่างขั้ว โดยมีแรงเทอร์โมไโคนามิกจากกระแส และแรงโน้มถ่วงมาขัดจังหวะน้อยลง อนุภาคจึงมีการเบี่ยงเบนไม่มาก ทำให้ลำอาร์กส่วนมากเป็นลำอาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางตรง จงเปนสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของหลอด คือ หากหลอดที่ทำงานที่ความถี่ต่ำ กับหลอดที่ทำงานที่ความถี่สูง ถ้าได้รับกำลังเท่ากันแล้ว หลอดที่ทำงานที่ความถี่สูงกว่าจะเปล่งแสงสว่างมากกว่า อุณหภูมิที่ผนังหลอดจะต่ำกว่า และอุณหภูมิสีของแสง (color temperature) จะต่ำกว่า (อุณหภูมิสีของแสงมีค่าต่ำลง เพราะความหนาแน่นของลำอาร์กเปลยนแปลงไปทำให้การกระจายสเปกตรัมของแสง (spectral distribution) มีการเปลยนแปลงไป) จึงทำให้การเห็นสีของแสง (color rendering) จากหลอดที่ทำงานความถี่สูงดูดีขึ้นด้วย (โดยเฉพาะหลอดที่ไม่ได้มีการเคลือบสารฟอสเฟอร์ที่ผนังหลอดสังเกตเห็นได้ชัดเจน) ในรูปที่ 2.4 จะเห็นวาระยะการอาร์กจากการใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบไม่มอดูเลต จะมีแรงดันคร่อมหลอดค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับรูปที่ 2.5 จากการใช้บัลลาสต์แบบมอดูเลต ซึ่งแรงดันที่ค่อนข้างคงที่ จะทำให้ปริมาณแสงค่อนข้างคงที่ และการสึกหรอของไส้หลอดค่อนข้างสม่ำเสมอ

**หมายเหตุ** การอาร์กระหว่างขั้วหลอดที่ความถี่ต่ำจะเป็นลำอาร์กในทางตรงผสมทางโค้ง ส่วนที่ความถี่สูงมากขึ้นลำอาร์กจะตรงมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดได้ แต่ไม่แน่นอนเสมอไป เพราะในหลอดก๊าซดิสชาร์จความเข้มสูงบางประเภท ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของคลื่นเสียงภายในหลอดก็จะเกิดลำอาร์กโค้ง และแสงสว่างลดลงได้ ซึ่งปัจจุบันยังไม่สามารถหาทฤษฎีมาอธิบายตรงจุดนี้ได้ชัดเจนว่า ทำไมหลอดก๊าซดิสชาร์จความเข้มสูงบางประเภทจะมีการลดลงของแสง แต่หลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่มีการลดลงของแสงจากการเรโซแนนซ์ของคลื่นเสียง ส่วนการทำงานที่แรงดันกระแสตรง หรือ ความถี่ต่ำยิ่งก็จะมีลำอาร์กตรง จึงอาจสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดได้เช่นกัน

## 2.3 ประเภทของกลไกในการจุดหลอด

จากกลไกในการจุดหลอด หากมองในภาพรวมก็จะสามารถแบ่งการจุดหลอดออกได้เป็น 2 แบบ คือ

### 2.3.1 จุดติดยาก (hard mode)

เป็นการจุดหลอดที่ใช้งานตามปกติ คือ การจุดหลอดหลังจากที่หลอดจุดติดสว่างสมบูรณ์เต็มที่ แล้วปิดสวิตช์ไฟไม่ได้ใช้หลอดเป็นเวลานาน จนกระทั่งไส้หลอดได้เย็นตัว และก๊าซภายในหลอดเย็นลง จึงมีการกระจายของการใช้เวลาในการจุดหลอดกว้าง (wide lag time distribution) และมีระยะเวลาเฉลี่ยในการจุดหลอดนาน (lag mean time) ช่วงระยะเวลาที่หลอดไม่สว่างกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ทำงาน (จนตัวหลอดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง) จะมีผลบ้างเล็กน้อยต่อระยะเวลาในการจุดหลอดครั้งต่อไป (ในทางปฏิบัติระยะเวลาที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่ทำงานนาน 10 นาทีก็ถือว่านานพอที่จะทำให้การจุดหลอดในครั้งต่อไปเป็นการจุดหลอดแบบจุดติดยาก)

### 2.3.2 จุดติดง่าย (easy mode)

เช่นการจุดหลอดครั้งที่ 2 หลังจากการจุดหลอดในครั้งแรกไม่ติด หรือการจุดหลอดติดชั่วคราวแล้วดับหลอด เพื่อจะจุดหลอดใหม่ หรือ การเปิด-ปิดหลอดในการทดลอง จึงเป็นการจุดหลอดหลังจากที่เกิดการเบรกคาวน์ หรือเกิดโกลว์ขึ้นในหลอดแล้ว จึงทำให้ประจุค้างอยู่ที่ผนังหลอด และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีสูงกว่าการเริ่มจุดหลอดแบบจุดติดยาก ทำให้โอกาสความน่าจะเป็นในการเกิดอิเล็กตรอนตัวแรกมีได้ง่ายกว่า การจุดหลอดจึงทำได้รวดเร็วกว่าการกระจายของเวลาที่ใช้ในการจุดหลอดแคบ (narrow lag time distribution) และระยะเวลาเฉลี่ยในการจุดหลอดจะสั้น (short mean lag time)

เราจะสังเกตเห็นความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการจุดหลอดทั้ง 2 แบบได้อย่างชัดเจน ในหลอดก๊าซดิสชาร์จความเข้มสูง แต่หลอดฟลูออเรสเซนต์อาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้อย่างเด่นชัดนัก

**หมายเหตุ** การจุดหลอดก๊าซดิสชาร์จความเข้มสูงใหม่อีกครั้ง จำเป็นต้องรอระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ไส้หลอดเย็นตัวลงก่อน หากต้องการจุดหลอดทันทีโดยไส้หลอดยังคงร้อนอยู่ จะต้องใช้แรงดันในการจุดหลอดมากขึ้น

## 2.4 สรุปข้อแตกต่างของการจุดหลอดด้วยบัลลาสต์อิเล็กทริกกับบัลลาสต์แมกเนติก

ดังนั้นพอจะสรุปข้อแตกต่างของการจุดหลอดด้วยบัลลาสต์อิเล็กทริกกับบัลลาสต์แมกเนติก ได้ดังนี้

1. บัลลาสต์อิเล็กทริกสามารถให้พลังงานในการจุดได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการจุดหลอดด้วยบัลลาสต์อิเล็กทริกที่ให้แรงดันสูง จึงไม่จำเป็นต้องมีมุมเฟสในการจุดหลอดที่คงที่ (non-fix phase angle)

2. สามารถออกแบบวงจรจุดหลอดด้วยบัลลาสต์อิเล็กทริกได้หลายแบบ และสามารถจำกัดกระแสหากเกิดการผิดปกติที่หลอดได้ เช่น ไส้หลอดขาดไป 1 ข้าง หรือเกิดปรากฏการณ์เรียงกระแส (rectification effect) (ALR, 1990)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การไม่มีตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก ทำหน้าที่จำกัดกระแสและแรงดันเหมือนบัลลัสต์ธรรมดา ทำให้การออกแบบบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ ต้องยุ่งยากในการออกแบบในการควบคุมให้สามารถจำกัดกระแส และแรงดัน ได้อย่างปลอดภัย

4. การจุดหลอดด้วยความถี่สูงมากยิ่งขึ้น จะต้องใช้แรงดันในการจุดมากยิ่งขึ้น เพราะการใช้ความถี่ที่สูงขึ้น พลังงานในรูปคลื่นที่จะไปจุดหลอดเพื่อให้เกิดการเบรกดาวนจะมีค่าลดลง การทำให้มีพลังงานเท่าเดิมจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันที่มากขึ้น

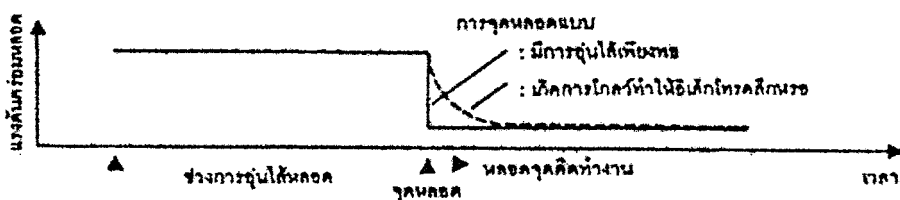
## 2.5 การอุ่นไส้หลอด (พรีฮีต)

ในการจุดหลอด จะต้องมีการควบคุมค่ากระแสอุ่นไส้หลอด (preheat current) แรงดันอุ่นไส้หลอด (preheat voltage) และระยะเวลาอุ่นไส้หลอด (preheating time) แรงดันที่ใช้จุดหลอดจะขึ้นอยู่กับลักษณะคุณสมบัติของหลอด อุณหภูมิห้อง และการช่วยจุดหลอด (ถ้ามี)

1. การควบคุมกระแสอุ่นไส้ให้มีค่าที่เหมาะสมเป็นระยะเวลานานเพียงพอจนไส้หลอดร้อนถึงอุณหภูมิที่พอเหมาะ เมื่อป้อนแรงดันจุดหลอดที่เหมาะสมแล้วจะทำให้สามารถจุดหลอดได้ติดทันที โดยไม่ต้องจุดหลอดหลายครั้ง

2. หากไส้หลอดมีอุณหภูมิเย็นเกินไป เมื่อจุดหลอดก็จะเกิดการโกลว์ไม่สำเร็จ เนื่องมาจากการปล่อยอิเล็กตรอนที่เกิดจากการอุ่นไส้ให้ร้อนไม่เพียงพอ (thermionic emission) ซึ่งในช่วงขณะนี้อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากไส้หลอดก็จะชนกันเองและกระจัดกระจาย ส่งผลให้เกิดรอยดำรอบปลายหลอด (blackening effect) และทำให้อายุการใช้งานหลอดสั้นลง

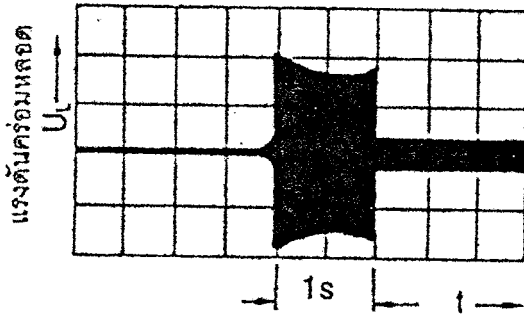
3. หากไส้หลอดมีอุณหภูมิสูงเกินไปก่อนที่จะเกิดการจุดหลอดก็จะส่งผลเสีย คือ ทำให้ไอของสารประกอบภายในหลอด และอนุภาคทั้งสแตนของไส้หลอดเกิดการระเหิดไปในอัตราที่สูงเป็นผลให้เกิดรอยดำรอบปลายหลอด (blackening effect) และทำให้อายุการใช้งานหลอดสั้นลง เช่นกัน



รูปที่ 2.6 แรงดันคร่อมหลอดขณะจุดหลอด ตามมาตรฐานสากลสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์

เซนส์แบบ T8 ที่ทำงานที่ความถี่สูง (A. Heidemann, 1993)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างแรงดันคร่อมหลอดขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ T8 จากผลการทดสอบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อหนึ่ง (Elektronische Vorchaltgerate 93/94)

รูปที่ 2.6 แสดงค่าแรงดันคร่อมหลอดขณะจุดหลอด ตามมาตรฐานและผู้ผลิตหลอด (A. Heidemann, 1993) ซึ่งได้กำหนดค่ากระแสอุ่นไส้ขั้นต่ำ (minimum cathode preheat current,  $I_{min}$ ) สำหรับการอุ่นไส้ในช่วงระยะเวลาต่างๆ (ซึ่งผู้ออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีอิสระในการเลือกค่ากระแสอุ่นไส้และระยะเวลาในการอุ่นไส้หรือ ดังรูปตัวอย่างในรูปที่ 2.7) ได้จากสมการ

$$t_H = (I_{min}^2 - I_{abs}^2)^{-1} \quad (2.1)$$

หรือเขียนดัดแปลงใหม่ให้อยู่ในรูป  $y=mx+c$  ได้เป็น

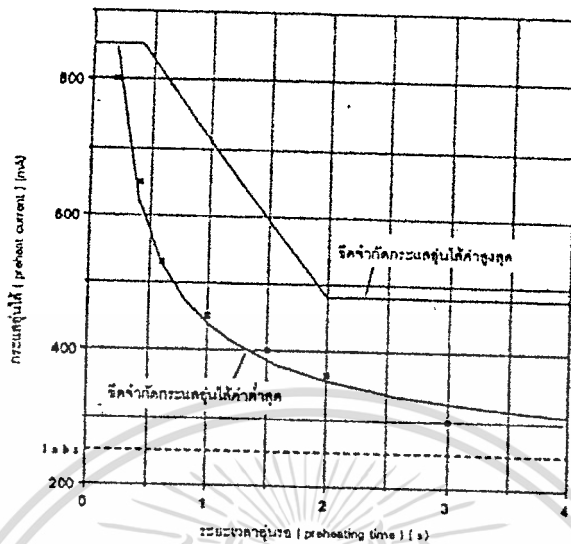
$$t_H \cdot I_{min}^2 = I_{abs}^2 \cdot t_H + a \quad (2.2)$$

โดยที่  $t_H$  = เวลาในการอุ่นร้อนน้อยที่สุด (minimum preheat time)

$I_{min}$  = กระแสอุ่นไส้แคโทดต่ำที่สุด (minimum cathode preheat current)

$a$  = ค่าคงที่แคโทด (cathode constant) หาได้จากค่าจุดตัดแกน Y ของกราฟระหว่าง  $t_H I_{min}^2$  กับ  $t_H$  (sec)

$I_{abs}$  หรือ  $I_m I_m$  = ค่ากระแสอุ่นไส้สมบูรณ์ต่ำสุด (absolute minimum value of preheat current) หาได้จากค่าความชันของกราฟระหว่าง  $t_H I_{min}^2$  กับ  $t_H$  (sec) (กราฟจากผลการทดลองของหลอดแต่ละแบบ) ค่าคงที่  $a$  และ  $I_{abs}$  จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีการจุดหลอดที่เหมาะสม มีค่ากระแสอุ่นไส้ที่พอเหมาะ ที่ทำให้อายุการใช้งานยาวนาน ไม่ทำให้ขั้วหลอดดำเร็ว ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 ที่แสดงขอบเขตของค่ากระแสอุ่นไส้ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 26 W ค่าที่ควรเลือกควรให้อยู่ระหว่างขีดพิักสูงสุดและขีดพิักต่ำสุด



รูปที่ 2.8 กราฟเพื่อใช้หาขอบเขตของค่ากระแสอุ่นไส้ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 26 W

หากกระแสอุ่นไส้น้อยไปไส้หลอดจะมีอุณหภูมิสูงไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการโกลว์ดีสชาร์จ หากกระแสอุ่นไส้มากเกินไปจะทำให้ไส้หลอดร้อนมากเกินไป ทำให้หลอดระเบิด ส่วนค่า  $I_{\min}$  หาได้จากสมการข้างต้น และ ค่า  $I_{\max}$  หาได้จากช่วงการทำงานที่ธาตุเบเรียมที่ไส้หลอดระเบิดในปริมาณที่ปลอดภัย ส่วนค่ากระแสหลอด (operating current) ถูกจำกัดจากค่าอุณหภูมิจุดร้อนของคาโทด (cathode hot spot temperature) และแรงดันเปลือกนอกของแคโทด (cathode sheath voltage) (A. Heidemann, 1993)

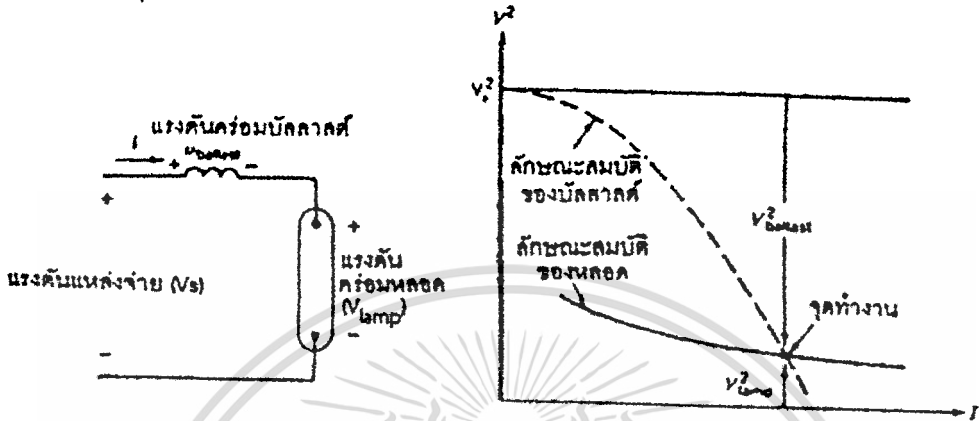
## 2.6 คุณลักษณะที่ดีในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์

กล่าวโดยสรุปการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ดี ควรเป็นตามลักษณะ ดังต่อไปนี้

1. ก่อนที่ไส้หลอดจะเกิดการโกลว์นั้น แรงดันเปิดวงจรที่คร่อมหลอดจะต้องมีค่าไม่สูงเกินไป มิฉะนั้นอาจเกิดการโกลว์ที่มากเกินไปและเป็นอันตรายต่อไส้หลอดได้
2. หลังจากที่เกิดการโกลว์ในหลอด และมีอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาแล้ว แรงดันคร่อมหลอดก็ควรมีค่าสูงที่พอเหมาะ คือ สูงมากเพียงพอให้หลอดติดสว่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องจุดหลอดซ้ำ แต่ก็ต้องไม่สูงมาก เพราะแรงดันเปิดวงจรยังสูงมากเท่าไร ก็จะมีกระแสจุดหลอดสูงมากขึ้น อันเป็นสาเหตุที่ทำให้ขั้วหลอดดำเร็ว (ขั้วหลอดเสื่อม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระแสอันได้ควรมีค่าพอเหมาะ เพื่อให้การจุดหลอดติดอย่างรวดเร็ว จึงจะไม่ทำให้ขั้วหลอดดำ



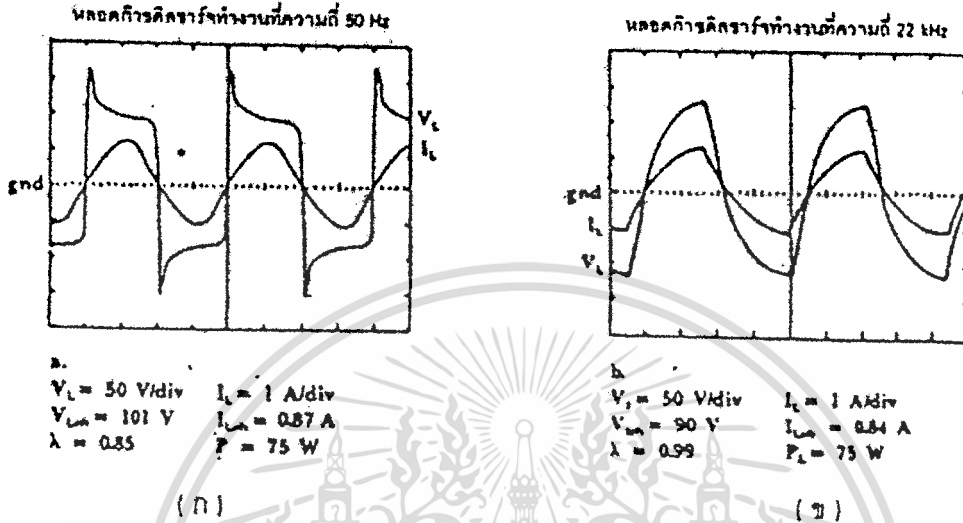
รูปที่ 2.9 การเลือกจุดทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์กับบัลลาสต์ โดยการใช้สมการ

$$V_{\text{ballast}}^2 + V_{\text{lamp}}^2 = V_s^2 \text{ เพื่อหาจุดทำงานที่มีเสถียรภาพได้จากจุดตัดของกราฟ}$$

## 2.7 การหาจุดทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ซึ่งหาได้จากจุดตัดของกราฟลักษณะสมบัติของหลอด (V-I characteristic) กับกราฟเส้นโหลด (load line) ของบัลลาสต์ จากรูปที่ 2.9 เพราะการใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวจำกัดกระแส จะทำให้ลักษณะของแหล่งจ่ายและบัลลาสต์เป็นแหล่งจ่ายกระแส (current source) ส่วนหลอดซึ่งมีลักษณะที่แรงดันคร่อมหลอดค่อนข้างคงที่ โดยไม่ขึ้นกับค่ากระแสจึงมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source) (H. Houkes, 1993) การให้หลอดทำงานที่ความถี่ต่างกันก็จะเป็นการแปรเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของหลอด และเปลี่ยนค่าแรงดันคร่อมหลอดโดยปริยาย แต่จากลักษณะของหลอด เช่น ถ้าหากแรงดันคร่อมหลอด หรือ อิมพีแดนซ์ของหลอดเพิ่มขึ้น 2 เท่า จะทำให้กระแสผ่านหลอดลดลงเพียงประมาณ 10% เท่านั้น (J. J. de Groot, 1994) และที่ความถี่สูงคุณสมบัติของหลอดจะแสดงคุณสมบัติคล้ายตัวความต้านทาน (ที่ความถี่สูง ในช่วงความถี่หนึ่ง) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) จะเห็นว่า การใช้บัลลาสต์แมกเนติกจะมีช่วงแรงดัน 2 ช่วง ช่วงที่เป็นพัลส์แรงดันค่าสูงพัลส์แรกจะเรียกว่าแรงดันจุดหลอด (ignition voltage) ส่วนพัลส์ต่อไปจะเรียกว่าแรงดันจุดซ้ำ (re-ignition voltage) และช่วงที่แรงดันแซดเทิล (saddle voltage) โดยที่ความถี่ต่ำค่าแรงดันคร่อมหลอดจะมีรูปคลื่นไม่เหมือนกระแสผ่านหลอด แต่การใช้บัลลาสต์ความถี่สูงสามารถทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีรูปคลื่นเหมือนกัน (ค่าตัวประกอบกำลังของหลอด จะมีค่าใกล้เคียง 1)

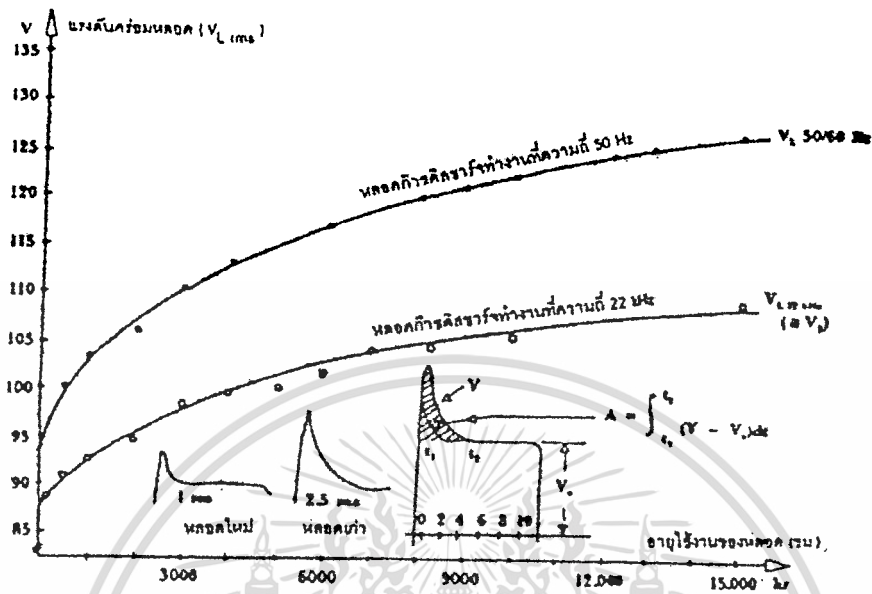


รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดก๊าซดิสชาร์จจากการใช้บัลลาสต์แมกเนติก(ความถี่ 50 Hz) (ก) เปรียบเทียบกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง 22 kHz) (ข)

กำลังที่หลอดต้องการใช้ในการส่องสว่างนั้น ประมาณได้ว่ามีค่าแปรตามความยาวของหลอด (ความยาวของการอาร์ก) ดังนั้นเราจึงสามารถประมาณกำลังของหลอดได้จากความยาวของหลอดและจากรูปที่ 2.10 จะสังเกตเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดก๊าซดิสชาร์จที่ทำงานที่ความถี่ต่ำจะมียอดแหลมของรูปคลื่นที่เรียกว่าแรงดันจุดซ้ำ (re-ignition voltage) แต่จะไม่พบลักษณะนี้ในรูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดที่ทำงานที่ความถี่สูง เพราะการทำงานที่ความถี่สูงนั้น การอาร์กจะไม่ดับขณะเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสทุกครึ่งคาบ จึงทำให้รูปคลื่นกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีรูปเหมือนกันแสดงว่า หลอดเปลี่ยนคุณสมบัติอิมพีแดนซ์แบบอินดักทีฟในการทำงานที่ความถี่ต่ำเป็นแบบรีซิสทีฟที่ความถี่สูง การไม่มีแรงดันจุดซ้ำทำให้การทำงานของหลอดไม่ขึ้นกับแรงดันคร่อมหลอด จึงทำให้ต้องใช้แรงดันคร่อมหลอด (อาร์เอ็มเอส) ค่าสูงเพิ่มมากขึ้น แต่ก็มีข้อดีคือช่วยยืดอายุหลอด หลอดที่ทำงานที่ความถี่สูงไม่เกิดการสึกหรอของไส้หลอดจากแรงดันจุดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.11 แรงดันจุดหลอด (และแรงดันจุดหลอดซ้ำ) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อหลอดมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นจากรูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดที่หลอดเก่ากับหลอดใหม่จะมีพื้นที่ต่างกัน ประมาณได้จากการอินทิเกรตกราฟเส้นบนจากการใช้บัลลาสต์ความถี่ต่ำ และกราฟเส้นล่างจากการใช้บัลลาสต์ความถี่สูง

## 2.8 ผลการทำงานเมื่อหลอดเริ่มเสื่อมคุณภาพ

ในรูปที่ 2.11 แสดงหลอดที่มีอายุการใช้งานนานมากขึ้นจะมีค่ายอดของแรงดันจุดหลอดเพิ่มสูงขึ้น และระยะเวลาในการจุดหลอดเพิ่มนานมากขึ้น ส่วนแรงดันแซดเดิลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นเพราะได้หลอดและก๊าซภายในหลอดเริ่มมีการเสื่อมสภาพลงไป ดังนั้นการใช้งานหลอดที่มีอายุการใช้งานนานมากขึ้นจะเกิดผล คือ

### 2.8.1. หลอดทำงานที่ความถี่ปกติ 50/60 Hz

- 1 ใช้แรงดันจุดหลอด (ignition voltage) เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่ายอดของแรงดันจุดหลอด (peak ignition voltage) เพิ่มสูงขึ้น และระยะเวลาจุดหลอด (ignition time) นานขึ้น
- 2 ใช้แรงดันจุดซ้ำ (re-ignition voltage) เพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3 ใช้แรงดันคร่อมหลอด (lamp voltage) เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่าแรงดันจุดเข้าเพิ่มสูงขึ้น และจากแรงดันแซดเคิล (saddle voltage) เพิ่มสูงขึ้น

### 2.8.2 หลอดที่ทำงานที่ความถี่สูง

1. ใช้แรงดันจุดหลอดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่ายอดของแรงดันจุดหลอดเพิ่มสูงขึ้น และระยะเวลาจุดหลอดนานขึ้น
2. ไม่ต้องใช้แรงดันจุดเข้า
3. ใช้แรงดันคร่อมหลอดเพิ่มขึ้นจากค่าแรงดันแซดเคิลเพิ่มขึ้น

### 2.8.3. หลอดที่ทำงานที่ความถี่ต่ำยิ่ง

1. ใช้แรงดันจุดหลอดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่ายอดของแรงดันจุดหลอดเพิ่มสูงขึ้น และระยะเวลาจุดหลอดนานขึ้น
2. ใช้แรงดันจุดเข้าเพิ่มสูงขึ้น แต่มีจำนวนครั้งของการจุดหลอดช้าน้อยกว่าหลอดในข้อ 2.8.1
3. ใช้แรงดันคร่อมหลอดเพิ่มขึ้นจากค่าแรงดันแซดเคิลเพิ่มขึ้น

ดังนั้นการให้หลอดทำงานที่ความถี่สูง หรือความถี่ต่ำยิ่ง จะสามารถประหยัดพลังงานในช่วงการจุดหลอด และช่วงหลอดทำงานได้มากกว่าการใช้ความถี่ต่ำ 50,60 เฮิร์ตซ์

## 2.9 การเลือกความถี่ในการทำงานของหลอดก๊าซคิซซาร์จ

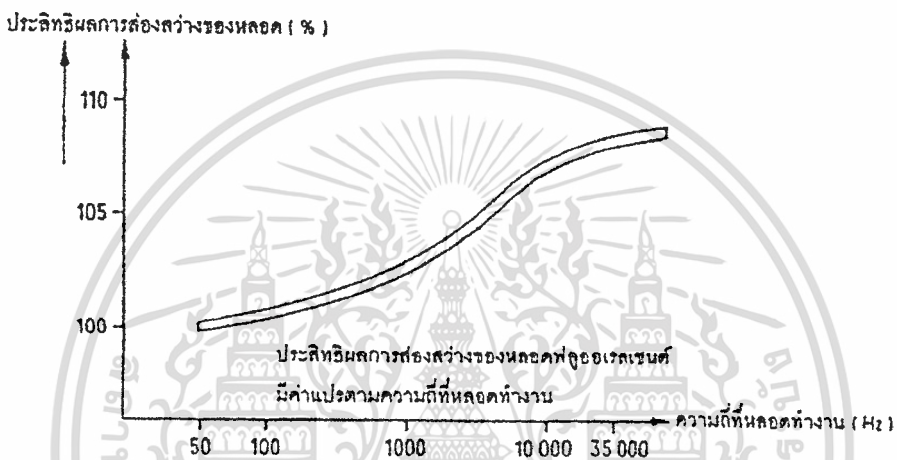
หากหลอดก๊าซคิซซาร์จทำงานที่ความถี่สูงจะประโยชน์จากการเปลี่ยนแกนของบัลลาสต์จากแกนเหล็กมาเป็นแกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่า ทำให้ใช้ไส้หลอดที่มีขนาดเล็กลง แต่ก็ต้องเพิ่มวงจรแปลงแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำให้เป็นแรงดันกระแสสลับความถี่สูง การเลือกใช้ความถี่ในการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบความถี่สูงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน เช่น การป้องกันการรบกวน การซีลด์ และคำนึงถึงความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์อื่นด้วย เพราะบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นสินค้าอุปโภคชนิดหนึ่งเช่นกัน การเลือกความถี่ในการทำงานสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ มีเกณฑ์ คือ

1. หากเลือกใช้ความถี่ยิ่งต่ำก็จะมีผลดี ทำให้การรบกวนเนื่องจากผลของฮาร์มอนิกจะมีผล

ลดน้อยลง แต่ขนาดของอุปกรณ์จะมีขนาดใหญ่กว่าการใช้ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความถี่ควรสูงกว่า 10 kHz เพราะหลอดจะมีประสิทธิภาพการส่องสว่างเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 7 ถึง 10 % ที่ความถี่สูงกว่า 10 kHz ดังแสดงในรูปที่ 2.12
3. ความถี่ควรสูงกว่า 18 kHz เพราะหากความถี่ต่ำกว่านี้ คุณจะไม่สามารถได้ยินอาจสร้างความรำคาญได้ (โดยทั่วไป หูคนโดยเฉลี่ยจะสามารถได้ยินเสียงความถี่สูงสุดได้ประมาณ 15 kHz แต่ในเด็กเล็กอาจสามารถได้ยินความถี่สูงขึ้นไปถึง 18 kHz) ซึ่งโดยทั่วไปจะถือเกณฑ์ความถี่ขั้นต่ำที่ 20 kHz เพื่อหลีกเลี่ยงการได้ยินของคน



รูปที่ 2.12 การเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ทำงานที่ความถี่ต่างๆ (Siemens, 1982)

4. หากเลือกความถี่สูงมากขึ้น ความถี่ควรสูงมากกว่า 50 kHz เพราะอากาศจะสามารถดูดกลืนคลื่นเสียงได้เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นผลดีที่ทำให้การรบกวน RFI ลดลงอย่างรวดเร็ว
5. การที่สวิตช์ต้องทำงานที่ความถี่สูงมากขึ้นก็ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในช่วงการสวิตช์มากขึ้น แต่ในกรณีที่วงจรมีคุณสมบัติไม่มีการสูญเสียขณะสวิตช์ (zero voltage switching : ZVS) ณ.ความถี่ใดๆ เช่นตัวอย่าง วงจร class E ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้
6. การเลือกใช้ความถี่สูงสุดได้เท่าไรนั้น ขึ้นกับขีดจำกัดด้านความเร็วของอุปกรณ์ เช่น แกนเฟอร์ไรซ์ (โดยปกติตัวสารแม่เหล็กที่กำหนดในท้องตลาดจะใช้งานในช่วงไม่เกิน 300 kHz หากต้องการใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นไปจำเป็นต้องติดต่อบริษัทตัวแทนโดยตรง เช่น บริษัทอาร์วาคซ์ไทย จำกัด) หรือ ทรานซิสเตอร์ที่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ ในที่นี้เลือกใช้ MOSFETs เพราะสามารถใช้งานได้เป็น MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานที่ความถี่สูงมากขึ้นนั้น ก็ไม่ได้ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (ที่ใช้หลักการกระแสผ่านหลอด) มีค่าประสิทธิผลการส่องสว่างเพิ่มไปมากกว่า 10 %
8. ยิ่งความถี่สูงมากขึ้นเท่าไร ก็จะเกิดผลของฮาร์มอนิกที่ 2, 3,... ฯลฯ ยิ่งสูงมากขึ้น จึงเป็นผลเสียที่จะไปเพิ่มการรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ทำงานที่ความถี่สูงในย่านเดียวกัน
9. ความถี่ที่ควรหลีกเลี่ยงในช่วง 30-60 kHz เพราะคลื่นพาหะของรีโมตคอนโทรลส่วนมากใช้ความถี่ในช่วงย่านนี้ ได้แก่ ความถี่ 23, 25, 33, 35, 40, 55 kHz โดยความถี่ที่มีการใช้งานมากที่สุด คือ 40 kHz เพราะมีความยาวคลื่นสั้น การเลี้ยวเบนของคลื่นน้อยมาก การดูดกลืนคลื่นในอากาศพอประมาณ ถ้าคลื่นเป็นลำแคบมีทิศทางที่แน่นอน
10. ได้มีการศึกษาถึงผลของความถี่และคลื่นต่อชีววิทยาของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (ALR, 1991) กล่าวถึง ความถี่ที่บดลาคืออิเล็กทรอนิกส์ที่ควรหลีกเลี่ยง อีกช่วงก็คือ 20-25 kHz เพราะหูของสุนัขจะสามารถได้ยินเสียงความถี่สูง และ มีความไวมากต่อความถี่สูงในช่วง 20-25 kHz จึงอาจสร้างความรำคาญให้แก่สุนัขได้

ดังนั้นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในปัจจุบัน จึงมีช่วงความถี่ที่เหมาะสมอยู่ในหลัก 10 kHz โดยทั่วไปความถี่ที่มีการใช้ในวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ในช่วง 20-500 kHz แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ ความถี่ในช่วง 20-70 kHz (ในวงจรบัลลาสต์รุ่นใหม่ อาจใช้ความถี่สูงถึง 14 MHz)

## 2.10 คุณสมบัติหลอด

จากการทดลอง เพื่อวัดค่าแรงดัน และกระแสที่ไหลผ่านหลอดในขณะที่หลอดทำงานทั้งนี้การวัดค่าต่างเป็นไปตามสภาพแวดล้อมที่กำหนดตามที่โรงงานระบุ สามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 2.2

จากข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน และค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากตาราง และอาศัยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคุณสมบัติของหลอด (characteristic curve of lamp) ซึ่งสามารถกำหนดได้ว่า

$$V_{Lamp} = \frac{1}{(a + b * I_{Lamp})} \quad (2.3)$$

โดยที่  $a = 7.8e-3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$b = 2.01e-5$

$I_{Lamp}$  = lamp current in mA(rms)

$V_{Lamp}$  = lamp voltage in volt(rms)

จากสมการที่ 1 เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ คือ

$$I_{Lamp} = f(R_{lamp}) \tag{2.4}$$

$$= I(R_{lamp}) \tag{2.5}$$

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าค่า เพาเวอร์แฟกเตอร์มีค่าเกือบเป็น 1 ซึ่งเราสามารถสมมุติฐานได้ว่าค่าความต้านทานหลอดจะเป็นค่าความต้านทานรีซิสเตอร์ได้ ทั้งนี้ข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไปในบทที่ 4

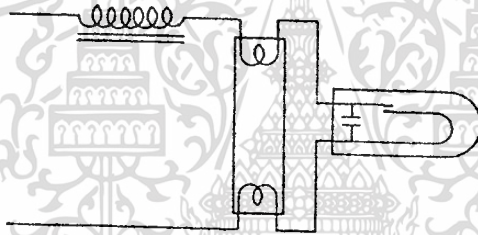
volt	mA	volt*mA	watt	power factor	R_lamp
86.4	19.03	16.4	16.4	0.997	454
85.1	200.3	17.0	17.0	0.997	425
83.2	210.3	17.5	17.5	1.000	396
81.6	220.1	18.0	17.9	0.997	371
80.1	230.2	18.4	18.4	0.998	348
79.0	240.2	19.0	19.0	1.001	329
77.9	250.2	19.5	19.5	1.000	311
76.7	260.2	20.0	19.9	0.997	295
75.2	265.0	19.9	19.9	0.999	284
75.0	270.2	20.3	20.3	1.002	278
73.8	280.0	20.7	20.7	1.002	264
73.1	290.1	21.2	21.2	1.000	252
71.7	300.2	21.5	21.6	1.004	239
71.7	310.3	22.2	22.3	1.002	231
69.9	320.3	22.4	22.4	1.000	218
70.1	330.2	23.1	23.2	1.002	212

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และค่ากระแสสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ทำงานร่วมกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

## บทที่ 3

### บัลลาสต์

การที่หลอดฟลูออเรสเซนต์มีคุณสมบัติด้านทานลบ กล่าวคือเมื่อมีกระแสไหลผ่านหลอดมากขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมหลอดจะลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องหาอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่จะนำมาต่ออนุกรมกับหลอด เพื่อกำหนดค่ากระแสที่พอเหมาะแก่หลอด อุปกรณ์ที่ง่ายที่สุดคือ ค่าความต้านทานแบบรีซิสแตนซ์ แต่ก็หมายถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันจึงได้ใช้บัลลาสต์ชนิดแกนเหล็ก ทำหน้าที่เป็นความต้านทานแบบรีแอคทีฟ ดังรูปที่ 3.1 หรือใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานที่ใช้บัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็กในการจุดหลอด

#### 3.1 หน้าที่ของบัลลาสต์

หน้าที่ที่นอกเหนือจากการกำหนดค่ากระแสที่เหมาะสมไหลผ่านหลอดของบัลลาสต์ยังมีอีก ดังนี้

1. ต้องสามารถให้แรงดันที่สูงมากพอในขณะที่จุดหลอด
2. ต้องจ่ายกระแสคงที่ให้แก่หลอด ไม่ว่าแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟตก หรือเพิ่มขึ้นในช่วงที่กำหนด
3. ต้องมีประสิทธิภาพที่สูง หรือให้มีค่าความสูญเสียน้อยที่สุด
4. ต้องมีการอุ่นไส้หลอดตลอดเวลา สำหรับหลอดที่เป็นชนิดฟรียูว หรือแรปปิดสตาร์ท
5. ต้องให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่สูง
6. กระแสที่ไหลผ่านหลอดต้องสมมาตรมีการไหลสลับไปมาระหว่างทั้งสองขั้วหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความสูญเสียเนื่องมาจากบัลลาสต์สามารถสังเกตเห็นได้จากตารางที่ 3.1 ส่วนใน ตารางที่ 3.2 จะทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ต้องการใช้ระหว่างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับบัลลาสต์ ชนิดแกนเหล็ก

Lamp type	Lamp No.	Number of lamps	Ballast watts	Total watts
Preheat	F14T12	1	5	19
	F15T12	1	5	20
	F20T12	1	5	25
Rapid start	F40T12	1	12	52
	F40T12	2	12	92
	F40T12	3	20	140
Instant start	F48T12	1	20	59
	F48T12	2	32	110
	F72T12	1	27	82
	F72T12	2	34	144
	F96T12	1	27	102
	F96T12	2	34	184
	F96T12	2	34	184
High-output	F48T12HO	1	25	85
	F48T12HO	2	30	150
rapid start	F72T12HO	1	25	110
	F72T12HO	2	31	201
	F96T12HO	1	30	140
	F96T12HO	2	21	241
	F96T12HO	2	21	241
Very high-output	F48T121500	1	28	143
	F48T121500	2	15	245
	F72T121500	1	20	180
	F72T121500	2	15	335
	F96T121500	1	15	230
	F96T121500	2	15	455

ตารางที่ 3.1 ความสูญเสียอันเกิดจากบัลลาสต์ชนิดแกนเหล็กที่ใช้งานกับหลอดชนิดต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lamp No.	Ballast type	Total watts
2 F40CW	Inductor ballast	92-94
2 F40CW	Electronic ballast	66-77
2 F40ES	Electronic ballast	58-60
2 F40CW	Electronic dimming ballast	77
2 F40ES	Electronic dimming ballast	64

### ตารางที่ 3.2 เปรียบค่าพลังงานที่ต้องการใช้ระหว่างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับบัลลาสต์ชนิดแกนเหล็ก

วงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายในการใช้งานแสงสว่างทั่วไป เพราะมีข้อดีคือ ให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าวงจรหลอดอินแคนเดสเซนต์ เช่น หลอด 36 วัตต์ให้ปริมาณแสง 2850 ลูเมน จึงมีค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างเท่ากับ  $2850/36 = 80$  ลูเมนต่อวัตต์ (ส่วนหลอดอินแคนเดสเซนต์ 75 วัตต์ให้ปริมาณแสง 1200 ลูเมน จึงมีค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างเท่ากับ  $1200/75 = 16$  ลูเมนต่อวัตต์) อย่างไรก็ตาม วงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ก็มีข้อเสียสำคัญ 2 ประการ คือ

1. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งวงจรสูงกว่าวงจรหลอดอินแคนเดสเซนต์ (ค่าหลอด ค่าบัลลาสต์ ค่าสตาร์ทเตอร์ และ ค่าโคม) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นหากมองในระยะยาวแล้วหลอดฟลูออเรสเซนต์จะคุ้มกว่าหลอดอินแคนเดสเซนต์ เพราะมีอายุการใช้งานต่อหลอดนานถึง 8000 ชั่วโมง

2. หลอดฟลูออเรสเซนต์จะเปลืองแสงที่มีค่าความยาวคลื่นเพียงบางค่าเท่านั้น

แต่จากข้อดีเรื่องการประหยัดพลังงานจึงทำให้มีผู้นิยมใช้อย่างกว้างขวาง จึงมีความพยายามที่จะออกแบบบัลลาสต์แบบใหม่ๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (ALR, 1993) ที่สามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้สูงถึง 90 ลูเมนต่อวัตต์

### 3.2 ปัญหาสำคัญในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

มีประเด็นหลักอยู่ 2 ประการ คือ

#### 3.2.1 อะไรคือจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับหลอด?

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบบัลลาสต์ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาเก็บข้อมูล และทำความเข้าใจถึง ลักษณะทางกายภาพของหลอด ลักษณะสมบัติของกระแส แรงดัน ที่จำเป็นสำหรับหลอดในการจุดหลอด ในการทำงานของหลอด และ ในการเปลี่ยนสถานะจากการจุดหลอดเป็นการทำงานของหลอด (ALR, 1990)

### 3.2.2 ลักษณะด้านออกของวงจรบัลลาสต์ที่เหมาะสมควรเป็นอย่างไร?

การออกแบบบัลลาสต์ จึงจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับค่ากระแส แรงดันที่เหมาะสมว่าเป็นเท่าไร ต้องใช้แรงดันที่เหมาะสมเท่าไรในการจุดหลอด และวงจรควรจ่ายแรงดันเท่าไร จ่ายกำลังเท่าไร ให้หลอดขณะทำงาน

การออกแบบบัลลาสต์ที่ดีจึงต้องทราบถึงรายละเอียด และขั้นตอนการทำงานของหลอดโดยละเอียด

## 3.3 คุณสมบัติ และประสิทธิภาพการทำงาน(Performance Parameter)

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ต้องคำนึงรายละเอียดต่างๆ ดังนี้ด้วย

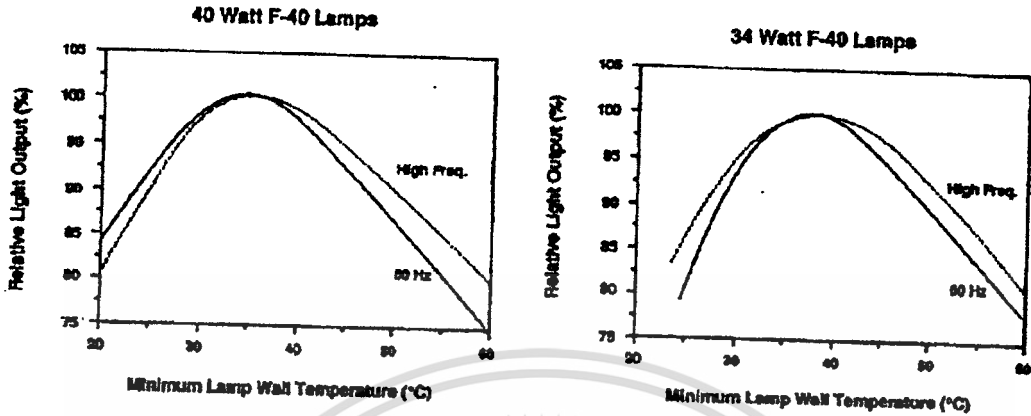
### 3.3.1 ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจร(System Efficacy)

การวัดประสิทธิภาพการทำงานของวงจร สามารถวัดได้จากการแปรเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าด้านเข้าเป็นแสงสว่างที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งมีหน่วยเป็นความสว่างต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า (lumens/Watt) โดยปกติค่าประสิทธิภาพของวงจรจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผนังหลอดขณะที่หลอดทำงาน (the lamp wall temperature) ในทางปฏิบัติแล้วอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 35 ถึง 60 องศาเซลเซียส

### 3.3.2 ลักษณะรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านหลอด(Lamp Input Current Wave Shapes)

ทั้งนี้การวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านหลอด เพื่อต้องการหาค่า the lamp current crest factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ายอดของกระแส(peak current) เทียบกับค่ากระแสอาร์เอ็มเอส(rms current) ที่ไหลผ่านหลอด จากมาตรฐานของ American Nation Standards Institute(ANSI) ค่า current crest factor ต้องไม่เกิน 1.7 โดยที่ค่ากระแสไหลผ่านหลอดหากเป็นรูปคลื่นไซน์แล้ว ค่า current crest factor จะมีค่าเท่ากับ 1.414 ทั้งนี้หากค่า current crest factor จะเป็นผลให้อายุการใช้ของหลอดสั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงถึงความส่องสว่างของแสงเทียบอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำของหลอด 40 W F-40 และหลอด 34 W F40 ที่ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แมกเนติกแกนเหล็ก และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

### 3.3.3 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ไหลผ่านหลอด (Lamp Input Voltage Wave Shapes)

หน่วยวัดคุณสมบัติที่ดีของบัลลาสต์อีกอย่างคือ Voltage Crest Factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ายอดของแรงดันหารด้วยค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน ตามสูตรนี้

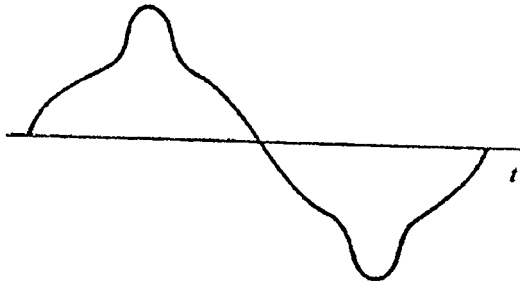
$$VCF = \frac{V_{PK}}{V_{rms}} \quad (3.1)$$

ทั้งนี้โดยปกติสำหรับรูปคลื่นแรงดันที่เป็นไซน์โดยสมบูรณ์ จะได้ค่า VFC เป็น 1.414 สำหรับบัลลาสต์โดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 2.0 สังเกตได้รูปคลื่นได้ดังรูปที่ 3.3 จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (Fourier analysis) จะประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกที่สาม ซึ่งเป็นผลมาจากที่แกนเหล็กเข้าสู่ช่วงการอิ่มตัว (saturation region) เนื่องได้รับการจ่ายค่าแรงดันเข้าขณะหลอดทำงาน

### 3.3.4 ฮาร์โมนิก (Harmonic Content)

การที่รูปคลื่นไม่เป็นไซน์โดยแท้จริงนั้นจะต้องประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกที่สูงกว่าฮาร์โมนิกพื้นฐาน 50 หรือ 60 Hz ในกรณีที่รูปคลื่นกระแสเป็นไซน์โดยแท้จริง ค่ากระแสในนิวทรอน(neutral line) ในวงจรสามเฟสจะเป็นศูนย์ และทั้งนี้ค่าฮาร์โมนิกที่สามไม่ได้ถูกหักลบยกกันพอดีในทั้งสามเฟสก็จะมีค่ากระแสไหลผ่านในนิวทรอน นอกจากนี้ยังจะทำให้เกิดสัญญาณไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆ ได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะรูปคลื่นที่ไหลผ่านหลอด

### 3.3.5 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Conducted Radiated Electromagnetic Energy)

การที่วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 60 Hz เป็นกระแสไฟฟ้าตรงแล้วใช้การสวิตช์ซึ่งความถี่สูงไปจุดหลอดนั้น ค่าพลังงานความถี่สูง และความถี่ฮาร์โมนิกอาจย้อนกลับเข้าแหล่งจ่ายค่ากระแสได้ และไปรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆที่ต่ออยู่กับสายไฟเส้นนี้ รวมไปถึงจะเกิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ไปในอากาศ ซึ่งอาจนำไปสู่การรบกวนอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายได้ ทั้งนี้จะมีหน่วยงานที่ควบคุม คือ The Federal Communication Commission (FCC)

### 3.3.6 ฟลิกเกอร์ (Flicker)

จะเป็นอย่างมากเมื่อทำงานที่ความถี่ 50 Hz แต่เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ทำงานที่ความถี่สูงมาก อย่างต่ำ 20-30 kHz ดังนั้นปัญหาของฟลิกเกอร์จะหมดไปโดยอัตโนมัติ

### 3.3.7 ค่าความแสงสว่าง (Light Output)

การที่จะวัดประสิทธิภาพของ วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถวัดได้จากค่าพลังงานด้านเข้าเพียงอย่างเดียว ต้องมีการตรวจประสิทธิภาพของแสงสว่างที่ได้จากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เทียบกับค่าความสว่างที่ โรงงานผู้ผลิตหลอดกำหนด หรือที่เรียกว่า บัลลาสต์แฟกเตอร์ (ballast factor) โดยปกติบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการรับรอง และได้ Certified Ballast Manufacturers (CBM) นั้นต้องมีค่าบัลลาสต์แฟกเตอร์อย่างน้อย  $95 \pm 2.5\%$  ที่วัดได้จากหลอดที่อยู่ในมาตรฐานของ ANSI

### 3.3.8 Regulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งนั้น ต้องสามารถที่จะทำงานได้ในกรณีที่ค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หรือลดลงในช่วง 10 %

### 3.3.9 คุณสมบัติการจุดหลอด (Starting Characteristic)

ค่าแรงดันสูงสุดในการจุดหลอดของหลอดชนิด 40-W F40 ที่กำหนดโดย ANSI นั้นต้องไม่เกิน 360 Vrms ทั้งนี้หากมากกว่านี้จะมีผลโดยตรงให้อายุการใช้งานหลอดสั้นลง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการออกแบบที่ดีจะมีการอุ่นไส้หลอดคาโทด และควบคุมค่าแรงดันในการจุดหลอดไม่ให้เกินข้อกำหนดของ ANSI

### 3.3.10 เพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power Factor)

ลักษณะรูปร่าง และเฟส ของค่ากระแส และแรงดัน จะเป็นตัวกำหนดค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (the line power factor) ตามข้อกำหนดของ ANSI นั้นค่านี้ต้องมีค่ามากกว่า 90 % สำหรับบัลลาสต์แกนเหล็กนั้นแก้ปัญหาโดยการเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์เข้าไปชดเชยค่าเหนี่ยวนำของโซลิต (the inductance chokes) ที่ทำหน้าที่ในการจำกัดค่ากระแสไหลผ่านหลอด นอกจากนี้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้อุ่นไส้ไม่เป็นขายน้จะเป็นผลให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ลดลง

### 3.3.11 ค่าพลังงานอุ่นไส้ (Filament Power)

การอุ่นไส้ที่ขั้วคาโทด (filaments) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรปปิดสตาร์ท (rapid start fluorescent) เป็นเหตุผลสำคัญทำให้การจุดหลอดสามารถกระทำได้ที่ค่าแรงดันที่ต่ำลง ซึ่งจะเป็นผลปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน (thermionic emission) ทั้งนี้ที่ไส้หลอด (filament) ของขั้วคาโทดที่ทำจากทั้งสแตนที่ถูกล้อมด้วย สาร low-work-function alkali earth material ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน (thermionic emission) ที่อุณหภูมิของไส้หลอดที่ต่ำกว่าได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการอุ่นไส้หลอดของ หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรปปิดสตาร์ท จะมีอายุการใช้งานนานกว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอินสแตนทสตาร์ท (instant start lamp) หรือ ชนิดพรีฮีทสตาร์ท (preheat start lamp) โดยปกติตามข้อกำหนดของ ANSI นั้นระบุควรมีการอุ่นไส้ตลอดเวลา โดยการให้มีแรงดันตกคร่อมที่ไส้หลอดประมาณ 2.5-4.1 V

ทั้งนี้วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดที่มีการตัดการอุ่นไส้หลอดภายหลังที่หลอดได้ทำงานแล้ว ซึ่งก็สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 4 W สำหรับวงจรที่มีการต่อหลอด 2 หลอดใช้งานพร้อมกัน แต่จะเป็นผลให้อายุการใช้งานของหลอดสั้นลง และจะเป็นผลกระทบมากขึ้นหากวงจรยังทำงานที่ความถี่สูงยิ่งทำให้อายุการใช้งานหลอดสั้นลง เมื่อเทียบกับหลอดที่ทำงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรที่สามารถปรับคแสงสว่างได้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการอุ่น  
ไส้ตลอดเวลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### พื้นฐานวงจรขยาย Class E Resonant Inverter

บทนี้จะแยกกล่าวถึงพื้นฐานวงจรขยาย Class E ที่นำมาประยุกต์เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์, วงจรพื้นฐานเรโซแนนท์ที่เหมาะสมนำมาประยุกต์มาใช้จุดหลอด, การพิสูจน์การสะท้อนค่าความต้านทานหลอดให้เป็นค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับวงจร Class E และส่วนสุดท้ายเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ช่วยในการออกแบบ

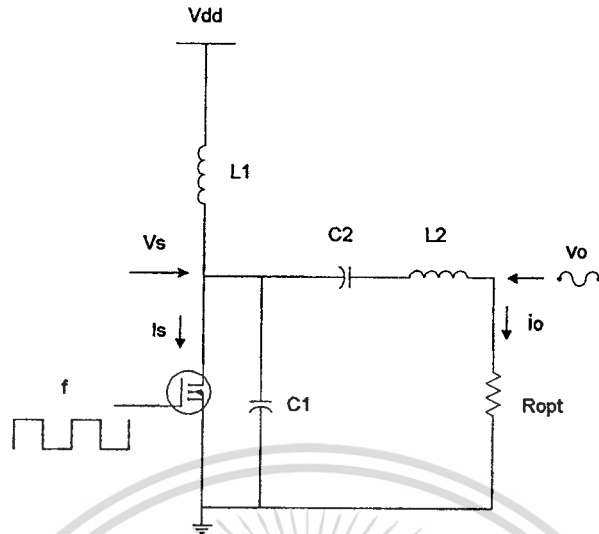
#### 4.1 พื้นฐานวงจรขยาย Class E Resonant Inverter

สำหรับวงจรพื้นฐาน Class E ได้มีการแนะนำโดย Sakals โดยเป็นวงจร Switching-mode Amplifier อย่างหนึ่ง โดยวงจรจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปิด-เปิด วงจร (Switching เช่น ทรานซิสเตอร์, มอสเฟต) และวงจรภาระ (load network) ที่มีหลักการสำคัญว่า แรงดัน และความชันของแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิทชิง ในขณะที่อุปกรณ์สวิทชิงนำกระแส (เปิด วงจร) จะต้องเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้วงจรพื้นฐานนี้จะมีค่าความสูญเสียอันเกิดสวิทชิงน้อย เพราะไม่เกิดการตัดกันระหว่างรูปคลื่นแรงดัน และกระแส ยังผลให้วงจรโดยรวมมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้หลักการที่สำคัญของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์คือ ต้องสามารถให้แรงดันที่ตกคร่อมที่สูงมากพอ ในขณะที่จุดหลอดในสภาวะเริ่มต้น และ ต้องควบคุมกระแสให้พอเหมาะในช่วงที่หลอดทำงานในสภาวะปกติ เนื่องมาจากคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็นความต้านทานลบ ซึ่ง วงจร Class E Resonant Inverter มีคุณสมบัติดังกล่าวครบถ้วน

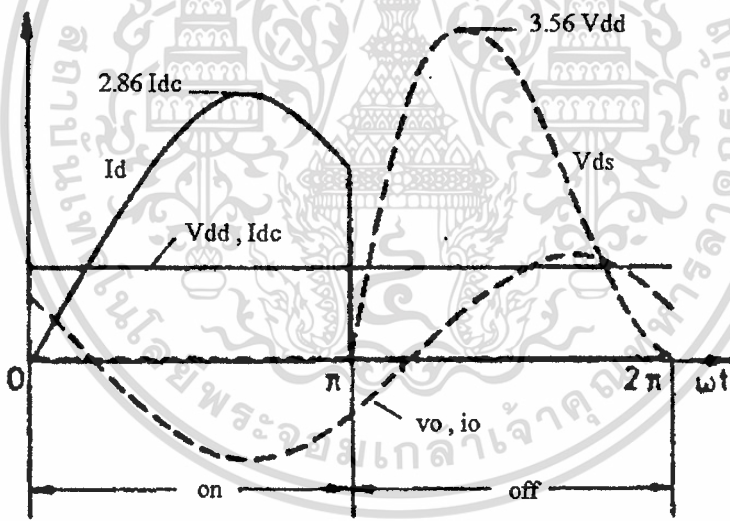
วงจรพื้นฐานของ CLASS E นั้นจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ตามรูปภาพที่ 4.1

1. อุปกรณ์สวิทชิงที่ต่อขนานกับ  $C1$  ซึ่ง โดยปกติค่าตัวเก็บประจุ  $C1$  ที่แฝงอยู่ในอุปกรณ์สวิทชิงนี้ในวงจรอื่นจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสียในการทำงานของอุปกรณ์สวิทชิง
2. วงจรภาระ (load network) ที่ประกอบไปด้วย Series tuned tank  $L2$   $C2$  และ load ( $R_{opt}$ )
3.  $L1$  ที่ทำหน้าที่เป็น ไซค์ ซึ่งจะจ่ายกระแสคงที่ หรือ มีรีปเปลล์น้อยมากจนกระทั่งสามารถตัดทิ้งได้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่า  $L1$  ต้องมีค่ามากเพียงพอ [1] นอกไปจากนี้หากได้รับการออกแบบที่ดีสามารถลดทอนสัญญาณ RFI ได้ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 พื้นฐานวงจรขยาย Class E



รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นกระแส  $i$ , และแรงดัน  $v$ ,

จุดสำคัญในการทำงานของวงจรขยาย Class E นั้น ในความหมายของ Sokals สามารถกำหนดได้ว่าวงจรนี้จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ที่ใช้การสวิตช์ซึ่งเพียง 1 ตัว และจะมีวงจรภาระ (load network) รวมไปถึงต้องมีการทำงานของวงจรที่สำคัญ 3 ประการ

1. การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในขณะที่อุปกรณ์กำลังเปิด วงจรต้องมีการหน่วงเวลา แล้วค่อยเพิ่มขึ้นในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์สวิทชิงควรจะตกลงเป็นศูนย์ในขณะที่อุปกรณ์สวิทชิงกำลังจะปิดวงจร

3. ค่าความชันของแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์สวิทชิง  $\left(\frac{dv}{dt}\right)$  จะต้องเป็นศูนย์ ในขณะที่อุปกรณ์สวิทชิงกำลังจะปิดวงจร

ทั้งนี้หากวงจรขยาย Class E ใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วนทั้ง 3 ประการข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าวงจรขยายนั่นอยู่ในสภาวะการทำงานที่เหมาะสม (optimum Class E) และถ้าวงจรขยายใดที่มีคุณสมบัติไม่ครบทั้ง 3 ประการสามารถกล่าวได้ว่าวงจรขยายดังกล่าวทำงานภายใต้สภาวะเหมาะสม (suboptimum Class E)

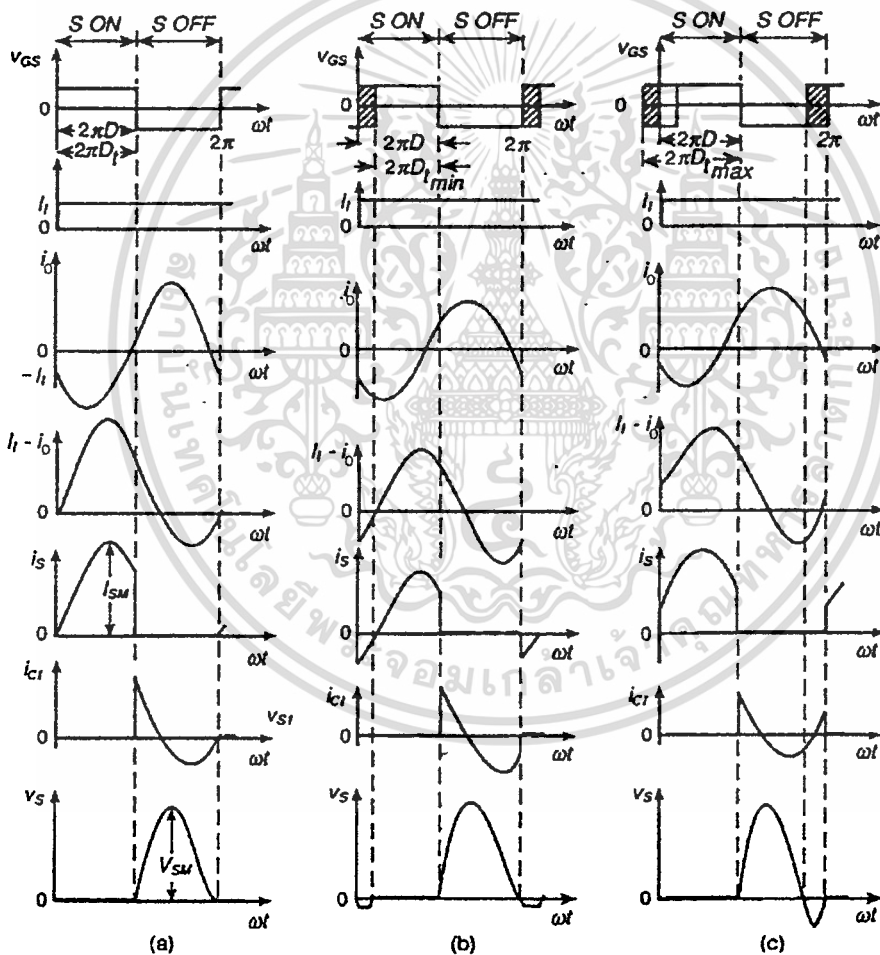
ลักษณะที่สำคัญของวงจร Class E เมื่อวงจรทำงานในสภาวะเหมาะสมนั้นลักษณะรูปร่างกระแส  $i_s$  และ แรงดัน  $v_s$  ต้องมีลักษณะตามรูปที่ 4.2 กล่าวคือ ขณะที่อุปกรณ์สวิทชิงเปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิทชิงจะไม่เพิ่มขึ้นก่อนที่กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิทชิง  $i_s$  จะตกลงเป็นศูนย์ และในขณะที่อุปกรณ์สวิทชิงปิดวงจรทั้งแรงดัน และความชันของแรงดันจะตกเป็นศูนย์ ก่อนที่กระแส  $i_s$  จะค่อยๆเพิ่มขึ้น ถ้าเป็นเช่นนั้นก็หมายความว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่อุปกรณ์สวิทชิง ทำงานปิด เปิด (Switching loss) จะมีค่าเป็นศูนย์ หรือต่ำมาก แม้ว่าทำงานที่ความถี่ที่สูงมาก นอกไปจากนี้ค่ากระแส และแรงดันที่กระแสจะมีลักษณะเป็น sinusoidal [2] รวมไปถึงค่าตัวเก็บประจุที่แฝงอยู่ในอุปกรณ์สวิทชิงที่โดยปกติจะเป็นค่าการสูญเสียก็จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของวงจรที่จะทำงานในลักษณะที่กระแส และแรงดันจะไม่ตัดกัน และที่สำคัญค่าตัวเก็บประจุแฝงนี้หากมีค่ามากพอ และทำงานที่ความถี่ที่สูงมากพอ ค่าตัวเก็บประจุแฝงนี้สามารถใช้แทน C1 ได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดอุปกรณ์ และ ง่ายต่อการออกแบบมากขึ้น [2]

พิจารณาจากรูป 4.3(a) เป็นรูปคลื่นของกระแส และแรงดันที่ทำงานในสภาวะเหมาะสม (optimum) ที่  $R=R_{opt}$  ; RF chock L1 จะทำให้เกิดกระแสตรง  $I_T$  และ RLC series-resonance ทำให้เกิดกระแส  $i_o$  สำหรับรูปร่างกระแส  $i_o$  นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า Q ของวงจร ถ้าหากค่า Q มีค่าสูง ( $Q \geq 7$ ) [7] รูปร่างของ  $i_o$  จะมีลักษณะคล้าย sinusoidal แต่ถ้าหากมี Q ที่ต่ำ รูปร่างของ  $i_o$  ก็จะมีลักษณะคล้าย exponential ทั้ง RF chock L1 และ RLC series-resonance ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส ที่มีค่าเท่ากับ  $I_T - i_o$  เมื่ออุปกรณ์สวิทชิง ทำงานค่า  $I_T - i_o$  จะไหลผ่านอุปกรณ์สวิทชิง แต่เมื่ออุปกรณ์สวิทชิง ไม่ทำงานนั้นค่ากระแสดังกล่าวจะไหลผ่าน C1 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C1 และ ตัวอุปกรณ์สวิทชิง

สำหรับการทำงานที่สภาวะเหมาะสม (optimum mode) ทั้งแรงดัน และความชันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิทชิง นั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็จะหมายถึงไม่มีค่าพลังงานที่สะสมไว้ที่ C<sub>1</sub> จึงทำให้ไม่มีค่าความสูญเสียเกิดขึ้น เนื่องด้วยค่าความชันของ  $V_s$  เป็นศูนย์ และการเพิ่มขึ้นของ  $i_s$  ที่ละเอียดอ่อนเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เปรียบเทียบกันด้านการค้า ไม่ว่าจะผิดใจกันสักแค่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

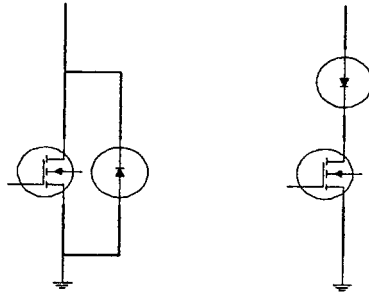


น้อยจากศูนย์ รวมถึงค่า  $v_s$  และ  $i_s$  มีค่าทางด้านซีกบวก เพราะฉะนั้นไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มไดโอดเข้าไปในวงจรพื้นฐาน Class E แต่อย่างไรก็ตามนั้นหมายถึงความจำเป็นจะต้องออกแบบและเลือกค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมทั้ง ความถี่ ความกว้างของขนาดสัญญาณความถี่ รวมไปถึงค่าของภาระ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานในสภาวะเหมาะสม (optimum mode) ได้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ค่าภาระมีค่ามากกว่า  $R_{opt}$ ,  $v_s$  จะมีค่ามากกว่าศูนย์เมื่ออุปกรณ์สวิตซิ่ง ทำงาน และค่าภาระมีค่าน้อยกว่า  $R_{opt}$  จะทำให้ค่า  $v_s$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งทั้งสองกรณีค่าพลังงานที่สะสมไว้ C1 จะเกิดการสูญเสียไปกับอุปกรณ์สวิตซิ่ง ในขณะที่อุปกรณ์สวิตซิ่งนำกระแส (turn on switching loss)



รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นกระแส  $i_s$  และแรงดัน  $v_s$  (a) เมื่ออยู่ที่สภาวะเหมาะสม (b) เมื่อขนานกับไดโอด (c) เมื่ออนุกรมกับไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการต่อไดโอดขนาน และอนุกรมอุปกรณ์สวิทซ์

ต่อมาได้มีการพัฒนาวงจรพื้นฐาน โดยนำไดโอดมาต่อขนาน หรือต่ออนุกรมกับ อุปกรณ์สวิทซ์ ดังรูปภาพที่ 4.4 สำหรับในกรณีต่อขนานนั้น จะเห็นว่าเป็นอุปกรณ์สวิทซ์ 2 ทาง เมื่อ  $v_s$  ลดลงเป็นศูนย์(ความจริงแล้วมีค่าเท่ากับ  $-0.7$  โวลต์) และ มีความชันเป็นลบ(ที่สภาวะ optimum ค่าความชันจะเป็นศูนย์) อุปกรณ์สวิทซ์จะปิดเองโดยอัตโนมัติ พิจารณาจากรูปภาพที่ 4.3(b) ไดโอดจะเป็นตัวเร่งเวลาในการปิดของอุปกรณ์สวิทซ์ ซึ่งก็ขึ้นกับค่าของ gate to source voltage หรือ base to emitter และ เนื่องด้วยอุปกรณ์สวิทซ์ จะปิดที่  $v_s = 0$  เป็นผลให้ turn on switching loss เป็นศูนย์ จะเห็นว่าวงจรดังกล่าวยังคงให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง รวมทั้งยังสามารถที่จะทำงานที่  $0 \leq R \leq R_{opt}$  และ นอกไปจากนี้ถ้าหาก  $R < R_{opt}$  แล้ว ยังสามารถปรับความถี่ และ ขนาดความกว้างของสัญญาณความถี่ได้ในช่วงที่กำหนดอีกด้วย

$$D_{min} \leq D_t \leq D \quad (4.1)$$

ส่วนการต่อไดโอดอนุกรมนั้นจากรูปภาพที่ 4 จะเห็นว่าเป็นอุปกรณ์สวิทซ์ ทางเดียว  $v_s$  สามารถเป็นได้ทั้งซิกดบ และบวก และ สวิทซ์จะปิดเองอัตโนมัติ เมื่อ  $v_s$  เป็นศูนย์ และค่าความชันมีค่าเป็นบวก เนื่องจากที่อุปกรณ์สวิทซ์จะปิดที่  $v_s$  เท่ากับศูนย์ เป็นผลให้ turn on switching loss เป็นศูนย์ ด้วยเช่นกัน จะเห็นว่าวงจรดังกล่าวยังคงให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง รวมทั้งยังสามารถที่จะทำงานที่  $0 \leq R \leq R_{opt}$  และ นอกไปจากนี้ถ้าหาก  $R < R_{opt}$  แล้ว ยังสามารถปรับช่วงความถี่ และ ขนาดความกว้างของสัญญาณความถี่ได้ในช่วงที่กำหนดอีกด้วย

$$D \leq D_t \leq D_{max} \quad (4.2)$$

แต่วงจรที่มี ไดโอดต่ออนุกรมอยู่นี้ค่อนข้างที่จะเสียในจุดที่จะมีกระแสไหลเข้าไป ประจุในตัวเก็บประจุที่แฝงอยู่ที่ทางออกของทรานซิสเตอร์ (transistor output capacitance) โดยการไหลผ่านไดโอด ซึ่งจะมีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแฝงนี้เท่ากับ  $V_{SM}$  และ จะคงค่านี้ไว้ตลอด จนกว่าสามารถคายประจุได้ เมื่อทรานซิสเตอร์ turn on เป็นผลให้เกิดความสูญเสีย ตามสูตร

$$P_D = f \cdot C_{OUT} \cdot V_{SM} / 2 \quad (4.3)$$

จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำค่าความถี่  $P_D$  อาจจะมีค่าน้อย แต่ที่ความถี่สูงค่าความสูญเสียจะมากขึ้นตามลำดับ จะสังเกตได้ว่ากฎเกณฑ์สำคัญที่ทำให้วงจรยังคงมีประสิทธิภาพสูงอยู่คือ การปิดเปิดของอุปกรณ์สวิตซิ่ง ในขณะที่แรงดันตกคร่อมจะเท่ากับศูนย์ (zero voltage switching) สำหรับการทำงานในช่วงภาระเป็น  $0 < R < R_{opt}$  เมื่ออุปกรณ์สวิตซิ่งทำงานแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ความชันของแรงดันเป็นลบ และ ค่ากระแสที่ไหลผ่านมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลบ ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะเรียกว่า "suboptimum Class E operation" แต่ในกรณีที่ค่า  $R > R_{opt}$  จะเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อมอยู่จะไม่เท่ากับศูนย์ในขณะที่อุปกรณ์สวิตซิ่งปิดวงจร ทำให้เกิดค่าความสูญเสีย  $P_D = f \cdot C_{OUT} \cdot V_{SM} / 2$  และ จะเกิดกระแสกระชากที่ตัวทรานซิสเตอร์ที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

## 4.2 การวิเคราะห์วงจรพื้นฐานวงจรขยาย Class E Resonant Inverter

### 4.2.1 สมมุติฐานในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์การทำงานวงจรขยาย Class E ZVS inverter ต้องอยู่ในสมมุติฐานต่อไปนี้

1. อุปกรณ์สวิตซิ่ง และไดโอด ต้องเป็นอุปกรณ์ในอุดมคติ กล่าวคือ ค่าความต้านในอุปกรณ์สวิตซิ่งเป็นศูนย์ในขณะที่ปิดวงจร และมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ เมื่อเปิดวงจร รวมถึงเวลาหน่วงในการเปิด-ปิดมีค่าเป็นศูนย์
2. ตัวกรองกระแส  $L_1$  ซึ่งทำหน้าที่เป็น โช๊คต้องมีค่ามากพอที่จะจ่ายกระแสตรงให้กับวงจร
3. ค่า  $Q$  ของวงจรต้องมีค่ามากพอ ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวถ่วงจะมีรูปคลื่นเป็นไซน์

### 4.2.2 ลักษณะรูปคลื่นกระแส และแรงดัน

ให้กระแสที่ไหลผ่านวงจร load network ซึ่งเป็นวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม โดยที่รูปคลื่นเป็นไซน์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_o = I_m \sin(\omega.t + \phi) \quad (4.4)$$

โดยที่  $I_m$  เป็นขนาดรูปคลื่นค่ากระแส และ  $\phi$  เป็นค่าเฟสเริ่มต้นของกระแส จากรูปที่ 4.2

$$i_s + i_{c1} = I_1 - i_o = I_1 - I_m \sin(\omega.t + \phi) \quad (4.5)$$

สำหรับช่วงเวลาระหว่าง  $0 < \omega.t < 2.\pi.D$  ให้อุปกรณ์สวิตซิ่งปิดวงจร ดังนั้น  $i_{c1} = 0$  จะได้สมการของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซิ่งได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_s = \begin{cases} I_1 - I_m \sin(\omega.t + \phi) & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2.\pi.D \\ 0, & \text{for } 2.\pi.D < \omega.t \leq 2.\pi \end{cases} \quad (4.6)$$

สำหรับช่วงเวลา  $2.\pi.D < \omega.t \leq 2.\pi$  ให้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเปิดวงจร ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเป็นศูนย์  $i_s = 0$  ดังนั้นกระแสที่ทั้งหมดจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  แทน ดังที่ได้แสดงในสมการต่อไปนี้

$$i_{C_1} = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2.\pi.D \\ I_1 - I_m \sin(\omega.t + \phi) & \text{for } 2.\pi.D < \omega.t \leq 2.\pi \end{cases} \quad (4.7)$$

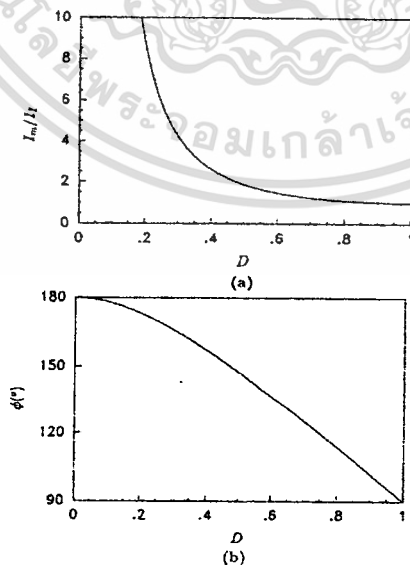
สามารถหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ได้จากสมการต่อไปนี้

$$v_s = \frac{1}{\omega.C_1} \int_{2.\pi.D}^{\omega.t} i_{C_1} d(\omega.t) = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2.\pi.D \\ \frac{1}{\omega.C_1} \{I_1(\omega.t - 2.\pi.D) + I_m [\cos(\omega.t + \phi) - \cos(2.\pi.D + \phi)]\}, & \text{for } 2.\pi.D < \omega.t \leq 2.\pi \end{cases} \quad (4.8)$$

จากข้อกำหนด  $v_s(2.\pi) = 0$  และแทนค่าดังกล่าวเข้าสู่สมการที่ 4.8 จะ ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_1$ ,  $I_m$ ,  $D$  และ  $\phi$  ได้ดังนี้

$$I_m = I_1 \frac{2.\pi(1-D)}{\cos(2.\pi.D + \phi) - \cos \phi} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ 4.9 สามารถนำมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_m/I_1$  เทียบ  $D$  ได้ดังรูปที่ 4.5(a)



รูปที่ 4.5 แสดงขนาดนอมอลไรท์ และเฟสของกระแส  $i_o$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $D$  โดย

(a)  $I_m/I_1$  เทียบกับ  $D$  (b)  $\phi$  เทียบกับ  $D$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ 4.9 ลงในสมการ 4.6 จะได้

$$\frac{i_s}{I_I} = \begin{cases} 1 - \frac{2\pi(1-D)\sin(\omega.t + \phi)}{\cos(2\pi.D + \phi) - \cos\phi} & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2\pi.D \\ 0, & \text{for } 2\pi.D < \omega.t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4.10)$$

แทนค่าสมการ 4.9 ลงในสมการ 4.7 จะได้

$$\frac{i_{C1}}{I_I} = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2\pi.D \\ 1 - \frac{2\pi(1-D)\sin(\omega.t + \phi)}{\cos(2\pi.D + \phi) - \cos\phi}, & \text{for } 2\pi.D < \omega.t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.9 และ 4.8 จะได้

$$v_s = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2\pi.D \\ \frac{I_I}{\omega.C_1} \left\{ \omega.t - 2\pi.D + \frac{2\pi(1-D)[\cos(\omega.t + \phi) - \cos(2\pi.D + \phi)]}{\cos(2\pi.D + \phi) - \cos\phi} \right\}, & \text{for } 2\pi.D < \omega.t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4.12)$$

จากข้อกำหนด  $dv_s/d(\omega.t) = 0$  ที่  $\omega.t = 2\pi$  จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง เฟส  $\phi$  และความกว้างของควมถี่  $D$  ได้เป็น

$$\tan\phi = \frac{\cos 2\pi.D - 1}{2\pi(1-D) + \sin 2\pi.D} \quad (4.13)$$

จะได้

$$\phi = \pi + \arctan\left\{ \frac{\cos 2\pi.D - 1}{2\pi(1-D) + \sin 2\pi.D} \right\} \quad (4.14)$$

สามารถนำมาพลอตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เฟส  $\phi$  และความกว้างของควมถี่  $D$  ได้ดังรูป 4.5(b)

จากสมการที่ 4.12 สามารถหาแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงเฉลี่ยวงจรได้เป็น

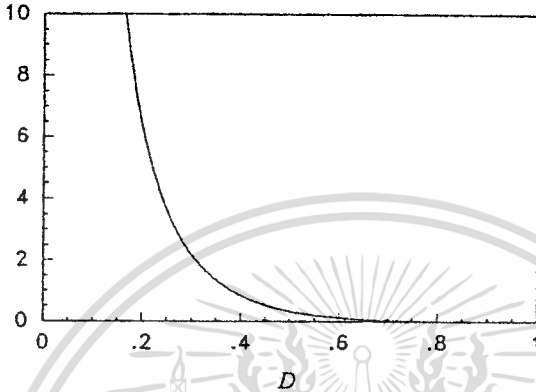
$$V_I = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi.D}^{2\pi} v_s d(\omega.t) = \frac{I_I}{\omega.C_1} \left\{ \frac{(1-D)[\pi(1-D)\cos\pi.D + \sin\pi.D]}{\tan(\pi.D + \phi)\sin\pi.D} \right\} \quad (4.15)$$

จัดสมการใหม่ จะได้ค่าความต้านทานด้านเข้าเป็น

$$R_{DC} = \frac{V_I}{I_I} = \frac{(1-D)[\pi(1-D)\cos\pi.D + \sin\pi.D]}{\omega.C_1 \tan(\pi.D + \phi)\sin\pi.D} \quad (4.16)$$

สามารถนำมาพลอตค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพลไรท์  $\omega.C_1.R_{DC}$  เทียบกับความกว้างของควมถี่  $D$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และค่าอิมพลไรท์ของแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ เทียบกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง จะได้ดังสมการที่ 4.17

$$\frac{v_s}{V_I} = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 < \omega.t \leq 2.\pi.D \\ \frac{\tan(\pi.D + \phi) \sin \pi.D}{(1-D)[\pi(1-D) \cos \pi.D + \sin \pi.D]} \{\omega.t - 2.\pi.D + \frac{2.\pi(1-D)}{\cos(2.\pi.D + \phi) - \cos \phi} [\cos(\omega.t + \phi) - \cos(2.\pi.D)]\} & \text{for } 2.\pi.D < \omega.t \leq 2.\pi \end{cases} \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.6 แสดงค่านอมอลไรท์ของค่าความต้านทานด้านเข้า  $\omega.C_1.R_{DC}$  ของวงจรขยาย Class E เทียบกับ  $D$

#### 4.2.3 ความทนกระแส และแรงดัน ที่มีผลต่ออุปกรณ์ (Voltage and Current Stresses)

เมื่อทำการหาค่าความชันในสมการที่ 4.10 จะได้ค่ากระแสยอดที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิทซึ่งได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega.t_{im} = \frac{3.\pi}{2} - \phi \quad (4.18)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 4.10 จะได้ค่านอมอลไรท์ของค่ายอดกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิทซึ่ง

$$\frac{I_{SM}}{I_I} = 1 - \frac{\pi(1-D)}{\sin \pi.D \sin(\pi.D + \phi)} \quad \text{for } \omega.t_{im} < 2.\pi.D \quad (4.19)$$

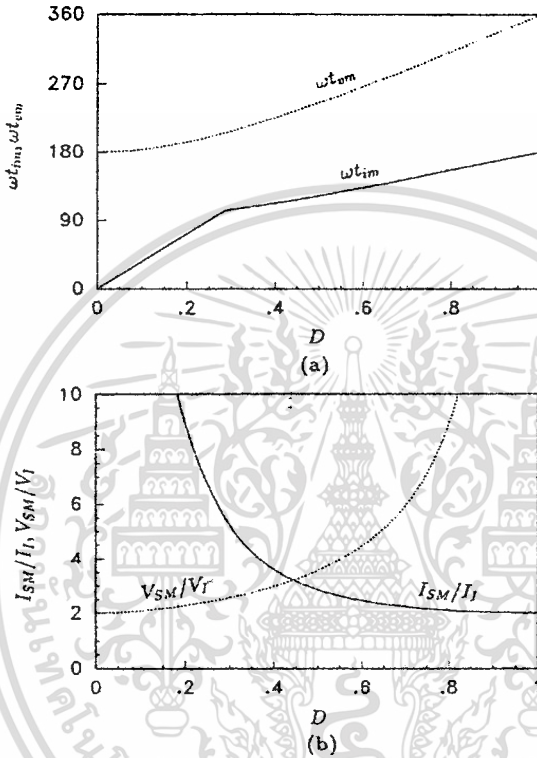
แต่อย่างไรก็ดี ที่ค่าความกว้างของความถี่มีค่า  $D$  ค่ายอดกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิทซึ่งจะเกิดที่  $\omega.t_{im} = 2.\pi.D$  ซึ่งจะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{I_{SM}}{I_I} = \frac{2.\pi(1-D) \sin(2.\pi.D + \phi)}{\cos \phi - \cos(2.\pi.D + \phi)} + 1 \quad \text{for } \omega.t_{im} = 2.\pi.D \quad (4.20)$$

เมื่อทำการหาค่าความชันในสมการที่ 13.13 จะได้ค่าแรงดันยอดที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิทซึ่ง ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega.t_{vm} = 2.\pi - \phi + \arcsin \left\{ \frac{\cos \phi - \cos(2.\pi.D + \phi)}{2.\pi(1-D)} \right\} \quad (4.21)$$

แทนค่าสมการที่ 4.21 ลงในสมการที่ 4.12 จะได้ค่าแรงดันขดที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตชิง ซึ่งสามารถนำมาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\omega \cdot t_{im}$ ,  $\omega \cdot t_{vm}$ ,  $\frac{I_{SM}}{I_I}$ ,  $\frac{V_{SM}}{V_I}$  เทียบกับ ความกว้างของความถี่  $D$  ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7



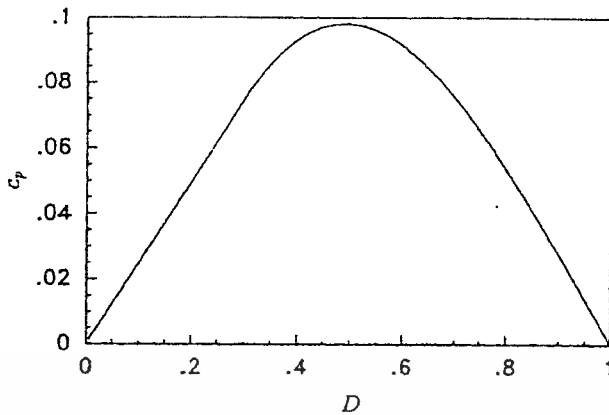
รูปที่ 4.7 แสดงแรงดันขด และกระแสขดของอุปกรณ์สวิตชิง (a)  $\omega \cdot t_{im}$  และ  $\omega \cdot t_{vm}$  เทียบกับ  $D$   
(b) ค่านอมอลไรท์ของกระแส  $I_{SM}/I_I$  และค่านอมอลไรท์ของแรงดัน  $V_{SM}/V_I$  เทียบกับ  $D$

และในกรณีที่ไม่พิจารณาความสูญเสียที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ค่ากำลังออกที่เป็นกระแสสลับ  $P_{Ri}$  มีค่าเท่ากับกำลังเข้าที่เป็นกระแสตรง  $P_i = V_I I_I$  จะสามารถหาค่า Power Output Capability ได้ดังสมการ

$$C_p \equiv \frac{P_{Ri}}{I_{SM} V_{SM}} = \frac{I_I V_I}{I_{SM} V_{SM}} \quad (4.22)$$

ซึ่งสามารถนำมาพลอตเป็นกราฟ ดังได้แสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่า Power Output Capability  $c_p$  เทียบกับ  $D$

### 4.3 สูตรสำเร็จในการออกแบบวงจรขยาย Class E

ในการออกแบบวงจรโดยปกติจะมีการกำหนดแหล่งจ่ายไฟตรง ( $V_{dd}$ ) ความถี่ในการเปิด-ปิดวงจรของอุปกรณ์สวิตซิ่ง ( $f$ ) และ เพาเวอร์เอ๊าท์พุท ( $P_o$ ) รวมถึงการกำหนดการทำงานของวงจรจะอยู่ในสถานะ optimum mode ซึ่งกำหนดค่า (duty cycle)  $D = 0.5$  และ สามารถเลือกค่า  $Q$  ตามตารางได้ ทั้งนี้หากเลือกค่า  $Q$  ที่สูงก็จะได้ค่าแรงดันใกล้เคียงรูปขายน้่มากขึ้น โดยค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร Class E สามารถหาได้จากสมการดังนี้ ให้พิจารณาจากตารางที่ 4.1 ประกอบการคำนวณ

Q	b	c	d	e	j	k
0	0.3587	0.2177		1.788	3.128	3.732
1	0.4008	0.2204	2.104	2.104	2.886	3.703
2	0.457	0.219	0.7124	2.85	2.761	3.662
3	0.4916	0.215	0.4166	3.75	2.759	3.636
5	0.5249	0.2067	0.2269	5.673	2.783	3.61
7	0.5401	0.2017	0.156	7.624	2.8	3.597
10	0.5514	0.1971	0.1062	10.62	2.816	3.587
20	0.5644	0.1909	0.0515	20.6	2.837	3.574
100	0.5744	0.1851	0.01	100.58	2.857	3.565

ตารางที่ 4.1 ตารางการออกแบบวงจรขยาย Class E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$R_{opt} = b.V^2_{DD} \quad (4.23)$$

$$C_1 = \frac{c}{w.R_{opt}} \quad (4.24)$$

$$C_2 = \frac{d}{w.R_{opt}} \quad (4.25)$$

$$L_1 = \frac{10}{w^2.C_1} \quad (4.26)$$

$$L_2 = \frac{e.R_{OPT}}{w} \quad (4.27)$$

$$I_{dc\max} = \frac{P_{dd}}{V_{dd}} \quad (4.28)$$

$$I_{s\max} = j.I_{dc\max} \quad (4.29)$$

$$V_{s\max} = k.V_{dd} \quad (4.30)$$

$$I_{o\max} = \sqrt{\frac{2.P_{dd}}{R_{opt}}} \quad (4.31)$$

$$V_{C2\max} = \frac{I_{o\max}}{\omega.C_2} \quad (4.32)$$

$$V_{L2\max} = \omega.L_2.I_{o\max} \quad (4.33)$$

#### 4.4 พื้นฐานวงจรเรโซแนนซ์

พื้นฐานวงจรเรโซแนนซ์ที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อช่วยในการจุดหลอดในสภาวะเริ่มต้น สามารถจัดแบ่งออกเป็น 3 วงจรหลัก ดังนี้

1. วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมกับภาระ(series-loaded resonant) SLR รูปที่ 4.9 (a)
2. วงจรเรโซแนนซ์ขนานกับภาระ(parallel-loaded resonant) PLR รูปที่ 4.9 (b)
3. วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานกับภาระ(series-parallel-loaded resonant) SPLR รูปที่ 4.9 (c)

ในตอนนี้จะพิจารณาการนำวงจรพื้นฐานเรโซแนนซ์แบบใดที่นำมาประยุกต์ใช้งานในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยการพิจารณาแรงดันเข้าเปรียบเทียบกับแรงดันออก ทั้งนี้เป็นการวิเคราะห์วงจร และการคำนวณต่างๆจะเป็นการประมาณการ รวมถึงสมมุติอุปกรณ์ทุกตัวที่ใช้มีคุณสมบัติในอุดมคติ และพิจารณาว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเป็นภาระที่เป็นตัวความต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อหลอดทำงานที่ความถี่ที่สูงมากพอ

จากรูปที่ 4.9(a) จะเป็นวงจรพื้นฐานเรโซแนนซ์อนุกรมกับภาระ(series-loaded resonant) SLR กล่าวคือ ภาระความต้านทานจะต่อในลักษณะอนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ทั้งนี้จะสามารถหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรนี้ได้เป็น

$$\left| \frac{\bar{V}_o(j\omega)}{\bar{V}_i(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_s^2 \left( \frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right)^2}} \quad (4.34)$$

$$\text{โดยที่ } \omega_s = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_s}} \quad (4.35)$$

$$\text{และ } Q_s = \frac{\omega_s \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_s \cdot C_s \cdot R} \quad (4.36)$$

ทั้งนี้จากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน จะสามารถนำมาพลอตกราฟได้เป็นดังรูป 4.10(a)

สำหรับวงจรพื้นฐานเรโซแนนซ์ขนานกับภาระ(parallel-loaded resonant) PLR นั้นตัวความต้านทานที่เป็นภาระจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ แล้วไปอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 4.5(b) สามารถหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรได้ดังต่อไปนี้

$$\left| \frac{\bar{V}_o(j\omega)}{\bar{V}_i(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \right)^2 + \left( \frac{\omega}{\omega_p \cdot Q_p} \right)^2}} \quad (4.37)$$

$$\text{โดยที่ } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_s}} \quad (4.38)$$

$$\text{และ } Q_p = \frac{R}{\omega_p \cdot L} = \omega_p \cdot C_p \cdot R \quad (4.39)$$

ทั้งนี้จากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน จะสามารถนำมาพลอตกราฟได้เป็นดังรูป 4.10(b)

ส่วนวงจรสุดท้ายเป็นวงจรพื้นฐานเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานกับภาระ(series-parallel-loaded resonant) SPLR จะเป็นวงจรที่มีการต่อทั้งการอนุกรม และขนานอยู่ในวงจรเดียวกัน โดยสามารถเห็นลักษณะในการต่อวงจรได้ ดังรูป 4.9(c) ทั้งนี้สามารถคำนวณหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันได้ดังนี้

$$\left| \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[ 1 + \frac{c_p}{c_s} - \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \right]^2 + Q_s^2 \left[ \frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right]^2}} \quad (4.40)$$

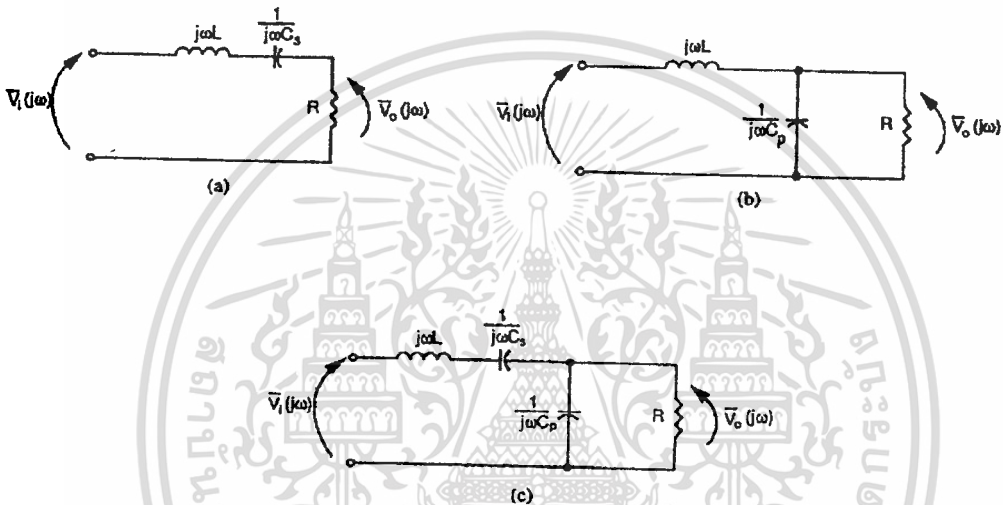
ทั้งนี้หาก  $C_s = C_p$  จะได้สมการใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left| \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(2 - \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2\right)^2 + Q_s^2 \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}} \quad (4.41)$$

โดยที่  $\omega_p$ ,  $\omega_s$  และ  $Q_s$  ได้กำหนดแล้วดังสมการข้างบน

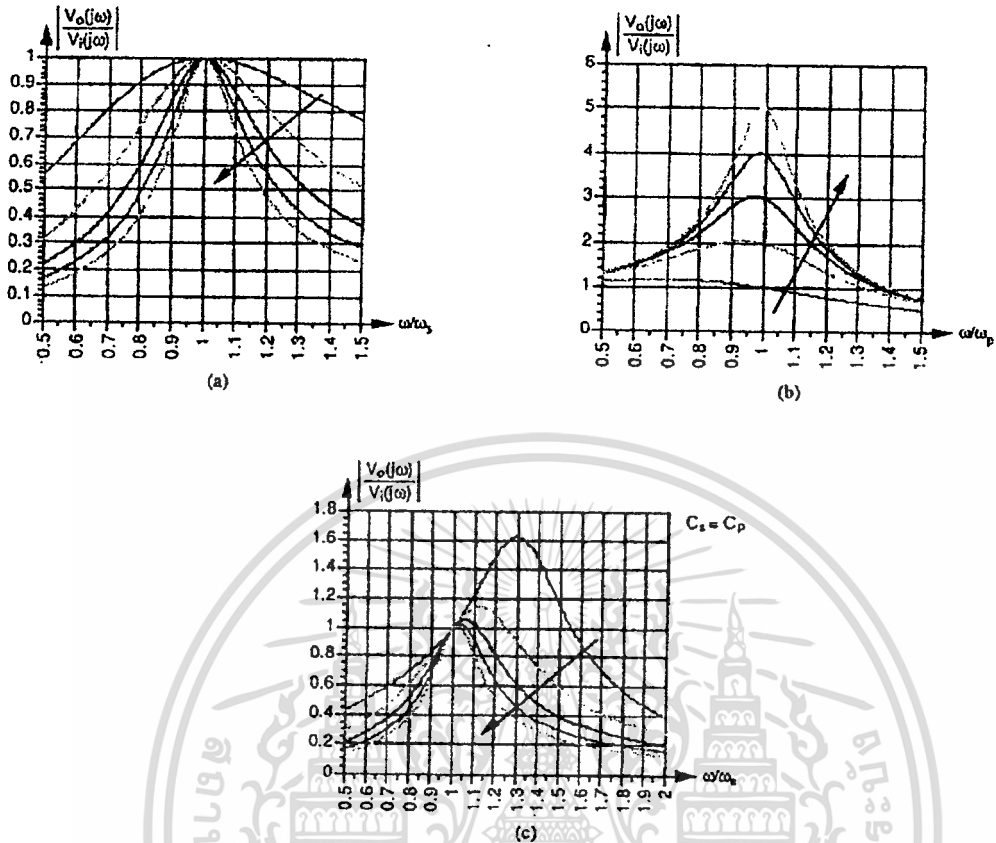
ทั้งนี้จากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน จะสามารถนำมาพลอตกราฟได้เป็นดังรูป 4.10(c)



รูปที่ 4.9 วงจรพื้นฐานเรโซแนนท์ (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน (c) แบบอนุกรม-ขนาน

จากรูปที่ 4.10 (a-c) จะแสดงให้เห็นว่าวงจรเรโซแนนท์ทุกแบบจะทำงานเป็นวงจรกรองความถี่ โดยที่ SPL และ SPLR จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบ band-pass filter ในขณะที่ PLR จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบ low-pass filter ถึงอย่างไรก็ตามจากการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น จะมีค่าความต้านทานที่สูงมากในขณะจุดหลอด และจะมีค่าความต้านทานที่ลดลง เมื่อหลอดทำงานอยู่ในสภาวะสมดุลเสถียรภาพ ดังนั้นวงจรที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการจุดหลอด และทำงานแทนบัลลาสต์แบบแม่เหล็ก จำเป็นต้องเป็นวงจรแปลงกระแสสลับที่การทำงานขึ้นอยู่กับภาระที่ต่ออยู่ (load dependent) กล่าวคือจะต้องสามารถให้แรงดันด้านออกที่สูงมากพอในขณะจุดหลอด และลดลงเมื่อหลอดทำงานในสภาวะปกติ ทั้งนี้เมื่อหลอดทำงานที่ความถี่สูงนั้นจะเสมือนว่าเป็นภาระที่เป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว ต่างจากการที่ทำงานที่ความถี่ต่ำที่เป็นภาระที่มีความต้านทานในหลายรูปแบบต่อรวมกันทั้งตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราขยาย เทียบกับความถี่ เรโซแนนซ์ โดยมีค่า  $Q = 1-5$  (a.)แบบอนุกรม (b.) แบบขนาน (c.)แบบอนุกรม-ขนาน

จากรูป 4.10(a) พอจะกล่าวได้ว่าวงจรพื้นฐาน SLR นั้นมีลักษณะที่เป็นวงจรแปลงกระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับภาระที่ต่ออยู่ (load dependent) ที่ความถี่ที่ต่ำกว่า หรือสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์  $\omega_0$  และสามารถปรับค่าแรงดันค่านอกได้ โดยการควบคุมความถี่ในการทำงานด้านเข้า นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าที่  $Q_s$  มีค่ามากนั้นวงจรสามารถให้แรงดันค่านอกในช่วงตั้งแต่ 0 จนกระทั่งถึงแรงดันด้านเข้า  $V_i$  ได้ โดยการปรับความถี่ด้านเข้าเพียงเล็กน้อยในช่วงแคบ แต่ในขณะที่มีค่า  $Q_s$  น้อย ( $Q_s \leq 1$ ) การปรับค่าแรงดันค่านอกต้องปรับแต่งความถี่ด้านเข้าในช่วงที่กว้างมากกว่า และคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการทำงานของวงจรนี้ คือค่า gain ที่ให้สูงสุดจะไม่เกิน 1 ซึ่งจะหมายความว่า การนำวงจร SLR มาประยุกต์ใช้เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์นั้น แรงดันค่านอกต้องมีค่ามากกว่าแรงดันที่ใช้ในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือมิเช่นนั้นอาจจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงปรับแรงดันให้สูงขึ้นมาช่วยในการจุดหลอด

จากรูป 4.10(b) แสดงให้เห็นว่าวงจรพื้นฐาน PLR ก็เป็นวงจรแปลงกระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับภาระที่ต่ออยู่ (load dependent) ณ.ความถี่เรโซแนนซ์  $\omega_p$  ซึ่งจะเห็นว่าค่า  $Q_p$  นั้นจะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

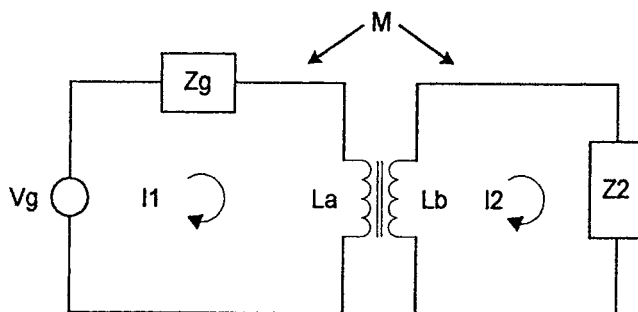
สัดส่วนโดยตรงกับค่าความต้านทานภาระ ดังนั้นจากคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้แรงดันด้านออกจะมีค่าสูงมากพอในการจุลโหลด เนื่องจากในสภาวะนี้ความต้านทานโหลดพูลออเรสเซนส์จะมีค่าสูงมาก หลังจากนั้นค่าแรงดันก็จะลดต่ำลง ซึ่งเป็นผลจากความต้านทานของโหลดจะมีค่าลดลงเมื่อโหลดเข้าสู่สภาวะทำงานปกติเสถียรภาพ ฉะนั้นสามารถนำวงจรนี้มาประยุกต์ใช้งาน โดยที่แรงดันด้านเข้ามีค่าแรงดันต่ำได้ ตัวอย่างแรงดันไฟกระแสตรงที่ได้จากการกรองไฟฟ้ากระแสสลับ 120 Vac

จากรูป 4.10(c) แสดงให้เห็นว่าวงจรพื้นฐาน SPLR ก็เป็นวงจรแปลงกระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับภาระที่ต่ออยู่(load dependent) ณ.ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์แต่ถึงอย่างไรก็ตามหากแรงดันด้านเข้ามีค่าแรงดันต่ำ ก็อาจทำให้แรงดันทางด้านออกมีไม่มากเพียงในการจุลโหลด ซึ่งอาจต้องพึ่งหม้อแปลงปรับแรงดันเข้าช่วยในการจุลโหลดพูลออเรสเซนส์

กล่าวโดยสรุปแล้วจะเห็นหากมีการนำวงจรพื้นฐานเรโซแนนท์มาประยุกต์เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีแรงดันด้านเข้าค่อนข้างต่ำแล้ววงจรเรโซแนนท์ขนานกับภาระ(parallel-loaded resonant) PLR จะเหมาะสมมากที่สุด ด้วยคุณสมบัติเด่นมากมายของวงจรพื้นฐาน

#### 4.5 การสะท้อนของค่าอิมพีแดนซ์(Reflected Impedance)

จากวงจรพื้นฐาน Class E นั้นการที่วงจรจะทำงานในสภาวะเหมาะสมนั้นค่าของภาระต้องเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายไฟ และกำลังด้านออกเท่านั้น ดังนั้นในการประยุกต์ใช้กับโหลดพูลออเรสเซนส์อาจไม่เหมาะสมกับวงจรที่ทำงานในสภาวะเหมาะสม จึงจำเป็นต้องทำการสะท้อนค่าความต้านทานโหลดผ่านหม้อแปลงให้เป็นความต้านทานที่เหมาะสมกับวงจร นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงวงจรเรโซแนนท์ขนานกับโหลดที่จะช่วยในการจุลโหลดในสภาวะเริ่มต้น ซึ่งส่วนที่กล่าวต่อไปจะเป็นพิสัยงานและการคำนวณ เพื่อสามารถออกแบบวงจรโดยรวมได้



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.11 ให้วงจรนี้แหล่งจ่ายไฟเป็น  $V_s$  และมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่อีกด้านหนึ่งของหม้อแปลง มีค่า  $Z_2$  จากการพิจารณาโดยใช้ KVL ทางด้านเข้าของหม้อแปลงจะได้

$$V_1 = SL_a \cdot I_1 - SM \cdot I_2 \quad (4.42)$$

$$0 = -SM \cdot I_1 + (Z_2 + SL_b) \cdot I_2 \quad (4.43)$$

แก้สมการ โดยการตัด  $I_2$  จากสมการ จะได้

$$V_1 = \left[ SL_a - \frac{S^2 M^2}{Z_2 + SL_b} \right] \cdot I_1 \quad (4.44)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = SL_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b} \quad (4.45)$$

$$= SL_1 + Z_R$$

โดยที่

$$Z_R = \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b} \quad (4.46)$$

จาก  $S = j\omega$

$$S^2 = j^2 \omega^2 = -\omega^2 ; \text{ โดยที่ } j^2 = -1$$

ดังนั้นจะสามารถแปลงวงจรในรูป 4.11 ใหม่ได้ โดยมองค่าอิมพีแดนซ์ที่ด้านออกทางด้านเข้าของหม้อแปลงได้เป็นดังรูปที่ 4.12

จากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายทอด (coefficient of coupling)

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_a \cdot L_b}} \quad (4.47)$$

ในกรณีที่เป็น unit coupling จะได้  $k = 1$  จะได้

$$M = \sqrt{L_a \cdot L_b} \quad (4.48)$$

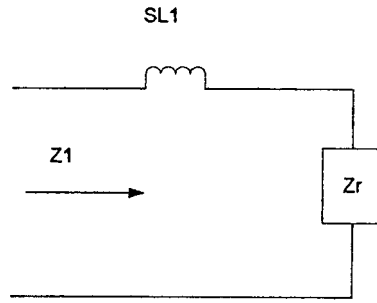
จากวงจร Parallel Resonant จะได้ข้อสรุป

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_p}} \quad (4.50)$$

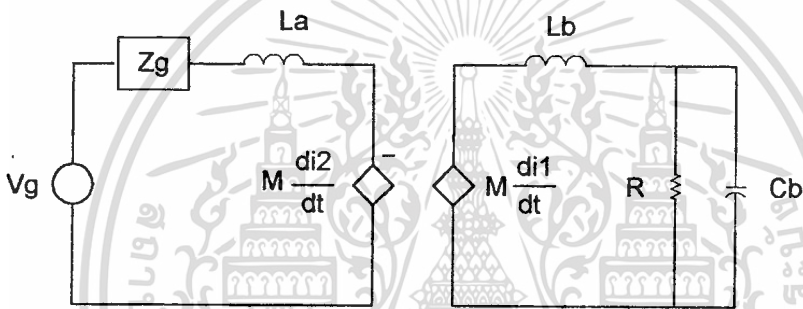
$$Q_p = \frac{R}{\omega_p \cdot L} = \omega_p \cdot C_p \cdot R \quad (4.51)$$

$$\omega_p^2 \cdot C_p \cdot L = 1 \quad (4.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลของภาวะ เมื่อมองจากด้านเข้าของหม้อแปลง



รูปที่ 4.13 เมื่อภาวะมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ด้านออกของหม้อแปลง

ในกรณีนี้  $Z_2$  เป็นการนำตัวเก็บประจุต่อขนานภาวะเราจะได้ภาพดังรูปที่ 4.13

จะได้ 
$$Z_2 = \frac{R}{SC.R+1} \quad (4.53)$$

จาก 
$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = SL_a + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b} \quad (4.54)$$

จะได้ 
$$\begin{aligned} Z_R &= \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b} & (4.55) \\ &= \frac{\omega^2 \cdot M^2}{\frac{R}{SC.R+1} + SL_b} \\ &= \frac{\omega^2 \cdot M^2}{\frac{R}{SC.R+1} + \frac{SL_b \cdot (SC.R+1)}{SC.R+1}} \\ &= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC.R+1)}{R + SL_b \cdot (SC.R+1)} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC \cdot R + 1)}{SL_b + (R - \omega^2 \cdot C \cdot L_b \cdot R)}$$

จาก  $\omega_p^2 \cdot C_p \cdot L = 1$  จะได้

$$\begin{aligned} &= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC \cdot R + 1)}{SL_b + (R - R)} \\ &= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC \cdot R + 1)}{SL_b} \end{aligned}$$

จาก  $M = \sqrt{L_a \cdot L_b}$  จะได้

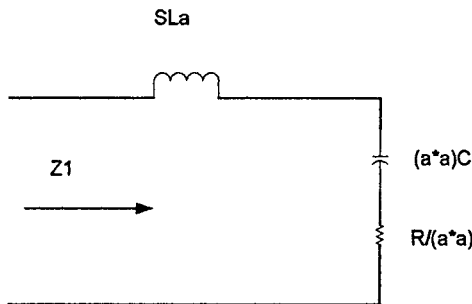
$$\begin{aligned} &= \frac{\omega^2 \cdot L_a \cdot L_b \cdot (SC \cdot R + 1)}{SL_b} \\ &= \frac{\omega^2 \cdot L_a \cdot L_b \cdot SC \cdot R}{SL_b} + \frac{\omega^2 \cdot L_a \cdot L_b}{SL_b} \\ &= \omega^2 \cdot L_a \cdot C \cdot R + \frac{\omega^2 \cdot L_a}{S} \end{aligned}$$

$$\text{จาก } \frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{a}\right)^2 \text{ จะได้}$$

$$\begin{aligned} &= \omega^2 \cdot \frac{L_b}{a^2} \cdot C \cdot R + \frac{\omega^2 \cdot L_b}{S \cdot a^2} \\ &= \frac{R}{a^2} + \frac{\omega^2 \cdot L_b \cdot C}{S \cdot a^2 \cdot C} \\ Z_R &= \frac{R}{a^2} + \frac{1}{S \cdot a^2 \cdot C} \end{aligned} \quad (4.56)$$

จะสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} Z_1 &= SL_a + Z_R \\ &= SL_a + \frac{R}{a^2} + \frac{1}{S \cdot a^2 \cdot C} \end{aligned} \quad (4.57)$$

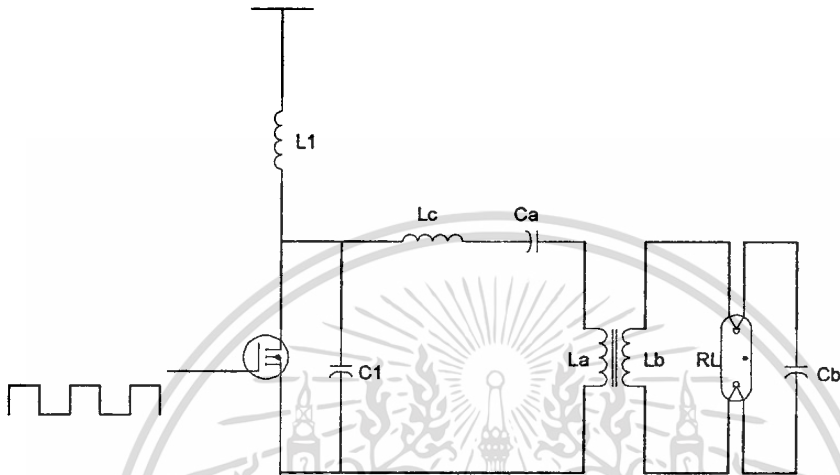


รูปที่ 4.14 วงจรสมมูลเมื่อมีค่าตัวเก็บประจุต่อขนานกับภาระเมื่อมองมาจากทางด้านเข้า

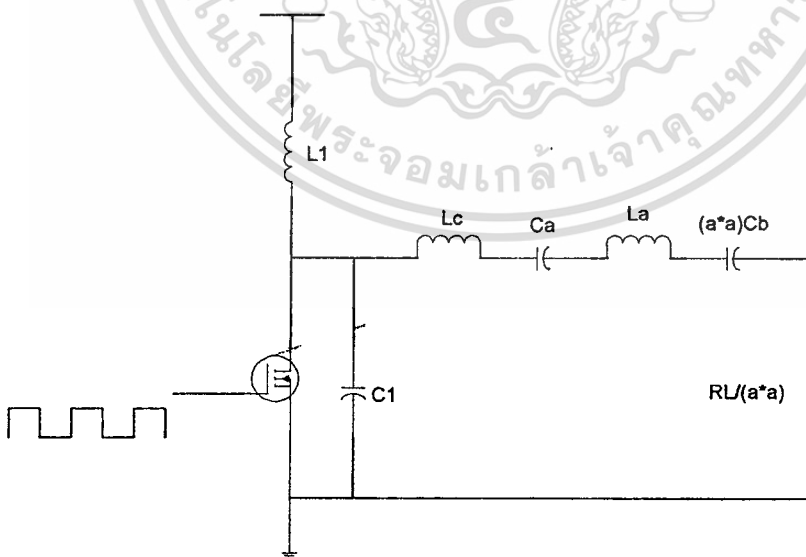
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นั่นหมายถึงสามารถแปลงค่าความต้านทานที่ขนานกับตัวเก็บประจุที่ด้านออกของหม้อแปลงดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อมองค่าเป็นอิมพีแดนซ์จากทางด้านเข้าของหม้อแปลงได้ตามสมการที่ 4.57 หรือแปลงเป็นรูปที่ 4.14

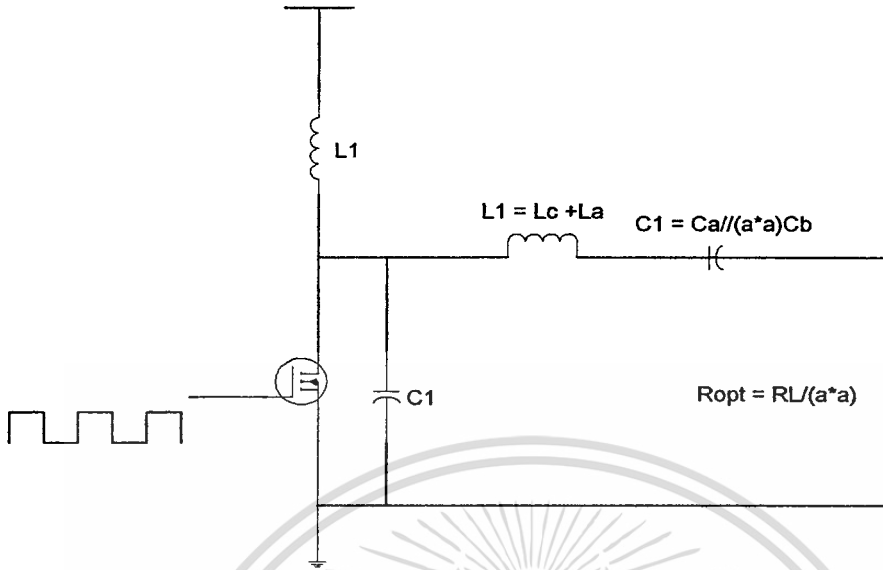


รูปที่ 4.15 วงจรที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.16 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงวงจรสมมูลของวงจรบัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 4.15

ดังนั้นจากรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นวงจรที่ออกแบบโดยการประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E สำหรับบัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์ สามารถแปลงการวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ

#### 4.6 การออกแบบวงจรบัลลาสต์อเล็กทรอนิกส์ที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E

การออกแบบโดยการใช้โปรแกรม Excel เข้าช่วย โดยมีหลักการขั้นตอนดังนี้

1. กำหนด ขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ
2. กำหนดความถี่ใช้งาน
3. กำหนด กำลังไฟออก และค่ากระแสผ่านโหลด ซึ่งก็จะได้ค่าความต้านทานโหลด
4. จะได้ค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสม  $L_1, L_2, C_1, C_2$  และ  $R_{opt}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากตาราง 4.1

5. หาค่าเรโซของหม้อแปลง ซึ่งได้จากค่าความต้านทานโหลด เทียบกับ  $R_{opt}$  ;  $a = \sqrt{\frac{R_l}{R_{opt}}}$

6. หาค่า  $C_b$  ได้จาก  $C_b = \frac{Q_p}{w \cdot R_l}$

7. หาค่า  $L_b$  ได้จาก  $L_b = \frac{R_l}{w \cdot Q_p}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หาค่า  $L_a$  ได้จากค่า  $L_a = \frac{L_b}{a^2}$

9. หาค่า  $L_c$  ได้จาก  $L_c = L_2 - L_a$

10. หาค่า  $C_a$  ได้จาก  $C_a = \frac{a^2 \cdot C_2 \cdot C_b}{a^2 \cdot C_b - C_2}$

#### 4.7 โปรแกรมออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E

ต่อไปจะเป็นโปรแกรมสำเร็จที่ช่วยในการออกแบบ เพียงกำหนดแหล่งจ่ายไฟขนาด 24 โวลต์ และกำลังไฟออก 18 วัตต์ ประสิทธิภาพ 90% ให้ค่ากระแสไหลผ่านหลอดเป็น 220 มิลลิแอมป์ และใช้ความถี่ในการสวิตชิงเป็น 100 kHz ทั้งนี้เพียงแค่เติมรายละเอียดดังกล่าวในช่องที่มีกรอบสี่เหลี่ยมล้อมไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การออกแบบวงจรขยายคลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

***A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design***

**ข้อกำหนด**

1	POWER OUT	Po	<input type="text" value="18.00"/>	Watt
2	LOAD RESISTANCE		371.90	Ohm
3	VOLTAGE SUPPLY		<input type="text" value="24.00"/>	Vdc
4	EFFIENCY	n	<input type="text" value="90%"/>	
5	FLUORESCENT LAMP	TYPE	18	Watt
	VOLTAGE RATED		81.82	Vrms
	LAMP CURRENT RATED		<input type="text" value="0.22"/>	Amp
	LAMP RESISTANCE		372	Ohm
	or if define power out'so lamp res is		372	Ohm
	;power output define as		18.00	Watt
6	Q factor	10 เท่ากับ คุณสามารถเลือกค่าได้ดังนี้	1, 2, 3, 5, 7, 10, 20 or 100	
7	Switching Frequency		<input type="text" value="100,000"/>	Hz
	หรือ $W=2\pi f$		628,571	
8	Resonant Frequency		94,218	Hz
10	Qp=		<input type="text" value="1"/>	

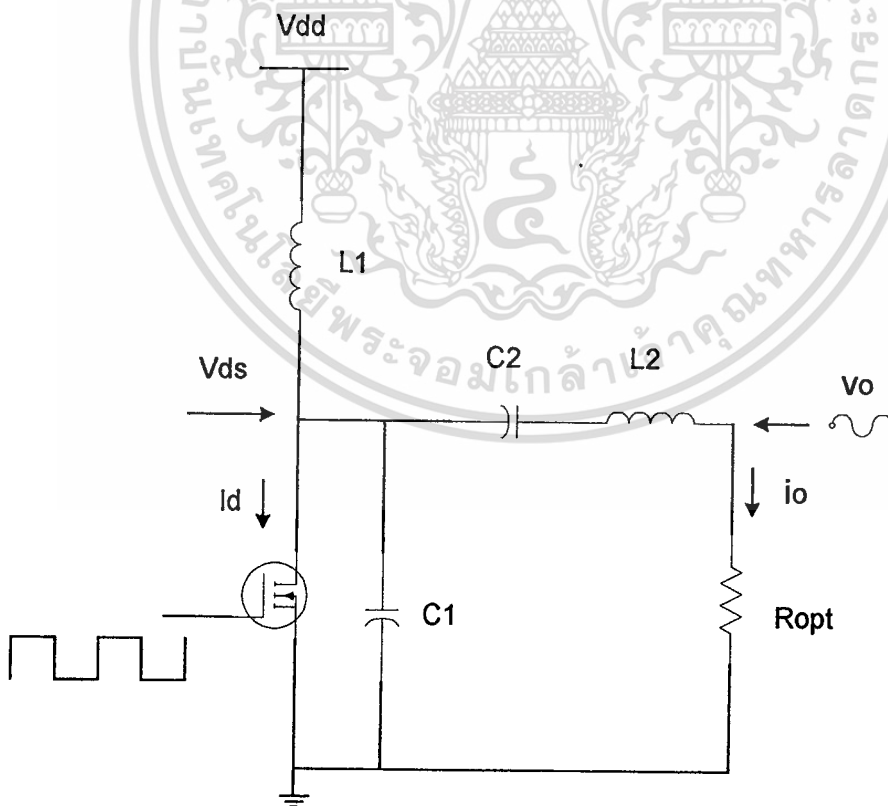
หมายเหตุ : ให้เติมข้อกำหนดต่างๆในช่องกรอบสีแดงพื้นเหลือง

## การออกแบบวงจรขยายคลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

### A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design

ค่าอุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้ในวงจร class E

L1	=	1.28E-03 Henry						
L1min	=	5.56E-04 Henry	Idc max	=	0.83 Ap			
L2	=	2.68E-04 Henry	Ip(L-C)	=	1.59 Ap	VL2 max	=	267.66 Vp
C1	=	1.97E-08 Farad				VC1 max	=	86.09 Vp
C2	=	1.06E-08 Farad	Ip(L-C)	=	1.59 Ap	VC2 max	=	237.32 Vp
Ropt	=	15.88 Ohm						
Pdd	=	20.00 Watt						
SW			Is max	=	2.35 Ap	Vs max	=	86.09 Vp



โปรแกรมช่วยการออกแบบ

Ballast class E 1.xls

Class E Value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การออกแบบวงจรขยายคลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**  
***A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design***

**การคำนวณหาค่าอุปกรณ์วงจรขยาย Class E**

**1 หาค่า Power input in DC**

$$P_{dd} = 20.00 \text{ Watt}$$

จากสูตร  $P_{dd} = P_o / \eta$

โดยที่  $P_o = 18.00 \text{ Watt}$

$\eta = 90\%$

**2 หาค่า Optimun Resistance**

$$R_{opt} = 15.88 \text{ Ohm}$$

จากสูตร  $R_{opt} = (b \cdot V_{dd} \cdot V_{dd}) / P_{dd}$

โดยที่  $b = 0.5514$  จากตาราง Class E Table Design

$V_{dd} = 24 \text{ Vdc}$

$P_{dd} = 20.00 \text{ Watt}$

**3 หาค่า C1**

$$C1 = 1.97E-08 \text{ Farad}$$

จากสูตร  $C1 = c / (W \cdot R_{opt})$

โดยที่  $c = 0.1971$  จากตาราง Class E Table Design

$W = 628,571$

$R_{opt} = 16 \text{ Ohm}$

**4 หาค่า C2**

$$C2 = 1.06E-08 \text{ Farad}$$

จากสูตร  $C2 = d / (W \cdot R_{opt})$

โดยที่  $d = 0.1062$  จากตาราง Class E Table Design

$W = 628,571$

$R_{opt} = 16 \text{ Ohm}$

**โปรแกรมช่วยการออกแบบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่สู่สาธารณะ **Calculate Class E Value** การคำนวณค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 หาค่า L2

L2 = 2.68E-04 Henry

จากสูตร  $L = (e \cdot R_{opt}) / W$

โดยที่  $e = 10.62$  จากตาราง Class E Table Design

$W = 628,571$

$R_{opt} = 16 \text{ Ohm}$

6 หาค่า L1min

L1min = 5.56E-04 Henry

จากสูตร  $L1min = (3.5 \cdot R_{opt}) / f$

โดยที่  $R_{opt} = 15.88$

$f = 100,000$

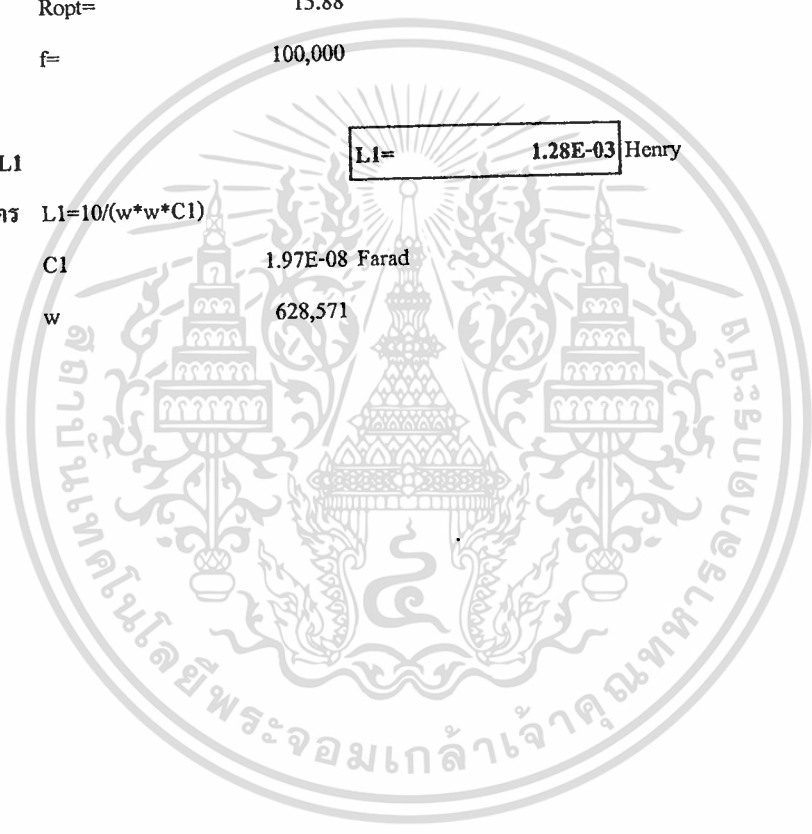
7 หาค่า L1

L1 = 1.28E-03 Henry

จากสูตร  $L1 = 10 / (w \cdot w \cdot C1)$

โดยที่  $C1 = 1.97E-08 \text{ Farad}$

$w = 628,571$



**การออกแบบวงจรขยายคลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

***A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design***

**ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความทนของอุปกรณ์วงจร Class E**

**1 DC input current maximum**

$$I_{dcmax} = 0.83 A_p$$

จากสูตร  $I_{dcmax} = P_{dd}/V_{dd}$

โดยที่  $P_{dd} = 20.00 \text{ Watt}$

$V_{dd} = 24 \text{ Vdc}$

**2 Peak current at switch device**

$$I_{smax} = 2.35 A_p$$

จากสูตร  $I_{smax} = j * I_{dcmax}$

โดยที่  $j = 2.816$

จากตาราง Class E Table Design

$I_{dcmax} = 0.83 A_p$

**3 Peak voltage at switch device**

$$V_{smax} = 86.09 V_p$$

จากสูตร  $V_{smax} = k * V_{dd}$

โดยที่  $k = 3.587$

จากตาราง Class E Table Design

$V_{dd} = 24 \text{ Vdc}$

**4 Current through L-C circuit**

$$I_p(L-C) = 1.59 A_p$$

จากสูตร  $I_p(L-C) = \sqrt{2 * P_{dd} / R_{opt}}$

โดยที่  $P_{dd} = 20.00 \text{ Watt}$

$R_{opt} = 16 \text{ Ohm}$

**5 Peak voltage across C2**

$$V_{C2max} = 237.32 V_p$$

จากสูตร  $V_{C2max} = I_m / (W * C_2)$

โดยที่  $I_m = 1.59 A_p$

$W = 628,571$

$C_2 = 1.06E-08 \text{ Farad}$



## 6 Peak voltage across L2

$$VL2max = 267.66 \text{ Vp}$$

จากสูตร  $VL2max=W*L2*Im$

โดยที่  $Im= 1.59 \text{ Ap}$

$W= 628,571$

$L2= 2.68E-04 \text{ Henry}$

## 7 Peak Voltage pass though Lc

$$Vp(Lc)= 242.46 \text{ Vp}$$

จากสูตร  $Vp(Lc)=W*Lc*Im$

โดยที่  $Im= 1.59 \text{ Ap}$

$W= 628,571$

$Lc= 2.43E-04 \text{ Henry}$

## 8 Peak voltage across Ca

$$Vp(Ca)= 212.12 \text{ Vp}$$

จากสูตร  $Vp(Ca)=Im/(W*Ca)$

โดยที่  $Im= 1.59 \text{ Ap}$

$W= 628,571$

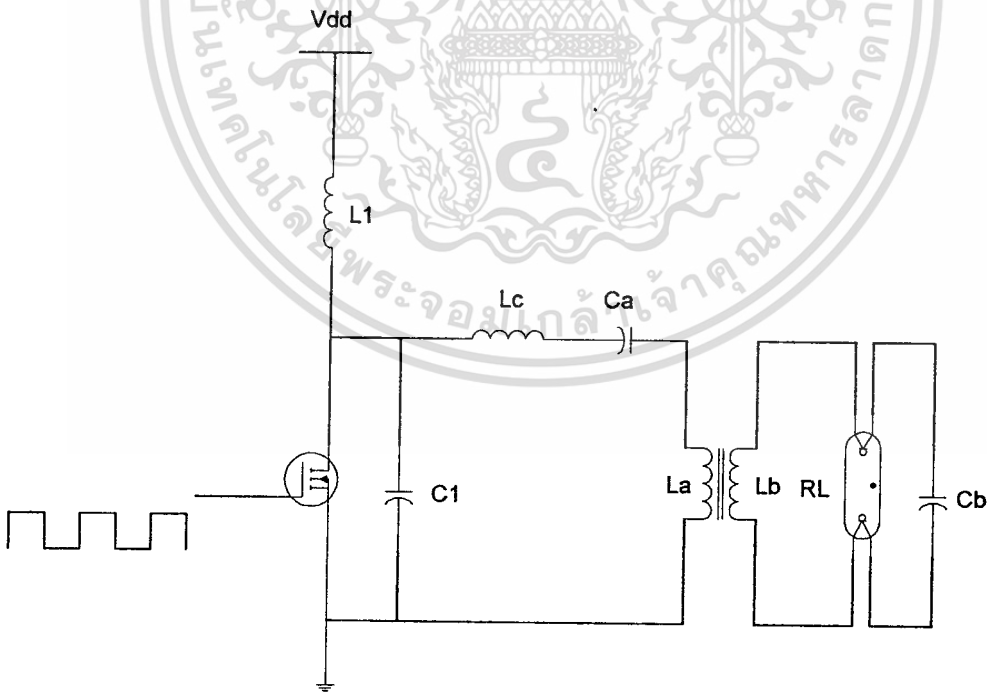
$Ca= 1.19E-08 \text{ Farad}$

**การออกแบบวงจรขดลวดฮี เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

***A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design***

**ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

L1	=	1.28E-03 Henry			
L1min	=	5.56E-04 Henry	Idc max =	0.83 Ap	
La	=	2.53E-05 Henry			
Lb	=	5.92E-04 Henry			
Lc	=	2.43E-04 Henry	Ip(Lc) =	1.59 Ap	Vp(Lc) = 242.46 Vp
C1	=	1.97E-08 Farad			Vp(C1) = 86.09 Vp
Cb	=	4.28E-09 Farad			
Ca	=	1.19E-08 Farad	Ip(Ca) =	1.59 Ap	Vp(Ca) = 212.12 Vp
a	=	4.84			



โปรแกรมช่วยการออกแบบ

Ballast class E 1.xls

Component of Electronic Ballast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การออกแบบวงจรขยายคลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

***A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design***

**ขั้นตอนการคำนวณหาค่าอุปกรณ์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

1 การหาค่า  $C_p = C_b$

$C_b = 4.28E-09$  Farad

จากสูตร  $C_b = Q_p / (W * R_L)$

โดยที่  $W = 628,571$

$R_L = 372$  Ohm

$Q_p = 1$

2 การหาค่า  $L_b$

$L_b = 5.92E-04$  Henry

จากสูตร  $L_b = R_L / (W * Q_p)$

โดยที่  $W = 628,571$

$R_L = 372$  Ohm

$Q_p = 1$

3 การหาค่า  $a$

$a = 4.84$

จากสูตร  $a = \sqrt{R_L / R_{opt}}$

โดยที่  $R_L = 372$  Ohm

$R_{opt} = 16$  Ohm

5 การหาค่า  $L_a$

$L_a = 2.53E-05$  Henry

จากสูตร  $L_a = L_b / (a * a)$

โดยที่  $L_b = 5.92E-04$  Henry

$a = 4.84$

4 การหาค่า  $L_c$

$L_c = 2.43E-04$  Henry

จากสูตร  $L_c = L_2 - L_a$

โดยที่  $L_2 = 2.68E-04$  Henry

$L_a = 2.53E-05$  Henry

## 5 กหาค่า Ca

$$Ca = 1.19E-08 \text{ Farad}$$

จากสูตร  $Ca = a * a * C2 * Cb / (a * a * Cb - C2)$

โดยที่  $C2 = 1.06E-08 \text{ Farad}$

$Cb = 4.28E-09 \text{ Farad}$

$a = 4.84$

## 6 ความถี่เรโซแนนท์

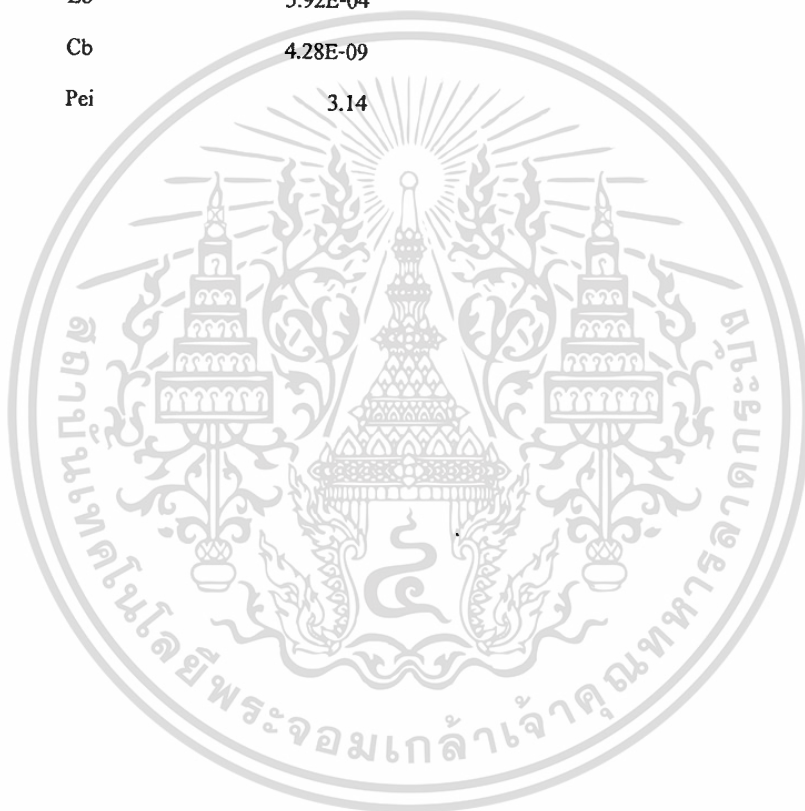
$$fp = 100,000 \text{ Hz}$$

จากสูตร  $fp = 1 / (2 * \pi * \sqrt{Lb * Cb})$

โดยที่  $Lb = 5.92E-04$

$Cb = 4.28E-09$

$Pei = 3.14$



โปรแกรมช่วยการออกแบบ

Ballast class E 1.xls

Calculate Electronic Ballast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การออกแบบวงจรขยายคลาส อี เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์**

***A Class E Resonant Inverter for Electronic Ballast Design***

**Class E Table Design**

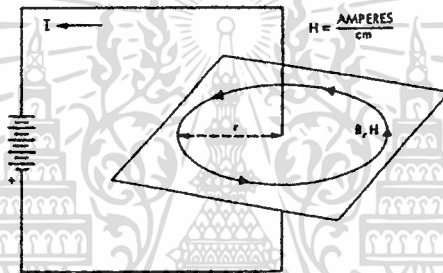
Q	b	c	d	e	j	k
0	0.3587	0.2177		1.788	3.128	3.732
1	0.4008	0.2204	2.104	2.104	2.886	3.703
2	0.457	0.219	0.7124	2.85	2.761	3.662
3	0.4916	0.215	0.4166	3.75	2.759	3.636
5	0.5249	0.2067	0.2269	5.673	2.783	3.61
7	0.5401	0.2017	0.156	7.624	2.8	3.597
10	0.5514	0.1971	0.1062	10.62	2.816	3.587
20	0.5644	0.1909	0.0515	20.6	2.837	3.574
100	0.5744	0.1851	0.01	100.58	2.857	3.565

## บทที่ 5

### การออกแบบหม้อแปลง และตัวเหนี่ยวนำ

#### 5.1 พื้นฐานของวงจรแม่เหล็ก

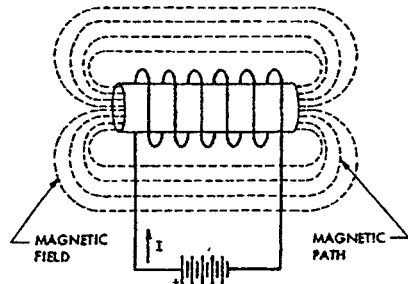
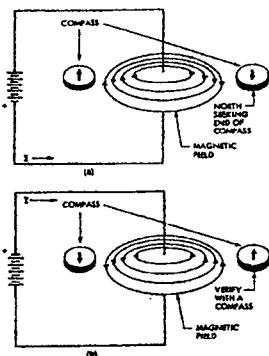
จากความรู้พื้นฐานที่ว่าเมื่อมีกระแสตรงไหลผ่านขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆตัวนำนั้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.1



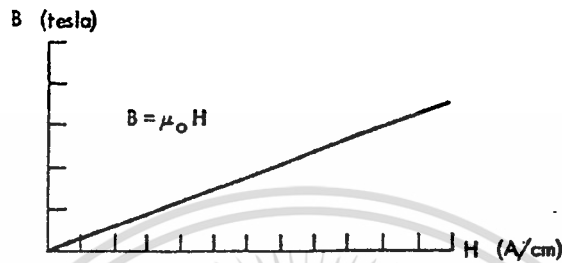
รูปที่ 5.1 สนามแม่เหล็กรอบขดลวด

และเมื่อนำขดลวดตัวนำนั้นมาพันรอบสารแม่เหล็ก จะเป็นผลให้สนามแม่เหล็กนั้นแรงขึ้น โดยมีขั้ว และเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามรูปที่ 5.3 ทั้งนี้สามารถทำการกลับขั้วแม่เหล็กและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กได้ด้วยการกลับทิศทางกระแส หรือกลับขั้วแหล่งจ่ายไฟ โดยจะมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า(magnetomotive force) ซึ่งเป็นขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากผลคูณระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับจำนวนรอบที่ขดลวดพัน

$$\text{mmf}(F) = NI \quad (5.1)$$

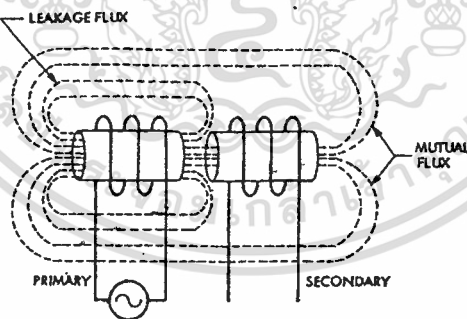


สำหรับรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยอัตราส่วนดังกล่าวจะได้ค่าคงที่ ที่เรียกว่า ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของตัวกลางที่ให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน  $\mu_0$



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B H

จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบอย่างง่ายของหม้อแปลงที่มีเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมต่อถึงระหว่างคอล์ยอากาศสองอัน โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่อเชื่อมร่วมกันหรือที่เรียกว่า mutual flux เป็นตัวการให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ปลายขดลวดทั้งสอง สำหรับเส้นแรงแม่เหล็กที่ไม่คล้อยอยู่ในคอล์ยอากาศทั้งสองจะเรียกว่า leakage flux



รูปที่ 5.5 แสดงพื้นฐานอย่างง่ายในการเกิดหม้อแปลง

โดยส่วนใหญ่วัสดุทั่วไปที่มีคุณภาพในแง่การเป็นสารแม่เหล็กไม่ดีนักจะมีความซึมซาบแม่เหล็กต่ำ ตัวอย่างเช่น ศูนย์อากาศจะมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับสารแม่เหล็กที่มีคุณภาพดีและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ดังตัวอย่างเช่น เหล็ก, นิกเกิล, และ โคบอล ที่จะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของคอล์ยอากาศสามารถกระทำได้โดยการให้ขดลวดคล้อยอยู่กับสารแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ชนิดของสารแม่เหล็ก

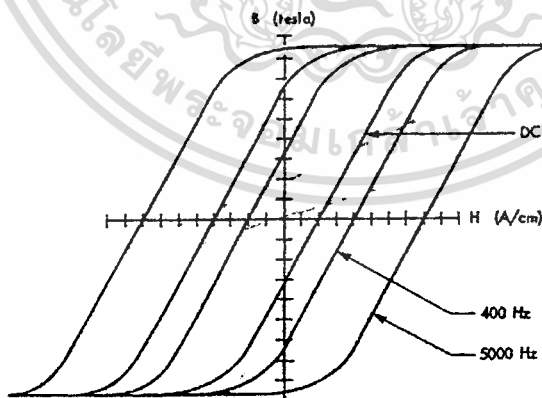
มีสารแม่เหล็กหลายชนิดที่มีการนำมาใช้ในการผลิต และจำหน่ายในท้องตลาดที่ให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดไม่เท่ากัน ให้ค่าความสูญเสีย น้ำหนัก ที่ต่างไม่เท่ากัน รวมไปถึงการตอบสนองช่วงความถี่ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการพิจารณาออกแบบต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ และต้องสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป ตัวอย่างของชนิดของสารแม่เหล็ก และแสดงถึงคุณสมบัติ dc B-H loops การตอบสนองความถี่สามารถศึกษาเพิ่มเติมในภาคผนวก

## 5.3 การสูญเสียภายในแกนสารแม่เหล็ก

โดยทั่วไปพลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปพลังงานความร้อน ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งค่าพลังงานสูญเสียออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ได้ดังนี้

### 5.3.1 core loss ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความสูญเสียดังนี้

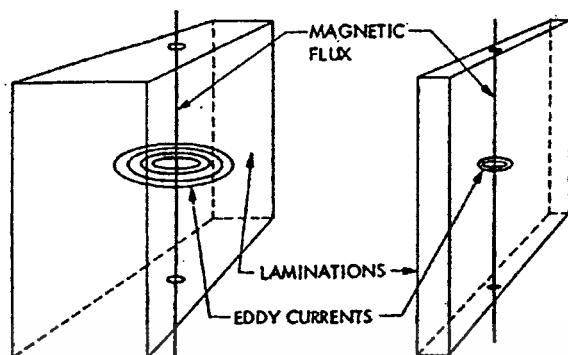
- 1 hysteresis loss ซึ่งสามารถหาได้จากพื้นที่ภายใน dc B-H loops
- 2 eddy current ซึ่งเป็นการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนภายในตัวสารแม่เหล็ก



รูปที่ 5.6 แสดงถึง core loss กับ การเพิ่มขึ้นของความถี่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





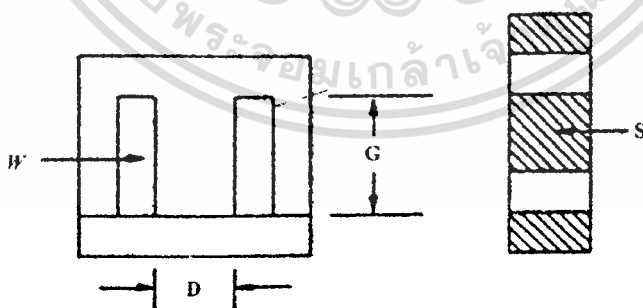
รูปที่ 5.7 แสดงการเกิดค่าความสูญเสียอันเกิดจาก eddy current

### 5.3.2 ความสูญเสียในขดลวด

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานที่อยู่ในขดลวด แล้วแปรสภาพความสูญเสียอยู่ในรูปพลังงานความร้อน

### 5.4 ลักษณะทางกายภาพของแกนเฟอร์ไรท์

แกนเฟอร์ไรท์มีหลายรูปแบบไม่เป็น EI Lamination, EE Lamination, Pot core, Powder core, C core, Single-coil, Tape-wound, Toroid, แต่ในส่วนนี้จะให้เห็นเฉพาะ EI



รูปที่ 5.8 EI Lamination

ซึ่งสามารถหารายละเอียดของขนาดความยาวแต่ละด้านของแกนเฟอร์ไรท์ รวมถึงพื้นที่หน้าตัดได้จากตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลงความถี่สูง

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์ หรือ คอนเวอร์เตอร์นั้น มีวิธีการการออกแบบ ได้ 2 วิธีคือ

### 5.5.1 Area Product Ap Approach

วิธีแรกเป็นการออกแบบที่ใช้การกำหนดคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้นของตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งเป็นกำลังงานที่สูญเสียของ  $Cu \text{ loss}(P_{cu})$  ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำทองแดงที่ใช้พันบนแกนสารแม่เหล็ก ส่วนวิธีที่สอง Kg Approach เป็นการออกแบบที่มีการกำหนดคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้นของตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลงความถี่สูงให้อยู่ในรูปของกำลังสูญเสียของขดลวดทองแดง  $Cu \text{ loss}(P_{cu})$  โดยตรงตั้งแต่เริ่มต้นการคำนวณ ซึ่งการออกแบบทั้ง 2 วิธี มีข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยการออกแบบ Ap Approach จะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์  $J$  (Current Density) ให้เหมาะสมก่อนแล้ว จึงดำเนินการออกแบบ แต่ถ้า  $J$  มีค่ามากไปก็จะส่งผลทำให้  $Cu \text{ loss}(P_{cu})$  มีค่ามาก ต้องเลือกค่า  $J$  ใหม่ แล้วดำเนินการตามขั้นตอนคำนวณใหม่ตั้งแต่ต้น ซึ่งเป็นการออกแบบที่เสียเวลามาก แต่ถ้ามีความชำนาญในการออกแบบ ก็จะกำหนดค่าไปได้อย่างเหมาะสมตั้งแต่ต้น โดยวิธีการคิดจะเริ่มจากสูตร ซึ่งโดยปกติทางโรงงานผู้ผลิตจะกำหนดมาให้ทราบ

$$A_p = W \cdot S \quad (5.2)$$

โดยที่  $W$  เป็นพื้นที่ช่องหน้าต่าง

$S$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กที่ขดลวดพันอยู่โดยรอบ

### 5.5.2 Core geometry Kg Approach

ส่วนการออกแบบ Kg Approach ต้องเลือกค่า  $Cu \text{ loss}(P_{cu})$  ตั้งแต่แรกเริ่มการคำนวณ ดังนั้นจึงไม่ค่อยประสบปัญหามากนัก เนื่องจากกำลังสูญเสีย (Core Loss & Copper Loss) จะถูกกำหนดในตอนเริ่มต้นการทำงานของแกนเฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้งาน จึงไม่ค่อยยุ่งยากมากนักในการออกแบบ โดยวิธีการคิดจะเริ่มจากสูตร ซึ่งโดยทางโรงงานผู้ผลิตจะกำหนดมาให้ทราบ และแจ้งให้ทราบ

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{l} \quad (5.3)$$

โดยที่  $W$  เป็นพื้นที่ช่องหน้าต่าง

$S$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กที่ขดลวดพันอยู่โดยรอบ

$l$  เป็นความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนแม่เหล็ก 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง (Lc)

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง มีหลายสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง ไม่ว่าจะเป็นการเลือกอุปกรณ์ ข้อกำหนด หรือขีดจำกัดต่างๆ ซึ่งจะกล่าวถึงดังนี้

### 5.6.1 การเลือกอุปกรณ์

1. ชนิด ลักษณะ โครงสร้าง และขนาดของแกนแม่เหล็กที่นำมาใช้งาน ในที่นี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์
2. ชนิด รูปร่าง ขนาด และจำนวนรอบที่ใช้ในการพันของลวดตัวนำ
3. ชนิด และลักษณะฉนวนของลวดตัวนำ
4. ลักษณะ โครงสร้างของ Case ตลอดจนการระบายความร้อน

### 5.6.2 ข้อกำหนด

1. ค่าความเหนี่ยวนำ
2. ขนาด และรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแส และแรงดัน
3. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ หรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Temperature rise) ที่ได้จากการพัน

### 5.6.3 ขีดจำกัด

1. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก ( $B_{max}$ ) กรณีแกนเฟอร์ไรต์ใช้ไม่เกิน 0.6 เทสลา (ขึ้นอยู่กับสารแม่เหล็กที่นำมาผลิต) ซึ่งค่าของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมรับได้ อาจถูกกำหนดโดยกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก (Core loss) หรือการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก (saturation core) ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดไหนที่ให้ค่า  $B_{max}$  ที่ต่ำกว่า จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กต่อหน้าหนัก ดังนั้นเมื่อทราบถึงความถี่ที่ใช้งาน และทราบถึงค่ากำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กที่ยอมรับได้ ก็เป็นผลให้ทราบถึงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดได้เช่นกัน แต่ทั้งนี้ค่าดังกล่าวต้องไม่มากไปกว่าค่าอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กที่ใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับสารแม่เหล็กที่นำมาทำแกนแม่เหล็ก

2. กำลังสูญเสียในขดลวด Copper loss  $P_{cu}$  การเลือกค่ากำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำ มีความสำคัญต่อการออกแบบโดยวิธี Kg Approach ซึ่งในการออกแบบจะมีการกำหนดกำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำ เมื่อคำนวณหาขนาดของแกนแม่เหล็กได้โดยอาศัยค่า  $P_{cu}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจริงในขดลวดทองแดงว่ามีความร้อนสูงเกิน หรือน้อยเกินไปหรือไม่ ซึ่งต้องปรับค่า  $P_{cu}$  ให้เหมาะสมกับขนาดแกนแม่เหล็กที่ใช้งาน ทั้งนี้ค่า  $P_{cu}$  ที่ยอมให้มีได้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ หรือหม้อแปลง โดยทั่วไปแล้วมักมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 1.5 เปอร์เซ็นต์ของกำลังที่ส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำ หรือหม้อแปลง

3. ค่าความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง ( $\rho$ ) ค่านี้เป็นคุณสมบัติของทองแดงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำขณะมีภาระ (load) เต็มที่มีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ค่า  $\rho$  มีค่าเท่ากับ  $1.72E-08$  โอห์ม-เมตร
4. สัมประสิทธิการใช้ช่องหน้าต่างของแกนแม่เหล็ก (Window Utilization Factor :  $k$ ) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงเปอร์เซ็นต์ของการใช้พื้นที่ในการพันขดลวดรอบแกนแม่เหล็ก ได้เทียบกับพื้นที่ที่แกนแม่เหล็กนั้นสามารถให้พันได้ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับ รูปร่างของแกนแม่เหล็ก รีบปิ้น วิธีการพัน ฉนวนที่หุ้มทองแดง รวมไปถึงการพันที่แน่นอนเพียงไรด้วย ซึ่งโดยปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.6
5. ปรากฏการณ์นำกระแสเฉพาะที่ผิวลวดตัวนำ (Skin effect) ทั้งนี้เมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านลวดตัวนำ จะเป็นผลให้ความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลของกระแสในขดลวดตัวนำย่อมทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive forces : emf's) บนพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะมีทิศทางที่ขัดขวางการไหลของกระแส และจะมีผลมากที่สุดตรงจุดศูนย์กลางของขดลวดตัวนำ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะถูกผลักให้ไหลอยู่เฉพาะตรงผิวรอบนอกของตัวนำ ทั้งนี้ปรากฏการณ์นี้จะมีผลมากขึ้นเมื่อความถี่ที่กระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำมีความถี่ที่สูงขึ้น โดยสามารถคำนวณหาค่าความลึกในการไหลของค่ากระแสบนผิวขดลวดตัวนำ (skin depth) ได้จากสูตร

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\pi \mu_r c}} \quad \text{m} \quad (5.4)$$

โดยที่

$c$  = velocity of light, =  $3E8$  m/s =  $4 \pi E-07 \mu_r$

$\mu_r$  = permeability of conductor, = 1 for nonmagnetic conductors

$\rho$  = resistivity,  $\Omega$  - m, =  $1.72E-8$  for copper

$\lambda$  = free space wavelength, =  $300E6 / f$  meters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่เราเลือกใช้ขดลวดในการพันบนแกนแม่เหล็ก จะได้

$$\begin{aligned}\delta &= 0.5\pi\sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{f}} \\ &= \frac{6.61}{\sqrt{f}} \quad \text{:cm} \\ &= \frac{2.60}{\sqrt{f}} \quad \text{:in}\end{aligned}\quad (5.5)$$

#### 5.6.4 สมการการออกแบบโดยวิธีการคำนวณแบบ Core Geometry Kg Approach

วิธีการนี้เป็นการออกแบบที่ใช้กำลังการสูญเสียของขดลวดทองแดง  $P_{cu}$  เป็นตัวกำหนด สามารถพิสูจน์ได้จากสมการเหล่านี้

$$\lambda = N \cdot \phi = L \cdot I_{peak} \quad (5.6)$$

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{S} = \frac{\lambda_{max}}{S \cdot N} = L \cdot I_{peak} \quad \text{:เทสลา} \quad (5.7)$$

$$N = \frac{L I_{peak}}{B_{max} S} \quad \text{:รอบ} \quad (5.8)$$

$$A_w = \frac{k \cdot W}{N} \quad \text{:m}^2 \quad (5.9)$$

$$l = N \cdot t \quad \text{:m} \quad (5.10)$$

$$R_w = \frac{\rho \cdot l}{A_w} = \frac{\rho \cdot N^2 \cdot t}{k \cdot W} \quad \text{:}\Omega \quad (5.11)$$

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R_w \quad \text{:Watt} \quad (5.12)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆให้อยู่ในรูป  $P_{cu}$

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot \rho \cdot \frac{L^2 \cdot I_{peak}^2}{B_{max}^2 \cdot S^2} \cdot \frac{t}{k \cdot W} \quad \text{:Watt} \quad (5.13)$$

โดยที่

$$\frac{L^2 \cdot I_{peak}^2}{B_{max}^2 \cdot S^2} = N^2 \quad (5.14)$$

จาก

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{t} \quad \text{:m}^5$$

จะได้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{gr} = \frac{W.S^2}{t} = \frac{4 \cdot \rho \cdot [(1/2)(L.I_{rms})^2] \cdot [(1/2)(L.I_{peak})^2]}{k \cdot B_{max}^2 \cdot P_{cu}} \quad :m^5 \quad (5.15)$$

โดยที่

- $\rho$  เป็นสภาพความต้านทานของทองแดงมีค่าเท่ากับ  $1.72E-8$  โอห์ม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- $R_w$  ความต้านทานรวมของขดลวดที่ใช้พันรอบแกนแม่เหล็ก
- $L$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการออกแบบ มีหน่วยเป็น เฮนรี่
- $I_{rms}$  เป็นค่ากระแสแอมแปร์ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- $I_{peak}$  เป็นค่ากระแสยอดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- $k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของหน้าต่าง หรือค่าขีดจำกัดหน้าต่าง (Window Utilization Factor) มีค่า 0.1-0.6
- $B_{max}$  เป็นค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมรับได้ สำหรับเฟอร์ไรต์ มีค่าไม่เกิน 0.6 เทสลา
- $P_{cu}$  เป็นค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดทองแดง มีหน่วยเป็น วัตต์
- $W$  เป็นพื้นที่ของหน้าต่าง มีหน่วยเป็น  $m^2$
- $S$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กที่ขดลวดทองแดงพันอยู่โดยรอบ (Effective Area) มีหน่วยเป็น m
- $l$  เป็นความยาวโดยประมาณของขดลวดที่ใช้ในการพันรอบแกนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น m
- $t$  เป็นความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนแม่เหล็ก 1 รอบ มีหน่วยเป็น m
- $A_w$  เป็นหน้าตัดของขดลวดทองแดง
- $N$  เป็นจำนวนรอบที่พันรอบแกนแม่เหล็ก
- $N_{wire}$  จำนวนเส้นของขดลวดทองแดงที่ต้องพันพร้อมกัน
- $f$  เป็นความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ

### 5.6.5 ขั้นตอนในการออกแบบ

1. จากข้อกำหนด และขีดจำกัดคำนวณหาค่า  $K_{gr}$  ได้จาก

$$K_{gr} = \frac{W.S^2}{t} = \frac{4 \cdot \rho \cdot [(1/2)(L.I_{rms})^2] \cdot [(1/2)(L.I_{peak})^2]}{k \cdot B_{max}^2 \cdot P_{cu}} \quad :m^5$$

2. เลือกขนาดของแกนที่มีค่า  $K_g$  มากกว่า  $K_{gr}$  ที่ได้จากการคำนวณ เพื่อที่จะได้สามารถพันขดลวดทองแดงรอบแกนแม่เหล็กได้ และเป็นการรับรองว่าขนาดแกนแม่เหล็กสามารถจ่ายกำลังได้ตามค่ากระแส และแรงดันที่ตกคร่อม ทั้งนี้ค่า  $K_g$  สามารถหาได้จากคู่มือรายละเอียดคุณสมบัติและการใช้งานแกนแม่เหล็ก จากสูตร

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{t} \quad : \text{m}^5$$

3. คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำจากสูตร

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max} S} \quad : \text{รอบ}$$

4. คำนวณหาขนาดของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำจากสูตร

$$A_w = \frac{k \cdot W}{N} \quad : \text{m}^2$$

5. เลือกขนาดหรือเบอร์ของขดลวดตัวนำ โดยปกติจะแบ่งขนาดตามหน่วย AWG ทั้งนี้ต้องเลือกขนาดของขดลวดตัวนำที่มี  $A_w$  ที่มากกว่า  $A_w$  ที่ได้จากการคำนวณในข้อที่ 4 และต้องเลือกรัศมีของขดลวดทองแดงให้เล็กกว่าความลึกของกระแสที่ไหลบนผิวขดลวดตัวนำ (skin depth) ได้จากสูตร

$$\delta = \frac{6.61}{\sqrt{f}} \quad : \text{cm}$$

6. คำนวณหาช่องว่างอากาศ (air gap) ได้จากสูตร

$$l_g = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{L} \quad : \text{m} \quad (5.16)$$

7. ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กกระจายโดยรอบที่ขอบหน้าตัดแกนแม่เหล็ก ทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น (Fringing Flux Correction Factor : F) สามารถหาได้จากสูตร

$$F = 1 + \frac{l_g}{S} \ln \left[ \frac{2G}{l_g} \right] \quad (5.17)$$

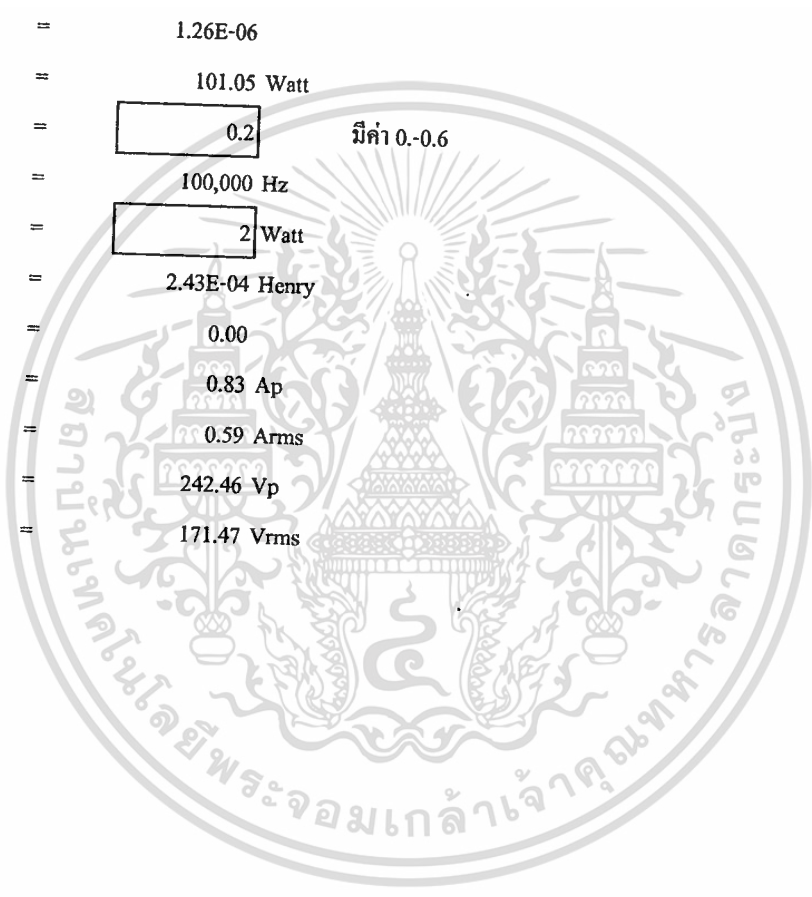
8. ปรับลดค่า  $l_g$  จนได้ค่า  $L$  ที่ต้องการ

## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ $L_c$

### Inductance with NO DC Flux

#### ข้อกำหนด

1 Bmax	=	<input type="text" value="0.2"/>	Tesla
2 p	=	1.72E-08	Ohm-m
3 u0	=	1.26E-06	
4 Pt	=	101.05	Watt
5 k	=	<input type="text" value="0.2"/>	มีค่า 0.-0.6
6 f	=	100,000	Hz
7 Pcu	=	<input type="text" value="2"/>	Watt
8 Lc	=	2.43E-04	Henry
9 a	=	0.00	
10 Ip(Lc)	=	0.83	Ap
11 Irms(Lc)	=	0.59	Arms
12 Vp(Lc)	=	242.46	Vp
13 Vrms(Lc)	=	171.47	Vrms





### การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ $L_c$

#### Inductance with NO DC Flux

#### สรุปรายละเอียดการพันตัวเหนี่ยวนำ

1 ค่าความเหนี่ยวนำ	$L_c$	=	2.43E-04 Henry
2 แกนเฟอร์ไรท์ขนาด	Core Type	=	EI-30
3 ขนาดขดขนาดเบอร์	Wire Number	=	33 AWG
4 จำนวนรอบการพัน	N	=	10 รอบ
5 จำนวนเส้นของขดลวด	Nwire	=	61 เส้น
6 ความกว้างของช่องอากาศ	lg	=	0.06 mm



การออกแบบคัมหม์เหนียวนำ LcInductance with NO DC Flux

## ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดแกนเฟอร์ไรท์ และการพันตัวเหนียวนำ

1 จากข้อกำหนดและขีดจำกัด คำนวณหาค่า Kgr

$$Kgr = 1.54E-14 \text{ m}^5$$

$$\text{จากสูตร } Kgr = (p * Lc * Irms * Irms * Lc * Ipeak * Ipeak) / (k * Bm * Bm * Pcu)$$

$$Lc = 2.43E-04 \text{ Henry}$$

$$p = 1.72E-08 \text{ Ohm-m}$$

$$Bmax = 0.2 \text{ Tesla}$$

$$Pcu = 2 \text{ Watt}$$

$$k = 0.2$$

$$Ipeak = 0.83 \text{ Ap}$$

$$Irms = 0.589 \text{ Arms}$$

2 เลือกขนาดของแกนเพื่อให้ K<sub>g</sub> มีค่ามากกว่า K<sub>gr</sub> ที่คำนวณได้จากข้อ 1

โคจตรวจสอบกับ TAB : core spec

3 คำนวณจำนวนรอบ N = 11 รอบ

$$\text{จากสูตร } N = Lc * Ip / (Bm * S)$$

$$Lc = 2.43E-04 \text{ Henry}$$

$$Ip = 0.83 \text{ Ap}$$

$$Bm = 0.2 \text{ Tesla}$$

$$S = 9.60E-05 \text{ m}^2$$

4 คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำ Aw = 1.56E-06 m<sup>2</sup>

$$\text{จากสูตร } Aw = (k * W) / N$$

$$k = 0.2$$

$$W = 8.24E-05 \text{ m}^2$$

$$N = 11 \text{ รอบ}$$

5 คำนวณหาค่า Skin Effect = 2.09E-04 m

จากสูตร Skin Effect =  $66.1 \cdot 10^{-3} / \sqrt{f}$

$f = 100,000 \text{ Hz}$

6 คำนวณหาร่องว่างอากาศ (air gap)  $l_g = 5.52E-05 \text{ m}$

จากสูตร  $l_g = N \cdot N \cdot u_0 \cdot S / L$

$N = 11 \text{ รอบ}$

$u_0 = 1.26E-06$

$S = 9.60E-05 \text{ m}^2$

$L_c = 2.43E-04 \text{ Henry}$

7 คำนวณจำนวนเส้นขดลวด  $N_{\text{wire}} = 61 \text{ เส้น}$

จากสูตร  $N_{\text{wire}} l = A_w / \text{bare area}$

$A_w = 1.56E-06 \text{ m}^2$

$\text{bare area} = 2.55E-08 \text{ m}^2$

8 คำนวณหาค่า Fringing Flux Correction Factor = 1.04

จากสูตร  $F = 1 + (l_g / \sqrt{S}) \cdot (\ln(2G / l_g))$

$l_g = 5.52E-05 \text{ m}$

$S = 9.60E-05 \text{ m}^2$

$G = 1.60E-02 \text{ m}$

9 คำนวณจำนวนรอบใหม่ได้  $N = 10 \text{ รอบ}$

จากสูตร  $N = \sqrt{l_g \cdot L_c / (F \cdot u_0 \cdot S)}$

$l_g = 5.52E-05 \text{ m}$

$L_c = 2.43E-04 \text{ Henry}$

$F = 1.04$

$u_0 = 1.26E-06$

$S = 9.60E-05 \text{ m}^2$

โปรแกรมช่วยการออกแบบ Inductance With No DC Flux.xls นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

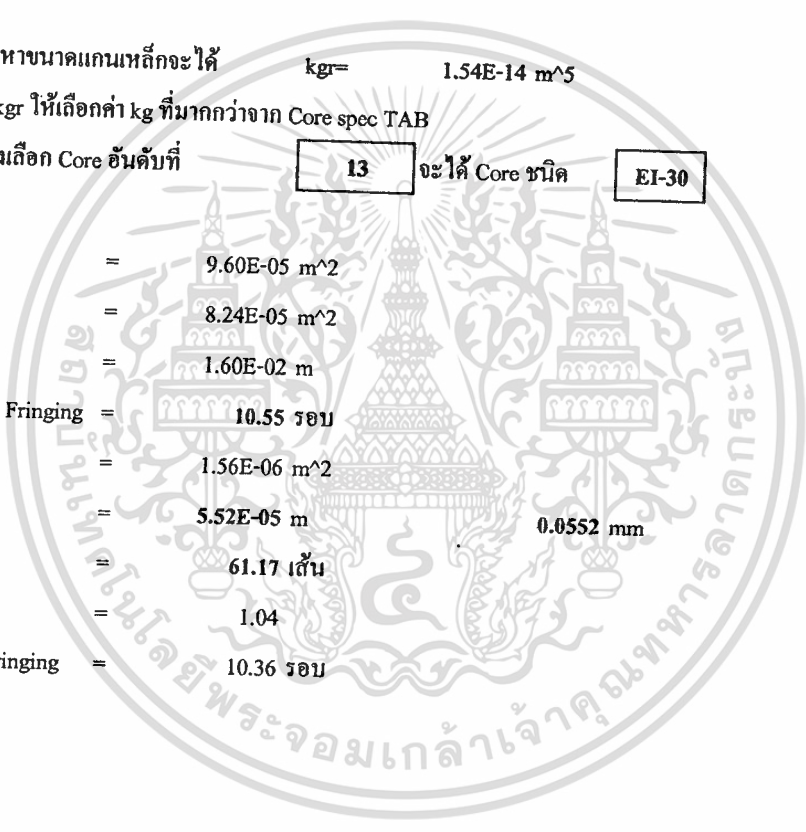
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การออกแบบคัพเหนืวนำ Lc**  
**Inductance with NO DC Flux**

**การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรท์ และขดลวด**

1 เลือกขดลวดขนาด 33 AWG  
 เนื่องจากผลของ skin effect = 0.2090 mm  
 Bare Area = 2.554E-08 m<sup>2</sup>

2 คำนวณหาขนาดแกนเหล็กจะได้  $k_{gr} = 1.54E-14 \text{ m}^5$   
 จากค่า  $k_{gr}$  ให้เลือกค่า kg ที่มากกว่าจาก Core spec TAB  
 ดังนั้นจึงเลือก Core อันดับที่ 13 จะได้ Core ชนิด EI-30  
 จะได้  
 S = 9.60E-05 m<sup>2</sup>  
 W = 8.24E-05 m<sup>2</sup>  
 G = 1.60E-02 m  
 N before Fringing = 10.55 รอบ  
 Aw = 1.56E-06 m<sup>2</sup>  
 lg = 5.52E-05 m      0.0552 mm  
 Nwire = 61.17 เส้น  
 F = 1.04  
 N after Fringing = 10.36 รอบ



AWG Wire Size	Bare Area		Diameter	
	cm <sup>2</sup> 10 <sup>-3</sup>	1.00E-07		
		m <sup>2</sup>	m	mm
10	52.61	5.26E-06	0.002587651	2.58765
11	41.68	4.17E-06	0.00230322	2.30322
12	33.08	3.31E-06	0.002051891	2.05189
13	26.6	2.66E-06	0.001839977	1.83998
14	20.82	2.08E-06	0.001627841	1.62784
15	16.51	1.65E-06	0.00144959	1.44959
16	13.07	1.31E-06	0.001289762	1.28976
17	10.39	1.04E-06	0.001149951	1.14995
18	8.228	8.23E-07	0.001023337	1.02334
19	6.531	6.53E-07	0.00091172	0.91172
20	5.188	5.19E-07	0.00081259	0.81259
21	4.116	4.12E-07	0.000723785	0.72378
22	3.243	3.24E-07	0.000642459	0.64246
23	2.588	2.59E-07	0.000573923	0.57392
24	2.047	2.05E-07	0.000510423	0.51042
25	1.623	1.62E-07	0.000454497	0.45450
26	1.28	1.28E-07	0.000403624	0.40362
27	1.021	1.02E-07	0.000360483	0.36048
28	0.8046	8.05E-08	0.000320009	0.32001
29	0.647	6.47E-08	0.000286962	0.28696
30	0.5067	5.07E-08	0.000253949	0.25395
31	0.4013	4.01E-08	0.000225999	0.22600
32	0.3242	3.24E-08	0.000203132	0.20313
33	0.2554	2.55E-08	0.000180294	0.18029
34	0.2011	2.01E-08	0.000159984	0.15998
35	0.1589	1.59E-08	0.000142211	0.14221
36	0.1266	1.27E-08	0.000126937	0.12694
37	0.1026	1.03E-08	0.000114273	0.11427
38	0.08107	8.11E-09	0.000101578	0.10158
39	0.06207	6.21E-09	8.88817E-05	0.08888
40	0.04869	4.87E-09	7.87212E-05	0.07872
41	0.03972	3.97E-09	7.11011E-05	0.07110
42	0.03166	3.17E-09	6.34786E-05	0.06348
43	0.02452	2.45E-09	5.5864E-05	0.05586
44	0.0202	2.02E-09	5.07046E-05	0.05070

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดขนาด และคุณสมบัติของขดลวด

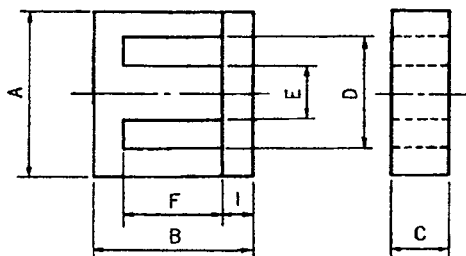
โปรแกรมช่วยการออกแบบสารที่สวอนไว้สำหรับการ Inductance With No DC Flux.xls นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์จากค่า Spec of Wire

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Items

		A	B	C	D	E	F	I
1	EI-10	10.00	6.60	4.90	7.70	2.40	4.20	1.00
2	EI-12ZT	12.00	9.60	5.00	8.00	3.00	5.60	2.00
3	EI-13	13.00	12.00	6.30	10.20	2.80	9.20	1.40
4	EI-14C	13.80	11.70	2.70	9.40	4.80	7.00	2.30
5	EI-16	16.00	14.30	5.00	12.00	4.20	10.20	2.05
6	EI-18	18.00	14.90	3.30	12.50	6.20	9.40	2.70
7	EI-19	19.00	15.90	5.10	14.00	5.10	11.30	2.35
8	EI-22	22.00	18.60	6.00	14.00	6.00	10.60	4.00
9	EI-24	24.00	18.10	9.85	18.00	6.00	12.00	2.90
10	EI-25	25.00	20.00	6.55	18.60	6.55	13.60	3.20
11	EI-28	28.00	20.50	11.00	18.60	7.50	12.50	3.50
12	EI-29	29.00	27.00	10.00	21.00	8.60	18.00	4.50
13	EI-30	30.00	26.00	10.00	20.00	10.00	16.00	5.50
14	EI-33	33.00	28.60	13.00	24.00	10.00	19.20	5.20
15	EI-35	35.00	29.20	10.30	25.00	10.30	18.20	5.00
16	EI-36T	36.00	29.70	12.00	26.00	10.30	18.20	5.50
17	EI-40	40.00	34.70	12.00	27.50	12.00	20.40	7.20
18	EI-50	50.00	42.00	15.00	35.00	15.00	25.00	8.50
19	EI-60	60.00	44.00	16.00	44.50	16.00	28.00	8.00

ตารางที่ 5.2 รายละเอียด และคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์ชนิด EI Laminate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Items	Core factor	Effective area	Effective length	Effective volume	Effective window	
	MPL/A					
	Cl(mm <sup>-1</sup> )	S(mm <sup>2</sup> )	MPL(mm)	Ve(mm <sup>3</sup> )	W(mm <sup>2</sup> )	
1	EI-10	1.59	11.00	17.50	192.40	11.40
2	EI-12ZT	1.31	16.60	21.70	358.70	14.60
3	EI-13	1.77	17.10	30.20	517.30	34.30
4	EI-14C	2.16	12.10	26.10	315.30	16.60
5	EI-16	1.78	19.60	34.80	679.60	40.80
6	EI-18	1.85	18.40	34.10	628.40	30.60
7	EI-19	1.68	23.30	39.20	914.20	51.70
8	EI-22	1.02	39.60	40.20	1,592.00	44.00
9	EI-24	0.80	57.20	45.80	2,622.00	73.80
10	EI-25	1.17	42.20	49.40	2,084.00	81.90
11	EI-28	0.57	86.10	49.00	4,215.00	72.50
12	EI-29	0.76	82.50	62.60	5,163.00	114.50
13	EI-30	0.60	96.00	57.90	5,555.00	82.40
14	EI-33	0.56	119.40	67.30	8,039.00	136.80
15	EI-35	0.65	103.80	67.80	7,035.00	136.00
16	EI-36T	0.56	123.10	69.00	8,501.00	145.10
17	EI-40	0.52	147.90	77.00	11,380.00	161.70
18	EI-50	0.42	225.70	95.10	21,460.00	255.00
19	EI-60	0.45	245.10	109.70	26,880.00	404.60

ตารางที่ 5.2 รายละเอียด และคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรต์ชนิด EI Lamimnate (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Items	Area Product		Core Geometry		
	W*S Ap(mm <sup>4</sup> )	(W*S*S)/t Kg(mm <sup>5</sup> )	1.00E-12 Ap(m <sup>4</sup> )	1.00E-15 Kg(m <sup>5</sup> )	
1	EI-10	125.40	78.82	1.25E-10	7.88E-14
2	EI-12ZT	242.36	185.40	2.42E-10	1.85E-13
3	EI-13	586.53	332.11	5.87E-10	3.32E-13
4	EI-14C	200.86	93.12	2.01E-10	9.31E-14
5	EI-16	799.68	450.39	8.00E-10	4.50E-13
6	EI-18	563.04	303.81	5.63E-10	3.04E-13
7	EI-19	1,204.61	716.01	1.20E-09	7.16E-13
8	EI-22	1,742.40	1,716.39	1.74E-09	1.72E-12
9	EI-24	4,221.36	5,272.09	4.22E-09	5.27E-12
10	EI-25	3,456.18	2,952.45	3.46E-09	2.95E-12
11	EI-28	6,242.25	10,968.53	6.24E-09	1.10E-11
12	EI-29	9,446.25	12,449.13	9.45E-09	1.24E-11
13	EI-30	7,910.40	13,115.69	7.91E-09	1.31E-11
14	EI-33	16,333.92	28,978.75	1.63E-08	2.90E-11
15	EI-35	14,116.80	21,612.45	1.41E-08	2.16E-11
16	EI-36T	17,861.81	31,866.50	1.79E-08	3.19E-11
17	EI-40	23,915.43	45,936.26	2.39E-08	4.59E-11
18	EI-50	57,553.50	136,591.22	5.76E-08	1.37E-10
19	EI-60	99,167.46	221,567.41	9.92E-08	2.22E-10

ตารางที่ 5.2 รายละเอียด และคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์ชนิด EI Laminate (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Items	Effective area		Effective window	
	1.00E-06		1.00E-06	
		S(m)		W(m <sup>2</sup> )
1	EI-10	1.10E-05		1.14E-05
2	EI-12ZT	1.66E-05		1.46E-05
3	EI-13	1.71E-05		3.43E-05
4	EI-14C	1.21E-05		1.66E-05
5	EI-16	1.96E-05		4.08E-05
6	EI-18	1.84E-05		3.06E-05
7	EI-19	2.33E-05		5.17E-05
8	EI-22	3.96E-05		4.40E-05
9	EI-24	5.72E-05		7.38E-05
10	EI-25	4.22E-05		8.19E-05
11	EI-28	8.61E-05		7.25E-05
12	EI-29	8.25E-05		1.15E-04
13	EI-30	9.60E-05		8.24E-05
14	EI-33	1.19E-04		1.37E-04
15	EI-35	1.04E-04		1.36E-04
16	EI-36T	1.23E-04		1.45E-04
17	EI-40	1.48E-04		1.62E-04
18	EI-50	2.26E-04		2.55E-04
19	EI-60	2.45E-04		4.05E-04

ตารางที่ 5.2 รายละเอียด และคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์ชนิด EI Laminate (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Items	Core factor	Effective area	Effective length	Effective volume	Effective window	
	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-01	1.00E-03	1.00E-02	
	Ci(cm <sup>-1</sup> )	S(cm <sup>2</sup> )	MPL(cm)	Ve(cm <sup>3</sup> )	W(cm <sup>2</sup> )	
1	EI-10	0.159	0.11	1.75	0.1924	0.114
2	EI-12ZT	0.131	0.166	2.17	0.3587	0.146
3	EI-13	0.177	0.171	3.02	0.5173	0.343
4	EI-14C	0.216	0.121	2.61	0.3153	0.166
5	EI-16	0.178	0.196	3.48	0.6796	0.408
6	EI-18	0.185	0.184	3.41	0.6284	0.306
7	EI-19	0.168	0.233	3.92	0.9142	0.517
8	EI-22	0.102	0.396	4.02	1.592	0.44
9	EI-24	0.08	0.572	4.58	2.622	0.738
10	EI-25	0.117	0.422	4.94	2.084	0.819
11	EI-28	0.057	0.861	4.9	4.215	0.725
12	EI-29	0.076	0.825	6.26	5.163	1.145
13	EI-30	0.06	0.96	5.79	5.555	0.824
14	EI-33	0.056	1.194	6.73	8.039	1.368
15	EI-35	0.065	1.038	6.78	7.035	1.36
16	EI-36T	0.056	1.231	6.9	8.501	1.451
17	EI-40	0.052	1.479	7.7	11.38	1.617
18	EI-50	0.042	2.257	9.51	21.46	2.55
19	EI-60	0.045	2.451	10.97	26.88	4.046

ตารางที่ 5.2 รายละเอียด และคุณสมบัติของแกนเทอร์ไรท์ชนิด EI Laminate (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Items	Area Product		Core Geometry	At
	1.00E-04 Ap(cm <sup>4</sup> )	1.00E-05 Kg(cm <sup>5</sup> )		cm
1	EI-10	1.25E-02	7.88E-04	2.52
2	EI-12ZT	2.42E-02	1.85E-03	2.6
3	EI-13	5.87E-02	3.32E-03	3.3
4	EI-14C	2.01E-02	9.31E-04	2.42
5	EI-16	8.00E-02	4.50E-03	3.4
6	EI-18	5.63E-02	3.04E-03	3.16
7	EI-19	1.20E-01	7.16E-03	3.82
8	EI-22	1.74E-01	1.72E-02	4
9	EI-24	4.22E-01	5.27E-02	5.57
10	EI-25	3.46E-01	2.95E-02	5.03
11	EI-28	6.24E-01	1.10E-01	5.92
12	EI-29	9.45E-01	1.24E-01	6.2
13	EI-30	7.91E-01	1.31E-01	6
14	EI-33	1.63E+00	2.90E-01	7.4
15	EI-35	1.41E+00	2.16E-01	7.06
16	EI-36T	1.79E+00	3.19E-01	7.6
17	EI-40	2.39E+00	4.59E-01	7.9
18	EI-50	5.76E+00	1.37E+00	10
19	EI-60	9.92E+00	2.22E+00	12.1

ตารางที่ 5.2 รายละเอียด และคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์ชนิด EI Laminate (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.7 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_a, L_b$ )

วิธีนี้เป็นการออกแบบที่ใช้กำลังสูญเสียของขดลวดทองแดง ( $P_{cu}$ ) ในการกำหนดในตอนเริ่มต้น โดยการกำหนดขนาดของหม้อแปลง และสามารถพิสูจน์หาค่า  $K_{gr}$  ได้จาก

### 5.7.1 การพิสูจน์หาค่า $K_{gr}$ เพื่อนำมากำหนดขนาดแกนเหล็กที่เหมาะสม

จากสูตร

$$\lambda = N \cdot \phi = N \cdot I_{peak} \quad (5.18)$$

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{S} = \frac{\lambda_{max}}{S \cdot N} = N \cdot I_{peak} \quad \text{: เทตลา} \quad (5.19)$$

จะได้

$$N = \frac{L I_{peak}}{B_{max} S} \quad \text{: รอบ} \quad (5.20)$$

จากสูตร

เมื่อแรงดันเป็น Square Wave

$$\Delta \phi_{max} = \frac{\int v \cdot dt}{N} = \frac{v \cdot \left(\frac{T}{2}\right)}{N} = n \cdot B_{max} \cdot S \quad (5.21)$$

เมื่อ  $n = 1$  เมื่อมี dc magnetizing current

เมื่อ  $n = 2$  เมื่อไม่มี dc magnetizing current

คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดได้

$$N = \frac{V_{rms}}{2 \cdot n \cdot B_{max} \cdot S \cdot f} \quad (5.22)$$

ในกรณีที่แรงดันเป็น Sine Wave

$$N = \frac{V_{rms}}{4.44 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f} \quad (5.23)$$

จะได้

$$\begin{aligned} N_1^2 &= \frac{L_1 I_{1peak}}{B_{max} S} \cdot \frac{V_{1rms}}{4.44 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f} \\ &= \frac{L_1 \cdot I_{1peak} \cdot V_{1rms}}{4.44 \cdot B_{max}^2 \cdot S^2 \cdot f} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot L_1 \cdot P_{in}}{4.44 \cdot B_{max}^2 \cdot S^2 \cdot f} \quad (5.24)$$

และ

$$N_2^2 = \frac{L_2 I_{2\ peak}}{B_{max} S} \cdot \frac{V_{2\ rms}}{4.44 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f}$$

$$= \frac{L_2 \cdot I_{2\ peak} \cdot V_{2\ rms}}{4.44 \cdot B_{max}^2 \cdot S^2 \cdot f}$$

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot L_1 \cdot P_{out}}{4.44 \cdot B_{max}^2 \cdot S^2 \cdot f} \quad (5.25)$$

จาก

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{t} \quad :m^5$$

และ

$$k \cdot W = N_1 A_{w1} + N_2 \cdot A_{w2} \quad (5.26)$$

โดยสมมติว่า

$$N_1 \cdot A_{w1} = N_2 \cdot A_{w2} = \frac{k \cdot W}{2} \quad (5.27)$$

จะได้

$$N_1 = \frac{k \cdot W}{2 \cdot A_{w1}} \quad (5.28)$$

$$A_{w1} = \frac{k \cdot W}{2 \cdot N_1} \quad (5.29)$$

$$A_{w2} = \frac{k \cdot W}{2 \cdot N_2} \quad (5.30)$$

จากสมการ

$$P_{cu} = I_{1\ rms}^2 \cdot R_{w1} + I_{2\ rms}^2 \cdot R_{w2} \quad (5.31)$$

$$R_w = \frac{\rho \cdot l}{A_w}$$

$$l = N \cdot t \quad :m$$

จะได้

$$P_{cu} = \frac{I_{1\ rms}^2 \cdot \rho \cdot N_1 \cdot t}{A_{w1}} + \frac{I_{2\ rms}^2 \cdot \rho \cdot N_2 \cdot t}{A_{w2}} \quad (5.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \frac{I_{1rms}^2 \cdot \rho \cdot N_1 \cdot t \cdot 2 \cdot N_1}{k \cdot W} + \frac{I_{2rms}^2 \cdot \rho \cdot N_2 \cdot t \cdot 2 \cdot N_2}{k \cdot W} \\
&= \frac{2 \cdot \rho \cdot t \cdot (I_{1rms}^2 \cdot N_1^2 + I_{2rms}^2 \cdot N_2^2)}{k \cdot W} \\
&= \frac{2 \cdot \rho \cdot t \cdot (I_{1rms}^2 \cdot L_1 \cdot I_{1peak} \cdot V_{1rms} + I_{2rms}^2 \cdot L_2 \cdot I_{2peak} \cdot V_{2rms})}{k \cdot W \cdot 4.44 \cdot B_{max}^2 \cdot S^2 \cdot f} \quad (5.33)
\end{aligned}$$

สามารถแปลงสมการใหม่ให้อยู่ในรูป

$$\begin{aligned}
&K_g = \frac{W \cdot S^2}{t} \\
\text{จะได้} \\
K_{gr} = \frac{W \cdot S^2}{t} &= \frac{2 \cdot \rho \cdot (I_{1rms}^2 \cdot L_1 \cdot I_{1peak} \cdot V_{1rms} + I_{2rms}^2 \cdot L_2 \cdot I_{2peak} \cdot V_{2rms})}{4.44 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot P_{cu}} \\
&= \frac{2 \cdot \rho \cdot (I_{1rms} \cdot L_1 \cdot I_{1peak} \cdot P_{in} + I_{2rms} \cdot L_2 \cdot I_{2peak} \cdot P_{out})}{4.44 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot P_{cu}} \quad (5.34)
\end{aligned}$$

สมมติว่า

$$P_{in} = P_{out} \quad (5.35)$$

จะได้

$$= \frac{2 \cdot \rho \cdot P_{in} \cdot (L_1 \cdot I_{1rms} \cdot I_{1peak} + L_2 \cdot I_{2rms} \cdot I_{2peak})}{4.44 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot P_{cu}} \quad (5.36)$$

จากสูตร

$$L_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_0} \quad (5.37)$$

$$L_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_0} \quad (5.38)$$

โดยที่  $\mathcal{R}_0$  เป็นค่าความต้านทานความเหนี่ยวนำในแกนแม่เหล็ก

และจากสมการพื้นฐานหม้อแปลง

$$\frac{V_{1rms}}{V_{2rms}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_{2rms}}{I_{1rms}} = \frac{1}{a} \quad (5.39)$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{a}\right)^2 \quad (5.40)$$

หรือ

$$L_1 = \frac{L_2}{a^2} \quad (5.41)$$

สามารถแปลงรูปใหม่ได้

$$K_{gr} = \frac{W \cdot S^2}{t} = \frac{2 \cdot \rho \cdot P_{in} \cdot \left(\frac{L_2}{a^2} \cdot a^2 \cdot I_{2rms} \cdot I_{2peak} + L_2 \cdot I_{2rms} \cdot I_{2peak}\right)}{4.44 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot P_{cu}} \quad (5.42)$$

$$= \frac{4 \cdot \rho \cdot P_{in} \cdot L_2 \cdot (I_{2rms} \cdot I_{2peak})}{4.44 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot P_{cu}} \quad \text{m}^5$$

จาก

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max} S}$$

$$N = \frac{V_{rms}}{4.44 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f}$$

$$\frac{LI_{peak}}{B_{max} S} = \frac{V_{rms}}{4.44 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f}$$

$$L = \frac{V_{rms}}{4.44 \cdot f \cdot I_{peak}} \quad (5.43)$$

จะได้

สามารถเปลี่ยนรูปได้เป็น

$$L2 \cdot (I_{2peak} \cdot I_{2rms}) = \frac{V_{2rms}}{4.44 \cdot f \cdot I_{2peak}} \cdot (I_{2rms} \cdot I_{2peak})$$

$$= \frac{V_{2rms} \cdot I_{2rms}}{4.44 \cdot f}$$

$$= \frac{P_{out}}{4.44 \cdot f} \quad (5.44)$$

สามารถแทนเข้าสมการจะได้

$$K_{gr} = \frac{W \cdot S^2}{t} = \frac{4 \cdot \rho \cdot P_{in} \cdot P_{out}}{(4.44)^2 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot P_{cu}}$$

$$= \frac{4 \cdot \rho \cdot P_{in}^2}{(4.44)^2 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot P_{cu}} \quad (5.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

- $\rho$  เป็นสภาพความต้านทานของทองแดงมีค่าเท่ากับ  $1.72E-8$  โอห์ม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- $R_{w1}$  ความต้านทานรวมของขดลวดทองแดงด้านเข้าของหม้อแปลงที่ใช้พันรอบแกนแม่เหล็ก
- $R_{w2}$  ความต้านทานรวมของขดลวดทองแดงด้านออกของหม้อแปลงที่ใช้พันรอบแกนแม่เหล็ก
- $L_1$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการออกแบบ ทางด้านเข้าของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น เฮนรี
- $L_2$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการออกแบบ ทางด้านออกของหม้อแปลงมีหน่วยเป็น เฮนรี
- $V_{1rms}$  เป็นค่าโวลต์เดจอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านขดลวดด้านเข้าของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น โวลต์
- $V_{2rms}$  เป็นค่าโวลต์เดจอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านขดลวดด้านเข้าของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น โวลต์
- $I_{1rms}$  เป็นค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านขดลวดด้านเข้าของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- $I_{1peak}$  เป็นค่ากระแสยอดที่ไหลผ่านขดลวดด้านเข้าของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- $I_{2rms}$  เป็นค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านขดลวดด้านออกของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- $I_{2peak}$  เป็นค่ากระแสยอดที่ไหลผ่านขดลวดด้านออกของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- $k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของหน้าต่าง หรือค่าขีดจำกัดหน้าต่าง (Window Utilization Factor) มีค่า 0.1-0.6
- $B_{max}$  เป็นค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมรับได้ สำหรับเฟอร์ไรต์ มีค่าไม่เกิน 0.6 เทสลา
- $P_{cu}$  เป็นค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดทองแดง มีหน่วยเป็น วัตต์
- $P_{in}$  เป็นค่ากำลังด้านเข้าของหม้อแปลง
- $P_{out}$  เป็นค่ากำลังด้านออกของหม้อแปลง
- $W$  เป็นพื้นที่ของหน้าต่าง มีหน่วยเป็น  $m^2$
- $S$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กที่ขดลวดทองแดงพันอยู่โดยรอบ (Effective Area) มีหน่วยเป็น  $m$
- $l$  เป็นความยาวโดยประมาณของขดลวดที่ต้องใช้ในการพันรอบแกนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $m$
- $t$  เป็นความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนแม่เหล็ก 1 รอบ มีหน่วยเป็น  $m$
- $A_{w1}$  เป็นหน้าตัดของขดลวดทองแดงด้านเข้าของหม้อแปลง
- $A_{w2}$  เป็นหน้าตัดของขดลวดทองแดงด้านออกของหม้อแปลง
- $N_1$  เป็นจำนวนรอบที่พันรอบแกนแม่เหล็กของขดลวดด้านเข้าของหม้อแปลง
- $N_{wire}$  จำนวนเส้นของขดลวดทองแดงที่ต้องพันพร้อมกันรอบแกนแม่เหล็กของขดลวดด้านเข้าของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- $N_2$  เป็นจำนวนรอบที่พันรอบแกนแม่เหล็กของขดลวดค้ำด้านออกของหม้อแปลง
- $N_{2wire}$  จำนวนเส้นของขดลวดทองแดงที่ต้องพันพร้อมกันรอบแกนแม่เหล็กของขดลวดค้ำด้านออกของหม้อแปลง
- $f$  เป็นความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ มีหน่วยเป็น Hz

### 5.7.2 ขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ

1. จากข้อกำหนด และขีดจำกัดคำนวณหาค่า  $K_{gr}$  ได้จาก

$$K_{gr} = \frac{W \cdot S^2}{t} = \frac{4 \cdot \rho \cdot P_{in}^2}{(4.44)^2 \cdot k \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot P_{cu}} \quad : m^5$$

2. เลือกขนาดของแกนที่มีค่า  $K_g$  มากกว่า  $K_{gr}$  ที่ได้จากการคำนวณ เพื่อที่จะได้สามารถพันขดลวดทองแดงรอบแกนแม่เหล็กได้ และเป็นการรับรองว่าขนาดแกนแม่เหล็กสามารถจ่ายกำลังได้ตามค่ากระแส และแรงดันที่ตกรวม ทั้งนี้ค่า  $K_g$  สามารถหาได้จากคู่มือรายละเอียดคุณสมบัติและการใช้งานแกนแม่เหล็ก จากสูตร

$$K_g = \frac{W \cdot S^2}{t} \quad : m^5$$

3. คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำจากสูตร

$$N_2^2 = \frac{\sqrt{2} \cdot L_1 \cdot P_{out}}{4.44 \cdot B_{max}^2 \cdot S^2 \cdot f} \quad : \text{รอบ}$$

4. คำนวณหาขนาดของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำที่พันรอบแกนเฟอร์ไรท์จากสูตร

$$A_{w2} = \frac{k \cdot W}{N_2} \quad : m^2$$

5. คำนวณหาขนาดเบอร์ของขดลวด และต้องเลือกรัศมีของขดลวดทองแดงให้เล็กกว่าความลึกของกระแสที่ไหลบนผิวขดลวดตัวนำ (skin depth) ได้จากสูตร

$$\delta = \frac{6.61}{\sqrt{f}} \quad : cm$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. คำนวณจำนวนเส้นขดลวดด้านทุติยภูมิ จากสูตร

$$N_{wire2} = \frac{A_{w2}}{barearea2}$$

7. คำนวณหาช่องว่างอากาศ (air gap) ได้จากสูตร

$$l_g = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{L} \quad :m$$

8. ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กกระจายโดยรอบที่ขอบหน้าตัดแกนแม่เหล็ก ทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น (Fringing Flux Correction Factor : F) สามารถหาได้จากสูตร

$$F = 1 + \frac{l_g}{S} \ln \left[ \frac{2G}{l_g} \right]$$

9. ปรับลดค่า  $l_g$  จนได้ค่า  $L_b$  ที่ต้องการ  
10. คำนวณหาจำนวนรอบค้ำปฐมภูมิได้จากสูตร

$$N_1 = \frac{N_2}{\alpha} \quad :รอบ$$

11. คำนวณหาขนาดพื้นที่ขดลวดทั้งหมดค้ำปฐมภูมิได้จากสูตร

$$A_{w1} = \frac{k \cdot W}{N_1} \quad :m^2$$

12. คำนวณหาจำนวนเส้นขดลวดค้ำปฐมภูมิได้จากสูตร

$$N_{wire1} = \frac{A_{w1}}{barearea1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบหม้อแปลงที่พิจารณาความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

### Matching transformer with self-Inductance

#### ข้อกำหนด

1 Bmax	=	<input type="text" value="0.2"/>	tesla
2 p	=	1.72E-08	ohm-m
3 u0	=	1.26E-06	
4 Pout	=	18.00	Watt
5 k	=	<input type="text" value="0.2"/>	มีค่า 0.-0.6
6 f	=	100,000	Hz
7 Pcu	=	<input type="text" value="2"/>	Watt
8 Lb	=	5.92E-04	Henry
9 a	=	4.84	
10 La	=	2.53E-05	Henry
11 Pdd	=	20.00	Watt

## การออกแบบหม้อแปลงที่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำค้ำานปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

### Matching transformer with self-Inductance

#### สรุปรายละเอียดการพันหม้อแปลง

#### Matching transformer with self-Inductance

1 ค่าความเหนี่ยวนำค้ำานปฐมภูมิ	$L_a$	=	2.53E-05 Henry
2 ค่าความเหนี่ยวนำค้ำานทุติยภูมิ	$L_b$	=	5.92E-04 Henry
3 อัตราส่วนการแปลง ( $N_2/N_1$ )	$a$	=	4.84
4 ใช้แกนเหล็กเหล็กชนิด	Core Type	=	EI-30
5 ใช้ขดลวดขนาดเบอร์	Wire Number	=	33 AWG
6 จำนวนรอบการพันค้ำานปฐมภูมิ	$N_1$	=	3 รอบ
7 จำนวนเส้นของขดลวดค้ำานปฐมภูมิ	$N_{wire1}$	=	95 เส้น
8 จำนวนรอบการพันค้ำานทุติยภูมิ	$N_2$	=	16 รอบ
9 จำนวนเส้นของขดลวดค้ำานทุติยภูมิ	$N_{wire2}$	=	20 เส้น
10 ความกว้างของช่องอากาศ	$l_g$	=	0.06 mm

## การออกแบบหม้อแปลงที่พิจารณาความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

### Matching transformer with self-Inductance

#### ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดแกนแม่เหล็ก และขนาดขดลวด

##### 1 จากข้อกำหนดและขีดจำกัด คำนวณหาค่า $K_{gr}$

$$K_{gr} = 7.08E-15 \text{ m}^5$$

$$\text{จากสูตร } K_{gr} = (4 \cdot p \cdot P_o \cdot P_o) / (4.44 \cdot k \cdot B_{max} \cdot B_{max} \cdot f \cdot f \cdot P_{cu})$$

$$p = 1.72E-08$$

$$P_o = 18.00 \text{ w}$$

$$B_{max} = 0.2 \text{ Tesla}$$

$$f = 100,000 \text{ Hz}$$

$$P_{cu} = 2 \text{ w}$$

$$k = 0.2$$

##### 2 เลือกขนาดของแกนเพื่อให้ $K_g$ มีค่ามากกว่า $K_{gr}$ ที่คำนวณได้จากข้อ 1

โดยตรวจสอบกับ TAB : core spec

##### 3 คำนวณหาจำนวนรอบ $N_2 = 16.47$ รอบ

$$\text{จากสูตร } N_2 = \sqrt{(3.75 \cdot L_b \cdot P_{dd}) / (4.44 \cdot B_{max} \cdot B_{max} \cdot S \cdot S \cdot f)}$$

$$P_{dd} = 20.00 \text{ w}$$

$$L_b = 5.92E-04 \text{ Henry}$$

$$B_{max} = 0.2 \text{ Tesla}$$

$$S = 9.60E-05 \text{ m}^2$$

$$f = 100,000 \text{ Hz}$$

##### 4 คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำ $A_{w2} = 5.00E-07 \text{ m}^2$

$$\text{จากสูตร } A_{w2} = (k \cdot W) / (2 \cdot N_2)$$

$$k = 0.2$$

$$W = 8.24E-05 \text{ m}^2$$

$$N_2 = 16.47 \text{ รอบ}$$

5 คำนวณหาค่า Skin Effect = 2.09E-04 m 0.20903 mm

จากสูตร Skin Effect=66.1\*1E-3/sqrt(f)

f = 100,000

6 คำนวณจำนวนเส้นขดลวด Nwire2 = 19.59 เส้น

จากสูตร Nwire2=Aw2/bare area2

Aw2 = 5.0044E-07 m<sup>2</sup>

bare area2 = 2.55E-08 m<sup>2</sup>

7 คำนวณหารองว่างอากาศ(air gap)lg = 5.53E-05 m 0.05525 mm

จากสูตร lg=N\*N\*u0\*S/L

N2 = 16.47 รอบ

u0 = 1.26E-06

S = 9.60E-05 m<sup>2</sup>

Lb = 5.92E-04 Henry

8 คำนวณหารอบ N1 = 3.40 รอบ

จากสูตร N1=N2/a

N2 = 16.47 รอบ

a = 4.84

9 คำนวณหานาขดลวดตัวนำ Aw1 = 2.42E-06 m<sup>2</sup>

จากสูตร Aw1=(k\*W)/(2\*N1)

k = 0.2

W = 8.24E-05 m<sup>2</sup>

N1 = 3.40 รอบ

10 คำนวณจำนวนเส้นขดลวด Nwire1 = 94.82 เส้น

จากสูตร Nwire1=Aw2/bare area2

Aw1 = 2.42E-06

bare area1 = 2.55E-08

## การออกแบบหม้อแปลงที่พิจารณาความเหนียวในด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

### Matching transformer with self-Inductance

#### การเลือกขนาดขดลวด

AWG2 =   
 bare area = 2.55E-08  
 Nwire2 = 19.59 เส้น  
 skin effex = 0.2090 mm

AWG1 =   
 bare area = 2.55E-08  
 Nwire1 = 94.82 เส้น

## การออกแบบหม้อแปลงที่พิจารณาความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

### Matching transformer with self-Inductance

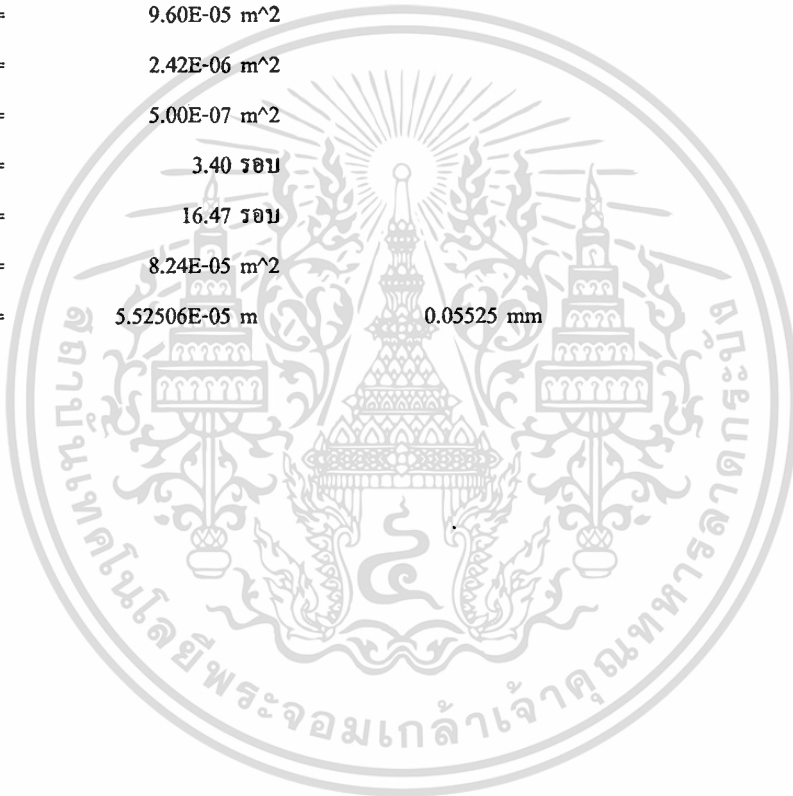
#### การเลือกแกนเฟอร์ไรท์

เลือกแกนแม่เหล็กเป็น  $kgr = 7.1E-15 \text{ m}^5$

จากค่า  $kgr$  ให้เลือกค่า  $kg$  ที่มากกว่าจาก Core spec TAB

ดังนั้นจึงเลือก Core อันดับที่  จะได้ Core ชนิด EI-30

S	=	9.60E-05 m <sup>2</sup>
Aw1	=	2.42E-06 m <sup>2</sup>
Aw2	=	5.00E-07 m <sup>2</sup>
N1	=	3.40 รอบ
N2	=	16.47 รอบ
W	=	8.24E-05 m <sup>2</sup>
lg	=	5.52506E-05 m      0.05525 mm





## 5.8 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับการกรองค่ากระแส (L<sub>r</sub>)

### Gapped Inductor Design using The Core Geometry $K_g$ Approach

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับการกรองกระแสแน่นอนสามารถออกแบบได้เช่นเดียวกันกับการออกแบบหม้อแปลง โดยการกำหนดค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ยอมรับได้ หรืออาจจะกำหนดจากการยอมรับค่าการกระเพื่อม (Regulation) ของกระแสที่เกิดจากการกรองได้สูงสุดเท่าใด ทั้งนี้ค่าของการกระเพื่อม และค่าความสามารถในการรับพลังงาน (Regulation and Energy-Handling) มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่อยู่ที่ 2 ตัว คือ ค่า  $K_g$  และ ค่า  $K_e$  ซึ่งเป็นไปตามสูตรนี้

$$\text{Regulation} \cdot \alpha = \frac{(\text{Energy})^2}{K_g \cdot K_e} [\%] \quad (5.46)$$

ค่าคงที่  $K_g$  สามารถหาได้จากค่า core geometry ตามแต่ละชนิด และขนาดของสารแม่เหล็ก

$$K_g = \frac{W \cdot S^2 \cdot K_u}{t} [\text{cm}^3] \quad (5.47)$$

สำหรับค่าคงที่  $K_e$  สามารถหาได้จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก และทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสูตรนี้

$$K_e = 0.145 \cdot P_o \cdot B_{\text{max}}^2 \cdot X10^{-4} \quad (5.48)$$

โดยที่  $P_o$  คือค่ากำลังทางด้านออก

$$B_{\text{max}} = B_{dc} + \frac{B_{ac}}{2} \quad (5.49)$$

#### 5.8.1 ข้อกำหนด

1. ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ
2. ค่ากระแสตรงที่ไหลผ่าน
3. ค่ากระแสสลับ(ค่ากระแสกระเพื่อม) ที่ยอมรับได้หรือไหลผ่าน ( $\Delta I$ )
4. ค่าความสูญเสีย และค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยอมรับได้

นอกจากนี้ต้องคำนึง และกำหนดค่าของ  $B_{dc}$  และ  $B_{ac}$  ที่ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้สารแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัว นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบคุณสมบัติว่าขนาด และชนิดของสารแม่เหล็กที่เลือกมาใช้นั้น สามารถให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่าไร ต้องเลือกให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำมากที่สุด ในขณะที่สารแม่เหล็กมีขนาดเล็กที่สุด สำหรับชนิดของสารแม่เหล็ก และให้ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดได้จากตารางที่ 5.3

ดังนั้นค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่กำหนดได้ ต้องเป็นค่า  $B_{dc} + B_{ac}$  โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.2 และสามารถแสดงให้เห็นเป็นสูตรดังนี้

$$B_{\text{max}} = B_{dc} + B_{ac} [\text{T}] \quad (5.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_{dc} = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N \cdot I_{dc} \cdot 10^{-4}}{l_g + l_m / \mu_r} \quad [\text{T}] \quad (5.51)$$

$$B_{ac} = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N(\Delta \cdot I / 2) \cdot 10^{-4}}{l_g + l_m / \mu_r} \quad [\text{T}] \quad (5.52)$$

รวมสมการทั้งสองจะได้

$$B_{max} = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N \cdot I_{dc} \cdot 10^{-4}}{l_g + l_m / \mu_r} + \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N(\Delta \cdot I / 2) \cdot 10^{-4}}{l_g + l_m / \mu_r} \quad (5.53)$$

Material		Flux density (T)
Magnesil	3% Si. 97% Fe.	1.6
Orthonol	50% Ni. 50% Fe.	1.5
48 Alloy	48% Ni. 50% Fe.	1.2
Permalloy	79% Ni. 17% Fe. 4% Mo.	0.75

ตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุดของแต่ละชนิดสารแม่เหล็ก

ทั้งนี้ตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่กรองกระแส และมีช่องว่างอากาศระหว่างแกนสารแม่เหล็ก สามารถให้เห็นถึงสมการได้ดังนี้

$$L = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S \cdot 10^{-4}}{l_g + l_m / \mu_r} \quad \text{Henry} \quad (5.54)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวของสารแม่เหล็ก(the effective length of the magnetic path) ซึ่งเป็นผลรวมของความยาวของช่องว่างอากาศ  $l_g$  และอัตราส่วนระหว่างความยาวของสารแม่เหล็กกับค่า  $\mu_r$  ทั้งนี้โดยปกติค่าความยาวของช่องว่างอากาศจะยาวกว่าค่า  $l_m / \mu_r$  มาก เนื่องจาก  $\mu_r$  จะมีค่าสูงมาก และจะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$L = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S \cdot 10^{-4}}{l_g} \quad \text{Henry} \quad (5.55)$$

นอกจากนี้แล้วเราต้องพิจารณาการฟุ้งกระจายเส้นแรงที่ช่องว่างอากาศ ทั้งนี้ค่านี้จะมีผลทำให้ ช่องว่างอากาศแคบลง ทำให้มีผลต่อการคำนวณ ค่าของแฟกเตอร์ของการฟุ้งกระจายเส้นแรงที่ช่องว่างอากาศสามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln\left(\frac{2G}{l_g}\right) \quad (5.56)$$

ทั้งนี้หากนำค่าการฟุ้งกระจายเส้นแรงที่ช่องว่างอากาศนำคิดว่ามีผลต่อ  $L$  เราจะได้

สมการใหม่เป็น

$$L = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot A_c \cdot F \cdot x 10^{-4}}{l_g} \text{ Henry} \quad (5.57)$$

ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส

โดยรายละเอียดได้แสดงอยู่แล้วใน โปรแกรมสำเร็จรูปที่นำเสนอต่อไป



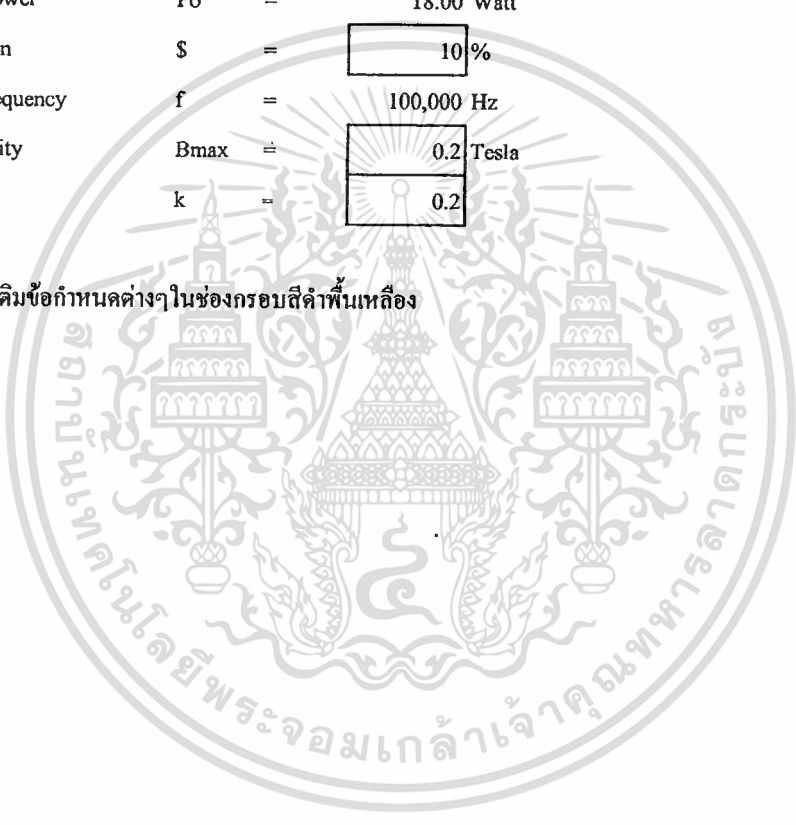
## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทรงกระแสด (L1)

### Gapped Inductor Design using The Core Geometry kg Approach

#### ข้อกำหนด

1 Inductance	L1	=	1.28E-03 Henry
2 dc current	Io	=	0.83 Arms
3 ac current	Iac	=	0.042 Arms
4 Output power	Po	=	18.00 Watt
5 Regulation	\$	=	<input type="text" value="10"/> %
6 Ripple frequency	f	=	100,000 Hz
7 Flux density	Bmax	=	<input type="text" value="0.2"/> Tesla
8	k	=	<input type="text" value="0.2"/>

หมายเหตุ : ให้เติมข้อกำหนดต่างๆในช่องกรอบสี่เหลี่ยมเหลือง



### การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทรงกระแสด (L1)

#### Gapped Inductor Design using The Core Geometry kg Approach

#### สรุปรายละเอียดการพันตัวเหนี่ยวนำทรงกระแสด

1 ค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ	L1	=	1.28E-03 Henry
2 ใช้แกนเฟอร์ไรท์ขนาด	Core Type	=	EI-30
3 ใช้ขดลวดขนาดเบอร์	Wire Number	=	27 AWG
4 จำนวนรอบการพัน	Nr	=	72 รอบ
5 จำนวนเส้นของขดลวด	Nwire	=	3 เส้น
6 ความกว้างของช่องอากาศ	lg	=	0.61 mm



## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทรงกระแสด (L1)

### Gapped Inductor Design using The Core Geometry kg Approach

#### ขั้นตอนการคำนวณตัวเหนี่ยวนำทรงกระแสด (L1)

1 คำนวณหาค่ากระแสรวม  $I = 0.8542 \text{ Arms}$

จากสูตร  $I = I_o + I_{ac}/2$

$I_o = 0.8333 \text{ Arms}$

$I_{ac} = 0.0417 \text{ Arms}$

2 คำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้  $\text{Energy} = 4.68E-04 \text{ W-s}$

จากสูตร  $\text{Energy} = L1 * I^2 / 2$

$L1 = 1.28E-03 \text{ Henry}$

$I = 0.8542 \text{ Arms}$

3 คำนวณหาค่าคงที่ ke The electrical condition constant  $ke = 1.04E-05$

จากสูตร  $ke = 0.145 * P_o * B_m * B_m * 1E-4$

$P_o = 18.00 \text{ Watt}$

$B_m = 0.2 \text{ Tesla}$

4 คำนวณหาค่า kgr  $kgr = 2.09E-03 \text{ cm}^5$

จากสูตร  $kgr = (\text{Energy}) * (\text{Energy}) / (ke * \$)$

$\text{Energy} = 4.68E-04 \text{ W-s}$

$ke = 1.04E-05$

$\$ = 10 \%$

#### 5 ทำการเลือกขนาดของแกนเหล็ก

EI-30

6 คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า = 296 A/cm<sup>2</sup>

จากสูตร  $J=2*(Energy)*1E4/(Bm*Ap*k)$

Energy = 0.0004676 W-s

Bm = 0.2 Tesla

Ap = 0.79 cm<sup>4</sup>

k = 0.2

7 คำนวณหาค่าพื้นที่ขดลวด Aw = 2.89E-03 cm<sup>2</sup>

จากสูตร  $Aw=I/J$

I = 0.8542 A

J = 296 A/cm<sup>2</sup>

8 เลือกขนาดขดลวด AWG No: 27

9 คำนวณจำนวนเส้นขดลวด Nwire = 2.83 เส้น

จากสูตร Nwire = Aw/bare area

Aw = 2.89E-03 cm<sup>2</sup>

bare Area = 1.02E-03 cm<sup>2</sup>

10 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่ประสิทธิภาพ = 0.618 cm<sup>2</sup>

จากสูตร  $Wa(eff)=W*S3$

W = 0.8240 cm<sup>2</sup>

S3 = 0.75

11 คำนวณหาจำนวนรอบในการพัน N = 81 รอบ

จากสูตร  $N=Wa(eff)*S2/Aw$

Wa(eff) = 0.38775 cm<sup>2</sup>

S2 = 0.6

Aw = 2.89E-03 cm<sup>2</sup>

12 คำนวณหาค่าความยาว gap  $lg = 6.12E-02 \text{ cm}$

จากสูตร  $lg = 1.26 * N * N * S * 1E-8 / L$

$N = 81 \text{ รอบ}$

$S = 0.96 \text{ cm}^2$

$L = 1.28E-03 \text{ Henry}$

13 คำนวณหาค่าที่กระจายเส้นแรงที่ gap ( amount of fringing flux )

$F = 1.25$

จากสูตร  $F = 1 + (lg/S) \ln(2 * G / lg)$

$lg = 6.12E-02 \text{ cm}$

$S = 0.96 \text{ cm}^2$

$G = 1.6 \text{ cm}$

14 คำนวณหาค่าจำนวนรอบการพัน เมื่อรวมค่าที่กระจายแล้ว

$Nf = 72 \text{ รอบ}$

จากสูตร  $N = \sqrt{lg * L / (1.26 * S * F * 1E-8)}$

$lg = 6.12E-02 \text{ cm}$

$L = 1.28E-03 \text{ Henry}$

$S = 0.96 \text{ cm}^2$

$F = 1.25$



### การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทรงกระสวย (L1)

#### Gapped Inductor Design using The Core Geometry kg Approach

#### ค่าคงที่ต่างๆในการคำนวณ

k	=	0.4
S3	=	0.75
S2	=	0.6

#### ค่าข้อมูลที่เกิดขึ้นในการคำนวณ

1 I	=	0.8542 A
2 Energy	=	4.68E-04 W-s
3 ke	=	1.04E-05
4 kgr	=	2.09E-03 cm <sup>5</sup> <b>2.09E-13 m<sup>5</sup></b>
5 J	=	296 A/cm <sup>2</sup>
6 Aw	=	2.89E-03 cm <sup>2</sup>
7 Wa(eff)	=	0.6180 cm <sup>2</sup>
8 N(no F)	=	81 รอบ
9 lg	=	6.12E-02 cm      0.61 mm
10 F	=	1.25
11 Nf	=	72 รอบ
12 R	=	9.02E-02 Ohms
13 Pcu	=	0.066 w
14 %	=	0.37 %
15 Bm	=	0.13 Tesla
16 Bac	=	0.003 Tesla

โปรแกรมช่วยการออกแบบที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทรงกระบอก (L1)

### Gapped Inductor Design using The Core Geometry by Approach

#### การเลือกขนาดขดลวด

AWG No:	=	<input type="text" value="27"/>	
Bare Area	=	$1.021 \text{ cm}^2 * 10^{-3}$	0.00102 $\text{cm}^2$
Aw	=	2.89E-03 $\text{cm}^2$	
Insulated Aw	=	0.00932 $\text{cm}^2$	
Wire Resistance	=	209 micro-Ohms/cm	
Nwire	=	2.83 เส้น	



## การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทรงกระแสด (LI)

### Gapped Inductor Design using The Core Geometry kg Approach

#### การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรท์

การคำนวณขนาดแกนเหล็กจะได้  $k_{gr} = 2.31E-03 \text{ cm}^5$

จากค่า  $k_{gr}$  ให้เลือกค่า  $k_g$  ที่มากกว่าจาก Core spec TAB

ดังนั้นจึงเลือก Core อันดับที่

13

จะได้ Core ชนิด

EI-30

$k_g$	=	1.31E-01 $\text{cm}^5$
$A_p$	=	0.79104 $\text{cm}^4$
MLT	=	6.00 cm
S	=	0.96 $\text{cm}^2$
W	=	0.824 $\text{cm}^2$
At	=	6.00 cm
G	=	1.60 cm
MPL	=	5.79 cm
W <sub>rfe</sub>	=	30 g
lg	=	0.61 mm

โปรแกรมช่วยการออกแบบที่สงวนไว้สำหรับใช้ Gapped Inductance.xls ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ Select Core of LI

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

จากการกำหนดค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 24 โวลต์ และกำลังไฟออก 18 วัตต์ ประสิทธิภาพ 90% ให้ค่ากระแสไหลผ่านโหลดเป็น 220 มิลลิแอมป์ และใช้ความถี่ในการสวิตช์เป็น 100 kHz รวมถึงค่าความกว้างของสัญญาณความถี่เท่ากับ 0.5 จะได้ค่าอุปกรณ์ดังนี้

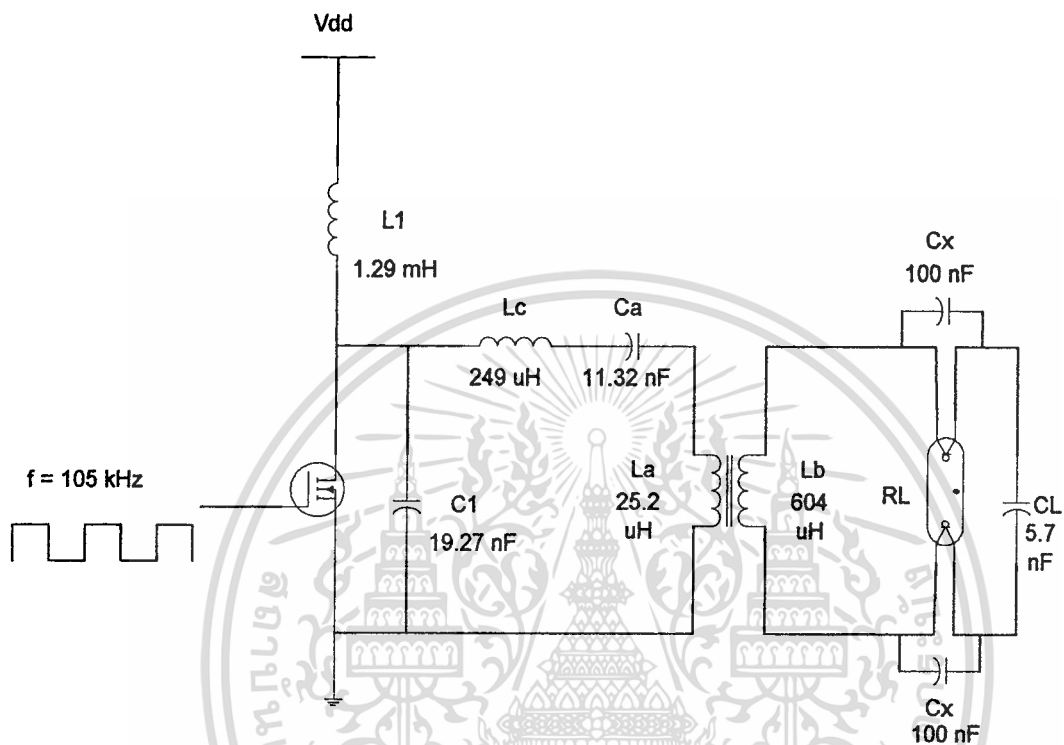
#### 6.1 ค่าของอุปกรณ์ที่ได้จากการคำนวณ และจากการทดลองจริง

	ค่าที่ได้จากการคำนวณ	ค่าจริงที่ได้วัด และทำการทดลอง
L1 =	1.28 mH	1.29 mH
La =	25.3 uH	25.2 uH
Lb =	592 uH	604 uH
Lc =	243 uH	249 uH
C1 =	19.70 nF	19.27 nF
Ca =	11.90 nF	11.32 nF
Cb =	4.28 nF	CL 5.7 nF
f =	100 kHz	105 kHz
Cx =	- nF	100 nF
a =	4.84	
RL =	372 โอห์ม	
Switching Device =		IRF621

อุปกรณ์แต่ละชนิดจำเป็นต้องคำนึงถึงความถี่ใช้งานด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของแกนเฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ ขนาดของขดลวดที่ต้องแน่ใจว่าสามารถรองรับความถี่ที่ใช้งานได้ ทั้งนี้การพันขดลวดควรให้แน่นมากที่สุด และเรียงเป็นระเบียบ โดยพันให้มีจำนวนรอบมากขึ้น แล้วจึงค่อยปรับช่องว่างอากาศ และจำนวนรอบให้เหมาะสมต่อไป นอกไปจากนี้ค่าตัวเก็บประจุทุกตัวต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนึงค่าความทนต่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันได้ เช่น  $C_b$  ควรใช้อย่างต่ำ 430 V ทั้งนี้หากใช้ตัวเก็บประจุที่ดีจะได้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่คาดเคลื่อนน้อยลง



รูปที่ 6.1 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำวงจรรขยาย Class E มาประยุกต์ใช้

## 6.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวัดผล

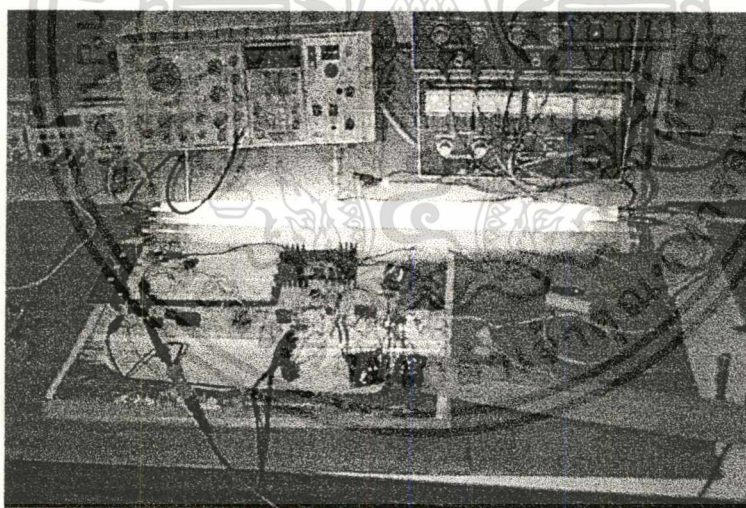
1. ANALAB LABORATORY DC POWER SUPPLY
2. HEWLETT PACKARD 54520 A DIGITAL OSCILLOSCOPE 500 MS A/S 500 MHz
3. HEWLETT PACKARD 33120 15 MHz FUNCTION / ARBITRARY WAVEFORM GENERATOR
4. DIGITAL POWER METER YOKOGAWA MODEL 2531

## 6.3 ขั้นตอนในการอุ่นไส้ และจุดหลอด (Ignition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้เพื่อให้การอุ่นไส้หลอดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมขั้วหลอด จึงได้ทำการต่อขานานตัวเก็บประจุขนาด 100 นาโนฟารัด ที่ขั้วคาโทดทั้งสองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และเปลี่ยนค่า  $C_b$  เป็น 5.7 นาโนฟารัด (CL: โดยการนำตัวเก็บประจุขนาด 120 นาโนฟารัด 2 ตัวมาอนุกรมกัน) ทั้งนี้หากนำค่าตัวเก็บประจุทั้งสามที่อนุกรม มาคำนวณจะมีค่าคาปาซิแตนซ์โดยรวมเป็น 5.12 นาโนฟารัด จากการทดลองจริงจำเป็นต้องขยับความถี่เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยใช้ความถี่ 105 kHz

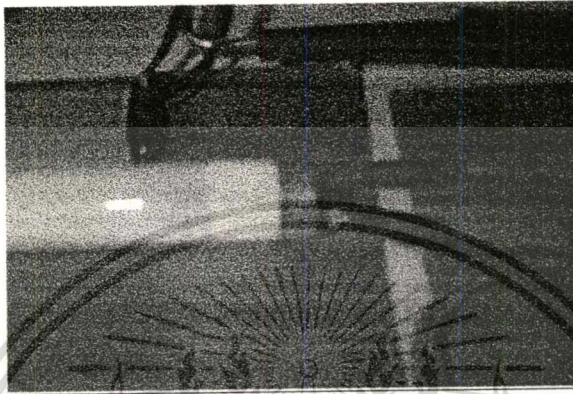
ผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าวงจร Class E สามารถให้ค่าแรงดันที่ตกคร่อมหลอดใกล้เคียงค่าชาชน์มากโดยสังเกตได้จากรูป 6.11 และที่ความถี่ที่สูงค่าความต้านทานหลอดเป็นค่าความต้านทานรีซิสแตนซ์เพียงอย่างเดียวจริง ทั้งนี้เทียบกับผลการทดลองที่ใช้ภาระจำลอง ที่เป็นค่าความต้านทานรีซิสแตนซ์เพียงเดียวมาเป็นภาระแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะให้รูปร่างคลื่นแรงดัน กระแส และเฟสใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งวงจรนี้ยังให้ปรากฏการณ์ในการจุดหลอดครบ 3 กระบวนการ กล่าวคือมีการอุ่นไส้หลอด การจุดหลอด และการทำงานเมื่อเสถียรภาพ ทั้งค่าขนาดและรูปร่างสังเกตได้จากรูปภาพดังต่อไปนี้



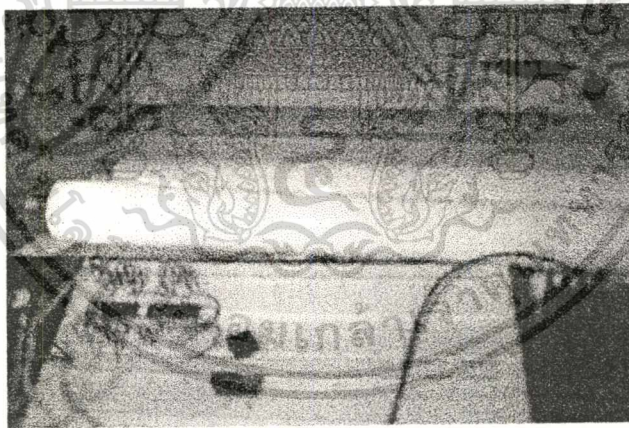
รูปที่ 6.2 ภาพวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยรวม

ช่วงแรกของการอุ่นไส้หลอด ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 6.3 จะมีการดึงกำลังด้านเข้าค่อนข้างมาก กล่าวคือ ต้องใช้กระแสตรงถึง 1.6447 A นั้นหมายถึงต้องใช้  $P_{in} = 24 \times 1.6447 = 39.57$  Watt เนื่องมาจากวงจรขยาย Class E ทำงานในสถานะไม่เหมาะสม อันเป็นผลมาจากค่าความต้านทานหลอดไม่ได้แปลงกลับสู่วงจรในค่าความต้านทานที่เหมาะสมของวงจร Class E สามารถสังเกตได้จากรูปคลื่น  $V_{ds}$  ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 6.14 ในขณะที่อุ่นไส้แรงดันที่ตกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อมขั้วหลอดจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเป็น 9 Vp อันเป็นสาเหตุมาจากค่าความต้านทานที่ไส้หลอดเพิ่มขึ้น เนื่องจากไส้หลอดร้อนขึ้น และค่าแรงดันที่คร่อมหลอดจะเพิ่มขึ้นจนถึง 300 Vp ก่อนที่หลอดจะเกิดการจุดหลอด (Ignition) พร้อมทั้งจะติดโดยสมบูรณ์ ส่วนในรูปที่ 6.4 แสดงการเกิดการจุดหลอด



รูปที่ 6.3 แสดงขั้นตอนในการอุ่นไส้หลอด



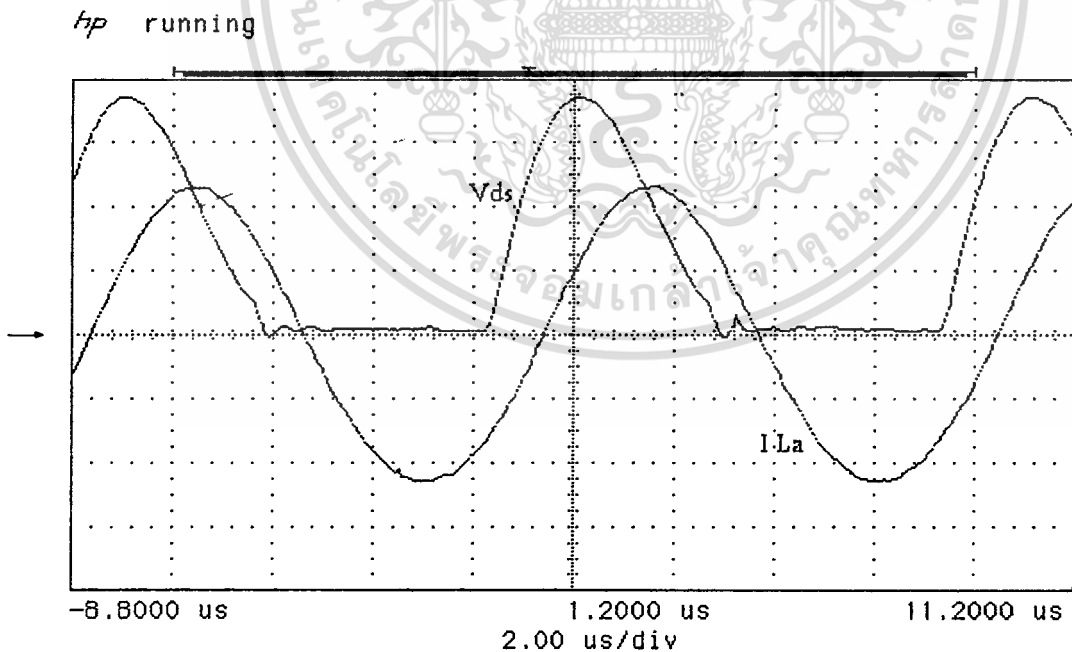
รูปที่ 6.4 แสดงการเกิด Ignition ก่อนหลอดจะติดสว่างสมบูรณ์

จากการทดลองนั้นค่าอุปกรณ์ที่เกิดความสูญเสียมากที่สุดนั้นจะเป็นตัวเหนี่ยวนำ Lc เนื่องแรงดันที่ตกคร่อมขณะที่วงจรทำงานนั้นจะมีค่าสูงมาก ในการออกแบบนั้นควรใช้แกนแม่เหล็กที่มีค่าความซึมซาบที่สูง เพื่อให้จำนวนรอบในการพันน้อยที่สุด รวมไปถึงใช้ขดลวดหลายเส้น และขนาดเล็กเนื่องจากระวังผลกระทบจากสกินเอฟเฟกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 ขั้นตอนการที่หลอดติดโดยสมบูรณ์

ภายหลังจากที่หลอดติดโดยสมบูรณ์ ค่ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเหลือเพียง 0.8365 A นั้นหมายถึงกำลังต้านเข้าจะลดลงเหลือ 20.120 Watt และแรงดันที่ตกคร่อมหลอดจะลดลงเหลือประมาณ 63.95 Vrms ที่มีรูปร่างใกล้เคียงซายน์มาก ค่า Voltage Crest Factor = 1.4548 ซึ่งใกล้เคียง  $\sqrt{2} = 1.414$  ดังแสดงในรูปที่ 6.11 รวมไปถึงค่ากระแสที่ไหลผ่านหลอดมีรูปร่างใกล้เคียงซายน์มากเช่นกัน ค่า Current Crest Factor = 1.4416 ซึ่งใกล้เคียง  $\sqrt{2} = 1.414$  เช่น โดยเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าถ้าหากเลือกค่า Q ของวงจรให้มีค่าสูงมากพอ ในการทดลองนี้ใช้ค่า  $Q = 10$  ค่ากระแสที่ไหลผ่านค่าภาระจะมีรูปคลื่นเป็นซายน์ นอกจากนี้วงจร Class E ได้ทำงานในสภาวะที่เหมาะสม กล่าวคือค่าความต้านทานหลอดที่ได้รับการคลีปป์ผ่านวงจรจ่ายที่เหมาะสม (Matching Network or Matching Transformer) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานที่เหมาะสมของวงจรขยาย Class E ซึ่งสังเกตได้จากรูปคลื่น  $V_{ds}$  ในรูปที่ 6.5 ที่ตกลงสู่ศูนย์ก่อนที่อุปกรณ์สวิทช์ซึ่งนำกระแส ในรูปที่ 6.6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าไม่มีการตัดกันระหว่างแรงดันที่ตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิทช์ซึ่ง ทำให้วงจรนี้ให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้น

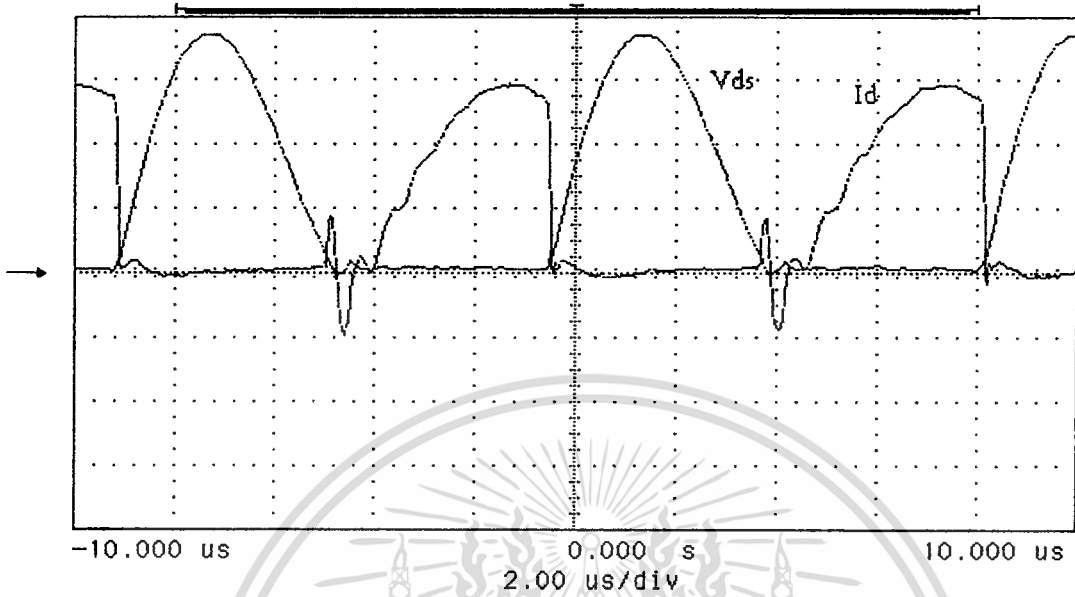


รูปที่ 6.5 แสดงรูปคลื่น  $V_{ds}$  (20 V/div) และ  $I_{La}$  (500 mA/div)

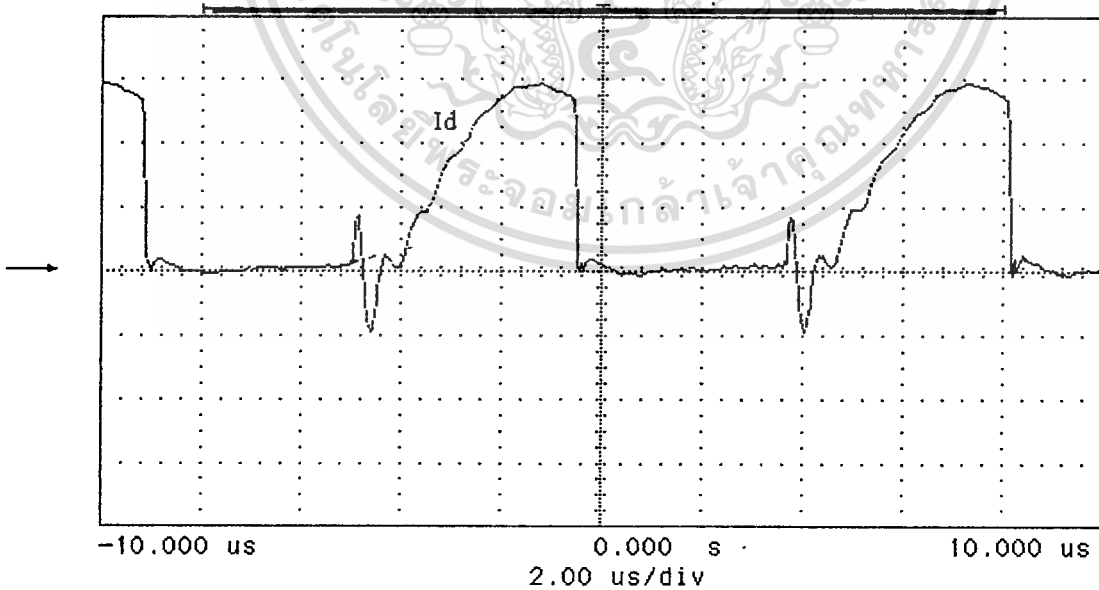
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



hp running

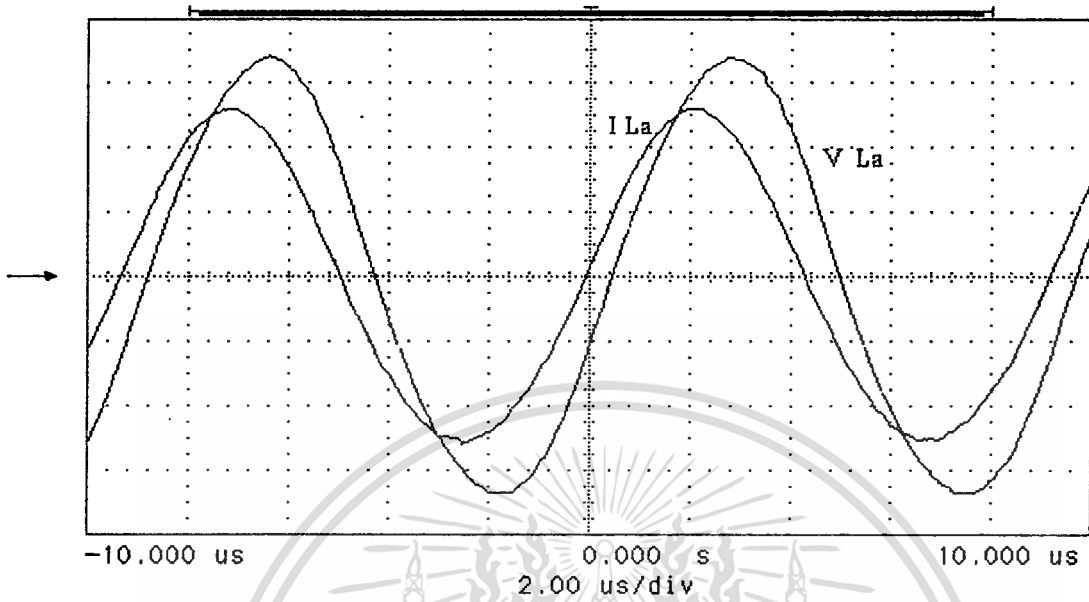
รูปที่ 6.6 แสดงรูปคลื่น  $V_{ds}$  (20 V/div) และ  $I_d$  (500 mA/div)

hp running

รูปที่ 6.7 แสดงรูปคลื่น  $I_d$  (500 mA/div)

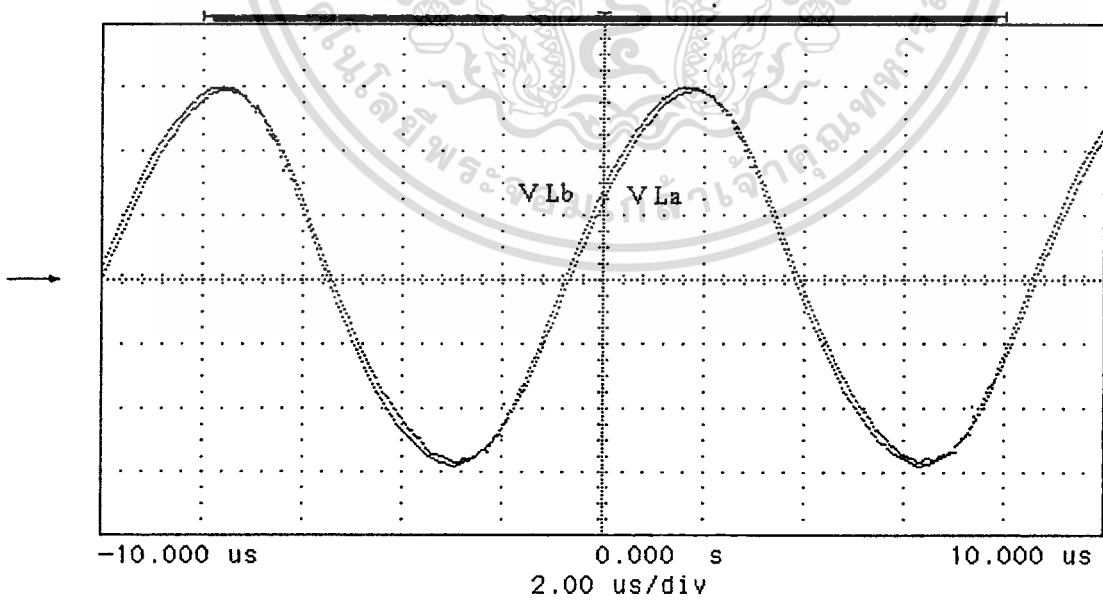
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*hp* stopped



รูปที่ 6.8 แสดงรูปคลื่น V La ( 5 V/div ) และ I La ( 500 mA/div )

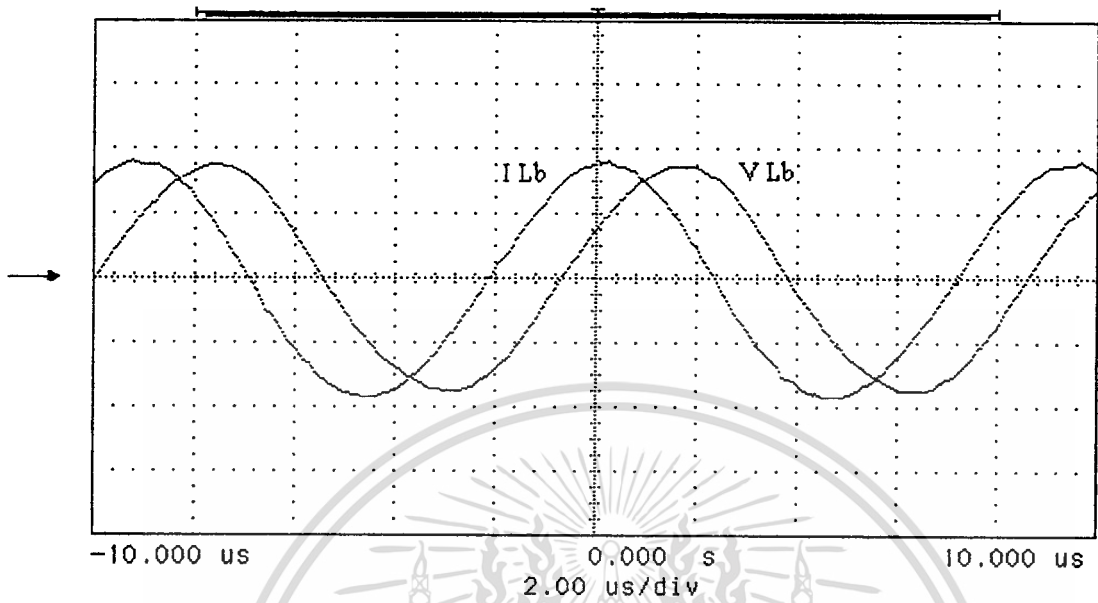
*hp* running



รูปที่ 6.9 แสดงรูปคลื่น V La ( 5.67 V/div ) และ V Lb ( 29.8 V/div )

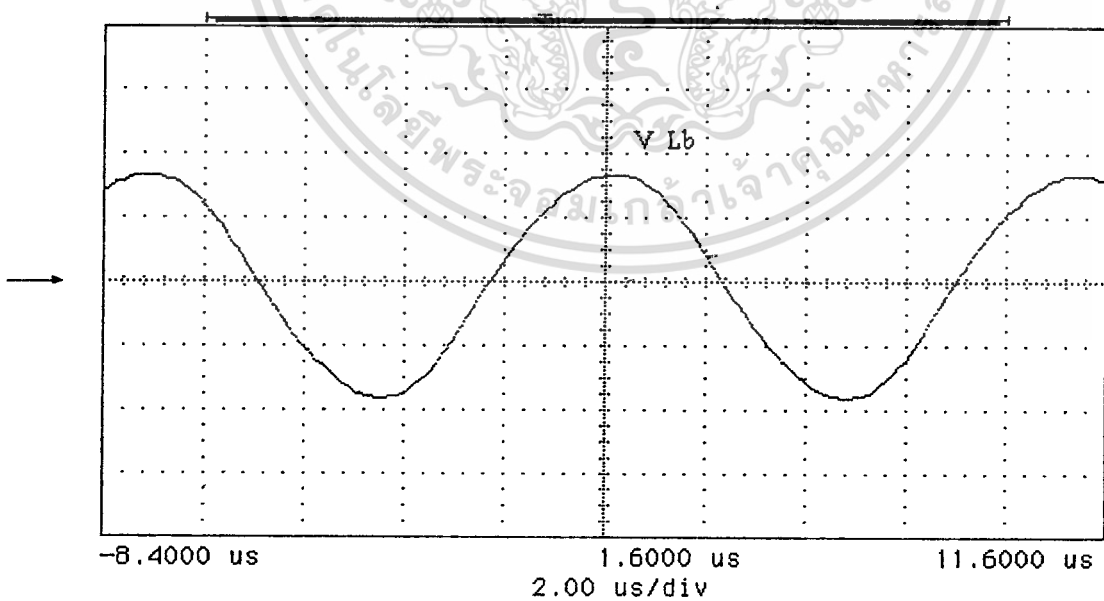
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hp running



รูปที่ 6.10 แสดงรูปคลื่น I Lb (200 mA/div) และ V Lb (50 V/div)

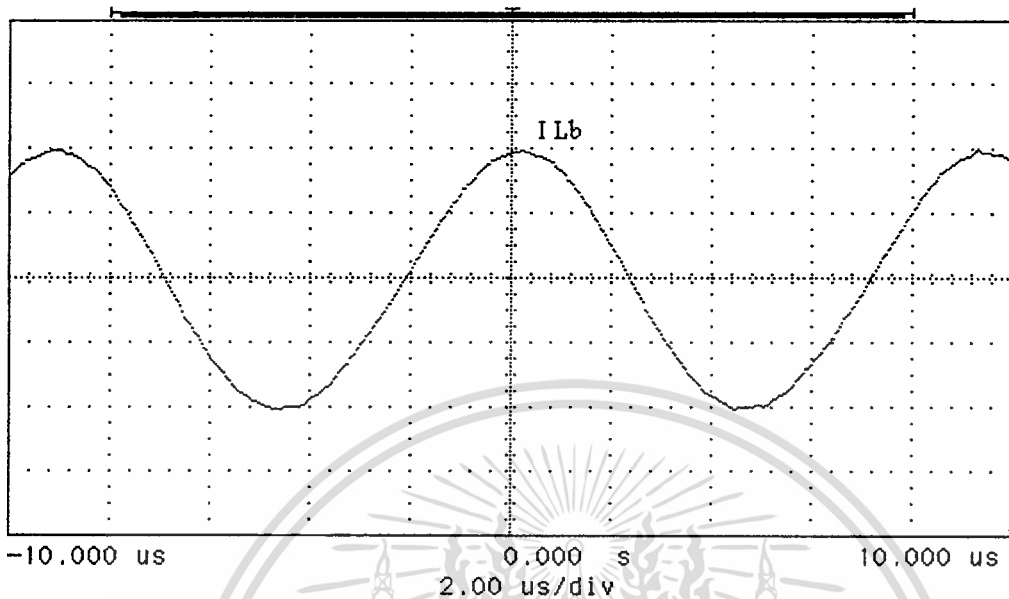
hp running



รูปที่ 6.11 แสดงรูปคลื่น V Lb (50 V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hp running

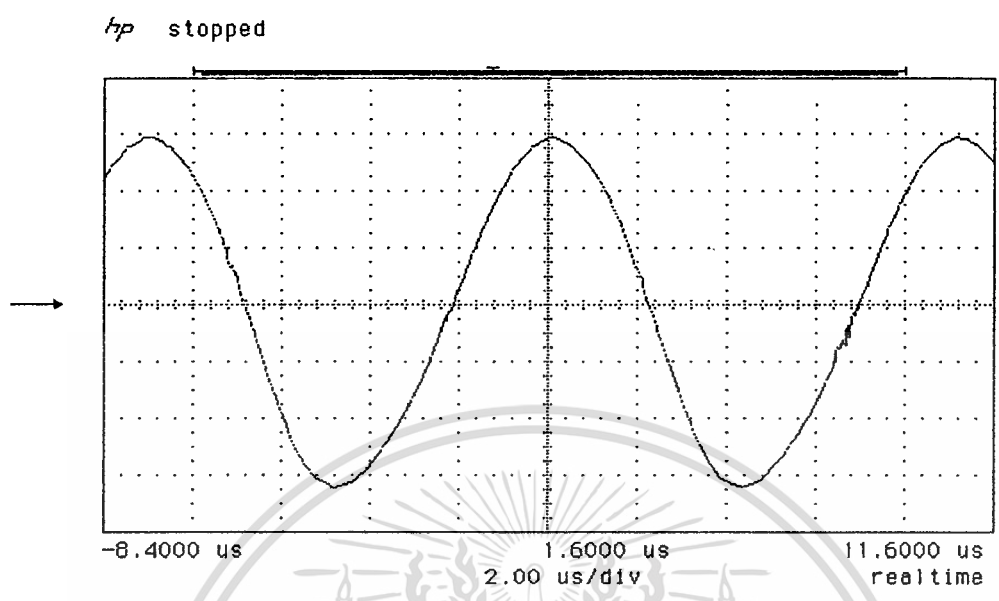
รูปที่ 6.12 แสดงรูปคลื่น  $I_{Lb}$  (200 mA/div)

จากที่ทราบอยู่แล้วว่า การที่จะให้หลอดมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น วงจรจำเป็นต้องมีแรงดันที่ตกคร่อมขั้วหลอดตลอดเวลาที่หลอดทำงาน โดยมีแรงดันตกคร่อมประมาณ 2-4 โวลต์ สังเกตรูปคลื่น ได้ดังรูปที่ 6.13 ทั้งนี้จะต้องใช้กำลังประมาณ 1-2 Watt ๕

จากการทดลองสามารถที่จะลดแรงดันแหล่งจ่ายไฟได้ต่ำถึง 22 Vdc ก็ยังสามารถจุดหลอดได้อยู่ ทั้งนี้ในช่วงก่อนการ Ignition หลอดต้องการแรงดันอย่างต่ำ 300 Vp ก่อนที่หลอดจะติดโดยสมบูรณ์ นั่นหมายถึงวงจรนี้หากได้รับการออกแบบที่ดี ค่า Regulation มีค่าลบได้ถึง -10 % และหากปรับแรงดันแหล่งจ่ายเป็น 30 Vdc หลอดยังคงได้ทำงานโดยสมบูรณ์ แต่จะกินกำลังไฟด้านเข้าเพิ่มขึ้นตามแรงดันแหล่งจ่ายที่มากขึ้น ในขณะที่หลอดก็ให้แสงสว่างที่มากขึ้นเช่นกัน

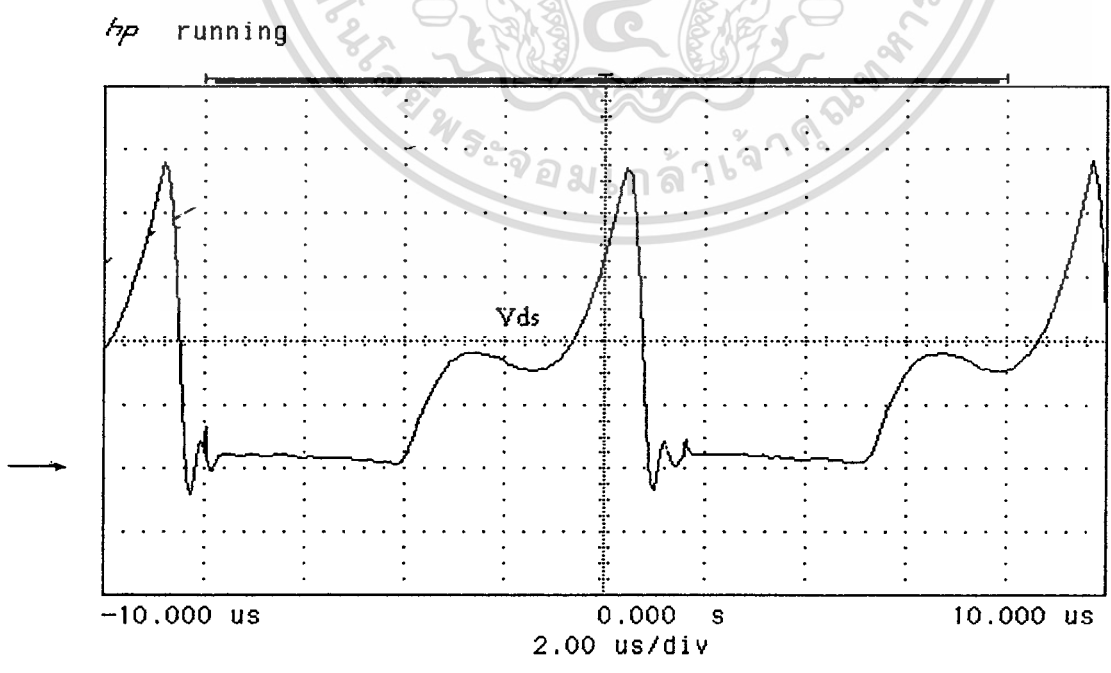
นอกจากนี้วงจรพื้นฐาน Class E ยังให้คุณสมบัติที่ดีในการป้องกัน กล่าวคือ เมื่อเกิดการ Short Circuit โดยการเชื่อมปลายขดลวดด้านทุติยภูมิเข้าไว้ด้วยกัน วงจรยังทำงานโดยไม่เสียหาย ทั้งนี้เนื่องจากวงจรจะกินกำลังลดลงโดยอัตโนมัติ และเมื่อทำการทดสอบ Open Circuit ซึ่งเป็นการจำลองในขณะที่ได้มีการเปลี่ยนหลอด และวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยังคงทำงานอยู่ โดยจะกินกำลังเข้ามากขึ้น ทั้งนี้หากออกแบบวงจรป้องกันเมื่อมีการกินกระแสมากกว่าปกติเป็นระยะเวลาพอสมควรก็ให้ตัดวงจรป้อนสัญญาณที่ไปขับตัวอุปกรณ์สวิทชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมหลอด ขณะหลอดติดสมบูรณ์ มีแรงดันยอดเป็น 3.6 Vp

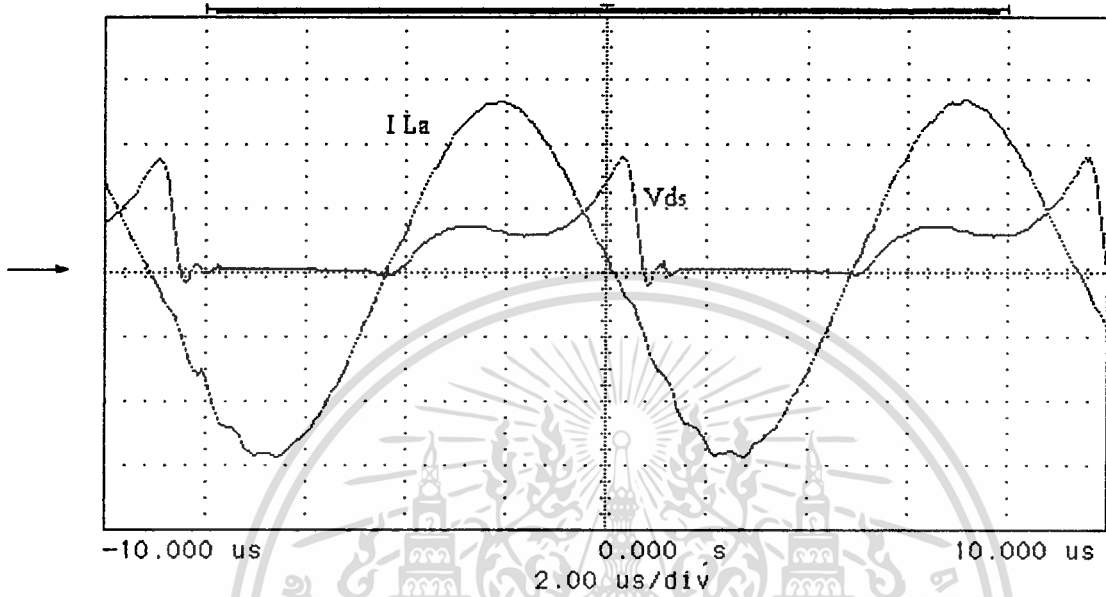
### 6.5 ผลการทดลองในขณะหลอดออก (Open Circuit Test)



รูปที่ 6.14 แสดงรูปคลื่น Vds (20 V/div)

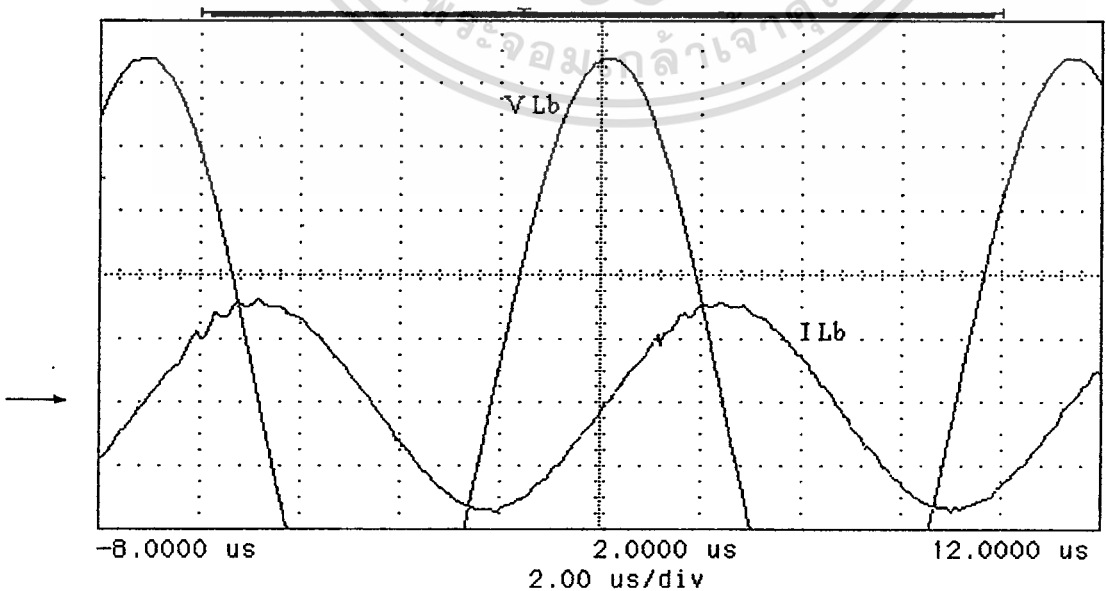
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hp running



รูปที่ 6.15 แสดงรูปคลื่น Vds ( 50 V/div ) และ I La ( 500 mA/div )

hp running



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 6.16 แสดงรูปคลื่น I Lb ( 500 mA/div ) และ V Lb ( 50 V/div )

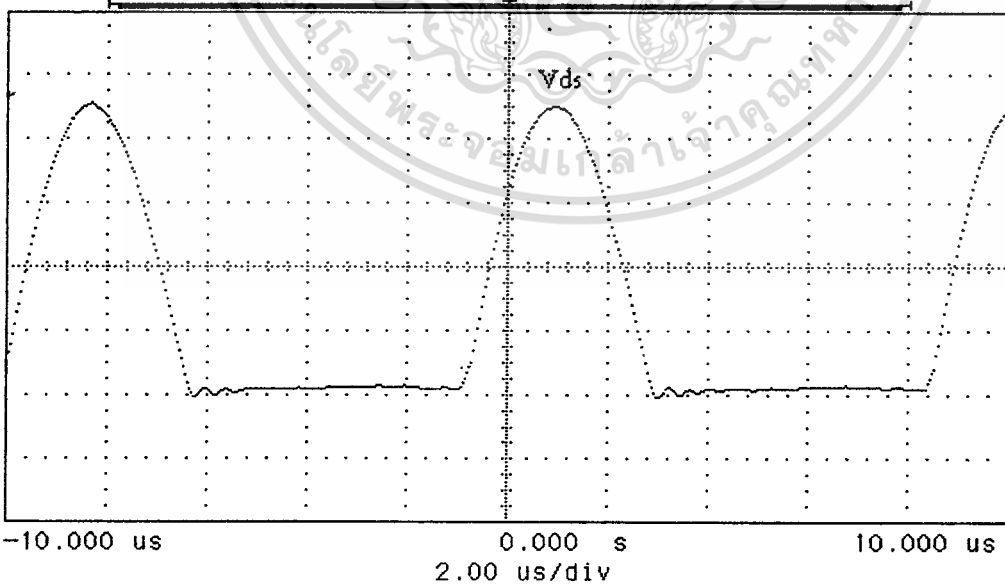
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการนำ Digital Power Meter YAKOGAWA Model 2531 วัดที่ด้านเข้าก่อนหน้า  $L_1$  จะได้ค่าดังต่อไปนี้

แรงดันเข้า	$V_{in} = 24.07 \text{ Vdc}$
กระแสเข้า	$I_{in} = 1.6447 \text{ Vrms}$
กำลังเข้า (Power)	$W = 39.57 \text{ w}$
Apparent Power	$VA = 39.58$
Reactive Power	$VAR = 0.76$
ค่าประกอบกำลัง	$PF = 0.9998$
Degree = 1.09 Lag	
$V_{pk} = 25.0 \text{ Vpk}$	
$A_{pk} = 1.715 \text{ Apk}$	

#### 6.6 ผลการทดลองในขณะช็อตโหลด (Short Circuit Test)

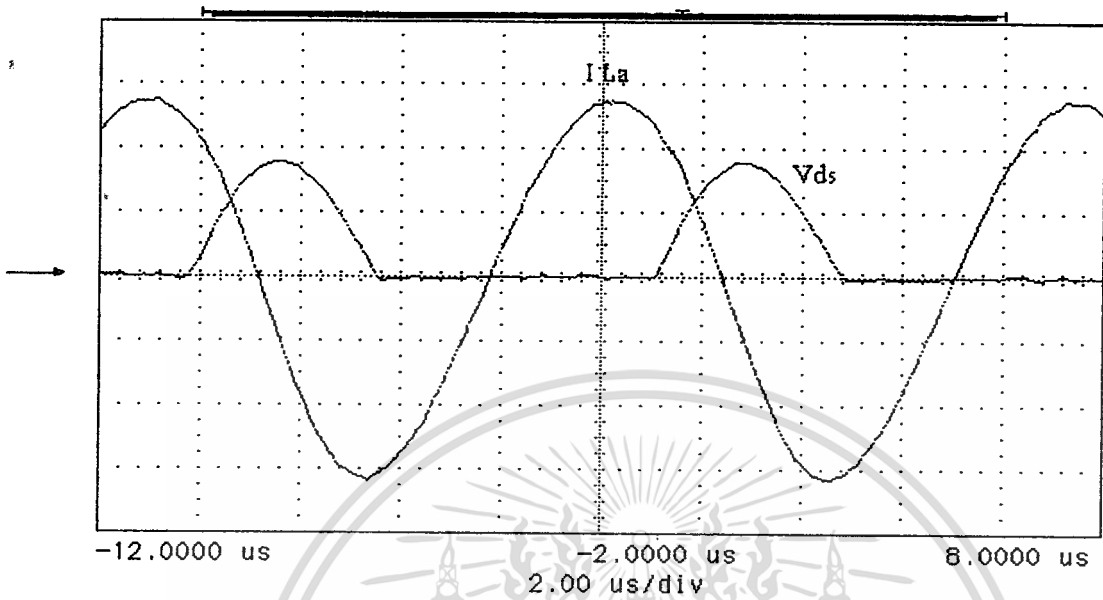
hp running



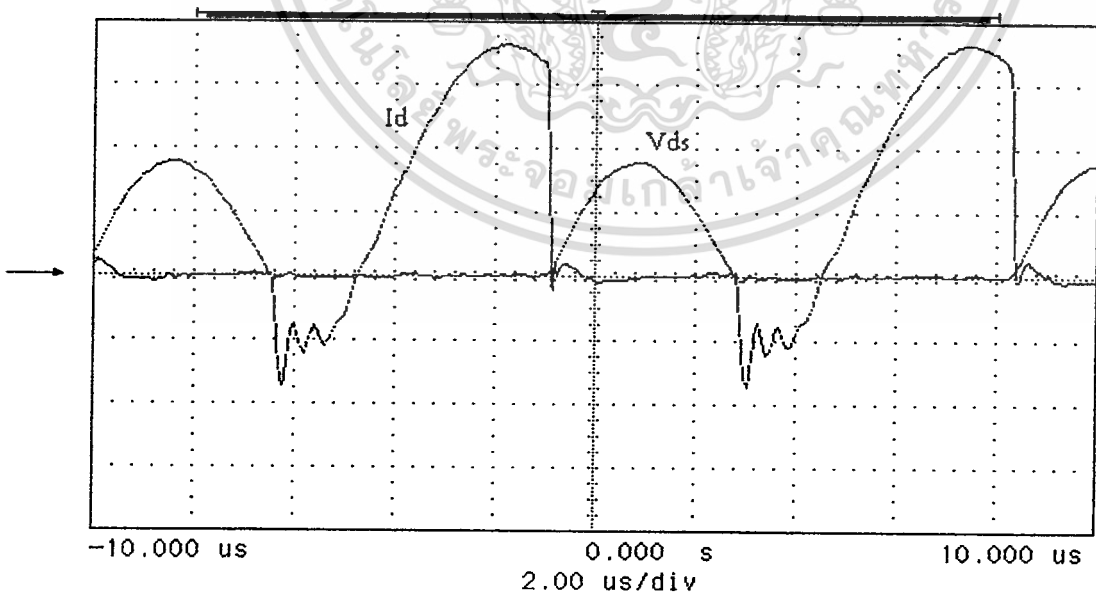
รูปที่ 6.17 แสดงรูปคลื่น  $V_{ds}$  (20 V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hp running

รูปที่ 6.18 แสดงรูปคลื่น  $I_{La}$  (500 mA/div) และ  $V_{ds}$  (50 V/div)

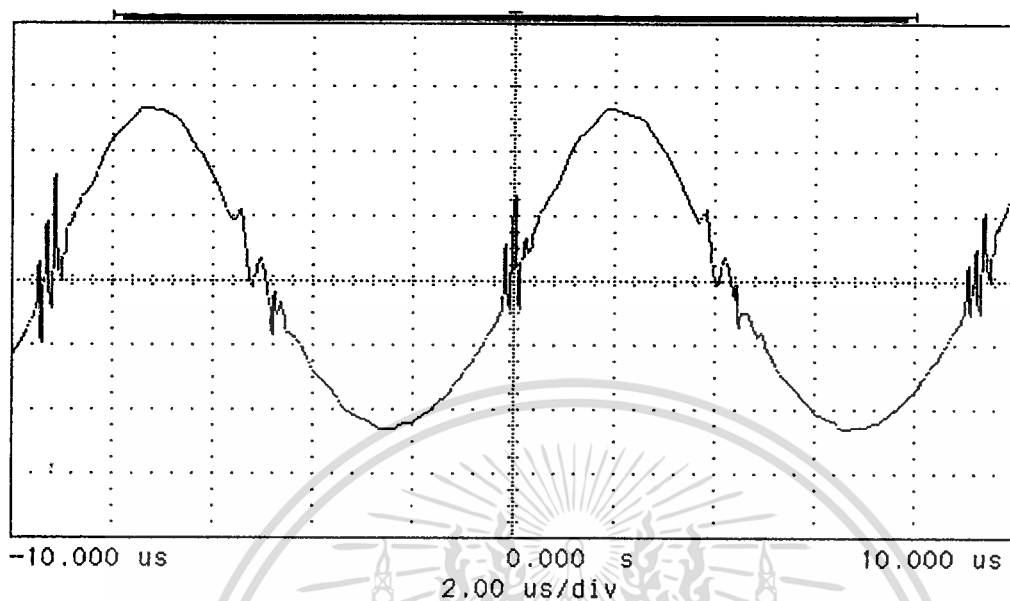
hp running

รูปที่ 6.19 แสดงรูปคลื่น  $I_d$  (500 mA/div) และ  $V_{ds}$  (50 V/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



h<sub>p</sub> stopped



รูปที่ 6.20 แสดงรูปคลื่น V<sub>La</sub> ( 500 mV/div )

จากการนำ Digital Power Meter YAKOGAWA Model 2531 วัดที่ด้านเข้าก่อนหน้า  $L_1$  จะได้ค่าดังต่อไปนี้

แรงดันเข้า	$V_{in} = 24.01 \text{ Vdc}$
กระแสเข้า	$I_{in} = 0.4218 \text{ Vrms}$
กำลังเข้า (Power)	$W = 10.12 \text{ w}$
Apparent Power	$VA = 10.13$
Reactive Power	$VAR = 0.36$
ค่าประกอบกำลัง	$PF = 0.9994$
Degree = 2.05 Lag	
$V_{pk} = 24.2 \text{ Vpk}$	
$A_{pk} = 0.455 \text{ Apk}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.7 เปรียบเทียบการทำงานกับการจำลองโดยใช้โปรแกรม Pspice

การจำลองการทำงานโดย Pspice จะให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง โดยใช้ข้อมูลดังนี้  
 นี้ ทั้งนี้สามารถสังเกตภาพรูปคลื่นได้ในภาคผนวก

### CLASS E FOR ELECTRONIC BALLAST

```

VBATT1      0      24
VIN  10      0      PULSE(0 20 0 0.005E-6 0.005E-6 4.84E-6 9.7E-6)
RMOS 10      3A      1
RL1   2      3      1
RC2   4      5      1E15
*RLAMP 6      7      372
RLAMP 6      7      {RLVAL}
.PARAM      RLVAL=1
.STEP PARAM      RLVALLIST 100 372 2000 8000 100000
RPATH0      7      1E8
L1    1      2      1.29E-3
LA    5      0      2.52E-5
LB    6      7      6.04E-4
LC    3      4      2.49E-4
K     LA    LB      1
C1    3      0      1.927E-8
CA    4      5      1.132E-8
CL    11     12     5.7E-9
CX1   6      11     100E-9
CX2   7      12     100E-9
D     0      3      D1N916A
.MODEL      D1N916A      D      (IS=100E-15 RS=4 CJO=1PF TT=12NS
+      BV=100 IBV=100E-15)
M1    3      3A      0      0      IRF252
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

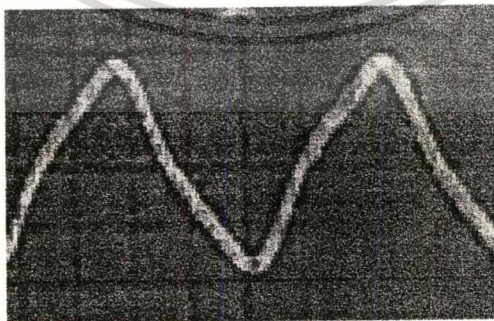
.MODEL      IRF252 NMOS(LEVEL=3 TOX=.10U L=3.0U LD=.5U W=2.0 WD=0
+          XJ=1.2U NSUB=4E14 IS=2.1E-14 RB=0 RD=.01 RS=.065 RDS=2E6
+          VTO=3.7 UO=550 THETA=.1 ETA=0 VMAX=1E6 CBS=1P CBD=3200P
+          PB=.7 MJ=.5 RG=8.8 CGSO=520P CGDO=105P CGBO=1P)
RCATH1     6      11     20
RCATH2     7      12     20
.TRAN      .05E-6 500E-6
.PROBE
.END

```

### 6.8 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หลักการกึ่งคลื่นชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

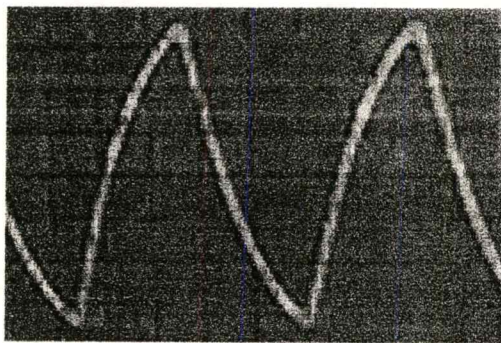
นอกจากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดบีสต์กึ่งออสซิลเลเตอร์ที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟต่ำที่ใช้ในรถขนส่งมวลชนแล้ว ในปัจจุบันได้มีการนำวงจรชนิดกึ่งคลื่นชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (a half bridge series resonant electronic ballast) ตามรูปที่ 6.26

จากการวัดค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ ดังรูปที่ 6.21 และ 6.22 จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนลักษณะของรูปคลื่นจะไม่เป็นรูปไซน์ ดังนั้นค่า Current or Voltage Crest Factor จะต้องมากกว่า 1.414 ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติพื้นฐานของวงจรอยู่แล้ว



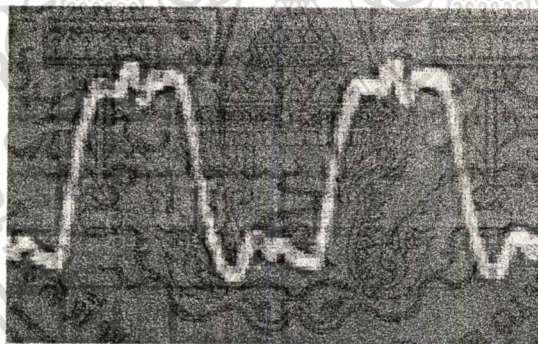
รูปที่ 6.21 แสดงให้เห็นลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมหลอด โดยแรงดันยอดเป็น 90 Vp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



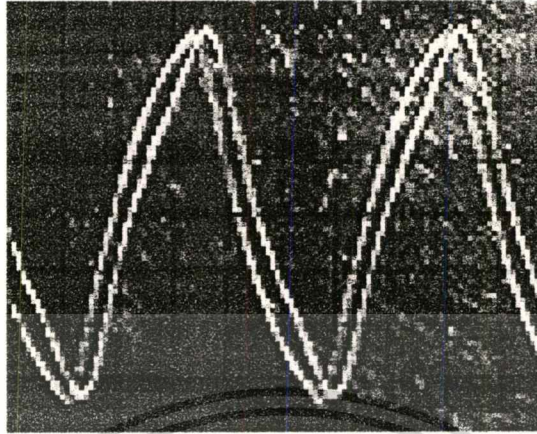
รูปที่ 6.22 แสดงให้เห็นลักษณะรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านหลอด

ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมขั้วคาโทดจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยม ตามที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 6.23 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่ไม่ตัวเก็บประจุต่อคร่อมหลอด และจะเกิดฮาโมนิกที่มีกำลังแรงไปรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ได้



รูปที่ 6.23 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมขั้วคาโทด

ส่วนสุดท้ายแสดงให้เห็นลักษณะเฟสของรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่ผ่านหลอด จะสังเกตเห็นว่ามีการเลื่อนเฟสอยู่เล็กน้อยเช่นกัน



รูปที่ 6.24 แสดงให้เห็นลักษณะเฟสของรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่ผ่านโหลด

## 6.9 ประสิทธิภาพของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E

จากการนำ Digital Power Meter YAKOGAWA Model 2531 วัดที่ด้านเข้าก่อนหน้า  $L_1$  จะได้ค่าดังต่อไปนี้

แรงดันเข้า	$V_{in} = 24.081 \text{ Vdc}$
กระแสเข้า	$I_{in} = 0.8365 \text{ Vrms}$
กำลังเข้า (Power)	$W = 20.120 \text{ w}$
Apparent Power	$VA = 20.127$
Reactive Power	$VAR = 0.376$
ค่าประกอบกำลัง	$PF = 0.9998$
Degree = 1.07 Lag	
$V_{pk} = 24.22 \text{ Vpk}$	
$A_{pk} = 0.859 \text{ Apk}$	

จะเห็นได้ค่าให้ค่าประกอบกำลังที่ใกล้เคียง 1 มาก และจากการวัดที่หลังขดลวดทุติยภูมิ ก่อนเข้าหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะได้

แรงดันออก	$V_{in} = 63.95 \text{ Vrms}$
กระแสออก	$I_{in} = 0.3212 \text{ Vrms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังออก (Power)  $W = 13.83 \text{ w}$

Apparent Power  $VA = 20.54$

Reactive Power  $VAR = 15.21$

ค่าประกอบกำลัง  $PF = 0.672$

Degree = 47.83 Lead

Vpk = 93.03 Vpk

Apk = 0.463 Apk

สามารถคำนวณหาค่า Voltage and Current Crest Factor และประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ได้จากสูตรนี้

$$\text{Voltage Crest Factor} = \frac{V_{pk}}{V_{rms}} = \frac{93.03}{63.95} = 1.4548$$

$$\text{Current Crest Factor} = \frac{A_{pk}}{A_{rms}} = \frac{0.463}{0.3212} = 1.4416$$

$$\text{ประสิทธิภาพวงจร } \eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{13.83}{20.12} = 68.73 \%$$

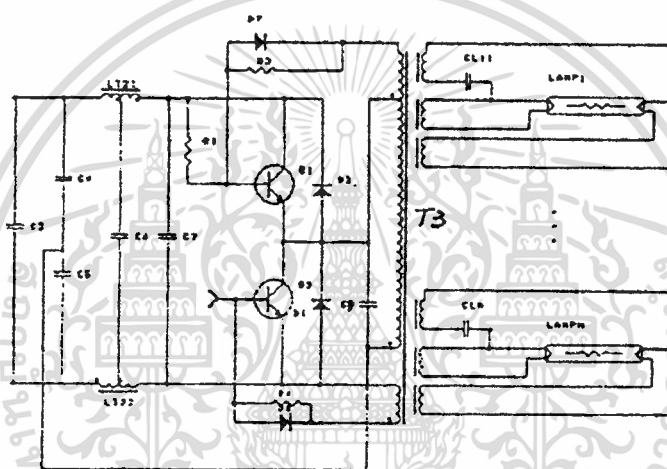
จากการทดลองนั้นค่าอุปกรณ์ที่เกิดความสูญเสียมากที่สุดนั้นจะเป็นตัวเหนี่ยวนำ Lc เนื่องแรงดันที่ตกคร่อมขณะที่วงจรทำงานนั้นจะมีค่าสูงมากประมาณ 275 Vpk ในการออกแบบนั้นควรใช้แกนแม่เหล็กที่มีค่าความซึมซาบที่สูง เพื่อให้จำนวนรอบในการพันน้อยที่สุด รวมไปถึงใช้ขดลวดหลายเส้น และขนาดเล็กเนื่องจากต้องระวังผลกระทบจากสกินเอฟเฟกซ์ ดังนั้นประสิทธิภาพของวงจรจึงเหลือเพียง 68.73 % ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงต่อไป

## 6.10 ผลการเปรียบเทียบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ

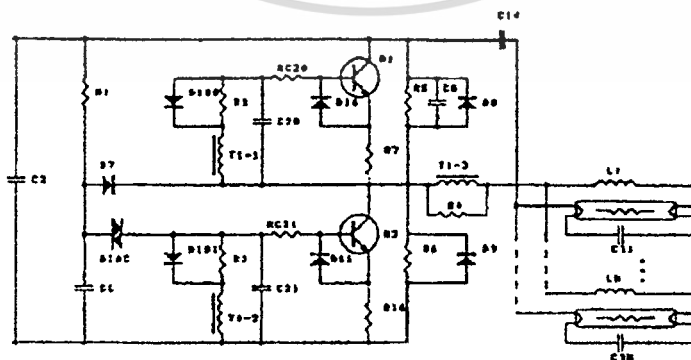
จากวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำมาประยุกต์เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่หลักการที่ง่ายที่สุด คือ อินเวอร์เตอร์ชนิด บล็อกกิ้งออสซิลเลเตอร์ (Blocking Oscillator) ที่ใช้อุปกรณ์สวิทชิงเพียงตัวเดียวนั้น แต่จะให้สัญญาณกระแสกลับในการขับโหลดแบบไม่สมมาตร และบ่อยครั้งที่ขั้นตอนในการจุดหลอด (Ignition) จะเกิดในทิศทางเดียว ซึ่งมีผลโดยตรงให้อายุหลอดสั้นลง และต่อมาได้มีการวางอินเวอร์เตอร์ชนิดพุทพุท (Push-Pull) โดยวงจรนี้จะให้รูปคลื่นกระแสกลับแก่หลอดในลักษณะสมมาตรทั้งซีกบวก และลบ แต่อย่างไรก็ดีวงจรชนิดนี้ จะเกิดการสูญเสียในขณะสวิทชิง (Switching Loss) ซึ่งจุดนี้ต่างจากวงจร Class E ที่จะไม่มีความสูญเสียในขณะ

สวิตช์ที่เกิดขึ้น สามารถที่จะทำงานที่ความถี่สูงมากได้เป็นผลให้ขนาด และน้ำหนักของวงจรมีน้อย ส่วนในตารางที่ 6.1 จะเป็นการเปรียบเทียบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ อันได้แก่

1. วงจร Self-Excited Parallel Resonant Electronic Ballast (PREB)
2. วงจร Self-Excited Series Resonant Electronic Ballast (SREB)
3. วงจร Current-Fed Push-Pull Electronic Ballast (CFPPEB)
4. และ Class E

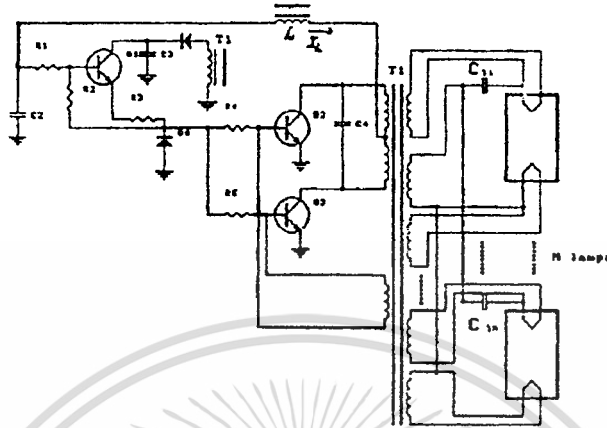


รูปที่ 6.25 วงจร Self-Excited Parallel Resonant Electronic Ballast (PREB)



รูปที่ 6.26 วงจร Self-Excited Series Resonant Electronic Ballast (SREB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.27 วงจร Current-Fed Push-Pull Electronic Ballast (CFPPEB)

	PREB	SREB	CFPPEB	Class E
<b>Starting Voltage</b>	no soft start, high voltage overshoot	soft start	soft start	soft start
<b>Filament Preheating</b>	no	yes	yes	yes
<b>Switch Voltage Stress</b>	$(\pi/2)V_{dc}$	$V_{dc}$	$\pi \cdot V_{dc}$	$3.25 \cdot V_{dc}$
<b>Switch Current Stress</b>	low	high	low	high
<b>Lamp Current Crest Factor</b>	$> \sqrt{2}$	$> \sqrt{2}$	$> \sqrt{2}$	1.4416
<b>Switching Loss</b>	low	high	low	very low
<b>Inherent Short-Circuited Protection</b>	yes	no	yes	yes
<b>Inherent Open-Circuited Protection</b>	yes	yes	yes	yes

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบการทำงานวงจรแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 7

### บทสรุป

จากผลการทดลองจะเห็นจุดเด่นหลายประการในการนำวงจรขยาย Class E มาประยุกต์ใช้เป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในเรื่องการให้แรงดัน และค่ากระแสไฟฟ้าที่เลี้ยงหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์มาก ซึ่งจะเป็นผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของหลอดให้ยาวนานขึ้น อีกทั้งวงจรนี้ยังให้การทำงานครบทั้ง 3 ขั้นตอน กล่าวคือ มีการอุ่นไส้ การจุดหลอด และควบคุมกระแสให้พอเหมาะเมื่อหลอดติดสว่างโดยสมบูรณ์ นอกจากนี้คุณสมบัติเด่นที่สามารถทำงานที่ความถี่สูงมากได้แล้ว ยังไม่มีค่าความสูญเสียเกิดขึ้นในขณะทำการปิด-เปิดอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับวงจรอื่นๆที่จำเป็นต้องหาอุปกรณ์เสริมเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำงานที่ความถี่สูง เพราะตัวคาปาซิเตอร์แผ่นจะมีผลต่อระบบมากขึ้น

และจากการที่เป็นวงจรที่ค่อนข้างง่าย มีอุปกรณ์จำนวนน้อย รวมไปถึงการออกแบบให้มีวงจรขยายที่เหมาะสม ทำให้สามารถประยุกต์วงจรนี้ไปใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้หลายชนิด และขนาดกำลัง แต่ทั้งนี้หากต้องการที่นำวงจรนี้ไปผลิตเพื่อใช้งานจริง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการผลิตโดยใช้อุปกรณ์ที่ได้จากโรงงานที่มีการควบคุมคุณภาพ โดยเฉพาะตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลง แล้วนำไปทดสอบภาคสนามก่อน เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงาน รวมถึงถึงความน่าเชื่อถือของวงจรเมื่อใช้งานจริงในภาคสนาม เนื่องจากการวิจัยนี้ดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมไม่ว่าจากแหล่งจ่ายไฟที่คงที่ ไม่มีการเพิ่มขึ้น หรือลดลง หรือกระชาก, อุณหภูมิ, ความชื้น, การระบายความร้อน รวมไปถึงแมลงต่างๆที่อาจหลุดเข้าไปในวงจร

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พยายามที่รวบรวมข้อมูลต่างๆไว้ให้มากที่สุด เพื่อใช้เป็นแหล่งข้อมูลในการทำวิจัยต่อไป รวมถึงได้พยายามใช้โปรแกรมสำเร็จรูปต่างๆเข้าช่วยในการออกแบบ โดยเฉพาะอย่างได้ใช้โปรแกรม Excel ที่ทุกคนรู้จัก และสามารถเข้าโปรแกรมเพื่อพัฒนาต่อไปโดยง่าย กระผมหวังเป็นอย่างยิ่งที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ทำวิจัยพัฒนาต่อไปทุกท่าน

## บรรณานุกรม

- [1] Georg Lutteke and Hubert C. Reats, "220 V Mains 500-kHz Class E Converter Using a BIMOS", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE-2, No 3, pp.186-193, July 1987..
- [2] Georg Lutteke and Hubert C. Reats, "High Voltage High Frequency Class E Converter Suitable for Miniaturization", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE1, No. 4, pp.193-199, October 1986
- [3] Richard Real, Bela Molnar and Nathan O. Sokal, "Small-Signal Dynamic Analysis of Regulated Class E DC/DC Converter", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE-1, No 2, pp.121-127, April 1986
- [4] Richard Real, Bela Molnar and Nathan O. Sokal, "Class E Resonant regulated DC/DC Power Converter: Analysis of Operations and Experimental Results at 1.5 MHz", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE1, No. 2, pp.111-120, April 1986
- [5] Marian K. Kazimierczuk and Xung T.Bui, "Class E Amplifier with An Inductive Impedance Inverter", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 37, No.2, PP.160-166, April 1990.
- [6] Joseph H. Rockot, "Losses in High Power Bipolar Transistor", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.PE2, No.1, PP.72-80, January 1987.
- [7] Marian K. Kazimierczuk and Krzysztof Puczek, "Class E Tuned Power Amplifier with Antiparallel Diode or Series Diode at Switch, with any Loaded Q, and Switch Duty Cycle", IEEE Transaction on Circuit and Systems, Vol.36, No.9, PP.1201-1209, September 1989.
- [8] Frederick H. Raab, "Idealized Operation of the Class E Tuned Power Amplifier IEEE Transaction on Circuit and Systems, Vol.CAS-24, No.12, PP.725-735, December 1977
- [9] Marian K. Kazimierczuk and Xung T. Bui , "Class E DC/DC Converters with A Capacitive Impedance Inverter", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.36, No.3, PP.425-433, August 1989.

- [10] Emnuel Fluskin, "The Non-Linear Theory of Fluorescent Lamp Circuits", *Int.J.Electronics*, Vol.63, No.3, PP.687-705, 1987.
- [11] J.L. Duarte, J.A.A. Wijntjens and J. Rozenboom, "Designing Light Sources for Solar-Systems", The European Power Electronics Association, pp.78-81, 1993
- [12] Carmelo Locitra, Luigi Malesani, Giorgio Spiazzi, Paolo Tenti, and Antonio Testa, "Single-Ended Soft-Switching Electronic Ballast with Unit Power", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.29, No.2, March/April 1993.
- [13] Rudolph R. Varderber, Oliver C. Morse and Francis M. Rubinstien, "Performance of Electronic Ballast and Controls with 34- and 40- Watt F40 Fluorescent Lamps", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.25, No.6, November/December 1989.
- [14] Yiyong Sun, P.E., "PSpice Modeling of Electronically Ballasted Compact Fluorescent Lamp Systems", *IEEE*, 1993
- [15] Ed Deng and Slobodan Cuk, "Single Stage, High Power Factor, lamp Ballast", *IEEE*, 1994
- [16] Michael Gulko and Sam Ben-Yaakov, "Current Source Push Pull Parallel-Resonant Inverter (CS-PPRI): Theory and Application as A Fluorescent Lamp Driver", *IEEE*, 1993
- [17] Melvin C. Cosby, JR. and R. M. Nelms, "A Resonant Inverter for Electronic Ballast Application", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.41, No.4, August 1994..
- [18] T.-H. YU L.-M. WU and T. -F. Wu, "Comparisons Among Self-Excited Parallel Resonant, Series Resonant AND Current-Fed Push-Pull Electronic Ballasts", *IEEE*, 1994.
- [19] David E. Johnson, John L Hibern and Johnny R. Johnson, "Basic Electric Circuit Analysis", Second Edition, Prentice-Hall, 1991
- [20] Colonel WM. T. Mclyman, "Transformer and Inductor Design Handbook Second Edition, Marcel Dekker Inc., 1988
- [21] นายกิตติ สุขุมคันติ, "การศึกษาเปรียบเทียบการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์" วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2537.

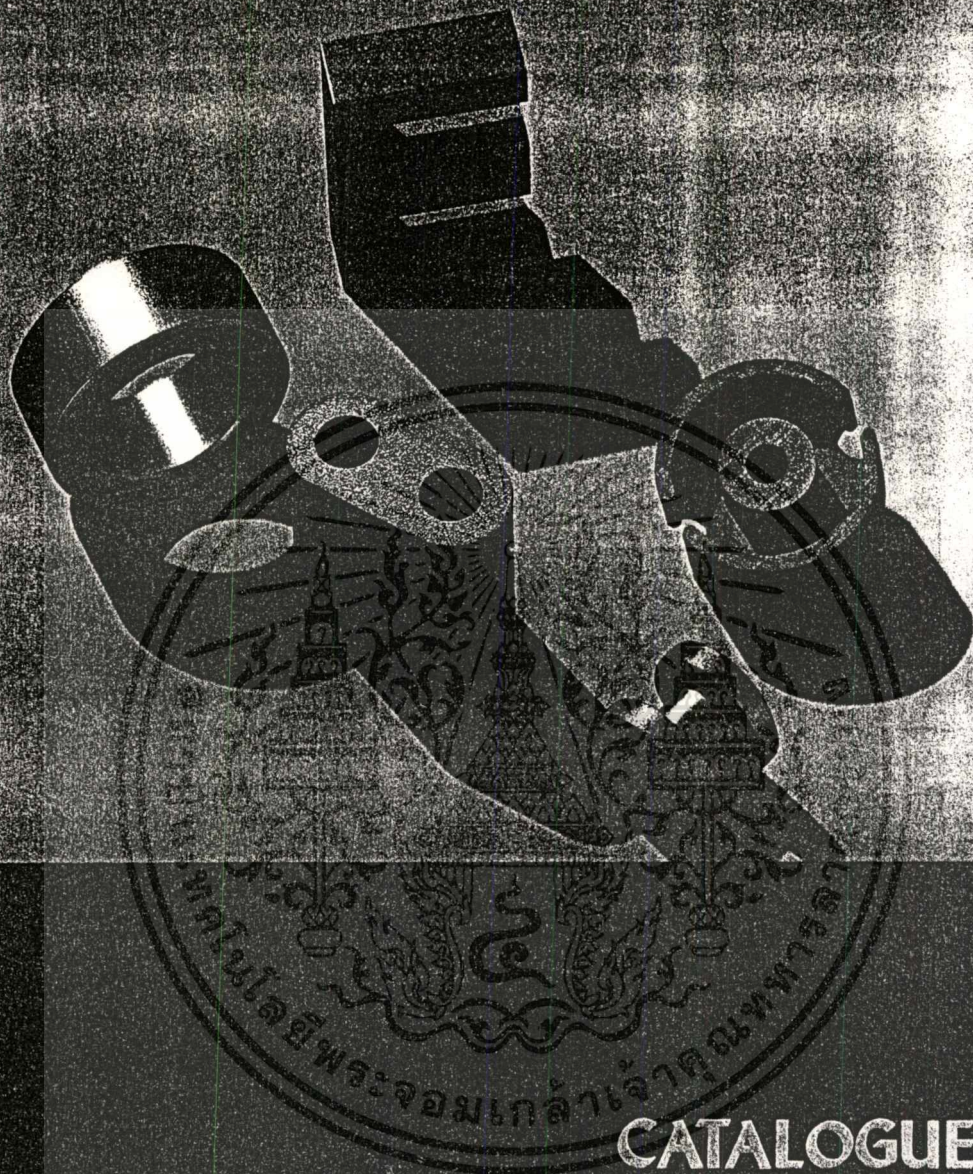
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### รายละเอียดของคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# TOMITA FERRITE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Material Characteristics

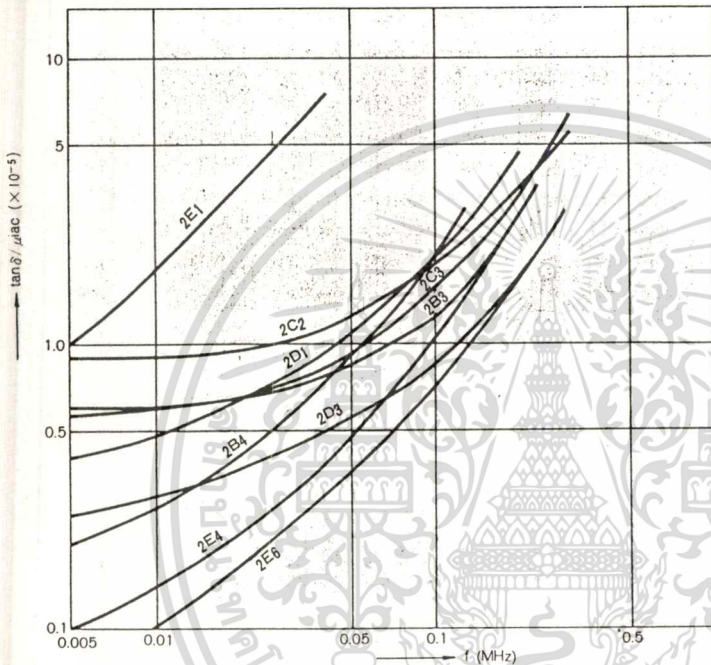
### ■ Standard Characteristics of Materials — (1)

Materials	$\mu_{iac}$	$\tan \sigma / \mu_{iac}$ ( $\times 10^{-3}$ ) 10kHz	$\alpha \mu r$ ( $\times 10^{-4}$ )	TC ( $^{\circ}\text{C}$ )	f (MHz)	DF ( $10^{-6}$ ) 1~10min	$\rho$ ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	Bms (G)	Hcms (Oe)	d g/cm <sup>3</sup>
2 B 3	2700 $\pm 20\%$	0.6	1.0	140	< 0.2	< 3	80	4400 (150e)	0.20	4.9
2 B 4	3500 $\pm 20\%$	0.3	0.1	170	< 0.2	< 1	40	4300 (150e)	0.25	4.9
2 C 2	1100 $\pm 20\%$	0.9	4	200	< 0.3	< 7	20	4200 (150e)	0.35	4.8
2 C 3	2000 $\pm 20\%$	0.6	3	110	< 0.2	< 4	130	3700 (150e)	0.20	4.9
2 D 1	4000 $\pm 20\%$	0.5	0.3	105	< 0.1	< 2	13	3800 (150e)	0.15	4.9
2 D 3	3000 $\pm 20\%$	0.3	-0.4	160	< 0.3	< 2	90	4500 (150e)	0.15	4.9
2 E 1	7000 $\pm 25\%$	1.8	-0.8	150	< 0.1	< 2	1.2	4150 (150e)	0.1	4.9
2 E 4	4000 $\pm 20\%$	0.15	-0.5	180	< 0.2	< 5	10	4500 (150e)	0.15	4.8
2 E 6	3000 $\pm 20\%$	0.1	-0.5	200	< 0.3	—	23	4900 (150e)	0.15	4.9

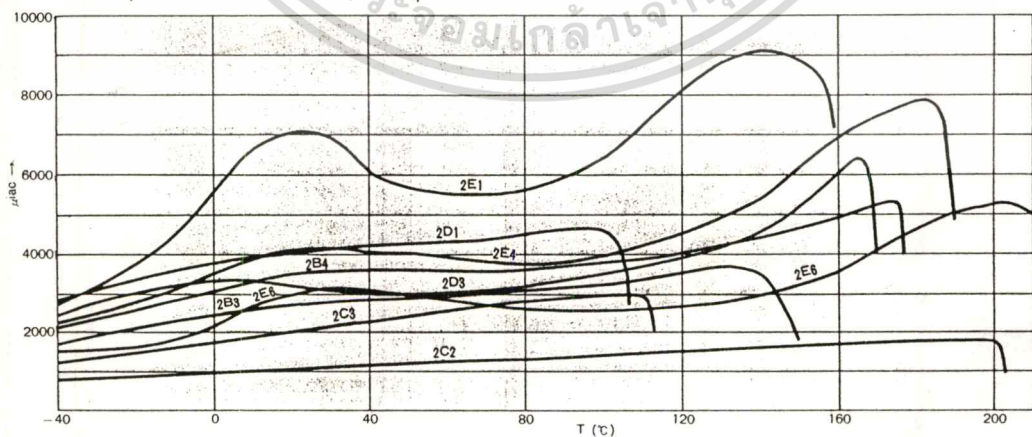
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TOMITA FERRITE

■ Relative Loss Factor as a Function of Frequency

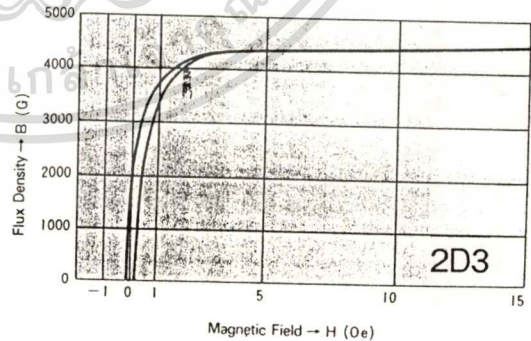
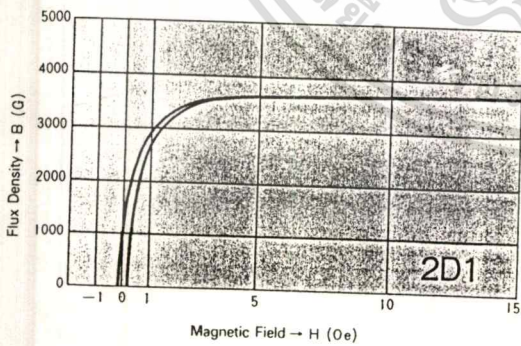
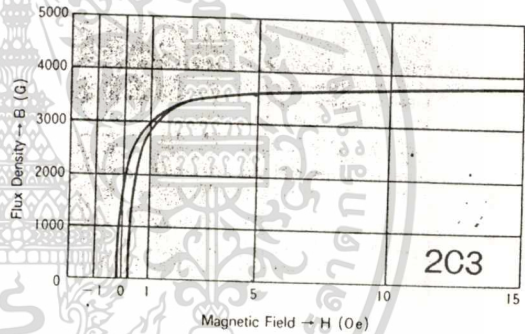
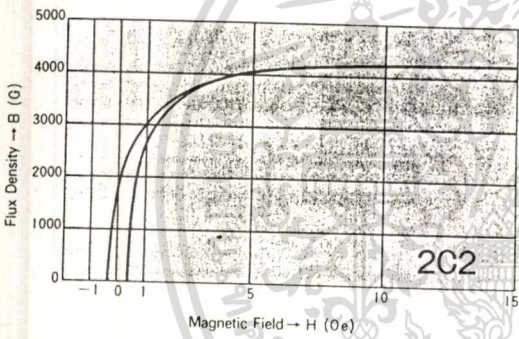
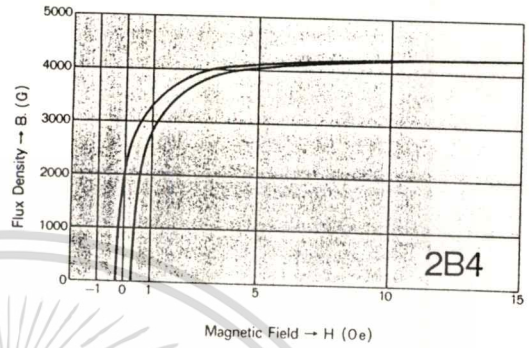
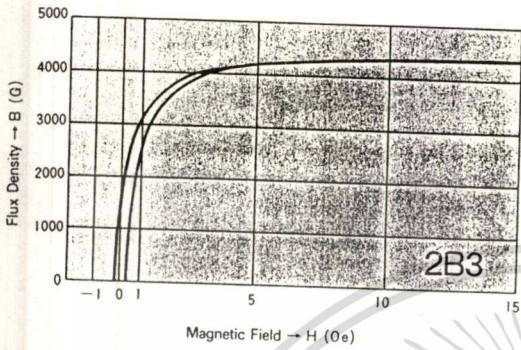


■ Permeability Factor as a Function of Temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

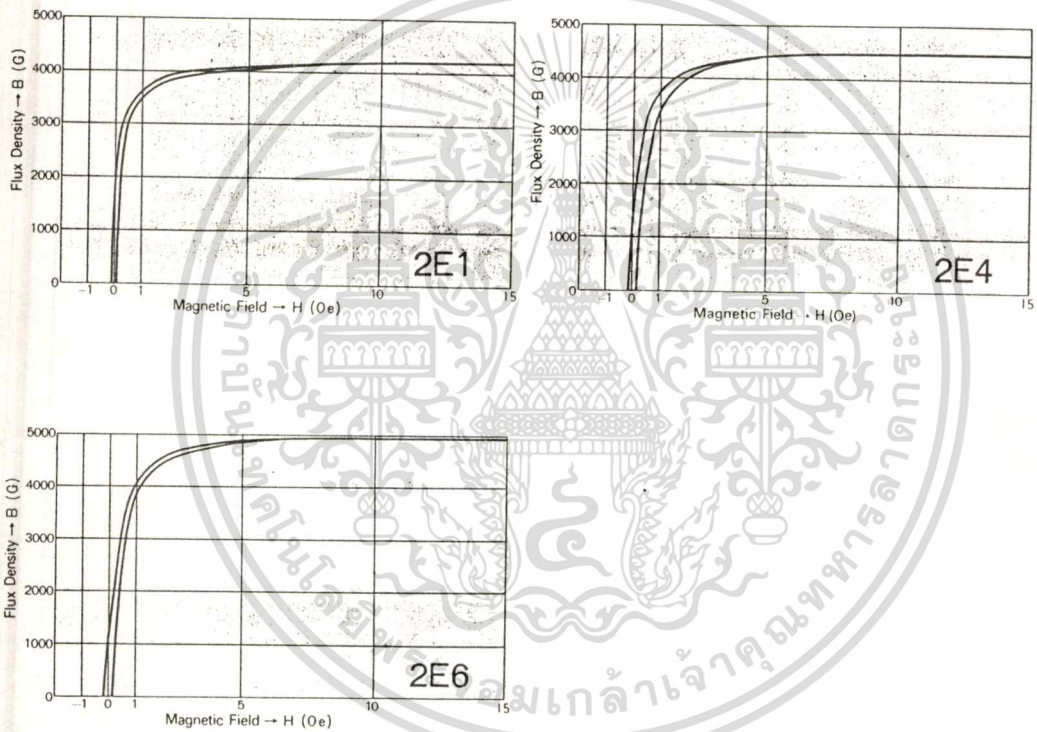
■ Static Magnetization Curves



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# TOMITA FERRITE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

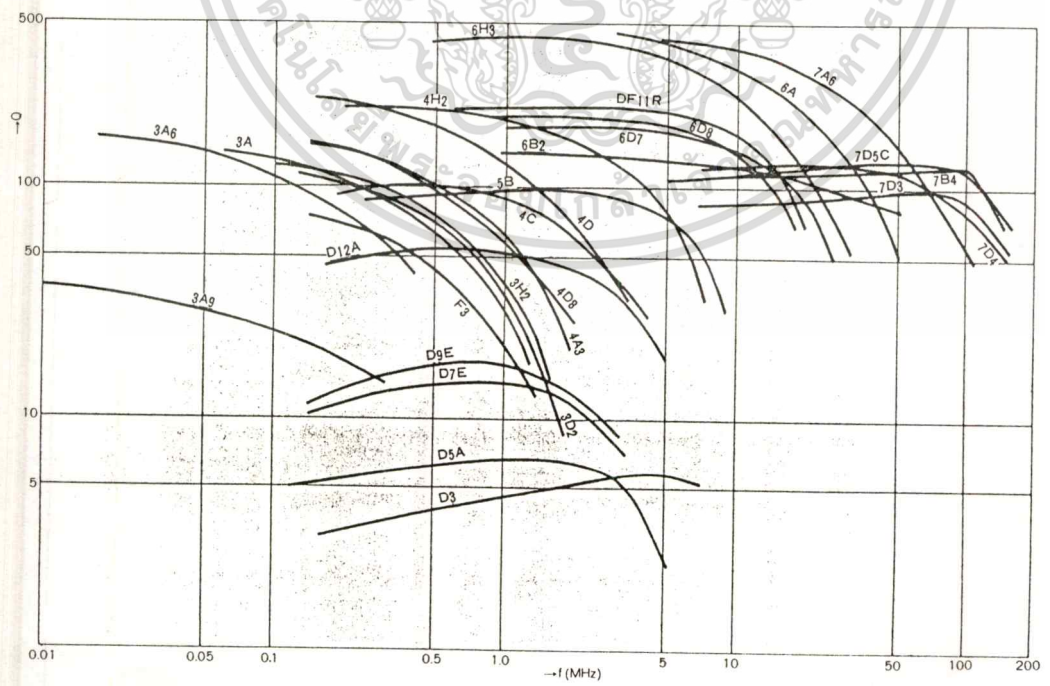
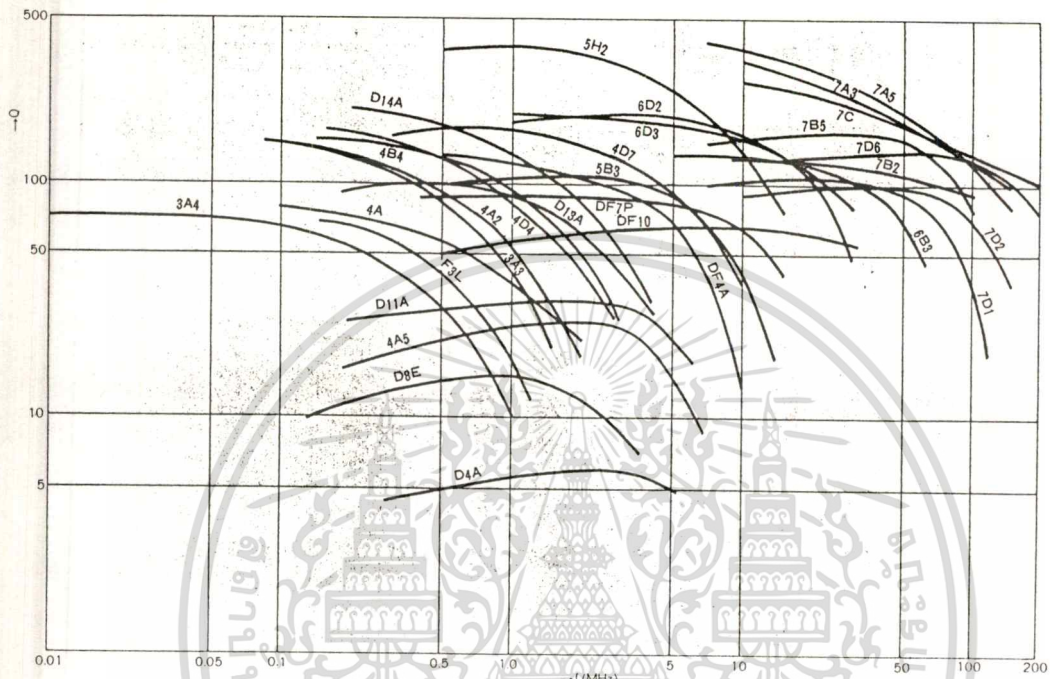
■ Standard Characteristics of Materials – (2)

Materials	$\mu_{i ac}$	$\tan \delta / \mu_{i ac}$		$n_{i ac}$ ( $\times 10^{-4}$ )	TC (°C)	f (MHz)
		( $\times 10^{-1}$ )	(MHz)			
3A	600	1.5	0.2	3	120	0.05 - 1
3A3	450	1.7	0.2	5	130	0.1 - 1.5
3A4	800	1.8	0.1	15	130	0.01 - 0.5
3A6	1000	0.95	0.1	8	110	0.01 - 0.5
3A9	2000	1.7	0.05	4	100	0.005 - 0.3
3H2	430	2.1	0.2	2	100	0.1 - 1.5
3D2	450	6.3	1	3	120	0.1 - 1.5
4A	450	4.3	0.5	12	180	0.1 - 2
4A2	400	2.8	0.5	7	160	0.1 - 2
4A3	400	2.6	0.5	2	150	0.1 - 2
4A5	200	24	0.5	30	210	0.2 - 5
D3	300	84	0.5	82	170	0.2 - 7
D4A	420	47	0.5	49	150	0.2 - 5
D5A	450	35	0.5	42	120	0.2 - 5
D7E	400	17	0.5	25	150	0.2 - 3
D8E	430	16	0.5	25	150	0.2 - 3
D9E	380	15	0.5	20	150	0.2 - 3
D11A	270	13	0.5	40	220	0.2 - 5
D12A	260	7.1	0.5	40	240	0.2 - 5
D13A	250	4	0.5	20	180	0.2 - 4
D14A	330	1.7	0.5	32	180	0.2 - 4
DF4A	83	16.7	5	6	250	0.5 - 10
DF7P	46	34	10	7	250	1 - 15
DF11R	51	11.5	10	9	250	1 - 20
DF10	47	32	10	76	250	1 - 30
F3	300	7.5	0.5	5	100	0.1 - 1.5
F3L	280	8.5	0.5	7	90	0.1 - 1.5
4B4	300	2.5	0.5	24	190	0.1 - 3
4D	200	2.7	0.5	50	120	0.1 - 3
4D4	400	2	0.5	12	160	0.3 - 3
4D7	150	3.8	1	60	250	0.3 - 10
4D8	370	4.6	1	3	120	0.1 - 2
4H2	170	3.2	1	2	250	0.2 - 7
4C	250	4	0.5	20	180	0.2 - 4
5B	140	7.3	1	20	250	0.3 - 8
5B3	120	9	5	28	250	0.5 - 15
5H2	110	2.6	1	2	250	0.2 - 15
6A	38	13	20	20	250	3 - 50
6B2	30	32	20	70	250	1 - 50
6B3	27	31	20	85	250	1 - 50
6D2	45	14	10	30	250	1 - 25
6D3	55	13	10	70	250	1 - 30
6D7	55	12.5	10	60	250	1 - 25
6D8	73	9.8	10	11	250	1 - 20
6H3	80	5.3	10	5	250	0.2 - 30
7A3	11	53	50	20	250	10 - 150
7A5	12	42	50	10	250	10 - 150
7A6	23	28	50	25	250	10 - 100
7B2	13	70	50	85	250	10 - 100
7B4	11	75	100	80	250	10 - 120
7B5	20	32	50	65	250	10 - 80
7B5E	16	60	100	52	250	10 - 120
7C	6	135	100	30	250	10 - 200
7D1	12	219	100	8.9	250	10 - 100
7D2	10	140	100	4	250	10 - 100
7D3	9	123	100	11	250	10 - 100
7D4	8	156	100	2	250	10 - 100
7D5C	7.5	111	100	14	250	10 - 120
7D5E	7	124	100	21	250	10 - 120
7D6	7	111	100	21	250	10 - 150
7D7	6	152	100	21	250	10 - 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

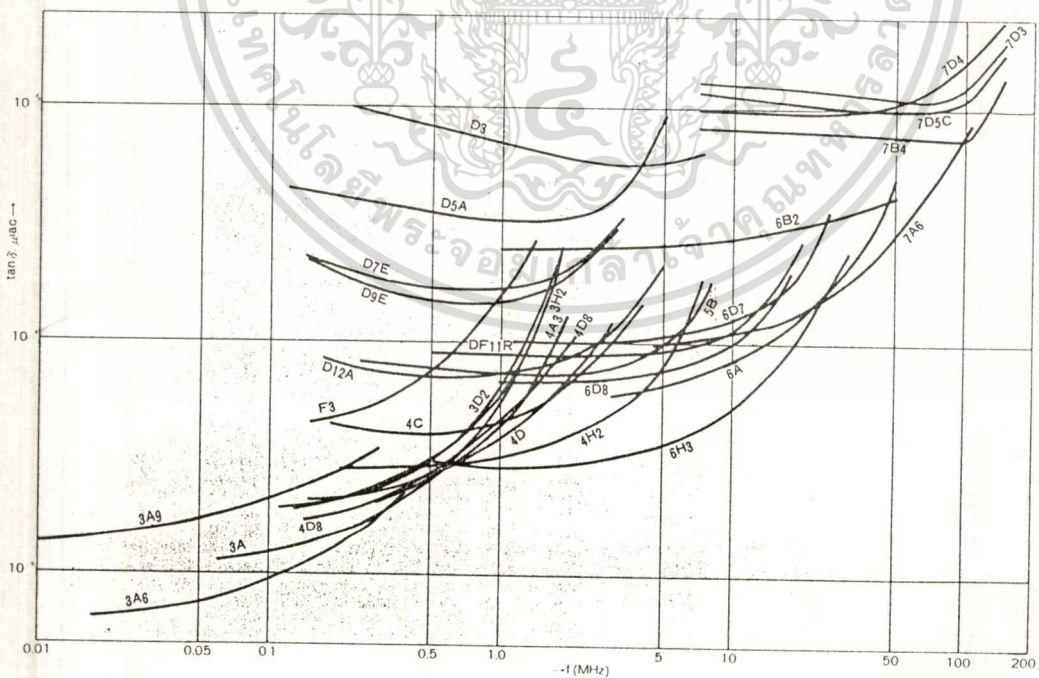
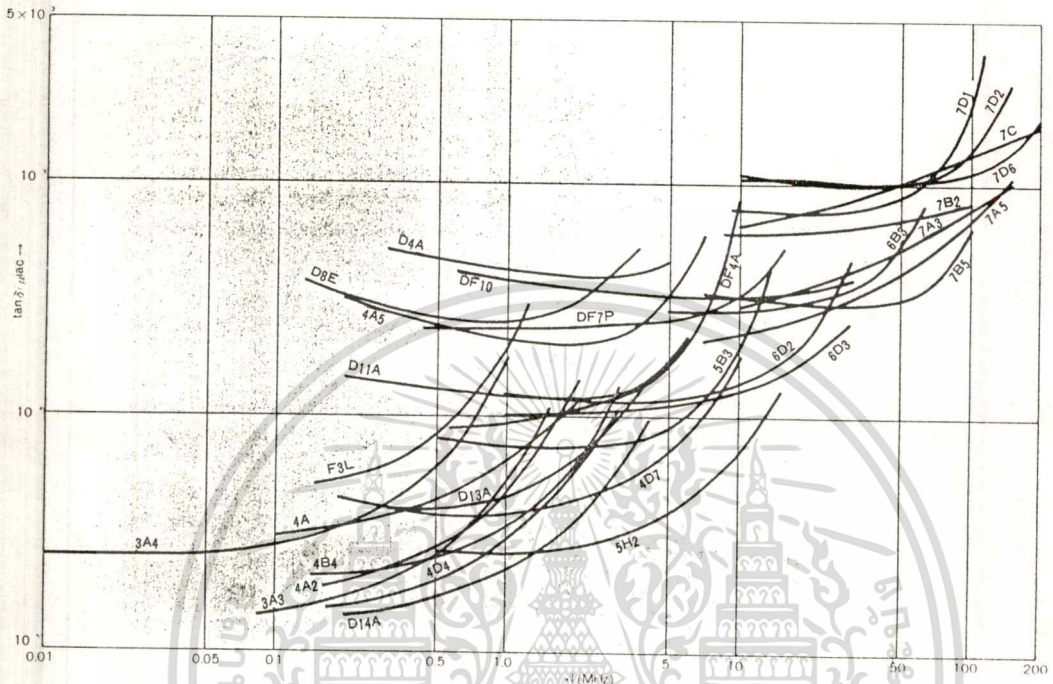
# TOMITA FERRITE

■ Q Factor Characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

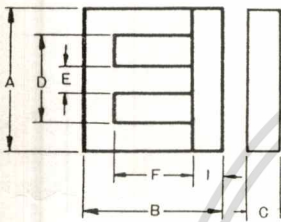
Relative Loss Factor as a Function of Frequency



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TOMITA FERRITE

## ■ Shape of EI Type Cores



## ■ Dimensions

Cores	A	B	C	D	E	F	I
E I -60	60.0±0.9	44.0±0.8	16.0 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.8</sub>	44.5±0.7	16.0 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.8</sub>	28.0±0.5	8.0±0.3
E I -50	50.0±0.8	42.0±0.6	15.0 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.8</sub>	35.0±0.6	15.0 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.8</sub>	25.0±0.4	8.5±0.3
E I -44	44.0±0.6	37.5±0.6	15.3 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	31.7±0.5	12.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	23.5±0.3	7.2±0.2
E I -40B	40.0±0.6	33.8±0.6	12.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	28.0±0.5	12.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	21.4±0.3	6.7±0.2
E I -40	40.0±0.6	34.7±0.6	12.0 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.7</sub>	27.5±0.5	12.0 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.7</sub>	20.4±0.3	7.2±0.3
E I -35	35.0 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.7</sub>	28.55±0.5	9.5±0.3	25.6±0.5	9.5±0.3	19.05±0.3	4.75±0.2
E I -33	33.0±0.5	28.6±0.5	13.0 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	24.0±0.5	10.0 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	19.2±0.3	5.2±0.2
E I -30A	30.0 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.2</sub>	26.5 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.2</sub>	11.0 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.7</sub>	20.0 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.7</sub>	11.0 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.7</sub>	16.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	5.5±0.2
E I -30	30.0±0.5	26.0±0.5	10.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	20.0±0.4	10.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	16.0±0.3	5.5±0.2
E I -28A	28.0±0.4	21.0±0.5	11.5 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	19.3±0.3	8.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	11.4±0.3	4.8±0.2
E I -28	28.0±0.4	21.5±0.5	11.0 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	18.6 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	7.5 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	12.5±0.3	4.5±0.2
E I -25.4	25.4±0.4	19.05±0.5	6.35±0.25	19.0±0.3	6.35±0.3	12.7±0.3	3.2±0.2
E I -25A	25.4±0.4	25.4±0.4	7.5 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	17.5 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.8</sub>	7.5 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	17.75±0.4	4.45±0.2
E I -25	25.0±0.4	20.0±0.4	6.55±0.3	18.6±0.3	6.55±0.3	13.6±0.25	3.2±0.15
E I -22B	22.0±0.4	19.4±0.4	5.7±0.2	16.5±0.3	5.7±0.2	11.4±0.2	4.0±0.2
E I -22A	$\frac{E 22.0±0.4}{I 22.7±0.4}$	18.8±0.4	5.7±0.2	15.75 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	5.7±0.2	10.8±0.2	4.0±0.2
E I -22	22.0±0.4	18.6±0.4	6.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	14.0±0.3	6.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub>	10.6±0.3	4.0±0.2
E I -19A	19.0±0.3	15.8±0.4	5.2 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.4</sub>	14.5±0.3	4.7 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	11.0±0.3	2.4±0.2
E I -19	19.0±0.3	15.9±0.4	5.1 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	14.0±0.3	5.1 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.5</sub>	11.3±0.3	2.35±0.2
E I -16	16.0±0.3	14.3±0.4	5.1 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.4</sub>	12.0±0.3	4.2 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.4</sub>	10.2±0.3	2.05±0.2
E I -12.5	$\frac{E 12.5±0.2}{I 12.6±0.2}$	9.1±0.4	5.0±0.2	9.2 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.15</sub>	2.5 <sup>+0.1</sup> <sub>-0.2</sub>	5.0±0.15	1.6±0.15
E I -12	12.0±0.3	9.6±0.3	3.0 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.4</sub>	8.0±0.3	3.0 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.4</sub>	5.6±0.3	2.0±0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรม Pspice

- รูปที่ 1 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมหลอด ในกรณีที่หลอดทำงานในสภาวะเหมาะสม
- รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวมอสเฟต เทียบกับสัญญาณความถี่ในการขับมอสเฟต ในกรณีที่หลอดทำงานในสภาวะเหมาะสม
- รูปที่ 3 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมหลอด ในกรณีที่หลอดมีความต้านทานต่างค่ากัน
- รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวมอสเฟต เทียบกับสัญญาณความถี่ในการขับมอสเฟต ในกรณีที่หลอดมีความต้านทานต่างค่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CLASS E FOR ELECTRONIC BALLAST

```

VBATT 1      0      24
VIN  10     0      PULSE(0      20      0      0.005E-6 0.005E-6 4.84E-6 9.7E-6)
RMOS 10     3A     1
RL1  2      3      1
RC2  4      5      1E15
*RLAMP      6      7      372
RLAMP 6     7      {RLVAL}
.PARAMRLVAL=1
.STEP  PARAM RLVAL LIST  100  372  2000  8000  100000
RPATH 0     7      1E8
LI  1      2      1.29E-3
LA  5      0      2.52E-5
LB  6      7      6.04E-4
LC  3      4      2.49E-4
K  LA     LB     1
CI  3      0      1.927E-8
CA  4      5      1.132E-8
CL  11     12     5.7E-9
CX1 6      11     100E-9
CX2 7      12     100E-9
D  0      3      D1N916A
.MODEL D1N916A      D      (IS=100E-15 RS=4 CJO=1PF TT=12NS BV=100
IBV=100E-15)
M1  3      3A     0      0      IRF252
.MODEL IRF252  NMOS(LEVEL=3 TOX=.10U L=3.0U LD=.5U W=2.0 WD=0 XJ=1.2U
+
NSUB=4E14 IS=2.1E-14 RB=0 RD=.01 RS=.065 RDS=2E6 VTO=3.7
+
UO=550 THETA=.1 ETA=0 VMAX=1E6 CBS=1P CBD=3200P PB=.7
+
MJ=.5 RG=8.8 CGSO=520P CGDO=105P CGBO=1P)
RCATH1      6      11      20
RCATH2      7      12      20
.TRAN .05E-6 500E-6
.PROBE
.END

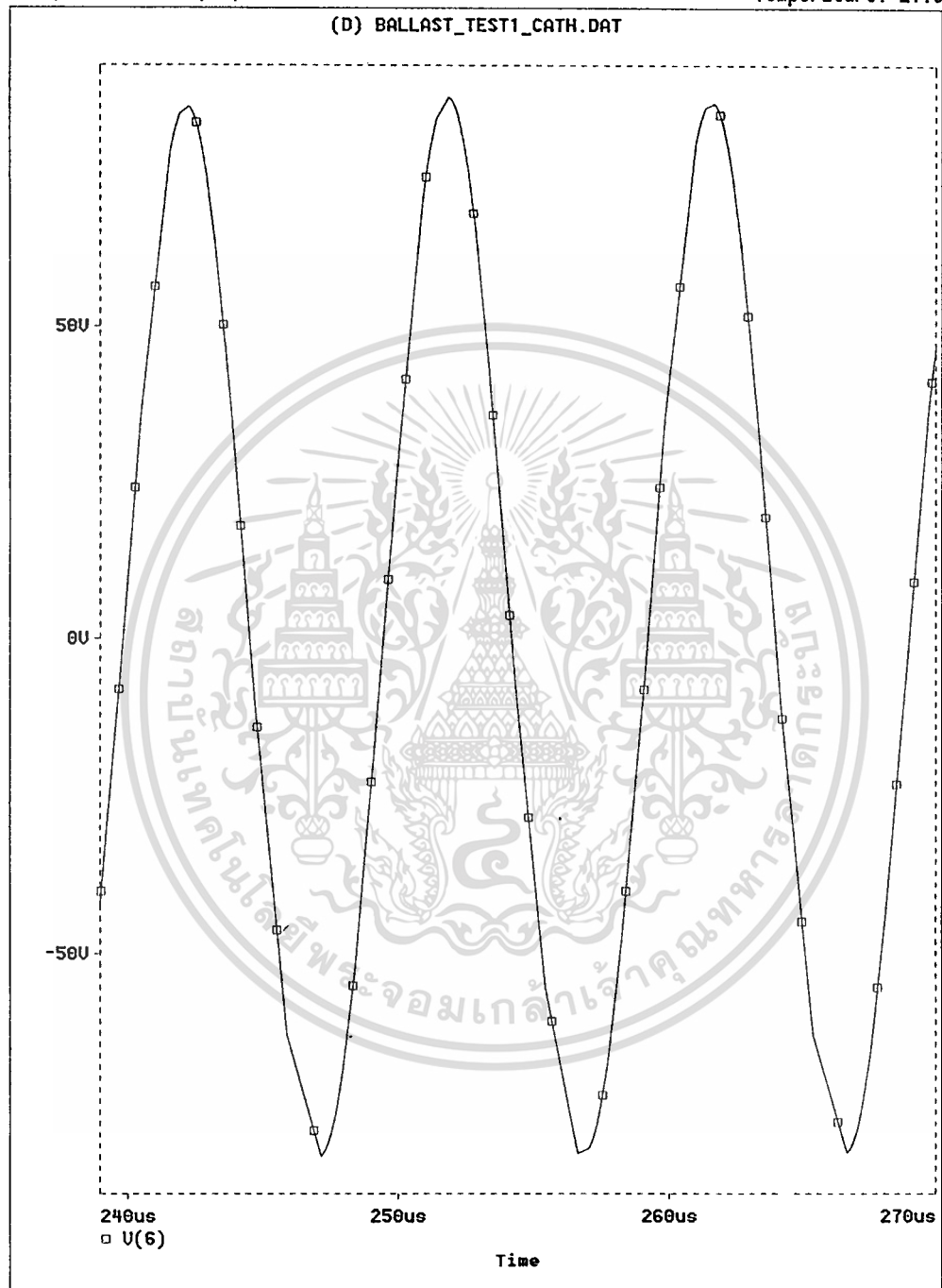
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CLASS E FOR ELECTRONIC BALLAST

Date/Time run: 06/22/98 04:20:11

Temperature: 27.0



Date: Jun 22, 1998

Page 1

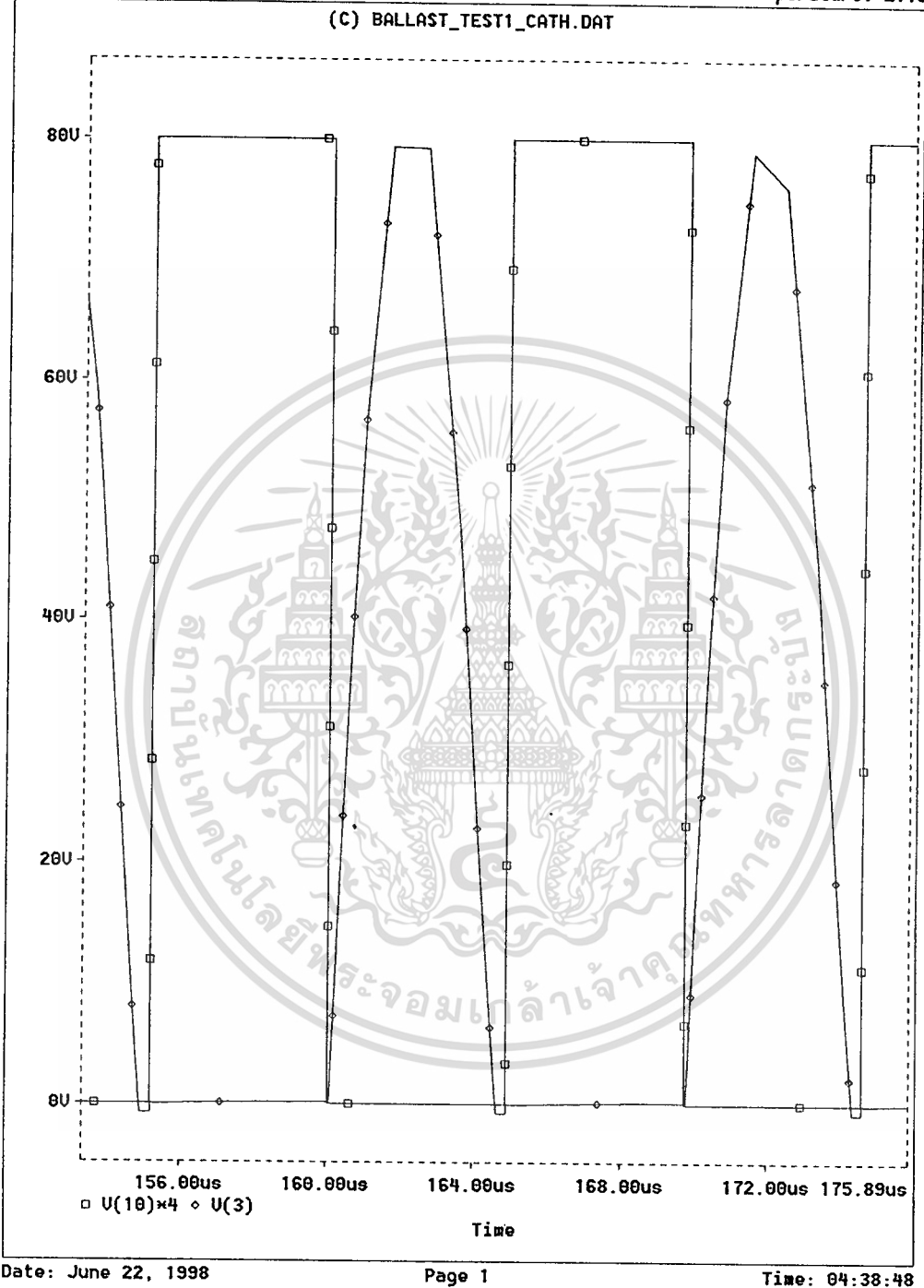
Time: 04:39:43

## รูปที่ 1 รูปคลื่นแรงดันคัทคร่อมหลอด ในกรณีที่หลอดทำงานในสภาวะเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



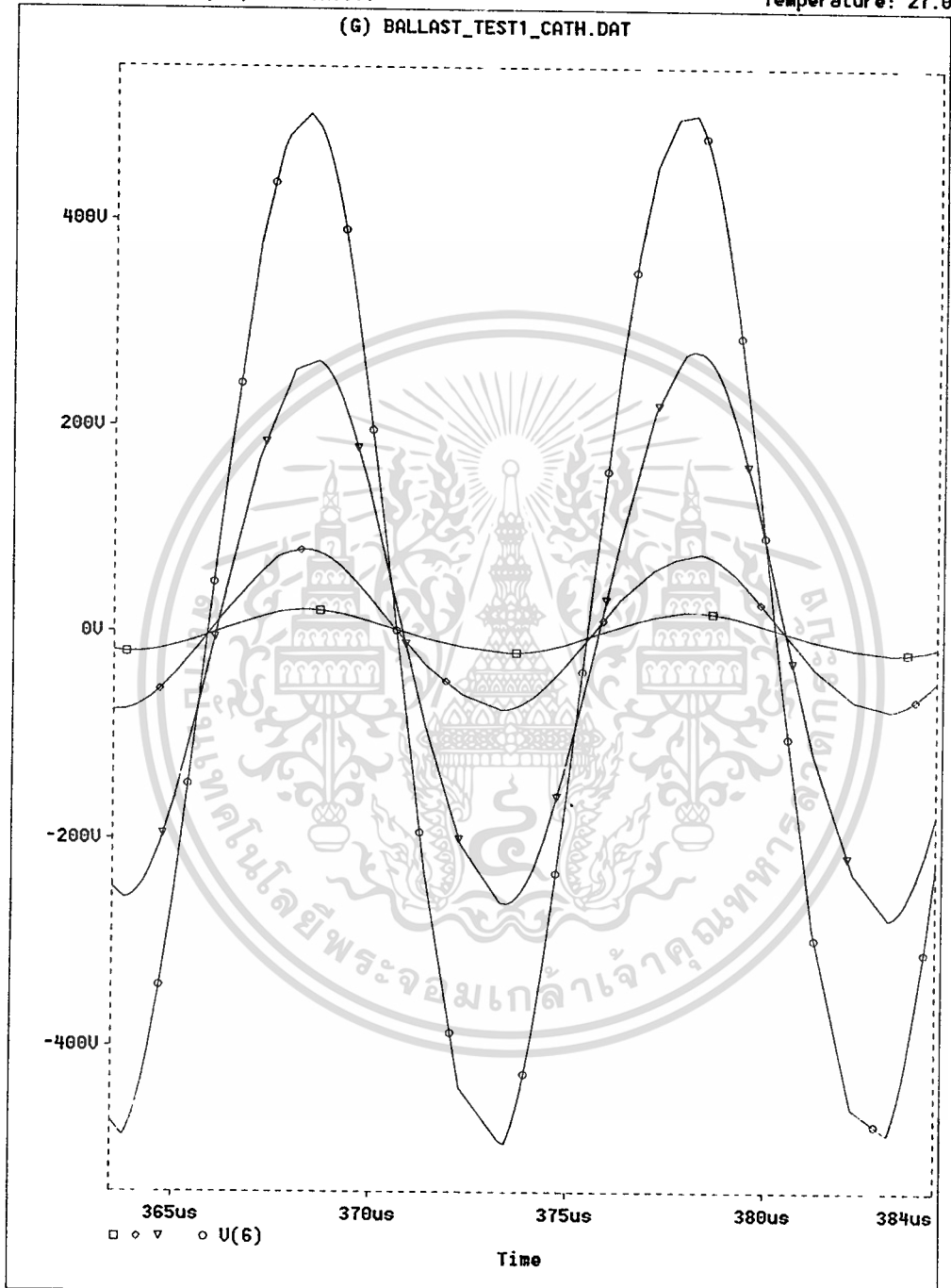
CLASS E FOR ELECTRONIC BALLAST  
Date/Time run: 06/22/98 04:20:11 Temperature: 27.0



รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวมอสเฟต เทียบกับสัญญาณความถี่ในการขับมอสเฟต ในกรณีที่  
หลอดทำงานในสภาวะเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CLASS E FOR ELECTRONIC BALLAST  
 Date/Time run: 06/22/98 04:20:11 Temperature: 27.0



Date: June 22, 1998

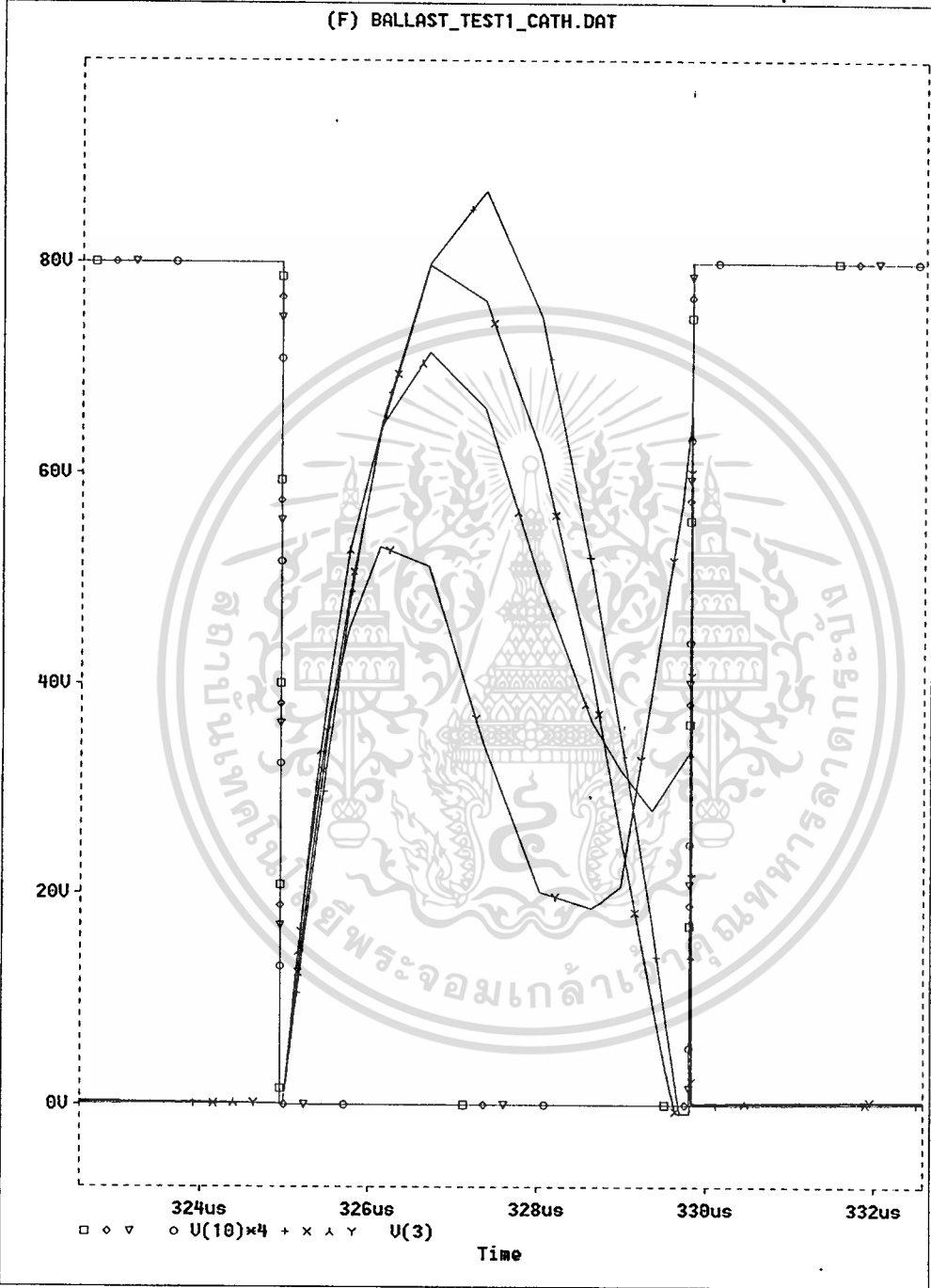
Page 1

Time: 04:54:43

### รูปที่ 3 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมหลอด ในกรณีที่หลอดมีความต้านทานต่างค่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CLASS E FOR ELECTRONIC BALLAST  
Date/Time run: 06/22/98 04:28:11 Temperature: 27.8



Date: June 22, 1998

Page 1

Time: 04:42:55

รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวมอสเฟต เทียบกับสัญญาณความถี่ในการขับมอสเฟต ในกรณีที่

หลอดมีความต้านทานต่างค่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### บทความที่ตีพิมพ์บนวารสารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

# ลาดกระบัง

คณ-วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2541

- |  |    |
|--|----|
| 1. การออกแบบการใช้งานช่องสัญญาณความถี่ของควมเทียมไทยคม 1<br>อัญชลา ราชศรีมนตรี กัลยา จันทร์ชานวรา สุวิมล สิทธิวิชาภา   | 1  |
| 2. หลักการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ SEPIC เพื่อแก้ไขเพาเวอร์แฟคเตอร์ในโหมคการนำกระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง<br>บุญเลิศ มัคศิริ นนทวัฒน์ จุลเดช                               | 11 |
| 3. การทดสอบการลดเสียงของอุกรณ์ลดเสียงแบบ Helmholtz<br>อัครเดช สิ้นธุภัก ปราโมทย์ เรืองฤทธิ์  | 24 |
| 4. เครื่องวัดความต้านทานดิน<br>วิญญู แสงสินภักดิ์ มณฑล สิลลาจินดาไกรฤกษ์   | 31 |
| 5. การประยุกต์ใช้วงจรแปลงกระแสไฟสลับที่ใช้หลักการเรโซแนนท์กับอิเล็กทรอนิกส์สับลลาสด<br>วิเชียร เต็มอนุภาพกุล วิมลลา สุระก่าพลธร                                  | 38 |
| 6. การสร้างตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกตัวกระตุ้น<br>วิทยา ทิพย์สุวรรณพร สุพรรณ กุลพานิชย์ เกียรติอนันต์ สุขชู                       | 49 |
| 7. การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปป์มอเตอร์เป็นกรณีศึกษา<br>ไสว เหลลไม้ วิศวุต ศรีรัตนะ ประภาช จุคคกิมาทันธุ์ กิตติ ศิริเศรษฐ | 58 |
| 8. วงจรผลิตสัญญาณอย่างง่ายโดยการประมาณสัญญาณไซน์จากสัญญาณสามเหลี่ยม<br>วินัย ศิลารวม จริยา เลิศจรสร่วมดี วิภา แสงพิสิทธ์   | 66 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประยุกต์ใช้วงจรแปลงกระแสไฟสลับที่ใช้หลักการ เรโซแนนท์กับอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์

## A Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications

วิเชียร เต็มอนุภาพกุล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

ศ. ดร. วัลลภ สุระกำพลธร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็น การนำเสนอ วงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ ที่นำวงจรขยาย Class E Resonant Inverter มาประยุกต์ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดชนิดประหยัดพลังงาน TL'D 18 W/54 ด้วยแหล่งจ่ายไฟตรงแรงดันต่ำ หลักการที่สำคัญของอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ คือ ต้องสามารถให้แรงดันตกคร่อมหลอดที่สูงมากพอ ขณะที่หลอดในสภาวะเริ่มต้น และต้องควบคุมกระแสให้พอเหมาะในช่วงที่หลอดทำงานในสภาวะปกติ อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีค่าเป็นความต้านทานลบ กล่าวคือ ช่วงก่อนการจุดหลอดค่าความต้านทานหลอดจะมีค่าสูงมาก และจะลดลงเมื่อหลอดทำงาน ทำให้กระแสไหลผ่านหลอดมากขึ้น ทั้งนี้วงจร Class E Resonant Inverter ให้คุณสมบัติในการเป็นแหล่งจ่ายกระแสสลับที่ ทำงานในช่วงความถี่ที่สูง ใช้จำนวนอุปกรณ์ค่อนข้างน้อย, การออกแบบที่ค่อนข้างง่าย รวมถึงประสิทธิภาพที่สูงเนื่องมาจากการสวิทช์ซึ่งจะเกิดในขณะที่แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ และจากการเลือกใช้งาน Parallel loaded Resonant Inverter ทำให้การจุดหลอดสามารถกระทำได้ครบทั้ง 3 ชั้นตอน กล่าวคือ ชั้นแรกเป็นการอุ่นไส้หลอด ชั้นที่สองเป็นการจุดหลอด และ ชั้นสุดท้ายเป็นการทำงานสถานะปกติที่จ่ายกระแสสลับที่ให้หลอด รวมถึงการออกแบบวงจรจ่ายที่เหมาะสมผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (matching network or transformer matching) ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับหลอดได้หลายขนาดง่าย นอกจากนี้วงจรจะจ่ายกระแสผ่านหลอดอยู่ในรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากที่ความถี่สูงมากพอตัวหลอดจะมีคุณสมบัติเป็นตัวความต้านทานรีซิสแทนท์เพียงอย่างเดียว ทำให้อายุการใช้งานหลอดยาวนานมากขึ้น ในบทความนี้ได้ นำเสนอ โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อช่วยในการออกแบบด้วย

### ABSTRACT

The low DC power supply class E resonant inverter used as an electronic ballast for 'TL'D 18 W/54 energy-saving fluorescent lamp is presented. Electronic ballasts must provide enough open circuit voltage to start the fluorescent lamp and current limiting while the lamp is running. Due to a fluorescent lamp has negative impedance characteristic, the lamp must be driven by a current source or at least by a voltage source with sufficiently high source impedance. Based on a class E resonant inverter that operates at high frequency, zero-voltage switching loss, requires low-cost component, simple design and a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

current source circuit behaviour, may be utilized in electronic ballast. The parallel-loaded resonant inverter was selected because of thier load-dependent at resonant frequency characteristics. So, all 3 stages of start up fluorescent lamp procedure (preheat, ignition and burning stage) can be achieved. And by the design of optimum matching coupling via transformer, this allows wide transformation ratios of actual lamp impedance into the class E effective load. It means that very simple to adapt all types of fluorescent lamps (lamp impedant) into electronic ballast circuit via matching transformer. Especially the class E circuit provides sinusoidal lamp current by the fact that fluoresecent lamp is purely resistance at higher frequency. All the advantages of the class E resonant inverter with optimum matching yield a long tube life. And for this article also include program to help researcher to design electronic ballast easier.

## 1. บทนำ

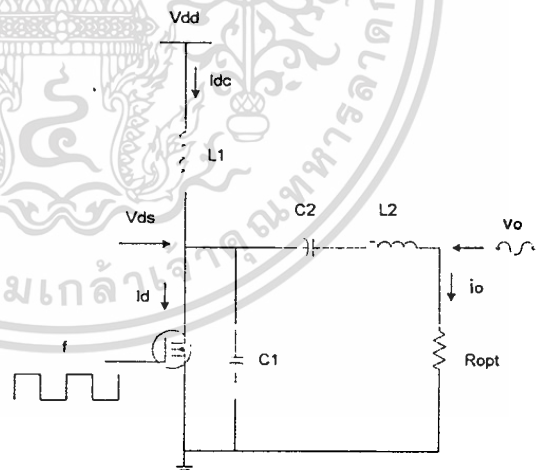
บทความนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E เป็นอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ โดยจะแบ่งออกเป็น ส่วนๆ เบื้องต้นจะกล่าวถึงพื้นฐานการทำงานของวงจรขยาย Class E , การประยุกต์ใช้วงจรเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการจุดหลอด, การพิสูจน์การสะท้อนค่าความต้านทานหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยผ่านหม้อแปลงเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับวงจรขยาย Class E , การออกแบบวงจร ค่าอุปกรณ์ต่างๆ โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วยให้ง่ายมากขึ้น ส่วนสุดท้ายเป็นผลการทดลอง และ สรุปผลการทดลอง

## 2. วงจรพื้นฐาน Class E Resonant Inverter

วงจรพื้นฐาน Class E ได้มีการแนะนำโดย Sokals ซึ่งเป็นวงจร Switching-mode Amplifier อย่างหนึ่ง ที่ประกอบไปด้วย อุปกรณ์สวิทซ์ซิ่ง(เช่น ทรานซิสเตอร์, มอสเฟต) และวงจรภาระ(load network) และมีลักษณะการต่อวงจร ดังรูปที่ 1

1. อุปกรณ์สวิทซ์ซิ่งที่ต่อขนานกับ C1
2. load network ที่ประกอบไปด้วย Series tuned tank L2 C2 และ load(Ropt)

3. L1 ที่ทำหน้าที่เป็นโช๊ค ซึ่งจะจ่ายกระแสตรงที่ หรือ มีรีปเปลน้อยมากจนกระทั่งสามารถตัดทิ้งได้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่า L1 ต้องมีค่ามากเพียงพอ [1] นอกจากนี้ หากได้รับการออกแบบที่ดีสามารถลดทอนสัญญาณ RFI ได้ [2]



รูปที่ 1 พื้นฐานวงจรขยาย Class E

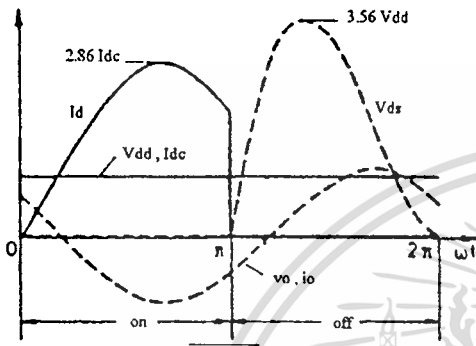
หลักการที่สำคัญในการทำงานของวงจรขยาย Class E นั้น ในความหมายของ Sokals มี 3 ประการ ใช้รูปที่ 2 ประกอบพิจารณา

1. การเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์สวิทซ์ซิ่งในขณะที่อุปกรณ์กำลังเปิดวงจรต้องมีกรหน่วงเวลา แล้วค่อยเพิ่มขึ้นในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าแรงคั่นคกรวมตัวอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งควร จะลดลงเป็นศูนย์ในขณะที่อุปกรณ์สวิทช์กำลังจะปิดวงจร

3. ค่าความชันของแรงคั่นคกรวมตัว อุปกรณ์สวิทช์ซึ่งจะต้องเป็นศูนย์ในขณะที่อุปกรณ์สวิทช์ กำลังจะปิดวงจร



รูปที่ 2 แสดงรูปคลื่นกระแส Id และแรงคั่น Vds

ทั้งนี้หากวงจรขยาย Class E ใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วนทั้ง 3 ประการข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าวงจรขยายนั้น อยู่ในสภาวะการทำงานที่เหมาะสม (optimum Class E) เป็นผลโดยรวมให้วงจรมีประสิทธิภาพที่สูงเนื่องจากมีการสูญเสียในขณะที่สวิทช์ชิ่งน้อยมาก และถ้าวงจรขยายใดที่มีคุณสมบัติไม่ครบทั้ง 3 ประการสามารถกล่าวได้ว่าวงจรขยายดังกล่าวทำงานภายใต้สภาวะเหมาะสม (suboptimum Class E) สำหรับรูปร่างกระแส  $i_o$  ขึ้นอยู่กับค่า Q ของวงจร ถ้าหากค่า Q มีค่าสูง ( $Q > 7$ ) [3] รูปร่างของ  $i_o$  จะมีลักษณะคล้าย sinusoidal แต่ถ้าหากมี Q ที่ต่ำ รูปร่างของ  $i_o$  ก็จะมีลักษณะคล้าย exponential ต่อมาได้มีการพัฒนาวงจรให้ดีขึ้น โดยการต่อไอโอดคอนานกับอุปกรณ์สวิทช์

ในการออกแบบวงจรขยาย Class E เพื่อหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1-7 โดยอาศัยค่าข้อมูลในตารางที่ 1 ประกอบการคำนวณ ซึ่งเป็นสูตรสำเร็จที่นักวิจัยชาวต่างประเทศได้คำนวณไว้แล้ว[5] โดยวงจรที่ได้จะทำงานในสภาวะเหมาะสม(optimum Class c) และความกว้างของความถี่(duty cycle)ในการสวิทช์ชิ่งเป็น 0.5 ซึ่งผู้ที่ต้องการออกแบบต้องกำหนดขนาดแรงคั่นของแหล่งจ่ายไฟตรง( $V_{dd}$ ) กำลังไฟออกที่ต้องการ( $P_o$ ) ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจร( $\eta$ ) และความถี่ในการสวิทช์ชิ่ง( $f$ )

$$P_{dd} = \frac{P_o}{\eta} \tag{1}$$

$$R_{opt} = \frac{b \cdot V_{dd}^2}{P_{dd}} \tag{2}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{3}$$

$$C_1 = \frac{c}{\omega \cdot R_{opt}} \tag{4}$$

$$C_2 = \frac{d}{\omega \cdot R_{opt}} \tag{5}$$

$$L_1 = \frac{10}{\omega^2 \cdot C_1} \tag{6}$$

$$L_2 = \frac{e \cdot R_{OPT}}{\omega} \tag{7}$$

โดยที่  $V_{dd}$  เป็นขนาดแรงคั่นของแหล่งจ่ายไฟตรง

$P_{dd}$  เป็นขนาดกำลังเข้า

$P_o$  เป็นขนาดกำลังออกที่ต้องการ

$\eta$  เป็นประสิทธิภาพวงจรที่ต้องการ

$f$  เป็นความถี่ในการสวิทช์ชิ่ง

$a, c, d$  และ  $e$  ค่าที่ได้จากตารางที่ 1

Q	b	c	d	e	j	k
0	0.3587	0.2177	-	1.788	3.128	3.732
1	0.4008	0.2204	2.104	2.104	2.886	3.703
2	0.457	0.219	0.7124	2.85	2.761	3.662
3	0.4916	0.215	0.4166	3.75	2.759	3.636
5	0.5249	0.2067	0.2269	5.673	2.783	3.61
7	0.5401	0.2017	0.156	7.624	2.8	3.597
10	0.5514	0.1971	0.1062	10.62	2.816	3.587
20	0.5644	0.1909	0.0515	20.6	2.837	3.574
100	0.5744	0.1851	0.01	100.58	2.857	3.565

ตารางที่ 1 ตารางการออกแบบวงจรขยาย Class E

กำหนดขนาดแหล่งจ่ายไฟแรงคั่นตรง( $V_{dd}$ )เป็น 24 โวลต์ กำลังไฟออกที่ต้องการ( $P_o$ )เป็น 18 วัตต์ ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจร( $\eta$ )เป็น 90% และความถี่ในการสวิทช์ชิ่ง( $f$ )เป็น 100 kHz จะได้ค่าอุปกรณ์ต่างๆดังนี้  $R_{opt} = 15.88$  โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

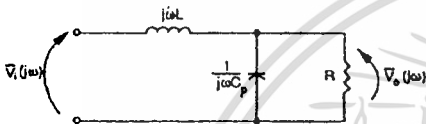


$$C_1 = 19.7 \text{ nF} \quad C_2 = 10.6 \text{ nF}$$

$$L_1 = 1.28 \text{ mH} \quad L_2 = 268 \text{ uH}$$

### 3. วงจรพื้นฐานเรโซแนนท์

วงจรพื้นฐานเรโซแนนท์ที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ เพื่อช่วยในการจุดหลอดในสถานะเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ วงจรเรโซแนนท์ขนานกับภาระ(parallel-loaded resonant) PLR ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรพื้นฐานเรโซแนนท์แบบขนานกับภาระ

สามารถหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรได้ดังต่อไปนี้

$$\left| \frac{\bar{V}_o(j\omega)}{\bar{V}_i(j\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_p \cdot Q_p}\right)^2}} \quad (8)$$

โดยที่  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_p}} \quad (9)$

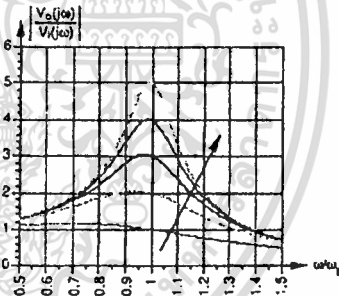
$$Q_p = \frac{R}{\omega_p \cdot L} = \omega_p \cdot C_p \cdot R \quad (10)$$

และ  $\omega_p^2 \cdot C_p \cdot L = 1 \quad (11)$

จากทรานเฟอร์ฟังก์ชันสมการที่ 8 จะสามารถนำมาพลอตกราฟได้เป็นดังรูปที่ 4 ทั้งนี้หากให้ความต้านทานในรูปที่ 3 เป็นความต้านทานหลอด จะสังเกตได้ว่าวงจรนี้เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการจุดหลอด เนื่องจากช่วงเริ่มจุดหลอดค่าความต้านทานหลอดจะสูง เป็นผลให้ค่า  $Q_p$  มีค่าสูงขึ้น ทำให้วงจรให้แรงดันออกที่สูง เพื่อช่วยในการจุดหลอด และลดลงเมื่อหลอดทำงานในสภาพปกติ

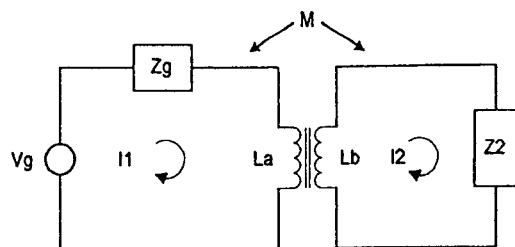
### 4. การสะท้อนของค่าอิมพีแดนซ์(Reflected Impedance)

วงจรพื้นฐาน Class E ที่ทำงานในสภาวะเหมาะสมนั้นค่าภาระต้องเหมาะสม ในที่นี้จากการคำนวณจะได้  $R_{opt} = 15.88$  โอห์ม จึงจำเป็นต้องทำการสะท้อนค่าความต้านทานหลอดผ่านหม้อแปลงความถี่สูง(matching network or transformer matching) ซึ่งหลอดฟลูออเรสเซนต์ประเภทยักษ์พลังงาน TL'D 18 w/54 จะมีค่าความต้านทานหลอดเมื่อทำงานความถี่สูง และอยู่ในสภาวะปกติจะมีค่าความต้านทานหลอดเท่ากับ 372 โอห์ม[8] นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงวงจรเรโซแนนท์ที่ช่วยในการจุดหลอด ที่อาศัยค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กขดลวดทุติยภูมิ และตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราขยายเทียบกับความถี่ โดยมีค่า  $Q=1.5$

รูปที่ 5 เป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลง โดยให้แหล่งจ่ายไฟเป็น  $V_g$  และมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่อีกด้านหนึ่งของหม้อแปลงมีค่าเป็น  $Z_2$  พิจารณาโดยใช้ KVL ทางด้านเข้าของหม้อแปลงจะได้



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1 = SL_a \cdot I_1 - SM \cdot I_2 \quad (12)$$

$$0 = -SM \cdot I_1 + (Z_2 + SL_b) \cdot I_2 \quad (13)$$

แก้สมการที่ 12, 13 โดยการตัด  $I_2$  จากสมการที่ 12 จะได้

$$V_1 = \left[ SL_a - \frac{S^2 M^2}{Z_2 + SL_b} \right] \cdot I_1$$

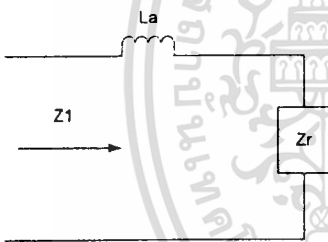
ดังนั้นจะได้ว่า

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = SL_a + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b} \quad (14)$$

จาก  $S = j\omega$

$$S^2 = j^2 \omega^2 = -\omega^2 ; \text{ โดยที่ } j^2 = -1$$

ดังนั้นจะสามารถแปลงวงจรในรูปที่ 5 ใหม่ได้ โดยสะท้อนค่าความต้านทานด้านออกให้อยู่ด้านเข้าของหม้อแปลงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของภาวะ เมื่อมองจากด้านเข้า

โดยที่  $Z_R = \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b} \quad (15)$

จากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเท (coefficient of coupling) ของหม้อแปลงจะได้

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_a \cdot L_b}} \quad (16)$$

ในกรณีที่ เป็น หม้อแปลง unit coupling จะได้  $k = 1$  จะได้

$$M = \sqrt{L_a \cdot L_b} \quad (17)$$

$$\frac{L_a}{L_b} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left( \frac{1}{a} \right)^2 \quad (18)$$

ในกรณีที่  $Z_2$  มีตัวเก็บประจุมาต่อขนานภาวะ เพื่อให้เป็น ส่วนหนึ่งของวงจรเรโซแนนซ์ จะได้ภาพดังรูปที่ 7

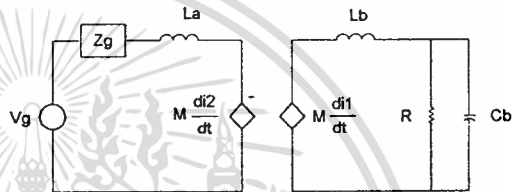
จากรูปที่ 7 จะได้  $Z_2 = \frac{R}{SC_b \cdot R + 1} \quad (19)$

จากรูปที่ 7 และวงจร Parallel Resonant แบบ ขนานที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำแฝงบนขดลวด ทดลยภูมิ และตัวเก็บประจุ  $C_b$  จะได้ข้อสรุปดังนี้

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_b C_b}} \quad (20)$$

$$Q_p = \frac{R}{\omega \cdot L_b} = \omega \cdot C_b \cdot R \quad (21)$$

$$\omega^2 \cdot C_b \cdot L_b = 1 \quad (22)$$



รูปที่ 7 เมื่อภาวะมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ที่ด้านออกของ หม้อแปลง

จากสมการที่ 14  $Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = SL_a + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_2 + SL_b}$

จะได้  $Z_R = \frac{\omega^2 \cdot M^2}{\frac{R}{SC_b \cdot R + 1} + SL_b}$   
 $= \frac{\omega^2 \cdot M^2}{\frac{R}{SC_b \cdot R + 1} + \frac{SL_b \cdot (SC_b \cdot R + 1)}{SC_b \cdot R + 1}}$   
 $= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC_b \cdot R + 1)}{R + SL_b \cdot (SC_b \cdot R + 1)}$   
 $= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC_b \cdot R + 1)}{SL_b + (R - \omega^2 \cdot C_b \cdot L_b \cdot R)}$

จากสมการที่ 22 จะได้

$$= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC_b \cdot R + 1)}{SL_b + (R - R)}$$

$$= \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (SC_b \cdot R + 1)}{SL_b}$$

จากสมการที่ 17 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

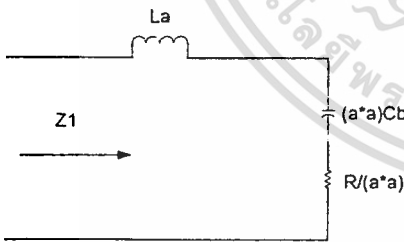
$$\begin{aligned}
 &= \frac{\omega^2 \cdot L_a \cdot L_b \cdot (S C_b \cdot R + 1)}{S L_b} \\
 &= \frac{\omega^2 \cdot L_a \cdot L_b \cdot S C_b \cdot R}{S L_b} + \frac{\omega^2 \cdot L_a \cdot L_b}{S L_b} \\
 &= \omega^2 \cdot L_a \cdot C_b \cdot R + \frac{\omega^2 \cdot L_a}{S}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 18 จะได้

$$\begin{aligned}
 &= \omega^2 \cdot \frac{L_b}{a^2} \cdot C_b \cdot R + \frac{\omega^2 \cdot L_b}{S \cdot a^2} \\
 &= \frac{R}{a^2} + \frac{\omega^2 \cdot L_b \cdot C_b}{S \cdot a^2 \cdot C_b} \\
 Z_R &= \frac{R}{a^2} + \frac{1}{S \cdot a^2 \cdot C_b} \tag{23}
 \end{aligned}$$

นั่นหมายถึงสามารถสะท้อนค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุที่ด้านออกของหม้อแปลง เมื่อมองเป็นค่าอิมพีแดนซ์จากทางด้านเข้าได้ดังสมการที่ 24 หรือนำเสนอได้ดังรูปที่ 8

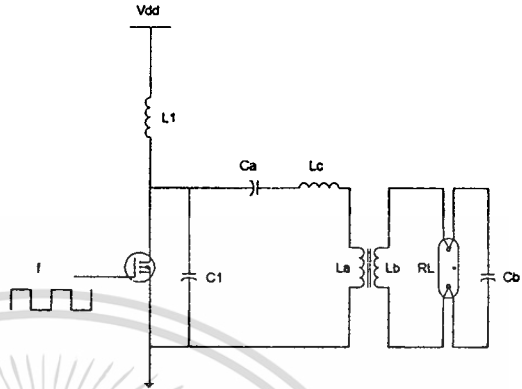
$$Z_1 = S L_a + \frac{R}{a^2} + \frac{1}{S \cdot a^2 \cdot C_b} \tag{24}$$



รูปที่ 8 วงจรสมมูลเมื่อสะท้อนตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ด้านออกของหม้อแปลงดังรูปที่ 7 มายังด้านเข้าของหม้อแปลง

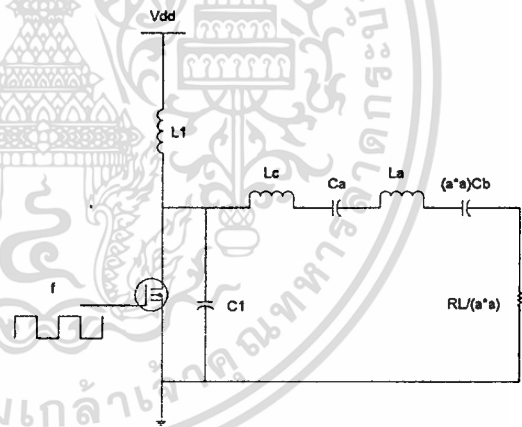
จากสมการที่ 24 สามารถพิสูจน์ถึงการสะท้อนค่าความต้านทานตลอดผ่านหม้อแปลงความถี่สูงได้ เพื่อให้เป็นความต้านทานที่เหมาะสมของวงจรพื้นฐาน Class E

( $R_{opt}$ ) ดังนั้นสามารถออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรที่ประยุกต์ใช้วงจรขยาย Class E กับอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์

จากสมการที่ 24 สามารถแปลงวงจรรูปที่ 9 ได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 วงจรสมมูลกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ โดยการใช้โปรแกรม Excel เข้าช่วย มีหลักการขั้นตอนวิธีการดังนี้

1. กำหนด ขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ
2. กำหนดความถี่ใช้งาน
3. กำหนด กำลังไฟออก และค่ากระแสผ่านหลอด ซึ่งก็จะได้ค่าความต้านทานหลอด
4. จะได้ค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสม L1 L2 C1 C2

$R_{opt}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หาค่าเรโซ ของหม้อแปลง ซึ่งได้จากค่าความ

ค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าที่ใช้ทดลอง

ด้านโหลด เทียบกับ  $R_{opt}$ ;  $a = \sqrt{\frac{R_L}{R_{opt}}}$

6. หาค่า  $C_b$  ได้จาก  $C_b = \frac{Qp}{w \cdot R_L}$

7. หาค่า  $L_b$  ได้จาก  $L_b = \frac{R_f}{w \cdot Q_p}$

8. หาค่า  $L_a$  ได้จากค่า  $L_a = \frac{L_b}{a^2}$

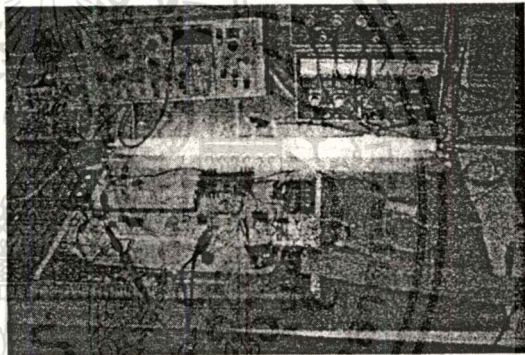
9. หาค่า  $L_c$  ได้จาก  $L_c = L_2 - L_a$

10. หาค่า  $C_a$  ได้จาก  $C_a = \frac{a^2 \cdot C_2 \cdot C_b}{a^2 \cdot C_b - C_2}$

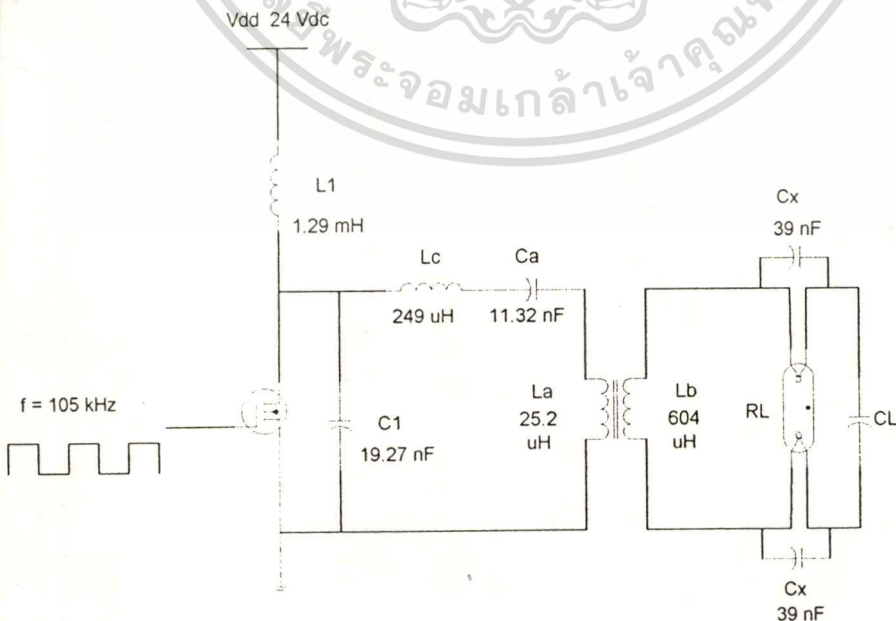
L1 =	1.28	1.29	mH
La =	25.3	25.2	uH
Lb =	592	604	uH
Lc =	243	249	uH
C1 =	19.7	19.27	nF
Ca =	11.9	11.32	nF
Cb =	4.28	CL	5.7 nF
a =	4.84		
RL =	372	โอห์ม	

5. ผลการออกแบบ และการวิเคราะห์

กำหนดแหล่งจ่ายไฟขนาด 24 โวลต์ และกำลังไฟออก 18 วัตต์ ประสิทธิภาพ 90% ให้ค่ากระแสไหลผ่านโหลดเป็น 220 มิลลิแอมป์ และใช้ความถี่ในการสวิตชิงเป็น 100 kHz จะได้ค่าอุปกรณ์ดังนี้

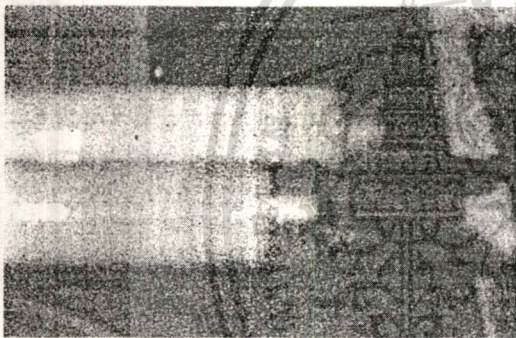


รูปที่ 11 ภาพวงจรโดยรวม

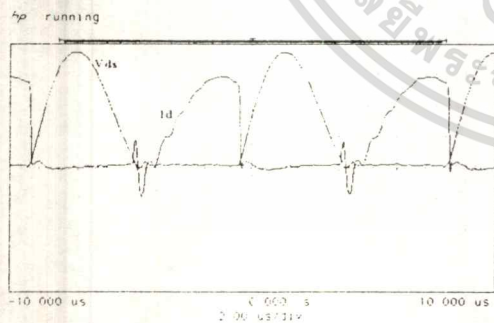


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ เพื่อให้การอุ่นไส้หลอดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องควบคุมแรงดันตกคร่อมขั้วหลอด จึงได้ต่อตัวเก็บประจุขนาด 39 nF ขนานที่ขั้วคาโทดของ หลอดฟลูออเรสเซนต์ทั้งสองด้าน และเปลี่ยนค่า Cb เป็น 6.12 nF(เรียกใหม่ว่า CL) จากการทดลองจริงจำเป็นต้อง ขยับความถี่เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เพื่อให้การสวิตชิ่งจะเกิดใน ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์สวิตชิ่งเป็นศูนย์ ซึ่ง สามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นของ Vds ตัดกับค่ากระแส Id ดังรูปที่ 14 โดยใช้ความถี่ 105 kHz ทั้งนี้เป็นผลมาจาก อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองจริงที่วัดได้ไม่ตรงกับกรคำนวณ มีการ เพิ่มค่าตัวเก็บประจุ Cx หรืออาจเกิดจากความคลาดเคลื่อน ของเครื่องมือวัดก็เป็นไปได้



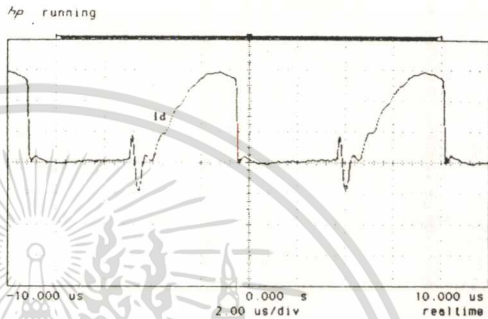
รูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในการอุ่นไส้หลอด



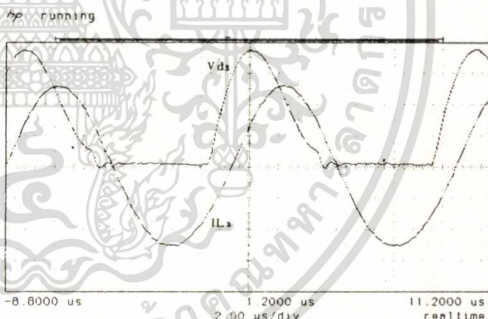
รูปที่ 14 แสดงรูปคลื่น Vds (20 V/div) และ Id (500 mA/div)

ส่วนในวงจรขั้วมอสเฟต IRF 832 นั้นได้ใช้ตัว กำหนดสัญญาณความถี่ 105 kHz ที่มีความกว้างความถี่(duty cycle) เป็น 0.5 และมีขนาดสัญญาณ 10 Vpp ให้เป็น สัญญาณเข้า MC14011BCP ซึ่งเป็นแอนเกท แล้วนำ

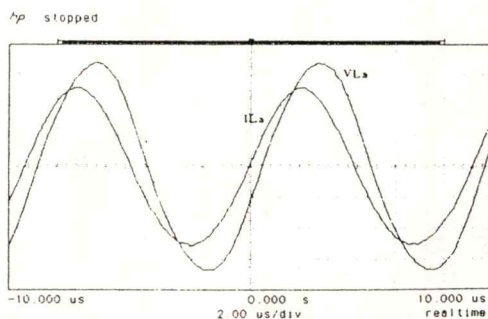
สัญญาณออกจากเกตไปขับมอสเฟตอีกต่อหนึ่ง ในงานวิจัย จากต่างประเทศในส่วนภาคควบคุมต้องมีการควบคุม เปลี่ยนแปลงความถี่ หรือความกว้างของสัญญาณความถี่ ในช่วงจุดหลอดก่อน แล้วจึงปรับความถี่ หรือความกว้าง กลับสู่สภาวะปกติในภายหลังจากที่หลอดดับโดยสมบูรณ์ แล้ว ทำให้การออกแบบวงจรเป็นไปอย่างเรียบง่าย



รูปที่ 15 แสดงรูปคลื่น Id (500mA/div)

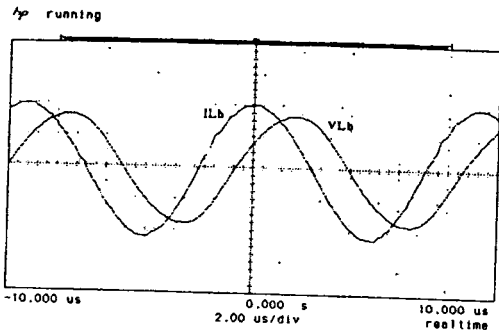


รูปที่ 16 แสดงรูปคลื่น Vds (20 V/div) และ ILa (500mA/div)

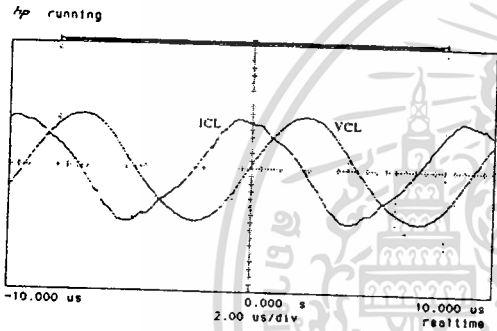


รูปที่ 17 แสดงรูปคลื่น VLa (5 V/div) และ ILa (500ma/div)

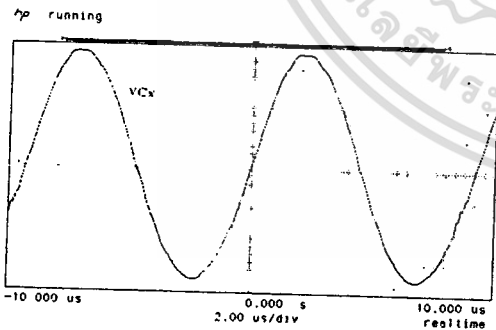
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 แสดงรูปคลื่น ILb (200 mA/div) และ VLb (50 V/div)



รูปที่ 19 แสดงรูปคลื่น ICL (200 mA/div) และ VCL (50 V/div)



รูปที่ 20 แสดงรูปคลื่น VCx (1 V/div)

ผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าวงจร Class E สามารถให้ค่าแรงดันตกคร่อมหลอดใกล้เคียงค่าชาชนเป็นอย่างมาก ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 18 อีกทั้งวงจรนี้ยังให้ปรากฏการณ์ในการจุดหลอดครบ 3 กระบวนการ กล่าวคือ

มีการอุ่นไส้หลอด การจุดหลอด และการทำงานเมื่อเสถียรภาพ ทั้งค่าขนาด และรูปร่างสังเกตได้จากรูปที่ 13,20 ซึ่งกล่าวได้ว่าวงจรมีการทำงานในลักษณะ Soft start จากการนำ Digital Power Meter YAKOGAWA Model 2531 วัดที่ด้านเข้าก่อนหน้า  $L_1$  จะได้ค่าดังต่อไปนี้

แรงดันเข้า	$V_{in} = 24.081 \text{ Vdc}$
กระแสเข้า	$I_{in} = 0.8365 \text{ Vrms}$
กำลังออก (Power)	$W = 20.120 \text{ w}$
Apparent Power	$VA = 20.127$
Reactive Power	$VAR = 0.376$
ค่าประกอบกำลัง	$PF = 0.9998$
Degree	$= 1.07 \text{ Lag}$
$V_{pk} = 24.22 \text{ Vpk}$	
$A_{pk} = 0.859 \text{ Apk}$	

จะเห็นได้ค่าให้ค่าประกอบกำลังที่ใกล้เคียง 1 มาก และจากการวัดที่หลังขดลวดทุติยภูมิ ก่อนเข้าหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะได้

แรงดันเข้า	$V_{in} = 63.95 \text{ Vrms}$
กระแสเข้า	$I_{in} = 0.3212 \text{ Vrms}$
กำลังออก (Power)	$W = 13.83 \text{ w}$
Apparent Power	$VA = 20.54$
Reactive Power	$VAR = 15.21$
ค่าประกอบกำลัง	$PF = 0.672$
Degree	$= 47.83 \text{ Lead}$
$V_{pk} = 93.03 \text{ Vpk}$	
$A_{pk} = 0.463 \text{ Apk}$	

สามารถคำนวณหาค่า Voltage and Current Crest Factor และประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ ได้จากสูตรนี้

$$\text{Voltage Crest Factor} = \frac{V_{pk}}{V_{rms}} = \frac{93.03}{63.95} = 1.4548$$

$$\text{Current Crest Factor} = \frac{A_{pk}}{A_{rms}} = \frac{0.463}{0.3212} = 1.4416$$

$$\text{ประสิทธิภาพวงจร } \eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{13.83}{20.12} = 68.73 \%$$

จากการทดลองนั้นค่าอุปกรณ์ที่เกิดความสูญเสียมากที่สุดนั้นจะเป็นตัวเหนี่ยวนำ  $L_c$  เนื่องแรงดันที่ตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อมขณะที่วงจรทำงานนั้นจะมีค่าสูงมากประมาณ 275 Vpk ในการออกแบบนั้นควรใช้แกนแม่เหล็กที่มีค่าความซึมซาบที่สูง เพื่อให้จำนวนรอบในการพันน้อยที่สุด รวมไปถึงใช้ขดลวดหลายเส้น และขนาดเล็กเนื่องจากต้องระวังผลกระทบจากสกินเอฟเฟกต์ ดังนั้นประสิทธิภาพของวงจรจึงเหลือเพียง 68.73 % ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงต่อไป

## 6. ผลการเปรียบเทียบวงจรชนิดต่างๆ

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำมาประยุกต์เป็นอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ที่หลักการที่ง่ายที่สุด คือ อินเวอร์เตอร์ชนิด บล็อกกิ้งออสซิลเลเตอร์ (Blocking Oscillator) ที่ใช้อุปกรณ์สวิทซ์เพียงตัวเดียวนั้น แต่จะให้สัญญาณกระแสกลับในการขับหลอดแบบไม่สมมาตร และบ่อยครั้งที่ขั้นตอนในการจุดหลอด (Ignition) จะเกิดในทิศทางเดียว ซึ่งมีผลโดยตรงให้อายุหลอดสั้นลง และต่อมาได้มีการวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดพุท-พูล (Push-Pull) โดยวงจรมีให้รูปคลื่นกระแสกลับแก่หลอดในลักษณะสมมาตรทั้งซีกบวก และลบ แต่อย่างไรก็ดีวงจรชนิดนี้จะเกิดการสูญเสียในขณะสวิทซ์ (Switching Loss) เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรขาย Class E ที่จะมีการสวิทซ์ในขณะที่แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิทซ์เป็นศูนย์ นอกจากนี้ยังสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้เป็นอย่างดี จำนวนอุปกรณ์ ความซับซ้อนการออกแบบ และส่วนควบคุมน้อยกว่า ส่วนในตารางที่ 2 จะเป็นการเปรียบเทียบวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ชนิดต่างๆ อันได้แก่ วงจร Self-Excited Parallel Resonant Electronic Ballast (PREB) วงจร Self-Excited Series Resonant Electronic Ballast (SREB) วงจร Current-Fed Push-Pull Electronic Ballast (CFPPEB) ซึ่งได้นำมาจากงานวิจัยชาวต่างชาติที่ได้ทำวิจัยไว้ [7] เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ Class E

วงจรพื้นฐาน Class E นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากให้ค่าความสูญเสียที่ค่อนข้างน้อย รวมไปถึงขั้นตอนการผลิตที่ไม่จำเป็นต้องใช้ฮีทซิงค์ อุปกรณ์ค่อนข้างน้อย และ วงจรควบคุมง่าย ซึ่งก็หมายถึงการเพิ่มวงจรตรวจสอบสภาพการทำงานของหลอด แล้วป้อนกลับมาควบคุมการทำงานใหม่อีกทีก็ได้ง่ายเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ให้กระแสที่เลี้ยงหลอดฟลูออเรสเซนต์ใกล้เคียงชานมากเป็นผลให้อายุการใช้งานหลอดจะยาวนานขึ้น

	PREB	SREB	CFPPEB	Class E
Starting Voltage	no soft start, high voltage overshoot	soft start	soft start	soft start
Filament Preheating	no	yes	yes	yes
Switch Voltage Stress	$(\pi/2)V_{dc}$	$V_{dc}$	$\pi \cdot V_{dc}$	$3.4 \cdot V_{dc}$
Switch Current Stress	low	high	low	1.04
Lamp Current Crest Factor	$> \sqrt{2}$	$> \sqrt{2}$	$> \sqrt{2}$	1.4416
Switching Loss	low	high	low	very low
Inherent Short-Circuited Protection	yes	no	yes	yes
Inherent Open-Circuited Protection	yes	yes	yes	yes

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบการทำงานวงจรแบบต่างๆ

## 7. บทสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำวงจรปรับปรุงนี้ เพื่อใช้กับวงจร Resonant DC/DC Power Convertors, Industrial Electronics for high frequency Electric Heating, Radio Transmitter และ Electronic Ballasts for Fluorescent Lamp.

## 8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ผมใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. วัลลภ สุระก่าพดธ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึงกำลังใจในการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ใคร่ขอขอบพระคุณท่านเหล่านั้นที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. รศ. ดร.วันชัย ธีรรัฐจา
2. ดร. นนทวัฒน์ จุลโคชะ
3. ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ กมวิษระ
4. คุณพงษ์สิทธิ์ วิชาสุรมณฑล
5. ดร. สมศักดิ์ ชุมช่วย
6. ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม
7. ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย
8. อ.อนุวัฒน์ งามวนิชเลิศ
9. เจ้าหน้าที่วิจัย นิรุช จิรสวรรณกุล
10. นางสาวนพรัตน์ ชำพันธุ์
11. เจ้าหน้าที่ประชาสัมพันธ์บัณฑิตวิทยาลัย
12. เจ้าหน้าที่ห้องสมุดทุกท่าน
13. เจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความกรุณา

## 9. เอกสารอ้างอิง

[1] Georg Lutteke and Hubert C. Reats, "220 V Mains 500-kHz Class E Converter Using a BIMOS", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE-2, No 3, pp.186-193, July 1987.

[2] Georg Lutteke and Hubert C. Reats, "High Voltage High Frequency Class E Converter Suitable for Miniaturization", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE1, No. 4, pp.193-199, October 1986.

[3] Richard Real, Bela Molnar and Nathan O. Sokal, "Small-Signal Dynamic Analysis of Regulated Class E DC/DC Converter", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE-1, No 2, pp.121-127, April 1986.

[4] Richard Real, Bela Molnar and Nathan O. Sokal, "Class E Resonant regulated DC/DC Power Converter: Analysis of Operations and Experimental Results at 1.5 MHz", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. PE1, No. 2, pp.111-120, April 1986.

[5] J.L. Duarte, J.A.A. Wijintjens and J. Rozenboom, "Designing Light Sources for Solar-Systems", The European Power Electronics Association, pp.78-81, 1993

[6] Melvin C. Cosby, JR. and R. M. Nelms, "A Resonant Inverter for Electronic Ballast Application", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.41, No.4, August 1994.

[7] T.-H. YU L.-M. WU and T. -F. Wu, "Comparisons Among Self-Excited Parallel Resonant, Series Resonant AND Current-Fed Push-Pull Electronic Ballasts", IEEE,1994.

[8] Yiyong Sun, P.E.. "PSpice Modeling of Electronically Ballasted Compact Fluorescent Lamp Systems", IEEE,1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ประวัติผู้เขียน



นายวีเชิร เต็มอนุภาพกุล เกิดเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2511 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2532 ปัจจุบันทำงานที่บริษัทแอดวานซ์ อินฟอร์เมชั่น ซิสเต็มส์ ในตำแหน่ง ผู้ช่วยผู้จัดการ ฝ่ายระบบคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้