การออกแบบวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

นายไพศาล บุญเจียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 971 - 346 - 447 - 6

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF AN ELECTRONIC BALLAST STARTING CIRCUITS

Mr. Paisan Boonchiam

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974 - 346 - 447 - 6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
โดย : นายไพศาล บุญเจียม
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

……..…….คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

……อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

……กรรมการ
(อาจารย์สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไพศาล บุญเจียม : การออกแบบวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (DESIGN OF AN ELECTRONIC BALLAST STARTING CIRCUIT) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต 125 หน้า ISBN 974 - 346 - 447 - 6

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยศึกษาการออก-แบบวงจรจุดหลอดบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกันสามชนิดคือ วงจรจุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด วงจรจุดหลอดที่มีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยความถี่ วงจรจุดหลอดที่มีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด เกณฑ์ที่ใช้เป็นฐานสำหรับการออกแบบประกอบด้วยข้อกำหนดของการออกแบบ ข้อจำกัดการออกแบบ รวมทั้งพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ บัลลาสต์ทุกชนิดจะต้องได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ ส่วนข้อจำกัดของการออกแบบและพฤติกรรมการทำงานจะแตกต่างกันตามชนิดของวง-จรจุดหลอด เนื่องจากอุปกรณ์บางส่วนและการทำงานของวงจรบัลลาสต์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้วิเคราะห์อย่างถูกต้องได้ยาก ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อกำหนดเกณฑ์การออกแบบจึงใช้วิธีการประมาณด้วยวงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูลที่ใช้ตัวต้านทานแบบเชิงเส้นแทนหลอดและใช้วิธีการทางกราฟประกอบการวิเคราะห์วงจรด้วย การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการออกแบบใช้การจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ร่วมกับผลทดสอบจากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จริง ผลการตรวจสอบพบว่าถูกต้องเพียงพอสำหรับการออกแบบเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2543	ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

417 04510 21 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD : ELECTRONIC BALLAST / LAMP IGNITION/PREHEAT TIME

PAISAN BOONCHIAM : DESIGN OF AN ELECTRONIC BALLAST STARTING CIRCUIT. THESIS ADVISOR : Assoc.Prof. YUTANA KULVITIT,Ph.D.125pp

ISBN 974 - 346 - 447 - 6

This thesis presents a systematic design of an electronic ballast starting circuit. Three types of starting circuit were studied, namely instant starting, frequency control preheat starting, and load circuit control preheat starting. Design criteria stem from ballast specifications, design constraint, as well as operation characteristics of the lamp ballast system. All types of ballast must be designed according to the ballast specifications. Design constraints and operation characteristics are different depending on the ballast type. As some of the circuit components in the lamp ballast system and its operation are nonlinear, exact circuit analysis and design could hardly be done. Fundamental frequency approximation analytical technique, linear lamp model, as well as graphical technique were used to establish the circuit equations and design criteria. Both computer simulations and experimental results were used to verify the design procedures.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature .....

Faculty of study Electrical Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2000 Co-advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ รองศาตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเสมอมา รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน และรุ่นพี่ห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคน ตลอดจนสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ(สพช.) และสำนักงานกองทุนวิจัยแห่งชาติ(สกว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล(ศรม.) ที่ได้ให้ทุนการศึกษา ขอบกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

ไพศาล บุญเจียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญเรื่อง.....ช
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญภาพ.....ฌ

บทที่

1 บทนำ.....1
2 ทฤษฎีเบื้องต้นและสมการของวงจร.....5
3 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ.....53
4 การทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....97
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....114
รายการอ้างอิง.....116
ภาคผนวก.....119
ประวัติผู้เขียน.....125

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่าของ L และ C_{ig} ที่ใช้ทดสอบกำลังออกเท่ากับพิกัดสำหรับ V_{DC} 3 ค่า……...62

3.2 การเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC}=230V……69

3.3 การเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC}=280V……69

3.4 การเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC}=350V……70

3.5 ช่วงของค่าองค์ประกอบพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....72

3.6 ค่า L และ C_{ig} ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบไม่มีการอุ่นไส้หลอด…..73

3.7 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในขณะจุดหลอดสำหรับ V_{DC}=230V…….77

3.8 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในขณะจุดหลอดสำหรับ V_{DC}=280V…….77

3.9 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในขณะจุดหลอดสำหรับ V_{DC}=290V…….78

3.10ช่วง f_{ph} และ V_{ph} ที่กระแส I_{ph} = 600mA$_{peak}$ ในช่วง L และ C_{ig} ที่ต้องการ……82

3.11 ช่วง f_{ig} ที่ V_{ig} = 600V$_{peak}$ ในช่วง L และ C_{ig} ที่ต้องการ……..83

3.12 ค่า L, C_{ig}, f_{ph}, และ f_{ig} สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ค่า……....83

3.13 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการ…….86
จุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สำหรับ V_{DC} =230V

3.14 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการ……..87
จุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สำหรับ V_{DC} =280V

3.15 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการ……..87
จุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สำหรับ V_{DC} =350V

3.16 ค่า L และ C_{ig} ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบไม่มีการอุ่นไส้หลอด…89

3.17 ค่า L, C_{ig} และ C_{ph} สำหรับแรงดันไฟตรง 3 ค่า……..92

3.18 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการ……..95
จุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด สำหรับ V_{DC} =230V

3.19 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการ……..96
จุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด สำหรับ V_{DC} =280V

3.20 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการ……..96
จุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด สำหรับ V_{DC} =350V

4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะทำงานปกติสำหรับ….100
V_{DC}=230V

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะทำงานปกติสำหรับ……100
V_{DC}=280V
4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะทำงานปกติสำหรับ……101
V_{DC}=350V
4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะจุดหลอดที่ V_{DC}=230V...104
4.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะจุดหลอดที่ V_{DC}=280V...104
4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะจุดหลอดที่ V_{DC}=350V...105
4.7 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุม……...108
ด้วยความถี่ที่ V_{DC}=230V
4.9 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุม……...108
ด้วยความถี่ที่ V_{DC}=280V
4.10 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุม…….109
ด้วยความถี่ที่ V_{DC}=350V
4.11 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุม…….112
ด้วยวงจรโหลดที่ V_{DC}=230V
4.12 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุม…….112
ด้วยวงจรโหลดที่ V_{DC}=230V
4.13 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุม…….113
ด้วยวงจรโหลดที่ V_{DC}=230V

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์……6
2.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์……8
2.3 คุณสมบัติด้านไฟตรงของแรงดันคร่อมหลอดกับกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……...9
2.4 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอด ……...9
2.5 คุณสมบัติ V-I ของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อเปลี่ยนความถี่การทำงาน……..10
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์……...11
2.7 แบบจำลองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงทำงานปกติ ……...12
2.8 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ตเตอร์...13
2.9 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์……15
2.10 โครงสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการออกแบบวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์……...16
2.11 โครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน……....17
2.12 แรงดัน V_{DC} ของโครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้วงจรแก้ตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน…...17
2.13 โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน……18
2.14 แรงดัน V_{DC} ของโครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน……..18
2.15 โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน……19
2.16 แรงดัน V_{DC} ของโครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน…..19
2.17 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……...20
2.18 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบ……....21
2.19 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ช่วงทำงานปกติ ……22
2.20 ความสัมพันธ์ของ Z_T กับ ω_n และ Q_L ……25
2.21 ความสัมพันธ์ของ θ_{RUN} กับ ω_n และ Q_L ……25
2.22 ความสัมพันธ์ของ V_{lamp}/V_S กับ ω_n และ Q_L ……27
2.23 ความสัมพันธ์ของ $I_L Z_O/V_S$ กับ ω_n และ Q_L ……....28
2.24 วงจรสมมูลช่วงจุดหลอดของบัลลาสต์ Instant Start ……..30
2.25 ความสัมพันธ์ของ $|Z_{ig}|/Z_S$ กับ ω_{nig} และ Q_{Sig} ……33
2.26 ความสัมพันธ์ของ θ_{ig} กับ ω_{nig} และ Q_{Sig} ……..33
2.27 ความสัมพันธ์ของ V_{ig}/V_S กับ ω_{nig} และ Q_{Sig} ……...34
2.28 ความสัมพันธ์ของ $I_{ig}Z_O/V_S$ กับ ω_{nig} และ Q_{Sig} ……35

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.29 วงจรสมมูลช่วงการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ……36
2.30 ความสัมพันธ์ของ $|Z_{ph}|/Z_S$ กับ ω_{nph} และ Q_{Sph} ……38
2.31 ความสัมพันธ์ของ θ_{ph} กับ ω_{nph} และ Q_{Sph} ……...38
2.32 ความสัมพันธ์ของ V_{ph}/V_S กับ ω_{nph} และ Q_{Sph} ……..40
2.33 ความสัมพันธ์ของ $I_{ph}Z_O/V_S$ กับ ω_{nph} และ Q_{Sph} ……41
2.34 วงจรสมมูลช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……41
2.35 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบที่ 1 ……42
2.36 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบที่ 2 ……42
2.37 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบที่ 3 ……42
2.38 คุณสมบัติความต้านทานของ PTC thermistor กับอุณหภูมิ ……43
2.39 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ……45
2.40 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ……..46
2.41 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีเปลี่ยนเป็นอนุกรม ……46
2.42 ความสัมพันธ์ของ $|Z_{phL}|/Z_{OL}$ กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL} ……49
2.43 ความสัมพันธ์ของ θ_{phL} กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL} ……49
2.44 ความสัมพันธ์ของ V_{phL}/V_S กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL} ……..50
2.45 ความสัมพันธ์ของ $I_{phL}Z_{OL}/V_S$ กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL} ……..51
2.46 วงจรสมมูลช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……..52
3.1 ความสัมพันธ์ของ L และ Cig ที่ทำให้หลอดมีกำลังด้านออกเท่ากับพิกัด ……..54
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ที่ทำให้ได้ขีดจำกัดตามที่กำหนด ……..56
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่าง ๆ ของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ กับ C_{ig} ……56
3.4 ความสัมพันธ์ความถี่ปทัสถานกับ C_{ig} ที่ L เปลี่ยนและ V_{DC} 3 ค่า ……57
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_L กับ C_{ig} ……..58
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ_{RUN} กับ C_{ig} ……..58
3.7 แรงดันจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เทียบกับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3ค่า ……..59
3.8 กระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เทียบกับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3ค่า ……..59
3.9 มุมเฟสของกระแสจุดหลอดกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ……60
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_{Sig} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า……..58

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ที่พิจารณา I_{fh} ในการออกแบบ.....61
3.12 กระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....63
3.13 แรงดันด้านออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์.....63
3.14 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์.....63
3.15 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดช่วงทำงานปกติกรณี V_S เป็นไซน์.....64
3.16 กระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....64
3.17 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....65
3.18 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม 65
3.19 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้ช่วงทำงานปกติ กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....65
3.20 แรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....66
3.21 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์.....66
3.22 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์.....67
3.23 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดช่วงทำงานปกติกรณี V_S เป็นไซน์.....67
3.24 แรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....67
3.25 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....68
3.26 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....68
3.27 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดช่วงทำงานปกติกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....68
3.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} เมื่อพิจารณาแรงดันวงจรเปิดเท่ากับ 800 V_{peak}.....71
3.29 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....73
3.30 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์.....74
3.31 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์.....74
3.32 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ กรณี V_S เป็นไซน์.....74
3.33 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....75
3.34 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....75
3.35 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....75
3.36 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....76
3.37 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....76
3.38 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....76

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} เมื่อลดความถี่การทำงานเป็น $0.8f_{rated}$ 79
3.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ที่พิจารณา I_{fh} ในการออกแบบ 80
3.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_{ph} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า เมื่อ I_{fh} เท่ากับ $600mA_{peak}$ 81
3.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ph} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า เมื่อ I_{fh} เท่ากับ $600mA_{peak}$ 81
3.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_{ig} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า เมื่อ V_{ig} เท่ากับ $600V_{peak}$ 82
3.44 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....84
3.45 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....84
3.46 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....84
3.47 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....85
3 48 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....85
3.49 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์.....85
3.50 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....86
3.51 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....86
3.52 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบควบคุมด้วยวงจรโหลด 88
3.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ที่พิจารณา I_{fh} ในการออกแบบ 88
3.54 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ig} กับ C_{ph} สำหรับ V_{DC} 3 ค่า 90
3.55 ความสัมพันธ์ของพลังงานและความต้านทานของ PTC thermister 91
3.56 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ph} และ V_{ph} กับ C_{ig} 91
3.57 กระแสอุ่นไส้และแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์.....92
3.58 กระแสอุ่นไส้และแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....93
3.59 แรงดันจุดหลอดและกระแสโหลดช่วงจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์.....93
3.60 แรงดันตกคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์.....93
3.61 กระแสอุ่นไส้และแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....94
3.62 กระแสอุ่นไส้และแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....94
3.63 แรงดันจุดหลอดและกระแสโหลดช่วงจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....94
3.64 แรงดันตกคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม.....95
4.1 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ 98
4.2 แรงดันคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ 98

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า
4.3 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดช่วงทำงานปกติ ……98
4.4 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานปกติ..... ……..99
4.5 แรงดันคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะทำงานปกติ…….……99
4.6 แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์และกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ ……...99
4.7 แรงดันจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……...102
4.8 กระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……....102
4.9 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงจุดหลอด……....102
4.10 แรงดันคร่อมขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงจุดหลอด…….....103
4.11 แรงดัน V_{ig} และ I_{ig} ช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……...103
4.12 มุมเฟสของ V_S และ I_{ig} ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง ……103
4.13 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด ……...105
4.14 มุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอด ……106
4.15 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……...106
4.16 แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด และทำงานปกติ...……106
ในช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอด
4.17 กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด และทำงานปกติ...…….....107
ในช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอด
4.18 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ …….....107
4.19 แรงดันคร่อมขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงจุดหลอด…….....107
4.20 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด ……110
4.21 มุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอด ……..110
4.22 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ……110
4.23 แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด และทำงานปกติ...……111
ในช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอด
4.24 กระแสออกของออินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด และทำงานปกติ...…….....111
ในช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอด
4.25 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ …….....111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

การพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าไปมาก ทำให้ความเป็นอยู่ของมนุษย์มีความสะดวกสบายขึ้นมาเป็นลำดับ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ทรัพยากรของโลกร่อยหรอลงไปและเกิดปัญหาด้านมลภาวะขึ้นด้วย ทรัพยากรที่สำคัญอันหนึ่งที่เป็นสิ่งอำนวยต่อความสะดวกสบายของมนุษย์คือ พลังงาน (energy) การพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้ทำให้การใช้พลังงานของมวลมนุษย์เพิ่มขึ้นเป็นอันมาก จนทำให้เป็นที่เกรงกันว่าจะเกิดการขาดแคลนพลังงานในอนาคต เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้เพื่อแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ และขณะเดียวกันก็ต้องประหยัดและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานด้วย พลังงานส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปในโรงงานอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง ตลอดจนเครื่องอำนวยความสะดวกในบ้าน การพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลและเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ นับเป็นสิ่งที่ได้กระทำกันมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ อุปกรณ์ให้แสงสว่างที่มีใช้กันทั่วไป ก็เป็นสิ่งหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาโดยตลอด การใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp) แทนหลอดแบบเผาไส้ (incandescent lamp) ทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 3-5 เท่า ในขณะที่ได้รับแสงสว่างเท่ากัน และในปัจจุบันเกือบร้อยละ 80 (J.R Coaton and A.M. Marsden, 1990) ของแหล่งกำเนิดแสงสว่างได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพราะหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพทางด้านการส่องสว่างสูง แสงนิ่มนวล มีสีให้เลือกมาก และอายุการใช้งานนาน

อย่างไรก็ตามหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อนำไปใช้งานจะมีส่วนประกอบของวงจรเพิ่มเติมทำให้ยุ่งยากในการติดตั้งกว่าหลอดแบบเผาไส้ เพราะหลอดฟลูออเรสเซนต์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) โดยก่อนจุดหลอดจะมีความต้านทานเป็นอนันต์ (infinite resistance) และมีความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ (negative dynamics resistance) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันที่สูงเพียงพอเพื่อจุดหลอดให้ติดสว่าง และต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแส (current source) ในภาวะการทำงานปกติ เพื่อให้การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพ (stability) ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำได้โดยใช้อิมพีแดนซ์ (impedance) ที่มีค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source)

อันเป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสูงขึ้น จึงมีลักษณะสมบัติค่อนไปทางด้านแหล่งจ่ายกระแส อิมพีแดนซ์ที่นำมาต่ออนุกรมเรียกว่า บัลลาสต์ (Ballast)

บัลลาสต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์มาเป็นเวลานานนั้น เป็นตัวเหนี่ยวนำแบบขดลวดพันบนแกนเหล็กที่มีขนาด 1-2 เฮนรี (henry) บัลลาสต์ดังกล่าวยังคงมีกำลังสูญเสียไม่น้อยเนื่องจากมีความต้านทานในขดลวดบัลลาสต์และความนำไฟฟ้าในแกนของบัลลาสต์ การลดกำลังสูญเสียของบัลลาสต์สามารถทำได้ แต่จะทำให้ ขนาด น้ำหนัก และราคาของบัลลาสต์เพิ่มขึ้น ปัจจุบันมีการลดกำลังสูญเสียบัลลาสต์แบบนี้โดยใช้แกนเหล็กที่มีกำลังสูญเสียต่ำและออกแบบให้เหมาะสมจึงสามารถลดกำลังสูญเสียลงได้ประมาณ 4-6 วัตต์ เรียกบัลลาสต์ชนิดนี้ว่าบัลลาสต์ แกนเหล็กกำลังสูญเสียต่ำ (low-loss magnetic ballast) การลดการสูญเสียของบัลลาสต์ทำได้อีกวิธีคือ การลดขนาดตัวเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มความถี่การทำงานของแหล่งจ่าย การเพิ่มความถี่การทำงานแหล่งจ่ายจะต้องมีวงจรเพิ่มเติมคือวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) และวงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter circuit) ซึ่งวงจรเหล่านี้ก็มีกำลังสูญเสียเช่นกัน ดังนั้นการออกแบบวงจรดัง-กล่าวจึงต้องให้กำลังสูญเสียรวมน้อยกว่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในบัลลาสต์แกนเหล็กทำงานที่ความถี่สายกำลัง วงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการออกแบบอย่างเหมาะสมจะมีประ-สิทธิภาพประมาณร้อยละ 95 การลดกำลังสูญเสียโดยอาศัยการเพิ่มความถี่ของแหล่งจ่ายมีผลดี 2 ประการคือ ลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เช่นเดียวกับบัลลาสต์แกนเหล็ก และเพิ่มประสิทธิ-ภาพการส่องสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นประมาณร้อยละ 10 (ยุทธนา กุลวิทิต และ เจิดกุล โสภาวนิตย์, 2535)

เราเรียกอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเพื่อจ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่มีส่วนประกอบ คือ วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ และวงจรจุดหลอด (ignition circuit) ทำหน้าที่แทนบัลลาสต์แกนเหล็กนี้ว่า “บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic ballast) ”

การวิจัยและพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันมีหลายแนวทาง เช่น การปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้านเข้า (Wood P.N., 1998; de Oliveira Brioschi R. and Vieira J.L.F., 1998; Moo C.S. and others., 1998), การออกแบบและวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ (Thomas J. Ribarich and John J. Ribarich, 1997, 1998, 1999; Urs Mader, 1993), การออกแบบวงจรจุดหลอด ฟลูออเรส-เซนต์ (Hammer E.E., 1988, 1989, 1990, 1997, 1998, 1999), การป้องกันสิ่งผิดปกติที่มีผลเสียกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Hammer E.E., 1988, 1989), การหรี่แสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Moo C.S., and others., 1999), และการลดความเค้นที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์(Wei chen and others., 1996) งานวิจัยเหล่านั้นส่วนใหญ่เป็นการวิจัยในแต่ละส่วนแยกกัน แต่จากการศึกษาพฤติกรรมของ

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรส่วนต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีความสัมพันธ์กัน การออกแบบที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาความเหมาะสมทั้งระบบสำหรับเงื่อนไขที่กำหนด

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและกำหนดเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีกำลังที่พิกัดตามที่กำหนดโดยมีการจุดหลอดอย่างเหมาะสมเพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีอายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากพฤติกรรมช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันด้านเข้า วงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ และวิธีการจุดหลอด ดังนั้นการออกแบบวงจรจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์จึงต้องมีการคำนึงถึงความสัมพันธ์ของวงจรจุดหลอดกับวงจรภาคอื่น ๆ ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยควรพิจารณาความเหมาะสมของการออกแบบทั้งระบบให้มีความเหมาะสมที่สุด

การออกแบบจะแบ่งชนิดการออกแบบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ในมาตราฐานอุตสาหกรรม IEC 929(Internation Electrotechnical Commission, 1990) และ ANSI C82.11(American National Stansdard Institute, 1993) ซึ่งมีการจุดหลอด 2 ลักษณะ คือ

- การจุดหลอดแบบไม่มีการอุ่นไส้ก่อน (Non-preheating ignition)
- การจุดหลอดแบบมีการอุ่นไส้ก่อน (Preheating ignition)

จากลักษณะการจุดหลอดดังกล่าวสามารถจำแนกการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างเหมาะสมได้ 3 แบบ คือ

- การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด
- การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ที่ควบคุมด้วยความถี่
- การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ที่ควบคุมด้วยวงจรทางด้านโหลด

1.2 <u>วัตถุประสงค์ของงานวิจัย</u>

1.เพื่อศึกษาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบต่างๆ โดยคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อการจุดหลอด

2.กำหนดเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

กำหนดเกณฑ์การออกแบบ และสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีลักษณะการจุดหลอดตามมาตราฐานอุตสาหกรรม IEC929 หรือ ANSI C82.11

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1.ศึกษาองค์ประกอบที่มีผลต่อการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2. กำหนดแนวทางการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบต่าง ๆ

3. ออกแบบ สร้าง และทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบต่าง ๆ

4.วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลที่ทำการศึกษาทางทฤษฎีกับผลการทดลอง

5.สรุปเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดอย่างแบบต่าง ๆ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.สามารถทราบถึงผลกระทบของวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่ออายุการใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เอง

2.สามารถออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดได้แบบต่าง ๆ โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์กันของวงจรภาคอื่น ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งระบบ

3.ผลการศึกษา วิจัย และพัฒนา สามารถที่จะนำไปใช้ในการพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในเชิงอุตสาหกรรมภายในประเทศได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นและสมการของวงจร

บทนำ

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อทำหน้าที่จุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้ติดสว่าง และควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้มีค่าตามที่กำหนดและมีเสถียรภาพ การเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบจำเป็นต้องเข้าใจการทำงานเบื้องต้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เห็นอิทธิพลของค่าองค์ประกอบแต่ละส่วนของวงจรอย่างชัดเจน ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทฤษฎีพื้นฐานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วิธีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามมาตราฐานอุตสาหกรรมที่ใช้อ้างอิง และหาสมการของวงจรเพื่อใช้ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบในบทต่อไป

2.1 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp)

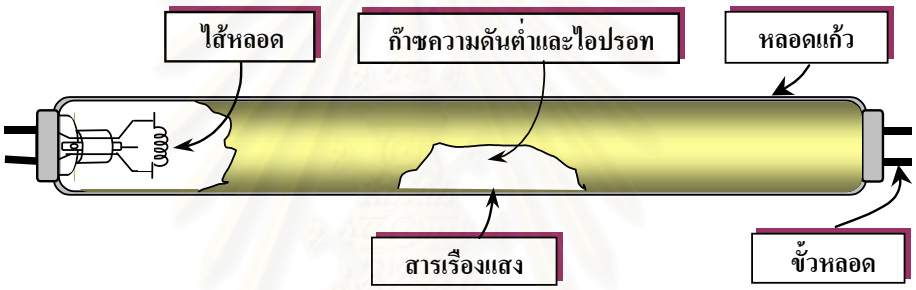
หลอดฟลูออเรสเซนต์คือหลอดดิสชาร์ตไอปรอทความดันต่ำ (low pressure mercury gas discharge lamp) ที่ได้นำเสนอ (J.R. Coaton and A.M.Marden, 1990) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่าง โดยใช้คุณสมบัติของก๊าซความดันต่ำ ไอปรอท และสารเรืองแสง ซึ่งจะแตกต่างจากหลอดแบบเผาไส้ (Incandescent lamp) ที่ใช้กระแสเผาไส้หลอดให้ร้อนเพื่อให้เกิดแสงสว่าง หลอดฟลูออเรสเซนต์มีโครงสร้างและการทำงานดังต่อไปนี้

2.1.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์มีองค์ประกอบหลายอย่างรวมกันเพื่อกำเนิดแสงสว่างที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ประกอบด้วยหลอดแก้วทรงกระบอกยาวภายในเคลือบด้วยสารเรืองแสง ขั้วหลอด ไส้หลอด ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์แต่ละส่วนมีลักษณะและการทำงานได้ดังนี้

2.1.1.1 หลอดแก้วทรงกระบอกยาว (Fluorescent tube)

ตัวหลอดแก้วทรงกระบอกยาวเป็นที่ยึดของอุปกรณ์และห่อหุ้มส่วนประกอบการกำเนิดแสงไว้ภายใน ตัวหลอดทรงกระบอกยาวมีลักษณะเป็นหลอดแก้วที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน มีรหัสบอกลักษณะรูปร่างตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่นตัว T หมายถึงหลอดฟลูออเรสเซนต์พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม และตามด้วยตัวเลขซึ่งแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดที่มีหน่วยเป็นหุน (1/8ของนิ้ว) สามารถเขียนลักษณะของหลอดเป็นรหัสได้ว่า T8 เป็นต้น



รูปที่ 2.1โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.1.1.2 ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Lamp terminal)

ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นส่วนรับพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเข้าภายในหลอดเพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถกำเนิดแสงสว่างได้ ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของหลอด เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอุ่นไส้ (preheat) ต้องการขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในแต่ละข้างของหลอด ดังนั้นขั้วหลอดจึงต้องเป็นชนิด 2 ขั้วด้วย ส่วนหลอดชนิดสลิมไลน์ (slimline)จะต้องการขั้วไฟฟ้าในแต่ละข้างหลอดเพียงขั้วเดียวเท่านั้น (ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช, 2521)

2.1.1.3 ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Filament lamp)

ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นขดลวดทังสเตนที่นำมาขดซ้อน ๆ กันและฉาบด้วยสารชนิดที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากโลหะทังสเตนจะปล่อย

อิเล็กตรอนที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 700 องศาเซลเซียส (Hammer E.E., 1999)

2.1.1.4 ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท (Mercury vapour and gas discharge)

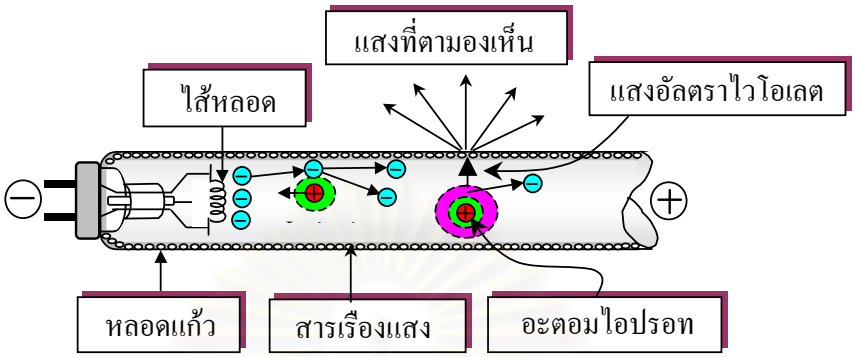
ก๊าซความดันต่ำและไอปรอททำหน้าที่กำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตซึ่งเป็นแสงที่ตามองไม่เห็น เมื่อก๊าซความดันต่ำและไอปรอทถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าก่อนจุดหลอด หลอดฟลูออเรสเซนต์จะยังไม่นำกระแสเนื่องจากปกติแล้วก๊าซความดันต่ำและไอปรอทจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงพอจะเกิดการกระตุ้นให้มีการปล่อยประจุและสามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อก๊าซความดันต่ำและไอปรอทนำกระแสจะมีการปล่อยแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ออกมา แสงสว่างนี้ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แต่จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแสงในช่วงความถี่ที่ตามองเห็นได้ด้วยสารเรืองแสงซึ่งฉาบอยู่ภายในหลอด

2.1.1.2. สารเรืองแสง (Phosphor)

สารเรืองแสงซึ่งฉาบด้านในของตัวหลอดแก้วเป็นสารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเลตให้เป็นแสงที่ตามองเห็น ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของสารที่ใช้ฉาบภายในของหลอด การใช้ส่วนผสมที่แตกต่างกันไปทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีสีสันต่าง ๆ กันได้ เมื่อยังไม่นำกระแสหลอดไฟจะยังคงมีสีขาวอยู่ยกเว้นหลอดชนิดที่ต้องการสีเข้มและหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ให้แสงเหมือนกับหลอดแบบไส้จะไม่เป็นสีขาว

2.1.2 <u>หลักการทำงานเบื้องต้น (Principle operation)</u>

ก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ก๊าซความดันต่ำและไอปรอทภายในหลอดแก้วยังไม่นำกระแสจนกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงที่เพียงพอมากระตุ้นทำให้มีการปล่อยประจุออกมาจึงจะทำให้เริ่มนำกระแสได้และเกิดแสงอัลตราไวโอเลตที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แสงอัลตราไวโอเลตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่ถูกฉาบไว้ภายในผิวหลอดแก้วให้ กำเนิดแสงสว่างที่สามารถมองเห็นออกมา แสดงปรากฏการณ์การกำเนิดแสงสว่างดังกล่าวแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

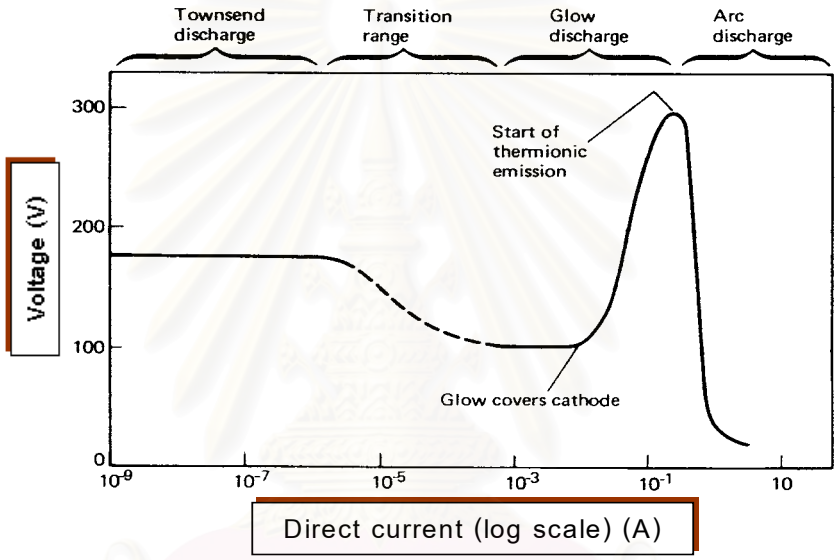
2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Electrical characteristic of fluorescent lamp)

การใช้งานหลอดแบบเผาไส้กำเนิดแสงสว่างสามารถต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง แต่สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องใช้ร่วมกับบัลลาสต์ (Ballast) และสตาร์ตเตอร์ (Starter) เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานได้ ดังนั้นในการออกแบบบัลลาสต์จึงควรทราบคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั้งในขณะก่อนจุดหลอด ขณะจุดหลอด และขณะที่หลอดติดสว่าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถจำแนกตามลักษณะการทำงานได้ 2 แบบ คือ ลักษณะสมบัติก่อนและขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ และลักษณะสมบัติขณะทำงานปกติ โดยอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

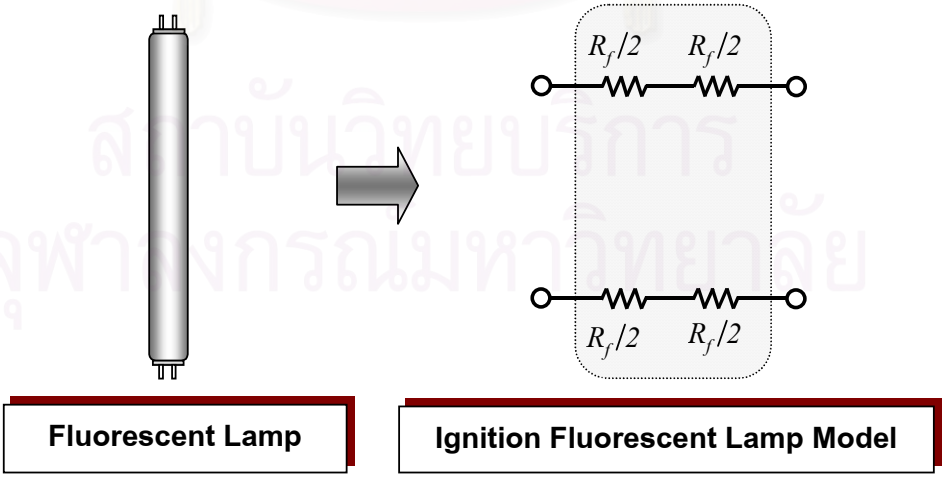
2.1.3.1 ลักษณะสมบัติก่อนและขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์

ก่อนจุดหลอดความต้านทานหลอดมีค่าสูงมากเป็นอนันต์ การจุดหลอดต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อกระตุ้นให้ก๊าซความดันต่ำแตกตัว เกิดประจุที่เป็นภาหะนำกระแสเคลื่อนทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์นำกระแสได้และหลอดติดสว่าง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดหลอดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความยาวของหลอดฟลูออเรสเซนต์ อุณหภูมิของไส้หลอดและอุณหภูมิรอบ ๆ ตัวหลอด เมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์เริ่มติดสว่างความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ลดต่ำลง รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ด้านไฟตรงของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะเห็นว่าในช่วง Townsend discharge และช่วง transition range เป็นช่วงที่ค่าความต้านทานของ

หลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าสูงมาก ต่อมาเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูงแบบทันทีทันใดในช่วง glow discharge อิเล็กตรอนจากไส้หลอดมีการแตกตัว เกิดแสงอัลตราไวโอเลตออกมา เมื่อหลอดติดสว่างแล้วจุดทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะอยู่ในช่วง Arc discharge ที่กำลังด้านออกพิกัด การเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จากค่าต่ำไปสู่จุดทำงานในช่วง Arc discharge แต่แรงดันตกคร่อมหลอดในช่วง glow discharge จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.3 คุณสมบัติด้านไฟตรงของแรงดันคร่อมหลอดกับกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

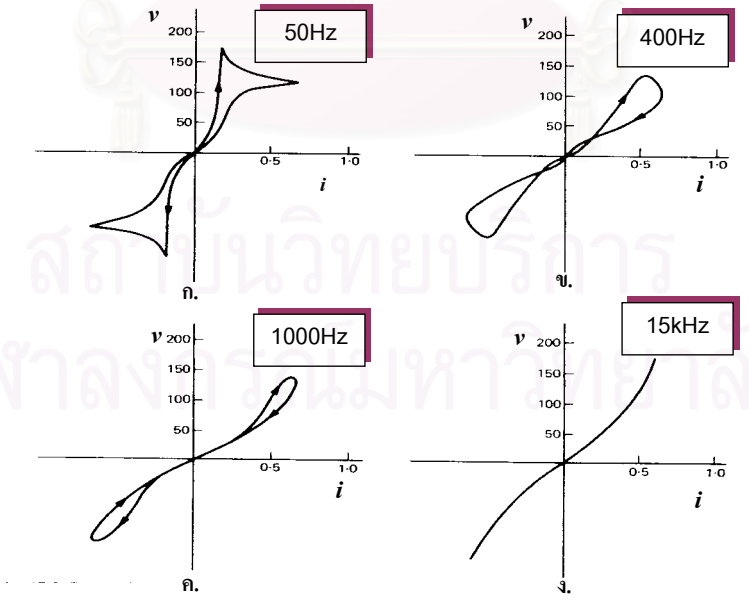


รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอด

จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยให้ความต้านทานหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ และไส้หลอดมีค่าความต้านทานของโลหะทังสเตนของทั้ง 2 ขั้วหลอดฟลูออเรส-เซนต์ดังในรูปที่ 2.4

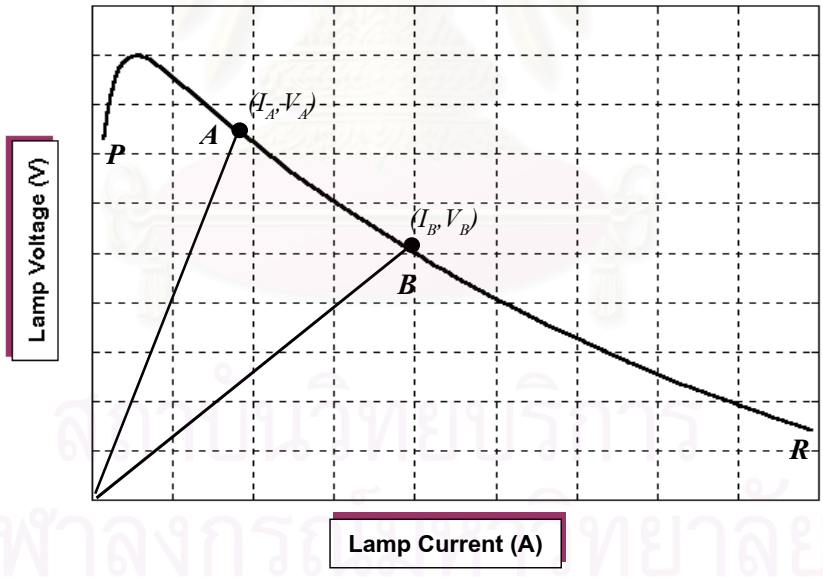
2.13.2 ลักษณะสมบัติขณะทำงานปกติของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วง arc discharge จะมีลักษณะไม่เชิงเส้นและมีค่าความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ หลอดฟลูออ-เรสเซนต์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่าง ๆ กัน มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์แตกต่างกันดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ อิมพีแดนซ์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะเพิ่มและลดไม่เหมือนกันดังรูปที่ 2.5(ก) และเมื่อเพิ่มความถี่การทำงาน ลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะเข้าใกล้ความต้านทานแบบเชิงเส้นมากขึ้นดังในรูปที่ 2.5(ข) – 2.5(ง) เรียงตามลำดับ และที่ความถี่มากกว่า 15 kHz จะมีความไม่เป็นเชิงเส้นเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติ V-I ของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อเปลี่ยนความถี่การทำงาน

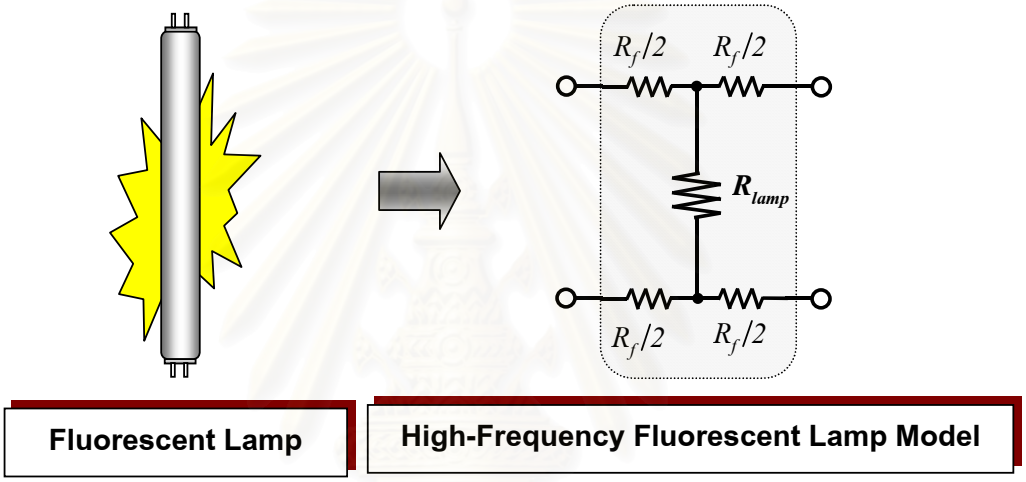
เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงป้อนให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะเกือบเป็นเชิงเส้นที่ค่าความต้านทานสมมูลขึ้นกับความชัน (Slop) ของกราฟ อย่างไรก็ดี ความชันของกราฟของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์จะแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอด รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่กำลังออก 2 ค่า มีค่ายอดของกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่จุด A และ B เมื่อนำค่ายอด (peak value) หรือค่าประสิทธิผล (effective value) ของกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดที่กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ไปเขียนบนกราฟของกระแสและแรงดันจะได้กราฟ PR เส้นกราฟดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดหรือประสิทธิผลของกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดที่กำลังออกค่าต่างๆ กัน ซึ่งเราจะเรียกว่าเส้นหลอด (lamp line) จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันจะเพิ่มขึ้นถ้ากำลังออกของหลอดลดลง เนื่องจากกำลังออกจะเพิ่มตามกระแสที่ผ่าน ดังนั้นแรงดันของหลอดจะลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ลักษณะดังกล่าวจะเป็นลักษณะของอุปกรณ์ที่มีค่าความต้านทานพลวัตเป็นลบ ($dV/di < 0$)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

สำหรับไส้หลอดทังสเตนที่อยู่ทั้งสองข้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ และไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของหลอดฟลูออ-

เรสเซนต์ช่วงทำงานปกติได้โดยสมมุติให้กระแสไหลผ่านฟลูออเรสเซนต์เป็นกระแสที่ออกจากจุดกึ่งกลางของไส้หลอดทำให้สามารถแบ่งความต้านทานไส้หลอดแต่ละข้างเป็นครึ่งหนึ่งดังรูปที่ 2.7 (Mark Sun and Bryce L. Hesterman., 1998) เพื่อให้เป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่หลอดฟลูออเรสเซนต์จริง แต่ในทางปฏิบัติการวัดค่ากำลังออกของหลอดจะวัดได้เฉพาะกระแสผ่านหลอดฟลูออเรส-เซนต์ไม่สามารถวัดแรงดันคร่อมหลอดจริงได้ เพราะต้องวัดแรงดัน ณ จุดที่ต้องรวมแรงดันคร่อมไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วย ซึ่งมีกำลังสูญเสียที่ไส้หลอด ประมาณ 1-2 W

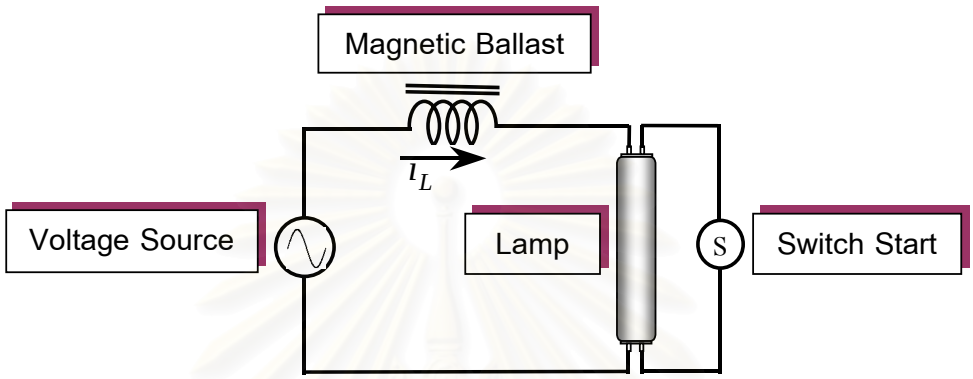


รูปที่ 2.7 แบบจำลองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะทำงานปกติ

2.2 <u>การใช้งานหลอดฟลูออเรสเซนต์กับบัลลาสต์แบบขดลวดพันบนแกนเหล็ก(fluorescent lamp working with Magnetic ballast)</u>

เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งจ่ายกระแส เพื่อให้การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพ การทำให้แหล่งแรงดันมีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งกระแสจะทำได้โดยใช้อิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน อันเป็นผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสูงขึ้น จึงมีลักษณะสมบัติค่อนไปทางด้านแหล่งจ่ายกระแส

โดยทั่วไปจะใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นอิมพีแดนต์ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียในอิมพิแดนซ์มากเกินไป ดังนั้นลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรส-เซนต์จะเป็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ตเตอร์

การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อใช้ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ตเตอร์มีลักษณะดังนี้คือ เมื่อเริ่มป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้วงจรในรูปที่ 2.8 หลอดฟลูออเรสเซนต์จะไม่นำกระแสทันที แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายส่วนใหญ่จะตกคร่อมสตาร์ตเตอร์ ทำให้เกิด glow discharge ขึ้นที่หน้าสัมผัสของสตาร์ตเตอร์ ทำให้หน้าสัมผัสร้อนขึ้นและต่อวงจร เมื่อหน้าสัมผัสของสตาร์ตเตอร์ที่เป็น bimetal ต่อวงจรแรงดันคร่อมสตาร์ตเตอร์จะลดลง glow discharge หยุดและหน้าสัมผัสของสตาร์ตเตอร์จะเย็นลง และตัดวงจรในช่วงที่สตาร์ตเตอร์ตัดวงจร บัลลาสต์แกนเหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันสูงคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ แรงดันนี้เรียกว่าแรงดันจุดหลอด(Striking Voltage, V_{ig}) ถ้า V_{ig} ไม่สูงเพียงพอที่จะจุดหลอดให้ติดสว่าง ขบวนการจุดหลอดจะเริ่มต้นใหม่ แต่ถ้า V_{ig} สูงพอจะทำให้หลอดฟลูออเรสเซนติดสว่าง แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์จะลดต่ำลง ทำให้แรงดันคร่อมสตาร์ตเตอร์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด glow discharge ได้อีก สตาร์ตเตอร์ก็จะเปิดวงจรอย่างนี้ตลอดไป ช่วงทำงานปกติของหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.3 <u>บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic ballast)</u>

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นแหล่งไฟฟ้ากระสลับความถี่สูงจ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อให้หลอดฟลูออเรส-

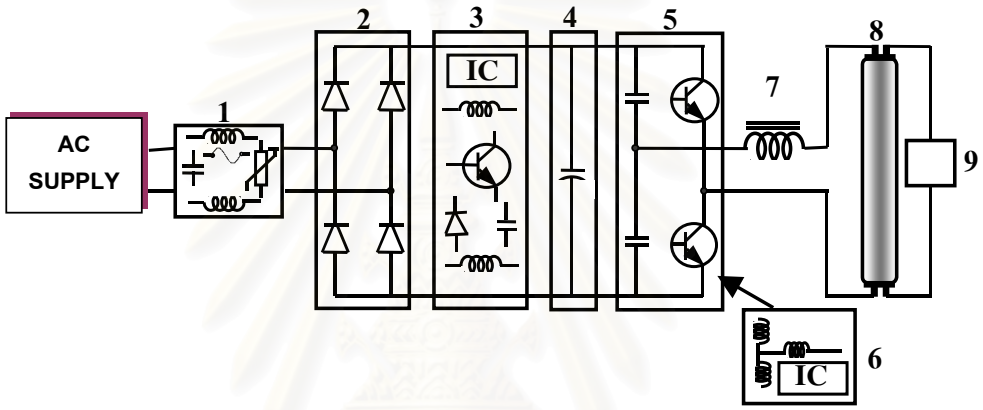
เซนต์ติดสว่างและทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กและมีกำลังสูญเสียต่ำและราคาไม่แพงเกินไปได้ การทำงานที่ความถี่สูงนอกจากสามารถลดกำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นบัลลาสต์แล้ว ยังทำให้ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สูงขึ้นตามความถี่การทำงานได้อีกด้วย

การให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานที่ความถี่สูง ถึงแม้จะช่วยลดกำลังสูญเสียในบัลลาสต์และลดกำลังด้านเข้าของหลอดลงได้ก็จริง แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานโดยทั่วไปจะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50Hz หรือไม่ก็เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้คอน-เวอร์เตอร์ (Converter) ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงขึ้นที่เรียกว่าอินเวอร์เตอร์ (inverter) การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นในคอนเวอร์เตอร์เอง และเพื่อให้สามารถลดกำลังสูญเสียรวมของระบบลงได้ ตัวคอนเวอร์เตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูง

2.3.1 <u>โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์(Construction of Electronic ballast)</u>

โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจรกรองสัญญาณรบกวน (EMI and RFI filter circuit) มีหน้าที่ กรองสัญญาณรบกวน EMI และ RFI จากภายนอกมารบกวนบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และจากภายในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ไปรบกวนอุปกรณ์ภายนอกโดยสายส่ง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier circuit) มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor correction circuit) มีหน้าที่เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังและลดฮาร์มอนิกด้านเข้าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองแรงดัน (Voltage filter circuit) มีหน้าที่ ลดการกระเพื่อมของแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit) มีหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันโดยทั่วไปจะใช้สวิตช์ไวงานเป็นทรานซิสเตอร์ (*BJT* หรือ *FET*) ทำงานแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ (Zero voltage resonant switching, *ZVS*) แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ วัฏจักรงานร้อยละ 50 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ (Drive circuit) มีหน้าที่ สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ซึ่งปัจจุบันมีอยู่ 2 แบบ คือ ใช้วงจรประมวลสร้างสัญญาณ และอาศัยการป้อนกลับของ

กระแสด้านโหลดผ่านหม้อแปลงที่มีการอิ่มตัว ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) มีหน้าที่ เป็นส่วนประกอบของปรากฏการณ์เรโซแนนซ์สร้างแรงดันจุดหลอด และควบคุมกระแสผ่านหลอดขณะทำงานปกติ วงจรจุดหลอด (Ignition circuit) มีหน้าที่ เป็นส่วนประกอบของปรากฏการณ์เรโซแนนซ์สร้างแรง-ดันจุดหลอด และเป็นทางผ่านของกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ ส่วนใหญ่วงจรจุดหลอดจะมีคุณสมบัติค่อนไปทางตัวเก็บประจุไฟฟ้า และหลอดฟลูออเรสเซนต์ มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.9

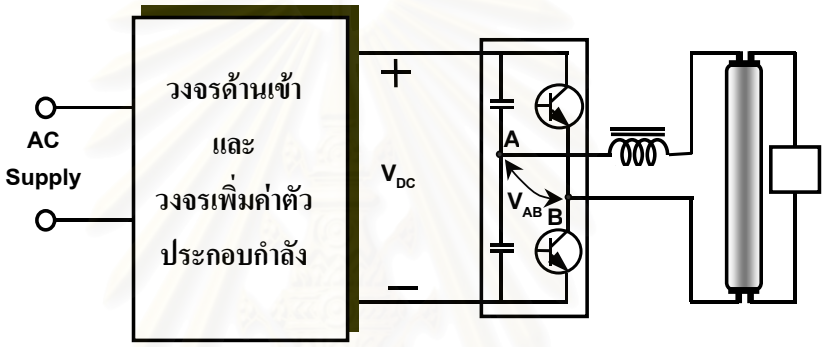


1. วงจรกรองสัญญาณรบกวน(EMI filter)
2. วงจรเรียงกระแส(Rectifier circuit)
3. วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง(PFC circuit)
4. วงจรกรองแรงดันไฟตรง(Voltage filter)
5. วงจรอินเวอร์เตอร์(Inverter circuit)
6. วงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์(Drive signal circuit)
7. ตัวเหนี่ยวนำจำกัดกระแส(inductor)
8. หลอดฟลูออเรสเซนต์(fluorescent lamp)
9. วงจรจุดหลอด(Ignition circuit)

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากพฤติกรรมช่วงก่อนจุดหลอด ขณะจุดหลอด และขณะหลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานปกติ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันด้านเข้า วงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ และวิธีการจุดหลอด ดังนั้นการออกแบบวงจรจุดหลอดจึงต้องมีการคำนึงถึงความสัมพันธ์ของวงจรจุดหลอดกับวงจรภาคอื่น ๆ ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งระบบ จากโครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาวงจรจุดหลอดเข้าร่วมกับวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ จะเห็นว่าการพิจารณาพารามิเตอร์ของการออกแบบค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เรา

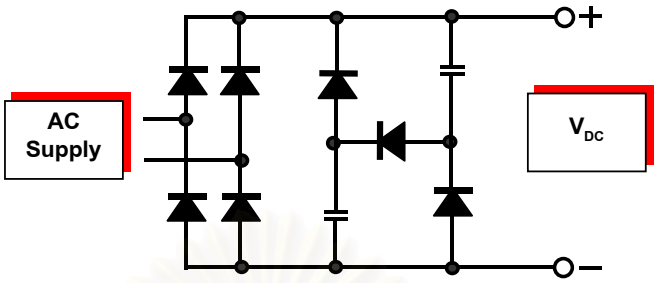
ต้องการทราบเพียงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า (DC bus Voltage, V_{DC}) ที่ป้อนให้แก่อินเวอร์เตอร์เท่านั้น ดังนั้นวงจรในส่วนหน้า (front end part) จะไม่มีการพิจารณาละเอียด แสดงวงจรได้ดังรูปที่ 2.10 สำหรับ V_{DC} จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวงจรด้านเข้า และโครงสร้างวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ในวิทยานิพนธ์พิจารณา 3 โครงสร้างหลักเพื่อให้ได้ V_{DC} ในการออกแบบ 3 ค่า คือ โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน และโครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน สามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้



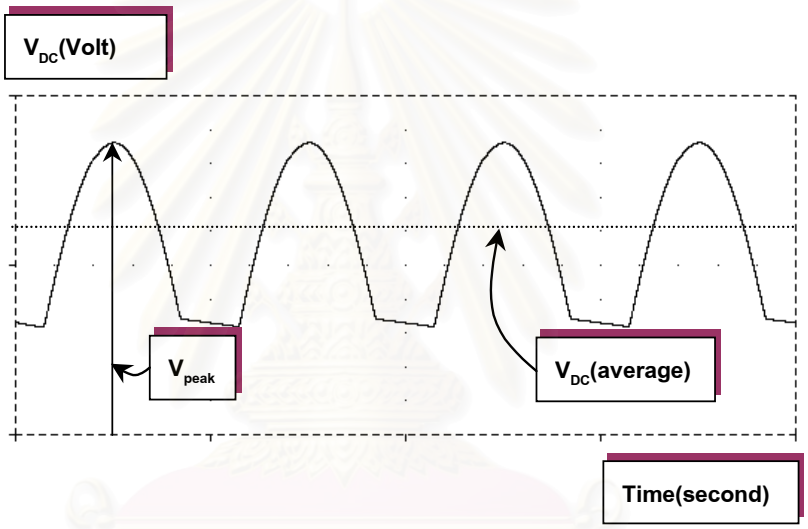
รูปที่ 2.10 โครงสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการออกแบบวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์

2.3.1.1 โครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน

โครงสร้างของวงจรด้านเข้าแบบนี้เป็นประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน (passive PFC) ชนิด Ripple and Valley (International rectifier Co.,LTD, 1999) เป็นวงจรให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และราคาถูก จะใช้ตัวเก็บประจุ 2 ตัว และไดโอด 3 ตัว ดังรูปที่ 2.11 ที่ทำงานทีละครึ่งคาบเวลาของวงจรเรียงกระแส ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะถูกประจุให้มีแรงดันเท่ากับครึ่งเท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันออกของวงจรได้ดังรูปที่ 2.12 จากรูปที่ 2.12 ค่าเฉลี่ยของ V_{DC} มีค่าเท่ากับ 230V เป็นแรงดันที่นำไปใช้ในการออกแบบ



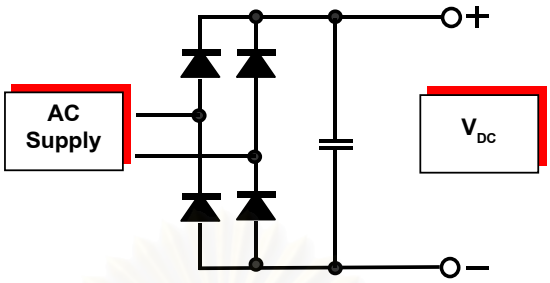
รูปที่ 2.11 โครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน



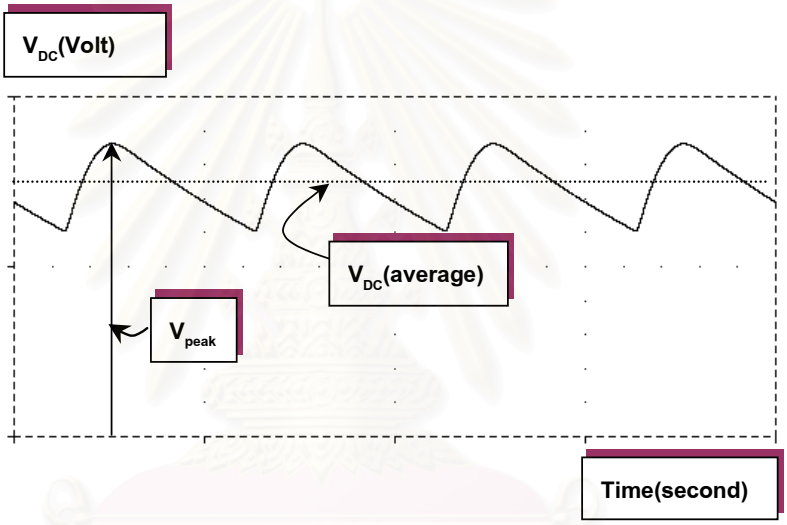
รูปที่ 2.12 แรงดัน V_{DC} ของโครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน

2.3.1.2 โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน

โครงสร้างวงจรด้านเข้าแบบนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันที่ใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดันดังรูปที่ 2.13 และแรงดันออกจากวงจรนี้จะเป็นดังรูปที่ 2.14 จากรูป V_{DC} มีค่าเท่ากับ 280V นำไปใช้ในการออกแบบ



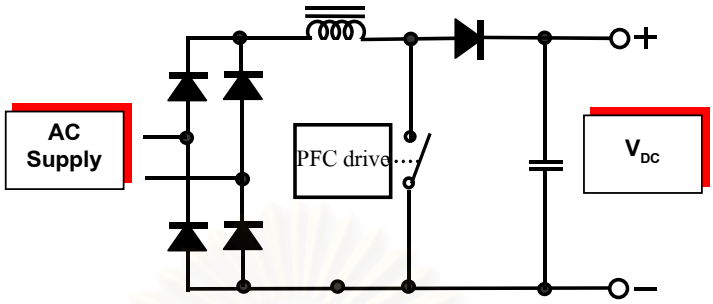
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน



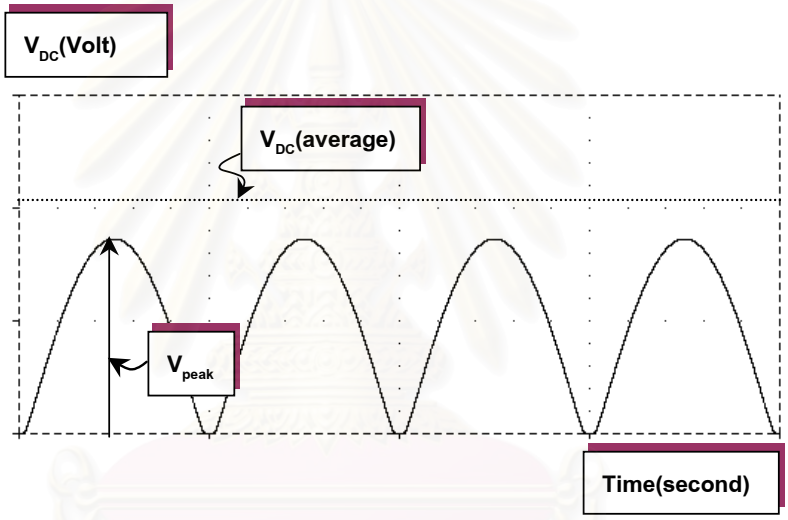
รูปที่ 2.14 แรงดัน V_{DC} ของโครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน

2.3.1.3 โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรเพิ่มตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

โครงสร้างของวงจรด้านเข้าแบบนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน (active PFC) ดังรูปที่ 2.15 วงจรนี้จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงกว่าค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ภายในวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังจะเป็นโครงสร้างวงจรทบระดับ (Boost Topology) อาจจะทำงานที่ความถี่สูงคงที่ ในโมดกระแสต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง แสดงแรงดันออกของวงจรโครงนี้ดังรูปที่ 2.16 เฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) มีค่าเท่ากับ 350V นำไปใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของวงจรด้านเข้าที่ใช้ร่วมกับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

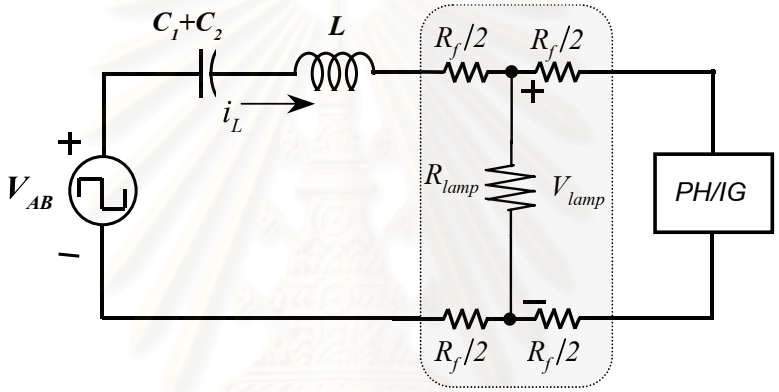


รูปที่ 2.16 แรงดัน V_{DC} ของโครงสร้างวงจรด้านเข้าที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

จากลักษณะของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่มีลักษณะแตกต่างกัน 3 แบบ จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ค่า ดังนั้นการออกแบบภาคอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะออกแบบวงจรโดยให้วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันไฟตรงพิกัด 3 ค่า โดยต้องออกแบบให้หลอดมีกำลังออกเท่ากับพิกัดก่อน จากนั้นจึงออกแบบวงจรจุดหลอดสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดตามเงื่อนไขการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่กำหนดต่อไป

2.3.2 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร

จากรูปที่ 2.10 สามารถเขียนวงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซ-แนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนานได้ ดังรูปที่ 2.17 โดยที่ V_{AB} คือแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ C_1 และ C_2 คือตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ L คือตัวเหนี่ยวนำควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ R_f คือความต้านทานไส้หลอด R_{lamp} คือความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และ PH/IG คือวงจรจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

V_{AB} ซึ่งเป็นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่มีค่า ณ เวลาต่าง ๆ กันดังในสมการที่ 2.1 สามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$V_{AB} = \begin{cases} \frac{V_{DC}}{2}, & 0 \le t \le \frac{\pi}{\omega} \\ -\frac{V_{DC}}{2}, & \frac{\pi}{\omega} \le t \le \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \qquad (2.1)$$

$$V_S(t) = \frac{V_{DC}}{2}\left\{\frac{4}{\pi}\sum_{n=odd}^{\infty}\frac{\sin n\omega t}{n}\right\} \qquad (2.2)$$

$$= \sum_{n=odd}^{\infty} V_{sn} \sin n\omega t \qquad (2.3)$$

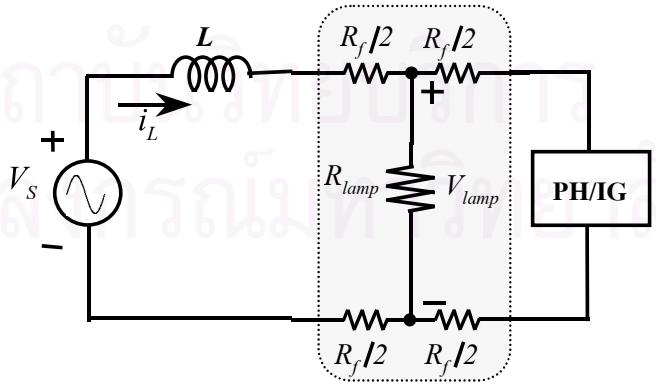
เมื่อ ω คือความถี่การสวิตช์

V_{DC} คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

เนื่องจากวงจรโหลดมีการต่อในลักษณะเป็นวงจรผ่านต่ำอันดับสอง (Second order low-pass filter) และมีความถี่การทำงานของวงจรอยู่รอบ ๆ ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamp natural frequency, f_O)ทำให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดมีรูปคลื่นใกล้ไซน์ความถี่หลักมูล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรจึงอาจจะวิเคราะห์โดยใช้แรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์แทนรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

- ละเลยการสูญเสียในสวิตช์ไวงาน
- ละเลย Reverse recovery ของ ไดโอด
- ถือว่าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีค่าสูงทำให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงด้านเข้ามีน้อย
- ค่า Q_L มีค่าสูงเพียงพอ ที่จะทำให้สามารถละเลยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

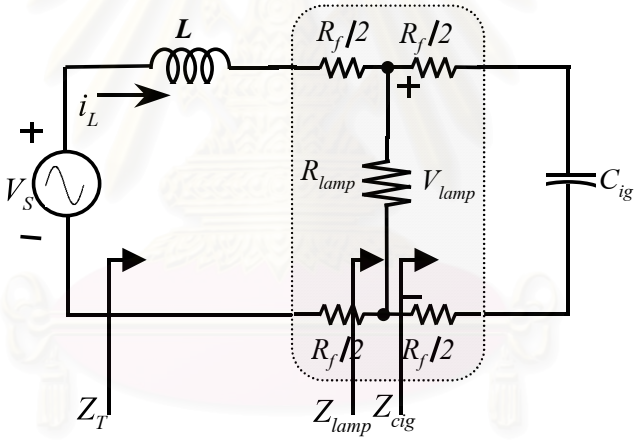
ได้วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังรูปที่ 2.18 โดยที่ V_S คือแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาดเท่ากับองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบ

2.4 พิกัดกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์และสมการของวงจรโหลด

การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงสำหรับจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้ผลจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับวงจรจุดหลอดซึ่งส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ ดังนั้นขณะจุดหลอดวงจรจุดหลอดในที่ 2.18 จะเป็นตัวเก็บประจุจุดหลอด (Ignition Capacitor, C_{ig}) ทำหน้าที่ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงสำหรับจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้ติดสว่าง และเป็นทางผ่านของกระแสอุ่นไส้ขณะทำงานปกติ (filament heating cuurent, I_{fh}) เพื่อให้ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีอุณหภูมิเพียงพอในการปล่อยประจุผ่านหลอด จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถเขียนวงจรสมมูลสำหรับการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดังรูปที่ 2.19 จากวงจรดังกล่าวสามารถคำนวณหาสมการที่ใช้ในการออกแบบในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ช่วงทำงานปกติ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.19 สามารถคำนวณสมการที่ใช้ในการออกแบบได้ ซึ่งประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ (load impedance, Z_T) มุมเฟสของกระแสออกเทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ (Load angle, θ_{RUN}) กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ (Load current, I_L) กระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ (Filament heating current, I_{fh}) ฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{lamp} กับ V_S ฟังก์ชันโอนย้ายของ I_L กับ $\mathbf{V_S}$ สมการความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง และค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลด (Load quality factor, Q_L) ตามลำดับ โดยสามารถทำให้เป็นปทัสถานด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้ คือ

- ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (undamp natural frequency)

$$\omega_O = \frac{1}{\sqrt{LC_{ig}}} \tag{2.4}$$

- ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency)

$$\omega_r = \omega_O \sqrt{1 - \frac{1}{Q_L}} \tag{2.5}$$

- ความถี่ปทัสถาน (normalized frequency)

$$\omega_n = \frac{\omega}{\omega_O} \tag{2.6}$$

- อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance)

$$Z_O = \omega_O L = \frac{1}{\omega_O C_{ig}} = \sqrt{\frac{L}{C_{ig}}} \tag{2.7}$$

- ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Load quality factor)

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{L + \left(2R_{lamp} + R_f\right)R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \times \omega_O \cong \frac{1}{Q_P} + \frac{1}{Q_S} \tag{2.8}$$

เมื่อ

$$Q_P = \frac{R_{lamp} + R_f}{\sqrt{L/C_{ig}}} \tag{2.9}$$

$$Q_S = \frac{\sqrt{L/C_{ig}}}{2R_f} \tag{2.10}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 2.4 – 2.10 สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรโหลดได้ดังสมการที่ 2.11 – 2.16 โดยที่ สมการที่ 2.11 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจุดหลอด สมการที่ 2.12 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของความต้านทานหลอดขนานกับอิมพีแดนซ์ของวงจรจุดหลอด และสมการที่ 2.13 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ทั้งหมด และมุมต่างเฟสของกระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ 2.16

$$Z_{cig} = \frac{1 + j\omega R_f C_{ig}}{j\omega C_{ig}} = \sqrt{\frac{1 + \left(\omega R_f C_{ig}\right)^2}{\left(\omega C_{ig}\right)^2}} \tag{2.11}$$

$$Z_{lamp} = \frac{R_{lamp}\left(1 + j\omega R_f C_{ig}\right)}{1 + j\omega\left(R_{lamp} + R_f\right)C_{ig}} = R_{lamp}\sqrt{\frac{1 + \left(\omega R_f C_{ig}\right)^2}{1 + \left[\omega C_{ig}\left(R_{lamp} + R_f\right)\right]^2}} \tag{2.12}$$

$$Z_T(j\omega) = \frac{1 - LC_{ig}\omega^2 + j\omega\left[\dfrac{L + \left(2R_{lamp} + R_f\right)R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f}\right]}{\dfrac{1}{R_{lamp} + R_f} + j\omega C_{ig}} \tag{2.13}$$

$$= \frac{Z_O\left[1 - \omega_n^2 + j\dfrac{\omega_n}{Q_L}\right]}{\dfrac{Z_O}{R_{lamp} + R_f} + j\omega_n} = |Z|e^{j\theta_{RUN}} \tag{2.14}$$

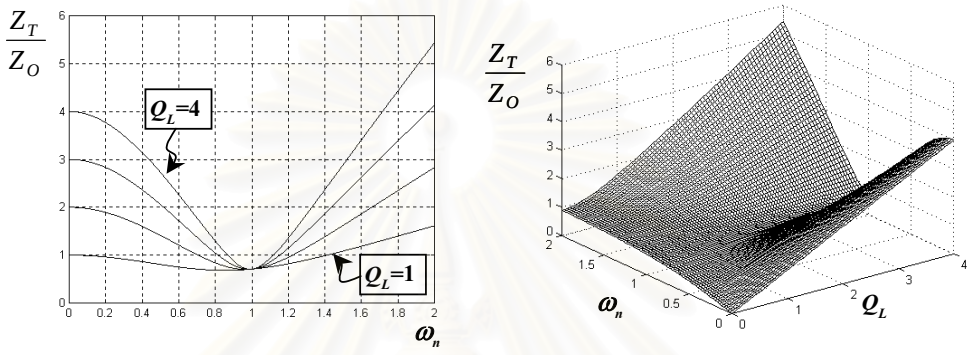
เมื่อ

$$\frac{|Z_T|}{Z_O} = \sqrt{\frac{\left[1 - \omega_n^2\right]^2 + \left[\dfrac{\omega_n}{Q_L}\right]^2}{\left[\dfrac{Z_O}{R_{lamp} + R_f}\right]^2 + \omega_n^2}} \tag{2.15}$$

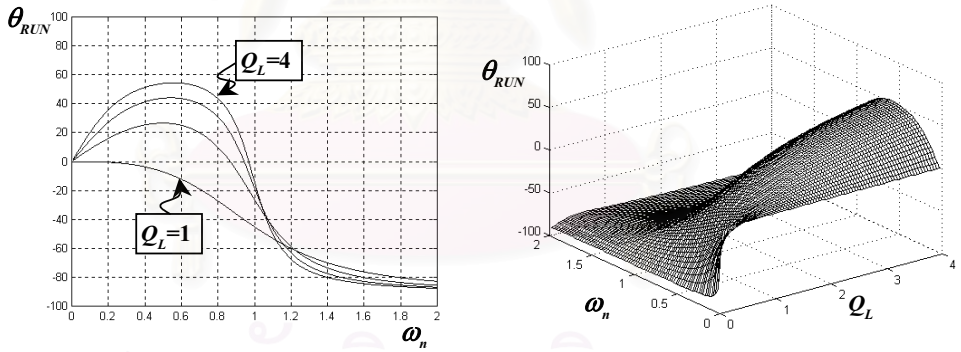
$$\theta_{RUN} = arctan\left\{\omega_n \times \frac{\left[Q_L\left(R_{lamp} + Rf\right)\left[\omega_n^2 - 1\right] + Z_O\right]}{Z_O Q_L\left[1 - \omega_n^2\right] + \omega_n^2\left(R_{lamp} + R_f\right)}\right\} \tag{2.16}$$

จากสมการที่ 2.15 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ปทัสถาน $(|Z_T|/Z_O)$ กับความถี่ปทัสถาน (ω_n) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลด (Q_L) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-4 ดัง

แสดงในรูปที่ 2.20 และจากสมการที่ 2.16 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ปทัสถาน (θ_{RUN}) กับความถี่ปทัสถาน (ω_n) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลด (Q_L) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-4 ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยที่สุดที่ $\omega_n = 1$ และเมื่อเพิ่มค่า Q_L จะทำให้กระแสมีโอกาสนำหน้าแรงดันได้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของ Z_T กับ ω_n และ Q_L



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของ θ_{RUN} กับ ω_n และ Q_L

กระแสออกของอินเวอร์เตอร์เป็นองค์ประกอบความถี่หลักมูลดังสมการที่ 2.17 และค่ายอดของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ (I_L) ดังสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$i_L = I_L \sin(\omega t - \theta_{RUN}) \qquad (2.17)$$

เมื่อ

$$I_L = \frac{V_S}{|Z_T|} \frac{V_S \times \left(\frac{1}{R_{lamp} + R_f} + j\omega C_{ig} \right)}{1 - \omega^2 LC_{ig} + j\omega \left(\frac{L + \left(2R_{lamp} + R_f\right) R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \right)} \quad (2.18)$$

$$= \frac{V_S}{Z_O} \sqrt{\frac{\left[\frac{Z_O}{R_{lamp} + R_f} \right]^2 + \omega_n^2}{\left[1 - \omega_n^2\right]^2 + \left[\frac{\omega_n}{Q_L} \right]^2}} \quad (2.19)$$

กระแสอุ่นไส้ขณะทำงานปกติ ดังสมการที่ 2.20

$$I_{fh} = I_L \times \frac{R_{lamp}}{R_{lamp} + Z_{cig}} \quad (2.20)$$

กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ (I_{lamp}) เมื่อพิจารณาหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นความต้านทานเชิงเส้น ดังสมการที่ 2.21

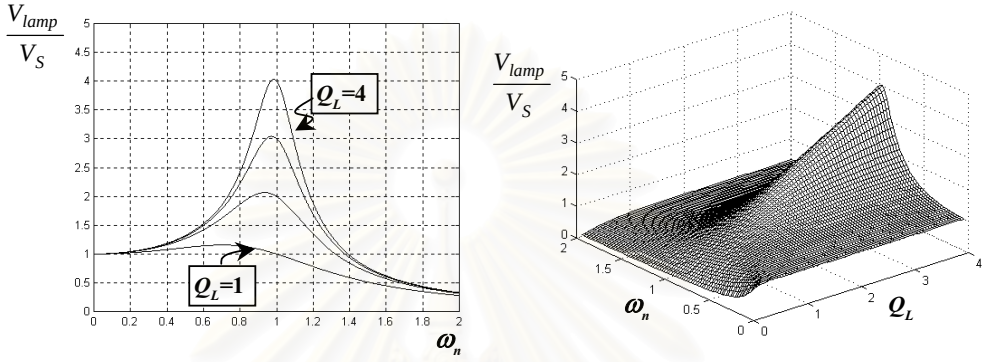
$$I_{lamp} = \frac{P_{lamp}}{V_{lamp}} = \frac{V_{lamp}}{R_{lamp}} = I_L \times \frac{Z_{cig}}{R_{lamp} + Z_{cig}} \quad (2.21)$$

สมการฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ V_{lamp} กับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ V_s ดังสมการที่ 2.22 และ 2.23

$$\frac{V_{lamp}}{V_S}(j\omega) = \frac{\frac{R_{lamp} + j\omega R_f R_{lamp} C_{ig}}{R_{lamp} + R_f}}{1 - \omega^2 LC_{ig} + j\omega \left(\frac{L + \left(2R_{lamp} + R_f\right) R_f C_{ig}}{R_{lamp} + R_f} \right)} \quad (2.22)$$

$$= \frac{R_{lamp}}{R_{lamp} + R_f} \times \left[\frac{1 + j\omega R_f C_{ig}}{1 - \omega_n^2 + j\frac{\omega_n}{Q_L}} \right] \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันโอนย้าย (V_{lamp}/V_S) กับความถี่ปทัสถาน (ω_n) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลด (Q_L) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-4 ดังในรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_L จะทำให้แรงดันคร่อมหลอดเพิ่มที่ V_S ค่าเดิม



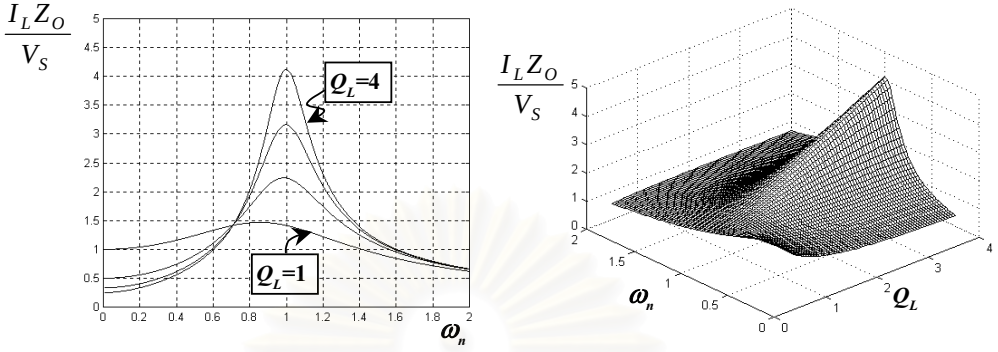
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของ V_{lamp}/V_S กับ ω_n และ Q_L

สมการฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ I_L กับแรงดันออกของอินเวอร์-เตอร์ V_s ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25

$$\frac{I_L}{V_S}(j\omega)=\frac{\left(\frac{1}{R_{lamp}+R_f}+j\omega C_{ig}\right)}{1-\omega^2 LC_{ig}+j\omega\left(\frac{L+\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig}}{R_{lamp}+R_f}\right)} \tag{2.24}$$

$$=\frac{\frac{Z_O}{R_{lamp}+R_f}+j\omega_n}{Z_O\left[1-\omega_n^2+j\frac{\omega_n}{Q_L}\right]} \tag{2.25}$$

จากสมการที่ 2.25 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสโหลดของอินเวอร์เตอร์ปทัสถาน $(I_L Z_O/V_S)$ กับความถี่ปทัสถาน (ω_n) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลด (Q_L) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-4 ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_L จะทำให้กระแสออกของอินเวอร์-เตอร์เพิ่มที่ V_S ค่าเดิม



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของ $I_L Z_O / V_S$ กับ ω_n และ Q_L

2.5 <u>วิธีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Ignition method for fluoreacent lamp)</u>

หลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงในการจุดหลอดและต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งกระแสเพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนตทำงานที่พิกัดได้อย่างมีเสถียรภาพ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงเพียงพอต่อการจุดหลอดโดยไม่ส่งผลกระทบในทางเสียหายต่อสมรรถนะของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อนำไปใช้งาน บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันอาศัยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ของวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ ในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นพารามิเตอร์หลักที่มีอิทธิผลต่อกลไกการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อทำให้เกิดแรงดันที่มีค่สูงในการจุดหลอดอยู่ 4 ประการ คือ

- การอุ่นไส้หลอด คือ กระแสอุ่นไส้ (preheat current) และเวลาอุ่นไส้ (preheat time)
- แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด คือ แรงดันไฟฟ้าจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Ignition rate open circuit voltage)
- ภาวะแวดล้อม (environment) คือ อุณหภูมิโดยรอบและความชื้นสัมพัทธ์
- ภาวะทางกายภาพของหลอด คือ ชนิดของก๊าซดิสชาร์จและความดันที่บรรจุไว้ภายในหลอด รูปร่างของหลอด และการมีฟิล์มตัวนำภายในหลอด

ลักษณะสมบัติเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อกันในลักษณะที่ซับซ้อน และสำหรับการเลือกใช้วิธีการจุดหลอดอย่างใดอย่างหนึ่ง ถ้าลักษณะสมบัติทั้งสี่รวมกันอย่างไม่ถูกต้อง สมรรถนะของหลอดฟลูออเรสเซนต์อาจจะลดลงได้ เช่น อายุการใช้งานหลอดสั้นลงตามจำนวนครั้งของการจุด

หลอด ปลายหลอดทั้งสองข้างดำมากเกินปกติ ลักษณะสมบัติทั้งสี่จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณา วิธีการจุดหลอดที่ใช้กับบัลลาสต์ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz เท่าที่ใช้กันแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

- การจุดหลอดแบบไม่มีอุ่นไส้หลอด
- การจุดหลอดแบบมีการอุ่นไส้หลอดก่อน

การจุดหลอดทั้ง 2 วิธีนี้สามารถนำมาใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แต่เนื่องจากบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมมากกว่า จึงสามารถออกแบบได้หลายลักษณะตามความต้องการของผู้ออกแบบ อย่างไรก็ตามบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อาจทำให้เกิดภาวะการจุดหลอดที่ซับซ้อนกว่าบัลลาสต์แกนเหล็ก 50 หรือ 60 Hz แบบดั้งเดิม แต่ก็สามารถใช้หลักการเดียวกันได้ถ้าต้องการให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีสมรรถนะการทำงานที่ดี

2.6 <u>ข้อกำหนดในระหว่างการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์</u>

เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานตามที่กำหนด การจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์จำเป็นจะต้องมีข้อกำหนดในระหว่างการจุดหลอด

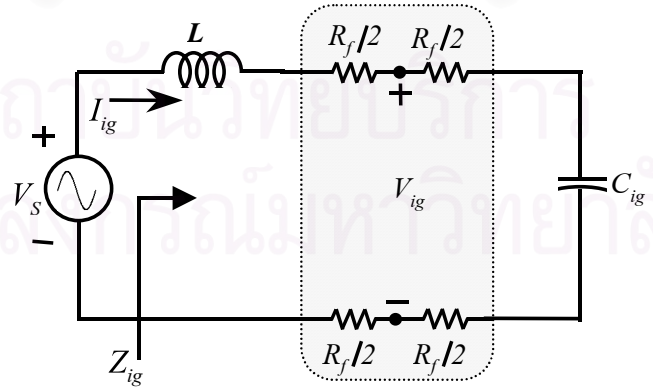
- ในระหว่างการเผาไส้หลอดก่อนการจุดหลอด กระแสเผาไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้สารปล่อยอิเล็กตรอนที่เคลือบไส้หลอดถูกทำลายเพราะมีความร้อนสูงเกินไป
- ช่วงก่อนจุดหลอดแรงดันไฟฟ้าคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะต้องรักษาไว้ให้ต่ำกว่าระดับที่จะทำให้เกิดกระแสรุ่งแสง (glow current) ผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อไส้หลอด
- หลังจากที่ไส้หลอดปล่อยอิเล็กตรอนที่เพียงพอแล้ว แรงดันไฟฟ้าจุดหลอดสูงเพียงพอที่จะทำให้หลอดติดสว่างได้อย่างรวดเร็วโดยปราศจากการจุดซ้ำอีก
- ถ้าจำเป็นจะต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อจุดหลอดให้ติด หลังจากที่อุณหภูมิไส้หลอดถึงจุดปล่อยอิเล็กตรอนแล้ว การเปลี่ยนแปลงจากแรงดันไฟฟ้าคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์จากค่าต่ำไปเป็นค่าสูงจะต้องเกิดขึ้นในขณะที่ไส้หลอดยังคงอยู่ที่อุณหภูมิปล่อยอิเล็กตรอน

ข้อกำหนดดังกล่าวจำเป็นต้องมีในขั้นตอนการจุดหลอดเพื่อให้อายุการใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยาวนาน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวิธีการจุด

หลอดแตกต่างกัน 3 ชนิด คือการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้-หลอด การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ที่ควบคุมด้วยความถี่ การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ที่ควบคุมด้วยวงจรทางด้านโหลด

2.7 <u>บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด</u>

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้จุดหลอดโดยอาศัยการปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงระหว่างไส้หลอดทั้งสองข้าง โดยไม่ต้องมีการอุ่นไส้หลอดในขณะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงจุดหลอดอย่างทันทีทันใด ระดับของแรงดันไฟฟ้าจุดหลอดและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่หลอดใช้ในการเปลี่ยนขั้นตอนจากการเกิดกระแสรุ่ง-แสงของการปล่อยประจุไปสู่สถานะอาร์กเต็มที่ วิธีการจุดหลอดแบบนี้ต้องการแรงดันจุดหลอดที่สูงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อไม่เกิดอันตรายต่อไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ การกำเนิดแรงดันสูงสำหรับการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้ติดสว่างจะอาศัยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ของวงจรโหลด วงจรจุดหลอดจึงเป็นตัวเก็บประจุที่เหมาะสมค่าหนึ่งที่ทำงานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าจุดหลอดในเวลาที่หลอดยังมีค่าความต้านทานใกล้เคียงค่าอนันต์โดยไม่ให้เกิดกระแสรุ่งแสงมากเกิน 25 mA ตามมาตราฐานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ตัวเก็บประจุดังกล่าวเป็นทางผ่านของกระแสอุ่นไส้ในขณะที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานปกติ สามารถเขียนวงจรสมมูลก่อนการจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบไม่มีการอุ่นไส้ก่อนหรือจุดหลอดแบบทันทีทันใด (instant start) ได้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดโดยไม่มีการเผาไส้หลอด

เหตุผลหลักอย่างหนึ่งที่ปลายขั้วหลอดดำมากเกินกว่าปกติ และหลอดฟลูออเรสเซนต์มีอายุการใช้งานสั้นกว่าเวลาอันควรก็คือกระแสปล่อยประจุรุ่งแสงมีค่าสูง และใช้เวลานานเกินไปในกระบวนการจุดหลอด เพื่อที่จะลดผลเสียหายเนื่องจากกระแสรุ่งแสงดังกล่าวนี้ให้ต่ำที่สุด จึงจำเป็นต้องทำให้แน่ใจว่ามีการป้อนแรงดันไฟฟ้าคร่อมหลอดต่ำที่สุดและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถที่จะจุดหลอดได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีการจุดซ้ำหลังจาก 100 มิลลิวินาที บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดจะใช้กระแสที่ไหลผ่านไส้หลอดเพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ นอกเหนือจากการอุ่นไส้หลอดที่เพียงพอ เช่น สนับสนุนการจุดหลอดที่แรงดันไฟฟ้าจุดหลอดลงต่ำลงได้ กรณีเช่นนี้จะต้องเคร่งครัดเรื่องขีดจำกัดของกระแสผ่านไส้หลอดสูงสุดเพื่อหลีกเลี่ยงมิให้ไส้หลอดร้อนจัดเกินไป

จากรูปที่ 2.24 คำนวณหาสมการในการออกแบบซึ่งประกอบด้วย ค่าอิมพิแดนซ์วงจรจุดหลอด (Z_{ig}) มุมเฟสของกระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงจุดหลอด (θ_{ig}) กระแสจุดหลอด (I_{ig}) ฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{ig} กับ V_S และฟังก์ชันโอนย้ายของ I_{ig} กับ V_S โดยสามารถทำให้เป็นปทัสถานด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

- ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency)

$$\omega_O = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_{ig}}} \tag{2.26}$$

- ความถี่ปทัสถานตอนจุดหลอด (Ignition normalized frequency)

$$\omega_{nig} = \frac{\omega}{\omega_O} \tag{2.27}$$

- อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance)

$$Z_O = \omega_O L = \frac{1}{\omega_O C_{ig}} = \sqrt{\frac{L}{C_{ig}}} \tag{2.28}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดช่วงจุดหลอด (ignition Series-loaded quality factor)

$$Q_{Sig} = \frac{\omega_O L}{2R_f} = \frac{1}{2\omega_O C_{ig} R_f} = \frac{Z_O}{2R_f} = \frac{\sqrt{L/C_{ig}}}{2R_f} \qquad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.26-2.29 สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลช่วงก่อนจุดหลอดแสดงได้ดังสมการที่ 2.30 และมุมเฟสของกระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงจุดหลอดได้ดังสมการที่ 2.33

$$Z_{ig}(j\omega) = \frac{1 - LC_{ig}\omega^2 + j2\omega R_f C_{ig}}{j\omega C_{ig}} \qquad (2.30)$$

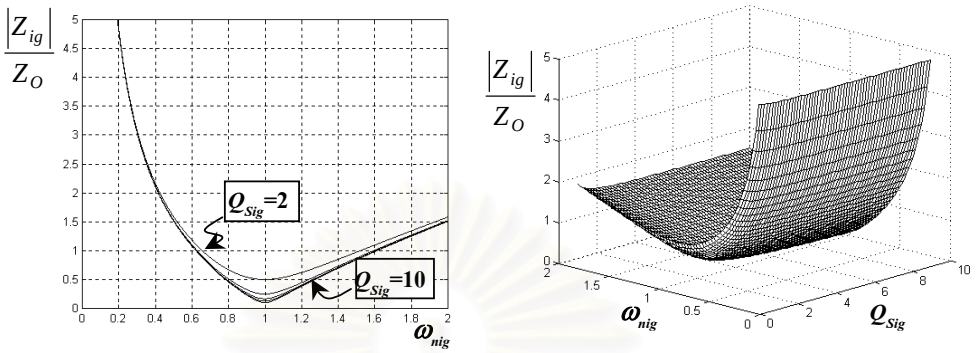
$$= 2R_f\left[1 + jQ_{Sig}\left(\omega_{nig} - \frac{1}{\omega_{nig}}\right)\right] = \left|Z_{ig}\right|e^{j\theta_{ig}} \qquad (2.31)$$

เมื่อ

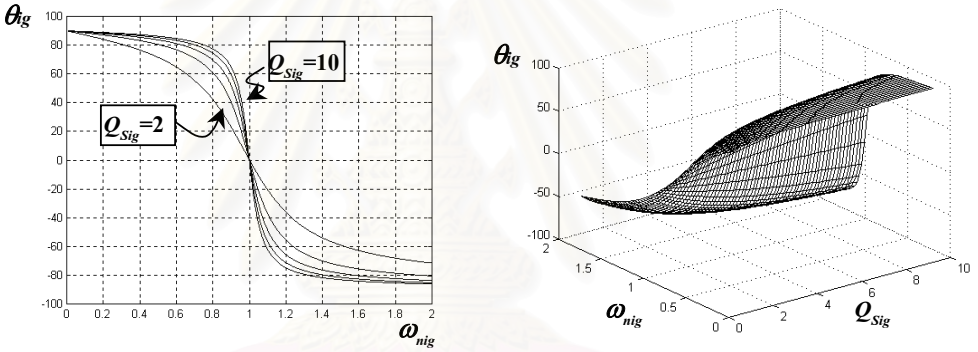
$$\frac{\left|Z_{ig}\right|}{Z_O} = \sqrt{\frac{1}{Q_{Sig}^2} + \left[\omega_{nig} - \frac{1}{\omega_{nig}}\right]^2} \qquad (2.32)$$

$$\theta_{ig} = arctan\left[Q_{Sig}\left(\omega_{nig} - \frac{1}{\omega_{nig}}\right)\right] \qquad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.32 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ปทัสถาน *(|Zig|/ZO)* กับความถี่ปทัสถานตอนจุดหลอด *(ω_{nig})* สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงจุดหลอด *(Q_{Sig})* ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยที่ ω_{nig}=1 และจะมีค่ายิ่งสูงเมื่อ ω_{nig} เข้าใกล้ศูนย์ จากสมการที่ 2.33 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสของกระแสออกเทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ *(θ_{ig})* กับความถี่ปทัสถานตอนจุดหลอด *(ω_{nig})* สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงจุดหลอด *(Q_{Sig})* ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.26 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า Q_{Sig} มุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ +90 ถึง -90 ที่ ω_{nig}=1



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของ $|Z_{ig}|/Z_S$ กับ ω_{nig} และ Q_{Sig}



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของ θ_{ig} กับ ω_{nig} และ Q_{Sig}

กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ช่วงจุดหลอดจะเข้าใกล้ความเป็นไซน์หรือองค์ประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ดังสมการที่ 2.34

$$i_{ig} = I_{ig}\ sin(\omega t - \theta_{ig}) \tag{2.34}$$

เมื่อ

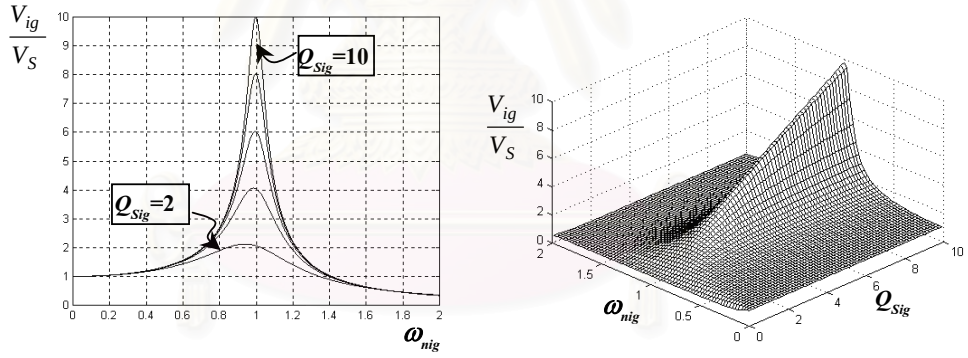
$$I_{ig} = \frac{V_S}{|Z_{ig}|} = \frac{V_S}{2R_f\sqrt{1+\left[Q_{Sph}\left(\omega_{nig} - \frac{1}{\omega_{nig}}\right)\right]^2}} \tag{2.35}$$

ในช่วงการจุดหลอด เราต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงเพียงพอสำหรับการจุดหลอด ฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{ig} กับ V_s คำนวณได้ดังดังสมการที่ 2.36

$$\frac{V_{ig}}{V_S}(j\omega) = \frac{1 + j\omega R_f C_{ig}}{1 - LC_{ig}\omega^2 + j2\omega R_f C_{ig}} \tag{2.36}$$

$$= \frac{1 + j\dfrac{\omega_{nig}}{2Q_{Sig}}}{1 - \omega_{nig}^2 + j\dfrac{\omega_{nig}}{Q_{Sig}}} \tag{2.37}$$

จากสมการที่ 2.37 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันโอนย้าย V_{ig}/V_S กับความถี่ปทัสถานตอนจุดหลอด (ω_{nig}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงจุดหลอด (Q_{Sig}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่าเมื่อ Q_{Sig} จะทำให้แรงดัน V_{ig} สูงขึ้นด้วย



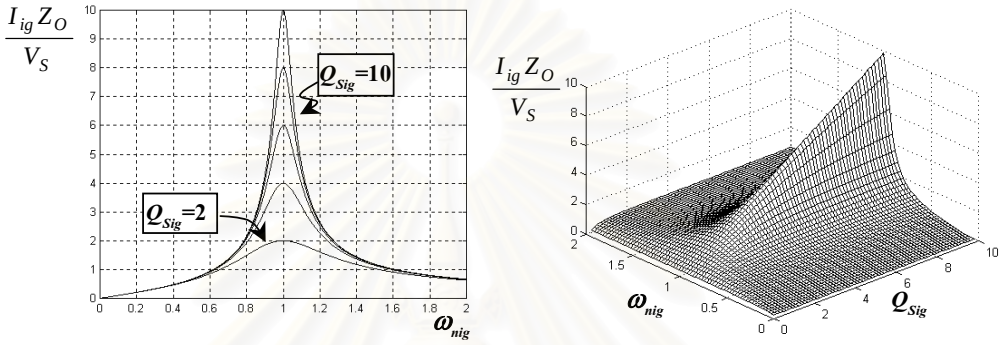
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของ V_{ig}/V_S กับ ω_{nig} และ Q_{Sig}

ฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสจุดหลอด I_{ig} กับ V_S ดังสมการที่ 2.38

$$\frac{I_{ig}}{V_S}(j\omega) = \frac{j\omega C_{ig}}{1 - LC_{ig}\omega^2 + j2\omega R_f C_{ig}} \tag{2.38}$$

$$= \frac{\dfrac{1}{2R_f}}{\left[1 + jQ_{Sig}\left(\omega_{nig} - \dfrac{1}{\omega_{nig}}\right)\right]} \tag{2.39}$$

จากสมการที่ 2.39 เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสจุดหลอดปทัสถาน $(I_{ig}Z_O/V_S)$ กับความถี่ปทัสถาน (ω_{nig}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลด (Q_{Sig}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังในรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_{Sig} จะทำให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์เพิ่มที่ V_S ค่าเดิม



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของ $I_{ig}Z_O/V_S$ กับ ω_{nig} และ Q_{Sig}

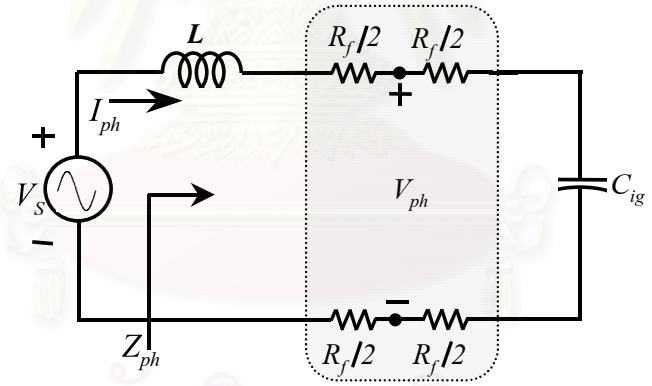
2.8 <u>บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยความถี่</u>

หลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นถ้ามีการเผาไส้หลอดจนถึงอุณหภูมิที่สามารถปล่อยประจุได้ง่าย คือประมาณ 700 องศาเซลเซียส (Hammer E.E., 1999) ก่อนการป้อนแรงดันไฟฟ้าจุดหลอดจะทำให้หลอดฟลูออเรสแซนต์ต้องการแรงดันจุดหลอดต่ำลงทำให้เพิ่มอายุการใช้งานของหลอด พร้อมทั้งเป็นผลดีในการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในตัวบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในพิกัดแรงดันและกระแสที่ต่ำลง ดังนั้นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดก่อนจุดหลอดจึงเป็นความต้องการในปัจจุบัน บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้มีขั้นตอนการทำงานคือ จ่ายกระแสไปเผาไส้หลอดให้ได้อุณหภูมิที่สามารถปล่อยประจุได้ง่าย สร้างแรงดันจุดหลอดให้เพียงพอต่อการจุดหลอด และควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้ทำงานในพิกัดอย่างมีเสถียรภาพ ถ้าเราให้ความถี่การทำงานของวงจรโหลดคงที่ จะทำให้เราไม่สามารถให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานทั้ง 3 สภาวะได้ จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงความถี่การทำงานทั้ง 3 สภาวะเพื่อให้มีกระแสอุ่นไส้หลอดตามต้องการ มีแรงดันจุดหลอดอย่างเหมาะสม และให้หลอดทำงานที่พิกัดกำลังออกอย่างมีเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อออกแบบการจุดหลอดแบบที่มีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยความถี่ โดยจะมุ่งพิจารณาไปที่ 3 ช่วงการทำงาน คือ ช่วงการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ช่วงการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ และช่วงทำงานปกติ

สำหรับการคำนวณหาสมการในการออกแบบ เราได้พิจารณาเงื่อนไขการทำงานที่พิกัดแล้ว ในหัวข้อที่ 2.5 ดังนั้นจะเหลืออีก 2 ช่วงการทำงานที่จะต้องหาสมการการออกแบบ ดังต่อไปนี้คือ

2.8.1 <u>ช่วงการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์</u>

ช่วงการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์นี้ หลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการกระแสอุ่นไส้หลอด (filament preheating current, I_{ph}) ที่เพียงพอเพื่อให้ได้อุณหภูมิเหมาะสมต่อการปล่อยประจุได้ง่าย บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะป้อน I_{ph} ให้แก่ไส้หลอด ในสภาวะนี้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของไส้หลอดทังสเตน (R_f) เป็นความต้านทานที่แปรค่าตามอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ผ่านไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะนั้น และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าความต้านทานเป็นอนันต์เนื่องจากยังไม่มีกระแสไหลผ่านหลอด หลอดฟลูออเรสเซนต์ยังไม่ติดสว่าง ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลของโหลดอินเวอร์เตอร์ร่วมกับวงจรจุดหลอดในสภาวะการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วงจรสมมูลช่วงการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์

จากรูปที่ 2.29 คำนวณหาสมการในการออกแบบช่วงอุ่นไส้หลอดซึ่งประกอบด้วย ค่าอิมพีแดนซ์วงจรอุ่นไส้หลอด (Z_{ph}) มุมเฟสของกระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอด (θ_{ph}) กระแสจุดหลอด (I_{ph}) ฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{ph} กับ V_S และฟังก์ชันโอนย้ายของ I_{ph} กับ V_S โดยสามารถทำให้เป็นปทัสถานด้วยตัวแปรตัวต่อไปนี้

- ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency)

$$\omega_O = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_{ig}}} \tag{2.40}$$

- ความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (preheat normalized frequency)

$$\omega_{nph} = \frac{\omega_{ph}}{\omega_O} \tag{2.41}$$

- อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance)

$$Z_O = \omega_O L = \frac{1}{\omega_O C_{ig}} = \sqrt{\frac{L}{C_{ig}}} \tag{2.42}$$

- ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดช่วงจุดหลอด(Preheat Series-loaded quality factor)

$$Q_{Sph} = \frac{\omega_O L}{2R_f} = \frac{1}{2\omega_O C_{ig} R_f} = \frac{Z_O}{2R_f} = \frac{\sqrt{L/C_{ig}}}{2R_f} \tag{2.43}$$

จากสมการที่ 2.40-2.43 สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลขณะอุ่นไส้หลอดแสดงได้ดังสมการที่ 2.44 และมุมของกระแสออกเทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ 2.47

$$Z_{ph}(j\omega_{ph}) = \frac{1 - LC_{ig}\omega_{ph}^2 + j2\omega_{ph}R_f C_{ig}}{j\omega_{ph}C_{ig}} \tag{2.44}$$

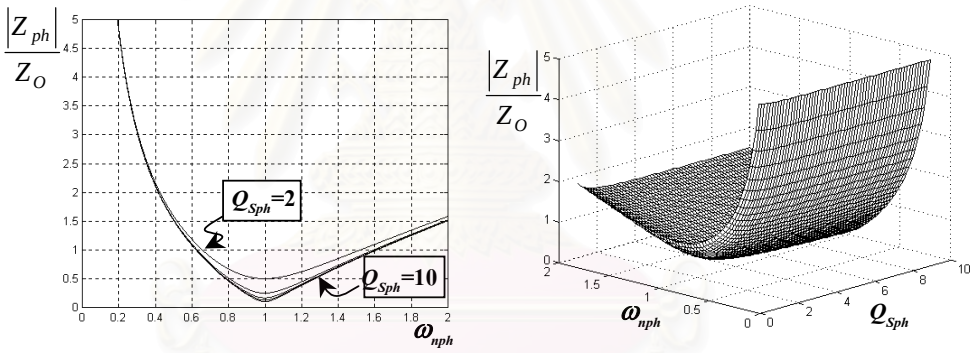
$$= 2R_f\left[1 + jQ_{Sph}\left(\omega_{nph} - \frac{1}{\omega_{nph}}\right)\right] = \left|Z_{ph}\right|e^{j\theta_{ph}} \tag{2.45}$$

เมื่อ

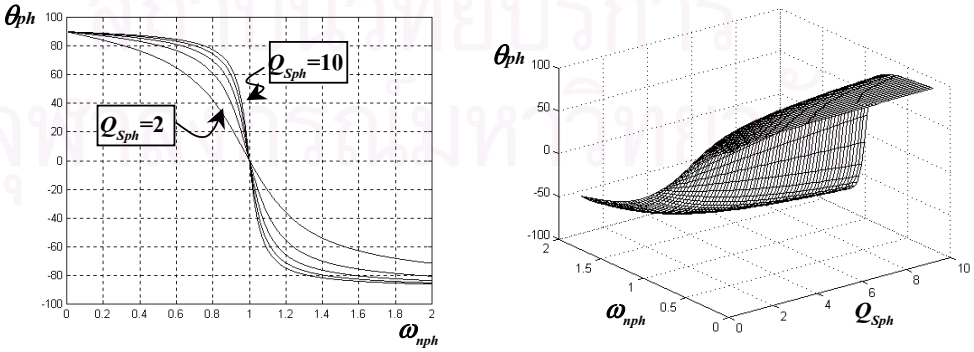
$$\frac{\left|Z_{ph}\right|}{Z_O} = \sqrt{\frac{1}{Q_{Sph}^2} + \left[\omega_{nph} - \frac{1}{\omega_{nph}}\right]^2} \tag{2.46}$$

$$\theta_{ph} = arctan\left[Q_{Sph}\left(\omega_{nph} - \frac{1}{\omega_{nph}} \right) \right] \qquad (2.47)$$

จากสมการที่ 2.46 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ปทัสถานช่วงอุ่นไส้-หลอด $(|Z_{ph}|/Z_O)$ กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ้นไส้หลอด (ω_{nph}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{Sph}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.30 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยที่ ω_{nph}=1 และจะมีค่ายิ่งสูงเมื่อ ω_{nph} เข้าใกล้ศูนย์ จากสมการที่ 2.47 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ (θ_{ph}) กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (ω_{nph}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{Sph}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.31 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า Q_{Sph} มุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ +90 ถึง -90 ที่ ω_{nph}=1



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ของ $|Z_{ph}|/Z_S$ กับ ω_{nph} และ Q_{Sph}



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ของ θ_{ph} กับ ω_{nph} และ Q_{Sph}

กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอดจะเข้าใกล้ความเป็นไซน์หรือองค์ประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ดังสมการที่ 2.46

$$i_{ph} = I_{ph}\, sin\left(\omega_{ph} t - \theta_{ph}\right) \tag{2.48}$$

เมื่อ

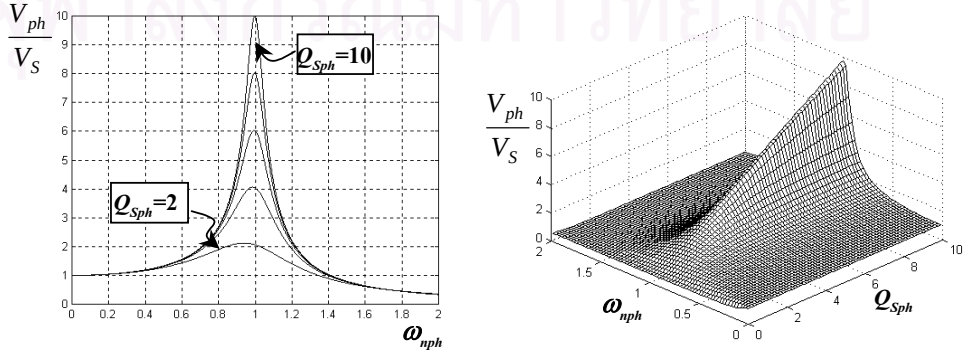
$$I_{ph} = \frac{V_S}{\left|Z_{ph}\right|} = \frac{V_S}{2R_f \sqrt{1+\left[Q_{Sph}\left(\omega_{nph} - \frac{1}{\omega_{nph}}\right)\right]^2}} \tag{2.49}$$

ในช่วงอุ่นไส้หลอด เราต้องการแรงดันไฟฟ้าคร่อมหลอดที่ไม่สูงมากเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสรุ่งแสง ในกรณีนี้สามารถแสดงฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{ph} กับ V_s ได้ดังดังสมการที่ 2.50

$$\frac{V_{ph}}{V_S}(\, j\omega_{ph}) = \frac{1 + j\omega_{ph} R_f C_{ig}}{1 - LC_{ig}\omega_{ph}^2 + j2\omega_{ph} R_f C_{ig}} \tag{2.50}$$

$$= \frac{1 + j\dfrac{\omega_{nph}}{2Q_{Sph}}}{1 - \omega_{nph}^2 + j\dfrac{\omega_{nph}}{Q_{Sph}}} \tag{2.51}$$

จากสมการที่ 2.51 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์โอนย้าย V_{ph}/V_S กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (ω_{nph}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{Sph}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จะเห็นว่าเมื่อ Q_{Sph} จะทำให้แรงดัน V_{ph} สูงขึ้นด้วย



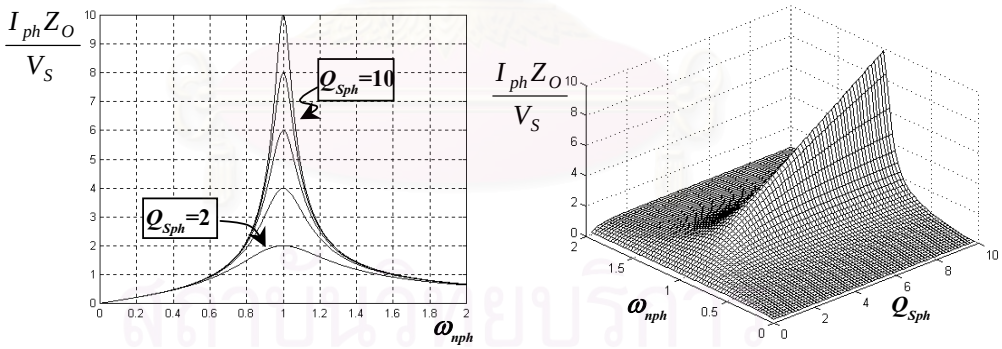
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของ V_{ph}/V_S กับ ω_{nph} และ Q_{Sph}

ฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสอุ่นไส้หลอด I_{ph} กับ V_S ดังสมการที่ 2.52

$$\frac{I_{ph}}{V_S}(j\omega_{ph}) = \frac{j\omega_{ph}C_{ig}}{1 - LC_{ig}\omega_{ph}^2 + j2\omega_{ph}R_f C_{ig}} \tag{2.52}$$

$$= \frac{\frac{1}{2R_f}}{\left[1 + jQ_{Sig}\left(\omega_{nph} - \frac{1}{\omega_{nph}}\right)\right]} \tag{2.53}$$

จากสมการที่ 2.53 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอุ่นไส้หลอดปทัสถาน $(I_{ph}Z_O/V_S)$ กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (ω_{nph}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{Sph}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.33 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_{Sph} จะทำให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์เพิ่มที่ V_S ค่าเดิม

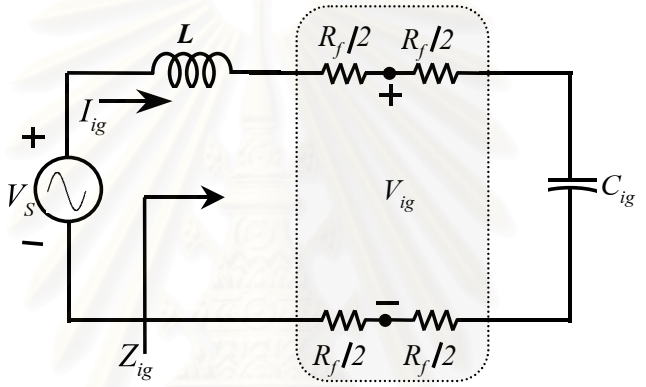


รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ของ $I_{ph}Z_O/V_S$ กับ ω_{nph} และ Q_{Sph}

2.8.2 <u>ช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์</u>

ช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงเพียงพอเพื่อจุดหลอดให้ติดสว่าง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อจุดหลอด คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงนี้ยังคงมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ ความต้านทานไส้หลอดทังสเตนเพิ่ม

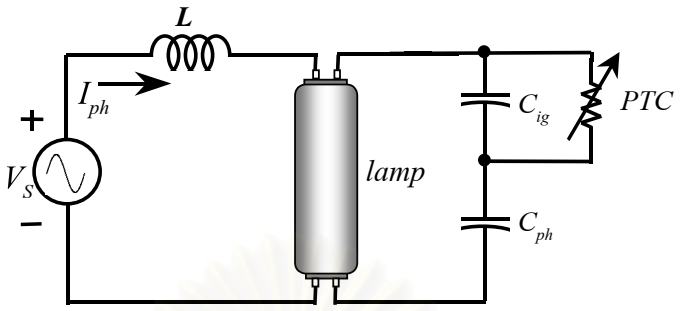
จากช่วงอุ่นไส้หลอด 4.25 เท่า การสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำโดยการลดความถี่การทำงานของสวิตช์ให้เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่ที่ใช้ในการจุดหลอดนี้เรียกว่า Ignition frequency, ω_{ig} วงจรสมมูลของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ในช่วงจุดหลอดแสดงดังรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าวงจรสมมูลจะเหมือนกับวงจรสมมูลในช่วงอุ่นไส้หลอด ส่วนที่แตกต่างกันคือความถี่การทำงานจะเปลี่ยนจาก ω_{ph} เป็น ω_{ig} และความต้านทานไส้หลอดจะเพิ่มตามการเพิ่มของอุณหภูมิมีค่าประมาณ 4.25 เท่าของ R_f สามารถคำนวณดังสมการที่ 2.44-2.53 เช่นกัน



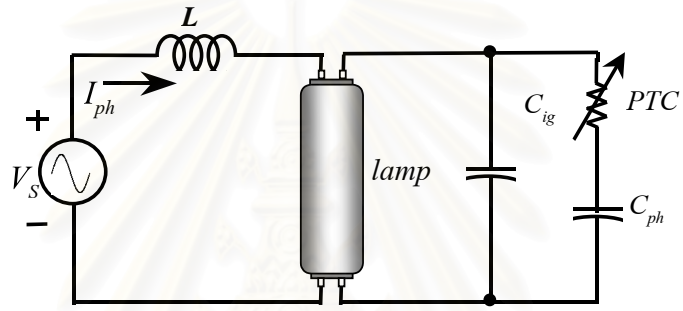
รูปที่ 2.34 วงจรสมมูลช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.9 <u>บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด</u>

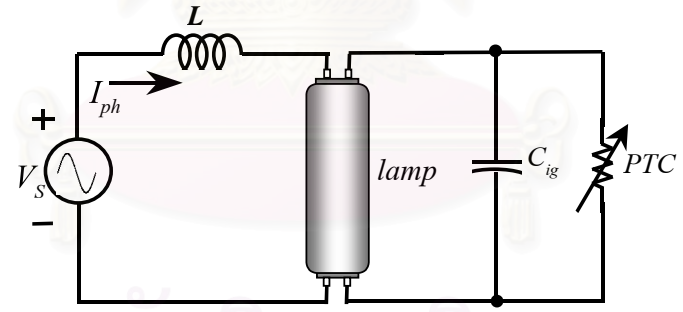
บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์จะอาศัยการเปลี่ยนโครงสร้างของวงจรโหลดให้มีการเปลี่ยนความถี่ธรรมชาติไม่หน่วงและตัวประกอบคุณภาพในช่วงอุ่นไส้หลอด ให้ต่ำลงกว่าความถี่การทำงานแทนการเพิ่มความถี่การสวิตช์ ซึ่งจะทำให้ขนาดของแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ลดลง การลด f_O และ Q_L ของวงจรโหลดลงจะใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานเพิ่มตามอุณหภูมิของอุปกรณ์ (positive temperature coefficient thermister, PTC thermistor) สามารถดัดแปลงวงจรหลักการพื้นฐานให้มีการจุดหลอดแบบนี้ได้ 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.35 – 2.37



รูปที่ 2.35 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบที่ 1



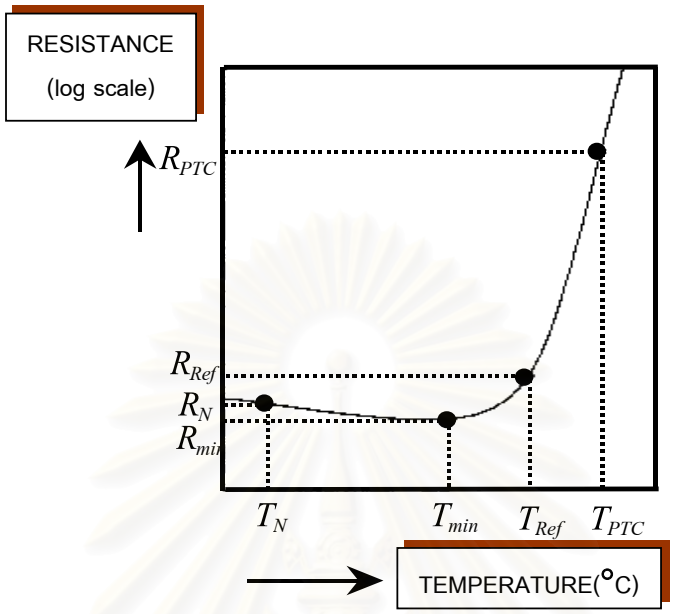
รูปที่ 2.36 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบที่ 2



รูปที่ 2.37 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบที่ 3

2.9.1<u>คุณสมบัติของ PTC thermistor</u>

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลดที่ใช้ตัวเก็บประจุและ PTC thermistor ลด f_O และ Q_L ของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้มีกระแสอุ่นไส้หลอด แรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด และเวลาอุ่นไส้หลอดตามข้อกำหนดของมาตราฐาน IEC929 โดย PTC thermistor เป็นตัวต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าตามอุณหภูมิทำจากเซรามิกบริสุทธิ์ (high purity semiconducting ceramics)



โดยที่ R_N คือ ความต้านทานพิกัด R_{min} คือ ความต้านทานต่ำสุด

R_{ref} คือ ความต้านทานอ้างอิง R_{PTC} คือ ความต้านทานใน Slop

T_{Rmin} คือ อุณหภูมิที่ R_{min} T_{ref} คือ อุณหภูมิที่ R_{ref}

T_{PTC} คือ อุณหภูมิที่ R_{PTC}

รูปที่ 2.38 คุณสมบัติความต้านทานของ PTC thermistor กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.38 จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า T_{ref} ความต้านทานของ PTC thermistor จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_{ref} การเพิ่มของอุณหภูมิจะทำให้ความต้านทานของ PTC thermistor เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่จุดอุณหภูมิ T_{ref} เรียกอีกชื่อว่าอุณหภูมิการสวิตช์ (Switching temperature) ค่าความต้านทานจุดนี้มีค่าเป็น 2 เท่า ของความต้านทาน R_N อุณหภูมิในผิวของ PTC thermistor สามารถเพิ่มได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัว PTC thermistor ความร้อนจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ Power dissipation การเกิดความร้อนไม่ได้ขึ้นอยู่กับการป้อนกระแสให้กับโหลดเท่านั้น แต่จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การเพิ่มของความต้านทาน (thermal resistance) ความร้อนที่เกิดขึ้นใน PTC thermistor สามารถเขียนเป็นสมการทางไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.54

$$P = V \times I = \frac{dH}{dt} = \delta \times (T - T_A) + C_{th} \times \frac{dT}{dt} \qquad (2.54)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ PTC thermistor

V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะของ PTC thermistor

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะของ PTC thermistor

dH/dt คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความต้านทานที่เก็บสะสมกับเวลา

δ คือ สัมประสิทธิการขยายตัวของความต้านทานของ PTC thermistor

T คือ อุณหภูมิชั่วขณะของ PTC thermistor

T_A คือ อุณหภูมิห้อง

C_{th} คือ ความจุความร้อนของ PTC thermistor

dT/dt คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลา

การออกแบบวงจรอุ่นไส้หลอดจะเลือกขนาด PTC thermistor ที่ให้มีเวลาอุ่นไส้ตามข้อกำหนดของมาตราฐาน IEC929 เนื่องจาก PTC thermistor เป็นตัวต้านทานเพิ่มค่าเมื่ออุณหภูมิผิว PTC thermistor เพิ่มขึ้นที่เวลาผ่านไปเวลาใดๆ การวิเคราะห์วงจรที่มีตัวต้านทานเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลาทำได้ยาก เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จะสมมุติให้เป็นความต้านทานของ PTC thermistor มีค่าคงที่ (R_N) ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_{ref} และมีค่าเป็นอนันต์เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_{ref}

จากสมการที่ 2.54 สามารถคำนวณหาเวลาอุ่นไส้หลอด (t_{ph}) ได้ดังสมการที่ 2.55 จะเห็นได้ว่าเวลา t_{ph} จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ PTC thermistor และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ PTC thermistor ทำให้ PTC thermistor มีอุณหภูมิสูงขึ้น

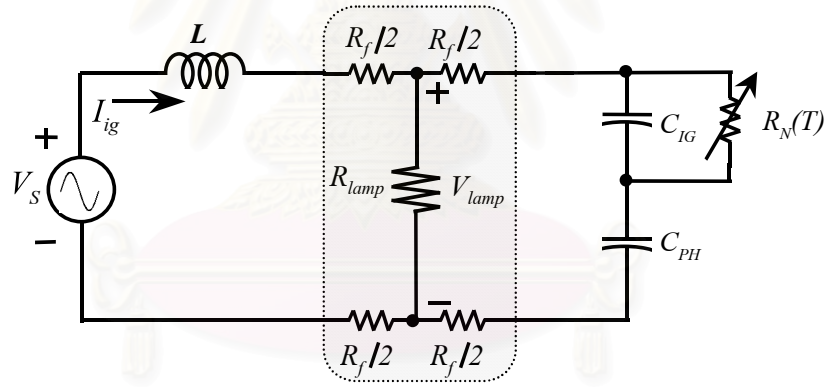
$$t_{ph} = \int_{0}^{t_{ph}} dt = \int_{T_A}^{T_{ref}} \frac{C_{th}}{P - \delta(T - T_A)} dT \qquad (2.55)$$

2.9.2 <u>การวิเคราะห์วงจร</u>

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้จะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการอุ่นไส้หลอด ช่วงการจุดหลอด และช่วงการทำงานปกติที่พิกัด ในช่วงการทำงานปกติและช่วงจุดหลอด ฟลูออเรสเซนต์ค่าความต้านทานของ PTC thermistor จะมีค่าสูงมากในการวิเคราะห์จะประมาณให้ความต้านทานเป็นความต้านทานของวงจรเปิด การออกแบบช่วงจุดหลอดจะใช้วงจรสมมูลและสมการการออกแบบช่วงจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด และการออกแบบช่วงทำงานปกติที่กำลังออกเท่ากับพิกัดจะใช้วงจรสมมูลและสมการ

พิจารณากำลังออกเท่ากับพิกัดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ส่วนช่วงการอุ่นไส้หลอดจะพิจารณาดังต่อไปนี้

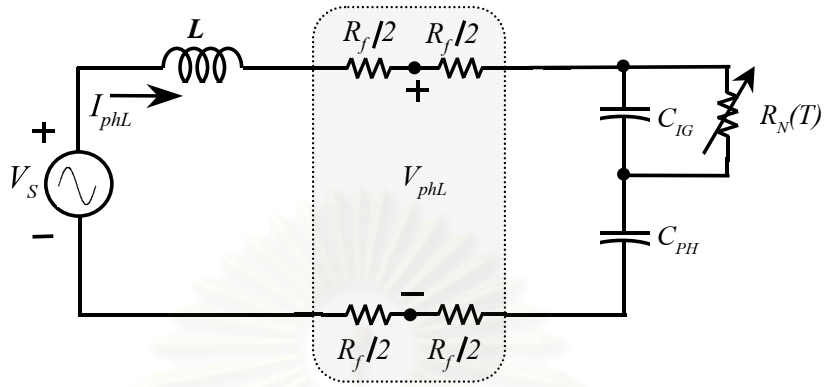
จากโครงสร้างของวงจรในรูปที่ 2.35-2.37 อธิบายได้ว่าวงจรในรูปที่ 2.35 เป็นวงจรที่ใช้ PTC thermistor ต่อขนานกับ C_{ig} ดังนั้นในตอนเริ่มจุดหลอดจะมีการเรโซแนนซ์กันของ L และ C_{ph} หลังจากที่ PTC thermistor มีอุณหภูมิสูงขึ้น วงจรจะมีการเรโซแนนซ์ค่า L และ C_{ig} อนุกรมกับ C_{ph} วงจรในรูปที่ 2.36 เป็นวงจรที่ใช้ PTC thermistor ต่ออนุกรมกับ C_{ig} ดังนั้นในตอนเริ่มจุดหลอดจะมีการเรโซแนนซ์ค่า L และ C_{ig} ต่อขนานกับ C_{ph} หลังจากที่ PTC thermistor มีอุณหภูมิสูงขึ้น วงจรจะทำการเรโซแนนซ์ค่า L และ C_{ph} วงจรในรูปที่ 2.37 เป็นวงจรที่ทำงานคล้ายกับวงจรในรูปที่ 3.35 เพียงแต่ไม่มี C_{ph} เท่านั้น เนื่องจากวงจรทั้ง 3 แบบวงจรมีการทำงานที่คล้ายกัน แต่จะแตกต่างในรายละเอียดเล็กน้อย ดังนั้นเราจะใช้วงจรในรูปที่ 3.35 เป็นวงจรที่ใช้ทดสอบและหาแนวทางในการออกแบบในขั้นต่อไป จากวงจรในรูปที่ 2.35 สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรด้านโหลด

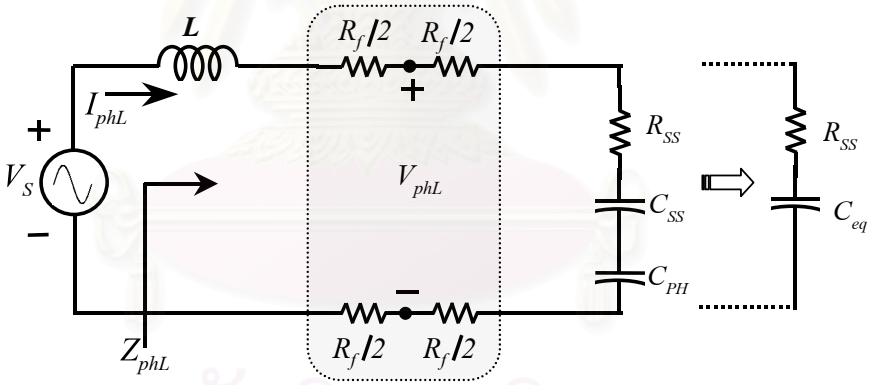
2.9.3 <u>ช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์</u>

ในช่วงอุ่นไส้หลอด ค่าความต้านทานสมมูลหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นอนันต์ และความต้านทาน PTC thermistor (R_N) มีค่าคงที่ค่าหนึ่งหนึ่งก่อนถึงอุณหภูมิการสวิตช์ สามารถเขียนวงจรสมมูลใหม่ได้ดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์

จากรูปที่ 2.40 สามารถเขียนวงจรสมมูลเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณโดยเปลี่ยนแปลงโครง-สร้างของวงจรขนานของ C_{ig} กับ R_N เป็นวงจรอนุกรม R_{SS} กับ C_{SS} ดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 วงจรสมมูลช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีเปลี่ยนเป็นอนุกรม

โดยความต้านทาน R_{SS} คำนวณได้ดังสมการที่ 2.56 C_{SS} คำนวณได้ดังสมการที่ 2.57 และ C_{eq} ดังสมการที่ 2.58

$$R_{SS} = \frac{R_N}{1+\left(\omega R_N C_{ig}\right)^2} \tag{2.56}$$

$$C_{SS} = C_{ig}\left(1+\frac{1}{\left(\omega R_N C_{ig}\right)^2}\right) \tag{2.57}$$

$$C_{eq} = \frac{C_{SS}C_{ph}}{C_{SS} + C_{ph}} \tag{2.58}$$

จากรูปที่ 2.41 คำนวณหาสมการในการออกแบบช่วงอุ่นไส้หลอดซึ่งประกอบด้วย ค่าอิมพีแดนซ์วงจรอุ่นไส้หลอด (Z_{Lph}) มุมเฟสของกระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้-หลอด (θ_{ph}) กระแสจุดหลอด (I_{ph}) ฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{phL} กับ V_S และฟังก์ชันโอนย้ายของ I_{phL} กับ V_S ดังสมการต่อไปโดยสามารถปทัสถานด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

- ความถี่เรโซแนนซ์ (load control resonant frequency)

$$\omega_{OL} = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_T}} \tag{2.59}$$

- ความถี่ปทัสถาน (load control normalized frequency)

$$\omega_{nL} = \frac{\omega}{\omega_{OL}} \tag{2.60}$$

- อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (load control characteristic impedance)

$$Z_{OL} = \omega_{OL}L = \frac{1}{\omega_{OL}C_{eq}} = \sqrt{\frac{L}{C_{eq}}} \tag{2.61}$$

- ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (load control Series-loaded quality factor)

$$Q_{SL} = \frac{\omega_{OL}L}{2R_f + R_{SS}} = \frac{1}{\omega_{OL}C_{eq}\left(2R_f + R_{SS}\right)} = \frac{Z_{OL}}{2R_f + R_{SS}} = \frac{\sqrt{L/C_{eq}}}{2R_f + R_{SS}} \tag{2.62}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 2.59-2.62 สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลช่วงก่อนจุดหลอดแสดงได้ดังสมการที่ 2.63

$$Z_{phL}(j\omega) = \frac{1 - LC_{eq}\omega^2 + j\omega(2R_f + R_{SS})C_{eq}}{j\omega C_{eq}} \tag{2.63}$$

$$= (2R_f + R_{SS})\left[1 + jQ_{SphL}\left(\omega_{nphL} - \frac{1}{\omega_{nphL}}\right)\right] = |Z_{phL}|e^{j\theta_{phL}} \tag{2.64}$$

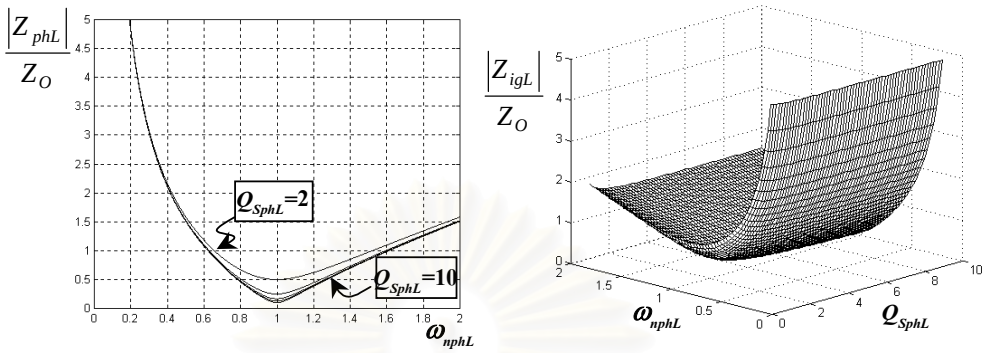
เมื่อ

$$\frac{|Z_{phL}|}{Z_{OphL}} = \sqrt{\frac{1}{Q_{SphL}^2} + \left[\omega_{nphL} - \frac{1}{\omega_{nphL}}\right]^2} \tag{2.65}$$

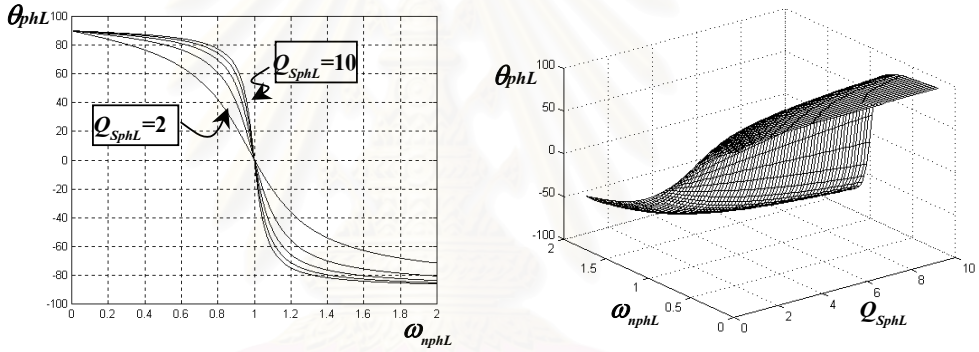
$$\theta_{phL} = arctan\left[Q_{SphL}\left(\omega_{nphL} - \frac{1}{\omega_{nphL}}\right)\right] \tag{2.66}$$

จากสมการที่ 2.65 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ปทัสถานช่วงอุ่นไส้-หลอด $(|Z_{phL}|/Z_O)$ กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ้นไส้หลอด (ω_{nphL}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{SphL}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.42 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยที่ ω_{nphL}=1 และจะมีค่ายิ่งสูงเมื่อ ω_{nphL} เข้าใกล้ศูนย์ จากสมการที่ 2.66 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ (θ_{phL}) กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (ω_{nphL}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{SphL}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.43 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า Q_{SphL} มุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ +90 ถึง -90 ที่ ω_{nphL}=1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ของ $|Z_{phL}|/Z_{OL}$ กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL}



รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ของ θ_{phL} กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL}

รูปคลื่นของกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอดจะมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์หรือองค์ประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ดังสมการที่ 2.69

$$i_{phL} = I_{phL}\ sin(\omega t - \theta_{phL}) \tag{2.69}$$

เมื่อ

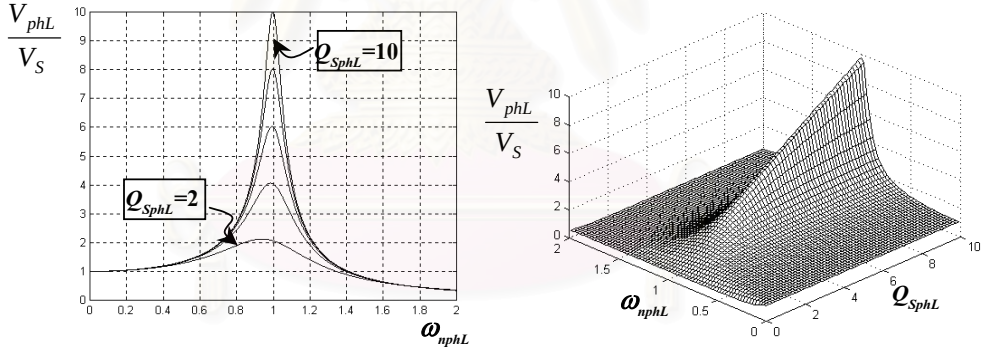
$$I_{phL} = \frac{V_S}{|Z_{phL}|} = \frac{V_S}{(2R_f + R_{SS})\sqrt{1+\left[Q_{SphL}\left(\omega_{nphL} - \frac{1}{\omega_{nphL}}\right)\right]^2}} \tag{2.70}$$

ในช่วงการอุ่นไส้หลอด เราต้องการแรงดันไฟฟ้าคร่อมหลอดขณะอุ่นไส้หลอดไม่สูงมาก เพื่อป้องกันการเกิดกระแสรุ่งแสง ในกรณีนี้สามารถแสดงฟังก์ชันการโอนย้ายของ V_{ig} กับ V_s ได้ดังสมการที่ 2.71

$$\frac{V_{phL}}{V_S}(j\omega) = \frac{1 + j\omega(R_f + R_{SS})C_T}{1 - LC_T\omega^2 + j\omega(2R_f + R_{SS})C_T} \tag{2.71}$$

$$\cong \frac{1 + j\dfrac{\omega_{nphL}}{2Q_{SphL}}}{1 - \omega_{nphL}^2 + j\dfrac{\omega_{nphL}}{Q_{SphL}}} \tag{2.72}$$

จากสมการที่ 2.72 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์โอนย้าย V_{phL}/V_S กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (ω_{nphL}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{SphL}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.44 จะเห็นว่าเมื่อ Q_{SphL} จะทำให้แรงดัน V_{phL} สูงขึ้นด้วย



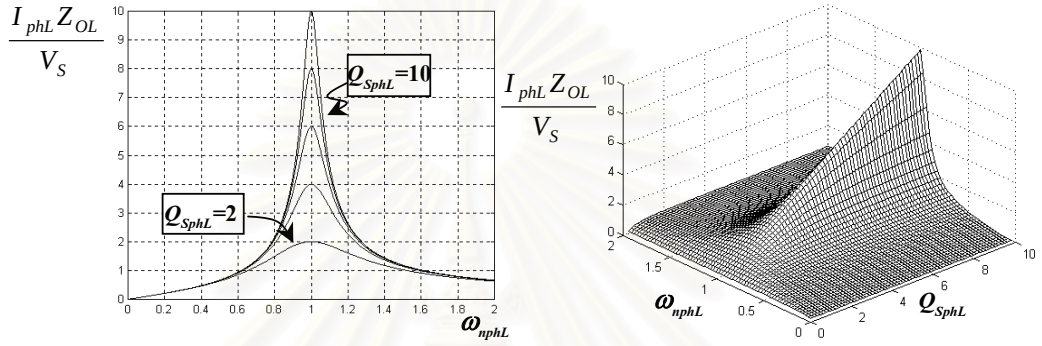
รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ของ V_{phL}/V_S กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL}

ฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสอุ่นไส้หลอด I_{ph} กับ V_S ดังสมการที่ 2.73

$$\frac{I_{phL}}{V_S}(j\omega) = \frac{j\omega C_T}{1 - LC_T\omega^2 + j\omega(2R_f + R_{SS})C_T} \tag{2.73}$$

$$= \frac{\dfrac{1}{(2R_f + R_{SS})}}{\left[1 + jQ_{SphL}\left(\omega_{nphL} - \dfrac{1}{\omega_{nphL}}\right)\right]} \tag{2.74}$$

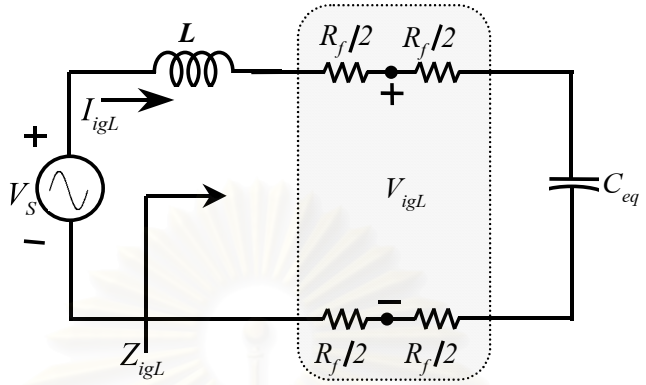
จากสมการที่ 2.74 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอุ่นไส้หลอดปทัสถาน $(I_{phL}Z_O/V_S)$ กับความถี่ปทัสถานช่วงอุ่นไส้หลอด (ω_{nphL}) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลดช่วงอุ่นไส้หลอด (Q_{SphL}) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-10 ดังแสดงในรูปที่ 2.45 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า Q_{SphL} จะทำให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์เพิ่มที่ V_S ค่าเดิม



รูปที่ 2.45 ความสัมพันธ์ของ $I_{phL}Z_{OL}/V_S$ กับ ω_{nphL} และ Q_{SphL}

2.9.4 <u>ช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์</u>

ช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงเพียงพอเพื่อจุดหลอดให้ติดสว่าง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อจุดหลอด คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในช่วงนี้ยังคงมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ ความต้านทานไส้หลอดทังสเตนเพิ่มจากช่วงอุ่นไส้หลอด 4.25 เท่า การสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด ทำได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ PTC thermistor ทำให้ความถี่ ω_O เพิ่มขึ้นเข้ามาใกล้ความถี่การสวิตช์ เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรสมมูลของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ในช่วงจุดหลอดสามารถละเลยค่าความต้านทานของ PTC thermistor ได้ แสดงวงจรสมมูลช่วงจุดหลอดดังรูปที่ 2.46 จะเห็นว่าวงจรสมมูลจะเหมือนกับวงจรสมมูลในช่วงจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ ส่วนที่แตกต่างกันคือความถี่การทำงานจะเปลี่ยนจากω_{ig} เป็น ω_{igL} และความต้านทานไส้หลอดจะเพิ่มตามการเพิ่มของอุณหภูมิ สามารถคำนวณได้เหมือนดังสมการที่ 2.42-2.51 เช่นกัน



รูปที่ 2.46 วงจรสมมูลช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์

เมื่อได้สมการการออกแบบสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทุดชนิดแล้ว การนำเอาสมการพื้นฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดตามความต้องการนั้นจะกล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์แตกต่าง ๆ กัน 3 แบบ การออกแบบอย่างเป็นระบบต้องพิจารณาเกณฑ์การออกแบบและผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยข้อกำหนดการออกแบบ ขีดจำกัดการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะเริ่มต้นจากการกำหนดช่วงของค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดเพื่อให้กำลังออกเท่ากับพิกัดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการกำหนดค่าอุปกรณ์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดโดยใช้ขีดจำกัดและพฤติกรรมการทำงานแตกต่างกัน

หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36W เมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงกำลังที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ทำได้แสงสว่างที่พิกัดมีค่าประมาณ 32W โดยจะ มี V_{lamp}=100V และ I_{lamp}=320mA โดยประมาณ การกำหนดความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องคำนึงถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย กล่าวคือหากความถี่การทำงานที่ต่ำกว่า 20 kHz อาจก่อให้เกิดเสียงรบกวนแก่ผู้ใช้ได้ ขณะเดียวกันความถี่สูงกว่า 50 kHz อาจเพิ่มปัญหาในด้านการรบกวนความถี่วิทยุและกำลังสูญเสียจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกความถี่อยู่ในช่วง 20 kHz – 50 kHz ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์เท่ากับ 33 kHz ขั้นตอนการออกแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 เกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

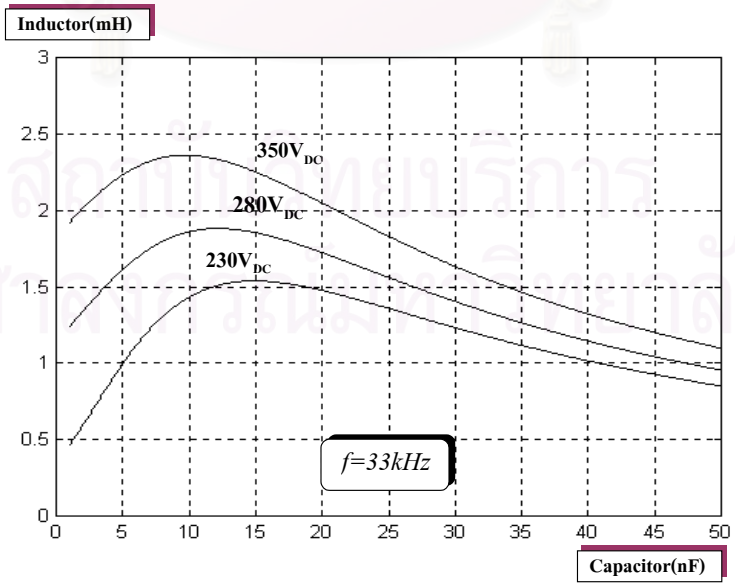
การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นจากการพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (line voltage, V_{supply}) และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ใช้ (PFC circuit) ส่วนคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้แก่ ความต้านทานไส้หลอด (R_f) และกำลังที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ (power output) ขีดจำกัดของการออกแบบประกอบด้วย แรงดันจุดหลอด (ignition voltage, V_{ig}) และมุมเฟสของกระแสออกที่ต้องล้าหลังแรงดัน V_S ของอินเวอร์เตอร์ทั้งช่วงก่อนและขณะจุดหลอดให้ติดสว่างและขณะทำงานปกติ

เพื่อให้สวิตช์เรโซแนนซ์เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (zero voltage switching, *ZVS*) และพฤติกรรมการทำงานของวงจรประกอบด้วย กระแสอุ่นไส้หลอดช่วงสตาร์ต (filament preheating current, I_{ph}) กระแสอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงทำงานปกติ (filament heating current, I_{fh}) และความถี่การทำงานต้องมีค่าที่เหมาะสม การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้นต้องใช้สมการสำหรับการออกแบบที่คำนวณจากวงจรสมมูลในบทที่ 2 ที่ประกอบด้วยสมการที่ใช้ในการออกแบบตามข้อกำหนด ขีดจำกัด และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแทนค่าแรงดันที่พิกัดในสมการที่ 2.22 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ที่ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีกำลังออกเท่ากับพิกัดสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าที่กำหนด (V_{DC}) ดังสมการที่ 3.1 รูปที่ 3.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ที่คำนวณจากสมการที่ 3.1 สำหรับ V_{DC} ที่กำหนด 3 ค่า

$$L = \frac{-b(C_{ig}) \pm \sqrt{b^2(C_{ig}) - 4a(C_{ig})k(C_{ig})}}{2a(C_{ig})} \tag{3.1}$$

เมื่อ

$$\left.\begin{aligned} a(C_{ig}) &= \omega^2 + \left(\omega^2 C_{ig}(R_{lamp} + R_f)\right)^2 \\ b(C_{ig}) &= -2\omega^2 R_{lamp}^2 C_{ig} \\ k(C_{ig}) &= \left(R_{lamp} + R_f\right)^2 + \omega^2\left(\left(2R_{lamp} + R_f\right)R_f C_{ig}\right)^2 \\ &\quad - \left(R_{lamp}^2 + \left(\omega R_{lamp} R_f C_{ig}\right)^2\right)\left|\frac{V_S}{V_{lamp}}\right|^2 \end{aligned}\right\} \tag{3.2}$$



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของ L และ C_{ig} ที่ทำให้หลอดมีกำลังด้านออกเท่ากับพิกัด

สำหรับสมการที่ใช้ในการออกแบบตามเงื่อนไขของขีดจำกัดประกอบด้วย สมการแรงดันจุดหลอดที่กำหนด (Constant open circuit voltage, V_{ig}) ดังสมการที่ 2.36 สมการกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด (Load current at ignition mode, I_{ig}) ดังสมการที่ 2.38 และมุมเฟสของกระแสออกต้องล้าหลังแรงดัน V_S ของอินเวอร์เตอร์ทั้งช่วงก่อนและขณะจุดหลอดให้ติดสว่าง และขณะทำงานปกติเพื่อให้สวิตช์เรโซแนนซ์เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (zero voltage switching, *ZVS*) จากสมการที่ 2.36 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} สำหรับแรงดันจุดหลอดที่กำหนด ได้สมการเช่นเดียวกับสมการที่ 3.1 โดยสัมประสิทธิ์ a, b, และ k ดังสมการที่ 3.3

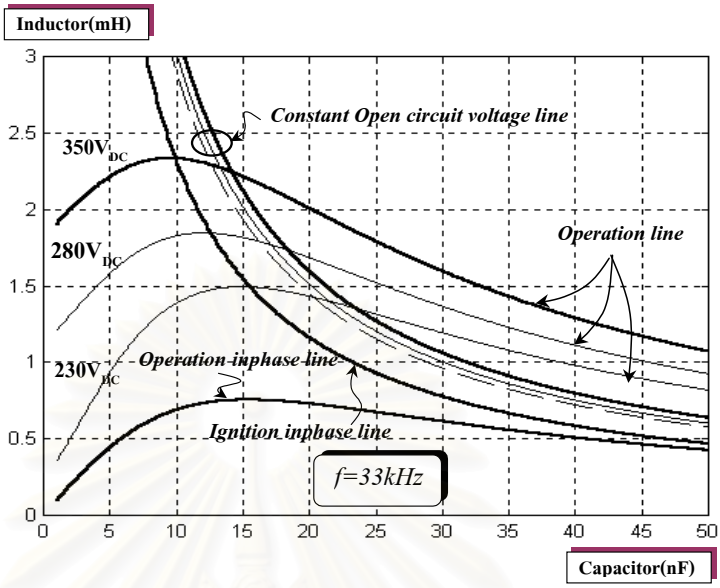
$$\left.\begin{aligned} a(C_{ig}) &= \omega^4 C_{ig}^2 \\ b(C_{ig}) &= -\left(2C_{ig}\omega^2\right) \\ k(C_{ig}) &= 1 + \left(2\omega R_f C_{ig}\right)^2 - \left(1 + \left(\omega R_f C_{ig}\right)^2\right)\left|\frac{V_S}{V_{ig}}\right|^2 \end{aligned}\right\} \qquad (3.3)$$

สำหรับเงื่อนไขขีดจำกัดของมุมเฟสขณะจุดหลอดและขณะทำงานปกติจะคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

$$\omega L \geq \frac{1}{\omega C_{ig}} \qquad (3.4)$$

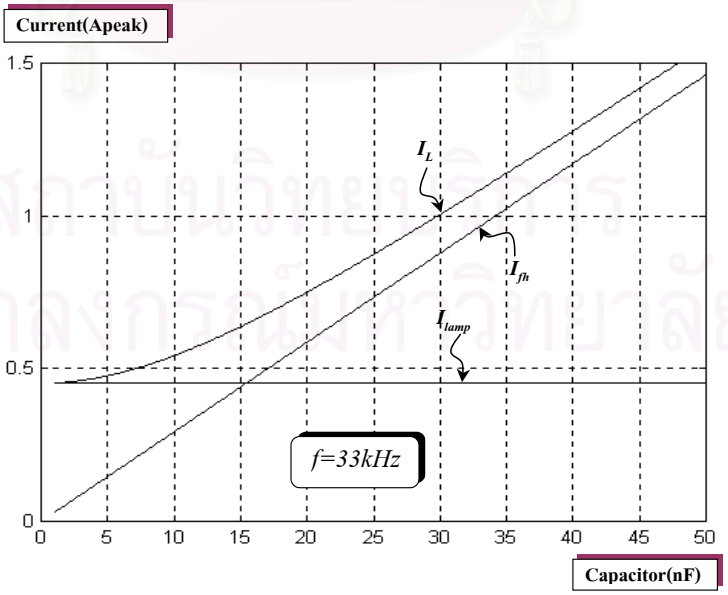
$$\omega L \geq \frac{\omega C R_{lamp}^2}{1 + \omega^2 C^2 R_{lamp}^2} \qquad (3.5)$$

รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ตามเงื่อนไขในสมการที่ 3.1, 3.3, 3.4 และสมการที่ 3.5 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดที่กำหนด และมุมเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ทั้งขณะจุดหลอดและขณะทำงานปกติสำหรับ V_{DC} ที่กำหนด 3 ค่า จะเห็นได้ว่า ช่วงของค่า L และ C_{ig} จะถูกจำกัดให้แคบลงอยู่ในช่วงระหว่างเงื่อนไขของมุมเฟสของกระแสออกกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ และแรงดันจุดหลอดที่กำหนดสูงสุด



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ที่ทำให้ได้ขีดจำกัดตามที่กำหนด

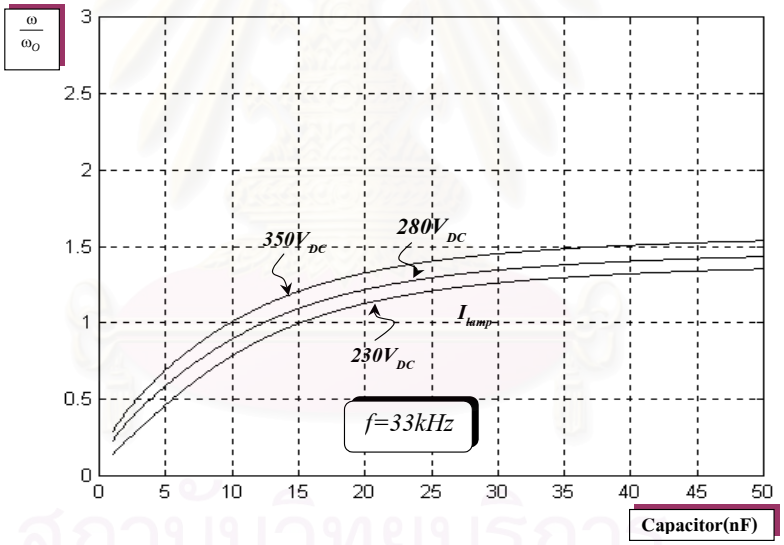
สำหรับพฤติกรรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้พฤติกรรมการทำงานที่เหมาะสม ประกอบด้วย สมการกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานปกติ กระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ ค่าตัวประกอบคุณภาพวงจรโหลดขณะทำงานปกติ ความถี่ปทัสถาน มุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ รูปที่ 3.3 – 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ กับตัวเก็บประจุ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่าง ๆ ของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ กับ C_{ig}

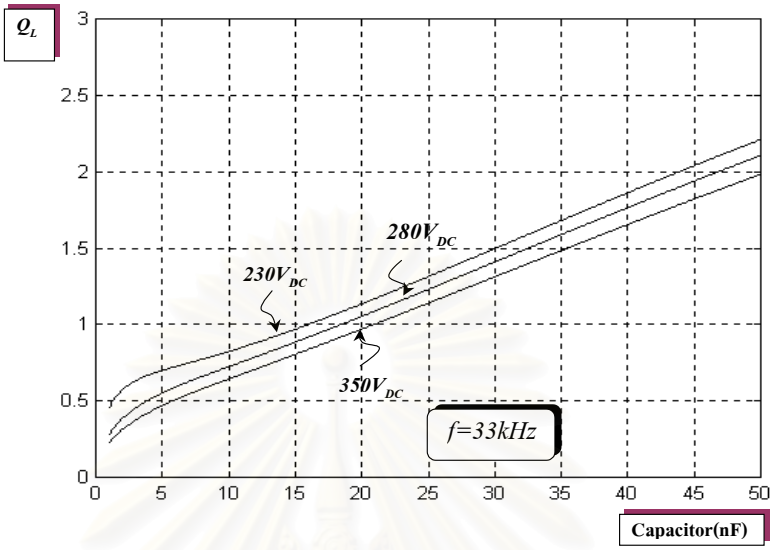
รูปที่ 3.3 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่าง ๆ ในวงจรโหลดกับ C_{ig} ที่กำลังออกของหลอดเท่ากับพิกัดที่กำหนดจากสมการที่ 2.18 – 2.21 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า C_{ig} โดยมีการปรับค่า L ให้เปลี่ยนตามจุด Operation line จะทำให้กระแส I_L, I_{fh} เพิ่มขึ้น โดยที่ I_{lamp} คงที่ นั่นหมายถึงกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าคงที่แต่กำลังไฟฟ้ารวมของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นโดยไม่ขึ้นกับแรงดันไฟตรงด้านเข้าพิกัดต่าง ๆ

จากสมการที่ 2.4 และ 2.6 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ω_n กับ C_{ig} สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า L และ C_{ig} ที่กำลังออกของหลอดเท่ากับพิกัดดังรูปที่ 3.4 จะเห็นว่า ถ้าเราลด C_{ig} ลง จะทำให้ ω_n ต่ำลงและมีโอกาศน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งหมายถึงกระแสออกของอินเวอร์เตอร์มีโอกาศนำหน้าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ในบางเงื่อนไขของการทำงาน การเลือกค่า L และ C_{ig} ควรเลือกที่ค่า $\omega_n \geq 1$ (จิโรจน์ พรวัฒนา, 2543)

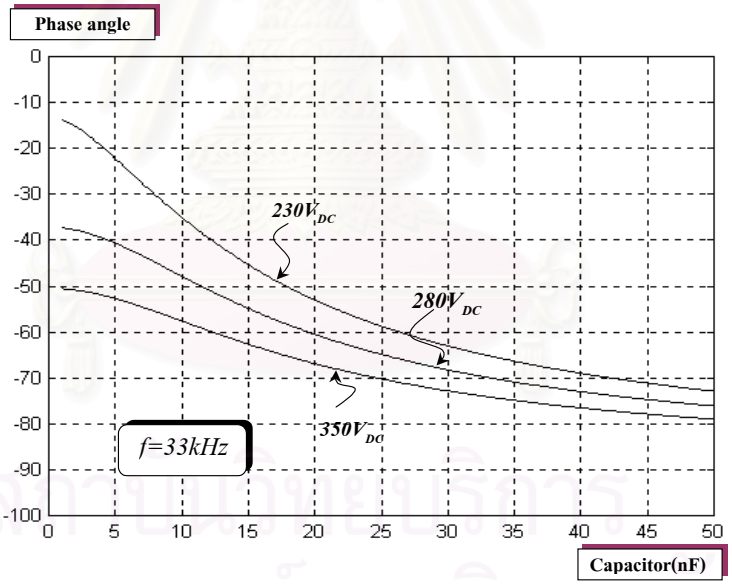


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ความถี่ปทัสถานกับ C_{ig} ที่ L เปลี่ยนและ V_{DC} 3 ค่า

จากสมการที่ 2.8 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง Q_L กับ C_{ig} สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า L และ C_{ig} ที่กำลังออกของหลอดเท่ากับพิกัดได้ผลดังรูปที่ 3.5 และจากสมการที่ 2.16 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง θ_{RUN} กับ C_{ig} ได้ผลดังรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าที่ค่า C_{ig} ต่ำ ๆ จะทำให้ Q_L มีค่าต่ำ และ มุม θ_{RUN} เข้าใกล้มุมศูนย์มากขึ้นแต่ไม่มีโอกาสลดลงเป็นศูนย์

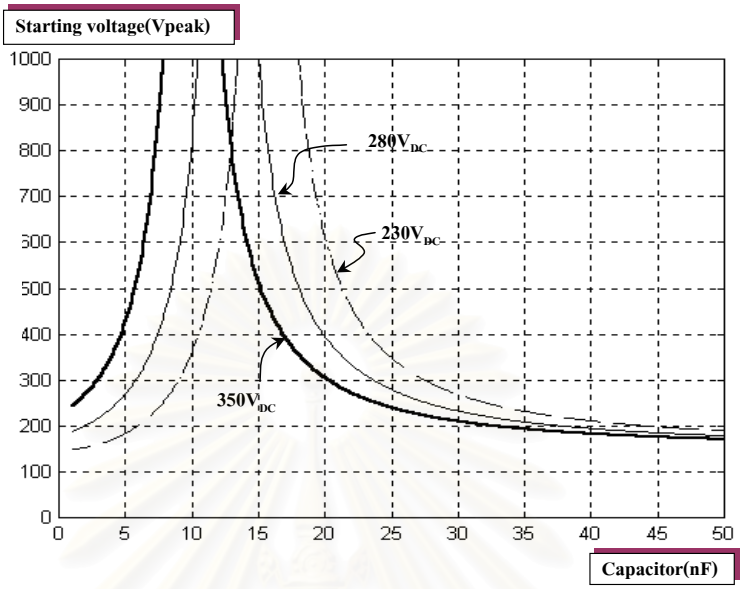


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_L กับ C_{ig}



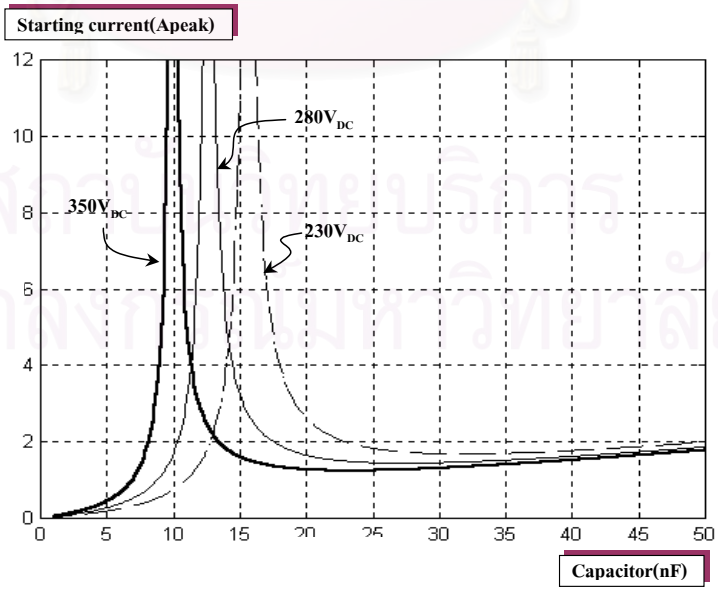
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ_{RUN} กับ C_{ig}

จากสมการที่ 2.36 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ig} กับ C_{ig} ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.7 กราฟดังกล่าวที่ค่า C_{ig} ต้องเข้าใจว่าจะต้องเลือกค่า L สำหรับแต่ละค่าของ C_{ig} เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังออกเท่ากับพิกัด จะเห็นว่าสำหรับช่วง $\omega_n \geq 1$ แรงดัน V_{ig} เพิ่มขึ้นเมื่อลดค่า C_{ig} ลง และสูงสุดที่จุด $\omega_n = 1$ ของแต่ละเงื่อนไข V_{DC}



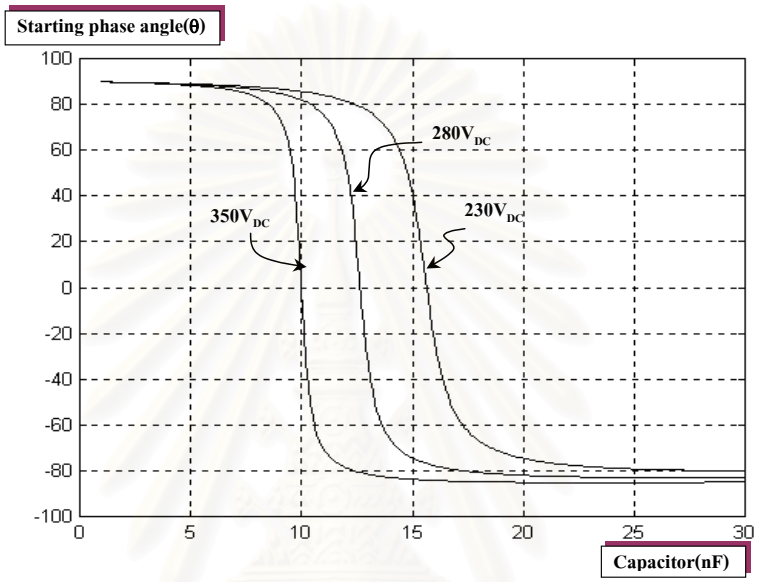
รูปที่ 3.7 แรงดันจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เทียบกับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า

จากสมการที่ 2.38 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{ig} กับ C_{ig} ได้ผลดังรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าได่ค่าในช่วง $\omega_n \geq 1$ การเลือกพิจารณาที่ ค่า C_{ig} ใหญ่จะได้กระแสจุดหลอดต่ำ แต่จะมีข้อเสียเรื่องกระแสอุ่นไส้หลอดถ้าเลือกค่า Cig เล็กจะทำให้กระแสอุ่นไส้หลอดและจุดหลอดสูงมากเกิดอันตรายแก่ไส้หลอดและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

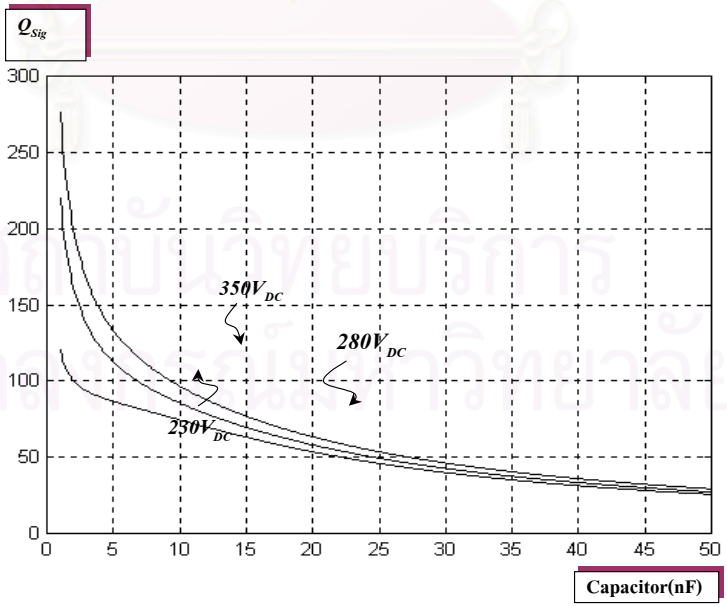


รูปที่ 3.8 กระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์เทียบกับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า

จากสมการที่ 2.33 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟส θ_{ig} กับ C_{ig} ได้ผลดังรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าถ้าเลือกค่า C_{ig} ไม่เหมาะสมจะทำให้กระแสจุดหลอดมีโอกาสนำหน้าแรงดัน และจากสมการที่ 2.29 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง Q_{Sig} กับ C_{ig} ได้ผลดังรูปที่ 3.10 จะเห็นว่า Q_{Sig} มีค่าสูงมากที่ค่า C_{ig} ต่ำ ๆ ดังนั้นในการเลือกค่า C_{ig} ต้องเลือกค่าที่เหมาะสม

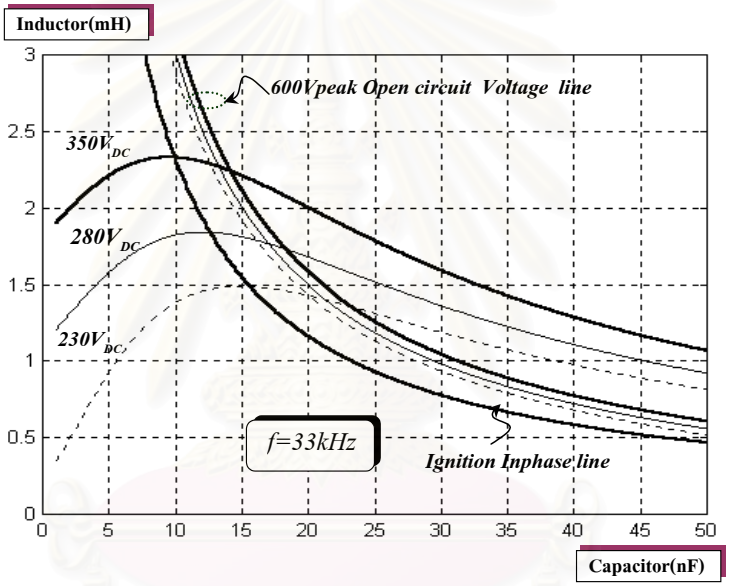


รูปที่ 3.9 มุมเฟสของกระแสจุดหลอดกับแรงดันออกอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ Q_{Sig} กับ C_{ig} ที่ V_{DC}

การออกแบบจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับค่า L และ C_{ig} จากรูปที่ 3.2 - 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ตามข้อกำหนดการออกแบบ ขีดจำกัดการออกแบบ และพฤติกรรมทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะเห็นว่าต้องเลือกค่า L และ C_{ig} ที่อยู่ในเส้น operation line ตามค่า V_{DC} ที่อยู่เหนือกับเส้น Ignition inphase line ส่วนขีดจำกัดมุมเฟสของของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ในขณะทำงานปกติสามารถละเลยได้ เนื่องจากเส้น Operation inphase line อยู่ใต้เส้น Ignition inphase line ทำให้ในภาวะที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานที่กำลังออกเท่ากับพิกัดกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ไม่มีโอกาสนำหน้าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ $\mathbf{C_{ig}}$ ที่พิจารณา I_{fh} ในการออกแบบ

จากรูปที่ 3.11 จะได้ช่วงของค่า L และ C_{ig} จะใช้ ที่ขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดที่สามารถสร้างขึ้นได้ และขีดจำกัดมุมเฟสของกระแสออกเทียบกับแรงดันออกอินเวอร์เตอร์ สำหรับความถี่ 33 kHz อย่างไรก็ดีในกรณีที่เราสามารถปรับความถี่ในขณะจุดหลอดได้เส้นขีดจำกัดมุมเฟสก็จะเปลี่ยนไป เพื่อทดสอบแนวทางการออกแบบจะจำลองการทำงานของวงจรได้โดยเลือกค่า L และ C_{ig} 2 จุด คือ จุด Ignition Inphase line กับจุด แรงดันจุดหลอดที่กำหนดเท่ากับ 600 V_{peak} ตัดกับ เส้น Operation line สำหรับ V_{DC} ที่กำหนดคือ 230 V, 280 V และ 350 V ได้ผลการออกแบบดังตารางที่ 3.1

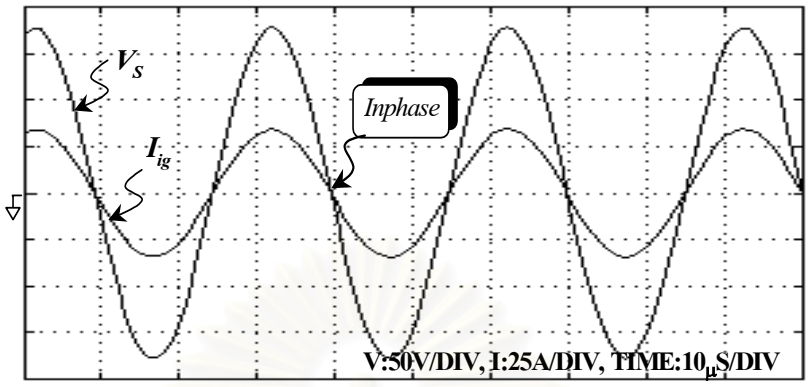
ตารางที่ 3.1 ค่าของ L และ C_{ig} ที่ใช้ทดสอบกำลังออกเท่ากับพิกัดสำหรับ V_{DC} 3 ค่า

V_{DC}	*Ignition inphase*		*Open circuit Voltage*	
	L(mA)	C_{ig}*(nF)*	*L(mA)*	C_{ig}*(nF)*
230	1.48	15.65	1.42	20.0
280	1.84	12.64	1.76	16.95
350	2.32	9.99	2.24	14.19

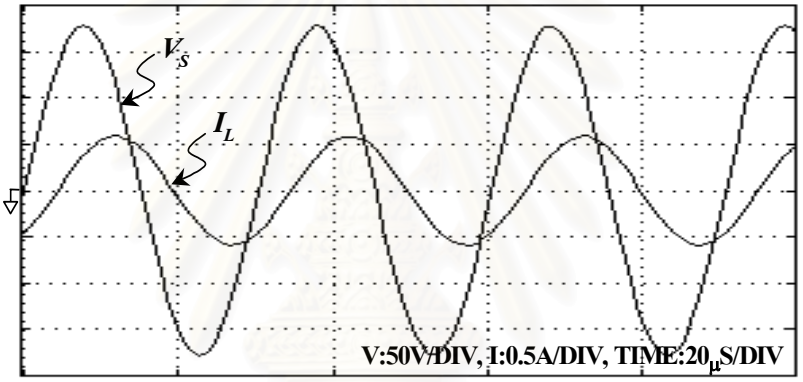
ได้มีการจำลองการทำงานของวงจรที่มีค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดตามตารางที่ 3.1 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบและเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ใกล้เคียงยิ่งขึ้นจึงมีการจำลองการทำงานโดยใช้แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นทั้งรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เลือกกรณี V_{DC} เท่ากับ 280V และความต้านทานไส้หลอดขณะร้อนในขณะทำงานปกติเป็นความต้านทานขณะไส้-หลอดร้อน (R_{fh}) โดยมีค่า 3 เท่าของ R_f ขณะเย็น (Bryce L. Hesterman and Thomas M. Poehlman, 1999) จะได้ R_{fh} เท่ากับ 3x2.5 = 7.5 Ω ความถี่การทำงานคงที่เท่ากับ 33kHz ได้ผลการจำลองการทำงานที่จุดตัดระหว่างเส้น ignition inphase line กับ Operation line และ จุดตัดระหว่างเส้น Ignition Open circuit voltage line กับ Operation line ดังนี้

3.2.1 จุดที่กระแสออกอินเฟสกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตอนจุดหลอด

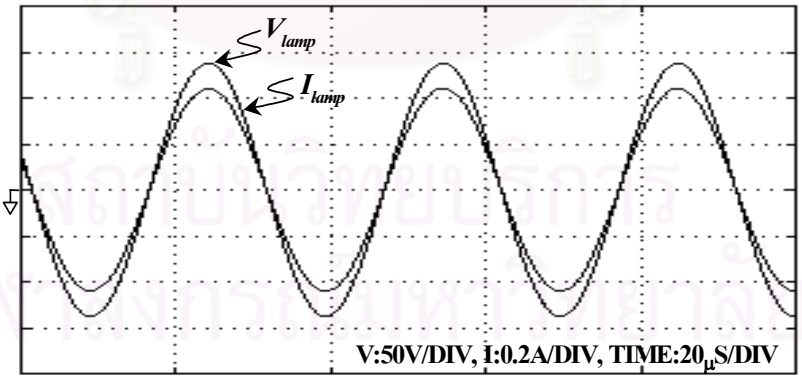
การจำลองการทำงานที่จุดตัดระหว่างเส้น ignition inphase line กับ Operation line จะได้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันสำหรับกรณีที่ V_S เป็นรูปคลื่นไซน์ในรูปที่ 3.12 – 3.15 และกรณี V_S เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.16 – 3.19 รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นของแรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดที่เส้น Inphase line จะเห็นว่ากระแสจะ inphase กับแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ กระแสออกสำหรับ L และ C_{ig} ค่านี้มีค่าสูงมาก ในการเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดไม่ควรเลือกใกล้เส้นนี้มาก รูปที่ 3.13 เป็นแรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานปกติโดยจำลองให้หลอดเป็นความต้านทานเชิงเส้น รูปที่ 3.14 แสดงแรง-ดันคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูอออเรสเซนต์จะเห็นว่า รูปคลื่นกระแสและแรงดันจะ Inphase กัน รูปที่ 3.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านตัวเก็บประจุขณะทำงานปกติ ซึ่งกระแสค่านี้ไม่ควรสูงมากเพราะอาจเป็นอันตรายแก่ไส้หลอด



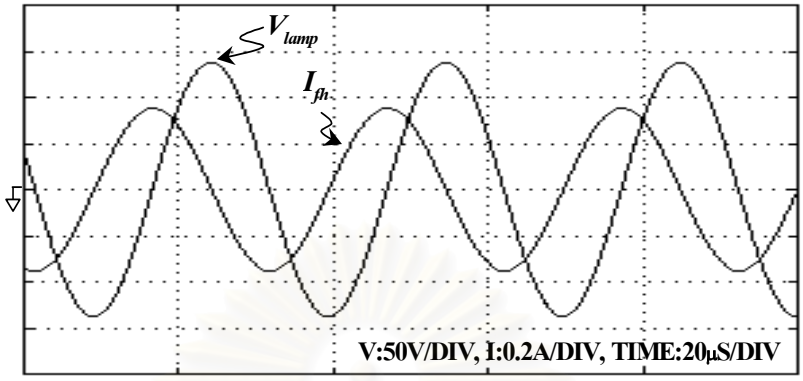
รูปที่ 3.12 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_Sเป็นไซน์



รูปที่ 3.13 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_Sเป็นไซน์

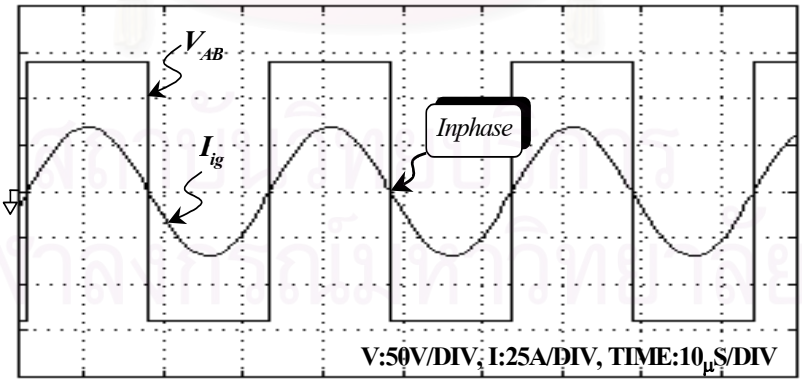


รูปที่ 3.14 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_Sเป็นไซน์

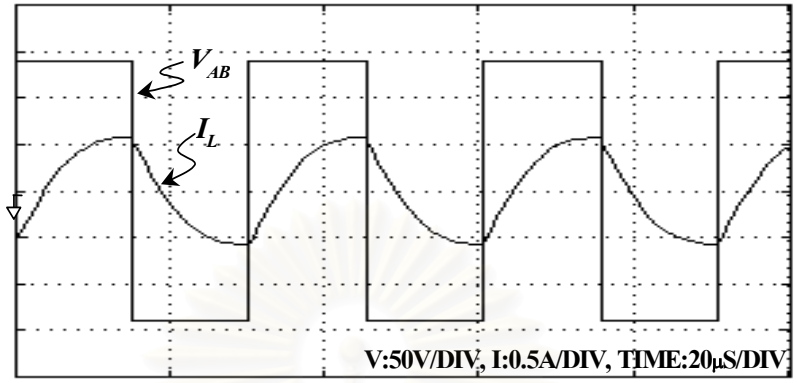


รูปที่ 3.15 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติกรณี V_Sเป็นไซน์

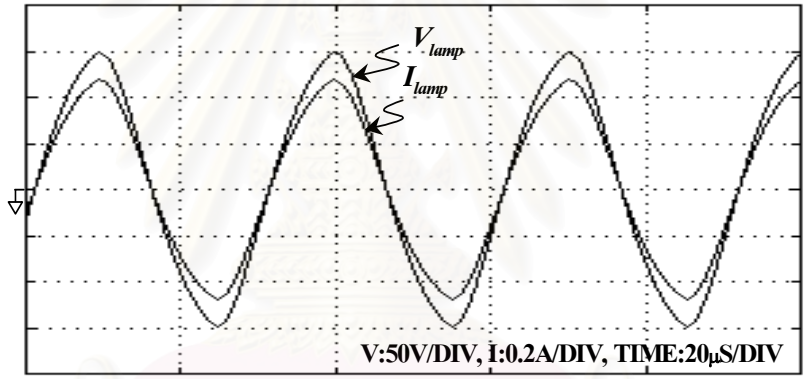
เมื่อเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.16 - 3.19 โดยที่ รูปที่ 3.16 แสดงการ Inphase ของแรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด เมื่อเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดที่เส้น Inphase line รูปที่ 3.17 แสดงแรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานปกติแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม รูปที่ 3.18 แสดงแรงดันคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม รูปที่ 3.19 แสดงแรงดันคร่อมหลอดและกระผ่านตัวเก็บประจุจะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนเป็นการป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ลักษณะกระแสจะมีส่วนของฮาร์-มอนิกปนอยู่แต่ขนาดของรูปคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก



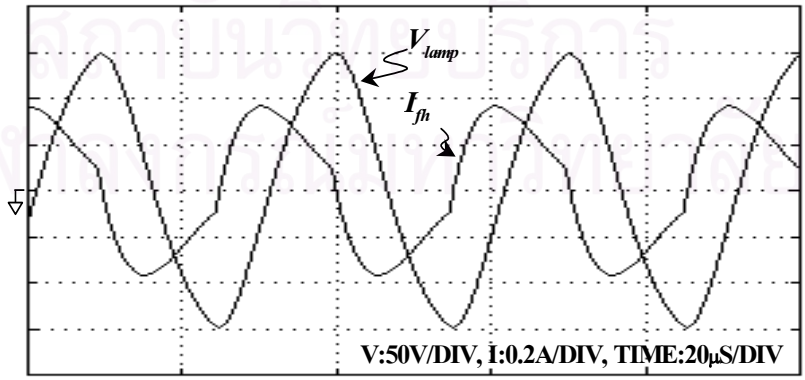
รูปที่ 3.16 กระแสออกและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_Sเป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.17 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_Sเป็นสี่เหลี่ยม



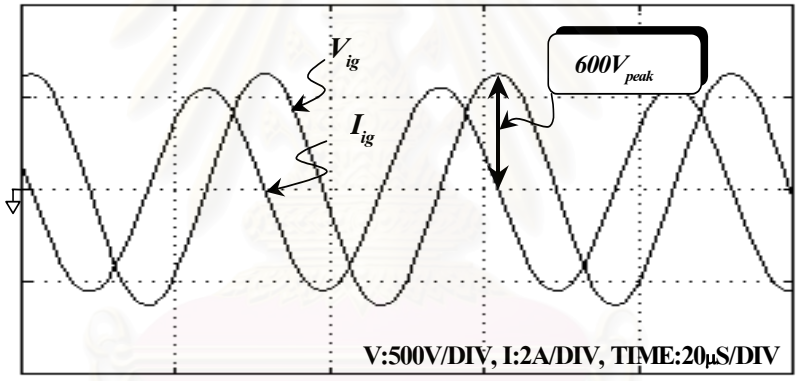
รูปที่ 3.18 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_Sเป็นสี่เหลี่ยม



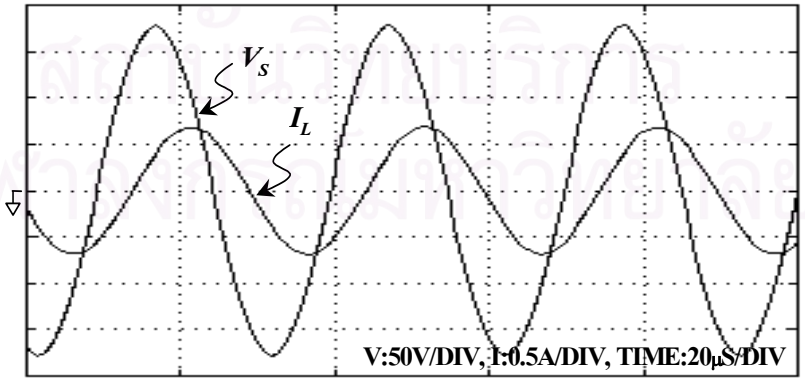
รูปที่ 3.19 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติกรณี V_Sเป็นสี่เหลี่ยม

3.2.2 จุดที่ให้แรงดันวงจรเปิดเท่ากับพิกัดที่กำหนด

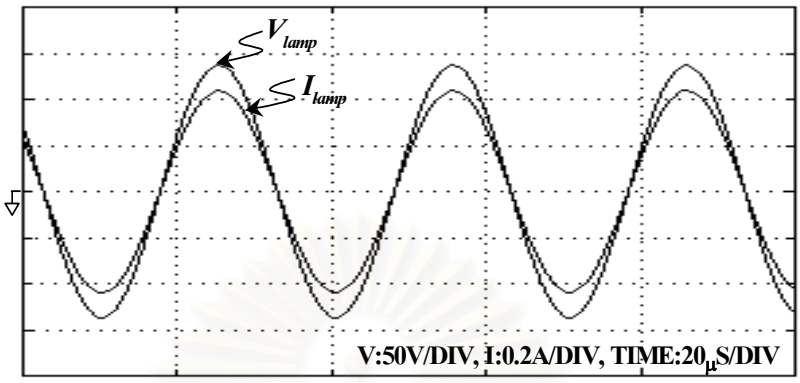
การจำลองการทำงานที่ที่จุดตัดระหว่างเส้น Open circuit Voltage line ที่กำหนดกับ Operation line จะได้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันต่าง ๆ เมื่อป้อนแรงดัน V_S เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 3.20 – 3.23 และแรงดัน V_S เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.24 – 3.27 โดยรูปที่ 3.20 แสดงแรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงจุดหลอด รูปที่ 3.21 แสดงแรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ในขณะทำงานปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.12 จะเห็นว่ากระแส I_L มีค่ายอดสูงขึ้นเล็กน้อย รูปที่ 3.22 แสดงแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งมีค่ากำลังออกเท่ากับพิกัด รูปที่ 3.23 แสดงแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านไส้หลอดขณะทำงานปกติหรือกระแสผ่านตัวเก็บประจุซึ่งมีค่ายอดสูงขึ้นจากกรณีในรูปที่ 3.15 เนื่องจากการลดลงของค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุขณะที่แรงดันคร่อมหลอดคงที่



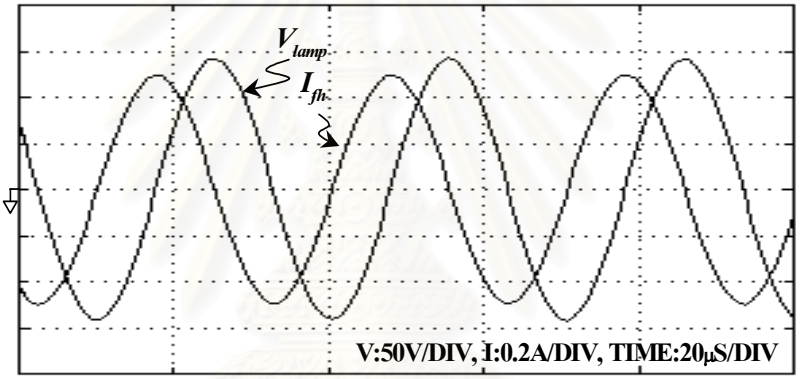
รูปที่ 3.20 แรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์



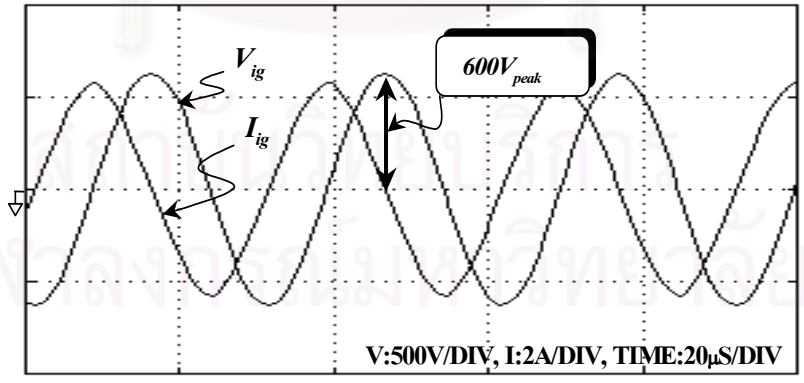
รูปที่ 3.21 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์



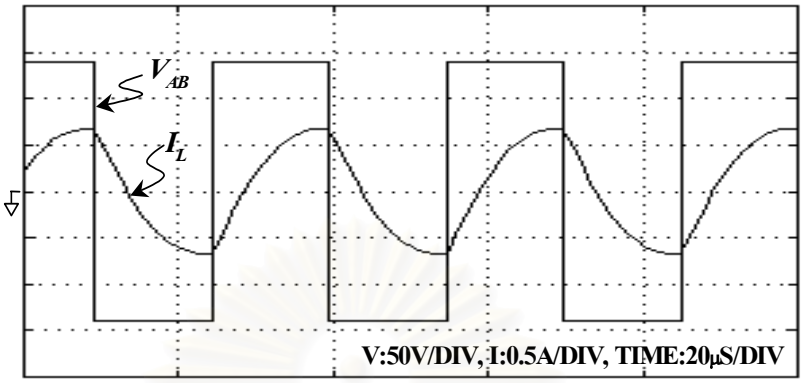
รูปที่ 3.22 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์



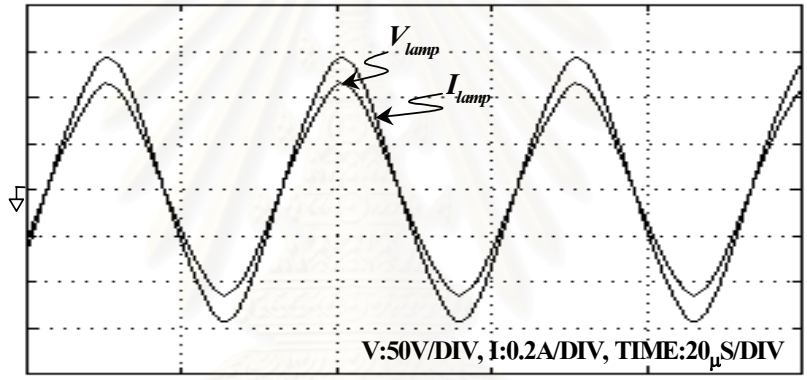
รูปที่ 3.23 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติกรณี V_S เป็นไซน์



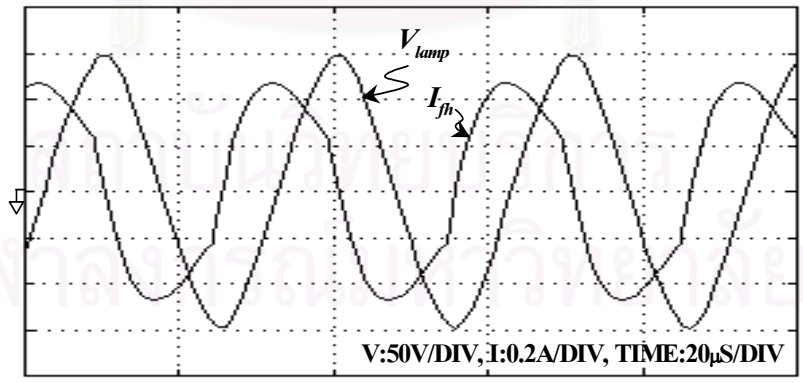
รูปที่ 3.24 แรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.25 แรงดันด้านออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.26 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.27 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม

สำหรับกรณีแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ในรูปที่ 3.24 จะเห็นว่าค่ายอดของกระแส I_L จะสูงกว่าค่ายอดในรูปที่ 3.21 เล็กน้อย และในรูปที่ 3.27 ลักษณะของรูปคลื่น

กระแสอุ่นไส้หลอดจะมีกระแสฮาร์มอนิกปนอยู่ สำหรับการเปรียบเทียบผลการป้อนแรงดันเข้าวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์กับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC} 3 ค่า โดยจะเปรียบเทียบค่ายอดและค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสและแรงดัน ดังตารางที่ 3.2 –3.4

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC}=230V

	จุด *Ignition inphase line*				จุด *Open circuit voltage*			
	Sine Voltage		*SquareVoltage*		*Sine Voltage*		*Square Voltage*	
	peak	*rms*	*peak*	*Rms*	*peak*	*rms*	*peak*	*rms*
$V_S(V)$	146.42	103.5	115	115	146.42	103.5	115	115
$I_L(A)$	0.649	0.459	0.6075	0.461	0.755	0.534	0.72	0.536
$V_{ig}(V)$	9028	6384	9000	6383	602	425	620	430
$I_{ig}(A)$	29.17	20.63	29.04	20.63	2.73	1.93	2.73	1.93
$V_{lamp}(V)$	141.42	100	146	99.89	141.42	100	147	100.6
$I_{lamp}(A)$	0.452	0.32	0.464	0.319	0.452	0.32	0.468	0.322
$I_{fh}(A)$	0.456	0.323	0.452	0.325	0.589	0.416	0.56	0.419
θ_{RUN}	45	45	36.61	36.61	42	42	31	31

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC} = 280V

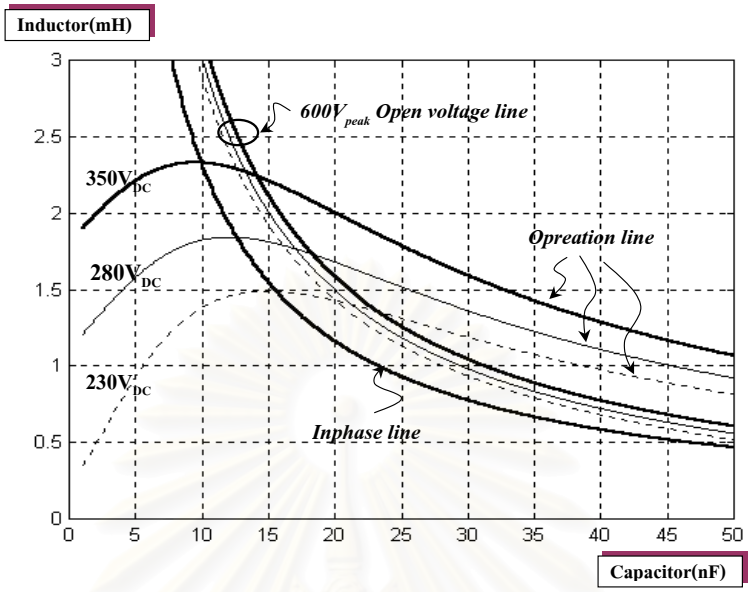
	จุด *Ignition inphase line*				จุด *Open circuit voltage*			
	Sine Voltahe		*SquareVoltage*		*Sine Voltage*		*Square Voltage*	
	Peak	*rms*	*peak*	*rms*	*peak*	*rms*	*Peak*	*Rms*
$V_S(V)$	178.25	126	140	140	178.25	126	140	140
$I_L(A)$	0.589	0.417	0.570	0.419	0.683	0.483	0.680	0.485
$V_{ig}(V)$	13395	9472	13350	9467	609	430	635	440
$I_{ig}(A)$	34.95	24.72	34.8	24.75	2.2	1.56	2.2	1.57
$V_{lamp}(V)$	141.4	100	148	100.1	141.4	100	147	100.6
$I_{lamp}(A)$	0.452	0.32	0.472	0.3204	0.452	0.32	0.472	0.322
$I_{fh}(A)$	0.369	0.261	0.365	0.264	0.497	0.352	0.469	0.355
θ_{RUN}	52	52	67.18	67.18	54	54	65	65

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันที่จุดต่าง ๆ สำหรับ V_{DC}=350V

	จุด *Ignition inphase line*				จุด *Open circuit voltage*			
	Sine Voltahe		*SquareVoltage*		*Sine Voltage*		*Square Voltage*	
	Peak	*rms*	*peak*	*rms*	*peak*	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	222.81	157.6	175	175	222.81	157.6	175	175
$I_L(A)$	0.541	0.383	0.562	0.385	0.62	0.439	0.65	0.441
$V_{ig}(V)$	21425	15150	21400	15150	608	430	612	432
$I_{ig}(A)$	44.33	31.35	44	31.35	1.78	1.265	1.88	1.27
$V_{lamp}(V)$	141.4	100	149	100.1	141.4	100	148	100.1
$I_{lamp}(A)$	0.452	0.32	0.472	0.32	0.452	0.32	0.442	0.32
$I_{fh}(A)$	0.291	0.206	0.281	0.21	0.415	0.294	0.388	0.296
θ_{RUN}	57	57	79.25	79.25	75	75	89	89

3.3 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด

เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงที่เพียงพอต่อการจุดหลอดให้ติดสว่างและไม่เกิดอันตรายต่อไส้หลอด แรงดันจุดหลอดที่เกิดจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ของวงจรสมมูลของโหลดขณะจุดหลอดจะทำให้หลอดนำกระแสได้และเกิดแสงสว่างออกมาที่กำลังออกเท่ากับพิกัด ขณะจุดหลอดจะพิจารณาขีดจำกัดการออกแบบซึ่งประกอบด้วย V_{ig} และ θ_{ig} เพื่อให้สวิตช์เรโซแนนซ์เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (zero voltage switching, *ZVS*) จากสมการที่ 3.1 และสัมประสิทธ์ดังสมการที่ 3.2 จะได้กำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์เท่ากับพิกัด สมการที่ 3.1- 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า 3 ค่า แรงดัน V_{ig} สูงสุดที่วงจรสามารถสร้างได้เท่ากับ $800V_{peak}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ที่ทำให้ I_{ig} และ V_S มีเฟส ตรงกันซึ่งจะไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} เมื่อพิจารณาแรงดันวงจรเปิดเท่ากับ $800V_{peak}$

การออกแบบวงจรโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องเลือกค่า L และ C_{ig} ที่อยู่ในเส้น operation line ในรูปที่ 3.28 ตามค่าของ V_{DC} ที่กำหนด โดยเลือกได้เฉพาะค่าในเส้นที่อยู่ระหว่างเส้น inphase line กับ $600V_{peak}$ open voltage line จะเห็นได้ว่าจำนวนเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาเพื่อเลือกค่าอุปกรณ์จะมีมากกว่าจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องเลือก เนื่องจากมีการกำหนดเกณฑ์ที่เป็นช่วงแทนที่จะเป็นค่าเดียวยกเว้นกำลังออกเท่ากับพิกัด การกำหนดค่า L และ C_{ig} ของวงจรโหลดที่เหมาะสมหลังจากทราบช่วงของ L และ C_{ig} แล้ว กำหนดโดยพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ

พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการพิจารณาเลือกค่า L และ C_{ig} ในขณะจุดหลอดจะใช้พฤติกรรมซึ่งประกอบด้วย แรงดันจุดหลอด กระแสจุดหลอด มุมเฟสของกระแสโหลดกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด และค่าตัวประกอบคุณภาพวงจรโหลดขณะจุดหลอด และขณะทำงานปกติจะให้พฤติกรรมซึ่งประกอบด้วย กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ กระอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ ความถี่ปทัสถาน ตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดขณะทำงานปกติ มุมเฟสขณะทำงานปกติ เพื่อให้ทราบถึงผลของค่า L และ C_{ig} ต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 สำหรับค่า V_{DC} ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.5 ช่วงของค่าองค์ประกอบพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

	V_{DC}		
	230	***280***	***350***
$V_{ig}(V_{peak})$	600 - 9028	600 - 13395	600 - 21425
$I_{ig}(A_{peak})$	2.73 - 29.17	2.2 - 34.95	1.78 - 44.33
Q_{Sig}	56 - 67	70 - 83	77 - 92
θ_{ig}	-75 - 0	-80 - 0	-83 - 0
$I_L(mA_{peak})$	658 - 760	615 - 660	540 - 630
$I_{fh}(mA_{peak})$	450 - 600	380 - 510	310 - 440
ω_n	1 - 1.2	1 - 1.23	1 - 24
Q_L	0.98 - 1.2	0.8 - 1	0.65 - 0.8
θ_{run}	-45 - -53	-50 - -57	-58 - -62

จากพฤติกรรมในตารางที่ 3.4 ถ้าเราให้ค่า C_{ig} เล็กจะมีผลทำให้แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดสูงเกินไป มุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกช่วงสตาร์ตน้อยและมีโอกาสนำหน้าถ้าเลือกไม่เหมาะสม ตัวประกอบคุณภาพวงจรโหลดตอนจุดหลอดสูงมาก และกระแสอุ่นไส้ช่วงทำงานปกติต่ำเกินไป ถ้าเลือกค่า C_{ig} ใหญ่เกินไปจะเกิดปัญหาเรื่องกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานปกติและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติสูง แต่ไม่มีปัญหาเรื่องมุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์

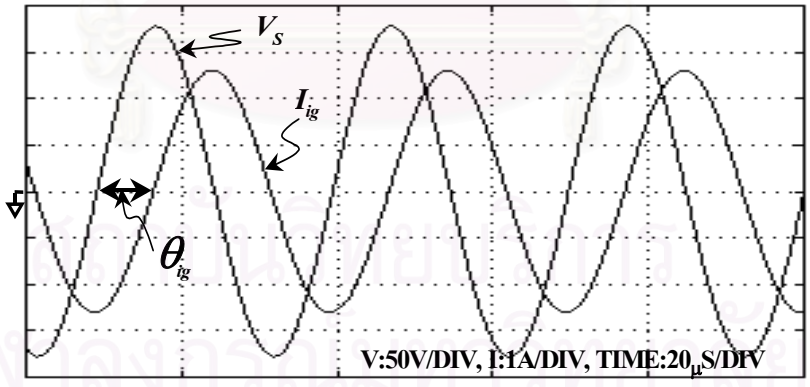
ดังนั้นในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด จะใช้ค่าของ L และ C_{ig} ที่อยู่ในระหว่างขอบเขตนี้ โดยให้ออกแบบให้แรงดันวงจรเปิดมีค่าเท่ากับ 800 V_{peak} กระแสอุ่นไส้หลอดไม่ควรเกิน 600 mA_{peak} มุมเฟสของกระแสออกไม่นำหน้าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด และห้ามต่ำกว่า 30° ขณะทำงานปกติ ค่า Q_L ควรต่ำ และ ค่า Q_{Sig} ไม่สูงมาก จะได้ค่า L และ C_{ig} สำหรับ V_{DC} 3 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 3.5

เมื่อจำลองการทำงานของวงจรที่มีค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดตามที่ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.5 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ใกล้เคียงยิ่งขึ้นจึงมีการจำลองการทำงานโดยใช้แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นทั้งรูป

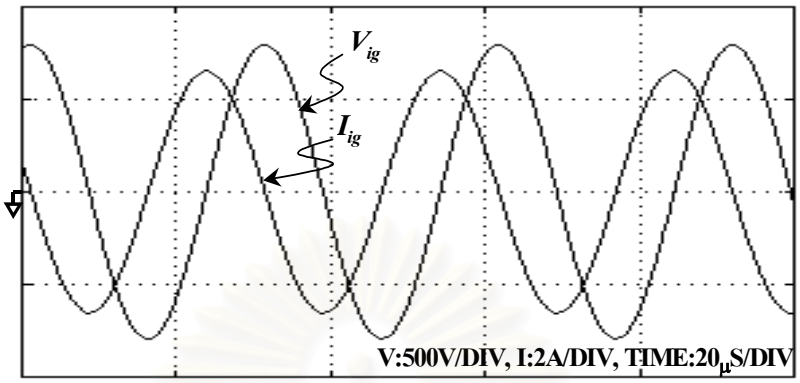
ตารางที่ 3.6 ค่า L และ C_{ig} ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด

$V_{DC}(V)$	$L(mH)$	$C_{ig}(nF)$
230	1.44	19.10
280	1.79	15.80
350	2.27	13.20

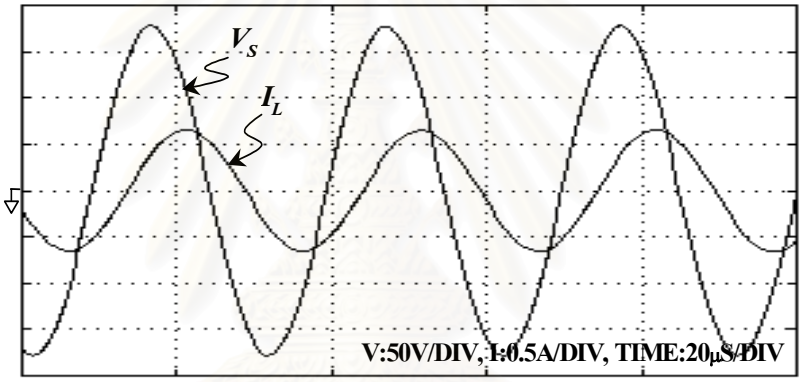
คลื่นไซน์และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เลือกกรณี V_{DC} เท่ากับ 280V และความต้านทาน R_f เท่ากับ 2.5 Ω ความถี่การทำงานคงที่เท่ากับ 33 kHz ดังแสดงในรูปที่ 3.29 – 3.38 โดยรูปที่ 3.29 เป็นแรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดขณะที่ V_S เป็นไซน์ จะเห็นว่ากระแสจุดหลอดจะมีค่าสูง แต่มุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ยังล้าหลังอยู่ รูปที่ 3.30 เป็นแรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด จะเห็นว่าแรงดันจุดหลอดมีค่าเท่ากับ $800V_{peak}$ และเมื่อผลการจำลองขณะทำงานปกติ ดังรูปที่ 3.31 - 3.33 จะเห็นว่ามีค่ากำลังออกเท่ากับพิกัดที่กำหนดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งกำหนด Vlamp=100V_{rms} และกระแสผ่านหลอดเท่ากับ 320 mA_{rms} และเมื่อเปลี่ยนแหล่งจ่าย V_S เป็นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.34-3.38 จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองเมื่อป้อนรูปคลื่นที่เป็นองค์ประกอบหลักมูลของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



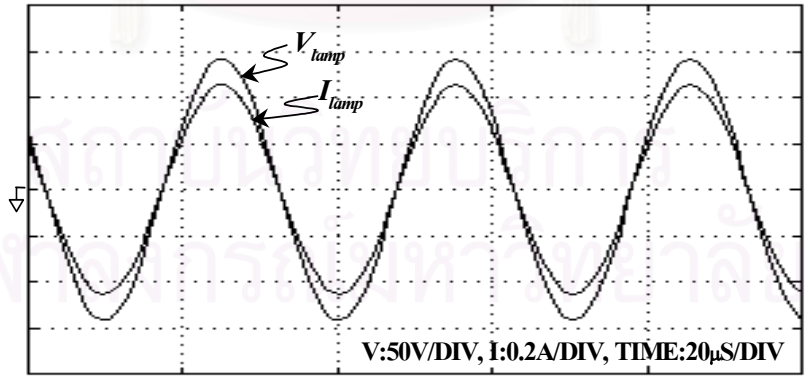
รูปที่ 3.29 แรงดันออกกับกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์



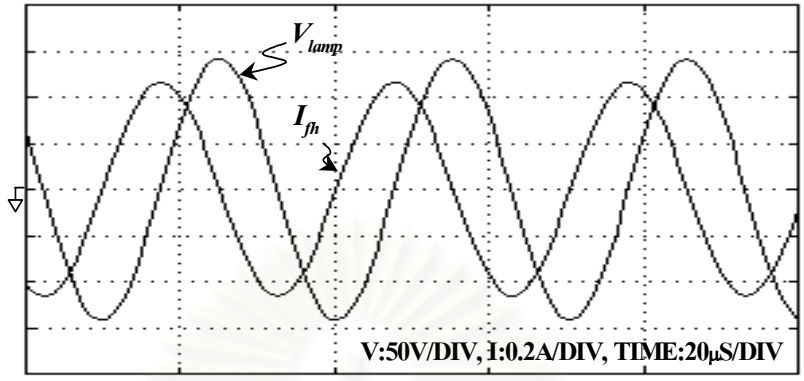
รูปที่ 3.30 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์



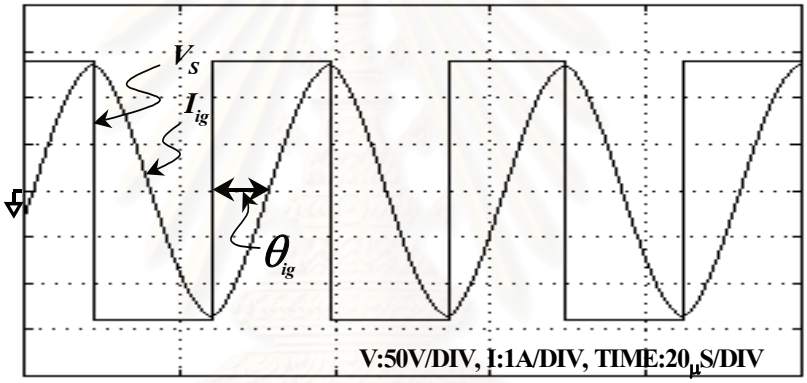
รูปที่ 3.31 แรงดันด้านออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์



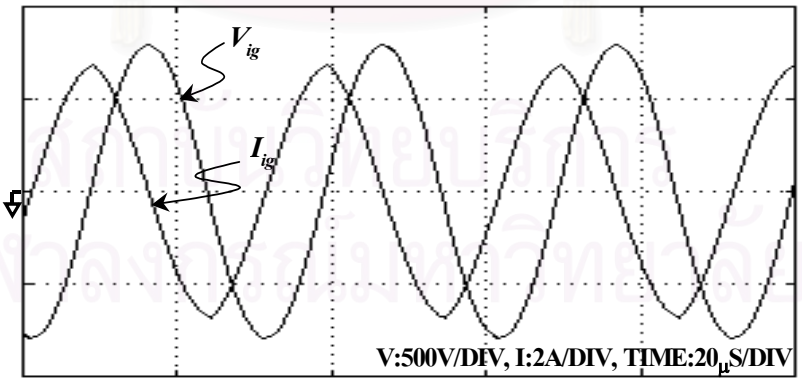
รูปที่ 3.32 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์



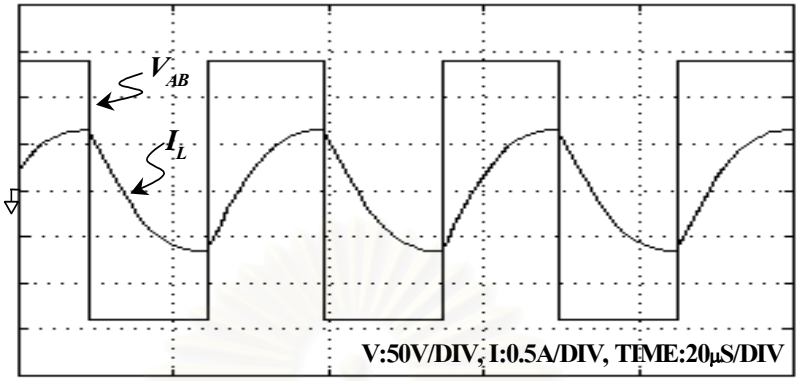
รูปที่ 3.33 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติกรณี V_S เป็นไซน์



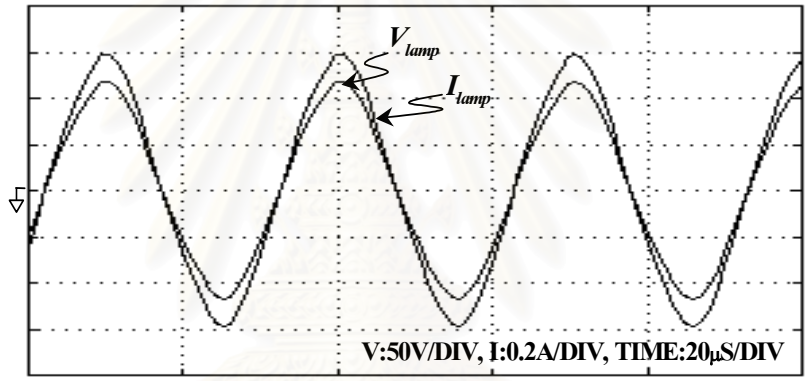
รูปที่ 3.34 แรงดันออกกับกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



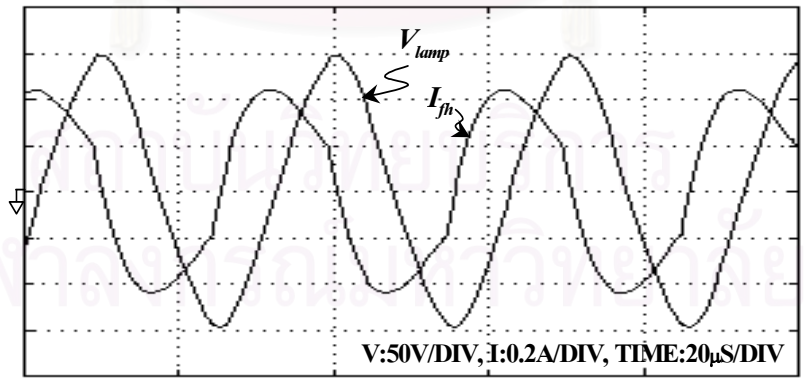
รูปที่ 3.35 แรงดันจุดหลอดและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.36 แรงดันด้านออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.37 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.38 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม

การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานเมื่อป้อนแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นไซน์กับสี่เหลี่ยม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.7 และ 3.8 จะเห็นว่าความแตกต่างกันของลักษณะรูปคลื่นทั้งสองเงื่อนไข จะแตกต่างกันที่ค่ายอดของรูปคลื่นเท่ากับสำหรับแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดจะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในขณะจุดหลอดสำหรับ V_{DC}=230V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	146.4	103.5	115	115
$V_{ig}(V)$	800	565.7	816	577.2
$I_{ig}(A)$	3.234	2.286	3.32	2.288
θ_{ig}	83.61	83.61	83.61	83.61
I_L	0.732	0.518	0.70	0.519
V_{lamp}	141.4	100	147	100.4
I_{lamp}	0.452	0.32	0.472	0.321
θ_{run}	54	54	32	32

ตารางที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในขณะจุดหลอดสำหรับ V_{DC} =280V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*Peak*	*rms*
$V_S(V)$	178.2	126	140	140
$V_{ig}(V)$	800	565.8	805.5	566.5
$I_{ig}(A)$	2.623	1.855	2.72	1.855
θ_{ig}	85.84	85.84	85.89	85.89
I_L	0.657	0.465	0.65	0.467
V_{lamp}	141.4	100	147	100.4
I_{lamp}	0.452	0.32	0.468	0.321
θ_{run}	54	54	66	66

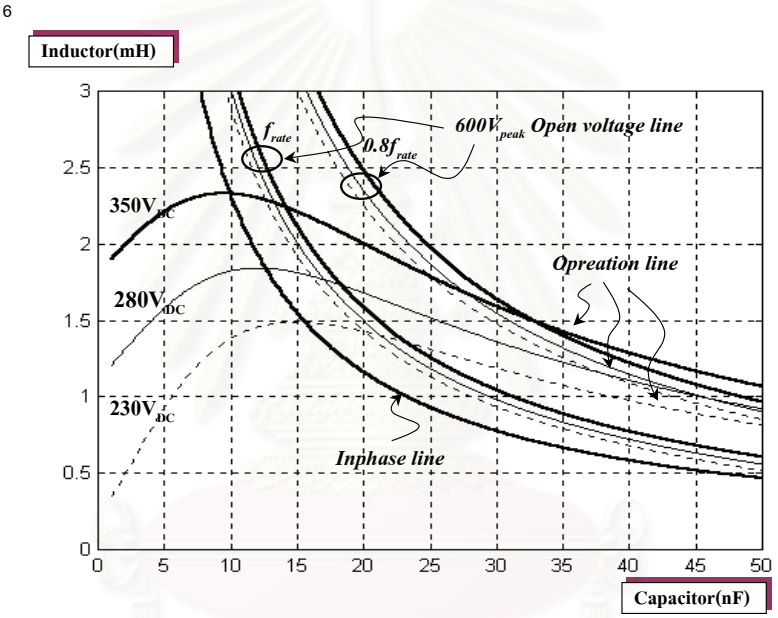
ตารางที่ 3.9 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในขณะจุดหลอดสำหรับ V_{DC} =350V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	222.8	157.5	175	175
$V_{ig}(V)$	800	565.7	800	563.2
$I_{ig}(A)$	2.16	1.532	2.3	1.532
θ_{ig}	86.82	86.82	86.79	86.79
I_L	0.60	0.425	0.63	0.427
V_{lamp}	141.4	100	147	100.1
I_{lamp}	0.452	0.32	0.472	0.321
θ_{run}	75	75	78	78

3.4 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ควบคุมด้วยความถี่

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้จะพิจารณาการทำงานในช่วงจุดหลอดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทำงานคือ ช่วงก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์จะต้องมีการอุ่นไส้หลอดให้มีอุณหภูมิสูงเพียงพอ และขณะจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการแรงดันจุดหลอดที่เหมาะสม หลอดฟลูออเรสเซนต์ก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอดยังไม่ติดสว่างทำให้พิจารณาความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าเป็นอนันต์ ดังแสดงวงจรสมมูลในรูปที่ 2.29 ความต้านทานของไส้หลอดทั้งสองข้างจะต่ออนุกรมกับ L และ C_{ig} ซึ่งค่าความต้านทานไส้-หลอดนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ การเพิ่มของความต้านทานไส้หลอดมีค่าประมาณ 4.25 เท่าของค่าความต้านทานตอนเย็น (ความต้านทานไส้หลอดขณะจุดหลอดเท่ากับ 4.25 ของความต้านทานไส้-หลอด)(Hammer E.E., 1999) บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ก่อนจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สิ่งแรกที่จะคำนึงถึงจะเหมือนกับการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอดคือ ข้อกำหนดการออกแบบ และขีดจำกัดการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ช่วงการทำงานปกติเมื่อนำมาต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ทำให้ได้กำลังออกเท่ากับพิกัด สำหรับช่วงอุ่นไส้หลอดและช่วงจุดหลอดฟลูออเรส-เซนต์จะใช้ขีดจำกัดและพฤติกรรมขณะอุ่นไส้หลอดและขณะจุดหลอดมาพิจารณา

การออกแบบช่วงการทำงานปกติเพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีกำลังออกเท่ากับพิกัด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ดังรูปที่ 3.1 แต่เมื่อพิจารณาขีดจำกัดการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ดังสมการที่ 3.2 – 3.5 จะได้ช่วง L และ C_{ig} ที่ความถี่เท่ากับขณะทำงานปกติคือ 33 kHz เมื่อเรามีการลดความถี่ขณะจุดหลอดในสมการที่ 3.3 จะทำให้มีช่วงของ L และ C_{ig} กว้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.39 การลดความถี่จากพิกัดเหลือ 0.8 เท่าของความถี่พิกัด การที่เราได้ช่วงของ L และ C_{ig} กว้างทำให้เราสามารถเลือกค่า L และ C_{ig} ได้หลายค่าก็จริง แต่เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานอย่างเป็นระบบแล้วจะเห็นว่าช่วงของการเลือกค่า L และ C_{ig} จะถูกบังคับโดยพฤติกรรมการทำงานทั้งช่วงก่อนจุดหลอดและขณะจุดหลอด



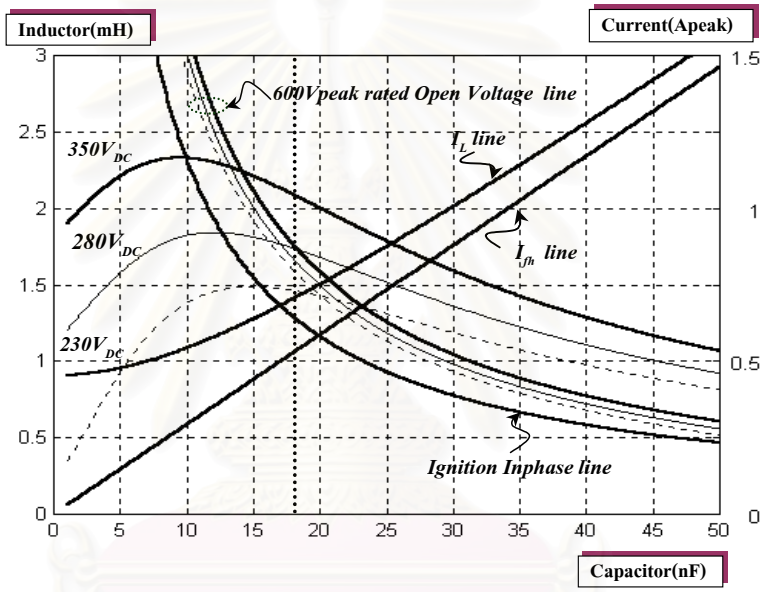
รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} เมื่อลดความถี่การทำงานเป็น $0.8f_{rated}$

จากรูปที่ 3.39 เมื่อลดความถี่การทำงานลงเพื่อให้แรงดัน V_{ig} เท่ากับ 600 V_{peak} เราสามารถเลือกค่า L และ C_{ig} ตามเส้น Operation line ทั้ง 3 ค่าของ V_{DC} ในช่วงระหว่าง เส้น Inphase line กับเส้น Ignition open voltage line ที่ความถี่ 0.8 เท่าของความถี่พิกัด ซึ่งจะเห็นว่าสามารถเลือกค่า C_{ig} ได้กว้างกว่าค่า L และกว้างกว่าการเลือกค่า C_{ig} ที่ความถี่พิกัด

การกำหนดค่า L และ C_{ig} ของวงจรโหลดสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ที่เหมาะสม โดยพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ ซึ่งประกอบด้วย กระแสอุ่นไส้หลอดก่อนจุดหลอด (I_{ph}) กระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ (I_{fh})

แรงดันคร่อมหลอดขณะอุ่นไส้หลอด (V_{ph}) มุมเฟส θ_{ph}, θ_{ig}, และ θ_{RUN} กระแสจุดหลอด (I_{ig}) และตัวประกอบคุณภาพวงจรโหลดอนุกรม (Q_{Sph})

ในการออกแบบค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ตามข้อกำหนด ขีดจำกัด และพฤติกรรมมากำหนด ที่ความถี่การทำงานเท่ากับ 33 kHz จะได้ช่วงของ L และ C_{ig} ดังรูปที่ 3.40 จะเห็นว่าค่ากระแสอุ่นไส้หลอดจะสูงมากเมื่อลดค่าตัวเก็บประจุลงตามลักษณะของแรงดัน V_{DC} 3 ค่า และได้ค่า L และ C_{ig} ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ที่พิจารณา I_{fh} ในการออกแบบ

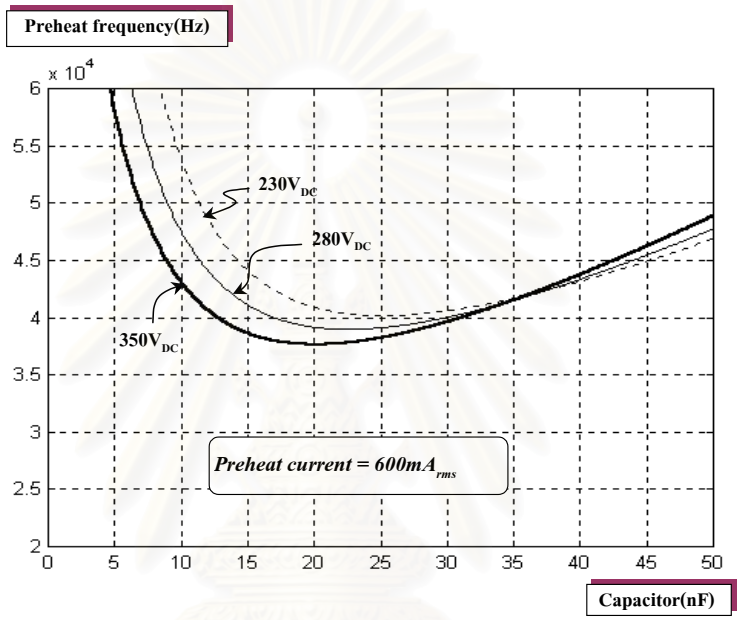
เมื่อได้ช่วงของค่า L และ C_{ig} แล้วต่อไปจะพิจารณาขณะอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยการกำหนดกระแสอุ่นไส้หลอดเพื่อเลือกความถี่ที่ต้องการในการสั่งให้อุ่นไส้หลอด ในวิทยานิพนธ์จะเลือกกระแสอุ่นไส้หลอด 600 mA_{rms} ซึ่งเป็นกระแสที่ทำให้มีการ glow ของไส้หลอด

เมื่อกำหนด I_{ph} แล้ว จะใช้สมการที่ 2.52 คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ig} และ f_{ph} ในช่วงอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ได้สมการที่ 3.13 ที่มีสัมประสิทธิ์ตามสมการที่ 3.14 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_{ph} และ C_{ig} ดังรูปที่ 3.41

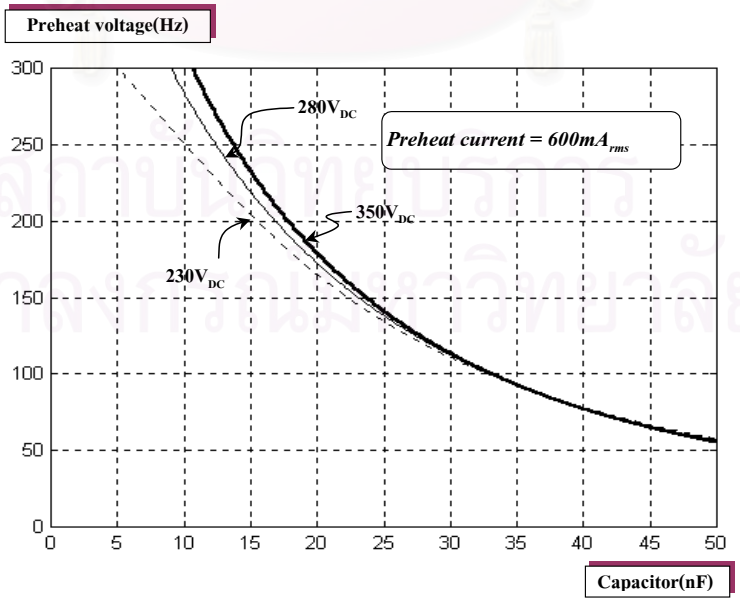
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{-b(L,C_{ig}) \pm \sqrt{b^2(L,C_{ig}) - 4a(L,C_{if})k}}{2a(L,C_{ig})}} \qquad (3.13)$$

เมื่อ

$$\left.\begin{aligned} a(L,C_{ig}) &= (LC_{ig})^2 \\ b(L,C_{ig}) &= -2LC_{ig} + (2R_f C_{ig})^2 - C_{ig}^2\left[\frac{V_s}{I_{ph}}\right]^2 \\ k &= 1 \end{aligned}\right\} \qquad (3.14)$$



รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_{ph} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า เมื่อ I_{fh} เท่ากับ $600mA_{rms}$



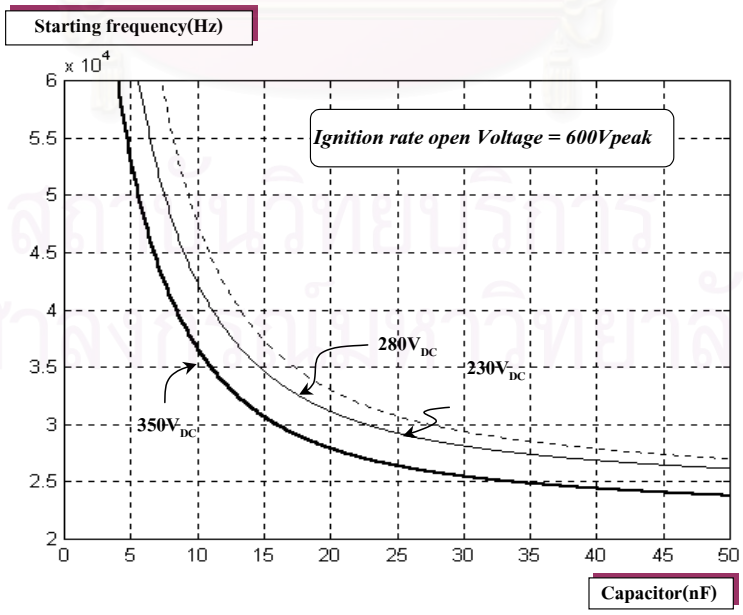
รูปที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ph} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า เมื่อ I_{fh} เท่ากับ $600mA_{rms}$

<u>ตารางที่ 3.10</u> ช่วง f_{ph} และ V_{ph} ที่กระแส $I_{ph} = 600mA_{rms}$ ในช่วง L และ C_{ig} ที่ต้องการ

$V_{DC}(V)$	$f_{ph}(kHz)$	$V_{ph}(V_{peak})$
230	40.9-43.5	165-200
280	40.0-43.3	188-246
350	39.0-43.2	243-300

จากสมการที่ 2.36 สามารถคำนวณหาสัมพันธ์ระหว่าง C_{ig} กับ f ในช่วงจุดหลอดหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อให้แรงดันจุดหลอดมีค่าคงที่เท่ากับที่กำหนดคือ $600V_{peak}$ ได้ดังสมการที่ 3.13 โดยมีสัมประสิทธิ์ดังสมการที่ 3.15 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ig} กับ f ได้ดังรูปที่ 3.43

$$\left.\begin{aligned} a(L,C_{ig}) &= (LC_{ig})^2 \\ b(L,C_{ig}) &= -2LC_{ig} + (2R_f C_{ig})^2 - (R_f C_{ig})^2 \times \left[\frac{V_s}{V_{ig}}\right]^2 \\ k(L,C_{ig}) &= 1 - \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2 \end{aligned}\right\} \qquad (3.15)$$



รูปที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_{ig} กับ C_{ig} ที่ V_{DC} 3 ค่า เมื่อ V_{ig} เท่ากับ $600V_{peak}$

ตารางที่ 3.11 ช่วง f_{ig} ที่ $V_{ig} = 600V_{peak}$ ในช่วง L และ C_{ig} ที่ต้องการ

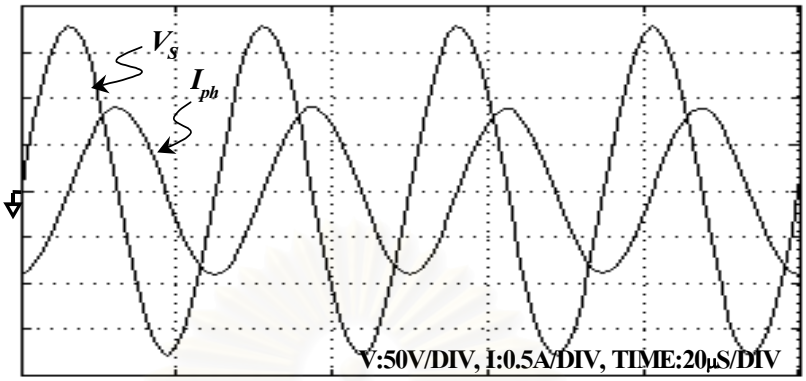
$V_{DC}(V)$	$f_{ig}(kHz)$
230	33-36.8
280	33-37.5
350	31-36.7

จากตารางที่ 3.10 และ 3.11 เราสามารถเลือกความถี่การอุ่นไส้หลอด ความถี่การจุดหลอดตามช่วงของค่า L และ C_{ig} ที่ใช้พฤติกรรมการทำงานกำหนดได้หลายค่า การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยความถี่ จะเลือกค่า L และ C_{ig} ที่อยู่ในช่วงขอบเขตดังรูปที่ 3.40 ทำให้ได้ความถี่ดังตารางที่ 3.12 สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ค่า

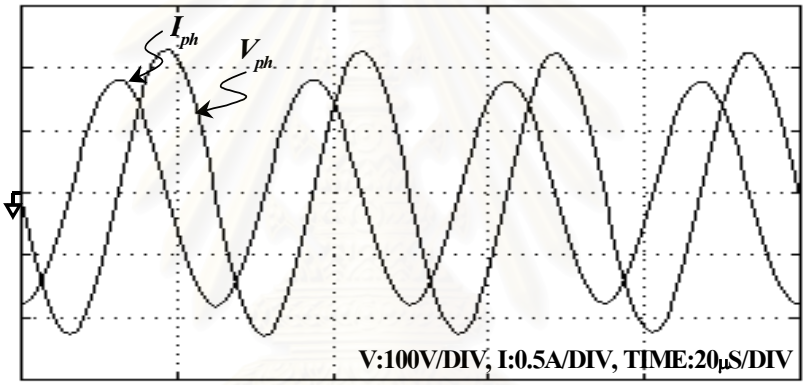
ตารางที่ 3.12 ค่า L, C_{ig},f_{ph}, และ f_{ig} สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ค่า

V_{DC}	$L(mH)$	$C_{ig}(nF)$	f_{ph}	f_{ig}
230	1.44	19.10	40-43	34
280	1.79	15.80	40-43	34
350	2.27	13.20	40-43	34

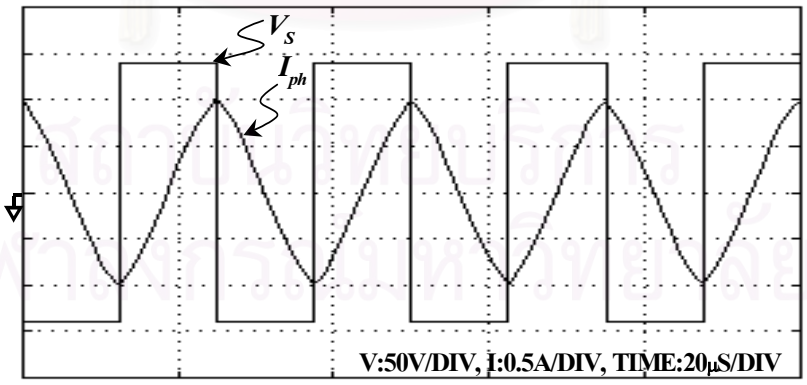
รูปที่ 3.44-3.51 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรที่มีค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดตามที่ออกแบบไว้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.12 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ใกล้เคียงยิ่งขึ้นจึงมีการจำลองการทำงานโดยใช้แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นทั้งรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เลือกกรณี V_{DC} เท่ากับ 280 V และความต้านทาน R_f ขณะเย็นเท่ากับ 2.5 Ω และ R_{fh} ขณะร้อนเป็น 4.25 เท่าของ R_fขณะเย็น โดยรูปที่ 3.44 แสดงแรงดันออกเป็นไซน์และกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอด ซึ่งกระแสออกของอินเวอร์เตอร์คือกระแสอุ่นไส้หลอด รูปที่ 3.45 แสดงรูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้-หลอดขณะอุ่นไส้หลอดเมื่อป้อนแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นไซน์ จะเห็นว่าเมื่อค่าตามที่กำหนดคือ $600mA_{rms}$ และเมื่อเปลี่ยนแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีค่าใกล้กับผลการจำลองเมื่อเป็นรูปคลื่นไซน์



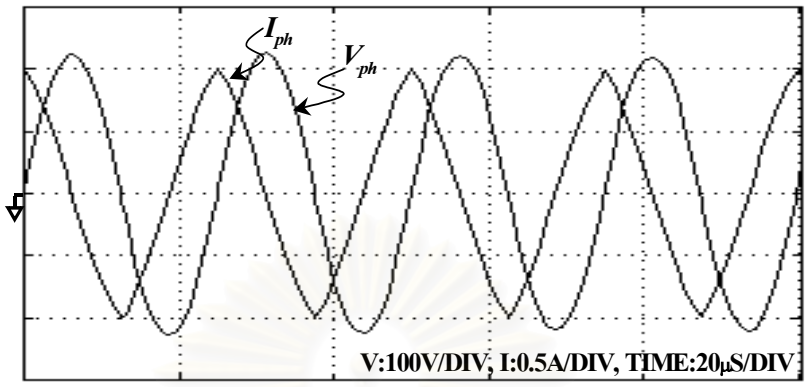
รูปที่ 3.44 แรงดันออกกับกระแสออกอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นไซน์



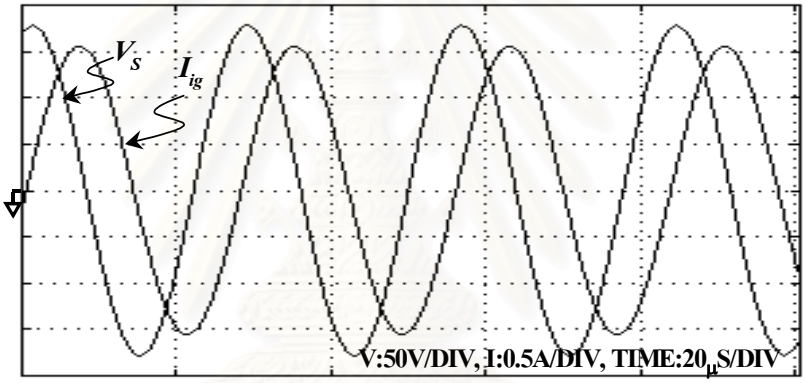
รูปที่ 3.45 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นไซน์



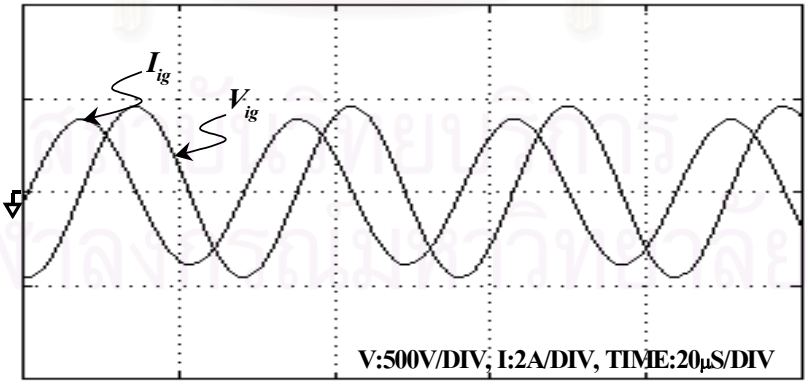
รูปที่ 3.46 แรงดันออกกับกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



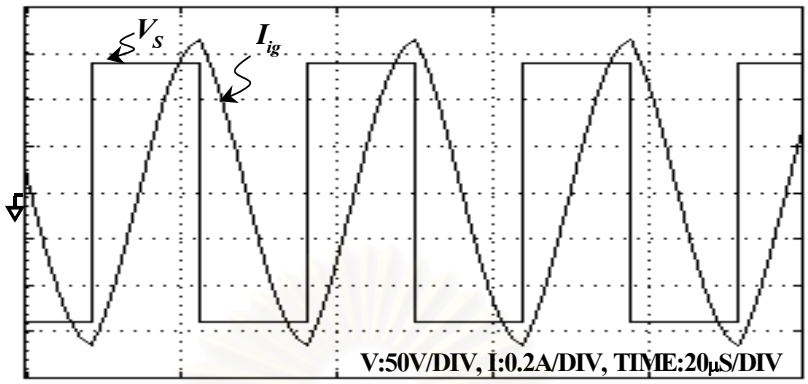
รูปที่ 3.47 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



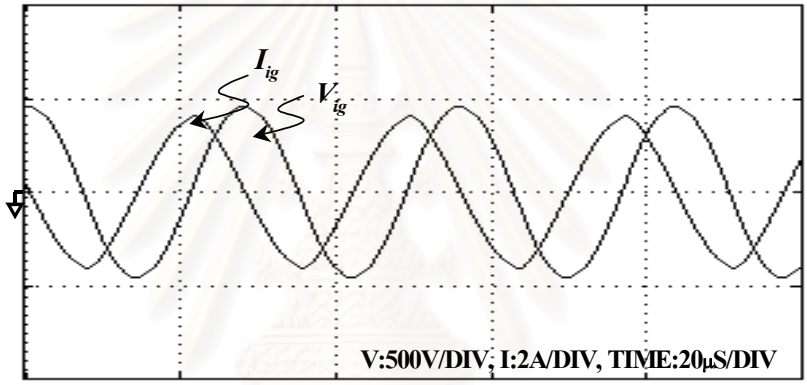
รูปที่ 3. 48 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์



รูปที่ 3.49 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์



รูปที่ 3. 50 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3. 51 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.13 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สำหรับ V_{DC} = 230 V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*Peak*	*Rms*
$V_S(V)$	146.4	103.5	115	115
$V_{ph}(V)$	180.8	130	190	134
$I_{ph}(A)$	0.840	0.6	0.96	0.634
$V_{ig}(V)$	615	435.3	598	435.4
$I_{ig}(A)$	2.35	1.66	2.44	1.65
θ_{ph}	77.5	77.5	77.5	77.5
θ_{ig}	72.2	72.2	72.1	72.1

ตารางที่ 3.14 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สำหรับ V_{DC} = 280 V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	178.2	126	140	140
$V_{ph}(V)$	204	145	212	150
$I_{ph}(A)$	0.84	0.6	0.95	0.612
$V_{ig}(V)$	616.8	432.2	593	436
$I_{ig}(A)$	1.964	1.389	2.080	1.387
θ_{ph}	88	88	91	91
θ_{ig}	72	72	76	76

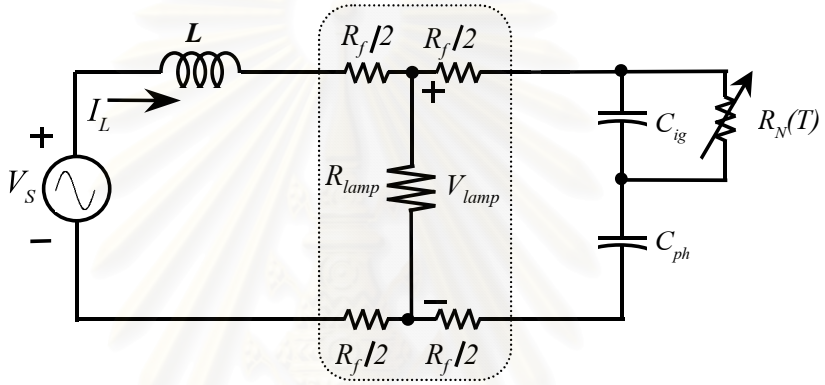
ตารางที่ 3.15 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ สำหรับ V_{DC} = 350 V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	222.8	157.5	175	175
$V_{ph}(V)$	250	178	257	182
$I_{ph}(A)$	0.84	0.6	0.98	0.65
$V_{ig}(V)$	611.9	432.7	595	432.8
$I_{ig}(A)$	1.646	1.164	1.76	1.16
θ_{ph}	88	88	94	94
θ_{ig}	71.4	71.4	71.5	71.5

ตารางที่ 3.13 - 3.15 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของวงจรขณะอุ่นไส้หลอด ขณะจุดหลอด และขณะทำงานปกติ เมื่อรูปคลื่นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นไซน์และสี่เหลี่ยม จะเห็นว่าได้ผลใกล้เคียงกัน แตกต่างกันที่เมื่อเปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นสี่เหลี่ยมค่ายอดขององค์ประกอบอื่น ๆ จะสูงขึ้น

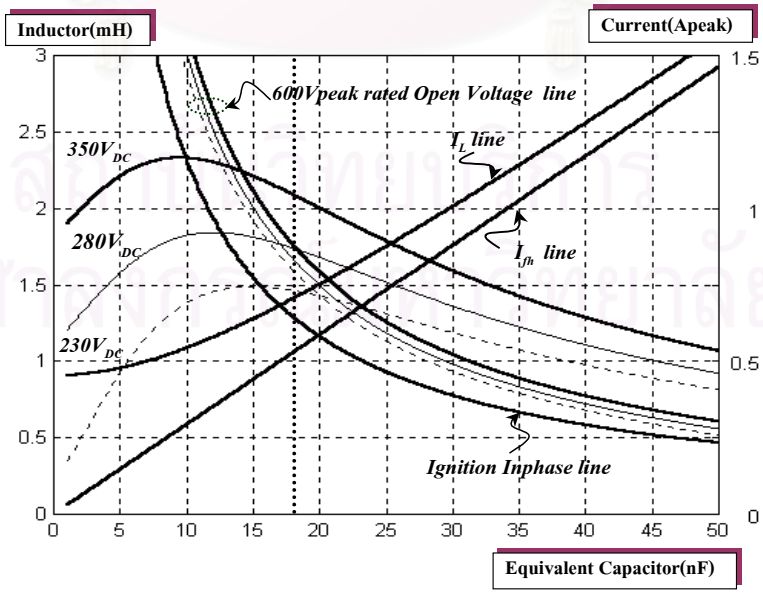
3.4 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด จะใช้วงจรสมมูลสำหรับองค์ประกอบหลักมูล(fundamental component) ดังรูปที่ 3.52 เมื่อ V_S คือแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นไซน์องค์ประกอบความถี่หลักมูลของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม R_f คือความต้านทานไส้หลอด R_{lamp} คือความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และวงจรจุดหลอดประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_{ig}, C_{ph} และ PTC thermistor



รูปที่ 3.52 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบควบคุมด้วยวงจรโหลด

การเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดใช้ข้อกำหนดของการออกแบบ ขีดจำกัดของการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานในภาวะปกติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยประมาณให้ PTC



รูปที่ 3.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C_{ig} ที่พิจารณา I_{fh} ในการออกแบบ

thermistor เป็นวงจรเปิดเนื่องจากความต้านทานของ PTC thermistor ในภาวะที่หลอดติดสว่างแล้วมีค่าใหญ่มาก การออกแบบตามเงื่อนไขดังกล่าวจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{eq} สำหรับ V_{DC} 3 ค่า ดังรูปที่ 3.53 และได้ค่าของ L และ C_{eq} ในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ค่า L และ C_{ig} ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบไม่มีการอุ่นไส้หลอด

$V_{DC}(V)$	$L(mH)$	$C_{eq}(nF)$
230	1.44	19.10
280	1.79	15.80
350	2.27	13.20

เนื่องจากยังไม่ทราบค่าของตัวเก็บประจุแต่ละตัว และไม่ทราบค่าความต้านทานของ PTC thermistor ที่ใช้กำหนดเวลาอุ่นไส้หลอด ดังนั้นสำหรับ C_{eq} เป็นค่าของตัวเก็บประจุที่สมมูลกับ C_{ig} อนุกรมกับ C_{ph} ทำให้สามารถเลือก C_{ig} และ C_{ph} ได้หลายค่าดังแสดงในรูปที่ 3.54 เกณฑ์การกำหนดค่าอุปกรณ์จะใช้เงื่อนไขการอุ่นไส้หลอดซึ่งประกอบด้วยกระแสอุ่นไส้หลอด (I_{ph}) แรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด (V_{ph}) ดังสมการที่ 2.70 และ 2.71 และเวลาในการอุ่นไส้หลอด (t_{ph}) โดยที่การเลือกค่าตัวเก็บประจุจะใช้ขนาดที่เป็นมาตราฐาน และการเลือก PTC thermistor จะใช้ I_{ph} และ t_{ph} ก่อนที่จะเลือกค่าอุปกรณ์ เราต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับ PTC thermistor ก่อนดังนี้

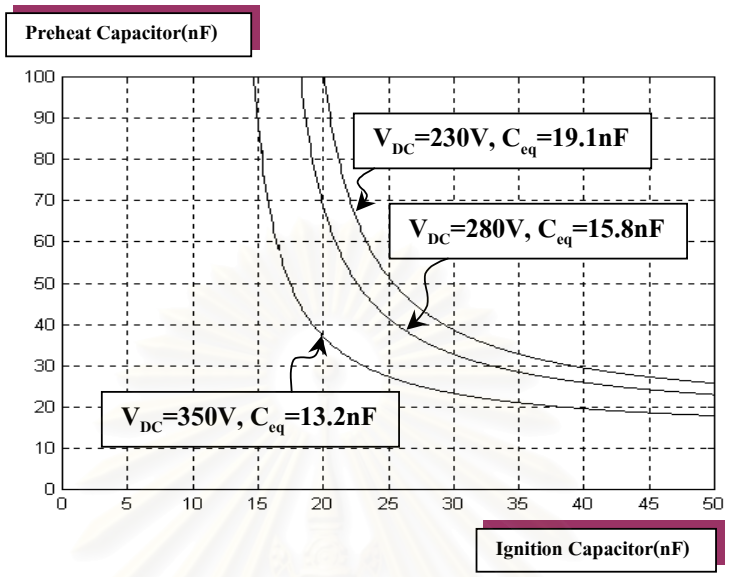
เวลาในการอุ่นไส้หลอด (t_{ph}) จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ PTC thermistor และกำลังไฟฟ้า (P) ที่ป้อนให้ PTC thermistor ทำให้ PTC thermistor มีอุณหภูมิ(T) สูงขึ้น ตัวแปรดังกล่าวสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.16

$$t_{ph} = \int_{0}^{t_{ph}} dt = \int_{T_A}^{T_{ref}} \frac{C_{th}}{P - \delta(T - T_A)} dT \qquad (3.16)$$

เมื่อ T_A = อุณหภูมิห้อง

C_{th} = ความจุความร้อนจำเพาะของ PTC thermistor

δ = ตัวประกอบาการกระจายความร้อนของ PTC thermistor



รูปที่ 3.54 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ig} กับ C_{ph} สำหรับ V_{DC} 3 ค่า

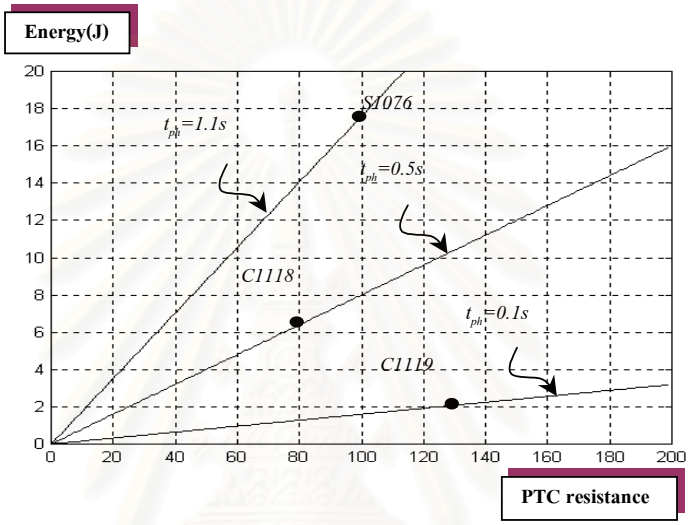
เนื่องจากมีในวิทยานิพนธ์นี้มีข้อจำกัดของขนาดของ PTC thermistor ที่มีใช้ในการออกแบบ ดังนั้นการเลือก PTC thermistor จะใช้วิธีการกำหนดค่า I_{ph} และเลือกเวลาเพื่อให้พลังงานที่ป้อนให้กับ PTC thermistor ในเวลาอุ่นไส้เท่ากับพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของ PTC thermistor ให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_{Ref} พลังงานที่ป้อนให้กับ PTC thermistor จะขึ้นอยู่กับ I_{ph}, R_{PTC} และ t_{ph} ตามสมการที่ 3.17 พลังงานที่ทำให้อุณหภูมิของ PTC thermistor ถึงอุณหภูมิ T_{Ref} จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ PTC thermistor ดังสมการที่ 3.18 โดยทั่วไป t_{ph} มีค่าน้อยจึงสามารถละเลยเทอมแรกในสมการที่ 3.18 ซึ่งเป็นผลของการระบายความร้อนผ่าน PTC thermistor ถ้าสมมุติให้อุณหภูมิของ PTC thermistor เป็นสมการเชิงเส้น

$$Energy = \int Pdt = I_{ph}^2 \times R_{PTC} \times t_{ph} \qquad (3.17)$$

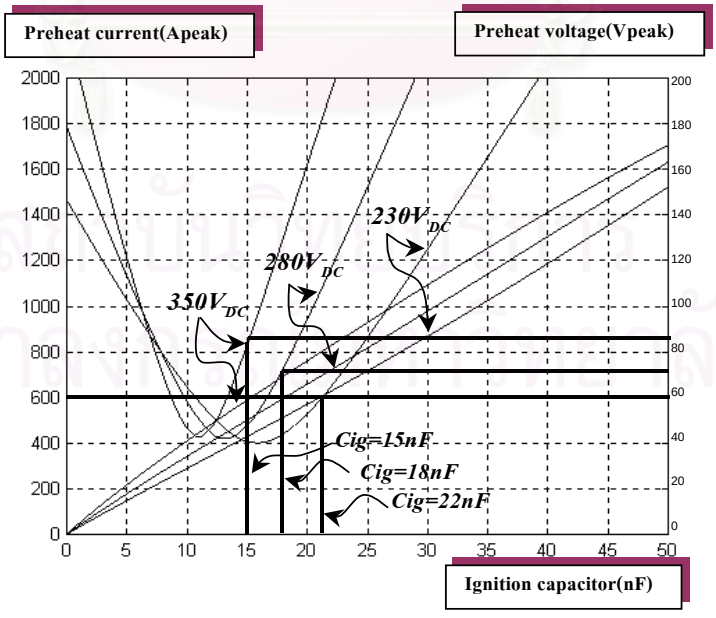
$$Energy = P \times t_{ph} = \frac{1}{2} \times \delta\left(T_{Ref} - T_A\right) \times t_{ph} + C_{th}\left(T_{Ref} - T_A\right) \qquad (3.18)$$

รูปที่ 3.55 แสดงค่าของพลังงานที่จะทำให้อุณหภูมิ PTC thermistor เพิ่มขึ้นถึง T_{Ref} สำหรับ PTC thermistor 3 ขนาด คือ S1076, C1118 และ C1119 และบนกราฟเดียวกันได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ป้อนให้แก่ PTC thermistor กับ R_N ขณะเย็น โดยให้ I_{ph}= 425 mA สำหรับ

t_{ph} แตกต่างกัน 3 ค่าตามสมการที่ 3.17 โดยมีการปรับค่า t_{ph} เพื่อให้เส้นกราฟผ่านจุดพลังงานที่เป็นคุณสมบัติของ PTC thermistor ทั้ง 3 ขนาด ซึ่ง PTC thermistor แต่ละขนาดจะมีเวลาอุ่นไส้หลอดแตกต่างกันจากรูปที่ 3.55 สามารถเลือก PTC thermistor ที่ให้ t_{ph} มากกว่า 0.4 วินาที ตามที่มาตรฐาน IEC929 กำหนดได้ 2 ขนาด คือ S1076 และ C1118 ในที่นี้จะเลือกขนาด S1076 ที่ให้ t_{ph} ประมาณ 1.1 วินาที มีความต้านทาน R_N ขณะเย็นประมาณ 100 โอห์ม เพื่อทดสอบผลการออกแบบ



รูปที่ 3.55 ความสัมพันธ์ของพลังงานและความต้านทานของ PTC thermistor



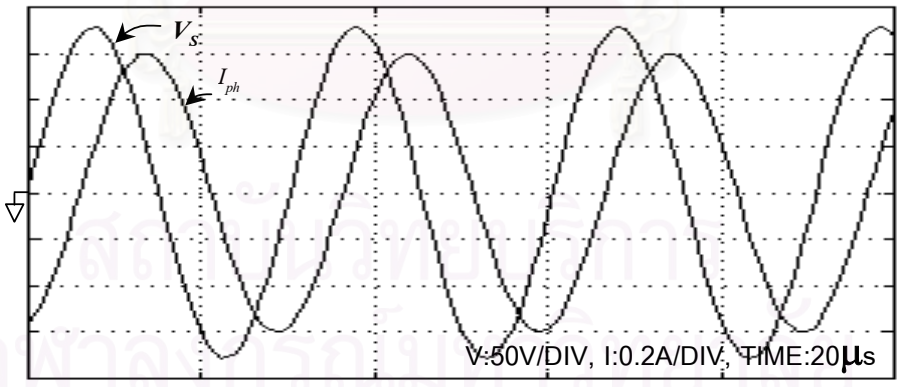
รูปที่ 3.56 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ph} และ V_{ph} กับ C_{ig}

เมื่อแทนค่า R_N, C_{ph}, และ C_{ig} ตามสมการที่ 2.66 และ 2.68 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ph} และ V_{ph} กับ C_{ig} และเมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ph} กับ C_{ig} สำหรับ V_{DC} 3 ค่า ดังรูปที่ 3.56 จากรูปจะได้ได้ค่าตัวเก็บแต่ละตัวประจุที่ความต้านทาน R_Nขณะเย็น เมื่อพิจารณาเลือก PTC thermistor ขนาด S1076 ได้ 100 โอห์ม ดังตารางที่ 3.17

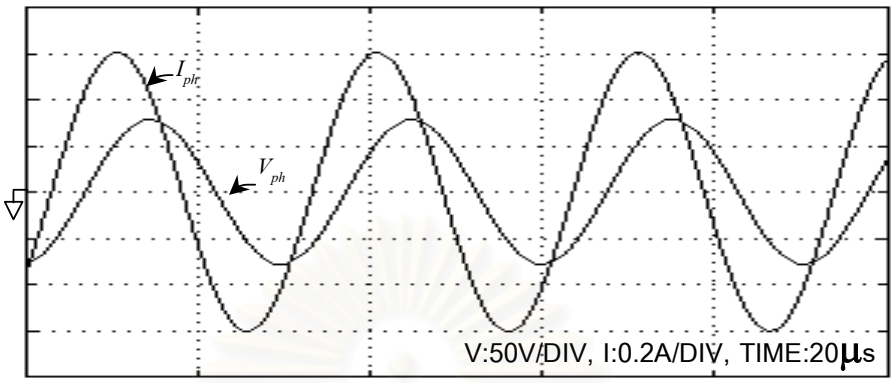
ตารางที่ 3.17 ค่า L, C_{ig} และ C_{ph} สำหรับแรงดันไฟตรง 3 ค่า

V_{DC}(V)	L(mH)	C_{ig}(nF)	C_{ph}(nF)	C_{eq}(nF)
230	1.44	22	122	19.10
280	1.79	18	86	15.80
350	2.27	15	58	13.20

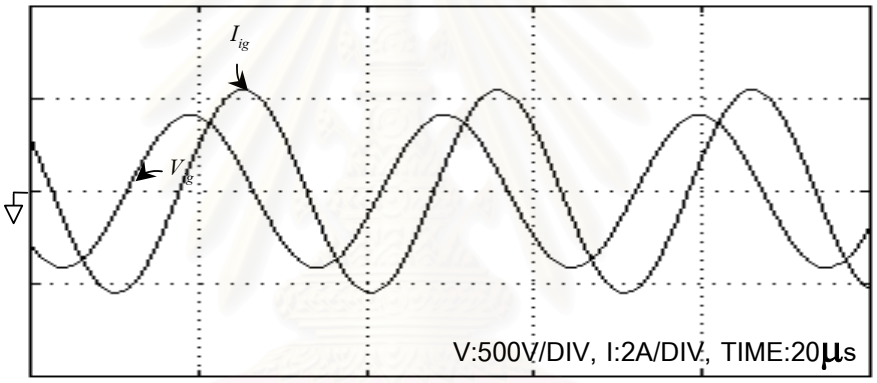
รูปที่ 3.57-3.64 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรที่มีค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดตามที่ออกแบบไว้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.17 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ใกล้เคียงยิ่งขึ้นจึงมีการจำลองการทำงานโดยใช้แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นทั้งรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เลือกกรณี V_{DC} เท่ากับ 280V และความต้านทาน R_f ขณะเย็นเท่ากับ 2.5 Ω และ R_{fh} ขณะร้อนเป็น 4.25 เท่าของ R_fขณะเย็น



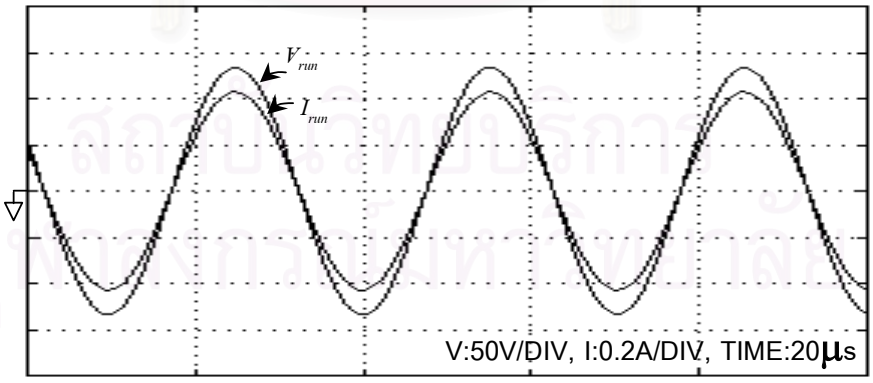
รูปที่ 3.57 กระแสอุ่นไส้และแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นไซน์



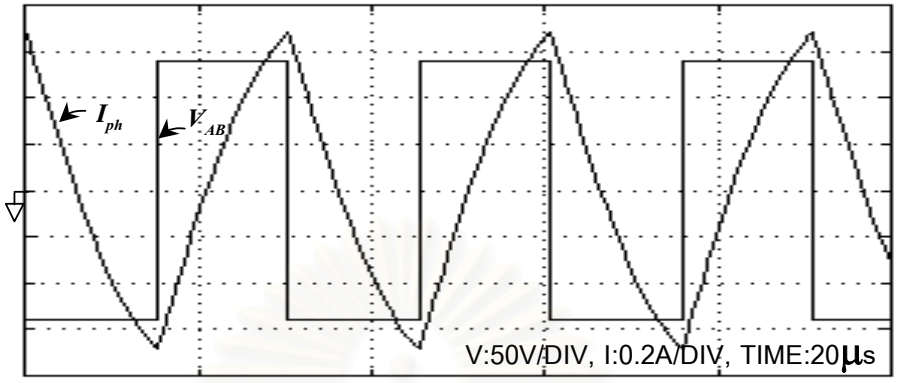
รูปที่ 3.58 กระแสอุ่นไส้และแรงดันคร่อมหลอดขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นไซน์



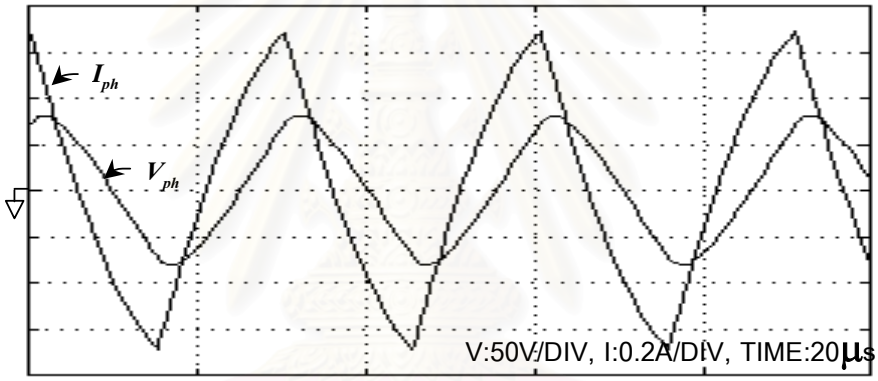
รูปที่ 3.59 แรงดันจุดหลอดและกระแสโหลดขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นไซน์



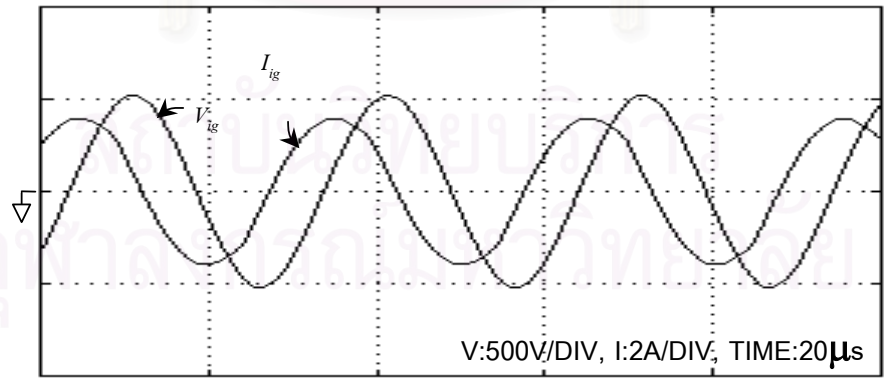
รูปที่ 3.60 แรงดันตกคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นไซน์



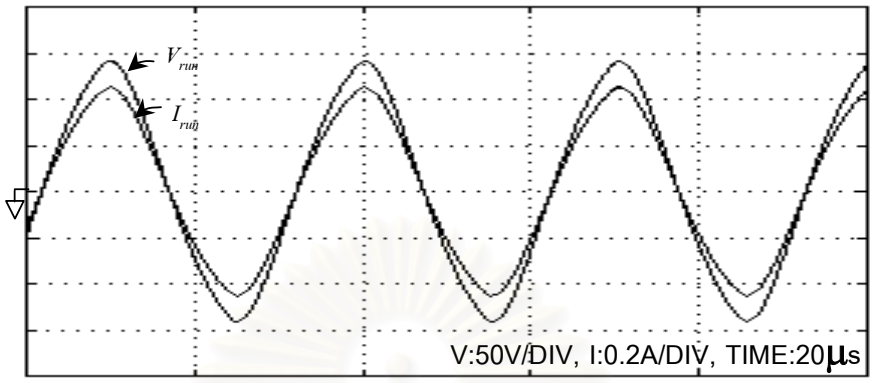
รูปที่ 3.61 กระแสอุ่นไส้และแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.62 กระแสอุ่นไส้และแรงดันคร่อมหลอดขณะอุ่นไส้หลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.63 แรงดันจุดหลอดและกระแสโหลดขณะจุดหลอดกรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.64 แรงดันตกคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กรณี V_S เป็นสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.18 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด สำหรับ V_{DC} = 230 V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	146.4	103.5	115	115
$V_{ph}(V)$	71.1	50.3	75	50.1
$I_{ph}(A)$	0.6	0.424	0.7	0.437
$V_{ig}(V)$	689	487.9	693	488
$I_{ig}(A)$	2.67	1.891	2.6	1.88
θ_{ph}	68.3	68.3	68.4	68.4
θ_{ig}	48.3	48.3	48.3	48.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.19 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด สำหรับ V_{DC} = 280 V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	178.2	126	140	140
$V_{ph}(V)$	75.9	53.7	80	53.8
$I_{ph}(A)$	0.6	0.424	0.68	0.426
$V_{ig}(V)$	871	616.1	860	616.4
$I_{ig}(A)$	2.69	1.9	2.62	1.9
θ_{ph}	71.75	71.75	71.8	71.8
θ_{ig}	48.3	48.3	48.1	48.1

ตารางที่ 3.20 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด สำหรับ V_{DC} = 350 V

	Sine wave		*Square wave*	
	Peak	*rms*	*peak*	*Rms*
$V_S(V)$	222.8	157.5	175	175
$V_{ph}(V)$	87.2	61.68	91	61.84
$I_{ph}(A)$	0.6	0.424	0.68	0.42
$V_{ig}(V)$	1014	717.7	1010	718
$I_{ig}(A)$	2.5	1.782	2.48	1.78
θ_{ph}	74.9	74.95	75	75
θ_{ig}	51.87	51.8	51.8	75

ตารางที่ 3.18 - 3.20 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกระแสต่าง ๆ ของวงจรขณะอุ่นไส้หลอด ขณะจุดหลอด และขณะทำงานปกติ เมื่อรูปคลื่นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นไซน์และสี่เหลี่ยมสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ควบคุมด้วยวงจรโหลด จะเห็นว่าได้ผลใกล้เคียงกัน

บทที่4

การทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

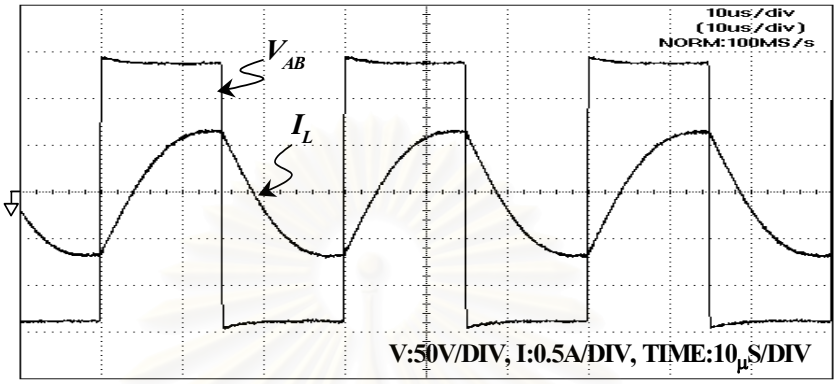
บทนำ

หลังจากที่ได้ออกแบบค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แล้ว ในบทนี้เป็นการทดสอบค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น วัดและบันทึกรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่ส่วนต่างๆ ของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์เพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบกับผลการทดลองทั้งที่ใช้ความต้านทานเชิงเส้นแทนหลอดและใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์จริง การวัดรูปคลื่นของกระแสและแรงดันในแต่ละส่วนของวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะแบ่งเป็น 3 กรณีคือเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าอินเวอร์เตอร์เป็น 230V, 280V, 350V การทดสอบนี้จะพิจารณา 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ พิจารณาเงื่อนไขกำลังออกที่พิกัดของหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นลำดับแรก และเงื่อนไขการจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดที่มีการจุดหลอดแตกต่างกันคือ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยความถี่ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด เรียงเป็นหัวข้อตามลำดับดังต่อไปนี้

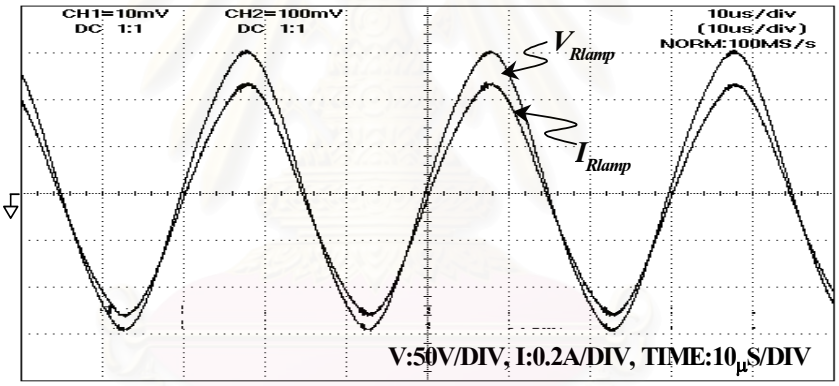
4.1 การทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัดกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัดกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะทดสอบโดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานเชิงเส้นแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ และทดสอบกับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริง วัดรูปคลื่นแรงดันกับกระแสของวงจรโหลดที่แรงดันออก(V_{AB})ของอินเวอร์เตอร์ กระแสออก(I_L)ของอินเวอร์เตอร์ แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์(V_{lamp}) กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์(I_{lamp})แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_{ig} และกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{ig} ซึ่งเป็นกระแสอุ่นไส้หลอดช่วงทำงานปกติเมื่อใช้ตัวต้านทานเชิงเส้นแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 โดยรูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นของ V_{AB} และ I_L รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นของ V_{Rlamp} และ I_{Rlamp} และรูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นของ V_{Cig} และ I_{fh} และเมื่อทดลองกับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.6 โดยรูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นของ V_{AB} และ I_L รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นของ V_{lamp}

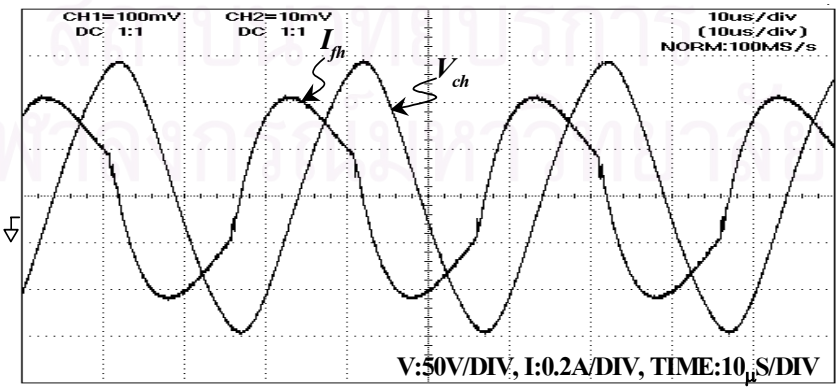
กับ I_{lamp} และรูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของ V_{Cig} กับ I_{fh} ในการทดลองใช้ L=1.79mH และ C_{ig}=15.7nF ทั้งสองเงื่อนไข



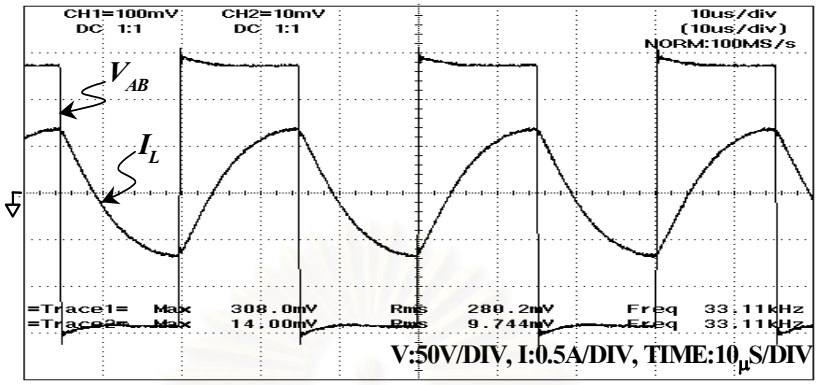
รูปที่ 4.1 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์



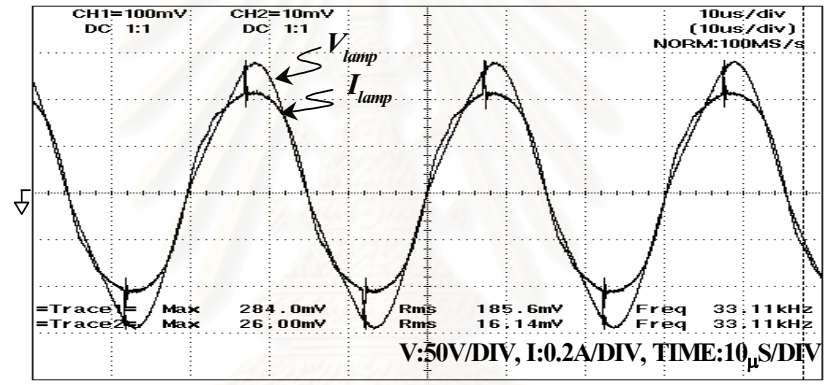
รูปที่ 4.2 แรงดันคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์



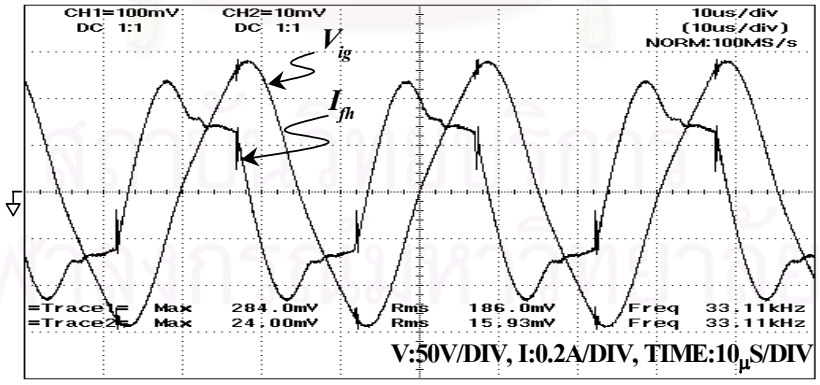
รูปที่ 4.3 แรงดันคร่อมหลอดและกระแสอุ่นไส้หลอดช่วงทำงานปกติ



รูปที่ 4.4 แรงดันออกและกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานปกติ



รูปที่ 4.5 แรงดันคร่อมและกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะทำงานปกติ



รูปที่ 4.6 แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์และกระแสอุ่นไส้หลอดขณะทำงานปกติ

จากการทดลอง จะเห็นว่าการใช้ความต้านทานแทนเชิงเส้นหลอดฟลูออเรสเซนต์และใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์จริง จะมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกันส่วนที่แตกต่างกันจะเป็นค่ายอดของ

กระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดฟลูออเรส-เซนต์ สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จำลองการทำงานกับผลการทดลองกับหลอดฟลูออเรส-เซนต์โดยวัดค่าเป็นค่าประสิทธิผลทางไฟฟ้า(electrical effective value, rms) ได้ผลดังแสดงในตาราง ที่ 4.1-4.3

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงในขณะทำงานปกติ สำหรับ V_{DC} = 230 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=230V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง	
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	ความต้านทานแทนหลอด	หลอดจริง
V_S	103.536	115	114.80	115.65
I_L	0.459	0.461	0.505	0.523
V_{lamp}	100	99.89	97.3	96.9
I_{lamp}	0.32	0.319	0.318	0.324
I_{fh}	0.323	0.325	0.376	0.373
θ_{Run}	45	36	40	48
Power	32	31.9	30.94	31.39

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงในขณะทำงานปกติ สำหรับ V_{DC} = 280 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=280V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง	
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	ความต้านทานแทนหลอด	หลอดจริง
V_S	126	140	138.50	138.45
I_L	0.383	0.4532	0.499	0.438
V_{lamp}	100	100	102.5	97.8
I_{lamp}	0.32	0.3204	0.337	0.343
I_{fh}	0.369	0.365	0.322	0.329
θ_{Run}	52	67.18	49	50
Power	32	32.07	34.5	33.5

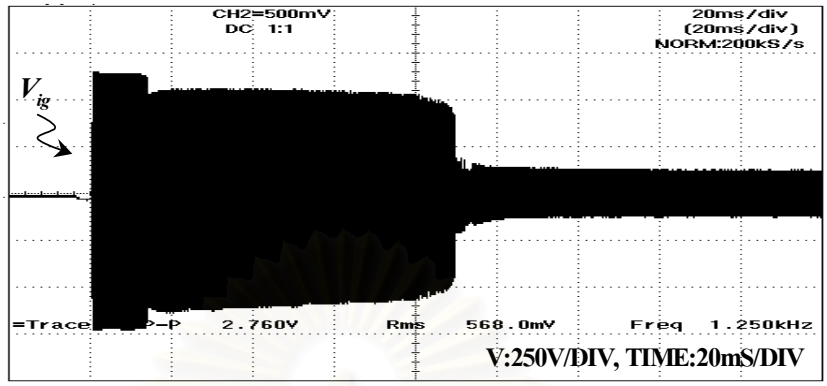
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงในขณะทำงานปกติ สำหรับ V_{DC} = 350 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=350V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง	
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	ความต้านทานแทนหลอด	หลอดจริง
V_S	157.5	175	170.85	172.45
I_L	0.383	0.411	0.467	0.457
V_{lamp}	100	100.1	100.5	96.2
I_{lamp}	0.32	0.32	0.319	0.347
I_{fh}	0.206	0.21	0.266	0.266
θ_{Run}	57	79.25	52.8	53.5
Power	32	32.03	32.14	33.38

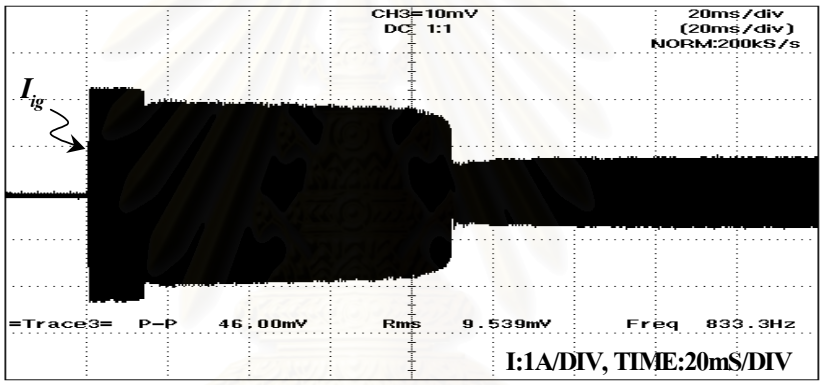
จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็นความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ มีค่าไม่มากนักสำหรับการออกแบบเบื้องต้นถือว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองการทำงาน

4.2 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด

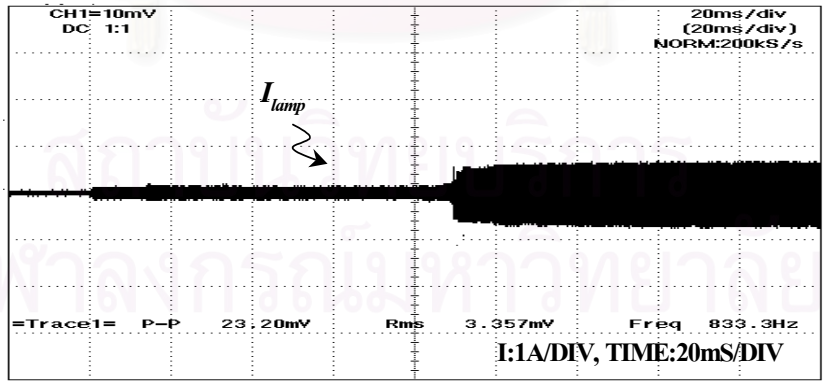
การทดสอบผลการออกแบบวงจรโหลดอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบไม่มีการอุ่นไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องการแรงดันสูงที่เพียงพอต่อการจุดหลอดให้ติด และทำงานที่กำลังออกเท่ากับพิกัดในภาวะการทำงานปกติ การจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะสร้างแรงดันสูงโดยการเรโซแนนซ์วงจรโหลดของอินเวอร์-เตอร์ที่ความต้านทานหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงก่อนจุดหลอดเป็นอนันต์ วัดรูปคลื่นของแรงดันจุด-หลอด (V_{AB}) กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ (I_{lamp}) และมุมเฟสช่วงจุดหลอด (θ_{ig}) ได้แสดงดังรูปที่ 4.7-4.10 โดยรูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของ V_{ig} รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นของ I_{ig} รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นของ I_{lamp} รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นแรงดันคร่อมขั้วหลอด รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นของ V_{ig} กับ I_{ig} และรูปที่ 4.12 เป็นรูปคลื่นแสดงมุมเฟสระหว่าง V_S และ I_L ในช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อใช้ค่า L =1.79 mH และ C_{ig} = 15.7 nF ที่ V_{DC} = 280V



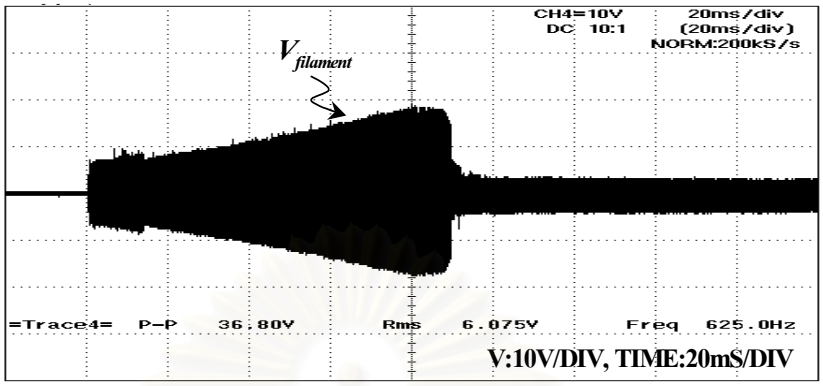
รูปที่ 4.7 แรงดันจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



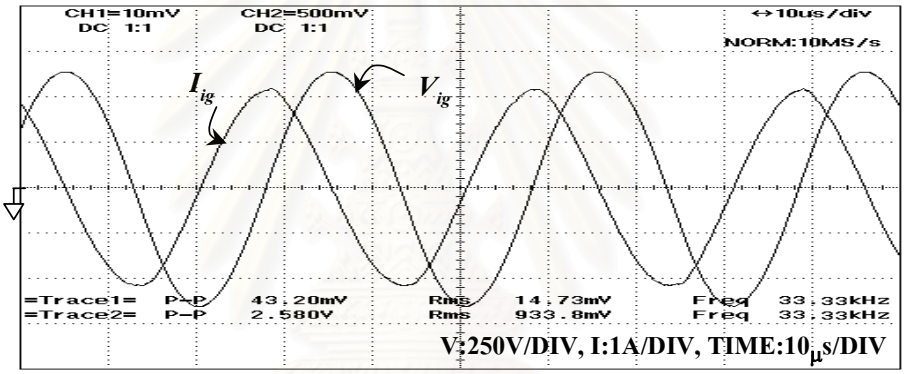
รูปที่ 4.8 กระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



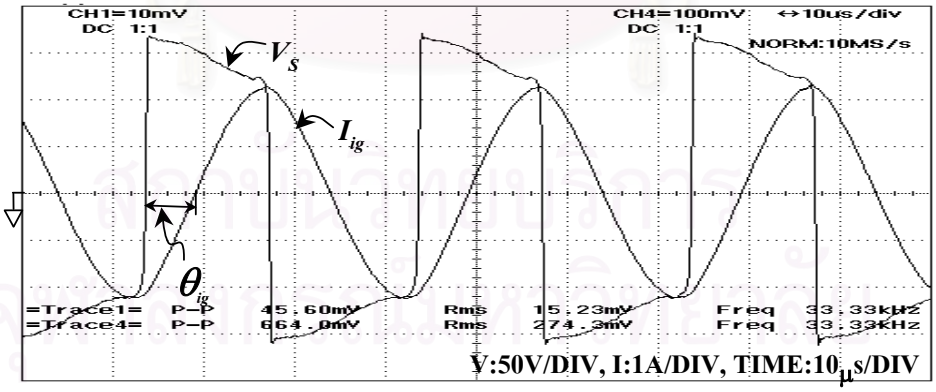
รูปที่ 4.9 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงจุดหลอด



รูปที่ 4.10 แรงดันคร่อมขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วงจุดหลอด



รูปที่ 4.11 แรงดัน V_{ig} และ I_{ig} ช่วงจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 4.12 มุมเฟสของ V_S และ I_{ig} ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง

รูปที่ 4.7 เป็นแรงดันตกคร่อมหลอดจะเห็นช่วงแรกแรงดันสูงสุดจะเป็นแรงดันที่วงจรเรโซแนนซ์สามารถสร้างได้ และจะลดลงเพราะความต้านทานของไส้หลอดเพิ่มขึ้นดังจะเห็นได้จากแรงดันคร่อมขั้วหลอดในรูปที่ 4.10 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังรูปที่ 4.9 จะมีกระแสไหล

เต็มที่เมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างแล้ว แต่ช่วงแรกจะมีกระแส I_{glow} เล็กน้อย จะเห็นว่าได้ว่ากระแสจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้จะสูงมาก จากการทดลองช่วงจุดหลอดของหลอดฟลูออเรสเซนต์ แสดงการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จำลองการทำงานกับผลการทดลองกับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริงดังตารางที่ 4.4-4.6 ผลการทดลองจะคลาดเคลื่อนจากผลการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งเป็นผลจากกระแสรุ่งแสงที่ไม่ได้นำมาพิจารณาในการจำลองการทำงาน

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะจุดหลอด ที่ V_{DC} = 230 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=230V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	103.5	115	115.7
I_L	2.286	2.288	2.22
V_{ig}	567.7	577.2	510
I_{ig}	2.286	2.288	2.22
θ_{ig}	83.61	83.6	70

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะจุดหลอด ที่ V_{DC} = 280 V

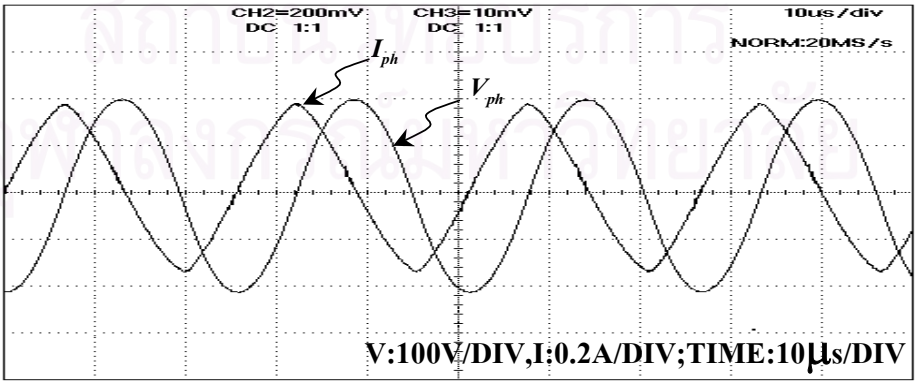
พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=280V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	126	140	138.45
I_L	1.855	1.85	1.94
V_{ig}	565.7	566.5	490
I_{ig}	1.855	1.85	1.94
θ_{ig}	85.89	85.89	80

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงในขณะจุดหลอด ที่ V_{DC}= 350 V

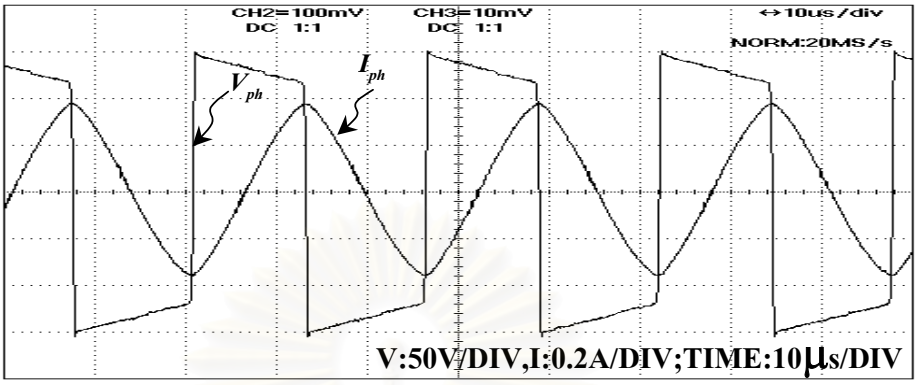
พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=350V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	157.5	175	172.45
I_L	1.532	1.532	1.83
V_{ig}	565.7	563.2	503
I_{ig}	1.532	1.532	1.83
θ_{ig}	82	82	78

4.3 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ควบคุมด้วยความถี่

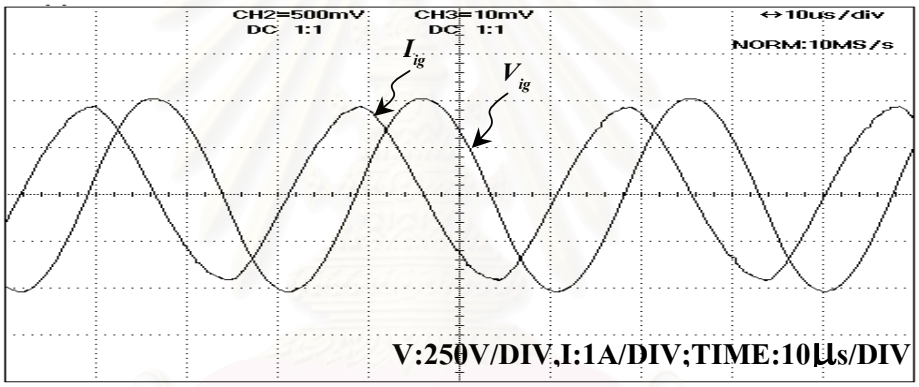
การทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยความถี่ จะวัดรูปคลื่นกระแสอุ่นไส้หลอด แรงคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด แรงดันจุดหลอดฟลูออเรส-เซนต์ ช่วงเวลาอุ่นไส้หลอด ดังแสดงรูปที่ 4.13-4.18 โดยรูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นของ I_{ph} กับ V_{ph} รูปที่ 4.14 เป็นรูปคลื่นแสดงรูปคลื่นของของ V_S กับ I_{ph} ขณะอุ่นไส้หลอด รูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นของ V_{ig} กับ I_{ig} รูปที่ 4.16-4.17 เป็นรูปคลื่นแสดงช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอดในรูปของแรงดันและกระแส และรูปที่ 4.18 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ และรูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นแรงดันคร่อมขั้วหลอด



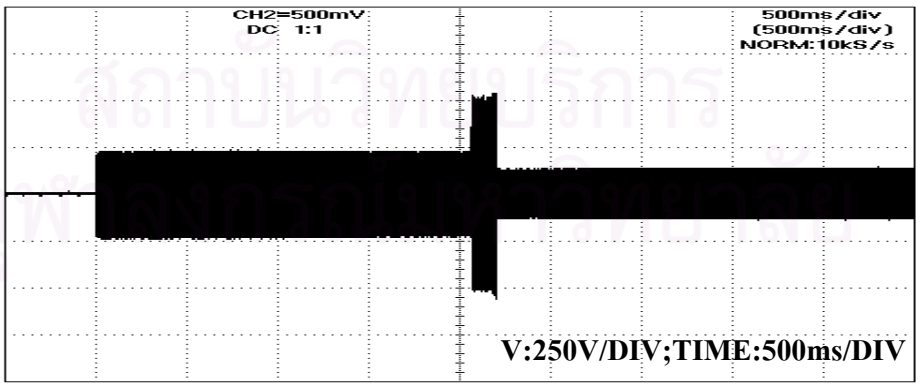
รูปที่ 4.13 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด



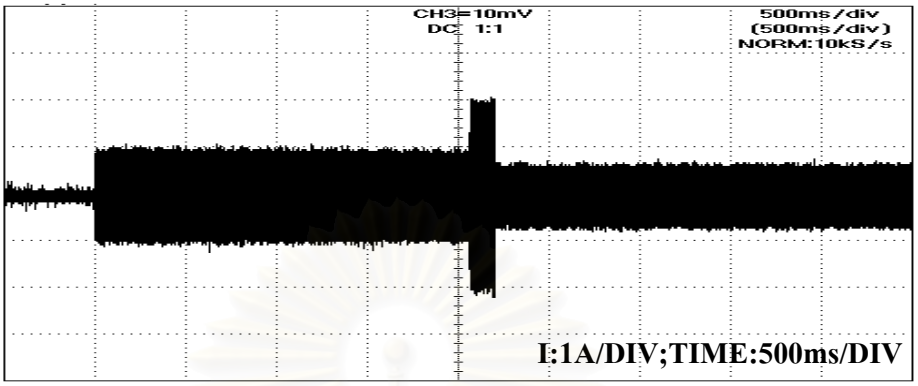
รูปที่ 4.14 มุมเฟสของกระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอด



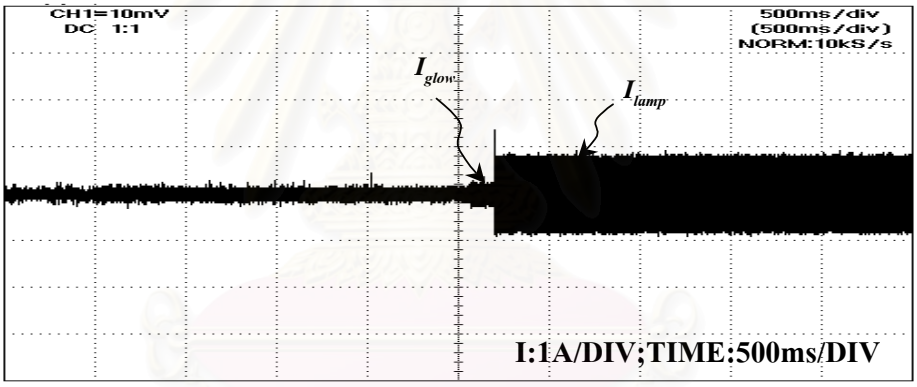
รูปที่ 4.15 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



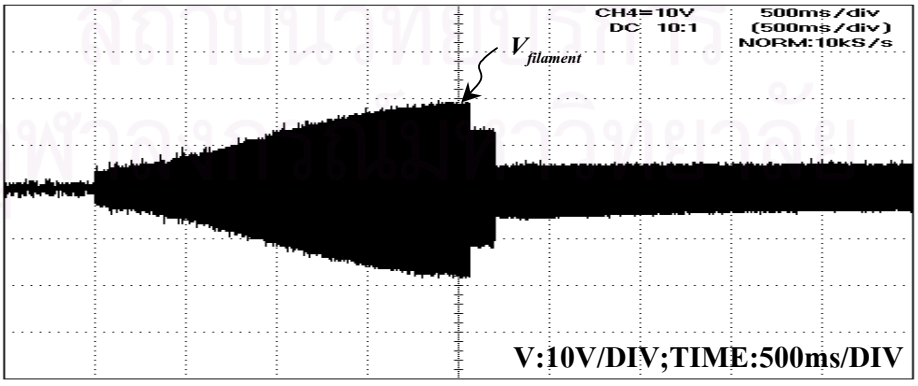
รูปที่ 4.16 แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด
และทำงานปกติในช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอด



รูปที่ 4.17 กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอด ขณะจุดหลอด และขณะทำงานปกติ ในช่วงเวลาอุ่นไส้หลอด



รูปที่ 4.18 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 4.19 แรงดันคร่อมขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ที่ V_{DC} = 230 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=230V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	103.5	115	115.3
I_L	0.4687	0.469	0.473
V_{ph}	130	134	85.3
I_{ph}	0.6	0.6	0.453
V_{ig}	435.3	435.4	295
I_{ig}	1.66	1.65	1.68
$\theta_{Preheat}$	77.5	77.5	82.7
θ_{Start}	72.2	72.1	78.5

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ที่ V_{DC} = 280 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=280V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	126	140	144.15
I_L	0.4273	0.4297	0.39025
V_{ph}	145	150	89.6
I_{ph}	0.6	0.61	0.4176
V_{ig}	432.2	436	419
I_{ig}	1.386	1.387	1.354
$\theta_{Preheat}$	88	91	86.538
θ_{Start}	72	72	78.546

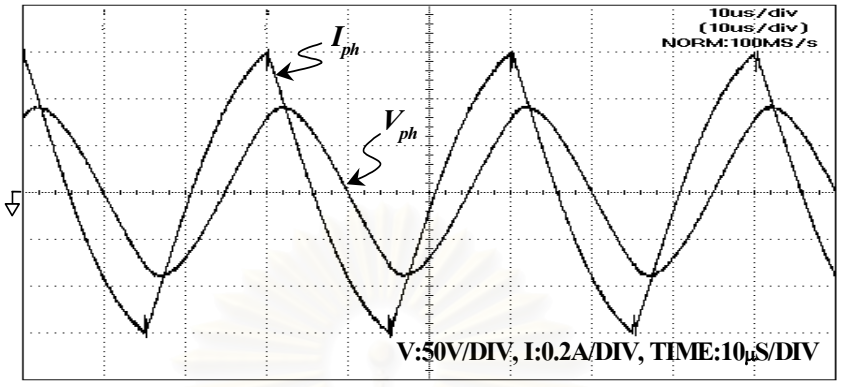
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุมด้วยความถี่ที่ V_{DC} = 350 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ $V_{DC}=350V$	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	157.5	175	178.68
I_L	0.4239	0.4242	0.4025
V_{ph}	123.3	123	112
I_{ph}	0.4239	0.4242	0.4123
V_{ig}	377.9	377.7	527.5
I_{ig}	1.026	1.026	1.789
$\theta_{Preheat}$	82.48	81.97	78.64
θ_{Start}	82.02	82.23	86.5
t_{ph}	1	-	1.1

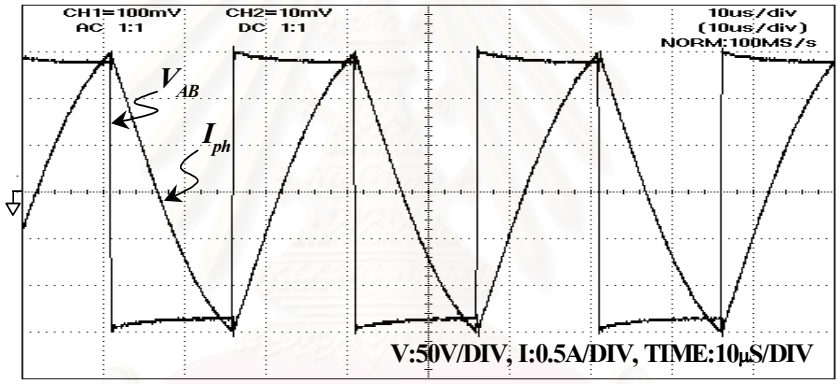
ตารางที่ 4.7-4.9 แสดงการการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับผลการทดลองกับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริง จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

4.3 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ควบคุมด้วยวงจรโหลด

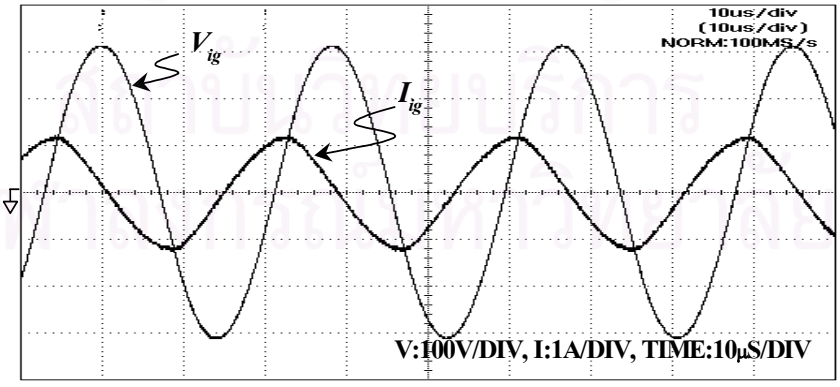
การทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดแบบมีการอุ่นไส้หลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด จะวัดรูปคลื่น I_{ph} ,V_{ph} ,V_{ig} ,และช่วงเวลาอุ่นไส้หลอด (t_{ph}) ดังแสดงในรูปที่ 4.19-4.24 โดยรูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นของ I_{ph} กับ V_{ph} รูปที่ 4.20 เป็นรูปคลื่นแสดงมุมเฟสของ V_S กับ I_{ph} ช่วงอุ่นไส้หลอด รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นของ V_{ig} กับ I_{ig} รูปที่ 4.22-4.23 เป็นรูปคลื่นแสดงช่วงเวลาการอุ่นไส้หลอดในรูปของแรงดันและกระแส และรูปที่ 2.24 เป็นรูปคลื่นกระแสเริ่มไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์



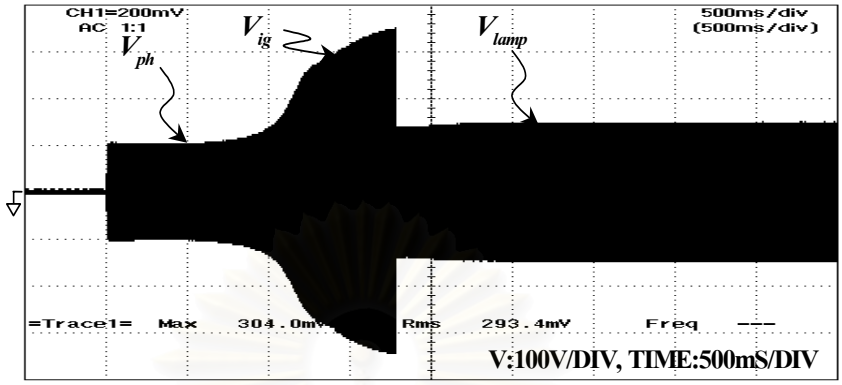
รูปที่ 4.19 กระแสอุ่นไส้หลอดและแรงดันคร่อมหลอดช่วงอุ่นไส้หลอด



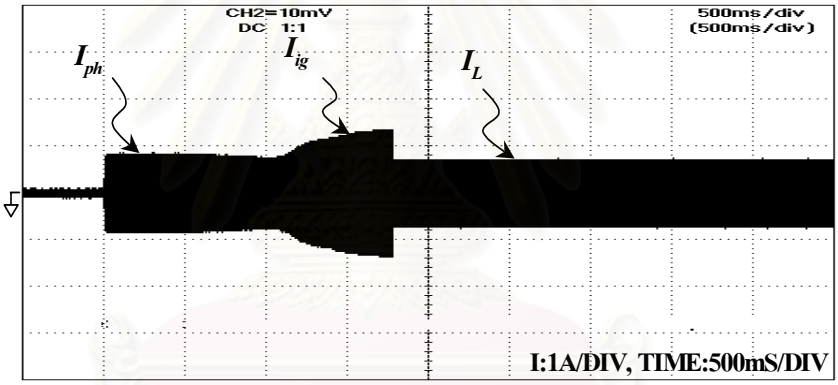
รูปที่ 4.20 กระแสออกเทียบแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ช่วงอุ่นไส้หลอด



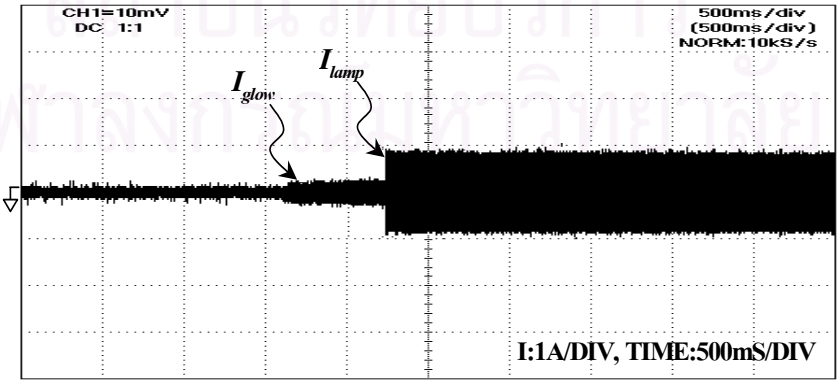
รูปที่ 4.21 แรงดันจุดหลอดและกระแสจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 4.22 แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด และขณะทำงานปกติในช่วงเวลาอุ่นไส้หลอด



รูปที่ 4.23 กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ขณะอุ่นไส้หลอด จุดหลอด และขณะทำงานปกติในช่วงเวลาอุ่นไส้หลอด



รูปที่ 4.24 กระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลดที่ V_{DC}= 230 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=230V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	103.5	115	114.6
I_L	0.4207	0.4226	0.42
V_{ph}	47.98	48.12	56
I_{ph}	0.4207	0.4226	0.412
V_{ig}	295.8	296.5	325
I_{ig}	1.171	1.169	1.2
$\theta_{Preheat}$	69	69.1	73
θ_{Start}	41.55	43.5	45.6
t_{ph}	1.1	-	1.3

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลดที่ V_{DC}= 280 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ V_{DC}=280V	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	126	140	142.3
I_L	0.4149	0.417	0.426
V_{ph}	51.79	51.93	58.68
I_{ph}	0.4149	0.419	0.431
V_{ig}	347.9	348.2	381.8
I_{ig}	1.112	1.112	0.92
$\theta_{Preheat}$	72.18	72.2	69.6
θ_{Start}	39.56	39.5	42
t_{ph}	1.1	-	1.2

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการทดลองจริงของการจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลดที่ V_{DC}= 350 V

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ $V_{DC}=350V$	ผลการจำลองการทำงาน เมื่อVS		ผลการทดลอง
	รูปคลื่นไซน์	รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	หลอดจริง
V_S	157.5	175	176.5
I_L	0.414	0.416	0.420
V_{ph}	59.32	59.54	63.64
I_{ph}	0.414	0.416	0.459
V_{ig}	390.9	391.3	351
I_{ig}	1.015	1.015	1.06
$\theta_{Preheat}$	75.26	75.4	64.8
θ_{Start}	42.7	42.7	40.8
t_{ph}	1.1	-	1

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกัลผลการทดลองกับหลอดฟลูออเรสเซนต์จริง จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีกำลังที่พิกัดตามที่กำหนดโดยมีการจุดหลอดอย่างเหมาะสมเพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีอายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากพฤติกรรมช่วงก่อนจุดหลอด ขณะจุดหลอด และขณะทำงานปกติของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ แรงดันด้านเข้า ค่าอุปกรณ์ของวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ และวิธีการจุดหลอด ดังนั้นการออกแบบวงจรจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์จึงต้องมีการคำนึงถึงความสัมพันธ์ของวงจรจุดหลอดกับวงจรภาคอื่น ๆ ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยควรพิจารณาความเหมาะสมของการออกแบบทั้งระบบให้มีความเหมาะสมที่สุด

การออกแบบจึงแบ่งชนิดการออกแบบของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ในมาตราฐานอุตสาหกรรม IEC 929 และ ANSI C82.11จากลักษณะการจุดหลอดดังกล่าวจะสามารถจำแนกการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างเหมาะสมได้ 3 แบบ คือ

1. การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยไม่มีการอุ่นไส้หลอด
2. การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ที่ควบคุมด้วยความถี่
3. การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดหลอดโดยมีการอุ่นไส้ที่ควบคุมด้วยวงจรทางด้านโหลด

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 แบบ จะอาศัยข้อกำหนดของการออกแบบ ขีดจำกัดของการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด เพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างเป็นระบบ สำหรับเงื่อนไขการออกแบบของบัลลาสต์แต่ละชนิดจะมีขีดจำกัดและพฤติกรรมการทำงานที่แตกต่าง ๆ กัน เพื่อให้เลือกค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุด และให้หลอดฟลูออเสเซนต์ทำงานที่กำลังออกเท่ากับพิกัดได้อย่างมีเสถียรภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย

1. การออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความต้านทานเชิงเส้นแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการออกแบบบัลลาสต์ทรอนิกส์ เพราะจากการทดสอบคุณสมบัติของหลอดทำงานที่ความถี่สูง จะมีลักษณะใกล้เคียงความต้านทานมาก เพื่อจะได้ผลที่ถูกต้องควรพัฒนาแบบจำลองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาพิจารณาในการออกแบบเพิ่มขึ้นอีก
2. การออกแบบจะใช้การคำนวณที่พิจารณาองค์ประกอบหลักมูลของรูปคลื่นแรงดันและกระแส เพื่อที่จะให้ผลการคำนวณถูกต้องควรพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จิโรจน์ พรวัฒนา ยุทธนา กุลวิทิต. "การวิเคราะห์การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์แรงดันศูนย์ที่ใช้หม้อแปลงอิ่มตัว". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22(EECON22) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ธันวาคม 2542, หน้า 264-267

จิโรจน์ พรวัฒนา ยุทธนา กุลวิทิต. "การขับนำสวิตช์ผิดจังหวะของวงจรขับนำเบสที่ใช้หม้อแปลงอิ่มตัว". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23(EECON23),มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ,พฤศจิกายน, 2543

ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช. การออกแบบระบบส่องสว่าง . บริษัทซีเอ็ดยูเคชันจำกัด(มหาชน) กรุงเทพมหานคร, 2521

ไพศาล บุญเจียม ยุทธนา กุลวิทิต. "ผลของอิมพิแดนซ์โหลดในอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซอนุกรมที่ต่อโหลดขนาน". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22(EECON22) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ธันวาคม 2542, หน้า 717-720

ไพศาล บุญเจียม ยุทธนา กุลวิทิต. "บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการอุ่นไส้ก่อนจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด".เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23(EECON23) , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543

ยุทธนา กุลวิทิต, เจิดกุล โสภาวนิตย์. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ . รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กองเศรษฐกิจการพลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแหล่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 2535.

ยุทธนา กุลวิทิต จิโรจน์ พรวัฒนา. "ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเข้าต่อความเชื่อถือได้ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์".เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23(EECON23) ,มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน, 2543

ยุทธนา กุลวิทิต ไพศาล บุญเจียม . "วิธีเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23(EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543

ภาษาอังกฤษ

Chin S.Moo., Hung L. Cheng., Tsai F. Lin and Hau C. Yen. "Designing a dimmable electronic ballast with voltage control for fluorescent lamp". ISIE 1999, pp 786-791.

Gluskin E. "A contribution to the theory of fluorescent lamp circuits". IEEE Circuit and system, 1988, pp 1385-1388.

Gluskin E. "On the theory of fluorescent lamp circuits". IEE science, Measurement and Technology 1990, pp 201-208.

Hammer, E.E., "Photocell Enhanced Technique for Measuring Electrode Starting Temperature in fluorescent lamps".Plasma Science, ICOPS '99.,IEEE International Conference on , 1999, pp 329 -329

Hammer, E.E., "Compact light source performance in recessed type luminaires". Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting. , 1998 , pp 2145 -2150 vol.3

Hammer, E.E. "Starting voltage characterristics of 40 W biaxial fluorescent lamp". Industry Applications Society Annual Meeting, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE , 1988 , pp 1835 -1841 vol.2

Hammer, E.E. "Effects of changing line voltage with various fluorescent systems". Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 24 4 , July-Aug. 1988 , pp 692 -699

Hesterman B.L., Poehlman T.M. "A novel parallel-resonant programmed start electronic ballast". Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting 1999, pp 249-255.

J.R. Coaton, A.M. Marsden. Lamp and Lighting .(n.p.): John Wiley and sons,Inc. , 1990.

Marian K. Kazimierczuk, Dariusz Czarkowski. Resonant Power Converters.(n.p.): John Wiley and sons,Inc. , 1995.

Mark Sun, Bryce L. Hesterman. "Pspice high-frequency dynamic fluorescent lamp model". IEEE transaction on power electronics, Vol.13 No.2, 1998.

Moo C.S., Cheng H.L., Chen H.N. and Yen H.C. "Designing dimmable electronic ballast with frequency control". APEC Annual meeting ,1999, pp 727-733.

Onishi N., Shiomi T., Okude A. and Yamauchi T. “A Fluorescent lamp model for high frequency wide range dimming electronic ballast simulation”. IEEE APEC conference record ,1999, pp 1001-1005.

T. Liu, K.J. Tseng and D.M. Vilathgamuwa. “A Pspice model for the electrical characteristics of fluorescent lamp”. IEEE/IAS conference record ,1998, pp

Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. “A New model for high-frequency electronic ballast design”. Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting , 1997. pp 2334-2339.

Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. “A New procedure for high-frequency electronic ballast design”. Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting ,1997.

Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. “A New control method for Dimmable high-frequency electronic ballasts”. Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting, 1998.

Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. “A new high-frequency fluorescent lamp model”. IEEE IAS Annual meeting ,1998, pp 2094-2098.

Thomas Ribarich. “A System Approach to Ballast IC Design”. PCIM Europe Nuremburg, Germany June 22-24, 1999.

Urs Mader. “Steady-state analysis of a voltage-fed inverter with second-order network and fluorescent lamp load”. IEE IEE ISMTEV,1998, pp 110-116.

Wu T.-F., Hung J.-C., Yu T.-H., “A Pspice model for fluorescent lamps operated at high frequencies”. IEEE IECON 21st International Conference, 1995, pp 359-364.

Zhu P., Hui S.Y.R. “Modelling of a High-frequency operated fluoescent lamp in an electronic ballast enviroment”. IEE ISMTEV,1998, pp 111-116.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig}

<u>ภาคผนวก ก.1</u> ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ Cig ที่กำลังออกเท่ากับพิกัด

ในการพิจารณากำลังออกเท่ากับพิกัด จะใช้สมการฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{lamp} และ V_S ดังในสมการที่ 2.22 เมื่อทราบค่าขององค์ประกอบที่กำลังออกที่พิกัดแล้ว สามารถหาความสัมพันธ์ได้โดยพิจารณาเฉพาะขนาดของฟังก์ชันโอนย้าย ดังนี้

$$\left[\frac{V_{lamp}}{V_S}\right]^2 = \frac{\left[\frac{R_{lamp}}{R_{lamp}+R_f}\right]^2 + \left[\frac{\omega R_f R_{lamp} C_{ig}}{R_{lamp}+R_f}\right]^2}{\left[1-\omega^2 LC_{ig}\right]^2 + \left[\frac{\omega L}{R_{lamp}+R_f} + \frac{\omega\left(2R_{lamp}R_f\right)R_f C_{ig}}{R_{lamp}+R_f}\right]^2} \qquad \text{(ก.1.1)}$$

จัดรูปสมการ ก.1.1 ใหม่

$$1-2\omega^2 LC_{ig} + \left(\omega^2 LC_{ig}\right)^2 + \left(\frac{\omega L}{R_{lamp}+R_f}\right)^2 + \frac{2\omega^2\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig}}{\left(R_{lamp}+R_f\right)^2} L$$
$$+\left(\frac{\omega\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig}}{R_{lamp}+R_f}\right)^2 - \left[\left(\frac{R_{lamp}}{R_{lamp}+R_f}\right)^2 + \left(\frac{\omega R_f R_{lamp} C_{ig}}{R_{lamp}+R_f}\right)^2\right] \times \left[\frac{V_S}{V_{lamp}}\right]^2 = 0 \qquad \text{(ก.1.2)}$$

นำ $(R_{lamp}+R_f)^2$ คูณตลอด

$$\left(R_{lamp}+R_f\right)^2 - 2\omega^2 LC_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)^2 + \left(\omega^2 LC_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)\right)^2 + \left(\omega L\right)^2$$
$$+2\omega^2\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig} L + \left(\omega\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig}\right)^2$$
$$-\left(R_{lamp}^2 + \left(\omega R_f R_{lamp} C_{ig}\right)^2\right) \times \left[\frac{V_S}{V_{lamp}}\right]^2 = 0 \qquad \text{(ก.1.3)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปกำลังสัมบูรณ์

$$\left[\omega^2+\left(\omega^2 C_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)\right)^2\right]L^2+\left[-2\omega^2 C_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)^2+2\omega^2\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig}\right]L+$$
$$\left(R_{lamp}+R_f\right)^2+\left(\omega R_f C_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)\right)^2-\left(R_{lamp}^2+\left(\omega R_f R_{lamp} C_{ig}\right)^2\right)\times\left[\frac{V_S}{V_{lamp}}\right]^2=0 \qquad \text{(ก.1.4)}$$

แสดงสัมประสิทธ์ของสมการที่ 3.1 ได้ดังสมการที่ ก.1.5

$$a\left(C_{ig}\right)=\left[\omega^2+\left(\omega^2 C_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)\right)^2\right]$$
$$b\left(C_{ig}\right)=\left[-2\omega^2 C_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)^2+2\omega^2\left(2R_{lamp}+R_f\right)R_f C_{ig}\right]$$
$$k\left(C_{ig}\right)=\left(R_{lamp}+R_f\right)^2+\left(\omega R_f C_{ig}\left(R_{lamp}+R_f\right)\right)^2-\left(R_{lamp}^2+\left(\omega R_f R_{lamp} C_{ig}\right)^2\right)\times\left[\frac{V_S}{V_{lamp}}\right]^2 \qquad \text{(ก.1.5)}$$

<u>ภาคผนวก ก.2</u> ความสัมพันธ์ระหว่าง L และ C_{ig} ขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดวงจรเปิด(Ignition rate open Voltage)

ในการพิจารณาขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดที่วงจรสามารถสร้างได้ จะใช้สมการฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{ig} กับ V_S ดังในสมการที่ 2.36 สามารถหาความสัมพันธ์ได้โดยพิจารณาเฉพาะขนาดของฟังก์ชันโอนย้าย ดังนี้

$$\left[\frac{V_{ig}}{V_S}\right]^2=\frac{1+\left(\omega R_f C_{ig}\right)^2}{\left(1-\omega^2 LC_{ig}\right)^2+\left(2\omega R_f C_{ig}\right)^2} \qquad \text{(ก.2.1)}$$

จัดรูปสมการ ก.2.1 ใหม่

$$1-2LC_{ig}\omega^2+\left(\omega^2 LC_{ig}\right)^2+\left(2\omega R_f C_{ig}\right)^2-\left(1+\left(\omega R_f C_{ig}\right)^2\right)\times\left[\frac{V_{ig}}{V_S}\right]^2 \qquad \text{(ก.2.2)}$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปกำลังสัมบูรณ์

$$\left(\omega^2 C_{ig}\right)^2 L^2 - 2\omega^2 C_{ig} L + 1 + \left(2\omega R_f C_{ig}\right)^2 - \left(1 + \left(\omega R_f C_{ig}\right)^2\right) \times \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2 = 0 \quad \text{(ก.2.3)}$$

แสดงสัมประสิทธ์ของสมการที่ 3.1 ได้ดังสมการที่ ก.2.4

$$\begin{aligned} a\left(C_{ig}\right) &= \left(\omega^2 C_{ig}\right)^2 \\ b\left(C_{ig}\right) &= -2\omega^2 C_{ig} \\ k\left(C_{ig}\right) &= 1 + \left(2\omega R_f C_{ig}\right)^2 - \left(1 + \left(\omega R_f C_{ig}\right)^2\right) \times \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2 \end{aligned} \quad \text{(ก.2.4)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ความสัมพันธ์ระหว่าง f และ C_{ig}

<u>ภาคผนวก ข.1</u> ความสัมพันธ์ระหว่าง f และ C_{ig} ขีดจำกัดกระแสอุ่นไส้หลอด

ในการพิจารณากระแสอุ่นไส้หลอด จะใช้สมการฟังก์ชันโอนย้ายของ I_{ph} และ V_S ดังในสมการที่ 2.52 สามารถหาความสัมพันธ์ได้โดยพิจารณาเฉพาะขนาดของฟังก์ชันโอนย้าย ดังนี้

$$\left[\frac{I_{ph}}{V_S}\right]^2 = \frac{\left(\omega_{ph} C_{ig}\right)^2}{\left(1-\omega_{ph}^2 LC_{ig}\right)^2 + \left(2\omega_{ph} R_f C_{ig}\right)^2} \qquad \text{(ข.1.1)}$$

จัดรูปสมการ ข.1.1ใหม่

$$1 - 2LC_{ig}\omega_{ph}^2 + \left(LC_{ig}\omega_{ph}^2\right)^2 + \left(2\omega_{ph} R_f C_{ig}\right)^2 - \left(\omega_{ph} C_{ig}\right)^2 \times \left[\frac{V_S}{I_{ph}}\right]^2 = 0 \quad \text{(ข.1.2)}$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปกำลังสัมบูรณ์

$$\left(LC_{ig}\right)^2 \omega_{ph}^4 - \left(2LC_{ig} - \left(2R_f C_{ig}\right)^2 + C_{ig}^2 \times \left[\frac{V_S}{I_{ph}}\right]^2\right)\omega_{ph}^2 + 1 = 0 \qquad \text{(ข.1.3)}$$

แสดงสัมประสิทธ์ของสมการที่ 3.13 ได้ดังสมการที่ ข.1.4

$$\begin{aligned} a\left(L, C_{ig}\right) &= \left(LC_{ig}\right)^2 \\ b\left(L, C_{ig}\right) &= -\left(2LC_{ig} - \left(2R_f C_{ig}\right)^2 + C_{ig}^2 \times \left[\frac{V_S}{I_{ph}}\right]^2\right) \\ k &= 1 \end{aligned} \qquad \text{(ข.1.4)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ภาคผนวก ข.2</u> ความสัมพันธ์ระหว่าง f และ C_{ig} ขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์

ในการพิจารณารงดันจุดหลอด จะใช้สมการฟังก์ชันโอนย้ายของ V_{ig} และ V_S ดังในสมการที่ 2.36 สามารถหาความสัมพันธ์ได้โดยพิจารณาเฉพาะขนาดของฟังก์ชันโอนย้าย ดังนี้

$$\left[\frac{V_{ig}}{V_S}\right]^2 = \frac{1+\left(\omega_{ig} R_f C_{ig}\right)^2}{\left(1-\omega_{ig}^2 LC_{ig}\right)^2 + \left(2\omega_{ig} R_f C_{ig}\right)^2} \qquad \text{(ข.2.1)}$$

จัดรูปสมการ ข.2.1ใหม่

$$1-2LC_{ig}\omega_{ig}^2 + \left(LC_{ig}\omega_{ig}^2\right)^2 + \left(2\omega_{ig} R_f C_{ig}\right)^2 - \left(1+\left(\omega_{ig} R_f C_{ig}\right)^2\right)\times\left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2 \qquad \text{(ข.2.2)}$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปกำลังสัมบูรณ์

$$\left(LC_{ig}\right)^2\omega_{ig}^4 - \left(2LC_{ig} - \left(2R_f C_{ig}\right)^2 + \left(R_f C_{ig}\right)^2 \times \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2\right)\omega_{ig}^2 + 1 - \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2 = 0 \qquad \text{(ข.2.3)}$$

แสดงสัมประสิทธ์ของสมการที่ 3.13 ได้ดังสมการที่ ข.2.4

$$\begin{aligned} a\left(L, C_{ig}\right) &= \left(LC_{ig}\right)^2 \\ b\left(L, C_{ig}\right) &= -\left(2LC_{ig} - \left(2R_f C_{ig}\right)^2 + \left(R_f C_{ig}\right)^2 \times \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2\right) \\ k\left(L, C_{ig}\right) &= 1 - \left[\frac{V_S}{V_{ig}}\right]^2 \end{aligned} \qquad \text{(ข.2.4)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายไพศาล บุญเจียม เกิดที่อำเภอกาบเชิง จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์กลาง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปีการศึกษา 2538 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย