

การหาตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อการออกแบบบัลลาสต์  
A Circuit Model of Fluorescent Lamp for Ballast Design Application



ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ  
Prasert Pinprathomrat

๑

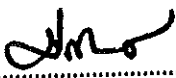
เลขหมู่	TKA 386 1/26 2539 ๘.๒
Order Key	
Bib Key	114975
	25 ส.ค. 2543

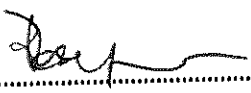
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering  
Prince of Songkla University  
2539

ชื่อวิทยานิพนธ์    การหาตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อการออกแบบบัลลาสต์  
ผู้เขียน            นายประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ  
สาขาวิชา          วิศวกรรมไฟฟ้า

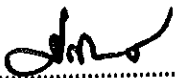
---

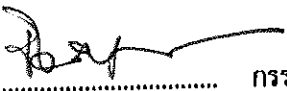
คณะกรรมการที่ปรึกษา

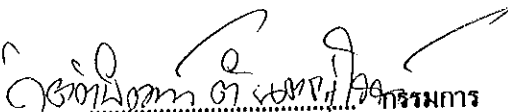
  
..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ปราโมทย์ จุฑาทพร)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวีชนาไทย)

คณะกรรมการสอบ

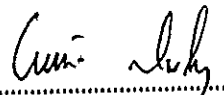
  
..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ปราโมทย์ จุฑาทพร)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวีชนาไทย)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ ตันตระกูลโรจน์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์มนัส เกื้อกุลกิจการ)

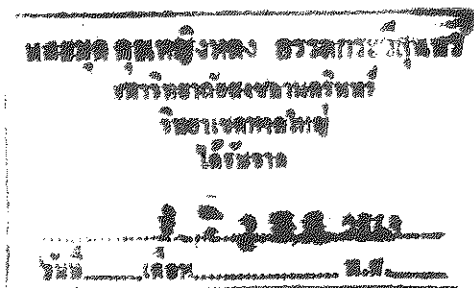
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ  
ของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
.....  
(ดร. ไพรัตน์ สงวนไทร)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์      การหาตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อการออกแบบบัลลาสต์  
ผู้เขียน                นายประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ  
สาขาวิชา              วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา            2539

#### บทคัดย่อ

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา เพื่อหาตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลการศึกษาพบว่าสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 W ซึ่งอาจใช้เป็นแบบอย่างได้นั้น ตัวแบบวงจรที่เหมาะสมประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ต่อขนานกัน และ วงจรทั้งหมดนี้ต่ออนุกรมเข้ากับ Zener diodes อีก 2 ตัว ที่ปลายวงจรทั้งสองข้าง (ภาพประกอบ 4.1 หน้า 42) ซึ่งใช้แทนความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลจากการทดลองด้วยวงจรและการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าตัวแบบวงจรให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริงดีพอควร



Thesis Title      A Circuit Model of Fluorescent Lamp for Ballast Design Application.  
Author             Mr. Prasert Pinpathomrat  
Major Program    Electrical Engineering  
Academic Year    1996

#### **Abstract**

This study was an attempt to determine a circuit model of a fluorescent lamp which is suitable for use in designing a ballast. For a typical 40-W fluorescent lamp, the model was found to consist of a resistor, a capacitor and an inductor in parallel which are connected in series with two Zener diodes (Fig. 4.1 , page 42). The diodes accounted for the lamp's nonlinearity. Both a physical circuit and a simulation using PSpice showed that the model gave reasonably good representation of the circuit behavior of an actual fluorescent lamp.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อ อาจารย์ปราโมทย์ จุฑาพร ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวีชานาโย รองประธานกรรมการที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดี รวมทั้งกรุณาช่วยเหลือหาเอกสารข้อมูล และ การสนับสนุนอีกหลายประการ ตลอดจนช่วยเหลือในการ ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนทำให้วิทยานิพนธ์ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพัฒน์ ตันตระกูลโรจน์ ดร. ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล และ อาจารย์มนัส เกื้อกูลกิจการ ตลอดจนอาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกคนของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ ที่ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณอาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และเพื่อนอาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วย ให้ข้อมูลและเอกสาร

ขอขอบคุณ ท่านอาจารย์นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ ผู้ช่วยอธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล นายมณฑล ฉายอรุณ ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ และ นายคณิง เจริญผล ผู้อำนวยการกองงานวิทยาเขต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่ให้ความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์และ กำลังใจมาด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณนายเอกพงษ์ แซ่จั้ง และนายโสมนัส นินิกสาร ที่ช่วยจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์จนสำเร็จ สมบูรณ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอโน้มศีรษะถึงพระคุณของบิดามารดา ที่ให้การส่งเสริมและอุปถัมภ์ด้านการ ศึกษา มาโดยตลอดจนได้ประสบความสำเร็จ

ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูป	(11)
<b>บทที่</b>	
1    บทนำ	1
2    การอาร์กดีสชาร์จ (Arc Discharge)	3
ความแตกต่างระหว่างอาร์กดีสชาร์จและ	3
โกลว์ดีสชาร์จ	
แนวลำประจุบวก (Positive Column)	7
คุณสมบัติของก๊าซในแนวลำประจุบวก	9
ความสมดุลย์ระหว่างพลังงานและความร้อน	15
ในแนวประจุบวก	
การสังเกตการณ์ในอาร์กคาโทด	20
อาร์กดีสชาร์จโดยการให้ความร้อน	21
คาโทดภายนอก	
3    หลักการหาตัวแบบวงจร	22
ที่มาของตัวแบบวงจร	22
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและ	24
กระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะเริ่มสตาร์ท	
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนกับ	25
กระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะทำงานที่	
ความถี่ 50 Hz ( $f = 50 \text{ Hz}$ )สภาวะในการเริ่มนำ	
กระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์	
สภาวะในการเริ่มนำกระแสของหลอดนีออน	28
ที่ความถี่ 50 Hz	
แนวความคิดการหาตัวแบบวงจรของ	33
หลอดฟลูออเรสเซนต์	
	(6)

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การออกแบบตัวเหนี่ยวนำภายนอก	37
พฤติกรรมของหลอดที่ความถี่สูงกว่า 50 Hz	38
<b>4 การทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSpice</b>	<b>42</b>
การทดลองตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์	42
ขอบเขตของอีตเตอร์ซิสของหลอดฟลูออเรสเซนต์	46
การใช้โปรแกรม PSpice ในการทดสอบตัวแบบวงจร	52
<b>5 สรุปและเสนอแนะ</b>	<b>56</b>
บรรณานุกรม	58
ภาคผนวก ก. การออกแบบบัลลาสต์ที่ความถี่ 50 Hz/220 V.	60
ภาคผนวก ข. ลักษณะโปรแกรมการใช้ของ PSpice และ แนะนำโปรแกรม PSpice	61
ประวัติผู้เขียน	77

คำศัพท์ และคำย่อ  
หมวดภาษาไทย-อังกฤษ

กำลังงาน	power
กระบวนการ	process
กระแสไฟฟ้า	current
การใช้ความร้อน	hissing
ขั้น	step
ขีดเริ่มเปลี่ยน	threshold
คาโทด	caThode
ค่าที่ตั้งไว้	set point
ความแม่นยำ	accuracy
ความเชื่อถือได้	reliability
ความต่างศักย์	potential
เครื่องมือวัดความหักเหของการแทรกสอด	interference refracton meter
แคลอรีมิเตอร์	calorimeter
ไซเคิล	cycle
ดีสชาร์จ	discharge
ตัวควบคุม	controller
แนวลำประจุบวก	positive column
โพลonium	polonium
ฟังก์ชัน	function
บัลลาสต์	ballast
ย่านโมเลกุล	molecular band
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	voltage
สถานะคงตัว	steady state
เสถียรภาพ	stability
หลอดฟลูออเรสเซนต์	fluorescent lamp
เอาท์พุต	output
อาร์ก	arc
อานอด	anode
อิเล็กโทรด	electrodes
อินแคนเดสเซนต์	incandescent
อินพุต	input
ออกซิเดชัน	oxidation
ออสซิลเลต	oscillate
ฮิสเตอรีซิส	hysteresis



คำศัพท์ และคำย่อ (ต่อ)  
หมวดอังกฤษ - ไทย

accuracy	ความแม่นยำ
anode	อานอด
arc	อาร์ค
ballast	บัลลาสต์
cathode	คาโทด
current	กระแสไฟฟ้า
cycle	ไซเคิล
calorimeter	แคลอรีมิเตอร์
controller	ตัวควบคุม
discharge	ดีสชาร์จ
electrodes	อิเล็กโทรด
fluorescent lamp	หลอดฟลูออเรสเซนต์
function	ฟังก์ชัน
hissing	การใช้ความร้อน
hysteresis	ฮิสเตอรีซิส
incandescent	อินแคนเดสเซนต์
input	อินพุต
interference refracton meter	เครื่องมือวัดความหักเหของการแทรกสอด
molecular band	ย่านโมเลกุล
oscillate	ออสซิลเลต
output	เอาต์พุต
oxidation	ออกซิเดชัน
power	กำลังงาน
process	กระบวนการ
potential	ความต่างศักย์
positive column	แนวลำประจุบวก
polonium	โพลอเนียม
stability	เสถียรภาพ
steady state	สถานะคงตัว
step	ขั้น
set point	ค่าที่ตั้งไว้
threshold	ขีดเริ่มเปลี่ยน
voltage	แรงเคลื่อนไฟฟ้า

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าอนุภูมิที่วัดได้ในแนวลำประจุบวกของการอาร์ก	14
2.2 การแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอด ขณะนำกระแส	21
4.1 ผลของวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์เทียบกับตัวแบบวงจร	43
4.2 การทดลองหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อค้อย ๆ เพิ่มแรงดัน	46
4.3 การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อค้อย ๆ ลดแรงดัน	47

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการอาร์ก (E) จะสัมพันธ์กับ I	4
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการอาร์ก (E) กับระยะห่างของอิเล็กโทรด	5
2.3 การกระจายของอุณหภูมิของก๊าซความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแสในการอาร์กที่มีความยาว	6
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า	7
2.5 แสดงความหนาแน่นของกระแส	8
2.6 การกระจายอุณหภูมิของก๊าซและอิเล็กตรอนในหลอดที่ความดันต่าง ๆ	9
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซและอิเล็กตรอนที่ความดันต่าง ๆ	10
2.8 แสดงการวัดอุณหภูมิของก๊าซในแนวลำประจุบวกด้วยวิธีใช้การซึมซาบรังสีเอ็กซ์	11
2.9 การวัดอุณหภูมิของก๊าซในแนวประจุบวก	12
2.10 ความเข้มของอนุภาคอัลฟา	14
2.11 การอาร์กในสนามความโน้มถ่วงโลก	15
2.12 การอาร์กในสนามไร้ความโน้มถ่วง	15
2.13 อัตราการขยายตัวของอนุภาค	16
2.14 การนำความร้อนของไฮโดรเจนและไนโตรเจน	17
2.15 การแสดงแรงดันระหว่างอิเล็กโทรด	20
3.1 การใช้คอมพิวเตอร์ทดสอบกลุ่มค่าระหว่าง V, I	23
3.2 กราฟแสดงการทดลอง V, I ของหลอด	24
3.3 วงจรทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์	24
3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์	25
3.5 ความสัมพันธ์ของความส่องสว่างกับกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์	25
3.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะหลอดไม่นำกระแส	26
3.7 (A) รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์	27
(B) รูปแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ Mode x-y	27
3.8 กระแสแรงดันตกคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ 50 Hz	28

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

3.9	วงจรการอสซิลเลตของหลอดนีออน	29
3.10	กราฟคุณสมบัติของหลอดนีออน	29
3.11	ตัวแบบวงจรในขณะเริ่มนำกระแสของหลอดนีออน	30
3.12	การอสซิลเลตของหลอดนีออน	30
3.13	วงจร Van der Pol Oscillator	31
3.14	กราฟแสดงค่าความต้านทานลบ	31
3.15	กราฟแสดงค่าความต้านทาน 1 หน่วย	31
3.16	รูปคลื่นที่ใช้ในการสังเคราะห์หาฟังก์ชันของวงจรที่สังเคราะห์	33
3.17	ส่วนประกอบของแรงดันตกคร่อมหลอด	34
3.18	ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์	34
3.19	(A) สัญลักษณ์หลอดฟลูออเรสเซนต์	36
	(B) ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์	36
3.20	วงจรทดสอบคุณสมบัติของหลอดที่ความถี่สูง	38
3.21	(A) กระแสและแรงดันของหลอดที่ความถี่ 15.57 KHz	39
	(B) กระแสและแรงดันของหลอดที่ Mode x-y	39
3.22	ความสัมพันธ์ของแรงดันเริ่มนำกระแสของหลอดต่อ การเปลี่ยนแปลงความถี่	39
4.1	วงจรทดลองตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์	42
4.2	กราฟแรงดันตกคร่อมหลอดและเวลา	43
4.3	ความสัมพันธ์ของ V, I	44
4.4	ภาพแสดงค่า V, I เมื่อใช้ตัวแบบวงจร	45
4.5	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน ( $v_p$ ) และแรงดัน ( $V_L$ ) ขณะเริ่มนำกระแส	44
4.6	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน ( $v_p$ ) และแรงดัน ( $V_L$ ) ขณะเริ่มหยุดนำกระแส	45
4.7	ความสัมพันธ์ของแรงดันเริ่มนำกระแสของหลอดต่อ การเปลี่ยนแปลงความถี่	47
4.8	ตัวแบบวงจรที่ใช้โปรแกรมทดสอบโปรแกรมและผลการทดลอง	48

## บทที่ 1

### บทนำ

หลอดฟลูออเรสเซนต์ จะให้แสงสว่างเป็นผลมาจาก การคายพลังงานของอิเล็กตรอนเนื่องมาจากการอาร์ก ของประจุภายในหลอดที่มีความดันต่ำ [A. Von Engel, 1965] เมื่อในหลอดมีสารเรืองแสง เช่น ฟอสเฟอร์ เป็นผลให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ มีคุณภาพของแสงดี และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสง จึงมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับหลอดอินแคนเดสเซนต์ เพราะคุณสมบัติพิเศษที่กล่าวมานี้ เป็นผลให้มีความนิยมในการนำหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามเมื่อมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย การพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานของหลอดจึงถูกนำเสนอ โดยปกติแล้วหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีส่วนประกอบของระบบ คือ บัลลาสต์ หลอด และ สตาร์ทเตอร์ หลอดจะนำกระแสได้ เมื่อแรงดันตกคร่อมหลอด มีค่าถึงระดับที่หลอดจะติดได้ เช่น ฟลูออเรสเซนต์ 40 วัตต์ จะมีแรงดันเริ่มนำกระแสที่ 190 โวลต์ เป็นต้น ดังนั้น สตาร์ทเตอร์จะเป็นไบเมทัลลสวิทช์ (bimetal switch) ถูกออกแบบให้เริ่มตัดต่อสวิทช์ ของสตาร์ทเตอร์เป็นเสมือนการสร้างแรงดันกระชากสูง ทั่วตกคร่อมหลอดซึ่งเป็นผลให้หลอดนำกระแสได้เนื่องจากพลังงานที่สะสมในบัลลาสต์ และเมื่อหลอดนำกระแสแล้ว บัลลาสต์จะทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลผ่านหลอดโดยไม่ทำให้หลอดเสียหาย และทำงานได้ต่อไป

จากความรู้เบื้องต้นของการทำงาน และส่วนประกอบของหลอดฟลูออเรสเซนต์นี้ได้ถูกใช้มาจนปัจจุบันแต่ยังต้องสูญเสียพลังงาน เนื่องจากผลของค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์ ซึ่งมีผลมากที่สุดในระบบของผู้ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ในการให้แสงสว่าง

การศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ นั้น เริ่มตั้งแต่ปีค.ศ. 1948 [Francis, 1948] ต่อจากนั้น Peek and Domina ได้นำเสนอสมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับ หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Peek and Domina Eberle Spencer, 1968) และ Gluskin ได้นำเสนอคุณสมบัติเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของแรงดัน และกระแสโดยเทียบเคียงความสัมพันธ์ตามหลัก entropy ของเทอร์โมไดนามิกส์ และสามารถพบพฤติกรรมภายในของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Gluskin, 1989, 1990) ตามลำดับ

สำหรับนักวิจัยของไทยเริ่มทำการวิจัยทางจรรยาบรรณบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อประสิทธิภาพของการประหยัดพลังงานของหลอดเมื่อปี 2524 ถึงปัจจุบัน โดยศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์, (มงคล เดชนครินทร์ 2525, 2534)

จากการวิจัยที่กล่าวมาแล้วพบว่า การใช้ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยังไม่เคยมีการนำเสนอและในขณะเดียวกันการแก้ตัวประกอบกำลังจะพิจารณาจากความต่างเฟสของกระแสและแรงดันแล้วใช้ตัวเก็บประจุช่วยคั้งนั้นจุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอพฤติกรรมของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่สามารถแทนด้วยตัวแบบวงจร และใช้ตัวแบบวงจรในการออกแบบบัลลาสต์ให้มีค่าเหนี่ยวนำ (inductance) เหมาะสม และนอกจากนั้น การใช้โปรแกรม PSpice ในการพิสูจน์ความถูกต้องของวงจร

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้จึงมีส่วนประกอบในการวิจัยดังนี้ บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำที่มาและจุดประสงค์ของการวิจัยสำหรับ บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงพฤติกรรมทางฟิสิกส์ ของหลอดอาร์กดีสชาร์จ ซึ่งจะเป็ความรู้พื้นฐาน นำไปสู่การพัฒนาตัวแบบวงจรที่เป็นวงจรไฟฟ้าแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ บทที่ 3 เป็นแนวคิด ในการสังเคราะห์ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ บทที่ 4 เป็นการทดลองวงจรรวมทั้งการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรโดยโปรแกรม PSpice บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัยและผลที่ได้รับ รวมทั้งข้อเสนอแนะที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้

## บทที่ 2

### การอาร์กดิสชาร์จ

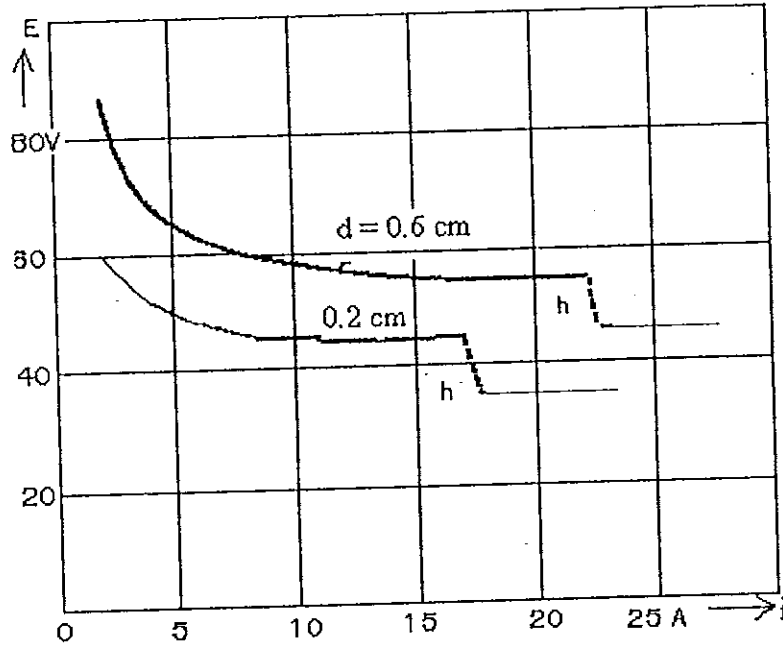
#### 1 ความแตกต่างระหว่างอาร์กดิสชาร์จและโกลว์ดิสชาร์จ

การดิสชาร์จแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ โกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) และ อาร์กดิสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งการดิสชาร์จชนิดแรกนั้นเป็นการดิสชาร์จจากขั้วคาโทด (cathode) 2 ขั้ว ที่อยู่ภายใต้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากขั้วหนึ่งผ่านก๊าซหรืออากาศเข้าหาอีกขั้วหนึ่ง

ส่วนอาร์กดิสชาร์จสามารถยกตัวอย่างให้เห็นได้อย่างง่าย ๆ ก็คือ การดิสชาร์จระหว่างขั้วคาร์บอนหรือโลหะตัวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด (electrode) 2 ตัว หรือ 2 ขั้ว ซึ่งแต่ละขั้วอยู่ด้วยกันและมีกระแสไหลจำนวนหนึ่ง เมื่อแยกอิเล็กโทรดทั้ง 2 ตัวนี้ออกจากกันก็จะเกิดการดิสชาร์จขึ้น ซึ่งการดิสชาร์จในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายทั้งในอากาศ หรือในสภาวะความดันสูง หรือต่ำกว่าบรรยากาศ หรือก๊าซ หรือแม้แต่สุญญากาศ แต่การทดสอบหรือการทดลอง การดิสชาร์จแบบอาร์กไม่เหมาะสมที่จะกระทำในบรรยากาศหรือในอากาศ เนื่องจากปฏิกิริยาหรือกระบวนการทางเคมีและความร้อนที่ผิวของอิเล็กโทรดจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน การทดลองการอาร์กดิสชาร์จในก๊าซจะสังเกตเห็นผล การทดลองได้ดีกว่า

วิธีที่สะดวกในการให้ค่าจำกัดความเกี่ยวกับอาร์กดิสชาร์จคือ การเปรียบเทียบกับโกลว์ดิสชาร์จที่บริเวณของขั้วคาโทด ในโกลว์ดิสชาร์จแรงดันไฟฟ้า ตกคร่อม ที่คาโทดจะมีค่าประมาณ 100 ถึง 400 V และมีความหนาแน่นของกระแสต่ำ ทั้งนี้ยกเว้นการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นที่ความดันสูง และกระแสสูง แนวลำประจุบวก (positive column) ที่เกิดขึ้นจะเต็มหลอดทดลอง ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการเกิดโกลว์ดิสชาร์จ แสงที่ได้ที่ขั้วคาโทดจะเป็นสเปกตรัม (spectrum) ของก๊าซ แต่ในการเกิดอาร์กดิสชาร์จแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขั้วคาโทดจะมีเพียงประมาณ 10 V เท่านั้น แต่ความหนาแน่นกระแสสูงมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลทางบวก ให้เกิดการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น แสงที่ได้จะเป็นสเปกตรัมของ ไอของสารที่ใช้ทำขั้วคาโทด แนวลำประจุบวกจะคอดลงที่ตำแหน่งใกล้ ๆ อิเล็กโทรด ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้ทองแดงเป็นคาโทดในก๊าซไนโตรเจนที่ ความดัน 1 บรรยากาศ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 350 V ความหนาแน่นของกระแสมีค่า  $1 \text{ A/cm}^2$  ถ้าแสงที่ได้บริเวณขั้วคาโทดมีสเปกตรัมอยู่ในช่วงของก๊าซไนโตรเจน การดิสชาร์จที่เกิดขึ้นเป็น โกลว์ดิสชาร์จ แต่ถ้าขั้วอิเล็กโทรดวางห่างกันไม่เกิน 1 cm. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมีเพียง 30 โวลท์ ความหนาแน่นกระแส  $10^4$  ถึง  $10^6 \text{ A/cm}^2$  แสงที่ได้ส่วนใหญ่เป็นสีเขียว แสดงว่าการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นเป็น อาร์กดิสชาร์จ

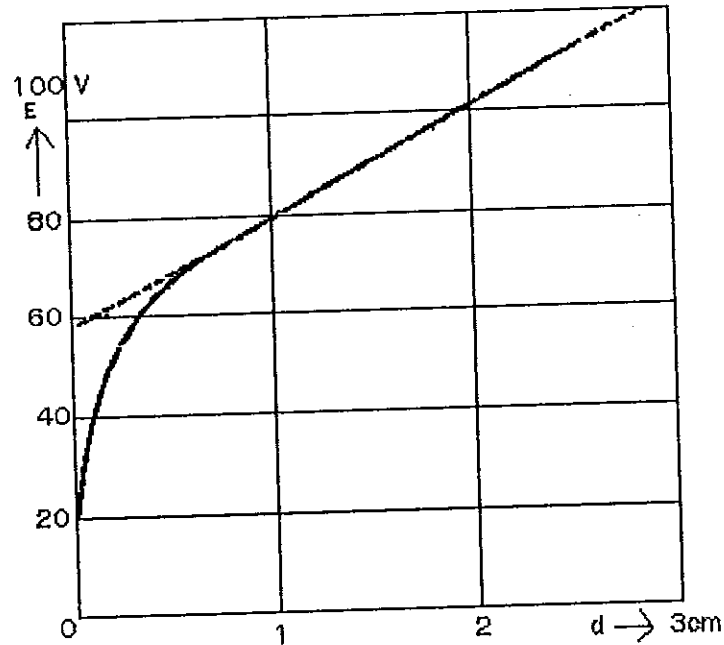
สมมติให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น  $d$  แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการอาร์ก เป็น  $E$  และ จะลดลงเมื่อกระแส  $i$  เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 2.1



ภาพประกอบ 2.1 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการอาร์ก  $B$  จะสัมพันธ์กับกระแส  $i$  ที่เกิดการอาร์กระหว่างอิเล็กโทรดคาร์บอนในอากาศที่ความดันที่ 1 บรรยากาศ และเกิดฮิสซิ่งอาร์กที่จุด  $h$  [ 1 ]

ในภาพประกอบ 2.1 นี้ อิเล็กโทรดเป็นคาร์บอนจะเห็นได้ว่าเมื่อ  $d$  มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้า  $B$  ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และแรงดันไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วที่จุด  $h$  ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของแอโนด (anode) ที่ทำให้การอาร์กที่จุดนี้เกิดเสียงดัง เรียกว่า ฮิสซิ่ง (hissing) กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามระยะ  $d$  ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 2.2





ภาพประกอบ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการอาร์ก  $E$  กับระยะห่างของอิเล็กโทรด  $d$  เมื่อเกิดการอาร์กของอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนในอากาศที่กระแส 7 แอมแปร์ [ 1 ]

จากภาพประกอบ 2.2 แนวล่าประจุบวกและสนามไฟฟ้าที่เกิดจะเท่ากันตลอด การวัดว่าเท่ากันหรือไม่นั้นก็โดยใช้การวัดแสงที่ได้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาว ซึ่งก็จะได้ค่าเท่ากันตลอดแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในสมการที่เข้าใจได้ง่าย ๆ ดังนี้

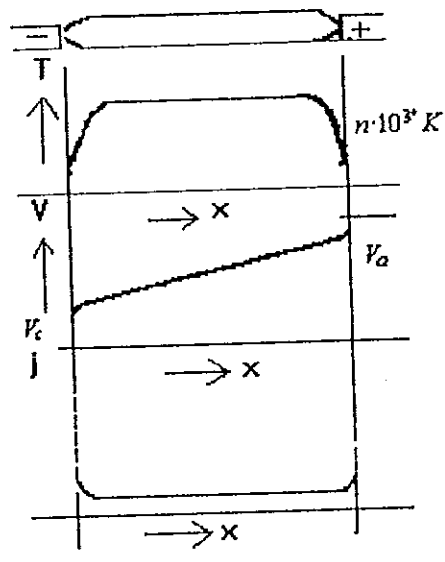
$$E = e_c + e_a + e_p + (e_1 + e_2) \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

- เมื่อ  $e_c$  เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่คาโทด  
 $e_a$  เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่แอโนด  
 $e_p$  เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแนวล่าประจุบวก  
 $e_1, e_2$  เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแนวล่าประจุบวกไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างของอิเล็กโทรดและกระแส

$$e_p = Xd_p \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

เมื่อ  $X$  เป็นสนามไฟฟ้าในแนวล่ำของความยาว  $d_p$  ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซและความดันที่ใช้

ค่าอื่น ๆ จะได้จากการวัดพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปแบบต่าง ๆ ในการอาร์กสั้น ๆ ระหว่างอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอน กระแสไฟฟ้าที่ใช้ 5A. ถ้าใช้แคลอรีมิเตอร์ (calorimeter) ของอากาศมาวัดก็จะได้ค่าประมาณ 42 % ของพลังงานไฟฟ้ารวมที่ส่งให้กับคาโทด และประมาณ 37% ที่แอโนด การสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการพาความร้อน การแผ่รังสี และการทำปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น เมื่อใช้คาร์บอนเป็นคาโทดแทนทองแดงจะพบว่า 45% ของพลังงานจ่ายให้กับคาโทด 80 % ของพลังงานไหลผ่านไปยังอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งอาจจะไม่เท่ากันทั้งสองข้าง ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้ในโตรเจนแทนอากาศก็จะพบว่าไม่เกิดการออกซิเดชัน (oxidation) ที่แอโนดที่เป็นคาร์บอน



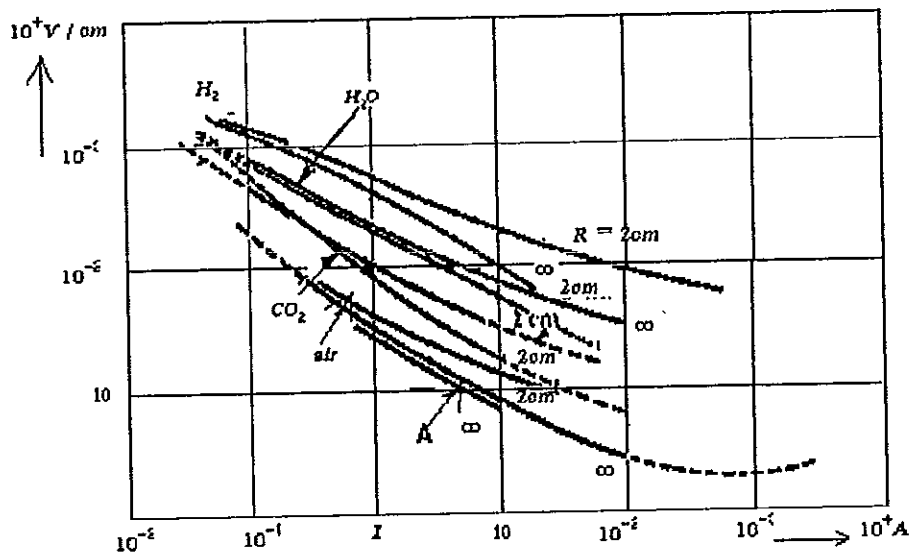
ภาพประกอบ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการกระจายของอุณหภูมิของก๊าซ ความต่างศักย์ (potential) และความหนาแน่นของกระแสในอาร์กที่มีระยะทางยาว ในการอาร์กที่มีระยะทางยาวนี้ 10 % ของพลังงานที่แอโนดลดลงอันเนื่องมาจากการนำความร้อนที่แอโนด [ 1 ]  
 เมื่อ  $T$  เป็นอุณหภูมิของก๊าซ  
 $V$  เป็นความต่างศักย์  
 $j$  เป็นความหนาแน่นของกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของ  $X$  ในการอาร์กที่มีระยะทางยาว  
 $V_c, V_a$  เป็นแรงดันตกคร่อมที่คาโทดและแอโนดตามลำดับ

2 แนวลำประจุบวก (Positive Column)

ในภาพประกอบ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการแปรเปลี่ยนของสนามต่าง ๆ กับกระแสที่ได้รับจากการวัดค่าของ  $B = f(d)$  (ภาพประกอบ 2.3)  $X$  จะมีค่าสูงเมื่ออยู่ในไฮโดรเจนหรือน้ำ เพราะว่ทั้งไฮโดรเจนและน้ำมีการนำความร้อนที่ดีมากซึ่งจะทำให้กระแสไหลสูงขึ้น และยังมีการสูญเสียต่าง ๆ จากการที่อุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นกระแสจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุและความเร็ว ดังสมการ

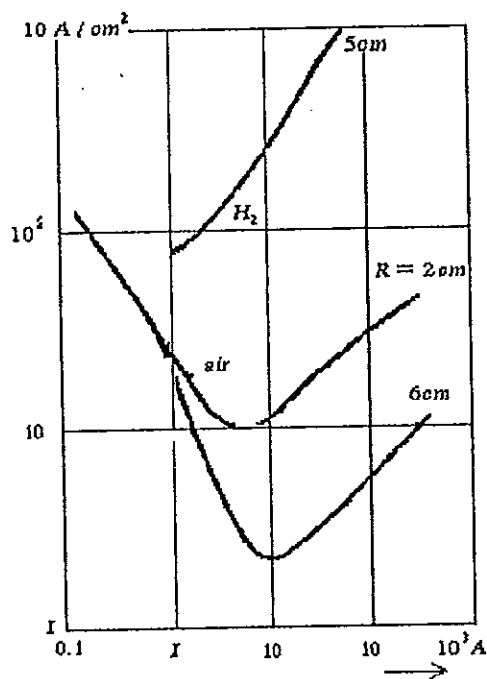
$$j = e N_e V_d \propto N_e X \dots\dots\dots(2-3)$$

และจาก  $X \propto j / N_e$  ซึ่งโดยปกติเมื่อ  $i$  เพิ่มขึ้น  $j$  จะลดลง แต่  $N_e$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อ  $T_g$  เพิ่มขึ้น และ  $i$  เพิ่มขึ้นขณะที่  $X$  ลดลง ดังในภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า  $X$  ในแนวลำประจุบวก ของการอาร์ก ซึ่งสัมพันธ์กับกระแส  $i$  ในก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ความดันบรรยากาศสำหรับหลอดทดลองที่  $R$  ต่างๆ กัน [ 1 ]

เมื่อค่ากระแส  $i$  มีค่าสูงมาก ๆ  $X$  จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของกระแส  $i$  ในค่า  $i$  ที่เพิ่มขึ้นมาก ๆ จะไปขึ้นอยู่กับรัศมีของหลอด ดังในภาพประกอบ 2.5 จะเป็นการวัดเปรียบเทียบกับแนวลำประจุบวกในอากาศและในไฮโดรเจน ให้สังเกตการเพิ่มขึ้นของ  $j$  และ  $i$  การที่  $i$  มีค่าเพิ่มขึ้นสูง ๆ นั้นการเพิ่มขึ้นของ  $j$  จะไปสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดแทน

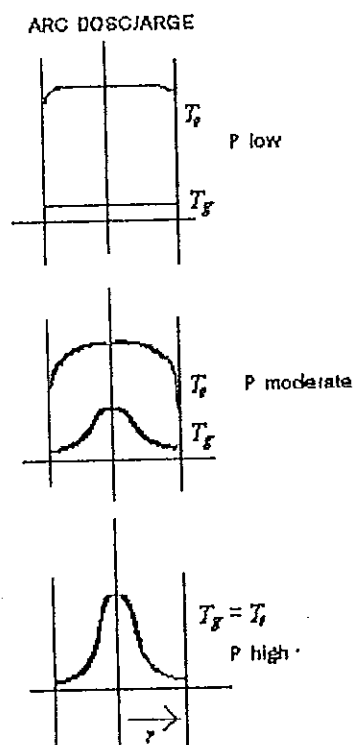


ภาพประกอบ 2.5 แสดงความหนาแน่นของกระแส  $P_j$  ในแนวลำประจุบวกที่สัมพันธ์กับกระแส  $i$  ในอากาศและในไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศสำหรับรัศมีค่าต่าง ๆ ของหลอด [ 1 ]

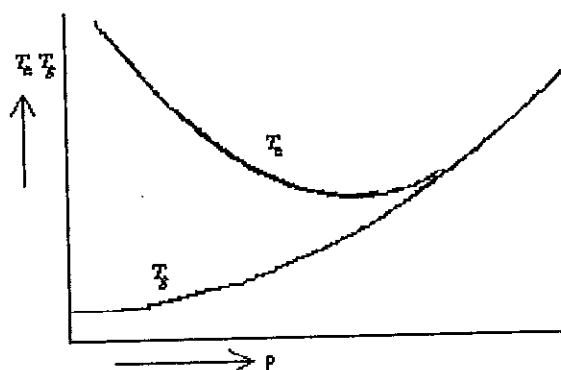
### 3 อุณหภูมิของก๊าซในแนวลำประจวบ

ในภาพประกอบ 2.6 แสดงถึงอุณหภูมิของก๊าซ  $T_g$  ที่ความดันต่ำ  $P$  ในแนวลำที่เท่ากับ อุณหภูมิภายนอกอุณหภูมิของอิเล็กตรอน  $T_e$  จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่ม  $P$   $T_g$  จะพบว่า  $T_e$  ลดลง ที่ ความดันต่ำ  $T_e$  จะไม่ขึ้นอยู่กับ  $r$  แต่ที่ความดันสูงทั้ง  $T_e$  และ  $T_g$  จะขึ้นอยู่กับ  $r$  ในรูปที่ 2.7 จะ แสดงการมีค่าเข้าใกล้กันของ  $T_e$  และ  $T_g$  ที่ความดันสูง

$$X \approx \text{const}$$



ภาพประกอบ 2.6 การกระจายของอุณหภูมิของก๊าซและอิเล็กตรอนในหลอดที่ความดันต่าง ๆ [ 1 ]



ภาพประกอบ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สและอิเล็กตรอนที่ความดันต่างๆ [ 1 ]

อุณหภูมิของแก๊สในแนวลำประจุบวกสามารถวัดได้หลายวิธีดังนี้

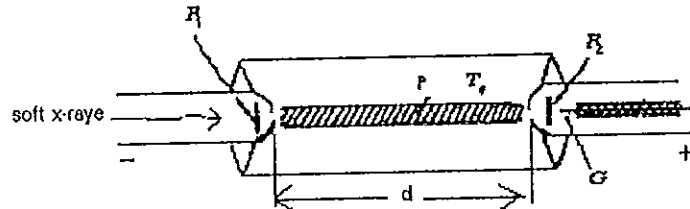
1. จากการวัดหนาแน่นของแก๊สโดยใช้รังสีเอ็กซ์ (X-Rays) หรืออนุภาค  $\alpha$  หรือใช้คลื่นเสียงแล้วนำมาเปรียบเทียบกับกฎของแก๊สในอุดมคติ (Ideal Gas Law)
2. จากการวัดเส้นของย่านโมเลกุล (Molecular Band)
3. จากอัตราส่วนของความเข้มของสเปกตรัม 2 ย่าน
4. จากการวัดความเข้มของการแผ่รังสี  $\gamma$  ของไอโซโทปกัมมันตภาพรังสี ( $Hg^{203}$ ) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของอะตอม
5. จากเครื่องมือวัดความหักเหของการแทรกสอด (Interference Refractometer) หรือการประยุกต์ใช้วิธีของชไลเรน (Schlieren) ซึ่งจะได้ดัชนีของการหักเห

วิธีการที่ 1 เป็นการวัดความหนาแน่นของแก๊สโดยใช้รังสีเอ็กซ์อย่างอ่อน ๆ ส่งผ่านแผ่นกรอง (Filter) ในแถบความยาวคลื่นแคบ ๆ ผ่านไปในแนวลำประจุบวก ดังในรูปที่ 2.8 ความเข้มที่ทางออกจะถูกวัดที่ระยะห่าง  $d$  และค่า  $p$  ในหลอดทดลองต่าง ๆ กัน ถ้า  $I_1$  และ  $I_2$  มีค่าสัมพันธ์กันโดยมีค่าเป็นความเข้มที่ระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  ซึ่งเป็นระยะระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจากค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของแก๊ส 1 หน่วย จะได้

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{-\left(\frac{\alpha}{p}\right) p (d_1 - d_2)} \quad \dots\dots(2-4)$$

$d$  = ระยะห่างของความเข้มทางออก

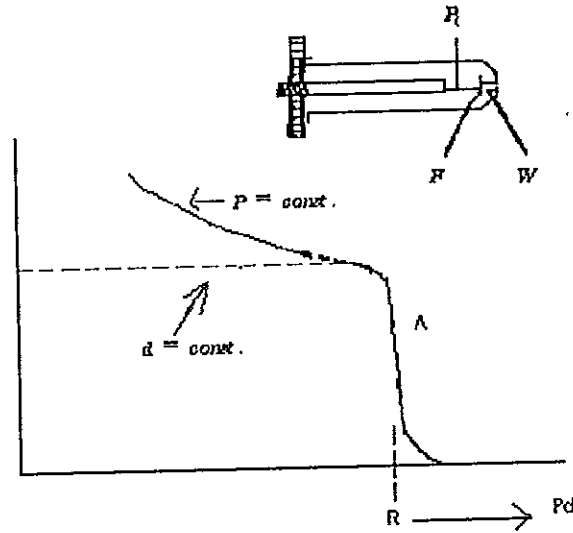
เมื่อ  $p$  เป็นค่าความหนาแน่นของก๊าซ อัตราส่วนของ  $I_1/I_2$  ปกติจะใช้ค่าของ (2.7) เพื่อการคำนวณที่ถูกต้อง



ภาพประกอบ 2.8 แสดงการวัดคุณสมบัติของก๊าซในแนวลำประจุบวกด้วยวิธีใช้การเชื่อมขั้วรังสีเอ็กซ์ [ 1 ] .

หลังจากทดลองครั้งแรกแล้วการทดลองครั้งต่อไปให้ใช้ระยะห่าง  $d_1$  และ  $d_2$  คงเดิม ลดความดันของก๊าซในหลอดทดลองลงเป็นค่า  $P_1$  และ  $P_2$  ที่ความเข้ม  $I_1$  และ  $I_2$  เท่าเดิมด้วยวิธีนี้จะทำให้ตัดเทอมของ  $a/p$  ออกไปได้ก็จะสามารถหาค่าของความหนาแน่นของก๊าซ และคุณสมบัติของก๊าซซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

ความหนาแน่นของก๊าซ  $\delta$  สามารถวัดได้ด้วยการสังเกตค่า  $R$  ของอนุภาค  $\alpha (R \propto \frac{1}{\delta})$  ที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดกัมมันตภาพรังสี ดังตัวอย่าง ของ การนำเอาลูกทรงกลมเงินที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้าให้สารโพลONIUM (polonium) เคลือบอยู่ ความหนาแน่นที่วัดได้ที่อิเล็กโทรดของการอาร์กผ่านทรงกลมนี้จะเป็นฟังก์ชัน (function) ของความหนาแน่น ( $p$ ) คูณด้วยระยะห่าง ( $d$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



ภาพประกอบ 2.9 แสดงการวัดอุณหภูมิของก๊าซในแนวลำประจุบวก ด้วยการวัดย่าน  $R$  ของอนุภาคอัลฟา ความเข้ม  $I$  ของรังสีอัลฟา จะเป็นฟังก์ชันมวลของก๊าซทั้งหมด ในรูปบนเล็กจะแสดงภาพตัดขวางของอิเล็กโทรดที่ใช้อาร์กซึ่งเป็นทรงกลมเงินเล็ก ๆ เคลือบด้วยโพลีเอทิลีน โดยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า ระยะห่าง  $W$  จะเป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งในการทดลอง เส้นกราฟ เมื่อ  $P$  คงที่ จะแสดงให้เห็นว่า  $I$  มีค่าลดลงเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้น [ 1 ].

ในการทดลองหาค่าในรูปที่ 2.9 นั้น ค่าที่จุด A หมายถึงการนำเอาตัวปล่อยอนุภาคอัลฟาไปใส่ไว้ในถังปิดที่เป็นอิเล็กโทรดทั้งอัน ซึ่งในถังปิดนั้นจะบรรจุด้วยก๊าซชนิดเดียวกันทั้งสองข้าง ระยะห่างจากอิเล็กโทรดไปยังช่องของถังปิดคือ  $W$  ซึ่งจะเป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งในการทดลองด้วย ระยะ  $W$  นี้จะทดลองเปลี่ยนไปเรื่อย โดยสังเกตที่เครื่องมือวัดอนุภาคอัลฟาจนกระทั่งค่าที่อ่านได้ตกลงอย่างรวดเร็วจากจึงลดค่าระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  แล้วเพิ่มค่า  $W$  ครั้งละ  $\Delta$  จนกระทั่งอ่านค่าความเข้มได้เท่าเดิมแล้วบันทึกค่า  $d_2$  ที่ได้เอาไว้ ค่าอุณหภูมิของก๊าซในแนวลำประจุบวกคือ

$$T_g = T_0 \Delta / (d_1 - d_2) \dots\dots\dots(2-5)$$



เมื่อ  $T_0$  เป็นอุณหภูมิของก๊าซระหว่างแหล่งกำเนิดกับ  $W$  ในภาชนะปิดที่ระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิของก๊าซสามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งนอกเหนือจากที่กล่าวมาคือการใช้คลื่นเสียงผ่านไป ในแนวลำประจุบวกแล้วด้วยความเร็ว  $V_s$  ที่ได้ ดังสมการ

$$V_s = \sqrt{\left(k \frac{p}{\rho}\right) \alpha \sqrt{\left(\frac{krt}{M}\right)}} \dots\dots\dots(2-6)$$

เมื่อ  $k = \frac{c_p}{c_v}$  และ  $d$  กับ  $p$  ความหนาแน่นกับความดันของก๊าซ

$T$  = อุณหภูมิ

$R$  = ความเข้มข้นภาคอัลฟา

$M$  เป็นน้ำหนักของโมเลกุลและ เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์

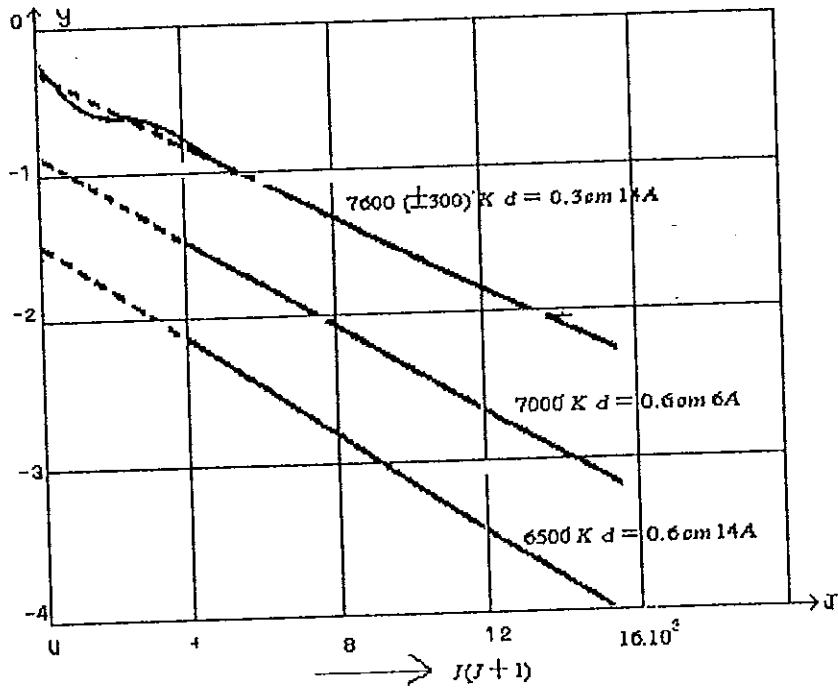
วิธีการอื่น ๆ ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของก๊าซ เช่น การสมมติให้โมเลกุลที่ไม่ถูกกระตุ้นใด ๆ ปลดปล่อยย่านสเปกตรัมของอุณหภูมิในสภาวะสงบออกมา และสมมติให้ไม่มีการซึมซาบใด ๆ เกิดขึ้น ความเข้มของแต่ละสภาวะที่ได้จากการปลดปล่อยสเปกตรัมของโมเลกุลคืออุณหภูมิซึ่งจะเป็นสัดส่วนกันโดยค่าตัวประกอบโบลซ์แมน  $e^{-\frac{e}{kt}}$  เนื่องจากแต่ละสภาวะจะประกอบด้วยระดับ  $(2J+1)$  เมื่อ  $J$  เป็นค่าควอนตัมของโมเมนต์เชิงมุม ความถี่ที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกไว้เพื่อทำเป็นสถิติ เมื่อ  $J=0$  ตัวเลขของโมเลกุลและความเข้มจะได้

$$I \propto V^4 (J' + J'' + 1) e^{-c[J' \frac{(J'+1)}{kt}]} \dots\dots\dots(2-7)$$

เมื่อ  $V = \frac{1}{y}$  เป็นตำแหน่งจำนวนคลื่นของสเปกตรัมที่แผ่ออกมา  $J'$  และ  $J''$

เป็นโมเมนต์เชิงมุมของสภาวะสูงและต่ำตามลำดับ  $C = \frac{h^2}{8\pi^2 e}$  เมื่อ  $e$  เป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

ของโมเลกุล  $y = kc^{-1} \ln[I / (j' + j'' + 1)]$  ใน ภาพประกอบ 2.10 แสดงถึงเส้นสเปกตรัมของความเข้มที่ย่าน ของการอาร์กที่เกิดจากอิเลคโตรดคาร์บอนอากาศที่กระแส 6 แอมแปร์ และ 14 แอมแปร์



ภาพประกอบ 2.10 ความเข้มของอนุภาคอิเล็กตรอน [ 1 ]

ความเข้ม  $y$  จะเป็นฟังก์ชันของค่าควอนตัมเชิงมุม  $J$  ของการอาร์คที่เกิดจากอิเล็กโทรดที่เป็นคาร์บอนในอากาศ โดยเปรียบเทียบที่ค่ากระแส และระยะที่แตกต่างกัน  
 จากตาราง 2.1 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน โดยความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ

ตาราง 2.1 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในแนวลำประจุบวกของการอาร์ค [ 1 ]

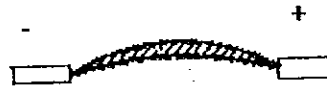
Gas/electrode	Pressure	Arc length (cm)	$i(A)$	Method	Position	$T_0 (^{\circ}K)$
Air C	1 atm	0.8	$\sim 2$	CN band	axis	$5900 \pm 300$
" "	"	0.3-1.8	1-12	"	"	6200-7800
" C+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	1.5-2	6-7	AlO	flame	2800-3800
" C+Cu	"	few cm	180	Cu+	axis	$\sim 12\ 000$
H <sub>2</sub> W	"	"	4	H <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	"	4000
" W	"	"	8-9	"	"	5300-6300
" C	"	"	few	C <sub>2</sub>	"	5000
N <sub>2</sub> Cu	"	15	2	X-rays α-rays	"	$5300 \pm 300$
Air Cu	"	"	2	"	"	$4700 \pm 450$
" "	"	"	14	H <sub>2</sub>	"	$5470 \pm 10$
H <sub>2</sub> O ..	"	(jet)	500	"	"	35 000
" ..	"	"	1500	"	"	50 000
Air Cu	"	"	$\approx 10$	sound	"	6100

#### 4 ความสมดุลระหว่างพลังงานและความร้อนในแนวลำประจุบวก

ในสภาวะความดันบรรยากาศโดยทั่วไปพลังงานในแนวลำของโมเลกุลและก๊าซ จำนวนเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นการแผ่รังสีหรือพลังงานทางเคมี ยกเว้นไอจําพวก Na และ Hg เป็นต้น พลังงานที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานความร้อนและถูกส่งออกไปโดยการพาความร้อน

การนำความร้อนที่เกิดขึ้นในการอาร์กในแนวลำจะทดลองให้เห็นได้ โดยการทำให้เกิดการอาร์กในกล่องที่ปิดทึบซึ่งภายในบรรจุไว้ด้วยอากาศแล้วบันทึกความหนาแน่นของกระแสและแสงที่เปล่งออกมาผลลัพธ์ที่ได้คือความร้อนที่สูญเสียจะทำให้ความต่างศักย์ของประจุบวกในแนวลำลดลง ดังภาพประกอบ 2.11

arc in a gravitational field



$$e \approx 45 \text{ V}$$

$$j \approx 4.5 \text{ A/cm}^2$$

ภาพประกอบ 2.11 การอาร์กในสนามความโน้มถ่วงโลก

arc in a gravitation-free field



$$e \approx 45 - 20 \text{ V}$$

$$j \approx 1 \text{ A/cm}^2$$

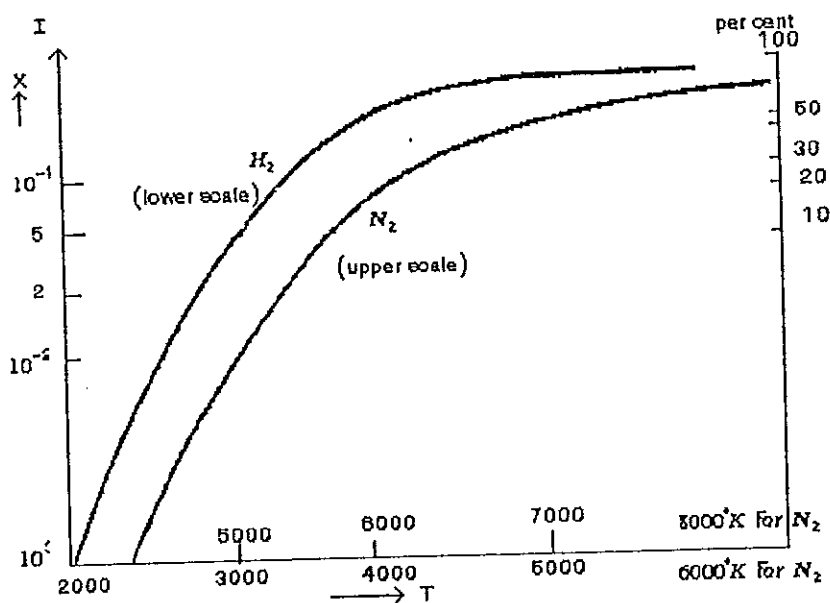
ภาพประกอบ 2.12 การอาร์กในสนามไร้ความโน้มถ่วง [1]

ภาพประกอบ 2.11 การอาร์กในแนวราบระหว่างอิเล็กโทรดคาร์บอนในอากาศ (8 แอมแปร์ ระยะห่าง 3 เซนติเมตร) ในสนามความโน้มถ่วงของโลกและไร้ความโน้มถ่วง

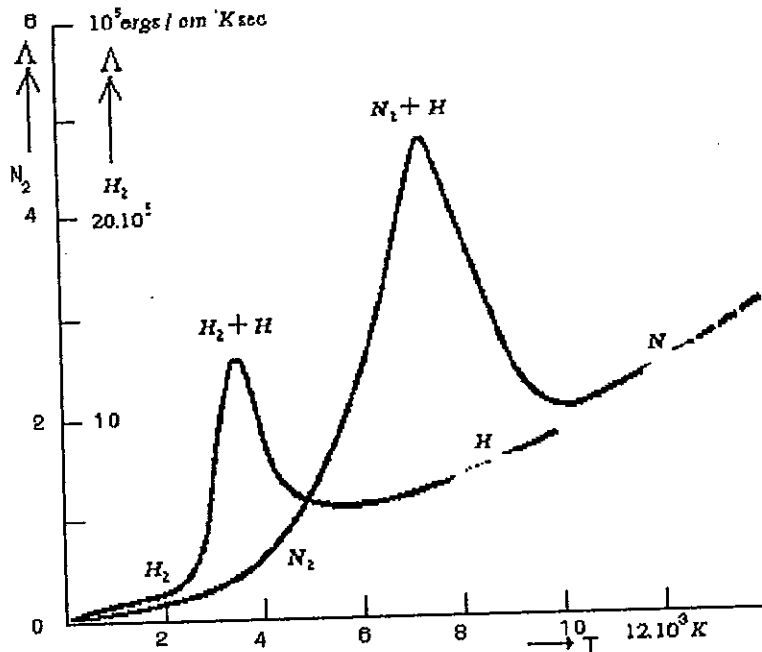
$e$  = แรงดันไฟฟ้าที่อาร์ก

$j$  = ความหนาแน่นของกระแสในแนวลำประจุบวก

ถ้าไม่มีการแผ่รังสีและการพาความร้อนการสูญเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ ก็จะเป็นการนำความร้อนอย่างไรก็ดีอุณหภูมิในแนวลำก็จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $5000^{\circ}$  ถึง  $50000^{\circ} K$  ที่อุณหภูมิห้องที่กระแสนสูง ๆ หรือที่ก๊าซ  $H_2, N_2, O_2$  ความดันสูงจะแยกตัวออกเป็นอะตอม ดังรูปที่ 2.12 และรวมตัวกันใหม่กลายเป็นกำพังกั้นระหว่างแนวลำและก๊าซ และ รวมทั้งส่วนอื่น ๆ ที่ยังเห็นอยู่ ทำให้เกิดการสั่นขึ้นใกล้ ๆ แนวกันอย่างมากจึงทำให้เกิดแสงกระจายออกมา เมื่อเข้าสู่สภาวะสงบของการกระจายแสงและการแยกตัวเข้าสู่สภาวะสงบเช่นเดียวกันแล้วอุณหภูมิก็จะคงที่การเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนกับอุณหภูมิของ  $H_2$  และ  $N_2$  แสดงในรูปที่ 2.14 ที่ค่าต่ำและสูงของ  $T, \nabla$  จะมีความสัมพันธ์กันถึงความนำของ  $H_2$  และ  $N_2$  แต่จะมีค่าของ  $T$  บางช่วงที่แยกตัวออกมาพุ่งสูงขึ้นถึงจุดสูงสุด



ภาพประกอบ 2.13 อัตราการแยกตัว  $x$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ  $T$  ในสภาวะสงบของ เทอร์โมไดนามิกส์ ของ  $H_2$  และ  $N_2$  ที่ความดันบรรยากาศ [1]



ภาพประกอบ 2.14 การนำความร้อน  $\Delta$  ของไฮโดรเจน และไนโตรเจน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ  $T$  ค่าสูงสุดของ  $O_2$  มีค่าประมาณ  $4000^\circ K$  และมีความเป็นไปได้ที่จะสูงเป็นสองเท่าของ  $N_2$  [1]

ที่อุณหภูมิซึ่งพุ่งขึ้นสูงมากของ และ อาจจะสูงขึ้นอีกเมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะคงที่ ซึ่งปรากฏการณ์นี้คือ "การกระตุ้นทางอุณหภูมิ" ซึ่งจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากวิธีการทางสเปกตรัม ในท่อคาร์บอนที่ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าซึ่งวัสดุต่าง ๆ มีศักยภาพในการถูกกระตุ้นต่ำการแยกตัวและการกระตุ้นที่สูงที่สุดจะถูกนำไปใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของความร้อนและความนำไฟฟ้าและอื่น ๆ ในแนวลำประจุบวก

วัตถุประสงค์ที่สร้างสภาวะการสมดุลระหว่างพลังงานในแนวลำประจุบวก ก็คือการหาค่าความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า  $X$ , กระแส  $i$ , รัศมี  $R$  ของทรงกระบอกความนำ สมมติให้แนวลำมีความยาวมากขึ้นและการสูญเสียในแนวรัศมีจากการแผ่รังสีและการนำความร้อน ความสมดุลย์ของพลังงานจะได้มาก

$$ix = E(T) - 2\pi R \Delta \left( \frac{dT}{dr} \right) R \dots\dots\dots(2-8)$$

เมื่อ  $E(T)$  เป็นการสูญเสียจากการแผ่รังสี กำหนดให้

$$\frac{T_r}{T_o} = \left\{ \left( \frac{r}{R} \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \dots\dots\dots(2-9)$$

เมื่อ  $T_o$  เป็นอุณหภูมิในแนวแกนจากการดิฟเฟอเรนเชียล (differentiation)

$$X = \frac{E(T) + \pi \Delta T_o}{i} \dots\dots\dots(2-10)$$

จะเป็นค่าคงที่ที่  $r = R$  เมื่อ  $T_R$  นั้นมีค่าต่ำเพียงเพื่อให้เป็นการแตกตัวเท่านั้นที่ค่า  $i$  ต่ำ ๆ และในโมเลกุลของก๊าซ  $E(T)$  จะมีค่าน้อย  $T_o$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ พร้อม ๆ กับ  $i$  และ  $X$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า  $\frac{1}{i}$  ซึ่งหาได้จากการวัดในแนวลำทั้งแบบเปิดและแบบปิด โดยไม่มีอากาศไหลใน

แนวแกนสำหรับค่า  $i$  ที่พอเหมาะ เมื่อ  $X \propto i^{-n}$  ( $n = \frac{2}{3}$  to  $\frac{3}{4}$ ) ที่ค่า  $i$  สูงมากขึ้น การแผ่รังสีจะเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นและมีความเกี่ยวข้องกับ  $X$  และ  $i$  ซึ่งจะลดลงจนกระทั่ง  $X$  เริ่มคงที่ ถ้าในแนวลำเป็นท่อแคบ ๆ  $X$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อม ๆ กับ  $i$  และเพราะว่า  $T_o$  มีค่าสูงมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของ  $E(T)$  และ  $T_o$  จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่า  $i$  และที่การแตกตัวไม่มากนักการเพิ่มขึ้นของ จะแสดงถึงในก๊าซจะมีค่า สูง เช่นเดียวกับ  $H_2$  หรือ  $H_2O$  ซึ่งจะมีค่ามากจนกระทั่ง  $T_o$  ไม่สามารถลดลงมาต่ำกว่าค่าที่จะทำให้เกิดการแตกตัวได้

$E(T)$  เป็นส่วนที่สำคัญเพราะว่า  $V_i$  โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำและมีค่าน้อยกว่า  $T_o$  ซึ่งจะมี ความจำเป็นในการแตกตัว เมื่อใช้ท่อที่ยาวขึ้นจะได้

$$iX = E(T) \dots\dots\dots(2-11)$$

ถ้าการแผ่รังสีนั้นเป็นส่วนหลักในเส้นของการเกิดการเรโซแนนท์ (Resonant) ที่เกิดจากการ กระตุ้นของการชนกันของอิเล็กตรอน จำนวนของควอนตัมที่แผ่ออกมาต่อวินาทีในหนึ่งหน่วยความยาว ของท่อหรือหลอดจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน จะได้

$$X \approx const \dots\dots\dots(2-12)$$

สำหรับจำนวนของไอระเหยและจำนวนของอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คือ  $N \propto \frac{1}{R^2}$

และกำหนดให้มวล  $m$  ของไอระเหยในหลอดปิดสนิทจะได้  $N \propto \frac{M}{R^2}$  และความเข้มของอิเล็กตรอนจะเป็น  $N_e \propto N_0^{\frac{1}{2}}$  จากสมการความต่อเนื่อง

$$i \propto jR^2 \propto N_e R^2 \quad g_d \propto N_e R^2 \frac{X}{P} \propto \frac{N_0^{\frac{1}{2}} X R^2 f(T)}{N_0} \propto X R^3 f(T) \dots \dots \dots (2-13)$$

และ 
$$X \propto \frac{i}{R^2 f(T)}$$

ซึ่งจะหมายถึงค่ากำลังคงที่  $X_i$  ต่อเซนติเมตรของหลอด  $X \propto R^{-\frac{3}{2}}$  ผลลัพธ์ที่ได้จะประกอบด้วยค่าในสมการ 14 เมื่อ  $f(T)$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า  $i$

อย่างไรก็ตามค่าที่ได้สามารถประมาณได้ว่าอัตราการแตกตัวในแนวลำประจุบวกที่ความดันสูงนั้นจะทำให้เกิดอุณหภูมิของก๊าซเท่านั้น ซึ่งจะเท่ากับอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออน (ions) ด้วย ข้อมูลต่าง ๆ ที่มีอยู่สามารถทำการทดลองที่แนวลำประจุบวกที่มีความยาวมากได้ โดยการทดลองในก๊าซ  $N_2$  และ วัดอุณหภูมิของก๊าซที่แนวแกน พร้อม ๆ กับวัดค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นเฉลี่ยด้วย จากสมการ

$$j = eN_e V_d = eN_e k - x = Xf(t) \dots \dots \dots (2-14)$$

$j, X$  และ  $I$  เป็นตัวแปรที่ทราบค่า ในสมการของการแตกตัวด้วยความร้อนในสภาวะสงบจะสามารถหาค่าต่าง ๆ ของก๊าซได้ ในก๊าซที่มีการผสมกันของก๊าซหลายชนิด เช่น อากาศ จะมีค่า  $V_1$  ค่าซึ่งจะต้องคอยสังเกตด้วย

ในกรณีของ  $H_g$  เมื่อแทนค่าลงในสมการ (15) จะพบว่าค่าที่ป้อนให้ต่อเซนติเมตรของแนวลำจะเป็น  $X$  และ  $i$  การสูญเสียอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง  $V_e$  ที่  $6000 A$  เมื่อไม่คิดการสูญเสียอื่นจะได้  $\sum A = 10$  และ

$$iX = \sum A h_\nu N_0 e^{-11700 \frac{V_a}{T}} \dots \dots \dots (2-16)$$

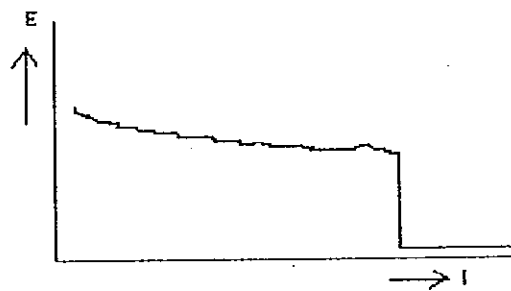
ที่ความหนาแน่นของไอระเหย  $N_0 = 10^{18}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  $X_1 = 30$  เมตร วัดต่อเซนติเมตร  $h_\nu = 4.10^{-10}$  วัตต์ วินาที  $V_a = 8e^y$  และ  $T = 5000^0 K$

แทนค่า 
$$i_x = 10(4 \cdot 10^{-9}) \cdot 10^{18} e^{-\frac{11700e^y}{5000}} \dots \dots \dots (2-16)$$

5 การสังเกตการณ์ในอาร์กคาโอด

การอาร์กที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะทำให้สะดวกต่อการแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือถ้าไอระเหยของอิเล็กโทรดอย่างหนึ่งที่ทันใดที่อุณหภูมิต่ำมากและมีการแผ่รังสีความร้อนของอิเล็กตรอน ทั้งหมดนี้เรียกว่าคาโอดเย็น ซึ่งการอาร์กดีสชาร์จที่เกิดขึ้นจากคาโอดที่เป็น  $C_u, A_g,$  และ  $H_g$  หรืออื่น ๆ ที่มีโครงสร้างคล้ายกันความต่างศักย์ของคาโอดจะลดลง บางครั้งในวงจรที่ใช้คาโอดเป็นคาร์บอนสามารถหยุดจ่ายแรงดันให้ได้ชั่วขณะเป็นเวลาประมาณ 1 วินาที - จากแรงดันหลายร้อยโวลต์ และเมื่อเริ่มจ่ายแรงดันใหม่การอาร์กก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนระยะห่างของคาโอดเลย ส่วนคาโอดที่เป็น  $C_u$  จะสามารถหยุดได้เพียง  $10^{-3}$  วินาที ส่วน  $H_g$  ที่ความดันต่ำจะใช้เวลาได้เพียง  $10^{-8}$  วินาที

ค่าแรงดันที่ลดลงนี้จะสามารถได้จากการทดลองที่เริ่มจากการเริ่มอาร์กในก๊าซ ระหว่างอิเล็กโทรดที่มีระยะห่างไม่กี่มิลลิเมตรจากนั้นบันทึกแรงดันตกคร่อมอิเล็กโทรดไว้จะได้ดังรูปที่ 2.15



ภาพประกอบ 2.15 แสดงแรงดันอาร์ค  $E$  ระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งเคลื่อนที่เข้ามาเรื่อย ๆ จนกระทั่งสัมผัสกันในแนวแกนจะแสดงค่าเวลาที่เคลื่อนที่หรือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด [ 1 ]

การทดลองเริ่มต้นจากแรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ และลดลงเรื่อย ๆ อย่างช้า ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะห่างเป็นเชิงเส้น ในที่สุดแรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลือเพียงไม่กี่สิบโวลต์ เมื่อคาโอดทั้งสองสัมผัสกันนั้น คือแรงดันที่เกิดขึ้นจากความต้านทานของอิเล็กโทรดทั้งสองนั่นเอง ค่าแรงดันที่น้อยที่สุดก่อนที่คาโอดทั้งสองจะสัมผัสกันเมื่อนาลบด้วยแรงดันที่อาโนด  $V_a$  จะเป็นค่า  $V_c$  ซึ่งเป็นแรงดันอาร์ก และจากการใช้อิเล็กโทรดต่างชนิดกันในก๊าซชนิดต่าง ๆ กันค่า  $V_a$  และ  $V_c$  จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังตาราง 2

ณ ค่าความต่างศักย์ที่ทำให้ก๊าซนำกระแส ที่แรงดันนี้ ก๊าซจะมีค่าความจำเพาะเท่ากับทองแดง ( $C_u$ ) หรือ เงิน ( $A_g$ ) และค่าความเร็วของอิเล็กตรอนในก๊าซที่ไอโอไนซ์จะมีค่าเป็น โดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะนำพลังงานระหว่างค่า 1.5 ถึง 2 อิเล็กตรอน-โวลต์



ตาราง 2.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอดขณะนำกระแส [1]

Electrodes	Gas	$i$ (A)	$T_c$ ( $^{\circ}K$ )	$T_a$ ( $^{\circ}K$ )	$j_c$	$j_a$ (A/cm <sup>2</sup> )	$V_c$ (V)	$V_a$ (V)
C—C	air	1-10	3500	4200	470	65	9-11	11-12
C—C	N <sub>2</sub>	1-10	3500	4000	500	70	...	...
Cu—Cu	air, N <sub>2</sub>	~ 5	< 2200	2400	~ 10 <sup>6</sup>	~ 10 <sup>3</sup>	8-9	2-6
Fe—Fe	air	~ 5	2400	2800	high	..	8-12	2-6
Ni—Ni	..	~ 5	2400	2400	..	..	..	..
W—W	..	~ 5	3000	4200 ?	..	..	..	..
Al—Al	..	~ 5	3400	3400	..	..	..	..
Al—Al	N <sub>2</sub>	~ 5	~ 2500	~ 2500	..	..	..	..
Zn—Zn	air	~ 5	3000	3000	..	..	..	..
Zn—Zn	N <sub>2</sub>	~ 5	low	low	..	..	..	..
Hg—C	Hg	> 2	~ 600	..	10 <sup>6</sup>	..	7-10	0-10

จากตาราง 2.2 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอดขณะนำกระแส

#### 6 อาร์กติสซาร์จโดยการเปิดคาโอดภายนอก

ถ้าใส่หลอดบรรจุอยู่ในภาชนะขนาดใหญ่ และยาว โดยคาโอดเป็นโลหะชนิดนิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) หรือทังสเตน (W) และความดันภายในหลอดที่เป็นภาชนะมีค่าความดันเป็น 0.1 mmปรอทแล้ว เมื่อให้ความร้อนแก่คาโอดที่อุณหภูมิ 2500 เคลวิน (K) ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 0.3 A/cm<sup>2</sup> จะเกิดพลาสมา (Plasma) ขึ้นบริเวณคาโอด จากนั้นเมื่อความต่างศักย์ของคาโอดสูงขึ้นขอบเขตของขอบเขตปลดปล่อยประจุ (Spacecharge) จะแคบลง จนกระทั่งแรงดันถึงระดับที่ทำให้พลาสมาเกิดขึ้นตลอดความยาวของหลอด ทำให้กระแสสามารถไหลครบวงจรได้ในขณะเดียวกัน หลอดจะเรืองแสง

ค่าความหนาแน่นของกระแส แสดงได้ดังนี้

$$j_e = \frac{1.85}{9\pi} \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{V_c}{d^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots(2-17)$$

เมื่อ 
$$d = \left(\frac{9}{32\pi} \cdot \frac{K + v_c^2}{j_e}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^{-4}$$

$$v_c = 10V$$

$$j_e = 10^3 A/cm^2 = 3 \times 10^{14}$$

$$K + P = 3 \times 10^2 \text{ แต่ } P = 100m.m.$$

$$\therefore K = 2900^{\circ}K$$

### บทที่ 3

#### หลักการหาตัวแบบวงจร

##### 1 ที่มาของตัวแบบวงจร

เนื่องจากพฤติกรรมของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น สามารถที่จะแยกสถานะออกเป็น 3 สถานะ คือ สถานะแรก เป็นช่วงที่หลอดยังไม่นำกระแส โดยปกติแล้วสถานะนี้จะเป็นช่วงที่แรงดันระหว่างอาโนด ทั้งสอง มีค่ายังไม่ถึงจุดทำงานของหลอด นั่นคือ สถานะของก๊าซที่อยู่ในหลอดยังเสถียรภาพคงตัว ไม่นำกระแส ในสถานะที่ 2 เป็นจุดที่ หลอดฟลูออเรสเซนต์มีแรงดันถึงจุดทำงานหลอดจะเริ่มเรืองแสงได้ถ้าบริเวณรอบๆ หลอดมีสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ในสถานะที่ 3 เป็นสถานะที่ แรงดันตกคร่อมหลอด มีค่ามากกว่าจุดที่หลอดเริ่มทำงาน ในจุดนี้แรงดันตกคร่อมหลอด จะมีค่าแรงดันคงที่ จุดทำงาน และขณะเดียวกันสถานะนี้จะต้องมีการจำกัดกระแสให้แก่หลอดฟลูออเรสเซนต์ จากสถานะทั้ง 3 ที่กล่าวมาแล้วได้ ถูกทำการพิสูจน์ โดย Peek (Peek and Spencer, 1968) และ Gluskin (Gluskin, 1989, 1990) ตามลำดับ จากผลการทดสอบผลการทดลองเดิม สามารถทำได้ดังนี้

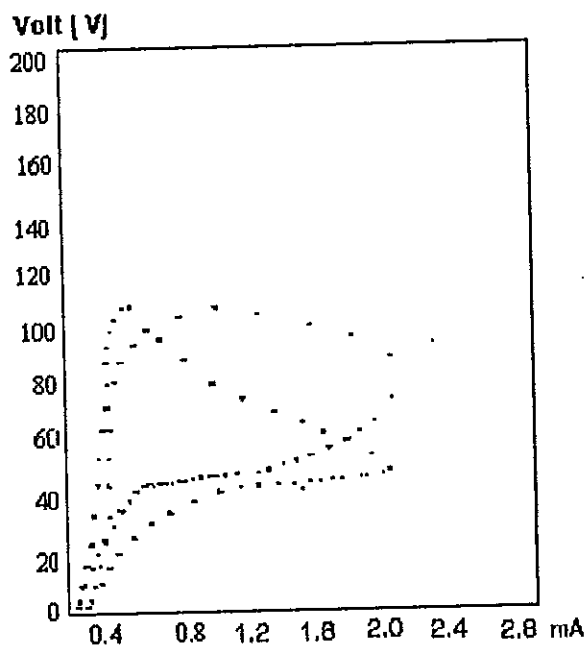
1.1 การทดสอบหาคุณสมบัติของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์จากการนำเสนอสมการของ Peek แสดงไว้ว่า สมการกำหนดกระแสคือ

$$i = vc \int_{s=0}^s b dt \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ  $i$  คือ กระแสที่ไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์  
 $V$  คือ แรงดันตกคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์  
 $c$  คือ ค่าประจุของตัวเก็บประจุภายในหลอด  
 $b$  มีค่าเป็น  $7.93 \cdot 10^2 V^{-1} + 1.308 \cdot 10^{-3} V^{-4} - 772$

$$\text{และ } V = \frac{V_0 \sin t}{1 + RC \int_0^t \beta dt} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

โดยสมการที่ (3.1) และ (3.2) ถูกคำนวณโดย คอมพิวเตอร์ IBM 1620 โมเดล 1 และเครื่องหลอดเทอร์รู่น 1D. 627 ทำการคำนวณจะได้ ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสได้ ดังรูปที่ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 การใช้คอมพิวเตอร์ทดสอบค่า  $V, i$  ในสมการ (3.1) และ (3.2) [ 6 ]

สำหรับการนำเสนอกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดย Gluskin นั้น มีดังนี้

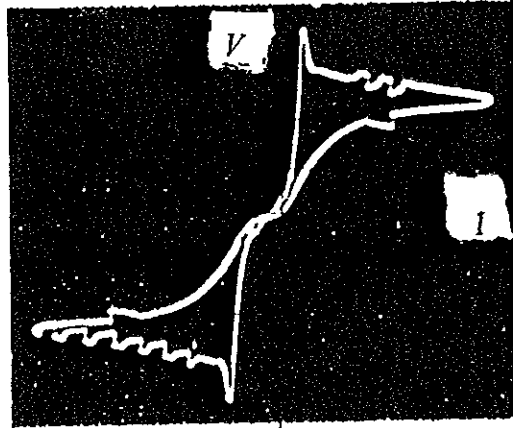
$$i = i_1 \exp\left(-\frac{E}{\beta \mathcal{G}^2}\right) \dots\dots\dots (3.3)$$

เมื่อ  $i$  = กระแสที่ไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

และ  $\exp\left(-\frac{E}{\beta \mathcal{G}^2}\right)$  เป็นสมการกำหนดความนำของหลอดโดย  $E, \mathcal{G}$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่  $E$  เป็นระดับแรงดันธรรมชาติ ขณะเดียวกัน แรงดัน มีฟังก์ชันเป็น

$$\mathcal{G}_L = \left( \frac{E}{\beta \ln \frac{i_1}{i}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots (3.4)$$

เมื่อ  $\mathcal{V}_L$  = เป็นค่าสมการของแรงดันตกคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังกราฟแสดงทดลอง ได้ดังภาพประกอบ 3.2

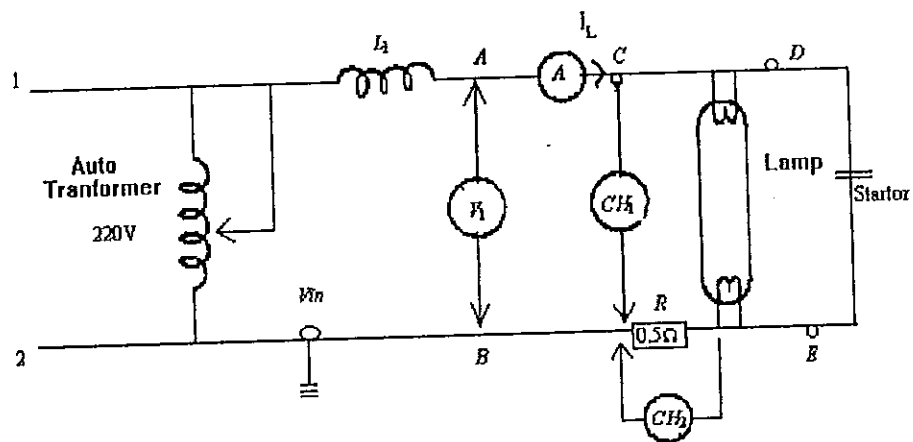


ภาพประกอบ 3.2 กราฟแสดงการทดลอง V,I ของโหลด

จากรูปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของโหลดฟลูออเรสเซนต์ โดยทำการจัดในขณะที่หลอดนำกระแส ด้วยออสซิลอสโคปโดยที่ Mode x-y

**2 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์**

จากแนวคิดของ Peek และ Gluskin ที่ได้นำเสนอแล้วนั้น ยังไม่ยืนยันถึงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ อย่างแน่นอนนักแต่จะเป็นการประมาณดังนั้นการทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถออกแบบทดสอบ เพื่อนำไปสู่การสังเคราะห์ตัวแบบ-วงจรได้

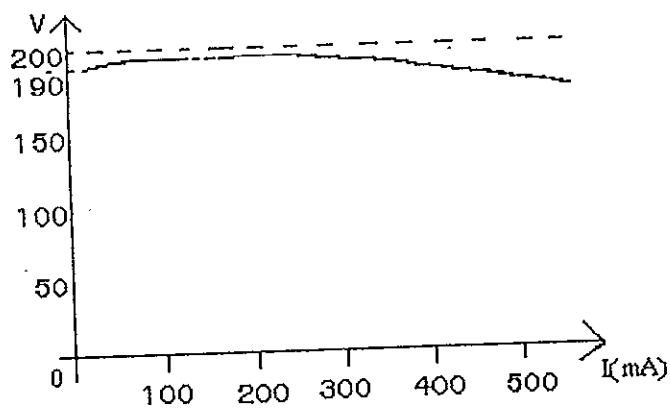


ภาพประกอบ 3.3 วงจรทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์

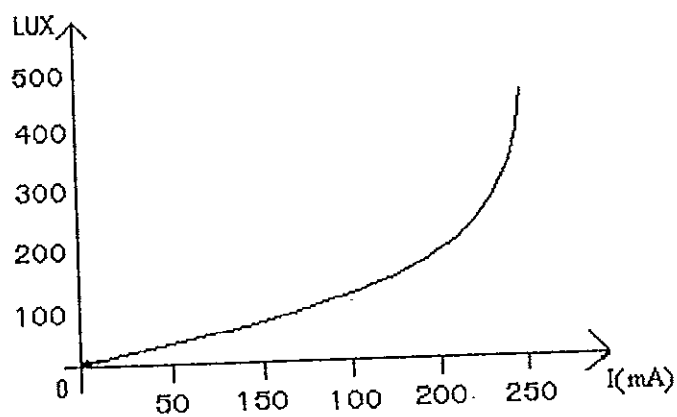
จากภาพประกอบ 3.3 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีส่วนประกอบดังนี้

1. หม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ (auto transformer)
2. ตัวเหนี่ยวนำ (L1)
3. โวลต์มิเตอร์ (V1)
4. แอมป์มิเตอร์ (A)
5. ออสซิลโลสโคป 2 ช่องวัด ( $CH_1$ ,  $CH_2$ ) และการวัด แบบ Mode x-y ได้
6. ตัวต้านทานสำหรับตรวจค่ากระแสในวงจร ( $R=0.5$  โอห์ม)
7. หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 40 W
8. สตาร์ทเตอร์ (stator)

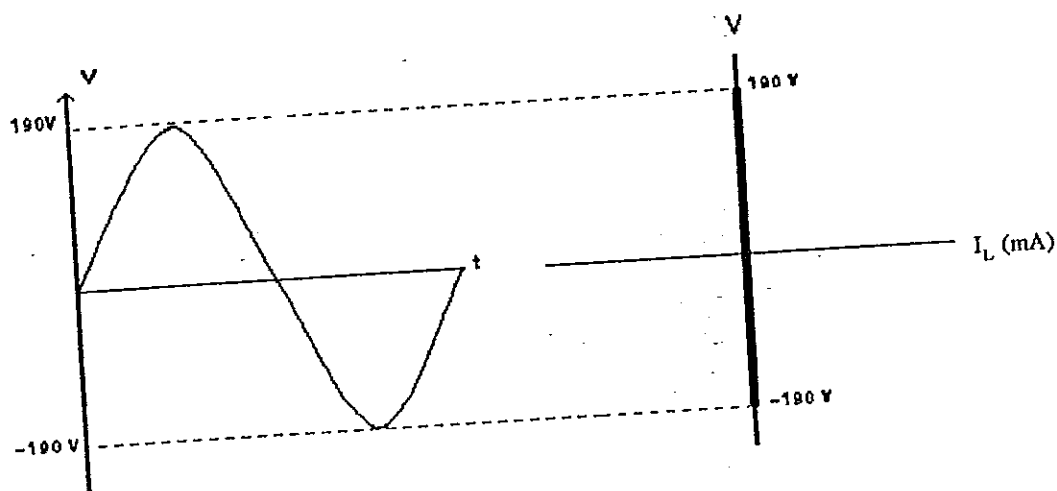
3 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขณะที่ทำงานที่ความถี่ 50 Hz สภาวะเริ่มนำกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ สามารถทำการทดลองได้กราฟภาพประกอบ 3.4



ภาพประกอบ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์



ภาพประกอบ 3.5 ความสัมพันธ์ของความส่องสว่างกับกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์



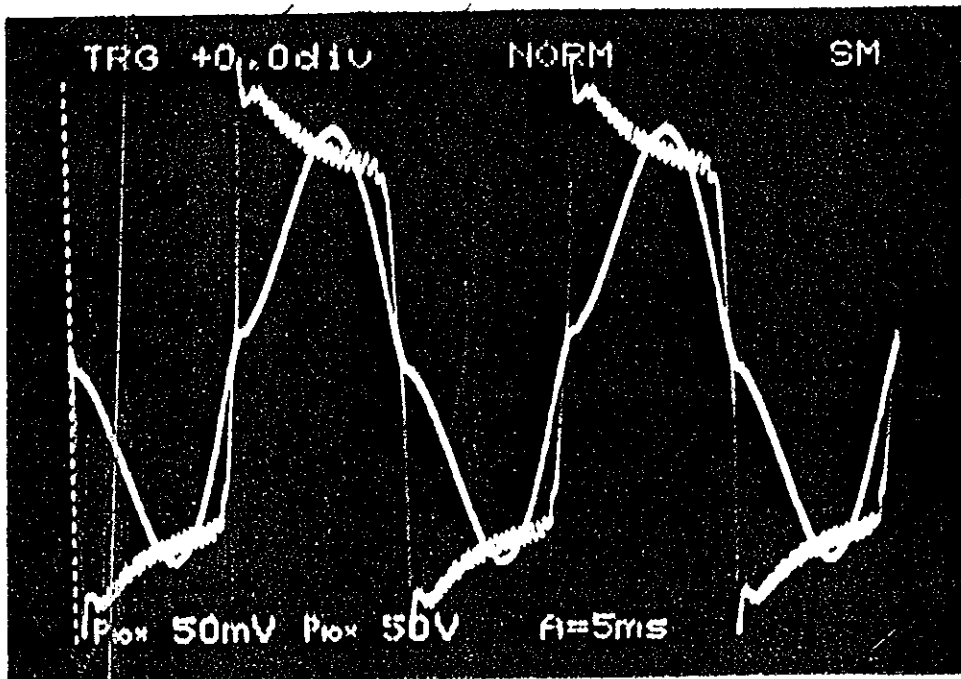
ภาพประกอบ 3.6 (A)

ภาพประกอบ 3.6 (B)

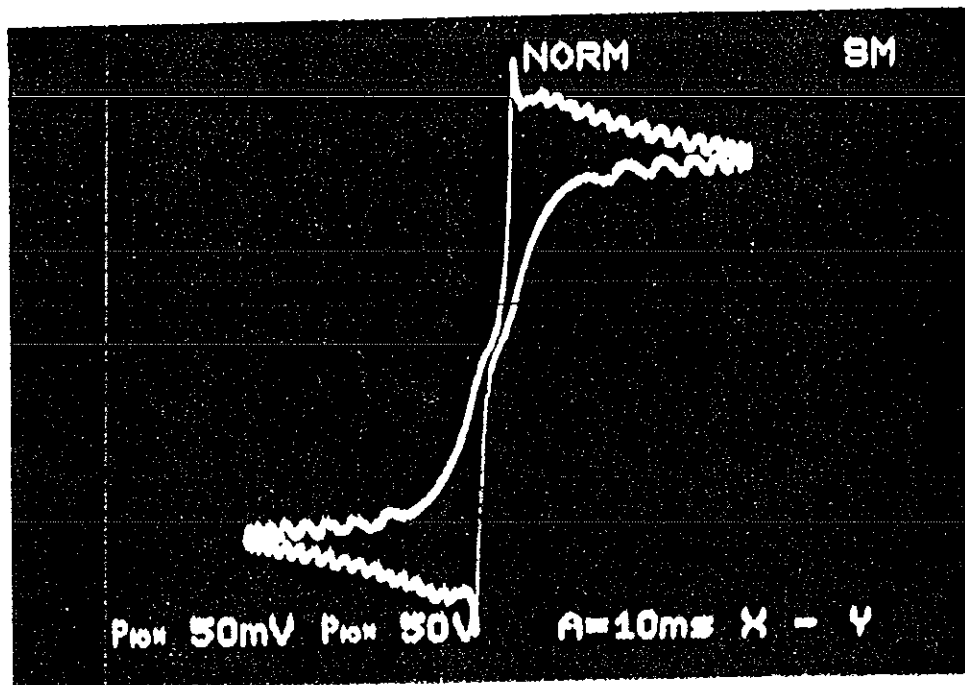
ภาพประกอบ 3.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดขณะหลอดฟลูออเรสเซนต์ยังไม่นำกระแสแสดงในรูป 3.6 (A)

ขณะเดียวกันการแสดงผลจากภาพประกอบ 3.6 (A) โดยใช้ Mode x-y แสดงได้ในภาพประกอบ 3.6 (B) จากภาพประกอบ 3.6 (A) เป็นรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสบนแกนตั้งส่วนแกนนอนจะเป็นเวลา (t) ส่วนภาพประกอบ 3.6 (B) เป็นรูปความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันโดยออสซิลโลสโคปทำงานใน Mode x-y

ภาพประกอบ 3.7 (A) และ ภาพประกอบ 3.7 (B) ทำนองเดียวกันตามลำดับกับภาพประกอบ 3.6 แต่ภาพประกอบ 3.7 จะเป็นสภาวะของหลอดนำกระแส

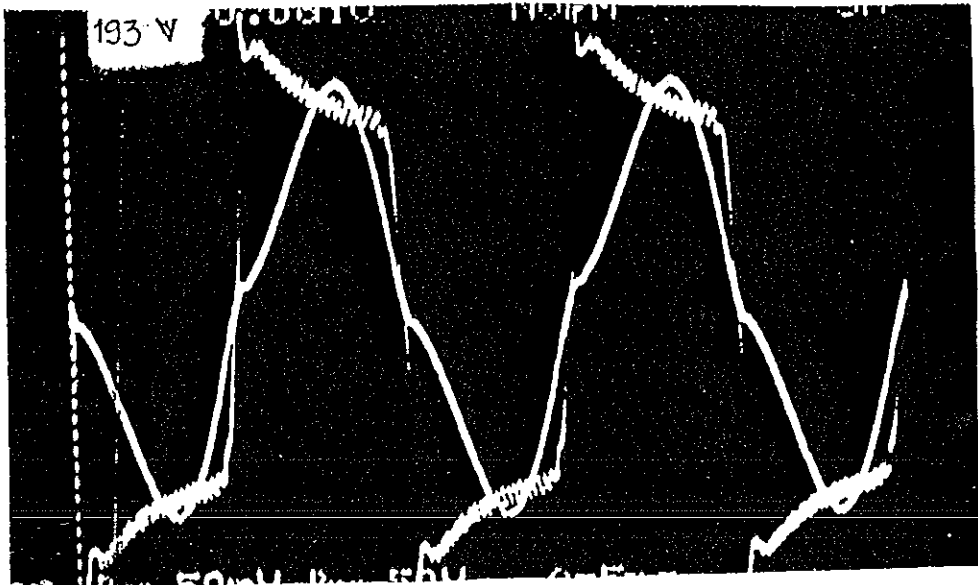


ภาพประกอบ 3.7 (A) เป็นรูปคลื่นของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออโรสเซนส์ขณะนำกระแส



ภาพประกอบ 3.7 (B) เป็นภาพประกอบ 3.7 (A) ขณะอยู่ใน Mode x - y

จากรูปวงจรทดสอบที่ภาพประกอบ 3.3 และกราฟความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์และกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในภาพประกอบ 3.6 และ 3.7 พบว่าแรงเคลื่อนตกคร่อมหลอดมีค่าน้อยกว่า 190 V หลอดจะนำกระแส และทำให้แรงดันตกคร่อมหลอดลงที่เมื่อหลอดนำกระแส ขนาดของกระแสสามารถปรับเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ให้งจรทางเข้า เพื่อป้องกันแรงดันทางเข้ามีค่าแอมป์ริจูดสูงกว่า 193 V ที่หลอด 40 W จะพบว่าขนาดของแอมป์ริจูดที่ตกคร่อมหลอดจะถูกจำกัด ในระดับคงที่ ที่ 193 V ดังภาพประกอบ 3.8



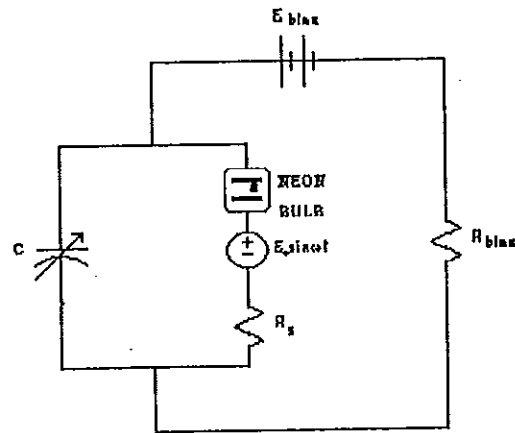
ภาพประกอบ 3.8 กระแสและแรงดันตกคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ 50 Hz

#### 4 สภาวะในการเริ่มนำกระแสของหลอดนีออน ที่ความถี่ 50 Hz

จากหัวข้อ 1 และ 2 ซึ่งเป็นการทดลองหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมหลอดโดยพฤติกรรมนี้สามารถนำไปสู่การสังเคราะห์ตัวแบบวงจรและสมการกำหนดคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาการเริ่มนำกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น การวิจัยของ Peek และ Gluskin ยังไม่ได้กล่าวถึง

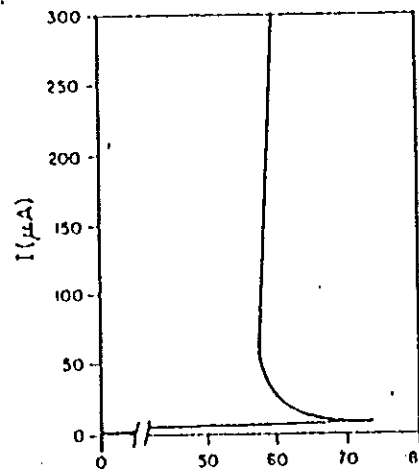
ในปีพ.ศ. 1927 Van der Pol and Van der Mark [2] ได้ศึกษาการออสซิลเลตในหลอดนีออน โดยใช้วงจรในภาพประกอบ 3.9 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลย์ ภายในหลอดนีออนซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ที่อยู่ภายนอกหลอดนีออนตามวงจรในภาพประกอบ 3.9





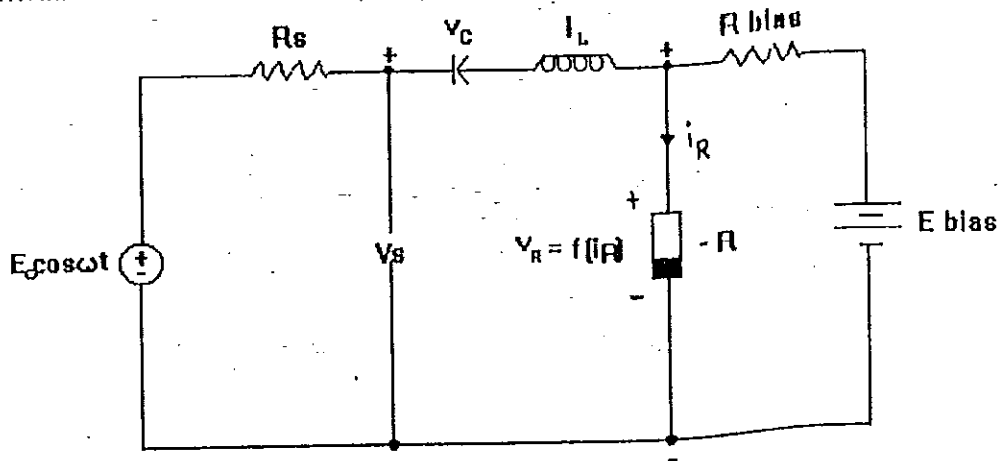
ภาพประกอบ 3.9 วงจรทดสอบการ oscillate ของหลอดนีออน [ 7 ]

จากภาพประกอบ 3.10 จะมีคุณสมบัติในความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมหลอด และกระแสที่ไหลผ่านหลอด



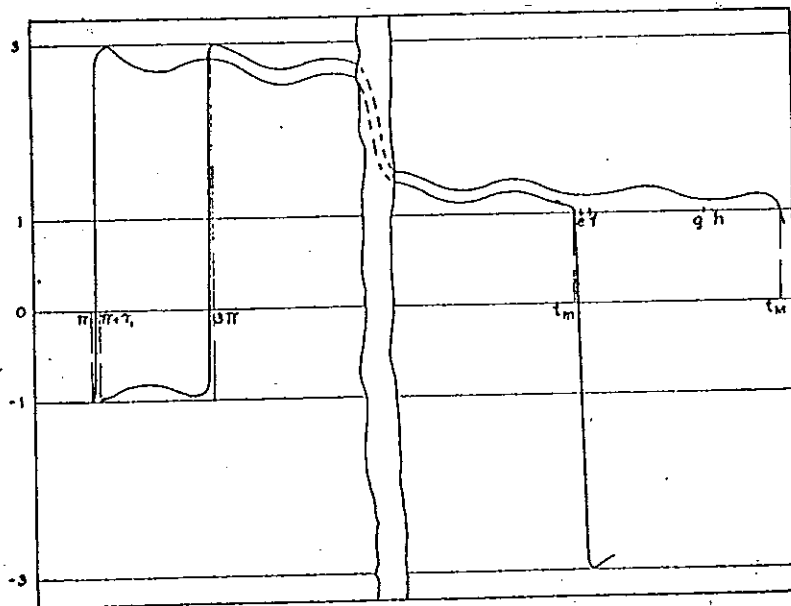
ภาพประกอบ 3.10 กราฟคุณสมบัติของหลอดนีออน [ 7 ]

จากการศึกษาของ Van der Pol และ Van der Mark ครั้งนี้ทำให้ได้ตัวแบบวงจรในการเริ่มนำกระแสของหลอดตามภาพประกอบ(3.10)



ภาพประกอบ 3.11 ตัวแบบวงจรในการเริ่มนำกระแสของหลอดไอออน [ 7 ]

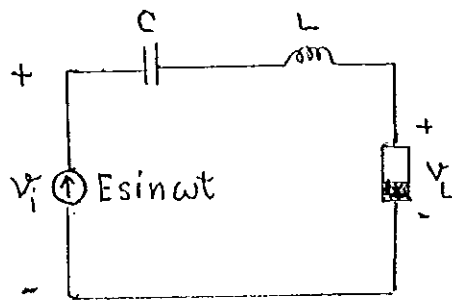
เมื่อแอมป์ริจูดของแรงดันที่แหล่งจ่าย  $E_0$  มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากหลอดอยู่กับฟังก์ชัน  $\sin \omega_0 t$  ถ้ามีการปรับค่าความถี่ของตัวเก็บประจุจะเป็นผลให้ความถี่  $\omega$  เปลี่ยนแปลงได้โดยทำให้  $\omega$  เข้าใกล้  $\omega_0$  วงจรในภาพประกอบ 3.12 จะออสซิลเลตที่ความถี่  $\omega$  ซึ่งต่ำกว่า  $\omega_0$  แต่จะเกิดขึ้นอย่างพร้อมกันบนแอมป์ริจูดของความถี่  $\omega_0$  แสดงได้ในภาพประกอบ 3.12



ภาพประกอบ 3.12 การออสซิลเลตของหลอดไอออน [ 7 ]

สมการของพฤติกรรมตัวต้านทานลบที่เกิดขึ้นในการทดลองของ Van der pol Oscillator

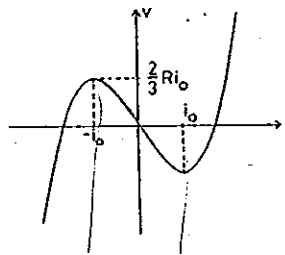
คือ 
$$f(v) = Ri_0 \left[ -\frac{i}{i_0} + \left( \frac{i}{i_0} \right)^3 \right] / 3 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$



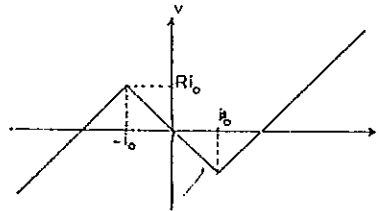
ภาพประกอบ 3.13 วงจร Van der Pol Oscillator [ 7 ]

ถ้าให้  $\frac{i}{i_0}$  เป็นค่าต่อหน่วย (per unit)

การเขียนขอบเขตของค่าความต้านทานลงขณะเริ่มนำกระแสขอบเขตจะอยู่ในขอบเขต 1 และ -1 โดยพฤติกรรมของหลอดนีออนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ  $[-a, -1]$ ,  $[-1, 1]$  และ  $[1, 2]$  โดยช่วง  $[-2, -1]$  และ  $[1, 2]$  มีค่าเป็นค่าความต้านทานบวกภาพประกอบ 3.12 จะแสดงเขตของเขตสมการ (3.5) และภาพประกอบ 3.14 จะแสดงขอบเขตเมื่อกำหนดให้ค่าตัวต้านทานลบมีค่า 1 หน่วย



ภาพประกอบ 3.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานลบ (ของสมการ 3.5) [ 7 ]



ภาพประกอบ 3.15 กราฟแสดงค่าความต้านทาน 1 หน่วย (พิจารณาโดย LEVISON) [ 7 ]

สมการ (3.5) เป็นสมการคำตอบ (Solution) ของสมการดิฟเฟอเรนเชียล อันดับ 2 ดังสมการ

$$E \frac{d^2 x}{dt^2} + \phi(x) \frac{dx}{dt} + Ex = b \cos(\omega t)$$

เมื่อ 
$$E = \sqrt{\frac{L}{CR}}$$

$$\phi = \frac{f}{R}$$

$$t \rightarrow \sqrt{LC} \cdot t$$

$$\omega \rightarrow \frac{\omega}{\sqrt{LC}}$$

$$b = \frac{E\omega}{(\sqrt{LC} \cdot R)}$$

$$x = \frac{i}{i_0}$$

จากสมการ (3.6) พบว่าเป็นพฤติกรรมของวงจรรอนุกรมของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุนั่นเอง จากการพิจารณาการเริ่มนำกระแสของหลอดนีออนนี้ พบว่าช่วงค่าความต้านทานลบขณะเกิดพฤติกรรมเริ่มนำกระแสแฉ่นั้นเป็นเสมือนฮีสเตอร์รีซิสของแรงดัน ซึ่งขณะเริ่มกระตุ้นการนำกระแสจะมีค่าแรงดันสูงกว่าขณะหลอดเริ่มดับ นอกจากนั้นความถี่ที่เกิดจากการกำเนิดภายในวงจรจะเป็นผลมาจากตัวเหนี่ยวนำที่ถูกสมมติจากหลอดเมื่อใช้ตัวเก็บประจูด้อยขนาด และสามารถเปลี่ยนความถี่ตามค่าของตัวเก็บประจุดังภาพประกอบ 3.12

### 5 แนวคิดการหาตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์

แนวคิดของการหาตัวแบบวงจรสามารถพิจารณาจาก กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ในสภาวะต่าง ๆ ตามภาพประกอบ 3.6 และภาพประกอบ 3.7 โดยพิจารณาเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้

เมื่อแรงดันตกคร่อมหลอดเป็น  $v_L$  จะมีค่าเป็น 2 สภาวะคือ เมื่อ  $v_L$  มีค่าเท่ากับแรงดันทางเข้า ( $v_i$ ) ขณะนี้หลอดจะยังไม่นำกระแส จนกระทั่งเมื่อแรงดันเกินจุดที่หลอดนำกระแส ( $V_{Th}$ ) หลอดจะนำกระแสและขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มแรงดันทางเข้า ( $v_i$ ) ก็จะไม่ส่งผลสำหรับแรงดันที่ตกคร่อมหลอด ( $v_L$ ) เมื่อหลอดนำกระแสแล้ว โดยแรงดันตกคร่อมหลอดขณะหลอดมีค่าคงที่ การเพิ่มแรงดันทางเข้าเป็นผลให้กระแสเพิ่มขึ้นและหลอดสว่างขึ้น

จากที่กล่าวมาแล้วสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมหลอดและกระแสที่ไหลผ่านหลอดได้ดังนี้คือ

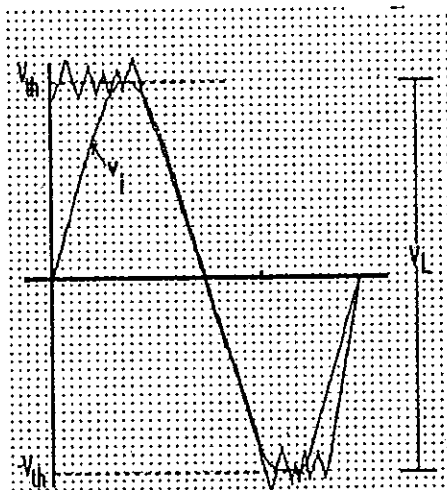
	$v_L = v_i$	ขณะหลอดยังไม่นำกระแส	..... (3.7A)
และ	$v_L = V_{Th}$	ขณะหลอดนำกระแส	..... (3.7B)
	เมื่อ $v_L$	คือแรงดันตกคร่อมหลอด	
	$v_i$	คือแรงดันทางเข้า	
	$V_{Th}$	คือแรงดันคงที่เมื่อหลอดนำกระแส	

ขณะเดียวกันกระแสที่ไหลผ่านหลอดเขียนได้เป็น

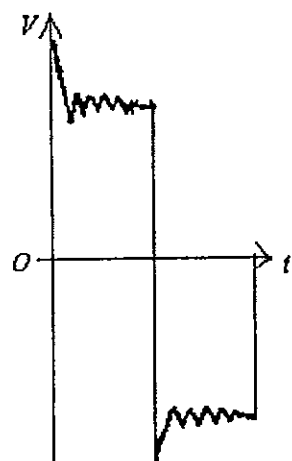
	$I = 0$	เมื่อหลอดไม่นำกระแส	..... (3.8A)
และ	$I = f(v_L)$	เมื่อหลอดนำกระแส	..... (3.8B)
	เมื่อ $I$	คือกระแสที่ไหลผ่านหลอด	
	และ $f(v_L)$	คือฟังก์ชันของแรงดันตกคร่อมหลอด	

จากภาพประกอบ 3.6 (A) และ 3.6 (B) เป็นสภาวะที่หลอดยังไม่นำกระแสเพื่อพิจารณาจากสมการ 3.5 และ 3.6 คือ  $v_L = v_i$  และ  $I = 0$  ในสภาวะที่หลอดนำกระแส การพิจารณาสมการ 3.5 และ 3.6 จะสรุปได้ว่า  $v_L = V_{Th}$  และ  $I = f(v_L)$

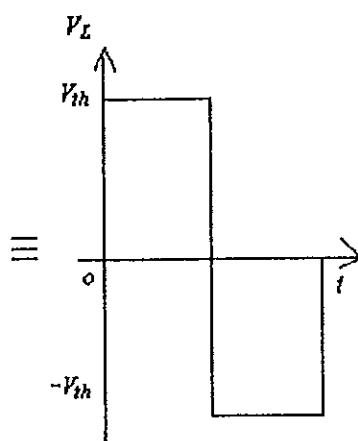
การพิจารณาส่วประกอบของฟังก์ชันในรูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ เทียบกับแรงดันทางเข้า แสดงภาพประกอบ 3.16



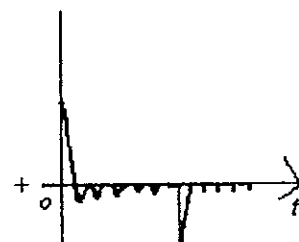
ภาพประกอบ 3.16 รูปคลื่นที่ใช้ในการสังเคราะห์หาฟังก์ชันของวงจรที่จะสังเคราะห์  
จากภาพประกอบ 3.16 เมื่อพิจารณาแรงดันบนหลอดฟลูออเรสเซนต์ ( $V_L$ ) แล้วจะพบว่า รูปคลื่นนี้ประกอบด้วยฟังก์ชัน 2 ฟังก์ชันคือ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม และ คลื่นรูปไซน์ ที่เป็นลักษณะของ damping โดยจะแยกส่วนประกอบ รูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดได้ดังภาพประกอบ 3.17 (A) และ 3.17 (B)



ภาพประกอบ 3.17(A)



ภาพประกอบ 3.17 (B)

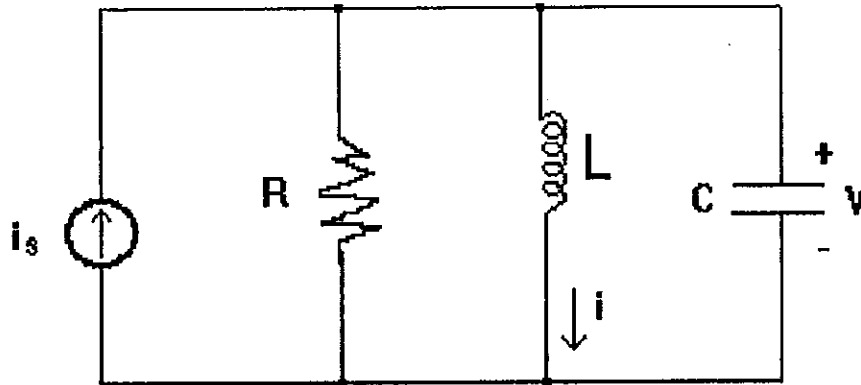


ภาพประกอบ 3.17 (C)

ภาพประกอบ 3.17 ส่วนประกอบของแรงดันคร่อมหลอด ( $V_L$ )

ดังนั้นจะเห็นว่า ภาพประกอบ 3.17 (A) เป็นแรงดันตกคร่อมหลอดซึ่งได้จาก ภาพประกอบ 3.17 (B) และ 3.17 (C) รวมกัน

จากหัวข้อ 3.1 ถึง 3.4 นี้ สามารถพิจารณาสมการของฟังก์ชันที่เกิดขึ้นของแรงดัน ที่ปรากฏบนหลอดได้ดังนี้ จากภาพประกอบ 3.17 (B)



ภาพประกอบ 3.18

จากวงจรภาพประกอบ 3.18 ค่าคำตอบของสมการกระแส  $i_s(t)$  สามารถเขียนได้คือ

$$i_s(t) = i_f(t) + i_n(t) \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

ซึ่ง  $i_f(t)$  = กระแสในสภาวะบังคับเชิงอนุพันธ์ (Forced response)

$i_n(t)$  = กระแสในสภาวะตามธรรมชาติ (Natural response)

เมื่อพิจารณาตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์เคอร์เร็นท์ (KCL) ในขณะที่การตอบสนองของกระแสโดยธรรมชาติ หรือเมื่อ  $t = 0$  และที่  $i_s(t) = 0$  จะได้

$$i_R + i_L + i_C = 0 \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

นั่นคือ  $\frac{V}{R} + i_L + C \frac{dV}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.9)$

เมื่อ  $V = L \frac{di}{dt}$

∴ แทนค่า  $V = L \frac{di}{dt}$  ในสมการ (3.9)

จะได้  $\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di(t)}{dt} + \frac{i(t)}{LC} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.10)$

ถ้า  $i(t) = Ae^{st}$  ดังนั้นสมการ จัดรูปได้เป็น

$$\frac{d^2(Ae^{st})}{dt^2} + 2\alpha \frac{d(Ae^{st})}{dt} + \omega_n^2 Ae^{st} = 0$$

ซึ่งจะได้  $S^2 Ae^{st} + 2\alpha S Ae^{st} + \omega_n^2 Ae^{st} = 0$

หารทั้งสองข้างด้วย  $Ae^{st}$  จะได้

$$S^2 + 2\alpha S + \omega_n^2 \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\therefore \text{จะได้เป็น } S = -2\alpha \pm \sqrt{4\alpha^2 - 4\omega_n^2} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

$$= -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_n^2} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\therefore \text{สรุปได้ว่า } i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad ; \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{จาก } i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

เมื่อกระจายเทอมใหม่จะได้

$$i(t) = A_1 e^{-\alpha t - j\omega t} + A_2 e^{-\alpha t + j\omega t}$$

$$\therefore \text{เขียนใหม่เป็น } i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 e^{-j\omega t} + A_2 e^{j\omega t}) \quad \dots\dots\dots(3.15)$$

$$\therefore \text{สรุปได้เป็น } i = e^{-\alpha t} (B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t) \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\text{นั่นคือ } B_1 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t = B \cos(\omega t + \theta) \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\text{เมื่อ } B_1 = B \cos \phi$$

$$B_2 = B \sin \phi$$

$$\therefore \frac{B_1}{B_2} = \frac{B \sin \phi}{B \cos \phi} = \tan \phi \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

$$\therefore \phi = \tan^{-1} \frac{B_2}{B_1} \quad \dots\dots\dots(3.19)$$

$$\text{เมื่อ } B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} \quad \dots\dots\dots(3.20)$$

สรุปจากสมการ (3.13), (3.14), (3.18), (3.19) และ (3.20) เป็นดังนี้คือ

รากสมการของวงจรอันดับ 2 จะมีค่าเป็น

$$S = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_m^2} \quad \dots\dots\dots(3.21)$$

$$\text{กระแสที่ไหลในวงจรคือ } i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad \dots\dots\dots(3.22)$$

$$\tan \phi = \frac{B_1}{B_2} \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

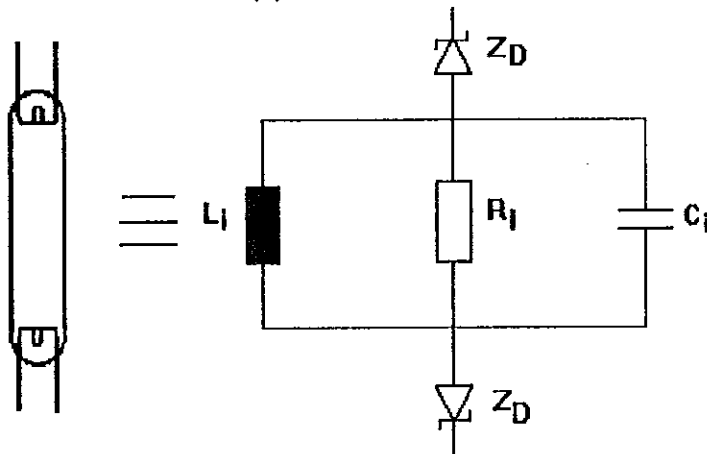
$$\phi = \tan^{-1} \frac{B_2}{B_1} \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

เมื่อ B เป็นขนาดความแรงของสัญญาณทั้งหมดจากสมการ (3.21) ถึง (3.25) สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการคิดสังเคราะห์ตัวแบบวงจรได้ดังภาพประกอบ 3.19



ภาพประกอบ 3.19(A) เป็นสัญลักษณ์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ส่วนภาพประกอบ 3.19(B) เป็นตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ได้จากสมการ (3.17) ที่ทำการทดสอบโดยสัญญาณแบบสลับ ซึ่งจะทำได้ผลตอบสนองดังภาพประกอบ 3.17(A)



3.19 (A)

3.19(B)

ภาพประกอบ 3.19 เปรียบเทียบสัญลักษณ์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (A) และตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (B)

**6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำภายนอก**

จากภาพประกอบ 3.3  $L_1$  คือ บัลลาสต์ที่ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันกระตุ้นขณะหลอดเริ่มนำกระแสและทำหน้าที่หน่วงกระแส ขณะหลอดนำกระแสแล้ว ดังนั้นการออกแบบบัลลาสต์จึงถูกจำกัดตามหน้าที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดขนาดของลวดที่ใช้พัน ในขณะที่เดียวกันค่าเพอร์มิวอริบิลิตี (permeability) ของแกนเหล็กซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux) จะเป็นผลในการออกแบบบัลลาสต์ด้วย ดังนั้นในการพิจารณาหาข้อกำหนดพื้นฐานของการออกแบบบัลลาสต์ที่ความถี่ต่ำทำได้ดังนี้

$$W = \int_0^T P(t) dt \dots\dots\dots(3.26)$$

$$= \frac{1}{2} L i^2(t)$$

เมื่อ  $W$  = พลังงานของบัลลาสต์มีหน่วยเป็นจูล (Joule ; J)  
 $P$  = กำลังงานของบัลลาสต์มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)  
 (Watt = Joule/ sec)

สมการกำหนดระดับแรงดันของหลอดคือ

$$V_L = L \frac{di}{dt}(t) \dots\dots\dots(3.27)$$

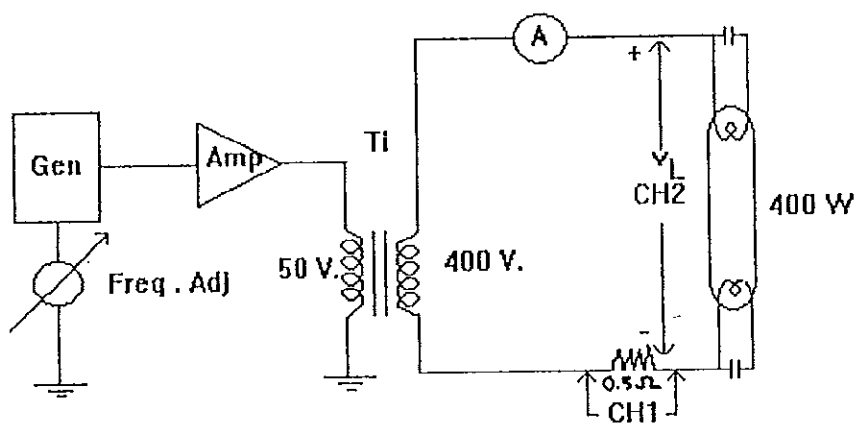
เมื่อ  $i(t) = \frac{V}{L} e^{-\frac{L}{R}t} \dots\dots\dots(3.28)$

จากสมการ (3.26) ถึง (3.28) นั้น สามารถนำมาใช้ในการออกแบบบัลลาสต์ได้เหมือนการออกแบบหาข้อ  
แปลงตามปรกติการออกแบบบัลลาสต์ที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

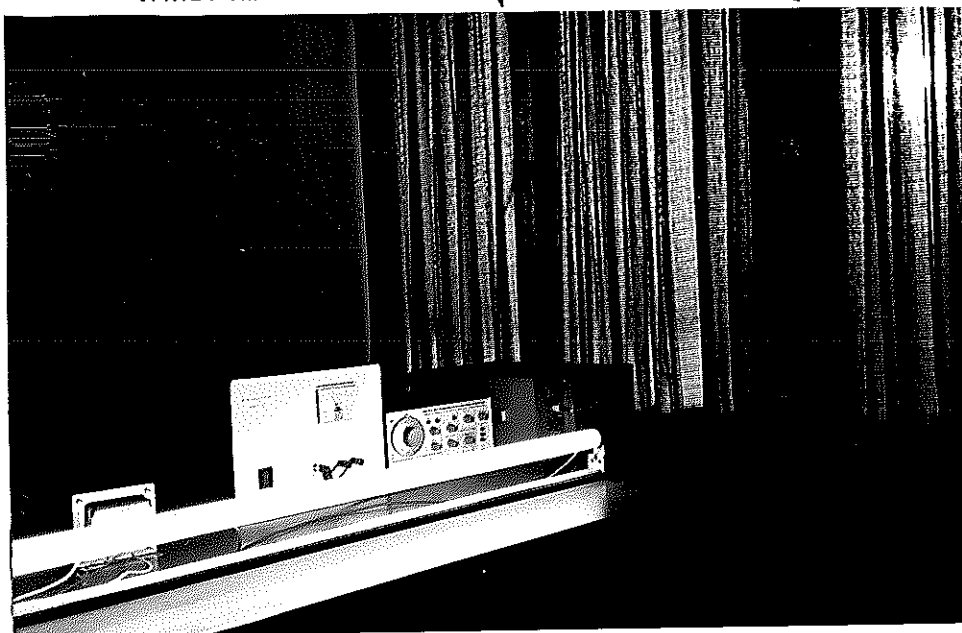
### 7 พฤติกรรมของหลอดที่ความถี่สูงกว่า 50 Hz

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ของแรงดัน และกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่  
50 Hz

ในหัวข้อ 2 และวงจรทดลองคือภาพประกอบ 3.3 นั้น พอที่จะหาสมการในการกำหนดตัว  
แบบวงจรได้ ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม การพิจารณาคุณสมบัติของแรงดันและกระแสของหลอดที่  
ความถี่สูงกว่า 50 Hz ก็เป็นสิ่งที่นำไปสู่การพิจารณาสมการเพื่อเป็นแนวทางในการสังเคราะห์ตัวแบบวงจร  
ของหลอดที่ความถี่สูงด้วย

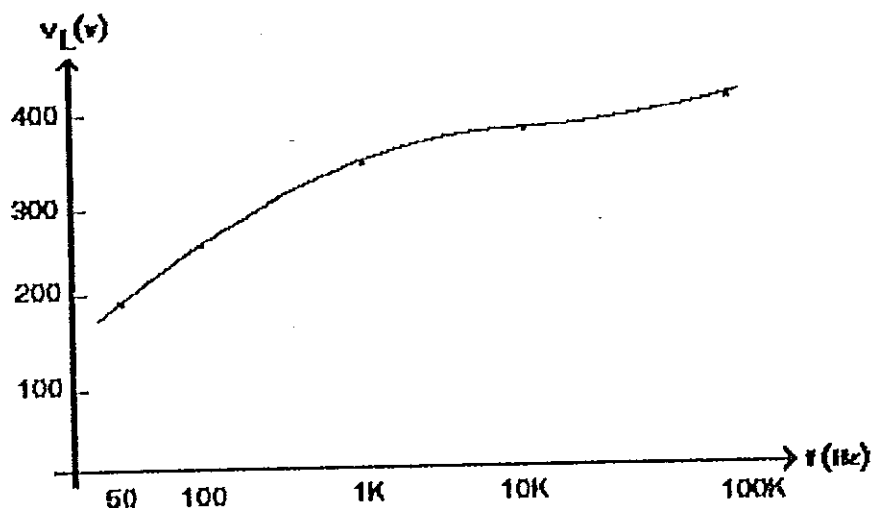


ภาพประกอบ 3.20 วงจรทดสอบคุณสมบัติของหลอดที่ความถี่สูง



ภาพประกอบ 3.21 เป็นภาพการทดลองวงจรทดสอบคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่  
ความถี่สูงตามวงจรภาพประกอบ 3.20

ผลการทดลองคุณสมบัติของหลอดที่ความถี่สูง จากภาพประกอบ 3.19 สามารถทดสอบหาแรงดันที่หลอดเริ่มนำกระแสได้ ดังผลทดลองดังรูป

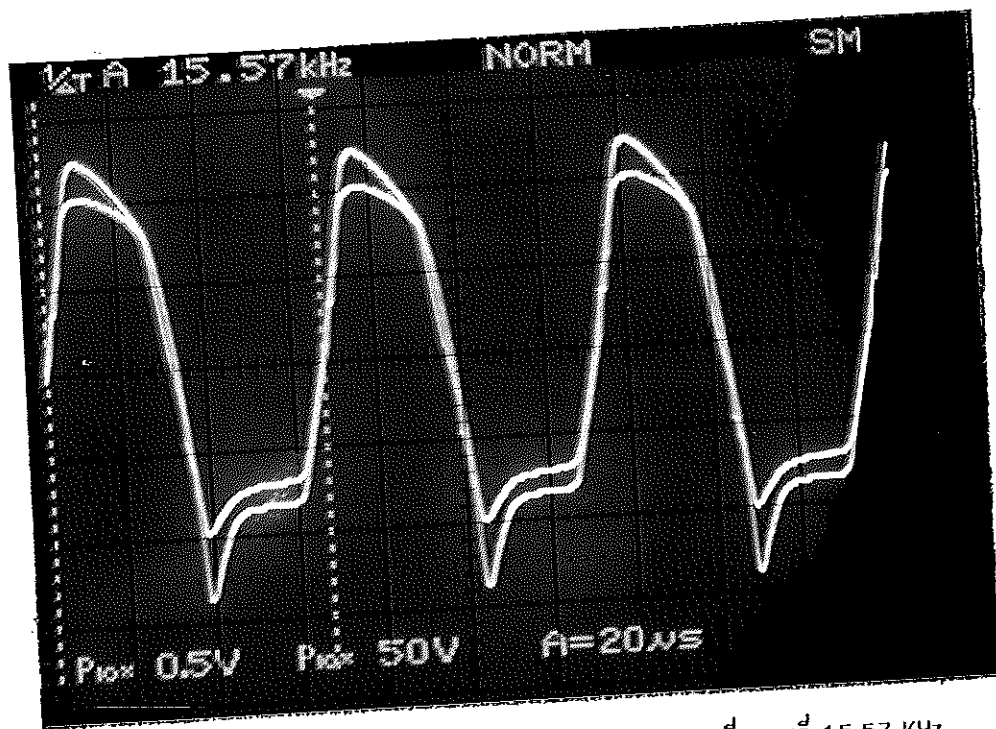


ภาพประกอบ 3.22 ความสัมพันธ์ของแรงดันเริ่มนำกระแสของหลอดต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่

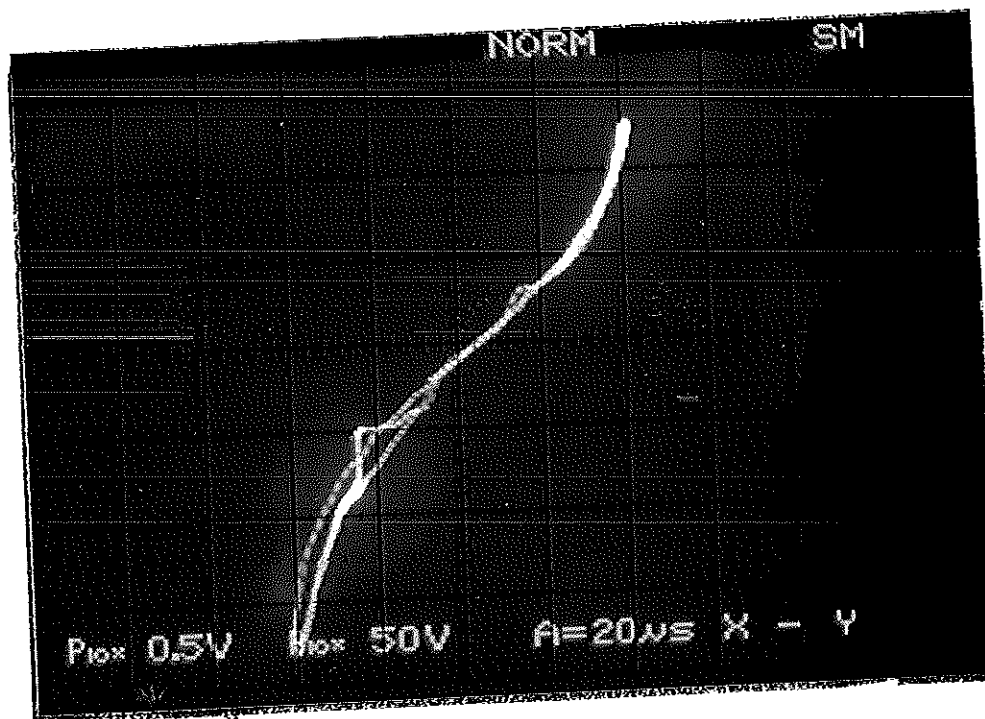
จากภาพประกอบ 3.20 เมื่อนำหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 W ขับด้วยวงจรขยายขนาด 150 W ให้อัตราการขยายต่อความถี่ 100 KHz โดยผ่านทรานส์ฟอร์มเมอร์ ( $T_1$ ) ซึ่งทรานส์ฟอร์มเมอร์ ( $T_1$ ) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันทางออกของวงจรขยายกำลัง

เนื่องจากวงจรขยายกำลัง 150 W มีแรงดันสวิงส์ได้สูงสุดเพียง  $\pm 50$  V ซึ่งแรงดันของวงจรขับกำลังไม่สูงพอที่จะกระตุ้นให้หลอดฟลูออเรสเซนต์นำกระแสได้ ดังนั้นทรานส์ฟอร์มเมอร์ ( $T_1$ ) จึงถูกนำมาเพิ่มแรงดันเพื่อป้อนกำลังให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างไรก็ตามทรานส์ฟอร์มเมอร์ ( $T_1$ ) มีโครงสร้างเหมือนทรานส์ฟอร์มเมอร์ทั่ว ๆ ไป โดยใช้แกนเหล็กซิลิกอน และใช้ลวดอาบน้ำมันที่มีขายทั่วไปและมีจุดแรงดันทั้งหมด 1000 V แต่เทคนิคของการพันขดลวดจะใช้แผ่นไมก้ารอง แต่ละชั้นขดลวดทางทุติยภูมิ (secondary coil) เพื่อป้องกันการสปาร์ค (spark) ระหว่างขดลวดเพื่อเพิ่มแรงดันสูง เมื่อทรานส์ฟอร์มเมอร์รับโหลดเต็มที่

ผลการทดลองพบว่า แรงดันตกคร่อมหลอด ที่ทำให้หลอดเริ่มนำกระแสคือ 400 V (ที่ความถี่ 50 Hz ขึ้นไป) ในขณะที่เดียวกันถ้าแรงดันตกคร่อมหลอดน้อยกว่า 400 V หลอดก็จะไม่นำกระแส ซึ่งภาพของแรงดันและกระแสของหลอดขณะนำกระแสนั้นแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.22



ภาพประกอบ 3.22 (A) กระแสและแรงดันของโหลดที่ความถี่ 15.57 KHz



ภาพประกอบ 3.22 (B) กระแสและแรงดันของโหลดที่ Mode x-y

จากภาพประกอบ 3.22(A) การกำหนดฟังก์ชันเพื่อหาสมการในการกำหนดเป็นตัวแบบวงจรของหลอดนั้น ไม่สามารถทำได้แน่นอนหนัก เนื่องจากเมื่อความถี่เปลี่ยนไป การเลื่อนของเฟส ระหว่างกระแสและแรงดัน ที่ตกคร่อมหลอดจะมีค่าไม่แน่นอนซึ่งปัจจัยส่วนหนึ่งเป็นผลของค่าเพอร์มิวอเบิลิตี ของแกนในทราสฟอร์เมอร์ นอกจากนี้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของการแตกตัวของก๊าซที่ความถี่สูงนั้นจะต้องอธิบายโดยทฤษฎีควอนตัม ซึ่งทำให้การทดสอบสรุปผลแน่นอนไม่ได้ดีนัก

ภาพประกอบ 3.22 (B) พบว่าเป็นการเปลี่ยนการนำเสนอ

ภาพประกอบ 3.22 (A) ให้เป็นแบบ x-y Mode ซึ่งสรุปได้ว่าในความถี่สูงกว่า 50 Hz แรงดันและ กระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นจะเริ่มมีเฟสที่เหมือนกันขณะที่เดียวกันกระแสในการกระตุ้นหลอดจะน้อยลง แต่แรงดันจะสูงขึ้นแต่อย่างไรก็ตามผลคูณของกระแสและแรงดันตกคร่อมหลอดจะมีค่าเท่ากับกำลังของ หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่กำหนดไว้นั่นเอง

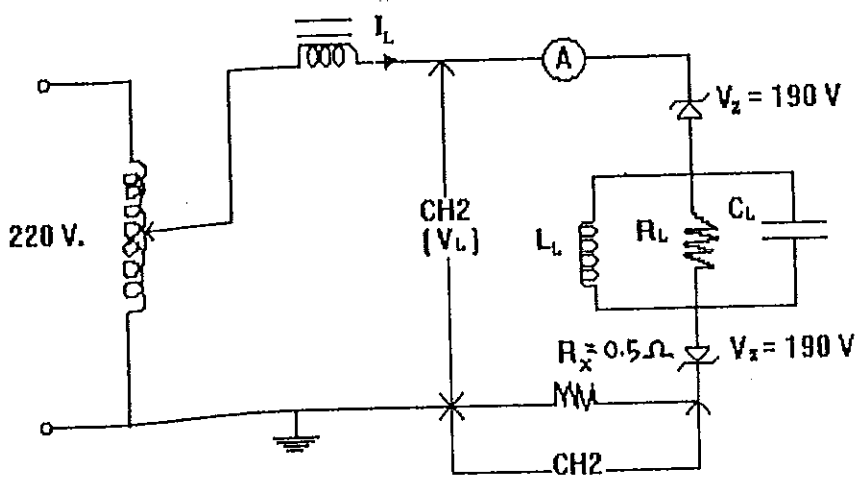
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSpice

#### 1 การทดลองตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากสมการและตัวแบบวงจรในภาพประกอบ 3.11 ของบทที่ 3 นั้น สามารถนำมาทำการทดลองเพื่อศึกษามสที่เกิดขึ้นของแรงดันและกระแสที่ปรากฏบนตัวแบบวงจรซึ่งจะทำให้สามารถยืนยันที่มาของแนวคิดจากการสังเคราะห์ที่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์และประยุกต์สมการแปลงรูปเป็นตัวแบบวงจร นั้นมีความถูกต้องเชื่อถือได้มากที่สุด

การทดลองในเบื้องต้นนี้จะใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแรงดันทั่วไปคือ  $V_{rms}$ , 220 V และใช้บัลลาสต์หรือขดลวดเป็นส่วนประกอบ และใช้ตัวแบบวงจรตามที่ได้สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งวงจรในการทดลองแสดงได้ตามภาพประกอบ 4.1

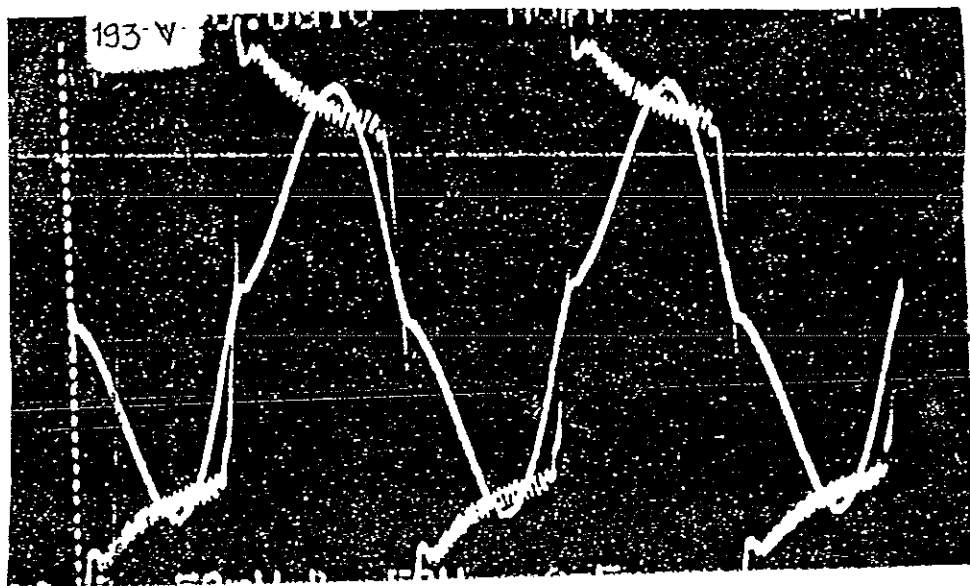


ภาพประกอบ 4.1 วงจรทดลองตัวแบบวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์

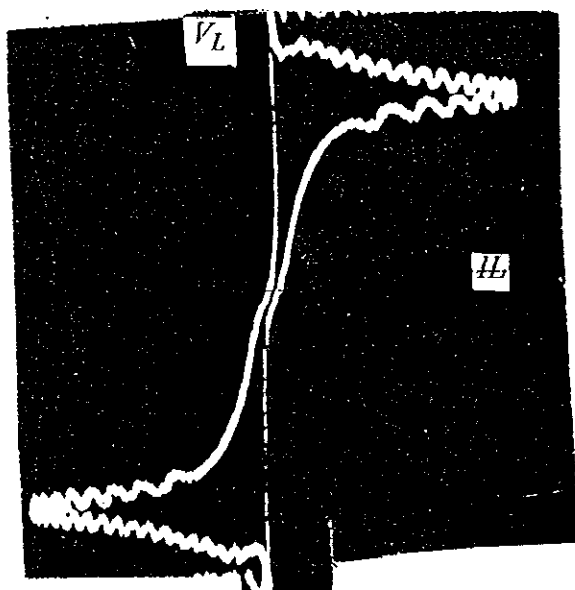
จากภาพประกอบ 4.1 การทดสอบแรงดัน และกระแส ที่ปรากฏบนหลอดฟลูออเรสเซนต์ สามารถแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบได้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริง ตามตาราง 4.1 และกราฟรูปคลื่นของแรงดันกับเวลา กระแสกับเวลาและแรงดันกับกระแส ซึ่งจะแสดงตาราง 4.1, 4.2, และ 4.3 ตามลำดับ

ตาราง 4.1. ผลของวงจรโหลดฟลูออเรสเซนต์เทียบกับผลของตัวแบบวงจร

$V_i$ (v)	$V_L$ (v)	โหลดฟลูออเรสเซนต์	ตัวแบบวงจร
		$I_L$ (mA)	$I_L$ (mA)
50	50	-	-
80	80	-	-
100	100	-	-
140	140	-	-
170	170	-	-
180	180	-	-
190	190	250	250
200	192	260	260
240	193	270	270
260	193	280	280



ภาพประกอบ 4.2 กราฟแรงดันตกคร่อมโหลดและเวลา t



ภาพประกอบ 4.3 ความสัมพันธ์ของ  $V_L$



จากภาพประกอบ 4.4 นั้นถ้าใช้ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ตามวงจรในภาพประกอบ 4.1 นั้น แล้วเมื่อพิจารณาสมการ (3.11) เทียบเคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นสามารถเขียนสมการ (3.11) ใหม่ได้เป็น

$$s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 = 0 \quad (4.1)$$

ซึ่งค่า  $\xi$  คือค่าอัตราส่วนของแอมป์ (damping ratio)

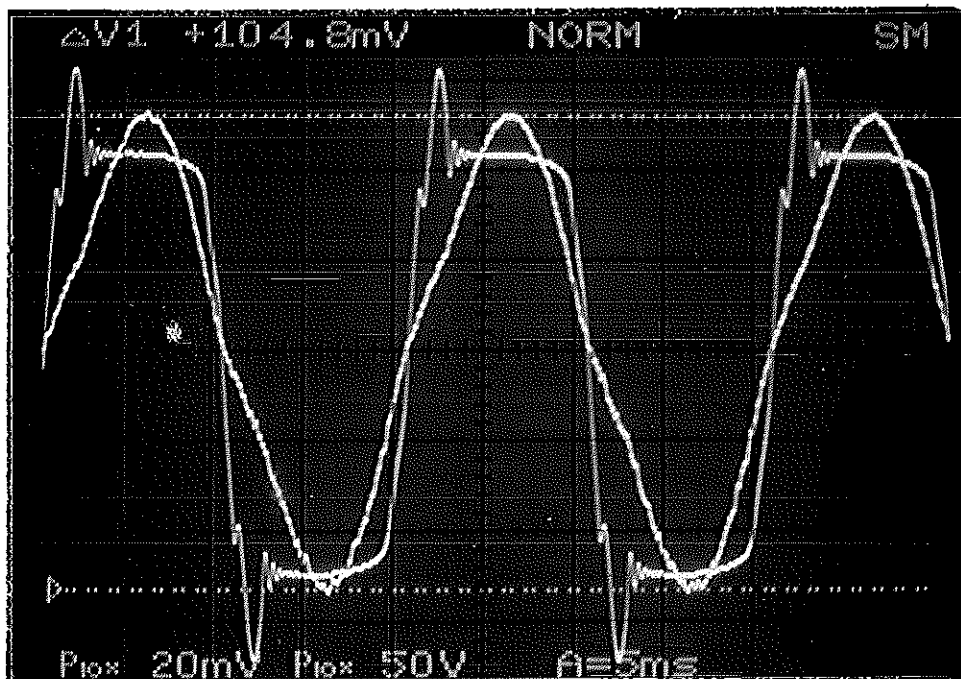
$$\text{โดย} \quad \xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2)$$

$$\text{หรือ} \quad j\omega d = j\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.3)$$

$$\text{และ} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.4)$$

จากภาพประกอบ 4.4 การทดสอบหาค่า  $R$ ,  $L$  และ  $C$  ภายในหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยใช้พื้นฐานสมการ (4.1)-(4.4) แล้วทดสอบได้ผลเป็นดังภาพประกอบ 4.4

จากภาพประกอบ 4.1 เมื่อใช้ค่าบัลลาสต์มีค่า  $700 \text{ mH}$   $L_1 = 900 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$ ,  $R_L = 1 \text{ K}\Omega$  แล้วทำการถ่ายภาพของความสั่นพ้องของ กระแสกับแรงดันตามภาพประกอบ 4.1 คือ  $CH_1$  กับ  $CH_2$  ตามลำดับภาพสั่นพ้องของโวลต์เตจและกระแสแสดงได้ตามภาพประกอบ 4:4



ภาพประกอบ 4.4 ภาพแสดงค่า V, I เมื่อใช้ตัวแบบวงจร

จากสมการ (4.1) ถูกทำการทดสอบโดยการวัดจากรูป 3.7 (A) และ 3.7 (B) พบว่าตัวแบบวงจรในภาพประกอบ 3.19 (B) มีค่า  $R_i \cong 900$  โอห์ม,  $L_i \cong 70.36$  mH และ  $C_i \cong 90$  nF ความถี่ในการ damp Cycleแรกมีค่า 2 กิโลเฮิร์ต และค่าแอมป์ริงแฟคเตอร์ ( $\xi$ ) มีค่าเป็น 0 ซึ่งจะได้คุณสมบัติของการแอมป์ตามรูปที่ได้จากการทดลองในภาพประกอบ 3.7A และ 3.7B

## 2 ขอบเขตของฮีสเตอร์ซิสของหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากภาพประกอบ 4.1 ทำการทดลองเฉพาะช่วงที่หลอดเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยขณะที่ป้อนแรงดันให้วงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น หลอดฟลูออเรสเซนต์จะไม่นำกระแส ในช่วงนี้ไม่สามารถวัดค่า  $V_L$  และ  $I_L$  ได้ แต่ในช่วงหยุดนำกระแสที่เราสามารถวัดค่า  $V_L$  และ  $I_L$  ได้จึงถือว่าหลอดจะดับ ตามข้อมูลได้ทดลองดังนี้ (การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 40 W ขณะเมื่อเพิ่มแรงดันและลดแรงดัน)

ตาราง 4.2 การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อค่อย ๆ เพิ่มแรงดัน

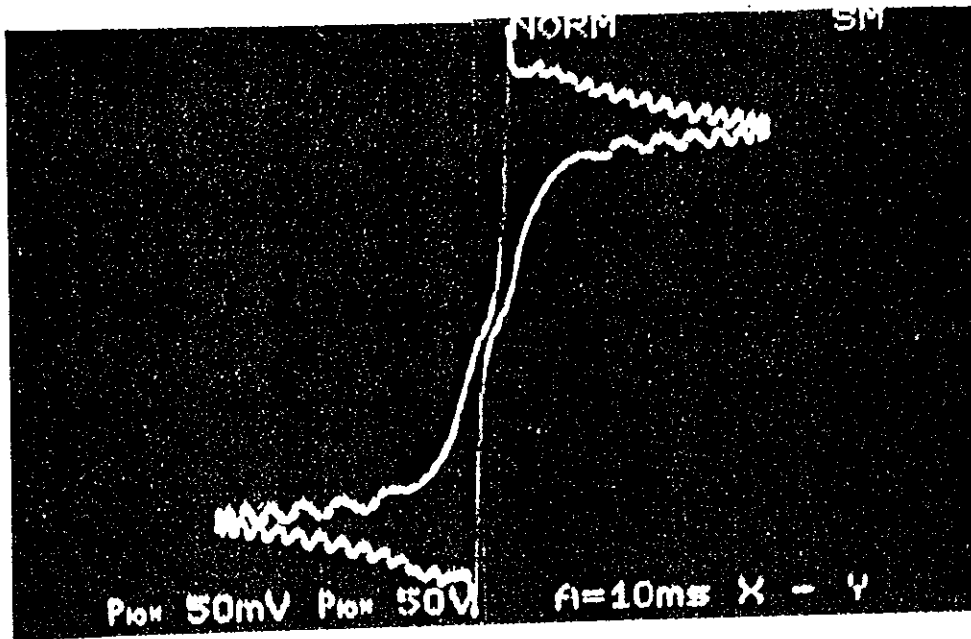
หลอด F.L		
$V_i$	$V_L$ (ON)	$I_L$ (mA)
180	-	
185	-	
187	-	
189	189	255
190	190	250
191	190	250
192	190	251
194	190	253
196	190	254
198	190	256
200	192	260
240	193	270

ตาราง 4.3 การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อค่อย ๆ ลดแรงดัน

หลอด FL		
$V_i$ (v)	$V_L$ (v)(Off)	$I_L$ (mA)
240	193	270
200	193	270
195	190	250
190	180	255
185	175	253
180	170	250
175	165	240
170	160	200
165	-	-
160	-	-
105	-	-

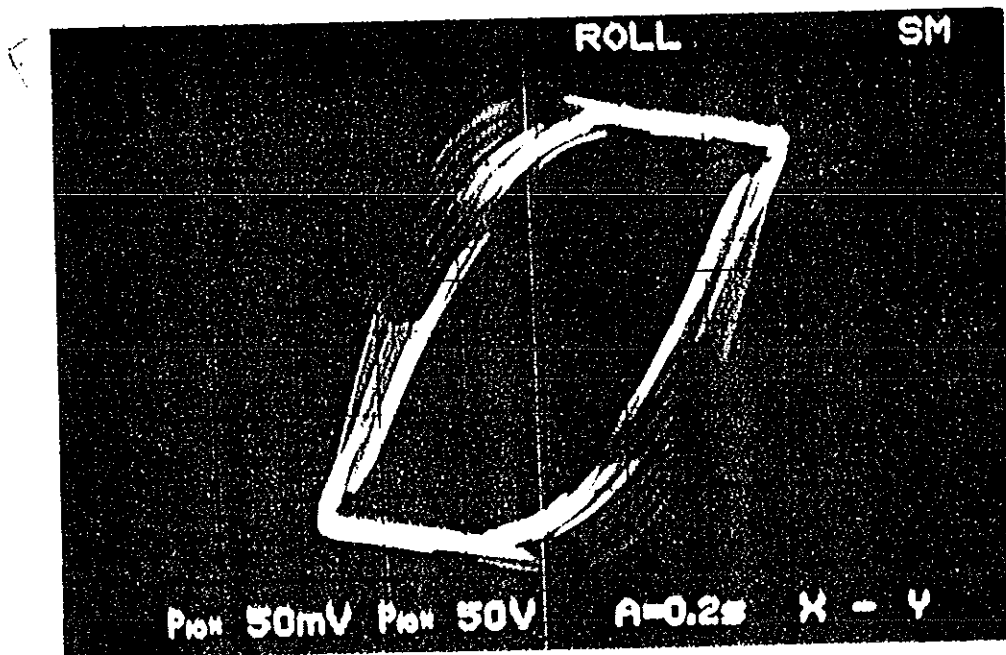
จากตาราง 4.2 และตาราง 4.3 จะเห็นว่าแรงดันที่ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ จะสูงกว่าแรงดันในช่วงหลอดฟลูออเรสเซนต์ off เพราะว่าพฤติกรรมของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้น จะใช้แรงดัน สูง เพื่อทำการจุดหลอดเพื่อให้เกิดน้ำกระแส แต่พอหลอดฟลูออเรสเซนต์น้ำกระแสแล้วนั้น แรงดันลดลงต่ำกว่าแรงดันจุดหลอดก็ยังสามารถน้ำกระแสได้อยู่ เนื่องจากคุณสมบัติของก๊าซภายในของหลอด ดังภาพประกอบ 4.5 และ 4.6

จากภาพประกอบ 4.5 A, 4.5 B และ 4.5 C เป็นการทดสอบหาระดับแรงดันหยุดทำงาน (Turn-off voltage) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ตามผลการทดลองตาราง 4.3



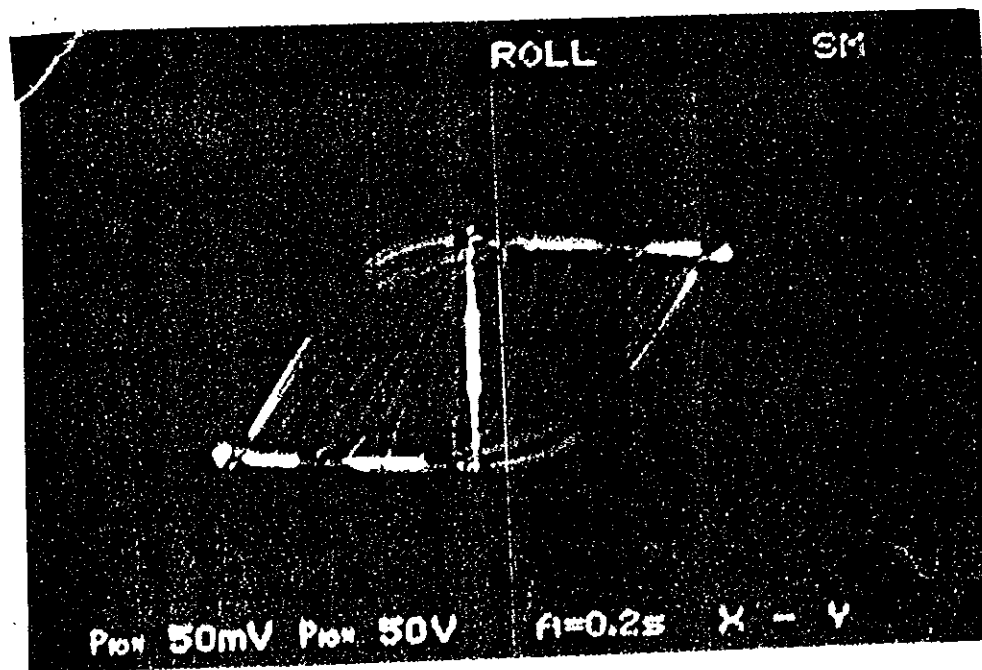
ภาพประกอบ 4.5 (A)

โดยภาพประกอบ 4.5A เป็นกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะนำกระแสปรกติ



ภาพประกอบ 4.5 (B)

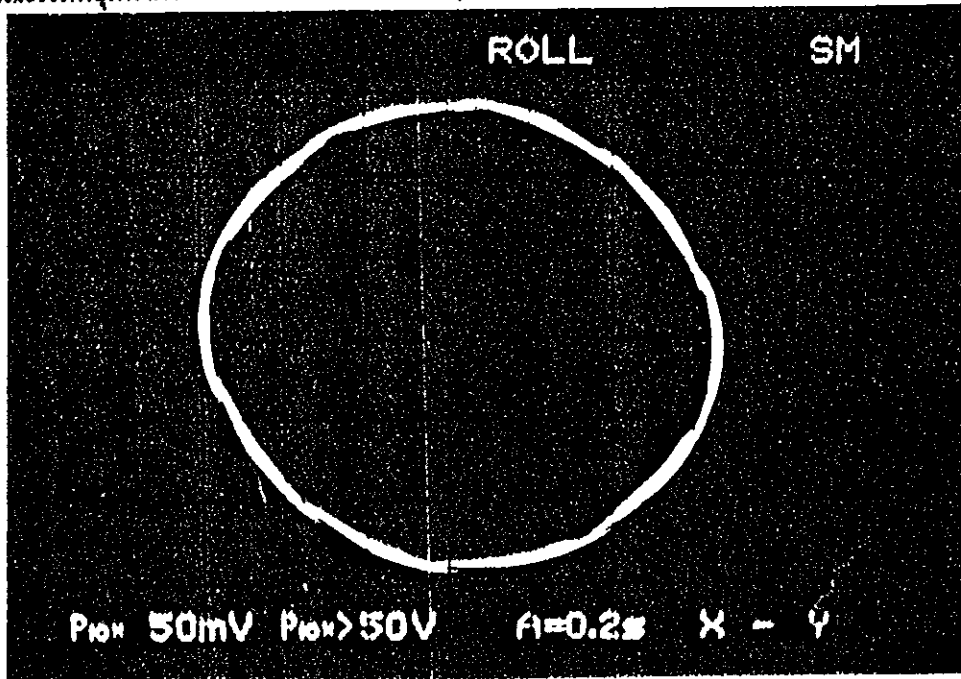
ส่วนภาพประกอบ 4.5 B เป็นภาพที่เริ่มทำการลดแรงดันตกคร่อมหลอดซึ่งจะพบว่าช่วงของยีสเตอร์ี่สของแรงดันจะมากขึ้น (ระยะบนแกน X)



ภาพประกอบ 4.5 (C)

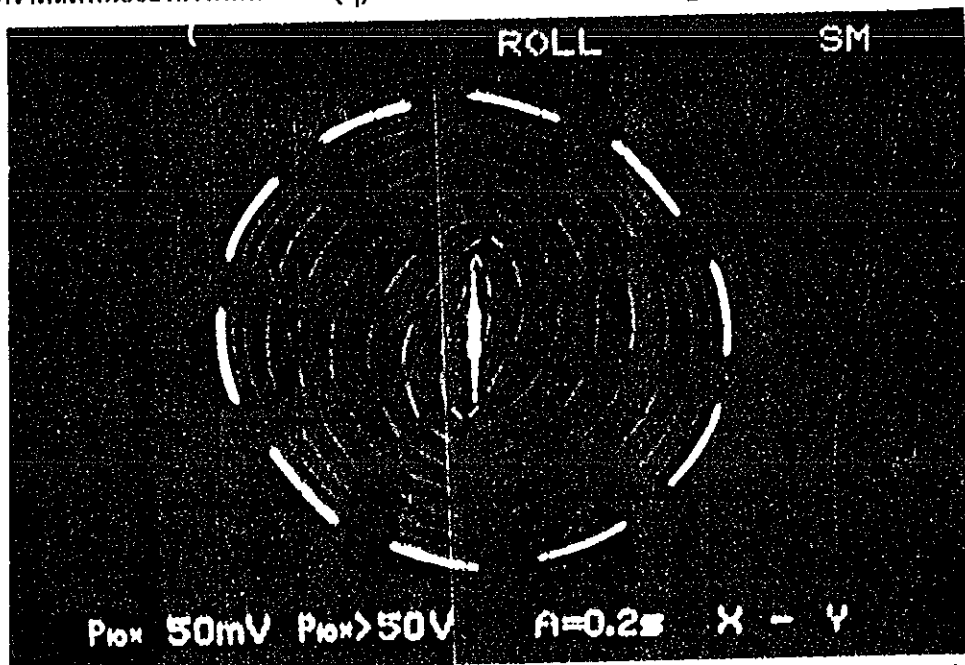
สำหรับสุดท้าย ภาพประกอบ 4.5 C เป็นภาพความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อแรงดันที่หลอดอยู่ในระดับที่หลอดไม่สามารถจะนำกระแสได้อีกต่อไป

ภาพประกอบ 4.6 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน ( $v_i$ ) และแรงดันการตกคร่อมหลอด ( $V_L$ ) ขณะเริ่มหยุดนำกระแส ดังภาพประกอบ 4.6 (A, B, C)



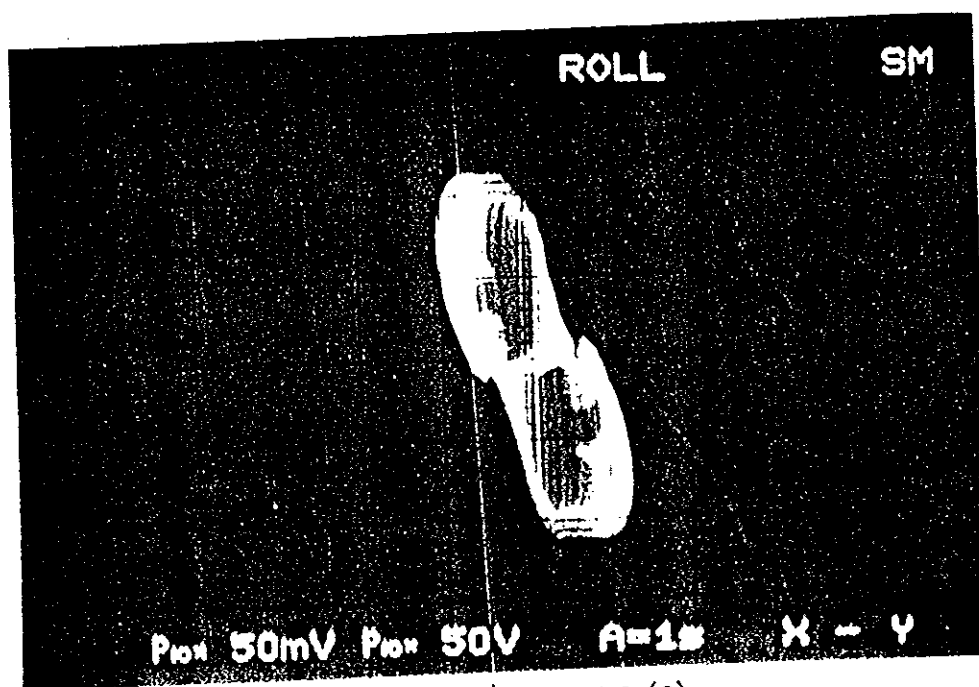
ภาพประกอบ 4.6 (A)

ความสัมพันธ์ของแรงดันทางเข้า ( $v_i$ ) กับแรงดันตกคร่อมหลอด ( $V_L$ ) ขณะที่หลอดทำงานปกติ



ภาพประกอบ 4.6 (B)

ความสัมพันธ์ของแรงดัน ( $v_i$ ) และ ( $V_L$ ) เมื่อเริ่มลดแรงดันใน  $v_i$  ลงเป็นผลให้  $V_L$  เริ่มลดลงและจะนำกระแสได้น้อยลง



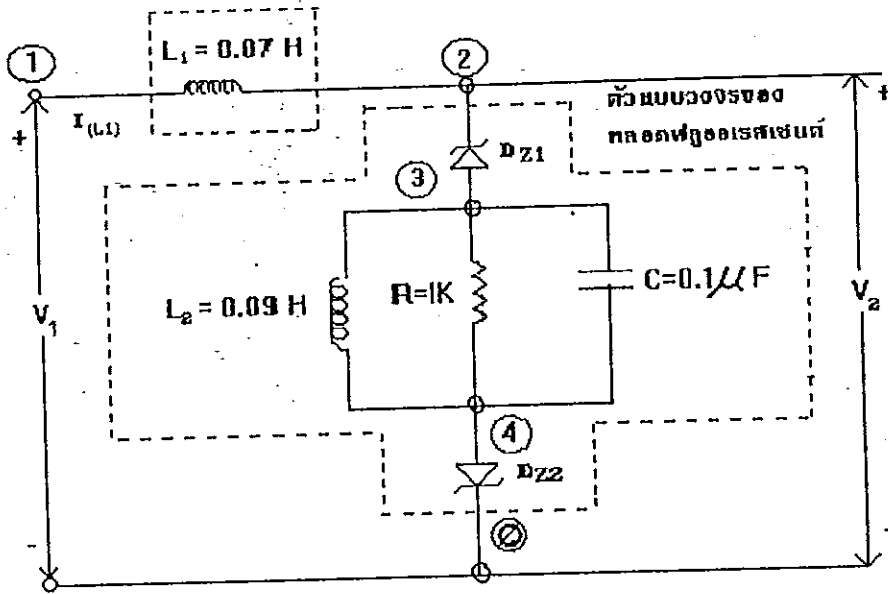
ภาพประกอบ 4.6 (c)

ความสัมพันธ์ของแรงดัน ( $v_L$ ) และ ( $V_L$ ) เมื่อหลอดกำลังจะหยุดนำกระแส ขณะนี้แรงดันตกคร่อมหลอด ( $V_L$ ) จะมีค่าต่ำกว่าแรงดัน ( $V_L$ ) ขณะเริ่มนำกระแส

3 การใช้โปรแกรม PSpice ในการทดสอบตัวแบบวงจร

การใช้โปรแกรมทดสอบตัวแบบวงจรนี้ ใช้โปรแกรม PSpice Student version ซึ่งวงจรที่ใช้ทำโปรแกรมแสดงได้ดังนี้

ขดลวดเสมือนบัลลาสต์



ภาพประกอบ 4.7 ตัวแบบวงจรที่ใช้โปรแกรมทดสอบพร้อมโปรแกรมแสดงได้ดังรูป จากภาพประกอบ 4.7 สามารถทำการสร้างโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้ โดยกำหนดจุดต่อของอุปกรณ์ แรงดันทางเข้า และจุดแสดงผลแรงดันทางออก ซึ่งโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทำได้ดังนี้ เมื่อ

$L_1$  คือ ขดลวดเสมือนบัลลาสต์

$L_2$ , R และ C รวมทั้งซีเนอร์ไดโอด ( $D_{Z1}$ ,  $D_{Z2}$ ) เป็นตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เซนต์

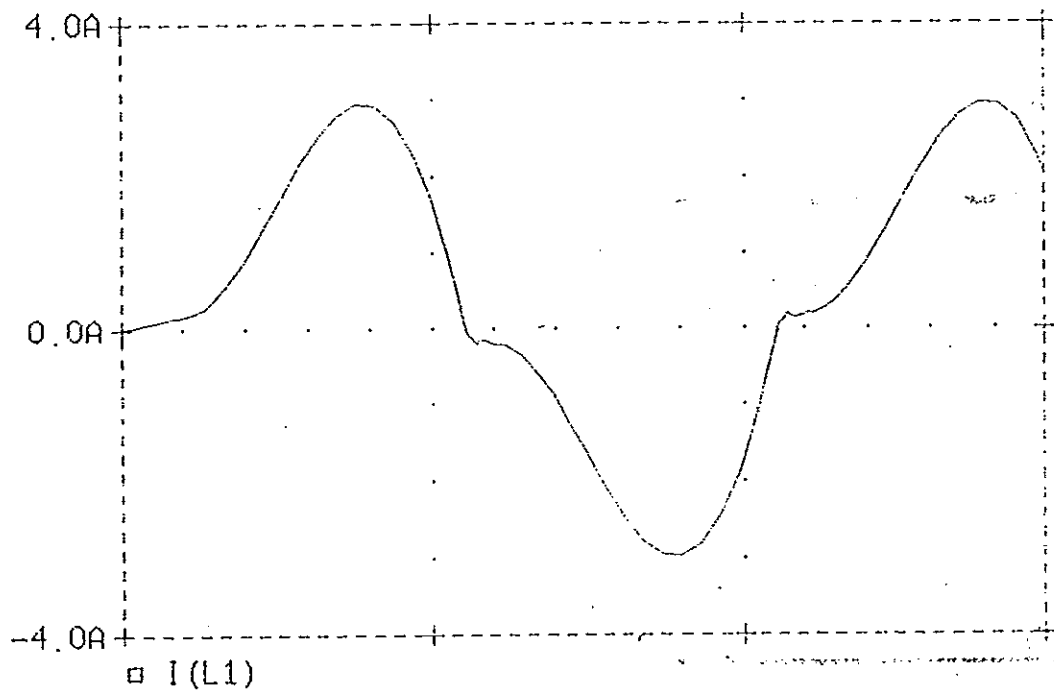


## ตัวอย่างการโปรแกรม

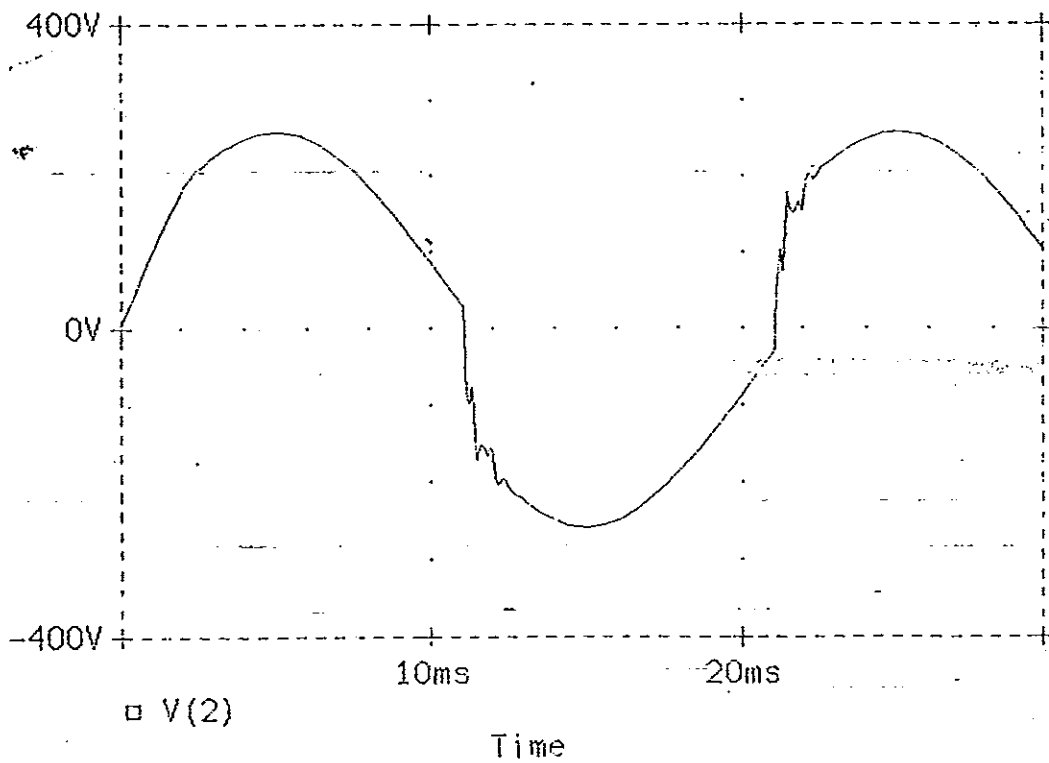
```
*PROGRAM SD
VIN 1.0 SIN(0 310 50HZ)
L1 1 2 0.07
D1 3 2 AA
L2 3 4 0.09
C1 3 0.1U
D2 4 0 AA
R1 3 3 1000
.MODEL AA D(BV=190)
.TRAN 0.01M 30M 0.1M
.OPTION NOPAGE
.END
```

\*PROGRAM SD

Date/Time run: 12/06/93 15:12:31 Temperature: 27.0



ภาพประกอบ 4.8A



ภาพประกอบ 4.8B

ผลการวิเคราะห์ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยโปรแกรมPSpice (ภาพประกอบ 4.7) ผลการวิเคราะห์แสดงได้ตามภาพประกอบ 4.8 ซึ่งผลการทดลอง ภาพประกอบ 4.8 A เป็นรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่าน  $L_1$  ( $I_{L1}$ ) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเฟสของแรงดันตกคร่อมตัวแบบวงจรดังภาพประกอบ 4.8 B พบว่าขณะที่แรงดันตกคร่อมหลอดเพิ่มขึ้นยังไม่ถึงระดับของแรงดัน ซีเนอร์ (Zener Voltage) กระแส  $I_{L1}$  จะยังไม่ไหลจนกระทั่งแรงดันจากคร่อมหลอดจะถึงระดับนำกระแสของหลอดแล้ว ( $V_L = V_{Th} = V_{zener}$ ) กระแสจะเพิ่มขึ้นและระดับของแรงดัน ( $V_L$ ) จะคงที่ ขณะเดียวกันเมื่อแรงดันเปลี่ยนเฟสเป็นด้านแรงดันลูปลบ (Negative Loop Voltage) การนำกระแสก็จะมีพฤติกรรมทำนองเดียวกัน

## บทที่ 5

### สรุปและเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงการทดลองและสังเคราะห์หาตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งผลการวิจัยทำให้ได้รูปแบบของตัวแบบวงจรที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุและซีเนอร์ไดโอดโดยพารามิเตอร์ที่ประกอบในตัวแบบวงจรนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ปรากฏตามผลที่ได้ทำการทดลองโดยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่กำหนดความถี่และขอบเขตของความต้านทานลบ เมื่อมีแรงดันมาตกคร่อมขณะเดียวกันซีเนอร์ไดโอดทำหน้าที่กำหนดระดับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุให้คงที่เสมือนเป็นแรงดันแตกตัวของก๊าซในหลอดขณะเริ่มนำกระแสและแรงดันของหลอดจะขึ้นอยู่กับการขึ้นของกระแสที่เพิ่มขึ้น โดยความสว่างของหลอดจะขึ้นอยู่กับการขึ้นของกระแสที่เพิ่มขึ้น ระดับแรงดันในการเริ่มนำกระแสของหลอดจะมีค่าสูงกว่าแรงดันในขณะที่กำลังจะหยุดนำกระแส เนื่องจากผลของฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกิดจากขอบเขตของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขณะมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งขณะเริ่มลดระดับแรงดันทางเข้าแรงดันออกซิลเลตที่แคบปี อยู่บนระดับแรงดันที่คงที่ของหลอดนั้นก็ลดลงเช่นกัน

นอกจากตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ได้ทำการวิจัยแล้วนั้น เป็นผลให้ทราบความสัมพันธ์ของบัลลาสต์ที่ใช้ยู่ทั่ว ๆ ไป โดยบัลลาสต์ทั่วไปนั้น ทำหน้าที่ 2 ประการ คือ ช่วยในการเริ่มนำกระแสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ในขณะที่เริ่มสตาร์ท โดยทำงานร่วมกับสตาร์ทเตอร์ และในการออกแบบบัลลาสต์ให้มีความเหมาะสมที่สุดจะสามารถทำได้ตามที่อธิบายในสมการ 3.13 และ 3.15 โดยการออกแบบในส่วนนี้สามารถที่จะประยุกต์กับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีความถี่สูงได้ด้วย โดยจะมีผลให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำเล็กลงด้วย

ผลที่ได้รับจากการวิจัยนี้ คือ (1) ค่าประมาณของค่าต้านทาน ( $R_p$ ) ค่าเหนี่ยวนำ ( $L_p$ ) และค่าประจุ ( $C_p$ ) รวมทั้งระดับแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่ทำการทดสอบได้ตรงกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม

(2) ตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรไฟฟ้าที่สามารถทดสอบพฤติกรรมที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ได้

(3) การออกแบบบัลลาสต์ชนิดที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ที่ให้ค่าเหมาะสม

(4) แนวทางในการพัฒนาไปสู่การสร้างตัวแบบวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความถี่สูงเพื่อพัฒนาอุปกรณ์หรือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการควบคุมการใช้พลังงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ในที่สุด

ข้อวิจารณ์ในการวิจัย เนื่องจากพฤติกรรมของก๊าซภายในหลอดบางลักษณะยังไม่ได้ทำการวิจัย เช่น พฤติกรรมของหลอดภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายที่มีความถี่สูง ซึ่งการพิจารณาหาตัวแบบวงจรไม่สามารถทำได้ผลเป็นที่แน่นอน เนื่องจากความถี่สูงขึ้น พฤติกรรมของแรงดันและกระแสจะแตกต่างกัน โดยตลอดซึ่งผิดกับพฤติกรรมที่ความถี่ต่ำนอกจากนั้น หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมของแสงแถบสีต่าง ๆ ที่หายไปเมื่อความถี่สูง ซึ่งจะมีประโยชน์มากสำหรับการประยุกต์หลอดฟลูออเรสเซนต์กับสเปคเตอร์โฟโตมิเตอร์ หรือการออกแบบวงจรขับกำลังแก่หลอดฟลูออเรสเซนต์ อย่างไรก็ตามตัวแบบวงจรที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์การออกแบบบัลลาสต์ที่ความถี่ 50 Hz ได้ดีและสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์เป็นบัลลาสต์ความถี่สูงได้ระดับหนึ่ง

## บรรณานุกรม

- Von Engel, A. 1965, "Ionized Gases", Oxford at the Clarendon Press , pp.259-275.
- Van der Pol, B. and Van der Make. 1927. "Frequency Demultiplication" Nature Vol 120.  
pp. 363 - 364.
- Francis, V. J. 1948. Fundamental of Discharge Tube Circuits , John Wiley & Sons Inc, New York,  
pp. 356-361.
- Gluskin, E, 1989. "Discussion of the Voltage/Current Characteristic of a fluorescent Lamp", IEE Proceedings Vol 136 Pt. ANO 5. pp. 229-232.
- \_\_\_\_\_ . "On the theory of fluorescent lamp Circuits", IEE Proceedings Vol 137 Pt S No. 4 ,  
July, 1990. pp. 201-208.
- Peek, S. C. and Spencer, Domina Eberle. "A Differential Equation for the fluorescent Lamp",  
Trans. of the Illumination Engineering Society Vol. 63 No. 4 April, 1968. pp. 157 - 166.
- Martin J. Hasler . "Electrical Circuits with Chaotic Behavior", Proceedings of the IEEE, Vol. 75, No. 8,  
August, 1987. pp. 1009-1020.
- มงคล เดชนครินทร์. "การออกแบบ และการสร้างวงจรบัลลาสต์", โครงการวิจัยเลขที่ 59-GER 2523,  
สถาบันวิจัยและการพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย . กรุงเทพฯ .  
สิงหาคม, 2525. หน้า 17-68.
- \_\_\_\_\_ . "การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของวงจรหลอดดาวแสง โดยใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม"  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,  
หาดใหญ่, สงขลา, พฤศจิกายน 2534, หน้า 34-37.

ภาคผนวก ก.  
การออกแบบปลั๊กสวิตซ์ที่ความถี่ 50 Hz/220 V.

## ภาคผนวก ก.

การออกแบบบัลลาสต์ที่ความถี่ 50 Hz / 220V.

จากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด ( $V_{rms}$ ) คือ

$$V_{rms} = 4.44 N f \phi \quad (A.1)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรอบ

$f$  คือ ความถี่

$\phi$  คือ ฟลักหรือเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่ง  $\phi = \frac{B}{A}$

$B$  คือ ความหนาแน่นของฟลัก / พื้นที่หน้าตัด

กำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ :  $P_i$

$$P_i = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (A.2)$$

$P_{out}$  = กำลังทางออก

$\eta$  = ประสิทธิภาพ

$$\therefore \text{กระแส คือ } I_i = \frac{P_i}{V_i} \quad (A.3)$$

$$\text{เมื่อ } V_i = L \frac{di}{dt} \quad (A.4)$$

$$\therefore L = V \frac{\Delta t}{\Delta I} \quad (A.5)$$

$$\therefore \text{จาก (A.5) } V \cdot \Delta t = L \cdot \Delta I \quad (A.6)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{V}{f} = 4.44 N \frac{B}{A}$$

$$\text{นั่นคือ } V \cdot t = 4.44 N \frac{B}{A} \quad (A.7)$$

แทนค่า (A.6) ใน (A.7) จะได้

$$L \cdot \Delta I = 4.44 N \frac{B}{A} \quad (A.8)$$

$$\therefore L = 4.44 N \frac{B}{A} \cdot \frac{1}{\Delta I}$$

$\Delta I$  มีค่าสูงสุดที่ขดลวด  $L$  รับได้ จะได้

$$L = 4.44 N \frac{NB}{A \cdot I_{max}} \quad (A.9)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรอบ

$B$  คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก : Weber /  $m^2$

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก :  $m^2$  (ตารางเมตร)

$I_{max}$  คือ กระแสสูงสุดที่ไหลในขดลวด (แอมป์) : Amp.



ภาคผนวก ข.  
ลักษณะโปรแกรมการใช้ของ PSpice  
และแนะนำโปรแกรม PSpice

Sec. 7.3 Diode Statement

Solution The list of the circuit file is as follows.

Example 7.1 Diode Characteristic

```
.OPTIONS NOPAGE NOECHO
* Operating temperatures: 50, 100, and 150°
.TEMP 50 100 150
* The input voltage that will be overridden by DC sweep voltage
* is assumed zero.
VF 1 0 DC DV
* Diode D1 whose model name is D1N914 is connected between nodes 1 and 2.
D1 1 2 D1N914
* A dummy voltage source to measure the diode current
VX 2 0 DC DV
* Diode model defines the model parameters.
.MODEL D1N914 D (IS=100E-15 RS=16 BV=100 IBV=100E-15)
* DC sweep from 0 to 2 V with 0.01 V increment
.DC VD 0 2V 0.01V
* Plot the diode current from the results of DC sweep.
.PLOT DC I(VX)
* Graphic post-processor
.PROBE
.END
```

The V-I characteristic that is obtained by varying the input voltage is shown in Figure 7.6.

Example 7.2

A Zener voltage regulator is shown in Figure 7.7. Plot the DC transfer characteristic if the input voltage is varied from -15 V to 15 V with an increment of 0.5 V. The Zener voltages of the diodes are the same and  $V_Z = 5.2$  V; the current at the zener breakdown is  $I_Z = 0.5 \mu\text{A}$ . The model parameters are  $IS=0.5\text{UA}$   $RS=6$   $BV=5.2$   $IBV=0.5\text{UA}$ . The operating temperature is  $50^\circ\text{C}$ .

Solution A Zener diode is implemented by setting the model parameters  $BV = V_Z = 5.2$  V and  $IBV = I_Z = 0.5 \mu\text{A}$ . The list of the circuit file is as follows.

Example 7.2 Zener Regulator

```
.OPTIONS NOPAGE NOECHO
* Operating temperatures: 50°
.TEMP 50
VIN 1 0 DC DV
R1 1 2 500
* Diodes D1 and D2 have model name DNAME.
D1 2 3 DNAME
D2 0 3 DNAME
RL 2 0 1K
```

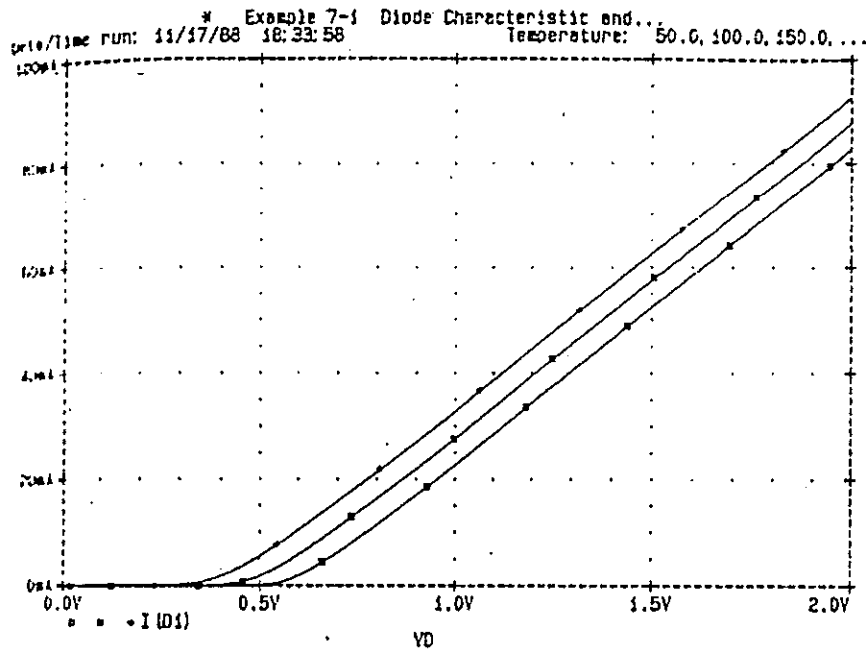


Figure 7.6 Diode forward characteristic for Example 7.1

- Model DNAME defines the parameters of Zener diodes.

```

.MODEL DNAME D (IS=0.5UA RS=1 BV=5.20 IBV=0.5UA)
  
```

- DC sweep from -15 to 15 V with 0.5-V increment

```

.DC VIN -15 15V 0.5V
  
```

- Print the load voltage using the results of DC sweep.

```

.PRINT DC V(2)
.PROBE
.END
  
```

The DC transfer characteristic is shown in Figure 7.8.

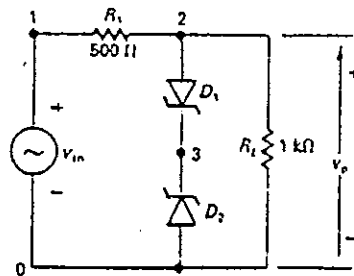


Figure 7.7 Zener regulator

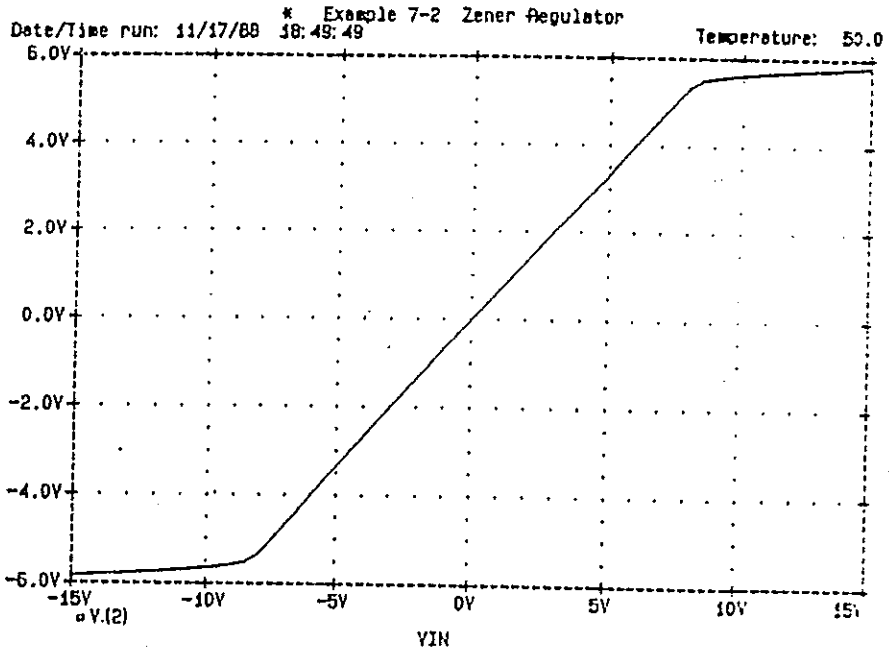


Figure 7.8 DC transfer characteristic for Example 7.2

Example 7.3

A clamping circuit is shown in Figure 7.9, where the output is taken from node 2. Plot the transient response of the output voltage V(2) for the time duration of 0 to 3 ms in steps of 20  $\mu$ s. The initial capacitor voltage is -15 V. The model parameters of the diode are the default values.

Solution The list of circuit file is as follows.

Example 7.3 Diode Clamper Circuit

Input voltage of 10 V peak at 1 kHz and zero offset voltage is connected between nodes 1 and 0.

```

VIN 1 0 SIN (0 10 1KHZ)
    
```

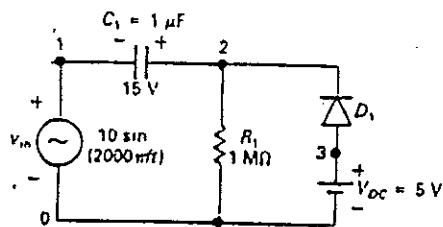


Figure 7.9 Diode clamper circuit

```

C Capacitor with an initial voltage of -15 V
C 1 2 10F IC=-15V
R 1 1MEG
DC 5
D 2 with model name DIODE is connected between nodes 3 and 2.
D DIODE
D model with default values of parameters
D DIODE D
TRAN 0 3ms 20us UIC
PRINT V(2) V(1)

```

The input and output voltages of the diode clamper circuit are shown in Figure 7.10.

Example 7.4

A diode circuit is shown in Figure 7.11(a). The AC input voltage is  $v_{in} = 10 \times 10^{-3} \sin(2\pi \times 10^3 t)$ . Print the DC bias point and the small-signal parameters of the

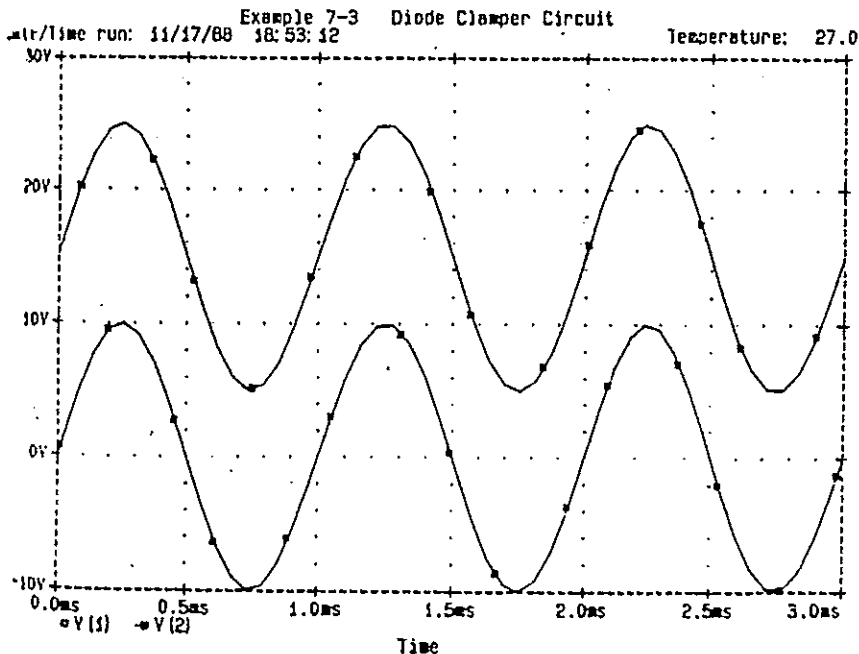


Figure 7.10 Output of diode clamper circuit for Example 7.3

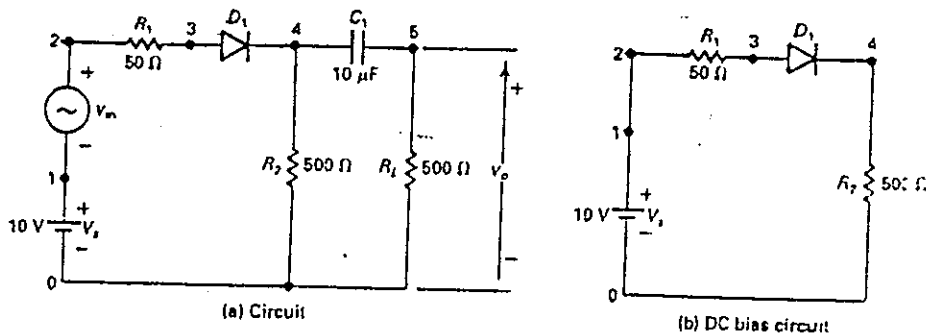


Figure 7.11 Diode circuit

diode. Plot the output voltage from 0 to 200  $\mu$ s with 2- $\mu$ s increments. If the frequency of the AC voltage is varied from 1 Hz to 1 kHz, plot the magnitude and phase angle of the output voltage. The model parameters are IS=100E-15 RS=16 CJO=2PF TT=12NS BV=100 IBV=100E-15.

Solution The equivalent circuit for calculating the dc bias point and small-signal parameters is shown in Figure 7.11(b). The list of the circuit file is as follows.

Example 7.4 Diode Circuit

```

• DC voltage of 10 V
YS 1 0 DC 10V
• AC voltage of 10 mV peak at 10 kHz and zero offset voltage for
  transient analysis and 10 mV peak for AC analysis
VIN 2 1 AC 10MV SIN (0 10M 10KHZ)
R1 2 3 50
R2 4 0 500
C1 4 5 10UF
RL 5 0 500
• Diode with model name D1N914 is connected between nodes 3 and 4.
D1 3 4 D1N914
• Diode model defines the model parameters.
.MODEL D1N914 D (IS=100E-15 RS=16 CJO=2PF TT=12NS BV=100 IBV=100E-15)
• Transient analysis for 0 to 200  $\mu$ s with 2- $\mu$ s increments.
.TRAN 2US 200US
• AC analysis from 1 Hz to 1 kHz with 10 points per decade
.AC DEC 10 1HZ 1KHZ
• Plot transient voltages
.PLOT TRAN V(5) V(2,1)
• Magnitude and phase plots of output voltage at node 5
.PLOT AC YDB(5) VP(5)
• Printing of the small-signal parameters and the dc operating point.
.OP
-PROBE
-END
    
```

The transient response is shown in Figure 7.12, and the frequency response is shown in Figure 7.13. The details of the DC bias point and the small-signal parameters are given next.

```

.... SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
1.00 VOLTAGE      NODE      VOLTAGE      NODE      VOLTAGE      NODE      VOLTAGE
   . 10.0000 ( 2) 10.0000 ( 3)  9.1756 ( 4)  6.2438
   . 0.0000
VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME      CURRENT
V1        -1.649E-02
V2        -1.649E-02
TOTAL POWER DISSIPATION  1.65E-01 WATTS
.... OPERATING POINT INFORMATION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NAME      D1
VALUE     D1N914
          1.65E-02
          9.32E-01
          1.57E+00
          7.65E-09

```

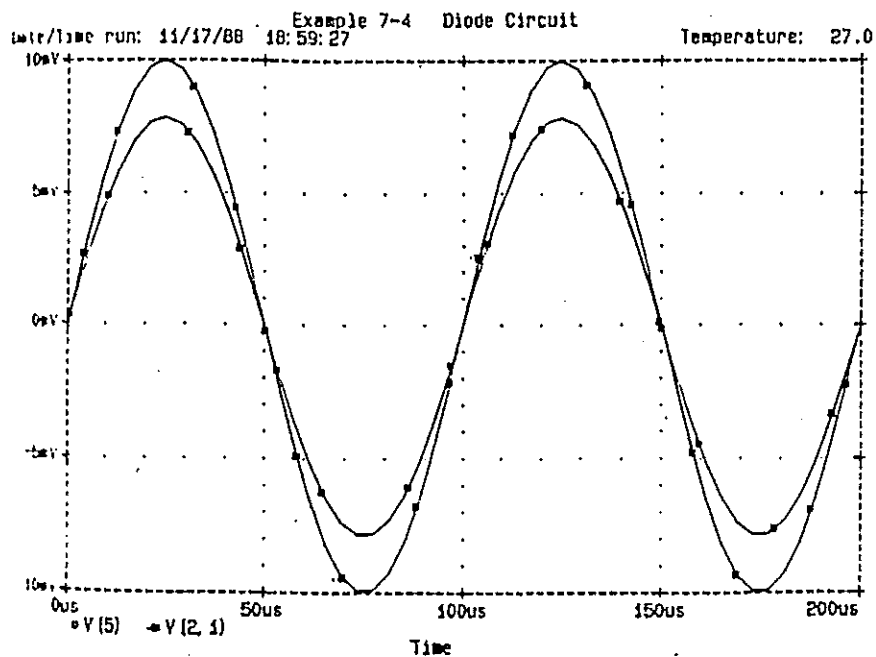


Figure 7.12 Transient response for Example 7.4

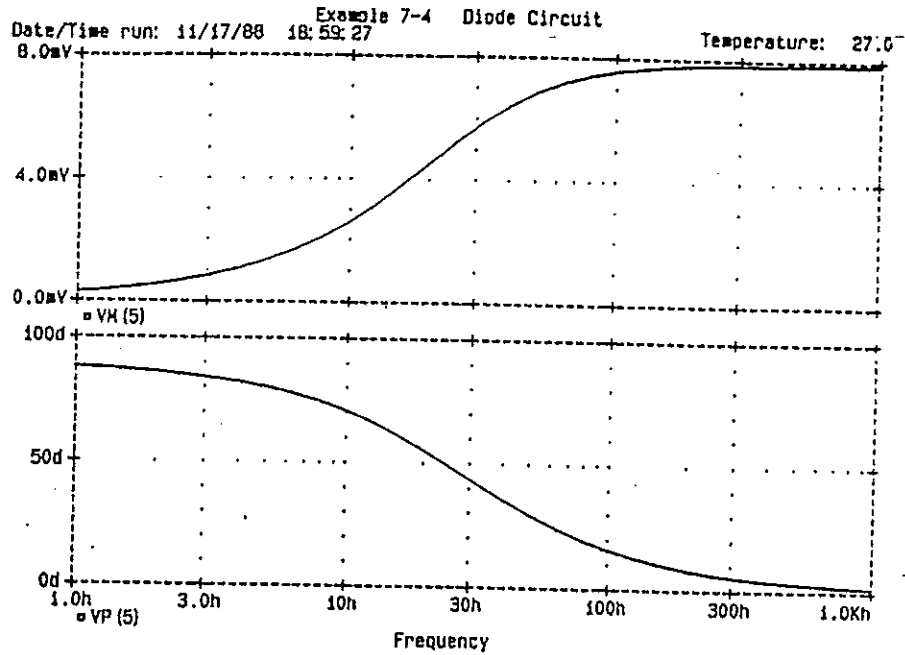


Figure 7.13 Frequency response for Example 7.4

Example 7.5

A diode waveform-shaping circuit is shown in Figure 7.14, where the output is taken from node 2. Plot the transfer characteristic between  $V_{in}$  and  $V(2)$  for values of  $V_{in}$  in the range of  $-15\text{ V}$  to  $30\text{ V}$  in steps of  $0.5\text{ V}$ . The model parameters of the diodes are  $IS=100\text{E}-15$   $RS=16$   $BV=100$   $IBV=100\text{E}-15$ .

Solution The list of circuit file is as follows.

Example 7.5 Diode Waveform-Shaping Circuit

The input voltage that is overridden by DC sweep voltage is assumed  $0\text{ V}$ .

```

*.TIT 1 0 DC 0
*.TIC 6 0 DC 15V
*.TID 10 0 DC -15V
*.R1 5 2K
*.R2 4 2K
*.R3 3 2K
*.R4 2 2K
*.R5 7 2K
*.R6 8 2K

```



```

R1 = 2 9 2K
R2 = 10 2K
* All diodes have the same model name of D1N914.
D1 = 5 D1N914
D2 = 4 D1N914
D3 = 3 D1N914
D4 = 7 D1N914
D5 = 8 D1N914
D6 = 9 D1N914
* Diode model D1N914 defines diode parameters.
MODEL D1N914 D (IS=100E-15 BS=16 BV=100 IBV=100E-15)
* DC sweep from -15 V to 30 V with 0.5 V increment
V1K -15 30 0.5
* Plot the results of DC sweep: V(2) versus V1K.
PLOT DC V(2)
* Graphic post-processor
PROBE
END
    
```

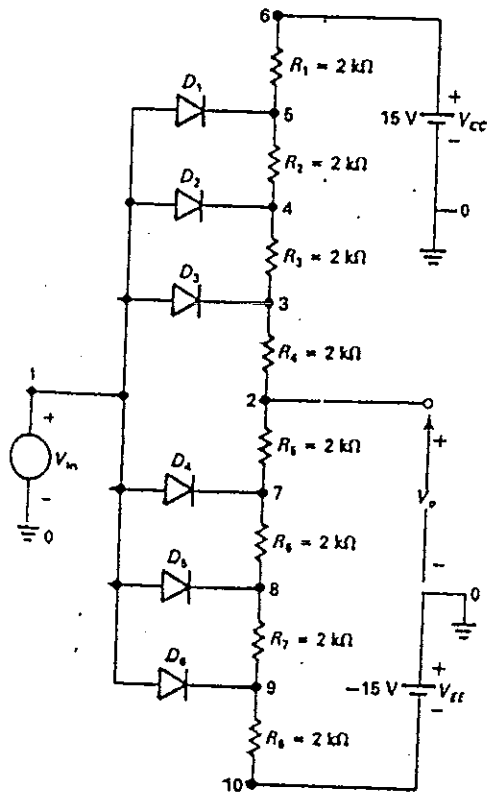


Figure 7.14 Diode waveform-shaping circuit

The results of the simulations are shown in Figure 7.15.

**Example 7.6**

A full-wave rectifier is shown in Figure 7.16, where the output is taken between terminals 4 and 3. Plot the transient response of the output voltage  $V(4, 3)$  for the time duration of 0 to 20 ms in steps of 0.1 ms. The peak voltage of the transformer primary is 120 V, 60 Hz. The turns ratio of primary to secondary windings is 10:1. The model parameters are the default values. Calculate and print the coefficients of Fourier series.

**Solution** The transformer secondaries may be considered as a voltage-controlled voltage source, as shown in Figure 7.17. The primary is represented by a voltage source with a very high resistance, e.g., 10 M $\Omega$ .

The list of the circuit file is as follows.

**Example 7.6 Rectifier with Single-phase Center-tapped Transformer**

- \* Primary is modeled as a voltage source of 120 V peak at 60 Hz with zero offset voltage.
- \* `VP 1 0 SIN (0 120 60HZ)`
- \* Primary winding is assumed to have a very high resistance:  $R1 = 10\text{ M}\Omega$ .
- \* `R1 1 0 10G0HM`
- \* Secondary winding is assumed as a voltage-controlled voltage source with

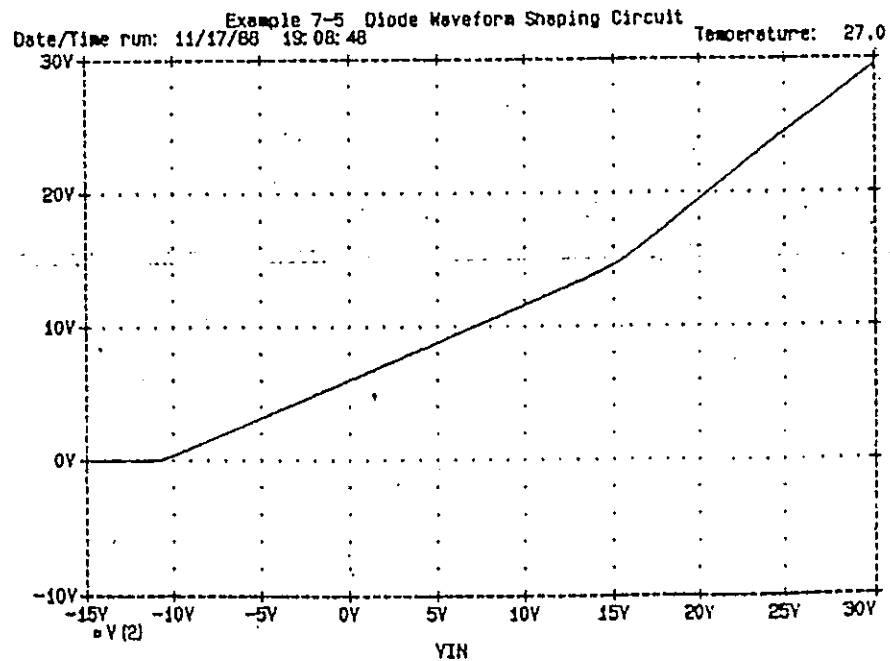


Figure 7.15 DC transfer characteristic for Example 7.5.

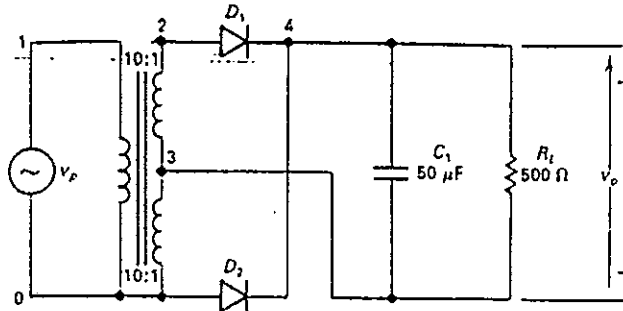


Figure 7.16 Rectifier with single-phase center-tapped transformer

```

* a voltage gain of 0.1.
D1 2 3 1 0 0.1
D2 3 0 1 0 0.1
C1 4 3 50UF
RL 4 3 500
* Diode D1 with model name DIODE
D1 2 4 DIODE
D2 3 4 DIODE
* Diode model with default values
.MODEL DIODE D
* Transient analysis from 0 to 20 ms with 0.1-ms increment
.TRAN 0.1MS 20MS
* Plot the results of transient analysis for voltage across nodes
* 4 and 3.
.PLOT TRAN V(4,3)
.FOUR 60HZ V(4,3)
* Graphic post-processor
.PROBE
.END
    
```

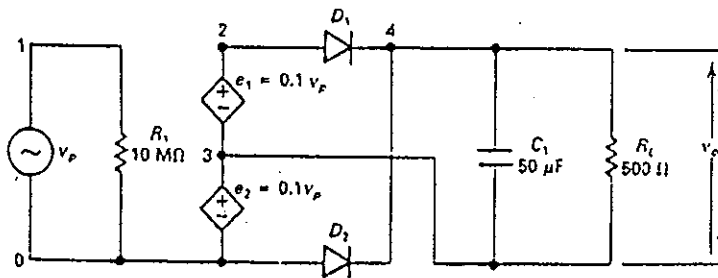


Figure 7.17 The equivalent circuit for Figure 7.16

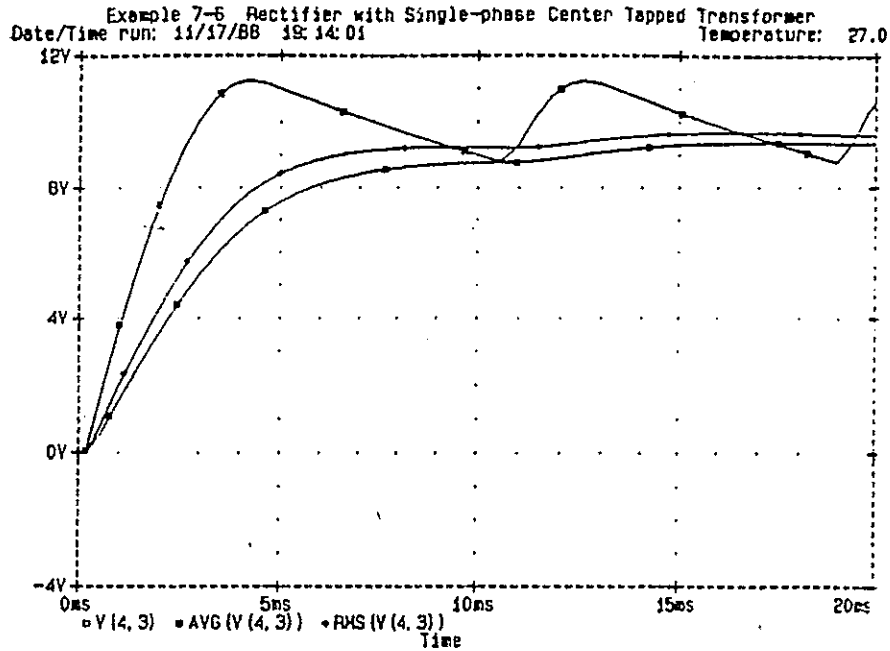


Figure 7.18 Output voltage for Example 7.6.

The transient response for Example 7.6 is shown in Figure 7.18. The coefficients of the Fourier analysis are given next.

```

****    FOURIER ANALYSIS                TEMPERATURE = 27.000 DEG C
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(4,3)
DC COMPONENT = 1.008665E+01

```

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	6.000E+01	2.112E-03	1.000E+00	-2.607E+00	0.000E+00
2	1.200E+02	9.843E-01	4.661E+02	1.162E+01	1.443E+01
3	1.800E+02	7.890E-04	3.736E-01	2.452E+01	2.713E+01
4	2.400E+02	3.833E-01	1.815E+02	2.131E+01	2.392E+01
5	3.000E+02	1.167E-03	5.526E-01	6.314E+01	6.575E+01
6	3.600E+02	1.669E-01	7.902E+01	3.761E+01	4.022E+01
7	4.200E+02	1.756E-03	8.314E-01	1.076E+02	1.102E+02
8	4.800E+02	7.140E-02	3.361E+01	6.667E+01	6.948E+01
9	5.400E+02	1.895E-03	8.971E-01	1.279E+02	1.305E+02

```

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 5.075342E+04 PERCENT
JOB CONCLUDED
TOTAL JOB TIME 22.62

```

The statements for diodes are

```
p(name) NA NK DNAME [(area) value]
.MODEL DNAME D (P1=V1 P2=V2 P3=V3 ...PN=VN)
```

## REFERENCES

- Spice Manual*. Irvine, Calif.: MicroSim Corporation, 1988.  
 Antognetti, *Power Integrated Circuits*. New York: McGraw-Hill, 1986.  
 A. Laha and D. Smart, "A Zener diode model with application to SPICE2," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-16, No. 1, pp. 21-22.

## PROBLEMS

- 7.1. For the diode circuit in Figure P7.1, print the bias point and the small-signal parameters of the diode. Use default values of Model parameters.

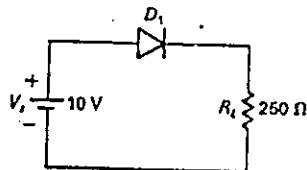


Figure P7.1

- 7.2. If the input voltage to the circuit in Figure 7.7 is  $v_{in} = 15 \sin(2000\pi t)$ , plot the transient response of the output voltage for a time duration of 0 to 2 ms with a time increment of 10  $\mu$ s. Print the details of transient analysis bias point. The Zener voltages of the diodes are the same,  $V_Z = 5.2$  V, and the current at the zener breakdown is  $I_Z = 0.5$   $\mu$ A. The model parameters are  $I_S = 0.5$   $\mu$ A  $R_S = 6$   $C_{JO} = 2$  PF  $T_T = 12$  NS  $BV = 5.20$   $I_{BV} = 0.5$   $\mu$ A. The operating temperature is 50°C.
- 7.3. If the input voltage of the circuit in Figure 7.14 is  $V_{in} = 10$  V DC, print the details of the DC operating point. Print the voltage gain ( $V_o/V_{in}$ ), the input resistance, and the output resistance.
- 7.4. A full-wave bridge rectifier is shown in Figure P7.4. Plot the transient response of the output voltage for the time duration of 0 to 20 ms in steps of 0.1 ms. The model parameters are the default values. Print the details of transient analysis bias point and the coefficients of the Fourier series.

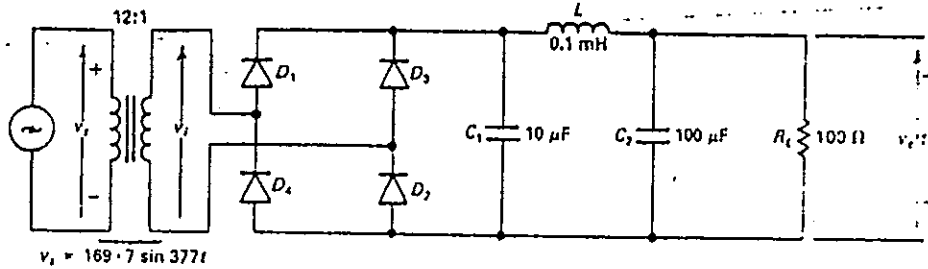


Figure P7.4

7.5. For the diode circuit in Figure P7.5, plot the DC transfer characteristic between  $v_{in}$  and  $v_o$  for values of  $v_{in}$  in the range of  $-18 \text{ V}$  to  $18 \text{ V}$  in steps of  $0.5 \text{ V}$ . The model parameters of the diodes are the default values.

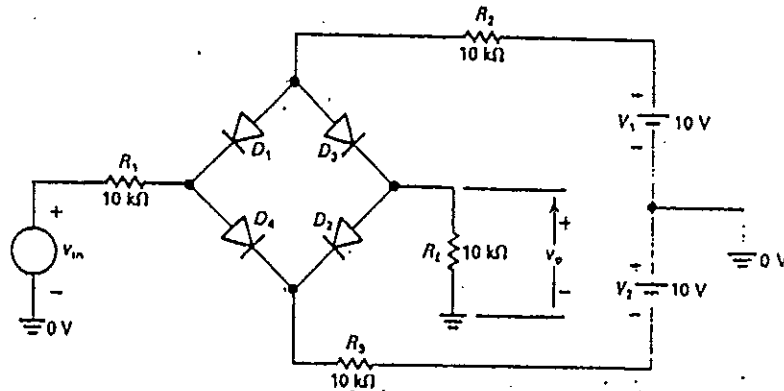


Figure P7.5

7.6. For the diode circuit in Figure P7.6, plot the input current against the input voltage for values of  $V_{in}$  in the range of  $-10 \text{ V}$  to  $10 \text{ V}$  in steps of  $0.25 \text{ V}$ . The model parameters are  $I_S = 0.5 \mu\text{A}$ ,  $R_S = 6$ ,  $BV = 5.20$ ,  $I_{BV} = 0.5 \mu\text{A}$ . The operating temperature is  $50^\circ\text{C}$ .

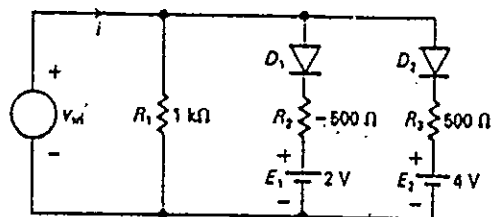


Figure P7.6

resistance  $R_B$  define the breakdown region. Diode  $D_2$  does not conduct until  $V_D = 5V$ , and if the reverse voltage is increased, then diode  $D_2$  becomes forward biased and the reverse current flows through  $R_B$ .

Reverse breakdown is modeled by an exponential increase in the reverse current and is determined by the reverse breakdown voltage, BV, and the current at breakdown voltage, IBV.

MODEL STATEMENT

The symbol for a diode is D. The name of a diode must start with D and it takes the general form

D(NAME) NA NK DNAME [(area) value]

where NA and NK are the anode and cathode nodes, respectively. The current flows from anode node NA through the diode to cathode node NK. DNAME is the model name.

Some Statements for Diode

```

D 5 6 DNAME
MODEL DNAME D (IS=0.5UA RS=6 BV=5.20 IBV=0.5UA)
D 33 35 SWITCH 1.5
MODEL SWITCH D (IS=100E-15 RS=16 CJO=2PF TT=12NS BV=100 IBV=100E-15)
D LAMP D 8 D1N914
MODEL D1N914 D (IS=100E-15 RS=16 CJO=2PF TT=12NS BV=100 IBV=100E-15)
    
```

Note. Diode DM, having model name DNAME, is a Zener diode with a reverse breakdown voltage of 5.2 V; the current at the zener break is 0.5  $\mu$ A.

Example 7.1

A diode circuit is shown in Figure 7.5. Plot the V-I characteristic of the diode for forward voltage from 0 to 2 V and for temperature of 50, 100, and 150°. The diode is of type D1N914 and the model parameters are IS=100E-15 RS=16 BV=100 IBV=100E-15.

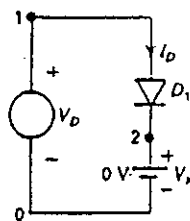


Figure 7.5 Diode circuit

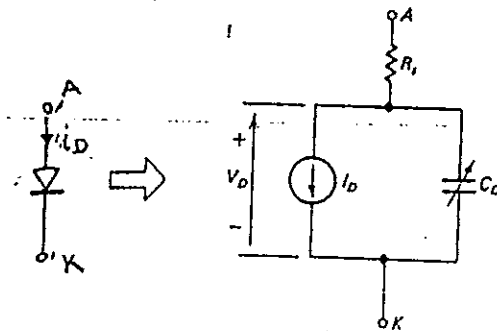


Figure 7.1 PSpice diode model with reverse-biased diode

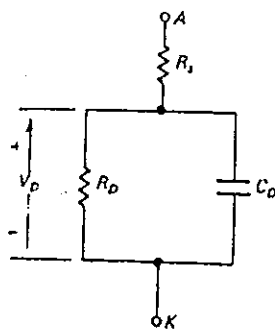


Figure 7.2 Small-signal diode model

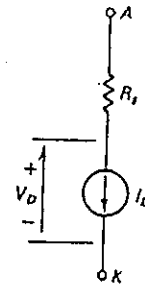


Figure 7.3 Static diode model with reverse-biased diode

at which this book is aimed, such complex models are not necessary. Many model parameters can be ignored by the users, and *PSpice* assigns default values of the parameters.

The model statement of a diode has the general form

```
.MODEL DNAME D (P1=V1 P2=V2 P3=V3 .....PN=VN)
```

where DNAME is the model name. DNAME can begin with any character, but its word size is normally limited to 8. D is the type symbol for diodes.  $P_1, P_2, \dots$  and  $V_1, V_2, \dots$  are the model parameters and their values, respectively. The model parameters are listed in Table 7.1.

An area factor is used to determine the number of equivalent parallel diodes of a specified model. The model parameters that are affected by the area factor are marked by an asterisk (\*) in the descriptions of the model parameters.

The diode is modeled as an ohmic resistance (value =  $RS/area$ ) in series with an intrinsic diode. The resistance is attached between node NA and an internal



TABLE 7.1 PARAMETERS OF DIODE MODEL

Name	Area	Model parameter	Units	Default	Typical
IS	•	Saturation current	Amps	1E-14	1E-14
RS	•	Parasitic resistance	Ohms	0	10
N		Emission coefficient		1	
TT		Transit time	seconds	0	0.1NS
CJO	•	Zero-bias pn capacitance	Farads	0	2PF
VJ		Junction potential	Volts	1	0.6
M		Junction grading coefficient		0.5	0.5
EG		Activation energy	Electron-volts	1.11	11.1
XTI		IS temperature exponent		3	3
KF		Flicker noise coefficient		0	
AF		Flicker noise exponent		1	
FC		Forward bias depletion capacitance coefficient		0.5	
BV		Reverse breakdown voltage	Volts	∞	50
IBV	•	Reverse breakdown current	Amps	1E-10	

anode node. [(area) value] scales IS, RS, CJO, and IBV, and defaults to 1. IBV and BV are both specified as positive values.

The DC characteristic of a diode is determined by the reverse saturation current IS, the emission coefficient N, and the ohmic resistance RS. The charge storage effects are modeled by the transit time TT, a nonlinear depletion layer capacitance, which depends on the zero-bias junction capacitance CJO, the junction potential VJ, and grading coefficient M. The temperature of the reverse saturation current is defined by the gap activation energy (or gap energy) EG and saturation temperature exponent XTI.

In order to simulate a Zener diode, the model in Figure 7.4 can be used. Diode D1 and the threshold voltage source V0 represent the normal forward voltage and reverse behavior of Zener diode. Diode D2, the voltage source BV, and

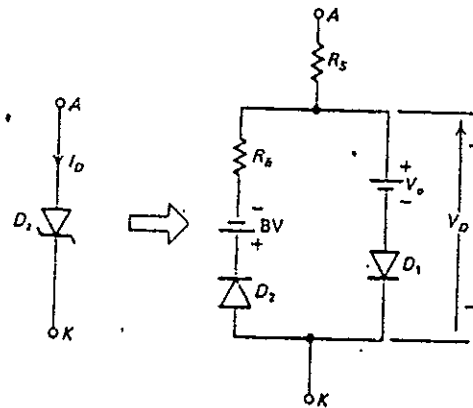


Figure 7.4 Static Zener diode model

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ	
วัน เดือน ปีเกิด	21 พฤศจิกายน 2504	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ครุศาสตรบัณฑิต (สาขาไฟฟ้ากำลัง)	เทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทเวศร์	2528

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ผู้ช่วยผู้อำนวยการ ฝ่ายบริการศึกษา  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตศาลายา  
96 หมู่ 3 ต.ศาลายา กิ่งอำเภอพุทธมณฑล  
จ. นครปฐม 73170