

การศึกษาเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์  
ชนิดปรับความเข้มแสงได้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง



นายธีระ ราศรีจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

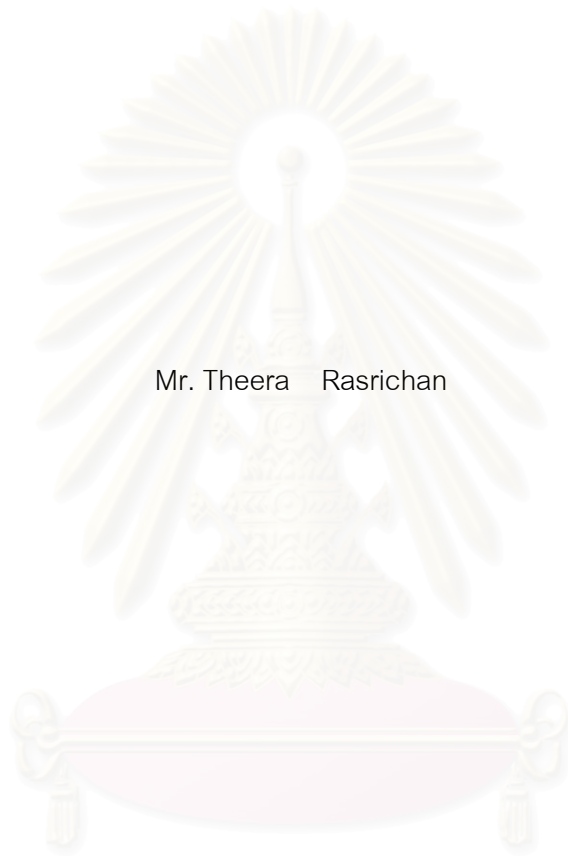
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1185-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON DESIGN CRITERIA OF ELECTRONIC DIMMING BALLAST  
FOR HPS LAMPS



Mr. Theera Rasrichan

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 2004

ISBN 974-53-1185-5



ธีระ ราศรีจันทร์ : การศึกษาเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความ  
เข้มแสงได้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง ( A STUDY ON DESIGN CRITERIA OF  
ELECTRONIC DIMMING BALLAST FOR HPS LAMPS )

อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ยุพธนา กุลวิฑิต , 99 หน้า. ISBN 974-53-1185-5.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความเข้มแสงได้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยขนาดของย่านการปรับแสงที่มีเสถียรภาพและความไวในการปรับความเข้มแสง จากการทดลองพบว่าบัลลาสต์ชนิดปรับความเข้มแสงด้วยการควบคุมแรงดันมีปัญหาด้านเสถียรภาพในย่านความเข้มแสงต่ำ ในขณะที่บัลลาสต์ชนิดปรับความเข้มแสงด้วยการควบคุมความถี่ไม่มีปัญหาดังกล่าว การคำนวณทางทฤษฎีโดยวิธีการประมาณด้วยความถี่หลักมุลแสดงให้เห็นว่าความต้านทานพลวัตที่เป็นลบของหลอด ประกอบกับความต้านทานพลวัตด้านออกที่มีค่าต่ำของบัลลาสต์ชนิดปรับความเข้มแสงด้วยการควบคุมแรงดันเป็นสาเหตุของปัญหา ส่วนความต้านทานพลวัตด้านออกในย่านความเข้มแสงต่ำของบัลลาสต์ชนิดปรับความเข้มแสงด้วยการควบคุมความถี่มีค่าสูงจึงไม่เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพ ในส่วนที่เกี่ยวกับความไวในการปรับความเข้มแสงนั้นพบว่าบัลลาสต์ที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดสูงจะมีความไวในการปรับความเข้มแสงสูง โดยเฉพาะเมื่อความถี่การทำงานเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรโหลด ดังนั้นจึงได้มีการคำนวณและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกและความไวในการปรับความเข้มแสงสำหรับกระแสผ่านหลอดค่าต่างๆกัน เมื่อใช้ค่าอุปกรณ์ของวงจรโหลดแตกต่างกัน สำหรับการเลือกใช้เป็นเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความเข้มแสงได้.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4570362221 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD: HPS LAMP/ BALLAST ELECTRONIC FOR HID LAMPS/ ELECTRONIC DIMMING BALLAST

THEERA RASRICHAN : A STUDY ON DESIGN CRITERIA OF ELECTRONIC DIMMING BALLAST FOR HPS LAMPS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. YOUTHANA KULVITIT, Ph.D. , 99 pp. ISBN 974-53-1185-5.

This thesis studies the effects of load circuit parameters on the behaviors of electronic dimming ballast for HPS lamps. Stable dimming range and dimming sensitivity were used as behavioral parameters. Experimental investigations shown that, voltage-control dimming ballast had a stability problem in the low light intensity range, while frequency-control dimming ballast did not. Theoretical calculations using fundamental frequency approximation revealed that, negative dynamic lamp resistance and low dynamic output resistance of the voltage-control dimming ballast are responsible for the instability at low light intensity. The high dynamic output resistance at low light intensity of the frequency-control dimming ballast eliminates stability problem. Regarding the dimming sensitivity, a high quality factor load circuit possesses high dimming sensitivity especially when the operating frequency is approaching load circuit resonant frequency. Ballast dynamic output resistance and dimming sensitivity as a function of lamp current for different load circuit parameters were calculated and plotted. This information can be used as optional design criteria for electronic dimming ballast.

Department.....Electrical engineering..... Student's signature.....  
 Field of study.....Electrical engineering..... Advisor's signature.....  
 Academic year.....2004..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและความเอาใจใส่อย่างดีเยี่ยมจาก ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ตลอดจนรุ่นพี่ห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ กำลังทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการพัฒนางานวิจัย รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ให้ วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาให้การสนับสนุนในทุกๆด้านและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญเรื่อง.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ .....	4
2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหลอดโซเดียมความดันสูง .....	5
2.1 หลอดปล่อยประจุความเข้มแสงสูง .....	5
2.2 การใช้งานหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แกนเหล็ก .....	13
2.3 การใช้งานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับหลอดโซเดียมความดันสูง .....	18
2.4 คุณลักษณะของแรงดัน-กระแส-และกำลังไฟฟ้าที่หลอดในช่วงการทำงานต่างๆ.....	24
2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับบัลลาสต์แกนเหล็ก .....	25
2.6 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร .....	25
2.7 สมการของวงจรสมมูลที่ทำงานในสภาวะอยู่ตัว .....	27
2.8 เงื่อนไขการทำงานและการออกแบบวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์.....	34
2.9 แนวทางการปรับความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียม ความดันสูง .....	39
2.10 ขอบเขตการปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง.....	43

บทที่	หน้า
3. เกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มแสงได้ .....	45
3.1 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ .....	46
3.2 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยพิจารณาพฤติกรรมการทำงานเป็นเกณฑ์ ในการออกแบบ .....	49
3.3 การเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุโดยพิจารณาพฤติกรรมการทำงาน เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ .....	63
3.4 การออกแบบวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ .....	67
3.5 สรุปผลการพิจารณาเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ .....	71
4. ผลการทดลองบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ .....	73
4.1 การทดลองบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จากเกณฑ์ในการออกแบบ .....	73
4.2 ผลการทดลองความไวในการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ในย่านความเข้มแสงสูง .....	87
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	89
5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย .....	90
รายการอ้างอิง .....	91
ภาคผนวก .....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	99



ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ .....	48
3.2 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ L, C แต่ลาคู่ จากการควบคุมความเข้มแสงโดยปรับความถี่การทำงาน .....	64
3.3 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ L, C แต่ลาคู่ จากการควบคุมความเข้มแสงโดยปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า .....	65
3.4 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ L, C แต่ลาคู่ จากการควบคุมความเข้มแสงทั้ง 2 แบบ .....	66
3.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบหม้อแปลงสร้างแรงดันสูงชั่วคราว .....	68



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกประเภทของหลอดไฟแสงสว่าง .....	6
2.2 โครงสร้างของหลอดโซเดียมความดันสูง .....	7
2.3 คุณลักษณะของกระแส – แรงดันของหลอดโซเดียมความดันสูงขนาด150 วัตต์ .....	11
2.4 วงจรสมมูลของหลอดโซเดียมความดันสูง .....	12
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดโซเดียมความดันสูง .....	12
2.6 ลักษณะการต่อหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แกนเหล็ก .....	13
2.7 วงจรจุดหลอดที่ต่อแบบกึ่งขนาน .....	14
2.8 วงจรจุดหลอดที่ต่อแบบอนุกรม .....	15
2.9 วงจรภายในของอุปกรณ์จุดหลอดกับบัลลาสต์แกนเหล็ก .....	15
2.10 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสของบัลลาสต์แกนเหล็กในขณะจุดหลอด .....	16
2.11 แรงดันตกคร่อมหลอด, กระแสผ่านหลอดขณะที่หลอดทำงานในสภาวะอยู่ตัว และกราฟคุณสมบัติของหลอดที่ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก.....	17
2.12 โครงสร้างของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่กำเนิดสัญญาณขับนำด้วยตัวเอง .....	18
2.13 โครงสร้างของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สัญญาณขับนำจากวงจร ประมวลสัญญาณ (IC Drive) .....	19
2.14 วงจรจุดหลอด (Igniter Electronic) .....	21
2.15 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ขณะจุดหลอด .....	23
2.16 แรงดันตกคร่อมหลอด, กระแสผ่านหลอดขณะที่หลอดทำงานในสภาวะอยู่ตัว และกราฟคุณสมบัติของหลอดที่ใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	24
2.17 พฤติกรรมของกระแส แรงดันคร่อมหลอด และกำลังไฟฟ้าที่หลอด ในขณะหลอดเริ่ม สว่างจนถึงกระทั่งหลอดสว่างถึงพิกัด(สภาวะอยู่ตัว) .....	24
2.18 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูง .....	25
2.19 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ .....	27
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟส ( $\phi$ ) กับความถี่ปัสถาน ( $f_s/f_o$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 – 5 .....	29
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ปัสถานกับความถี่ปัสถาน ( $f_s/f_o$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 – 5 .....	30
2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ได้กำลังที่พิกัด .....	32

รูปที่	หน้า
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(Watt) กับความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r/f_o$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 - 2.5.....	33
2.24 โครงสร้างวงจรถอดติลด์ทอนิกส์ .....	36
2.25 โครงสร้างภายในของวงจรถอดติลด์ทอนิกส์ .....	36
2.26 โครงสร้างที่สำคัญของอุปกรณ์จุดหลอด.....	39
2.27 วงจรสมมูลของบัลลาสต์ติลด์ทอนิกส์.....	40
2.28 โครงสร้างของการปรับความเข้มแสงโดยการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า .....	41
2.29 โครงสร้างของการปรับความเข้มแสงโดยการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์.....	42
2.30 โครงสร้างการปรับความเข้มแสงโดยการควบคุมค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ).....	43
3.1 วงจรสมมูลที่ใช้ในการออกแบบบัลลาสต์ติลด์ทอนิกส์.....	49
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุที่พิกัดการทำงาน.....	51
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การทำงานกับกระแสออกที่ค่า L, C แต่ละคู่.....	52
3.4 ลักษณะสมบัติกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดของหลอดโซเดียมความดันสูง .....	53
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ที่จุดทำงานต่างๆ.....	54
3.6 วงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ที่จุดทำงานของBallast Line กับ Lamp Line .....	55
3.7 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) จากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่.....	58
3.8 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) จากการปรับความถี่การทำงาน ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่.....	59
3.9 ขนาดความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_L$ ).....	60
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการควบคุมความเข้มแสงโดยการแปรค่าความถี่ เทียบกับกระแสผ่านหลอดเมื่อใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่.....	62
3.11 โครงสร้างที่สำคัญของอุปกรณ์จุดหลอด.....	67
3.12 การจำลองวงจรถอดติลด์ทอนิกส์จากโปรแกรม Orcad.....	69
3.13 การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์จากโปรแกรม Orcad.....	70
3.14 กระแส-แรงดันจุดหลอดของวงจรถอดติลด์ทอนิกส์จากโปรแกรมOrcad .....	70

รูปที่	หน้า
3.15 กระแส - แรงดันที่โหลดในสภาวะอยู่ตัวของวงจรมอเตอร์จากโปรแกรม Orcad ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าโดยมีความถี่การทำงานที่ 35 kHz .....	71
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านออก ( $I_B$ ) – แรงดันด้านออก ( $V_B$ ) ของบัลลาสต์ (Ballast line) จากการคำนวณและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่ และปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าเพื่อควบคุมความเข้มแสง .....	75
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านออก ( $I_B$ ) – แรงดันด้านออก ( $V_B$ ) ของบัลลาสต์ (Ballast line) จากการคำนวณและการทดลองโดยให้แรงดันด้านเข้ามีค่าคงที่ และปรับความถี่การทำงานเพื่อควบคุมความเข้มแสง .....	76
4.3 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) – แรงดันคร่อมหลอด ( $V_L$ ) ของ หลอดโซเดียมความดันสูงจากการทดลองและการคำนวณ.....	77
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) กับกระแส ผ่านหลอด ( $I_L$ ) จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงาน มีค่าคงที่และปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าเพื่อควบคุมความเข้มแสง .....	78
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) กับกระแส ผ่านหลอด ( $I_L$ ) จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยให้แรงดันไฟตรงด้าน มีค่าคงที่ และปรับความถี่การทำงานเพื่อควบคุมความเข้มแสง .....	78
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) และความ ต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_L$ ) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) จาก การคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่และปรับ แรงดันไฟตรงด้านเข้า.....	79
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) และความ ต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง( $R_L$ ) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) จาก การคำนวณทางทฤษฎีและการทดลอง โดยให้แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าคงที่และ ปรับความถี่การทำงาน.....	80

รูปที่	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของความต้านทานพลวัตด้านนอกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) และความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง( $R_L$ )หรือ (Overall Dynamic Resistance) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Ballast line) จากการคำนวณและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่และปรับแรงดันไฟตรง.....	81
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความควบคุมความเข้มแสงจากการปรับแรงดันในย่านความเข้มแสงต่ำ.....	82
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) จากการปรับแรงดันด้านเข้า ในช่วงที่มีจุดทำงานปกติ (A) และ ช่วงที่มีจุดทำงานที่ขอบเขต (B) .....	83
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) จากการปรับแรงดันด้านเข้า ในช่วงที่มีจุดทำงานวิกฤต (B) และ ช่วงที่ไม่มีจุดทำงาน.....	84
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความควบคุมความเข้มแสงจากการปรับความถี่การทำงาน.....	85
4.13 ความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดกับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ .....	87
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวของกระแสกับความถี่เทียบกับกระแสผ่านหลอดในย่านความเข้มแสงต่างๆ.....	88

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเบื้องต้น

การพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทำให้ความเป็นอยู่ของมนุษย์ในปัจจุบันมีความสะดวกสบายมากขึ้น อุปกรณ์ให้แสงสว่างเป็นผลผลิตมาจากการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมถึงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เริ่มต้นจากหลอดไส้ (Incandescent Lamp) มาเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp) จนมาถึงประเภทหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง (High Intensity Discharge Lamp) หรือ (HID Lamp) ซึ่งมีประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) ค่อนข้างสูง มีขนาดตั้งแต่ 30-130 ลูเมนต่อวัตต์ (Lm/W) รวมถึงมีอายุการใช้งานนานถึง 25,000 ชั่วโมง ปัจจุบันได้มีการนำหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง มาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เพื่อให้แสงสว่างแก่สถานที่ขนาดใหญ่ต่างๆ อาทิเช่น ห้างสรรพสินค้า โรงงาน อุตสาหกรรม สวนสาธารณะ ถนนหนทางต่างๆ เป็นต้น สำหรับชนิดของหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด โดยชนิดแรกคือ หลอดความดันไอปรอทหรือหลอดแสงจันทร์ (Mercury Vapor Lamp) มีประสิทธิภาพการส่องสว่างที่ประมาณ 30-60 Lm/W ใช้งานให้แสงสว่างตามถนน ธรรมชาติหรือบริเวณสวนสาธารณะทั่วไป ชนิดที่สองคือ หลอดเมทัลฮาไลด์ (Metal Halide Lamp) มีประสิทธิภาพการส่องสว่างที่ประมาณ 70-90 Lm/W ใช้งานให้แสงสว่างบริเวณที่โล่งแจ้งหรือบริเวณภายในอาคารขนาดใหญ่ต่างๆ หรือสถานที่อื่นๆ และชนิดสุดท้ายคือหลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamp) เป็นหลอดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงสุดในบรรดาหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง มีประสิทธิภาพการส่องสว่างที่ประมาณ 80-130 Lm/W ใช้งานให้แสงสว่างบริเวณถนนสายประธาน (ทางด่วน) หรือบริเวณอาคารสถานที่ขนาดใหญ่ต่างๆ ทั้งภายในและภายนอกอาคาร สำหรับอัตราการใช้งานของหลอดโซเดียมความดันสูงพบว่า มีจำนวนมากเมื่อเทียบกับหลอดปล่อยประจุความเข้มสูงแบบอื่น รวมถึงมีประสิทธิภาพการส่องสว่างและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ทำให้ได้รับความนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และเป็นหลอดที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ด้วย

การใช้งานหลอดโซเดียมความดันสูงจำเป็นต้องใช้บัลลาสต์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ผ่านหลอดให้มีค่าที่เหมาะสม และทำงานร่วมกับชุดจุดหลอด (Igniter) เพื่อทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า

สูงที่ใช้ในการจุดหลอดโซเดียมความดันสูงในตอนเริ่มแรก จากนั้นหลอดก็จะสว่างเพิ่มขึ้น(Warm Up)จนกระทั่งสว่างถึงพิกัดกำลังไฟฟ้าของหลอดตามลำดับ ในขณะที่ใช้งานบางครั้งหรือบางเวลาพบว่าบริเวณสถานที่ต่างๆปริมาณความเข้มแสงอาจจะมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น เนื่องจากอาจมีแสงจากธรรมชาติเข้ามาเพิ่มเติมแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้ หรือบางครั้งก็อาจมีความต้องการที่จะประหยัดพลังงานไฟฟ้าเป็นต้น ดังนั้นบัลลาสต์ที่สามารถปรับแสงได้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อควบคุมปริมาณความเข้มแสง (Dimming) ให้ได้ตามต้องการโดยเฉพาะสถานที่หลายแห่ง อาทิเช่น ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ บริเวณถนนทางด่วนที่ต้องการประหยัดพลังงานช่วงหัวค่ำ โรงงานอุตสาหกรรม สนามกีฬา และสถานที่อื่นๆที่ต้องการควบคุมความเข้มแสงเป็นต้น จึงมีแนวคิดที่จะควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ให้มีปริมาณความเข้มแสงเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งานได้ การลดความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง อาจจะทำให้ได้โดยการปิดไฟแสงสว่างบางส่วน ซึ่งการลดแสงสว่างโดยวิธีนี้จะทำได้ง่ายแต่ไม่สามารถควบคุมให้ได้ปริมาณตามต้องการและการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอ ส่วนการควบคุมอีกวิธีหนึ่งคือ การควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงโดยตรง ซึ่งความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะแปรผันกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอด สำหรับกรณีของบัลลาสต์แกนเหล็กนั้นการควบคุมความเข้มแสงจะต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดโซเดียมความดันสูง สำหรับในทางปฏิบัติจะยุ่งยากและย่ำแย่ในการควบคุมความเข้มแสงจะน้อย เนื่องจากจะเกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ เป็นผลทำให้หลอดดับได้ แต่ถ้าใช้ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงได้ และมีการกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบที่เหมาะสมจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ปัญหาที่ตามมาจากการควบคุมความเข้มแสงก็คือ ทำให้หลอดมีประสิทธิภาพการส่องสว่างลดลง รวมถึงอายุการใช้งานของหลอดลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากการใช้งานไม่เต็มพิกัดกำลังไฟฟ้าของหลอดโซเดียมความดันสูงนั่นเอง

การควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง โดยใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีการพัฒนากันอย่างแพร่หลายและสามารถทำได้หลายวิธี แต่ส่วนมากนิยมใช้การควบคุมความเข้มแสงโดยวิธีการปรับความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยปรกติแล้วจะทำงานสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เสมอ ซึ่งสามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และมีย่านการควบคุมความเข้มแสงกว้าง รวมถึงทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเสถียรภาพการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงในย่านความเข้มแสงต่างๆได้ แต่จะมีปัญหาเรื่องความไวในการควบคุมความเข้มแสงเกิดขึ้น กล่าวคือ หากต้องการปรับความเข้มแสงให้มากขึ้น จะต้องทำการเปลี่ยนความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าลดลงหรือเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะ

มีผลทำให้การควบคุมความเข้มแสงของหลอดเกิดความไม่แน่นอนขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ขนาดสูงขึ้นในย่านความเข้มแสงสูง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถควบคุมความเข้มแสงหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดย่านการปรับความเข้มแสง และปรับปรุงปัญหาเรื่องความไวในการควบคุมความเข้มแสง ให้สามารถควบคุมความเข้มแสงให้มีความแน่นอนขึ้นต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความเข้มแสงได้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง
2. ศึกษาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการปรับความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงในย่านความเข้มแสงต่ำ
3. ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความไวในการควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความเข้มแสงได้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง
2. วิเคราะห์สาเหตุและแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการปรับความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ
3. ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความไวในการปรับความเข้มแสง

## 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง
2. ศึกษาสาเหตุการเกิดปัญหาเสถียรภาพของการปรับความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงในย่านความเข้มแสงต่ำ
3. จำลองการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง



4. หาแนวทางในการออกแบบบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง
5. ออกแบบและสร้างบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง
6. ทดลองบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง
7. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี
8. แก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการปรับความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ
9. ศึกษาสาเหตุของปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงสูง
10. หาแนวทางปรับปรุงบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์และแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
11. ประเมินผลและเขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงเกณฑ์ในการออกแบบบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างเหมาะสม
2. เข้าใจถึงสาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงของบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงได้

#### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1. บทนำ
2. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรหลอดโซเดียมความดันสูง บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ แนวทางในการปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง
3. การออกแบบบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการปรับความเข้มแสงและการวิเคราะห์ความไวในการปรับความเข้มแสง
4. ผลการทดลองของการทำงานบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี
5. สรุป วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ
6. ภาคผนวก

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหลอดโซเดียมความดันสูง

#### บทนำ

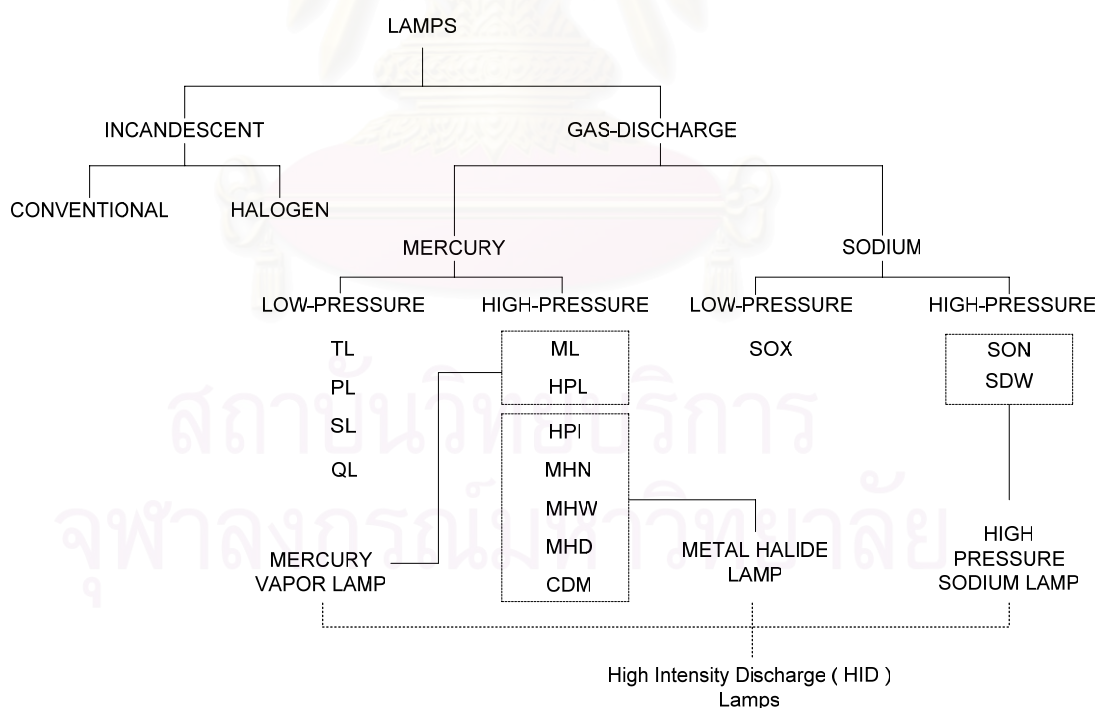
การควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง โดยใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และสามารถทำได้หลายวิธี แต่การควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงพบว่ามักเกิดปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ (หลอดจะดับ) และปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงสูง (การควบคุมแสงไม่นุ่มนวล) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะต้องเข้าใจถึงการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูง รวมทั้งวิธีการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างถูกต้อง ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของหลอดโซเดียมความดันสูง การทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก รวมถึงการใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ สมการพื้นฐานของวงจรสมมูลบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบ และวิธีการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงอย่างเหมาะสม

#### 2.1 หลอดปล่อยประจุความเข้มแสงสูง (High Intensity Discharge Lamp: HID Lamp)

หลอดไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบแสงสว่างมีมากมายหลายชนิด แต่ชนิดนั้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานตามสถานที่ต่างๆตามคุณลักษณะของหลอด รูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกหลอดตามลักษณะการกำเนิดแสงเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มของหลอดเผาไส้ (Incandescent Lamp) และกลุ่มของหลอดก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge Lamp) สำหรับหลอดก๊าซดิสชาร์จจะต้องใช้งานร่วมกับบัลลาสต์เพื่อควบคุมกระแสผ่านหลอด เนื่องจากการทำงานของหลอดประเภทก๊าซดิสชาร์จต้องการแหล่งจ่ายที่มีลักษณะใกล้เคียงความเป็นแหล่งกระแส ซึ่งบัลลาสต์ทั่วไป (แกนเหล็ก) จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของหลอด ดังนั้นเมื่อนำบัลลาสต์ไปต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันจะมีผลทำให้แหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงแหล่งกระแส ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ทำให้หลอดมีเสถียรภาพในการทำงาน

หลอดก๊าซดิสชาร์จสามารถแบ่งตามชนิดของก๊าซที่บรรจุภายในหลอดได้ 2 ชนิด คือหลอดที่ใช้ก๊าซปรอทและหลอดที่ใช้ก๊าซโซเดียม ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดจะมีการใช้งานทั้งที่ความดันต่ำและที่ความดันสูง สำหรับหลอดก๊าซดิสชาร์จที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงจะเป็นหลอดที่ใช้ก๊าซโซเดียม โดยเฉพาะหลอดโซเดียมความดันต่ำ (Low Pressure Sodium: SOX) เป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงสุดที่มีการผลิตจำหน่าย ส่วนหลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium: SON) เป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างรองลงมา และเป็นหลอดที่ใช้วิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

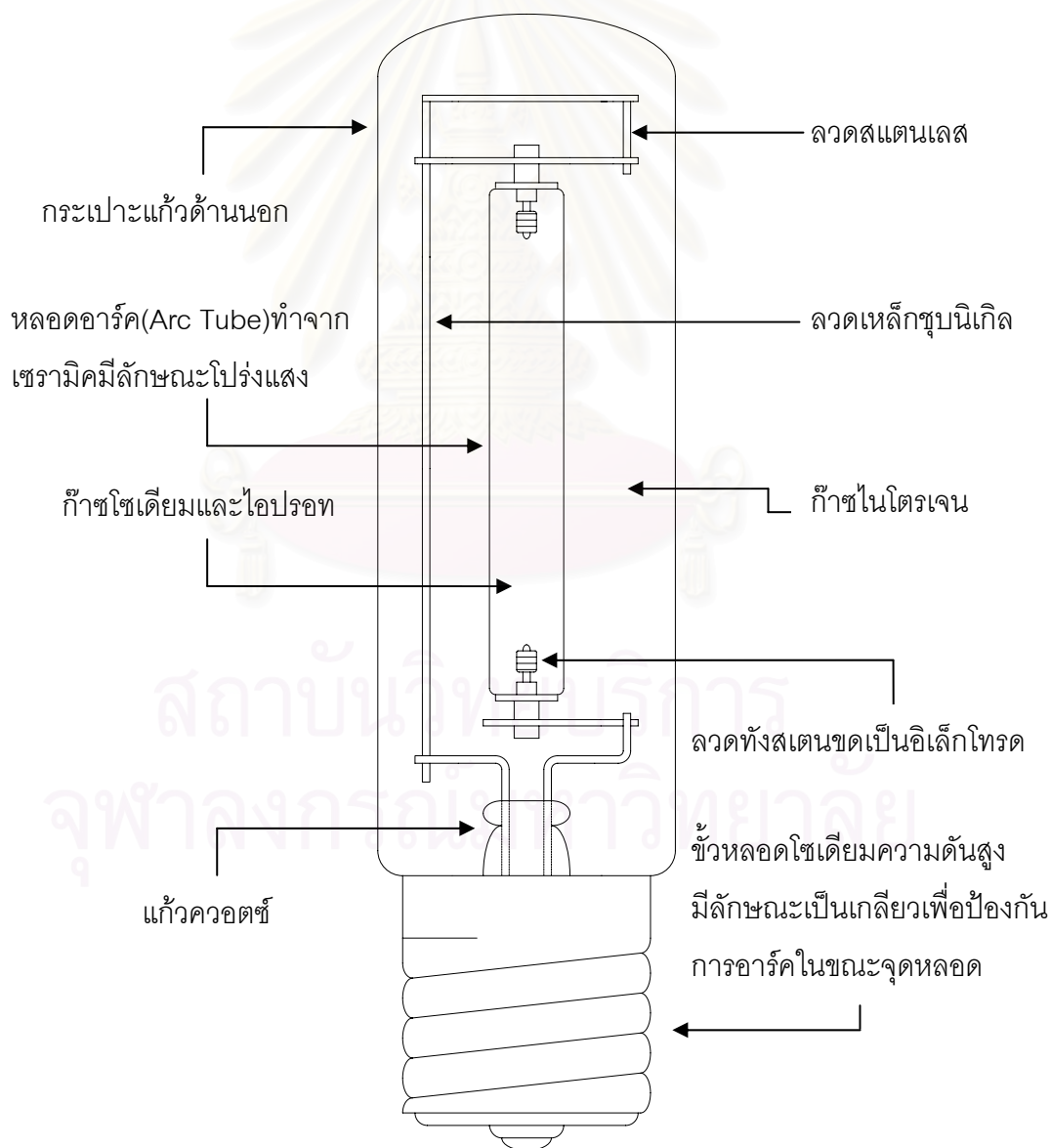
เนื่องจากปัจจุบันหลอดโซเดียมความดันสูงถูกนำไปใช้งานในระบบแสงสว่างตามสถานที่ที่ต้องการปริมาณแสงสว่าง โดยเฉพะอย่างยิ่งในระบบแสงสว่างบนทางด่วนทั่วไป (High Way Express) รวมถึงบริเวณสถานที่อื่นๆที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ หลอดโซเดียมความดันสูงเป็นหนึ่งในหลอดปล่อยประจุความเข้มแสงสูง ซึ่งมี 3 ชนิด ได้แก่ หลอดความดันไอปรอท หลอดเมทัลฮาไลด์ และหลอดโซเดียมความดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของหลอดไฟแสงสว่าง

### 2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของหลอดโซเดียมความดันสูง

หลอดโซเดียมความดันสูงเป็นหลอดปล่อยประจุความเข้มแสงสูงที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานกับพื้นที่ที่ต้องการปริมาณแสงสว่างมากๆ หลอดโซเดียมความดันสูงเป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงสุดในบรรดาหลอดปล่อยประจุความเข้มแสงสูง (HID) ทั้งหมด สำหรับงานที่ต้องการควบคุมความเข้มแสงของหลอดชนิดนี้พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นคือ ปัญหาเสถียรภาพในการปรับความเข้มแสงและปัญหาความไวในการปรับความเข้มแสง ดังนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงโครงสร้าง และกระบวนการทำงานของหลอดที่สภาวะต่างๆ เมื่อใช้งานกับบัลลาสต์ที่สามารถปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้ ใน [3] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหลอดโซเดียมความดันสูง

โครงสร้างของหลอดโซเดียมความดันสูงแสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

#### 2.1.1.1 หลอดอาร์ค (Arc Tube) ของหลอดโซเดียมความดันสูง

หลอดอาร์คมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงสว่าง โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กและยาว เพื่อให้ความหนาแน่นของกระแสภายในหลอดอาร์คมีค่ามากจึงเป็นผลทำให้ความเข้มแสงที่เกิดขึ้นมีค่ามากได้เช่นกัน(ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต)รวมถึงในขณะที่ใช้งานหลอดอาร์คจะมีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง ได้แก่ สารเซรามิกที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งนอกจากจะมีความทนทานต่อความร้อนสูงและยังสามารถปล่อยให้แสงผ่านออกมาได้ โดยห้องทดลองค้นคว้าด้านไฟฟ้าแสงสว่าง ได้เอาสารเซรามิกนี้มาค้นคว้าวิจัยต่อจนปรากฏเป็นสารเซรามิกใหม่ที่มีชื่อว่า Polycrystalline Translucent alumina material ซึ่งถูกนำไปใช้เป็นหลอดอาร์คสำหรับบรรจุก๊าซโซเดียมและไอปรอทที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง

#### สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญภายในหลอดอาร์คมีดังนี้

1. ก๊าซซีนอน (Xenon) เป็นก๊าซเฉื่อยที่ทำหน้าที่ให้ก๊าซโซเดียมแตกตัวได้เร็วขึ้น
2. ไอปรอท (Mercury) เป็นตัวที่ผสมกับไอโซเดียมทำให้แสงมีความนุ่มนวลมากขึ้น
3. โซเดียม (Sodium) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงสว่าง
4. อิเล็กโทรด (Electrode) เป็นทั้งสแตนท์มีลักษณะเป็นขดลวดเพื่อเพิ่มพื้นที่นำกระแส

#### 2.1.1.2 กระเปาะแก้วด้านนอก (Bulb Tube) ของหลอดโซเดียมความดันสูง

กระเปาะแก้วด้านนอกทำจากแก้วบอลโลซิลิเกต ซึ่งมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดีและมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง โดยช่องที่อยู่ระหว่างกระเปาะแก้วภายนอกกับหลอดอาร์คนั้นจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของโลหะที่ติดอยู่กับหลอดอาร์ค จากนั้นจึงใส่ก๊าซไนโตรเจนเข้าไป (เล็กน้อย) เพื่อกรองสเปกตรัมของคลื่นแสงบางช่วงที่ไม่ต้องการออกไป กระเปาะแก้วภายนอกจะช่วยควบคุมอุณหภูมิของหลอดอาร์คให้สม่ำเสมอ เนื่องจากไม่มีอากาศจากภายนอกเข้าไปรบกวนหรือเกิดการพาความร้อน ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่หลอดอาร์คได้

## 2.1.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของหลอดโซเดียมความดันสูง

หลักการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูง คือ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดอาร์คจะเป็นผลทำให้ไอของโซเดียมเกิดการระเหยภายใต้อุณหภูมิที่สูง ดังนั้นจึงทำให้เกิดแสงสว่างออกมาได้ การที่ไอของโซเดียมสามารถให้แสงสว่างออกมานั้นเกิดจากอิออนที่มาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในหลอดอาร์คไปชนกับอะตอมของไอโซเดียม ทำให้อิเล็กตรอนของอนุภาคโซเดียมกระเด็นหลุดออกจากวงโคจรปกติไปสู่วงโคจรที่มีสถานะสูงขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ เมื่อกลับสู่วงโคจรเดิมจะคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมาในช่วงสเปกตรัมของแสงขาวประมาณ 500 นาโนเมตร จาก [2]และ[4] โดยมีลักษณะเป็นแสงสีเหลือง ซึ่งการคายพลังงานส่วนเกินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไอโซเดียม ถ้าอุณหภูมิและความดันมีขนาดตามข้อกำหนดตามการออกแบบของผู้ผลิตแล้ว การแผ่รังสีของคลื่นแสงจะครอบคลุมสเปกตรัมของแสงสว่างเป็นช่วงกว้างได้

ในทางปฏิบัตินั้นจะมีการผสมไอปรอทเข้ากับไอโซเดียม เพื่อทำหน้าที่ควบคุมสีและระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอด นอกจากนั้นจะมีแก๊สซีนอนอีกส่วนหนึ่งที่บรรจุในหลอดอาร์คเพื่อช่วยนำกระแสในตอนเริ่มทำงาน แต่การที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลตอนเริ่มต้นได้นั้นต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงสำหรับการจุดหลอดให้ติด ดังนั้นจึงต้องมีวงจรจุดหลอด (Igniter) เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงลักษณะเป็นช่วงๆ (High Voltage Pulse) ซึ่งแรงดันเป็นช่วงๆนี้จะต้องมีขนาดและช่วงเวลาที่เหมาะสมพอที่จะทำให้แก๊สซีนอนเกิดการอิออนไนซ์และจุดหลอดติดต่อไปได้

บัลลาสต์จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสให้มีค่าคงที่ รวมถึงจำกัดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหลอด หลอดโซเดียมความดันสูงจะมีการอุ่นหลอด (Warm Up) ประมาณ 3 – 4 นาที ก่อนที่จะให้แสงสว่างถึงพิกัด ในช่วงของการอุ่นหลอดแสงสว่างที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนสีไปเรื่อยๆ โดยในตอนแรกจะมีสีน้ำเงินปนขาวซึ่งเกิดจากแก๊สซีนอนที่ถูกอิออนไนซ์ หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินที่ค่อนข้างสดใสซึ่งเป็นสีของไอปรอท และเมื่อความสว่างเพิ่มมากขึ้นสีจะมีลักษณะเป็นโทนสีเหลือง จนกระทั่งความดันในหลอดอาร์คมีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงพิกัด หลอดจะให้แสงออกมาโดยมีลักษณะเป็นแสงสีขาวออกโทนสีทอง (Golden White)

สำหรับในกรณีที่หลอดโซเดียมความดันสูงเกิดการดับขึ้นมา การเริ่มต้นจุดหลอดใหม่นั้นต้องรอให้หลอดคืนสภาพของก๊าซต่างๆภายในหลอดให้เป็นปกติเสียก่อน จึงสามารถเริ่มจุดหลอดใช้งานต่อไปได้ ซึ่งช่วงเวลากคืนสภาพของก๊าซ (Re-Strike time) ของหลอดโซเดียมความดันสูง

จะมีเวลาน้อยสุดในบรรดาหลอดปล่อยประจุความเข้มแสงสูง เนื่องจากค่าความต้านภายในหลอดอาร์คของหลอดโซเดียมความดันสูงนั้นจะมีค่าต่ำกว่าหลอดความดันไอปรอท (หลอดแสงจันทร์) มาก เนื่องจากคุณสมบัติของก๊าซปรอทที่สภาวะอุณหภูมิค่าใดๆจะมีความดันที่สูงกว่าก๊าซโซเดียม ดังนั้นเมื่อกระแสไฟฟ้าต้นทางเกิดการขัดข้องไปชั่วขณะจะทำให้หลอดดับไป ซึ่งหลอดอาร์คของหลอดโซเดียมความดันสูงสามารถเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็ว และเวลาที่หลอดจะสามารถจุดติดได้อีกครั้งหนึ่งจะประมาณ 1 นาที หรือ 2 นาทีซึ่งนับว่าสั้นมาก

### การทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงแบ่งออกเป็น 3 สภาวะ คือ

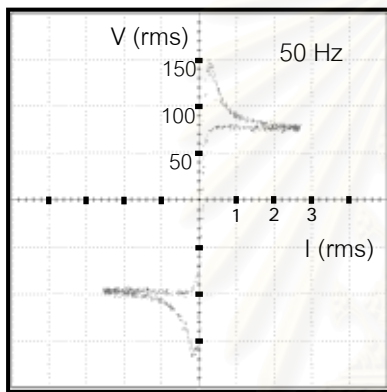
1. ช่วงก่อนจุดหลอด
2. ช่วงหลังจุดหลอด
3. ช่วงหลอดทำงานในสภาวะอยู่ตัว

ช่วงก่อนจุดหลอดค่าความต้านทานของหลอดโซเดียมความดันสูงจะมีค่าสูงมาก ดังนั้นการจุดหลอดให้ติดสว่างนั้นจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดสูง เพื่อจุดหลอดให้ติดสว่างซึ่งค่าแรงดันที่ใช้ในการจุดหลอดจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดอาร์ค ความยาวของหลอดอาร์ค รวมถึงอุณหภูมิภายในหลอดอาร์ค จากนั้นเมื่อหลอดโซเดียมความดันสูงถูกจุดติดทำให้มีกระแสไหลผ่านหลอด โดยค่าความต้านทานของหลอดจะมีค่าที่ค่าหนึ่ง(ค่าประมาณ 10 โอห์ม) ต่อจากนั้นหลอดก็จะสว่างขึ้นเรื่อยๆ ( Warm Up ) ซึ่งค่าความต้านทานของหลอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่พิกัด (ค่าประมาณ 48 โอห์ม) ซึ่งเป็นการทำงานที่สภาวะอยู่ตัวของหลอด

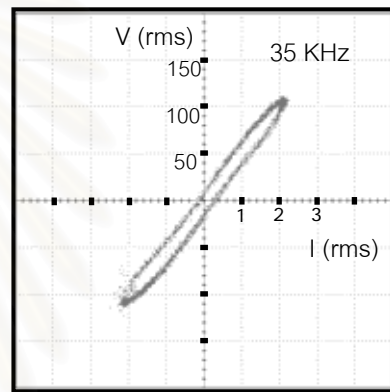
#### 2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดโซเดียมความดันสูง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดโซเดียมความดันสูง ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหลผ่านหลอด แรงดันตกคร่อมหลอด และความถี่การทำงานสวิตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (A - B) โดยที่อิมพีแดนซ์ประสิทธิผล (Effective Impedance) ของหลอดโซเดียมความดันสูงสามารถประมาณเป็นตัวต้านทานสมมูลไม่เชิงเส้นที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่มีรูปคลื่นไซน์ป้อนให้กับหลอด โดยค่าความต้านทานพลวัตของหลอดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องใน 1 รอบส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่หลอดเป็นแบบไม่เชิงเส้น ดังรูปที่ 2.3 (A)

แต่เมื่อเพิ่มความถี่การทำงานให้กับหลอด ทำให้พฤติกรรมของกระแสและแรงดันที่หลอด มีคุณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นลดลง ดังรูปที่ 2.3 (B) เนื่องจากกระบวนการแตกตัวเป็น ไอออนของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหลอดยาวกว่าคาบของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหลอดที่มีค่าสั้น มากสำหรับการทำงานที่ความถี่สูงของหลอด จึงทำให้กระบวนการดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสได้ ดังนั้นเป็นผลให้ความหนาแน่นของพลาสมา มีลักษณะ เกือบคงที่และอิมพีแดนซ์ประสิทธิผลทุกอย่างขณะเกือบคงที่ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่าน หลอด – แรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้



(A) Low Frequency: 50 Hz



(B) High Frequency: 35 KHz

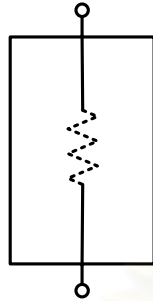
รูปที่ 2.3 คุณลักษณะของกระแส – แรงดันของหลอดโซเดียมความดันสูงขนาด 150 วัตต์

#### 2.1.4 วงจรสมมูลของหลอดโซเดียมความดันสูง

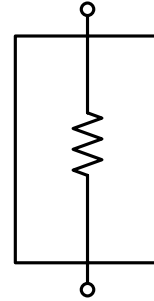
เนื่องจากการทำงานที่แตกต่างกันในช่วงก่อนจุดหลอดและหลังการจุดหลอด ดังนั้นวงจร สมมูลของหลอดจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานต่างๆ กล่าวคือก่อนการจุดหลอดจะไม่มีกระแสไฟ ฟ้าไหลผ่านหลอดโซเดียมความดันสูง ดังนั้นหลอดโซเดียมความดันสูงจะมีลักษณะเป็นวงจรเปิด หรือความต้านทานสมมูลของหลอดมีค่าเป็นอนันต์ จึงเขียนวงจรสมมูลของหลอดโซเดียมความ ดันสูงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4(A) หลังจากจุดหลอดติดจะเป็นช่วง (Warm Up) ซึ่งค่าความต้านทาน สมมูลของหลอดโซเดียมความดันสูงจะมีค่าลดลงต่ำมาก จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงพิกัดกำลัง ไฟฟ้าของหลอด(สภาวะอยู่ตัว) การใช้หลอดโซเดียมความดันสูงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มี การทำงานที่ความถี่สูง สามารถประมาณคุณสมบัติของหลอดโซเดียมความดันสูงเป็นตัวต้านทาน



สมมูลได้ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านหลอด-แรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นโดยประมาณ ทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดโซเดียมความดันสูงได้ดังรูปที่ 2.4 (B)



$$R_L = \infty \Omega$$



$$R_L(t) \leq 2.3t^2 + 9t + 1 \Omega ; 0 < t < 3 \dots \text{min}$$

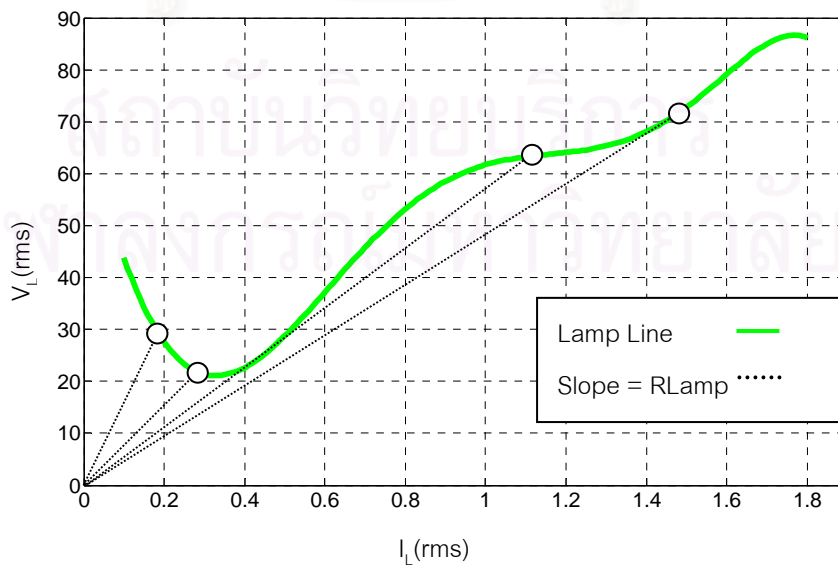
$$R_L(t) \leq 48 \Omega ; t > 3 \dots \text{min}$$

(A) ช่วงก่อนจุดหลอด

(B) ช่วงหลังจุดหลอดจนถึงช่วงสภาวะอยู่ตัว

รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของโซเดียมความดันสูง

ถึงแม้ว่าหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้งานกับแหล่งจ่ายความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติเป็นความต้านทานสมมูลแบบเชิงเส้น แต่ค่าความต้านทานสมมูลของหลอด ( $R_L$ ) จะมีค่าไม่คงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังออกของหลอดโซเดียมความดันสูง เมื่อกำลังไฟฟ้าด้านออกมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ความชัน (Slope) ของกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหลอดโซเดียมความดันสูงมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานสมมูลของหลอดแสดงดังรูปที่ 2.5



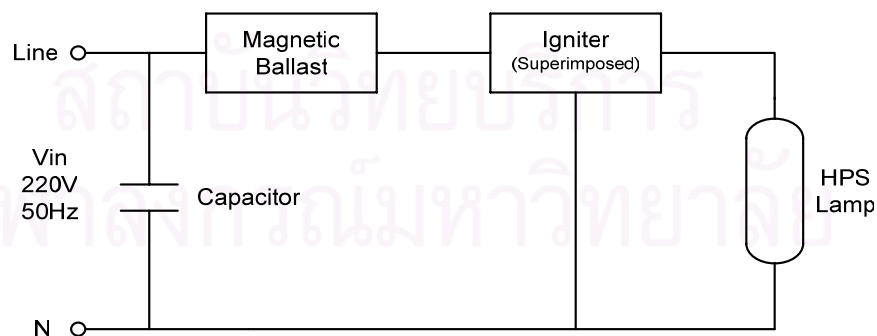
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดโซเดียมความดันสูง

## 2.2 การใช้งานหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แกนเหล็ก

การใช้งานหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แกนเหล็ก จำเป็นต้องมีอุปกรณ์จุดหลอดในสภาวะเริ่มแรกเพื่อทำหน้าที่สร้างแรงดันสูงชั่วขณะ โดยทำให้เกิดพลาสมา (Plasma) ของกระแสที่ไหลจากขั้วหนึ่งไปสู่อีกขั้วหนึ่งกระแสจึงสามารถไหลผ่านหลอดได้ ในขณะเดียวกันจะต้องมีบัลลาสต์เพื่อทำหน้าที่จำกัดการไหลของกระแสผ่านหลอด ซึ่งหมายถึงการทำให้แหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงแหล่งกระแส ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านหลอดจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเกิดขึ้น ทำให้หลอดมีเสถียรภาพการทำงานได้

การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานของหลอดโซเดียมความดันสูงร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กรวมถึงหลักการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นต้องเข้าใจถึงโครงสร้างและการทำงานของบัลลาสต์แกนเหล็กที่ใช้ร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูง โดยเฉพาะโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์จุดหลอด ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มแสงได้ รวมถึงเข้าใจแนวทางในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพและปัญหาด้านความไวในการปรับความเข้มได้

รูปที่ 2.6 แสดงการต่อหลอดโซเดียมความดันสูงเข้ากับบัลลาสต์แกนเหล็กและตัวจุดหลอด โดยมีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อทำหน้าที่เพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการต่อหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แกนเหล็ก

อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูงมีดังต่อไปนี้

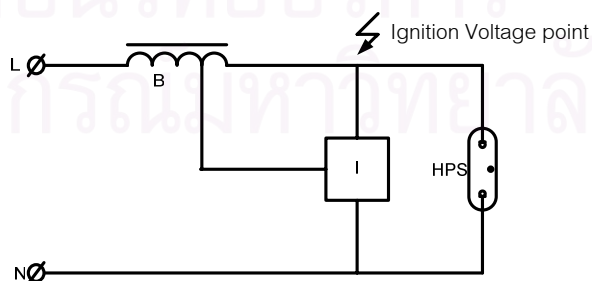
### 2.2.1 บัลลาสต์แกนเหล็ก

บัลลาสต์แกนเหล็กที่ใช้งานร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูง มีลักษณะโครงสร้างที่ใหญ่กว่าบัลลาสต์แกนเหล็กที่ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป ขนาดของบัลลาสต์แกนเหล็กที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงจะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้ หน้าที่สำคัญของบัลลาสต์ประเภทนี้คือ ควบคุมขนาดกระแสผ่านหลอดให้มีค่าคงที่ เนื่องจากมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำสูง(~200mH) เมื่อต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันจะทำให้มีลักษณะเข้าใกล้แหล่งกระแส ในขณะที่จุดหลอดบัลลาสต์จะมีความทำงาน 2 ประเภท คือ ประเภทแรกจะไม่สร้างแรงดันจุดหลอดขึ้น ซึ่งการสร้างแรงดันจุดหลอดจะเป็นหน้าที่ของอุปกรณ์จุดหลอด และบัลลาสต์อีกประเภทจะทำงานร่วมกับอุปกรณ์จุดหลอดหรือมีลักษณะรวมเป็นชุดเดียวกัน โดยบัลลาสต์จะสร้างแรงดันจุดหลอดขึ้นจากนั้นจะควบคุมกระแสให้มีค่าคงที่ด้วยเช่นกัน

### 2.2.2 อุปกรณ์จุดหลอด

อุปกรณ์จุดหลอดที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงมีหลายประเภท แต่ละประเภทมีหน้าที่เหมือนกันคือ กำเนิดแรงดันสูงเพื่อจุดหลอด แต่จะมีหลักการทำงานที่แตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกเป็น 2 ประเภทที่สำคัญได้ดังนี้

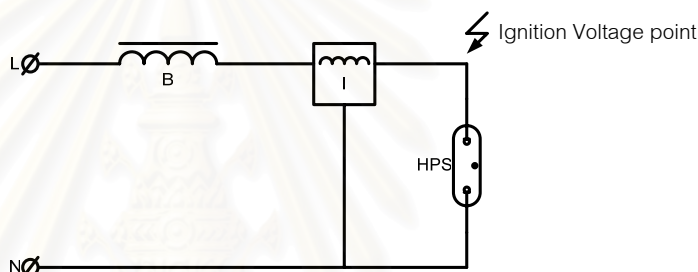
#### 2.2.2.1 Semi – Parallel Impulser Igniter (วงจรจุดหลอดที่ต่อแบบกึ่งขนาน)



รูปที่ 2.7 วงจรจุดหลอดที่ต่อแบบกึ่งขนาน

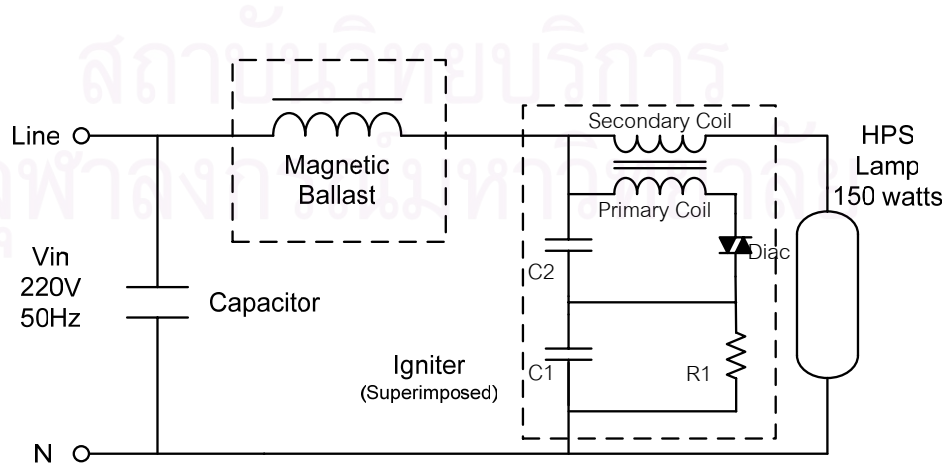
อุปกรณ์จุดหลอดประเภทนี้จะรวมเป็นชุดเดียวกับบัลลาสต์แกนเหล็ก การสร้างแรงดันจุดหลอดเป็นหน้าที่ของบัลลาสต์โดยมีตัวจุดหลอดทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า จากนั้นจะปล่อยประจุไฟฟ้าไปสู่อุปกรณ์อย่างทันทีทันใดจึงทำให้เกิดแรงดันจุดหลอดขึ้น ซึ่งมีข้อดีคือจะไม่มีกระแสสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นที่ตัวจุดหลอดในขณะที่หลอดทำงาน ส่วนข้อเสียคือวงจรนี้มีลักษณะการต่อไม่เหมาะสมแก่การนำไปออกแบบเป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากต้องการให้ตัวจุดหลอดมีลักษณะการต่อเป็นแบบอนุกรม เพื่อให้ตัวจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำด้านโหลดหลังจากหลอดถูกจุดติด

### 2.2.2.2 Superimposed (Series) Igniter (วงจรจุดหลอดที่ต่อแบบอนุกรม)



รูปที่ 2.8 วงจรจุดหลอดที่ต่อแบบอนุกรม

เป็นชนิดที่ใช้งานการวิจัย เนื่องจากบัลลาสต์กับตัวจุดหลอดทำงานแยกกัน รวมถึงมีการต่อวงจรเป็นแบบอนุกรม สามารถเป็นเงื่อนไขการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามที่กำหนดได้จากรูปที่ 2.8 สามารถจำแนกถึงองค์ประกอบภายในของ Superimposed Igniter ได้ดังรูปที่ 2.9

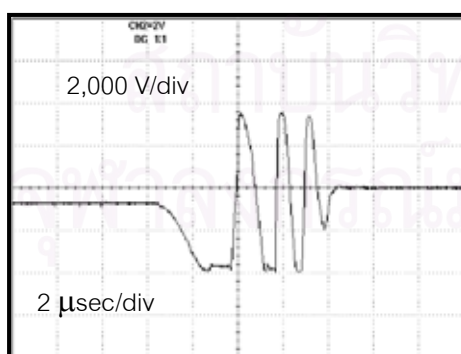


รูปที่ 2.9 วงจรภายในของอุปกรณ์จุดหลอดกับบัลลาสต์แกนเหล็ก

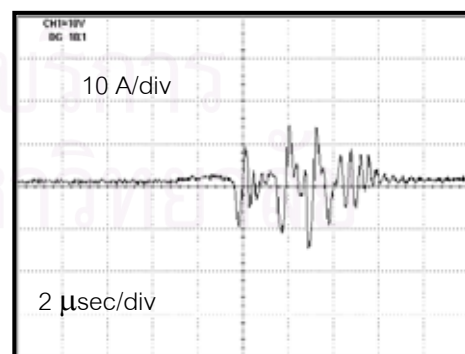
สำหรับในการทดลองนั้น อุปกรณ์จุดหลอดที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงจะเป็นชนิด Superimposed ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยสร้างแรงดันสูงชั่วขณะเป็นแบบทวีแรงดัน (Step-Up Voltage) ซึ่งวงจรมีลักษณะเป็นแบบหม้อแปลงออโต (Auto Transformer) แรงดันสูงชั่วขณะที่ได้ จะเกิดเฉพาะที่หลอดเท่านั้น และไม่ส่งผลกระทบต่อบัลลาสต์แกนเหล็กในขณะจุดหลอด แต่จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อุปกรณ์จุดหลอดในขณะที่หลอดทำงาน โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้ สามารถละลายได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่บัลลาสต์แกนเหล็กซึ่งมีค่ามากกว่า

### 2.2.3 การทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์แกนเหล็ก

การให้หลอดโซเดียมความดันสูงทำงานร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็ก จะมีลักษณะการต่อวงจรดังในรูปที่ 2.9 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าไปในวงจร ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านบัลลาสต์เพื่อไปยังตัวเก็บประจุ C2 เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้า ขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ C1 ก็เก็บพลังงานไฟฟ้าเช่นเดียวกัน เมื่อแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทั้งสองมีขนาดถึงค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ที่พิกัดของไดแอค ไดแอคจะลัดวงจรทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในตัวเก็บประจุ C2 ถูกคายพลังงานออกมา ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดด้านปฐมภูมิแบบทันทีทันใด ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิเกิดขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบหม้อแปลงทวีแรงดันเป็นผลให้เกิดแรงดันสูงชั่วขณะขึ้น (ประมาณ 3,500 – 4,000 โวลต์) แต่จะเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาอันสั้น (ประมาณ 5 ไมโครวินาที) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(A) จากนั้นจะเกิดพลาสมาบริเวณขั้วอิเล็กโทรดภายในหลอดอาร์คทำให้หลอดถูกจุดติดขึ้นมาได้



(A) แรงดันคร่อมหลอดขณะจุดหลอด

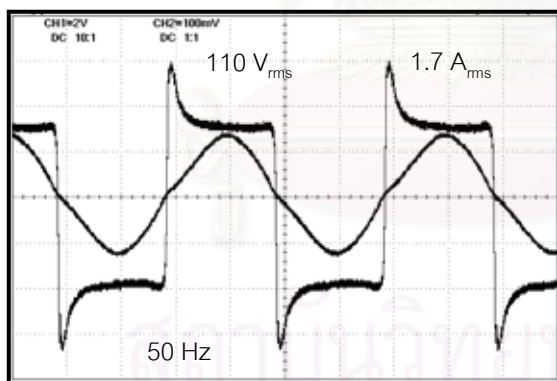


(B) กระแสผ่านหลอดขณะจุดหลอด

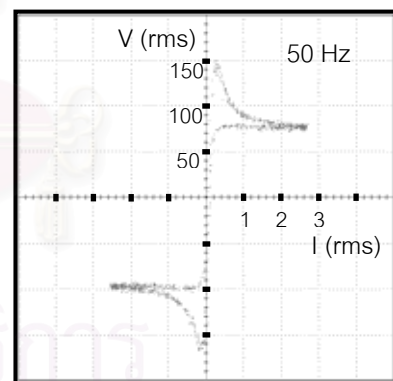
รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสของบัลลาสต์แกนเหล็กในขณะจุดหลอด

หลังจากที่หลอดถูกจุดติดแล้วกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีค่ามาก เพราะค่าความต้านทานภายในหลอดมีค่าต่ำ รวมถึงแรงดันตกคร่อมหลอดต่ำด้วยเช่นกัน จากนั้นเมื่อภายในหลอดอาร์คมีอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นคุณลักษณะการทำงานของก๊าซภายในหลอดอาร์ค มีผลทำให้แรงดันตกคร่อมหลอดมีค่าสูงเพิ่มขึ้น และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดจะมีค่าลดลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวของระบบ รูปคลื่นของกระแสผ่านหลอด-แรงดันคร่อมหลอดที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ในสภาวะอยู่ตัว มีลักษณะดังรูปที่ 2.11 (A)

การทำงานในสภาวะอยู่ตัว พบว่าความสัมพันธ์ของรูปคลื่นแรงดันคร่อมหลอดกับกระแสผ่านหลอดมีลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละคาบเวลา เนื่องจากการทำงานที่ความถี่ต่ำนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านหลอดจะช้ากว่าการแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซภายในหลอดอาร์ค ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส จึงทำให้ความหนาแน่นของพลาสมา มีลักษณะไม่คงที่ อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามกระแสผ่านหลอดด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นมีคุณลักษณะแบบไม่เชิงเส้น ดังในรูปที่ 2.11 (B)



(A)



(B)

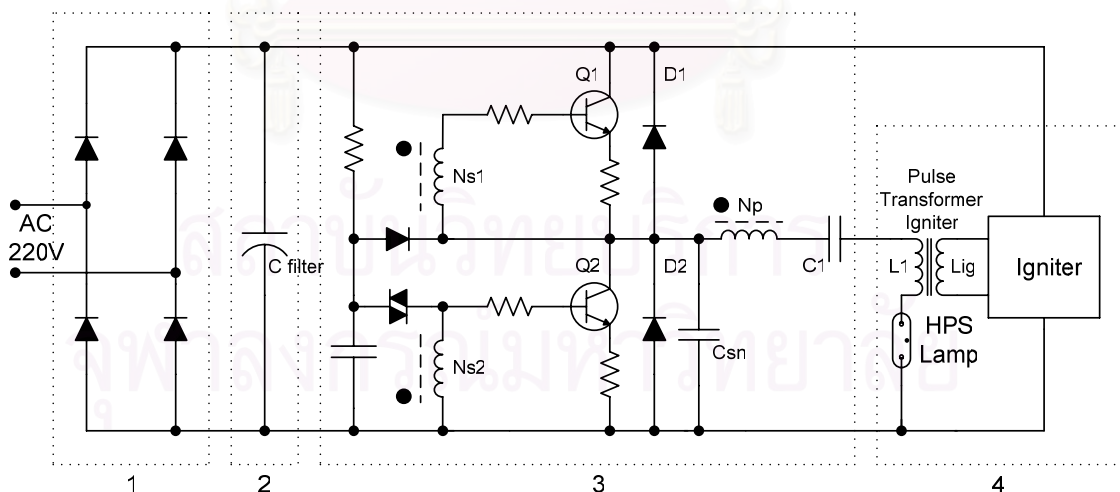
รูปที่ 2.11 แรงดันตกคร่อมหลอด, กระแสผ่านหลอดขณะที่หลอดทำงานในสภาวะอยู่ตัว (A)

และกราฟคุณสมบัติของหลอดที่ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก (B)

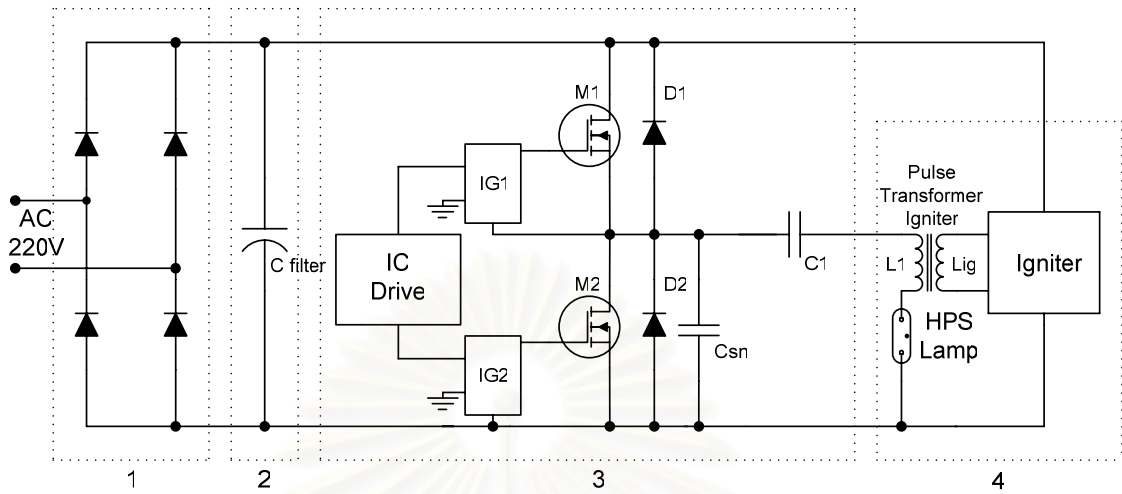
### 2.3 การใช้งานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับหลอดโซเดียมความดันสูง

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะหน้าที่การทำงานเช่นเดียวกับบัลลาสต์แกนเหล็ก แต่ทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่สายกำลังมาก ดังนั้นจึงทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเล็กลง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา กะทัดรัดมากขึ้น และสามารถออกแบบให้ควบคุมความเข้มแสงได้ แต่การใช้งานกับหลอดโซเดียมความดันสูงจะต้องมีอุปกรณ์จุดหลอด (Igniter) เช่นเดียวกับกรณีของบัลลาสต์แกนเหล็ก เพราะไม่สามารถใช้หลักการเรโซแนนซ์เพื่อให้เกิดแรงดันสูงชั่วขณะเพื่อจุดหลอดเหมือนกรณีของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ เพราะแรงดันสูงชั่วขณะที่ได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้หลอดติดได้ ดังนั้นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จึงต้องมีวงจรสร้างแรงดันสูงชั่วขณะ หรือวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ และหลังจากการจุดหลอดวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องสามารถทำงานได้ทันที รวมถึงระบบต้องมีเสถียรภาพการทำงานในสภาวะอยู่ตัว

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการทดลองมี 2 ประเภท โดยมีโครงสร้างในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 ตามลำดับ โดยแบบแรกเป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หม้อแปลงอิมตัวป้อนกลับเป็นสัญญาณขับ และแบบที่สองเป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สัญญาณขับนำจากวงจรประมวลสัญญาณ



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่กำเนิดสัญญาณขับนำด้วยตัวเอง



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สัญญาณขับนำจากวงจรประมวลสัญญาณ

### 2.3.1 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีส่วนประกอบตามลำดับดังนี้

#### 2.3.1.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

วงจรเรียงกระแสมีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สายกำลัง ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยรวมถึงวงจรกรองด้านเข้า และวงจรป้องกัน (Input filter and Protection Circuit) มีหน้าที่กรองสัญญาณรบกวน EMI และ RFI จากภายนอกที่จะเข้ามารบกวนบัลลาสต์ และจากบัลลาสต์ไปรบกวนอุปกรณ์ภายนอกรวมทั้งช่วยป้องกันกระแสชากและแรงดันเกินชั่วขณะในตอนเปิดไฟ

#### 2.3.1.2 ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟตรง (Capacitor Filter)

ทำหน้าที่ลดแรงดันกระเพื่อม(Ripple Voltage) ของแรงดันไฟตรง (DC Bus) ทางด้านเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยให้แรงดันกระเพื่อมมีค่าน้อยสุด



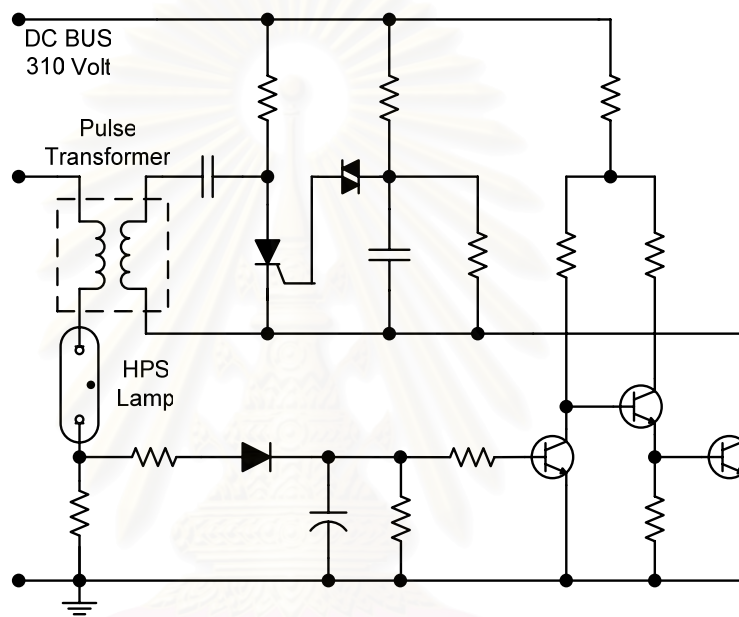
### 2.3.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรขับนำ

วงจรอินเวอร์เตอร์มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงทำให้ อุปกรณ์ต่างๆมีขนาดเล็กกลงได้โดยเฉพาะตัวเหนี่ยวนำ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นมีหลายชนิด แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้วงจรบริดจ์หรือกึ่งบริดจ์ที่มี BJT หรือ MOSFET เป็นสวิตช์ไวงาน ซึ่งในแต่ละ กิ่งของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ต่อกันอนุกรมกันและสลับกันนำกระแส เนื่องจากกระแสและ แรงดันของโหลดมีเฟสต่างกัน ดังนั้นสวิตช์ที่ใช้จะต้องเป็นสวิตช์ที่นำกระแสได้ 2 ทาง ซึ่งทำได้โดย การต่อไดโอดขนานกับสวิตช์ ดังรูปที่ 2.12 - 2.13 สวิตช์ไวงานจะทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไปสู่ โหลด ส่วนพลังงานจากโหลดที่ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟตรงจะไหลผ่านไดโอด อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมอสเฟตที่ใช้สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไปมักจะมีไดโอดต่ออยู่แทบทั้งสิ้น ซึ่งการ ทำงานของสวิตช์ไวงานเป็นแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Resonant Switching, ZVS) ที่มีกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำ แรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่าเฉลี่ย เท่ากับศูนย์ วัฏจักรงานร้อยละ 50 และเนื่องจากกำลังออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับโหลด โหลดโซเดียมความดันสูงขนาด 150 วัตต์ มีค่าไม่สูงนัก จึงเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างเป็น แบบกึ่งบริดจ์ (Half-bridge inverter) โดยวงจรขับนำมี 2 แบบคือ แบบหม้อแปลงอิมิตัวบ่อนกลับ กระแส และ แบบวงจรประมวลสัญญาณขับนำ สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุม ความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้นั้น สามารถทำได้โดยควบคุมกระแสไหลผ่านหลอด จากการควบคุมความถี่การทำงานของวงจรขับนำหรือควบคุมแรงดันไฟตรงด้านเข้าวงจร อินเวอร์เตอร์ ซึ่งการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สัญญาณขับนำ จากวงจรประมวลสัญญาณ

### 2.3.1.4 วงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Igniter)

มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 มีลักษณะการทำงานโดยเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ตัวเก็บประจุ จน มีขนาดของแรงดันที่ทำให้เกิดแรงดันที่สามารถจุดหลอดโซเดียมความดันสูงได้ (ประมาณ 1,500 – 3,000 โวลต์) เมื่อจุดชนวนSCR จะทำให้ตัวเก็บประจุปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมาในช่วงเวลาสั้น ผ่านหม้อแปลงพัลส์ที่ทำหน้าที่เพิ่มแรงดัน ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบหม้อแปลงทวีแรงดัน โดยจะสร้างแรงดันสูงเป็นช่วงเวลาสั้นๆ (1 - 2 ไมโครวินาที) ก็สามารถทำให้การทำงานของหลอด เริ่มต้นได้

สำหรับวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะมีความแตกต่างกับตัวจุดหลอดของบัลลาสต์แกนเหล็กที่ว่า หม้อแปลงพัลส์ของวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่เป็นหม้อแปลงพัลส์ในช่วงจุดหลอดและต่อจากนั้นเมื่อหลอดไซเดียมความดันสูงถูกจุดติดเสร็จ หม้อแปลงพัลส์จะทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำของวงจรไหลของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขจากการใช้วงจรเรโซแนนซ์ไหลดอนุกรม ดังนั้นจึงทำให้วงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการทำงาน



รูปที่ 2.14 วงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์

### 2.3.1.5 หลอดไซเดียมความดันสูง

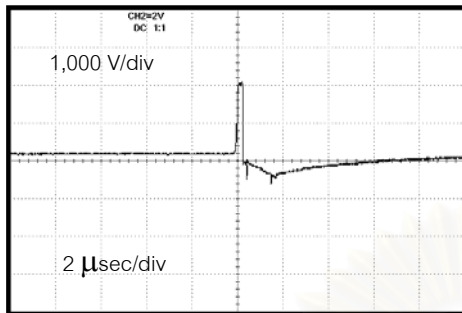
เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงสว่างซึ่งมีเงื่อนไขการทำงาน คือ ต้องการแรงดันสูงชั่วขณะในการจุดหลอด, ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งกระแส ในขณะที่ทำงานจะมีความต้านทานพลวัตเป็นทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับย่านการทำงาน โดยในย่านที่มีความเข้มแสงมากถึงปานกลางจะมีความต้านทานพลวัตเป็นบวก ในย่านที่มีความเข้มแสงต่ำหรือช่วงที่หลอดใกล้จะดับจะมีความต้านทานพลวัตเป็นลบ โดยความเข้มแสงของหลอดจะแปรผันตามกระแสที่ไหลผ่านหลอดเสมอ สำหรับการปรับความเข้มแสงของหลอดจะใช้การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านหลอดด้วยวิธีต่างๆตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หลอดไซเดียมความดันสูงมีขนาดตั้งแต่ 50 – 1000 วัตต์ โดยเลือกหลอดขนาด 150 วัตต์ เป็นขนาดที่ใช้ในการวิจัย

### 2.3.2 การทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงเมื่อใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

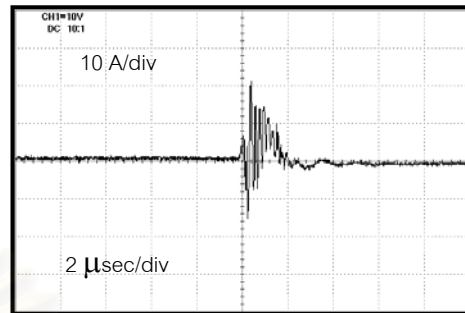
การใช้งานหลอดโซเดียมความดันสูงกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ มีโครงสร้างการทำงานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น 2 โครงสร้าง โดยมีการทำงานที่เหมือนกันในแต่ละช่วงการทำงาน แต่จะแตกต่างกันในส่วนของสัญญาณขับนำ ซึ่งการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 โครงสร้างนี้สามารถทำให้หลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเสถียรภาพในการทำงานได้

ลักษณะการทำงานของวงจรจากรูปที่ 2.14 มีการทำงานตามลำดับดังนี้คือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ กระแสที่ไหลออกจากวงจรกรองแรงดันจะมี 2 ส่วนที่สำคัญคือ กระแสที่ไหลเข้าสู่อินเวอร์เตอร์กับกระแสที่ไหลเข้าสู่จุดจุดหลอด โดยจุดจุดหลอดจะทำงานในช่วงแรก ส่วนชุดอินเวอร์เตอร์จะทำงานในช่วงต่อไปหลังจากหลอดติดแล้วตามลำดับช่วงแรกกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านระหว่างขั้วภายในหลอดอาร์คได้ เนื่องจากความต้านทานภายในของหลอดอาร์คมีค่าสูงมากหรือเป็นลักษณะวงจรเปิด ชุดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หม้อแปลงอิมพัลส์ป้อนกลับเป็นสัญญาณขับนำหรือใช้สัญญาณขับนำจากไอซีนั้น การทำงานจะเกิดขึ้นได้ลักษณะไหลของวงจรต้องมีลักษณะเป็นวงจรปิดเสียก่อน จึงจะทำให้ชุดอินเวอร์เตอร์ทำงานได้ และการจุดหลอดโดยใช้การเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำด้านไหลนั้นไม่เพียงพอที่จะสร้างแรงดันสูงชั่วขณะขึ้นมาที่จะทำให้หลอดติดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรจุดหลอดเพื่อทำหน้าที่ให้หลอดทำงานในช่วงแรก อินเวอร์เตอร์ก็จะทำงานต่อมาตามลำดับ

การทำงานของวงจรจุดหลอดนั้น เริ่มแรกกระแสจากแรงดันไฟตรงที่บัสจะไหลเข้าตัวเก็บประจุของวงจรจุดหลอด เพื่อเก็บแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟตรงที่บัสประมาณ 310 โวลต์ จากนั้นเมื่อมีสัญญาณทริกเกอร์เกิดขึ้น ทำให้ SCR ต่ วงจรระหว่างตัวเก็บประจุกับหม้อแปลงสร้างพัลส์ทางด้านขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดการปล่อยพลังงานของตัวเก็บประจุผ่าน SCR เข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งกระแสที่ไหลจะมีลักษณะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใดจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของแรงดันขึ้นทางด้านทุติยภูมิ โดยหม้อแปลงพัลส์จะมีลักษณะเป็นแบบหม้อแปลงทวิแรงดันตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้เกิดแรงดันสูงชั่วขณะที่มีขนาดประมาณ 2,000 โวลต์ (Peak Voltage) ในช่วงเวลา 1 ไมโครวินาที โดยแสดงดังรูปที่ 2.15 (A)



(A) แรงดันตกคร่อมหลอดขณะจุดหลอด



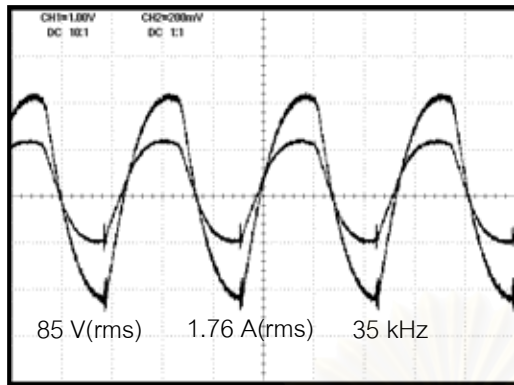
(B) กระแสผ่านหลอดขณะจุดหลอด

รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ขณะจุดหลอด

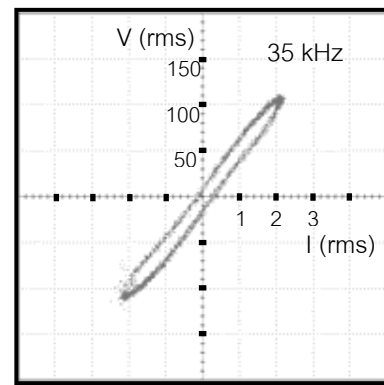
ตามอุดมคติแรงดันสูงชั่วขณะต้องมีค่าประมาณ 4,500 โวลต์ แต่เนื่องจากการสูญเสียของแรงดันเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆ คือ การรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก แรงดันตกคร่อมความต้านทานอนุกรมสมมูล (ESR) ของตัวเก็บประจุ แรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ แรงดันตกคร่อมความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ และการเชื่อมต่อ (Coupling) ที่ไม่สมบูรณ์ของหม้อแปลงสร้างแรงดันพัลส์ แต่แรงดันพัลส์ที่ได้ก็เพียงพอที่จะสามารถจุดหลอดให้ติดสว่างได้

จากนั้นเมื่อหลอดเริ่มนำกระแสได้ ชุดอินเวอร์เตอร์จะทำงานทันที โดยวงจรจุดหลอดจะหยุดทำงานไป จากการตัดแรงดันไฟตรงด้านเข้าวงจรจุดหลอด ต่อมาหลอดก็จะสว่างเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะอยู่ตัวของหลอดหรือหลอดสว่างถึงพิกัดกำลังไฟฟ้า รูปคลื่นของกระแส-แรงดันของหลอดมีลักษณะดังในรูปที่ 2.16 (A)

การทำงานในช่วงสภาวะอยู่ตัว พบว่าลักษณะรูปคลื่นของแรงดันคร่อมหลอดกับกระแสที่ไหลผ่านหลอดมีลักษณะที่ค่อนข้างเหมือนกันในแต่ละคาบเวลา เนื่องจากการทำงานที่ความถี่สูงส่งผลให้การแตกตัวของไอออนภายในหลอดยาวกว่าคาบของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด ซึ่งมีค่าสั้นมาก จึงทำให้กระบวนการดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสได้ จึงทำให้ความหนาแน่นของพลาสมามีลักษณะเกือบคงที่ รวมถึงอิมพีแดนซ์ประสิทธิผลมีลักษณะเกือบคงที่เช่นเดียวกัน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นมีคุณลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นได้ โดยแสดงดังในรูปที่ 2.16 (B)



(A)

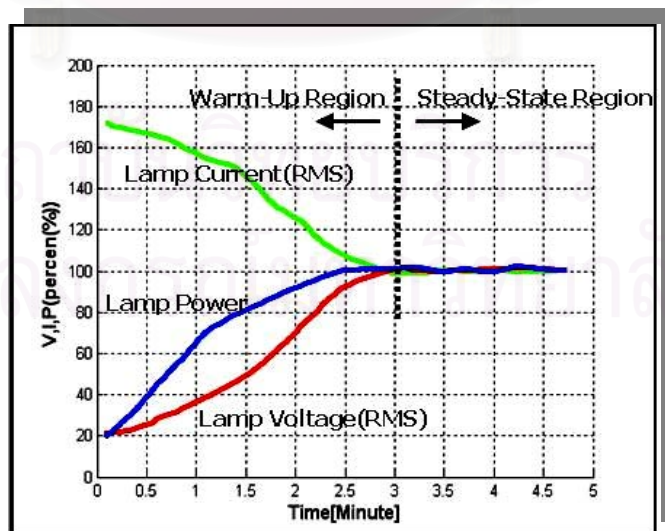


(B)

รูปที่ 2.16 แรงดันตกคร่อมหลอด, กระแสผ่านหลอดขณะที่หลอดทำงานในสภาวะอยู่ตัว และกราฟคุณสมบัติของหลอดที่ใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

#### 2.4 คุณลักษณะของแรงดัน-กระแส-และกำลังไฟฟ้าที่หลอดในช่วงการทำงานต่างๆ

หลังจากหลอดถูกจุดติดแล้วกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีค่ามาก เพราะค่าความต้านทานภายในหลอดมีค่าต่ำ มีผลให้แรงดันตกคร่อมหลอดต่ำด้วย จากนั้นหลอดจะสว่างขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสภาวะอยู่ตัว ซึ่งสามารถแสดงพฤติกรรมของกระแส แรงดันคร่อมหลอดและกำลังไฟฟ้าที่หลอด ในขณะที่หลอดเริ่มสว่างจนถึงหลอดสว่างเต็มที่ ได้ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 พฤติกรรมของกระแส แรงดันคร่อมหลอด และกำลังไฟฟ้าที่หลอด ในขณะที่หลอดเริ่มสว่างจนถึงหลอดสว่างถึงพิกัด(สภาวะอยู่ตัว)

## 2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับบัลลาสต์แกนเหล็ก

พบว่าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะมีการสร้างแรงดันพัลส์ครั้งเดียว ก็เพียงพอที่จะจุดหลอดให้ติดได้ และหลอดไม่กระพริบขณะจุดหลอด ทำให้สารเคลือบที่ขั้วหลอดสูญเสียเล็กน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดจำนวนครั้งในการจุดหลอด ดังนั้นจึงทำให้อายุการใช้งานของหลอดยาวนานขึ้น เมื่อใช้ความถี่สูง รวมถึงการทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่สายกำลังนั้นพบว่าคุณสมบัติของแรงดันและกระแสที่หลอดมีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากขึ้น

## 2.6 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร

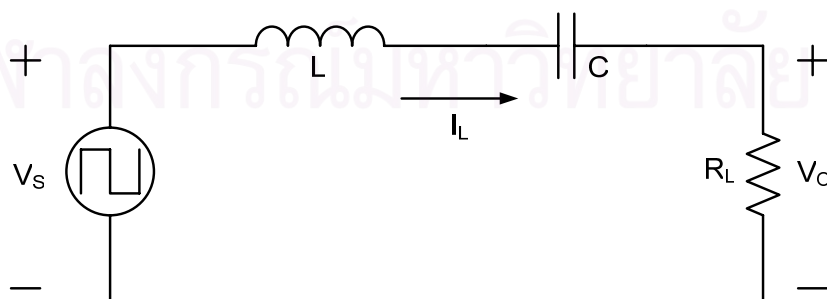
บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง หรือไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงป้อนให้กับหลอดโซเดียมความดันสูง โดยโครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยส่วนต่างๆมากมาย สำหรับส่วนที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์วงจรคือส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่มีลักษณะเป็นแบบเรโซแนนซ์โพลดอนุกรม แสดงในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 เมื่อวงจรอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันสี่เหลี่ยม สามารถเขียนวงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์โพลดอนุกรมแบบกึ่งบริดจ์ได้ดังรูปที่ 2.18

โดยที่  $V_s$  คือแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

$L$  คือตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหนด

$C$  คือตัวเก็บประจุของวงจรโหนด

$R_L$  คือความต้านทานสมมูลของหลอด



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูง

แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ( $V_S$ ) ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่าที่เวลาใดๆ ดังในสมการที่ (2.1) สามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ (2.2), (2.3)

$$V_S = \begin{cases} \frac{V_{DC}}{2}, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_s} \\ -\frac{V_{DC}}{2}, & \frac{\pi}{\omega_s} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega_s} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$V_S(t) = \frac{V_{DC}}{2} \left[ \frac{4}{\pi} \sum_{n=odd} \frac{\sin n\omega_s t}{n} \right] \quad (2.2)$$

$$V_S(t) = \sum_{n=odd} V_{sn} \left( \frac{\sin n\omega_s t}{n} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\omega_s$  คือความถี่การสวิตช์ (rad/sec)

$V_{DC}$  คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า (DC Bus)

เนื่องจากวงจรไหลดมีการต่อในลักษณะเป็นวงจรผ่านต่ำอันดับสอง (Second order low pass filter) และมีความถี่การทำงานของวงจรอยู่รอบๆ ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamp natural frequency,  $f_0$ ) ทำให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมโหลดและกระแสผ่านโหลดมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรจึงอาจจะวิเคราะห์โดยใช้แรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์แทนรูปสี่เหลี่ยม โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

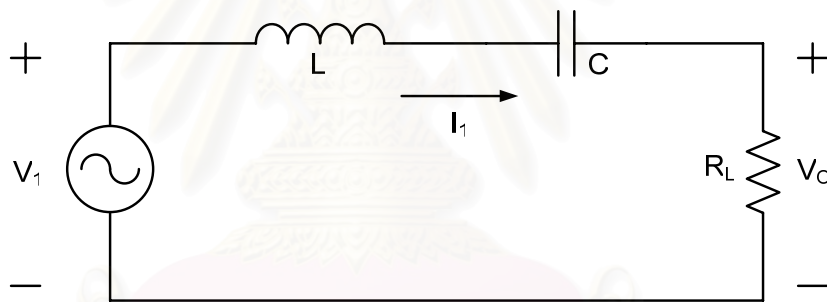
- ละเลยการสูญเสียในสวิตช์ไวงาน
- ละเลย Reverse Recovery ของ ไดโอด
- ถือว่าตัวเก็บประจุฟิลเตอร์มีค่าสูงพอ ทำให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงด้านเข้าอินเวอร์เตอร์มีน้อย
- ค่า Q มีค่าสูงเพียงพอ ที่จะทำให้สามารถละเลยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปโหลดโซเดียมความดันสูงมีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น แต่เมื่อใช้โหลดกับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง กระแสผ่านโหลดและแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีความสัมพันธ์กัน

แบบเชิงเส้นโดยประมาณ ดังนั้นจึงสามารถแทนหลอดโซเดียมความดันสูง ด้วยค่าความต้านทานสมมูล  $R_L$  ใดๆก็ได้ นอกจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดโซเดียมความดันสูง และค่าความต้านทานของหลอดยังแปรค่าตามกำลังที่หลอดหรือกระแสผ่านหลอดขณะทำงาน การวิเคราะห์วงจรในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.19

โดย  $V_s$  คือค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันออกสำหรับความถี่หลักมูลของรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}}{\pi} * V_{dc}$  .....Volt ดังนั้นจึงประมาณ  $V_s$  ด้วย  $V_1$  และประมาณ  $I_L$  ด้วย  $I_1$  เช่นกัน

ได้วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถใช้งานร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูงดังแสดงตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

## 2.7 สมการของวงจรสมมูลที่ทำงานในสภาวะอยู่ตัว

การทำงานในสภาวะอยู่ตัว ที่ความถี่การทำงานสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ขนาดของกระแสแรงดันคร่อมหลอด และขนาดกำลังไฟฟ้าที่หลอดจะมีค่าคงที่ รวมถึงค่าความต้านทานสมมูลของหลอดโซเดียมความดันสูง( $R_L$ ) จะมีค่าเท่ากับค่าที่พิกัดในการทำงานในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรได้ดังนี้

- ความถี่เรโซแนนซ์ ( Resonant frequency )

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$



- อิมพีแดนซ์ลักษณะ ( characteristic impedance )

$$Z_o = \omega_o L = \frac{1}{\omega_o C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.5)$$

- ตัวประกอบคุณภาพของโหลดที่ความถี่การทำงาน ( Quality factor )

$$Q_o = \frac{Z_o}{R_L} = \frac{\omega_o L}{R_L} = \frac{1}{R_L \omega_o C} \quad (2.6)$$

- ความถี่ที่ปรับสถานะ ( Normalized frequency )

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_o} \quad (2.7)$$

- อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์โหลดอนุกรม ( Impedance of the series resonant load )

$$Z = SL + \frac{1}{SC} + R_L$$

$$Z = j\omega_s L + \frac{1}{j\omega_s C} + R_L$$

$$Z = R_L \left[ 1 + \frac{j\omega_s}{R_L} \left( L - \frac{1}{\omega_s^2 C} \right) \right]$$

$$Z = R_L \left[ 1 + jQ_o \left( \frac{\omega_s}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega_s} \right) \right]$$

$$Z = R_L \left[ 1 + jQ_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right]$$

$$Z = |Z| e^{j\phi} = R_L + jX \quad (2.8)$$

โดยสามารถหาขนาดอิมพีแดนซ์และขนาดมุมเฟสได้ดังนี้

$$|Z| = R_L \sqrt{1 + Q_o^2 \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)^2} \quad (2.9)$$

$$|Z| = Z_o \sqrt{\left( \frac{R_L}{Z_o} \right)^2 + \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)^2}$$

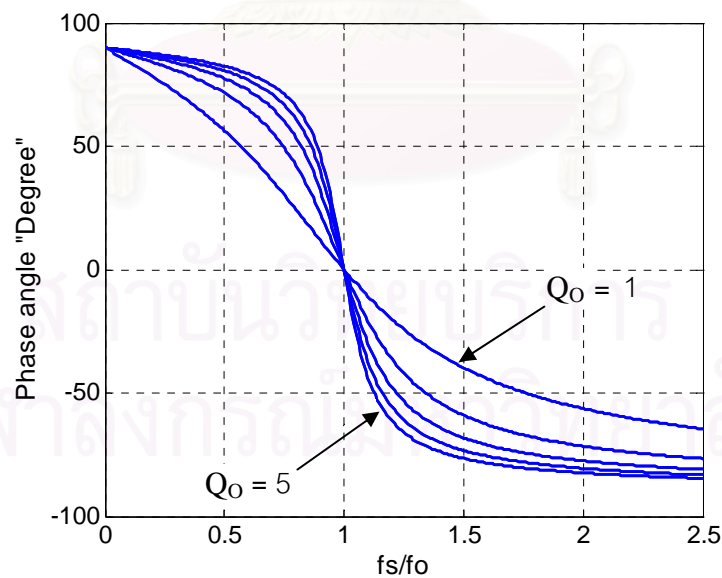
$$|Z| = Z_o \sqrt{\left( \frac{1}{Q_o} \right)^2 + \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)^2} \quad (2.10)$$

$$\phi = \arctan \left[ Q_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right] \quad (2.11)$$

$$R_L = |Z| \cdot \cos \phi$$

$$X = |Z| \cdot \sin \phi$$

จากสมการที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมุมเฟส ( $\phi$ ) กับความถี่พัสดาน ( $\omega_n$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหนด ( $Q_o$ ) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 - 5 ดังแสดงในรูปที่ 2.20

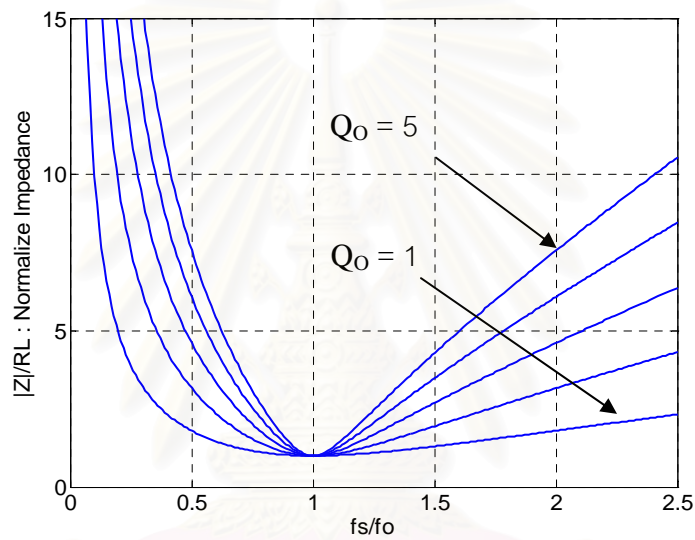


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟส ( $\phi$ ) กับความถี่พัสดาน ( $f_s/f_o$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 - 5

จากสมการที่ 2.9 สามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์ปัทสทานได้ดังนี้

$$\frac{|Z|}{R_L} = \sqrt{\left[1 + Q_o^2 \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)^2\right]} = f(Q_o, \omega_n) \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ปัทสทานกับความถี่ปัทสทาน ( $\omega_n$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพโหลด ( $Q_o$ ) ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 - 5 ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ปัทสทานกับความถี่ปัทสทาน ( $f_s/f_o$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 - 5

- สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ

โดยคำนวณจากฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันคร่อมโหลด ( $V_o$ ) ต่อแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์  $V_1$  จากวงจรสมมูลตามรูปที่ 2.19

$$V_o = \frac{R_L}{Z} * V_1 \quad (2.12)$$

แทนค่า Z ตามสมการที่ 2.8 ลงในสมการที่ 2.12

$$V_o = \frac{V_1}{1 + jQ_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)} \quad (2.13)$$

$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{1}{1 + jQ_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)} \quad (2.14)$$

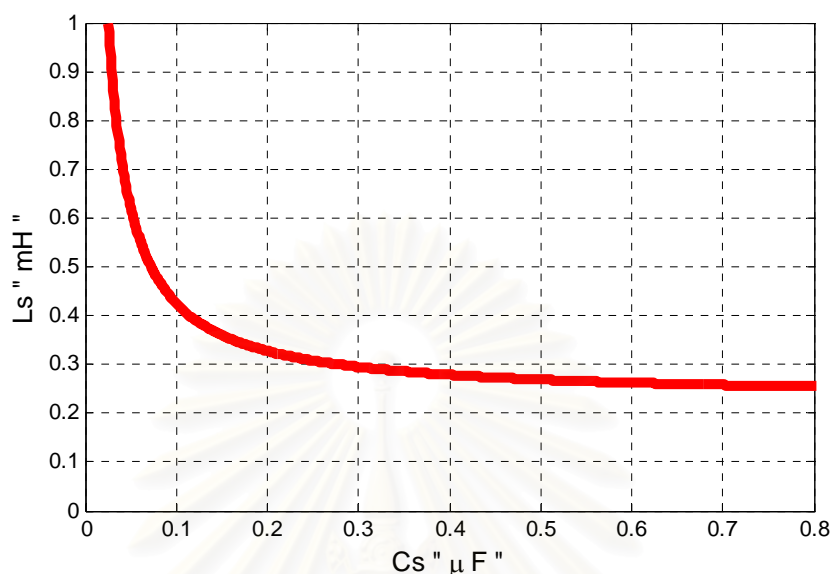
จากสมการที่ 2.14 สามารถคำนวณความสัมพันธ์ของ L กับ C ดังนี้

$$\begin{aligned} (Q_o \omega_n)^2 - 2Q_o^2 + \left( \frac{Q_o}{\omega_n} \right)^2 + \left( 1 - \left| \frac{V_1}{V_o} \right|^2 \right) &= 0 \\ \left( \frac{\omega_s L}{R_L} \right)^2 - 2 \left( \frac{\omega_o L}{R_L} \right)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C R_L} \right)^2 + \left( 1 - \left| \frac{V_1}{V_o} \right|^2 \right) &= 0 \\ \left( \frac{\omega_s}{R_L} \right)^2 L^2 - \left( \frac{2}{R_L^2 C} \right) L + \left( \frac{1}{\omega_s C R_L} \right)^2 + \left( 1 - \left| \frac{V_1}{V_o} \right|^2 \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.15) สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของ L กับ C ได้ดังนี้

$$L = \frac{1}{\omega_s^2 C} + \sqrt{\left( \frac{1}{\omega_s^4 C^2} - \frac{R_L^2}{\omega_s^2} \left[ 1 - \left( \left| \frac{V_1}{V_o} \right| \right)^2 + \frac{1}{(\omega_s C R_L)^2} \right] \right)} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ โดยกำหนดให้แรงดันคร่อมหลอดมีค่า 85 โวลต์ ค่าความต้านทานหลอดมีค่า 48 โอห์มซึ่งเป็นค่าที่พิกัด ต่อจากนั้นกำหนดความถี่การทำงานเป็น 35 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันไฟตรงด้านเข้า 280 โวลต์ ตามการใช้งาน สำหรับค่าคาปาซิเตอร์ตั้งแต่ 0 – 1  $\mu\text{F}$  ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ C ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ได้กำลังที่พิกัด

สำหรับเงื่อนไขในการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์นั้น มีข้อกำหนดว่าความถี่การทำงานต้องมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์เสมอ (Over Resonance Frequency) เพื่อให้การทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ มีลักษณะการทำงานเป็นแบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching: ZVS) ดังนั้นจึงต้องมีเกณฑ์การเลือกค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ให้มีค่ามากกว่าค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ที่ความถี่การทำงานตามค่าที่กำหนด ความถี่การทำงานที่กำหนดมีค่า 35 KHZ ซึ่งจากกราฟดังรูปที่ 2.22 นั้นสามารถเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ทุกจุดบนเส้นของการคำนวณ เนื่องจากสามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ได้ แต่ต้องพิจารณาถึงเกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสมต่อไป

สำหรับการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือต้องหลีกเลี่ยงจุดทำงานทั้งสองสถานะคือ ที่ความถี่การทำงานเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ และที่ความถี่การทำงานน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ เนื่องจากจะมีผลทำให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์ไม่เป็นแบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ได้ (No ZVS) ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเค้นที่สวิตช์ไวงานได้ (Stress Active Switching) จึงทำให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นต้องเลือกค่าอุปกรณ์ที่ความถี่การทำงานให้มีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตามการออกแบบเสมอ

- สมการกำลังไฟฟ้าของหลอดโซเดียมความดันสูง (Lamp Power)

$$P_o = I_1^2 R_L = \frac{V_o^2}{R_L} \quad (2.17)$$

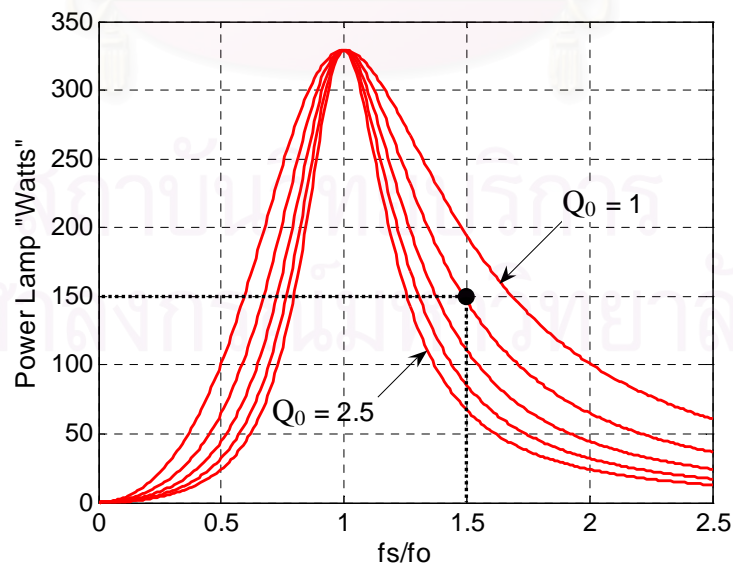
จากสมการที่ (2.13) ;

$$P_o = \frac{(V_1)^2}{R_L \left( 1 + \left[ Q_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right]^2 \right)}$$

จาก  $V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * V_{dc}$

$$P_o = \frac{2(V_{dc})^2}{\pi^2 R_L \left( 1 + \left[ Q_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right]^2 \right)} \quad (2.18)$$

คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่หลอดกับความถี่การทำงาน โดยมีการเปลี่ยนค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 - 2.5 ดังในรูปที่ 2.23 โดยกำหนดแรงดันไฟตรงขนาด 280 โวลต์ และค่าความต้านทานหลอดที่พิกัดเป็น 48 โอห์ม ทำให้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบที่พิกัดกำลังไฟฟ้ค่าต่างๆ ซึ่งบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงขนาด 150 วัตต์ จะได้ค่าของตัวประกอบคุณภาพกับค่าความถี่การทำงานผลตามการคำนวณ ดังในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(Watt) กับความถี่ที่สถานะ ( $f_s/f_o$ ) สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q_o$ ) ตั้งแต่ค่า 1 - 2.5

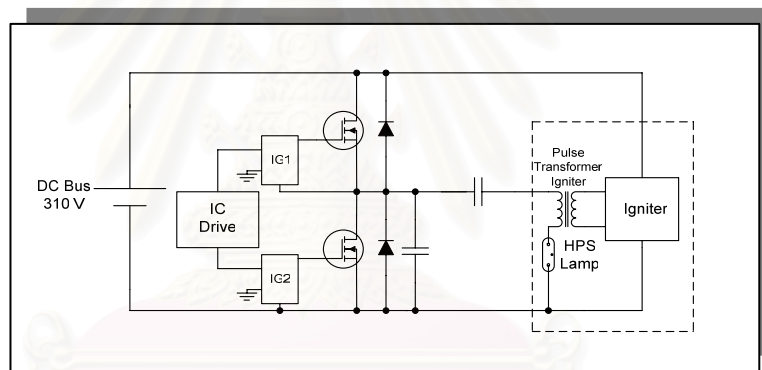
## 2.8 เงื่อนไขการทำงานและการออกแบบวงจรถอดอิล็กทรอนิกส์

ส่วนของบัลลาสต์อิล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญส่วนหนึ่งคือ วงจรถอดอิล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำงานในตอนเริ่มแรกของบัลลาสต์อิล็กทรอนิกส์ โดยจะสร้างแรงดันสูงชั่วขณะที่มีทั้งขนาด และเวลาที่เหมาะสมต่อการจลลอด เพื่อให้การจลลอดแต่ละครั้งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า อุปกรณ์จลลอดแบบธรรมดา เนื่องจากอุปกรณ์จลลอดแบบธรรมดาจะมีแรงดันสูงชั่วขณะ เกิดขึ้นซ้ำๆกันหลายครั้ง ซึ่งการจลลอดแบบนี้จะทำให้ขั้วของหลอดอาร์คมีคุณภาพลดลง (โดยเป็นมาตรฐานการจลลอดโซเดียมความดันสูงทั่วไป) ตามความเป็นจริงแล้วไม่จำเป็นต้องใช้การจลลอดซ้ำๆกัน เนื่องจากการจลลอดด้วยแรงดันสูงชั่วขณะที่มีความเหมาะสมนั้น การจลลอดด้วยแรงสูงเพียง 1 ครั้งก็เพียงพอที่จะสามารถทำให้หลอดถูกจลลอดได้ (อ้างอิงจากการทดลองที่ผ่านมา รูปที่ 2.15) ดังนั้นจึงเป็นข้อดีของวงจรถอดอิล็กทรอนิกส์ แต่จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการทำงานและข้อกำหนดการออกแบบที่มีความเหมาะสมดังนี้

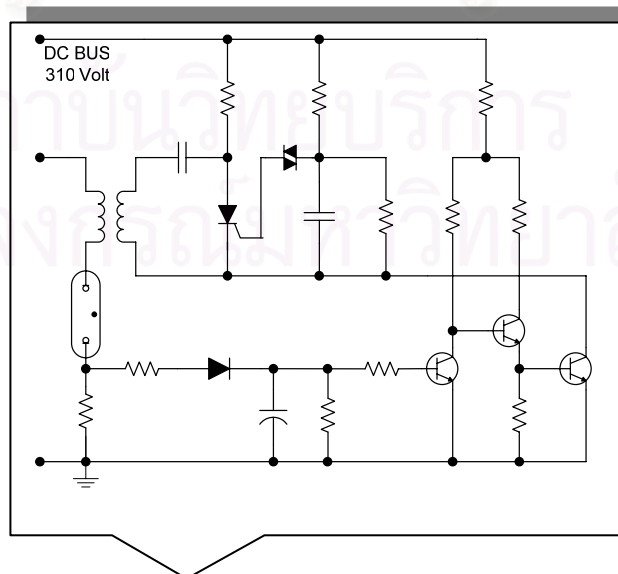
- วงจรถอดอิล็กทรอนิกส์ต้องมีการทำงาน 2 ลักษณะ คือทำหน้าที่จลลอดในขณะเริ่มทำงาน และเป็นตัวเหนี่ยวนำของวงจรรีโซแนนซ์ในขณะที่หลอดทำงาน
- วงจรถอดอิล็กทรอนิกส์จะต้องมีการทำงานร่วมกับวงจรรีโซแนนซ์ที่มีลักษณะเป็นแบบวงจรรีโซแนนซ์ไหลดอนุกรมเท่านั้น เนื่องจากแรงดันสูงชั่วขณะ (ประมาณ 2,000 โวลต์) ที่สร้างขึ้นมาจะตกคร่อมที่หลอดโซเดียมความดันสูงเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในการต่อตัวเก็บประจุขนานกับหลอดโซเดียมความดันสูงนั้น จะเป็นลักษณะของรีโซแนนซ์อนุกรมไหลดขนาน ตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงแรงดันทันทีทันใดไม่ได้ ทำให้แรงดันสูงจึงไม่เกิดขึ้น
- วงจรถอดอิล็กทรอนิกส์เมื่อทำการจลลอดโซเดียมความดันสูงติดแล้ว จะต้องมีการหยุดการเก็บพลังงานของคาปาซิเตอร์ภายในวงจรถอดอิล็กทรอนิกส์เพื่อลดค่าความสูญเสีย (Loss Power) ของตัวจลลอดอิล็กทรอนิกส์ในขณะที่หลอดทำงาน
- วงจรถอดอิล็กทรอนิกส์จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อได้รับแรงดันบัสมากกว่า 300 โวลต์ขึ้นไปแต่ต้องไม่เกินพิกัดของอุปกรณ์ภายในวงจร ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการออกแบบพิกัดของวงจรถอดอิล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถกำหนดได้

### 2.8.1 โครงสร้างของวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ต้องคำนึงถึงพิกัดของตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) เป็นสำคัญ โดยต้องมีพิกัดของกระแสมากกว่ากระแสที่ไหลผ่านหลอด ( $I_L$ ) เสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการอิ่มตัวของตัวเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเป็นแบบหม้อแปลงสร้างแรงดันสูง (Pulse Transformer) ซึ่งข้อสำคัญอย่างหนึ่งของหม้อแปลงสร้างแรงดันสูงก็คือ การเชื่อมต่อของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Coupling) ระหว่างด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิ ซึ่งจะต้องให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าจากปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิมีค่ามากที่สุด รวมถึงตัวเก็บประจุ ( $C_{ig}$ ) ที่ใช้ในการเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันสูง(310โวลต์) โดยจะต้องเป็นชนิดที่มีค่าความต้านทานอนุกรมสมมูลน้อยสุด (Low ESR) เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุในขณะจุดหลอด ซึ่งวงจรจะแสดงดังรูปที่ 2.24 (A-C)

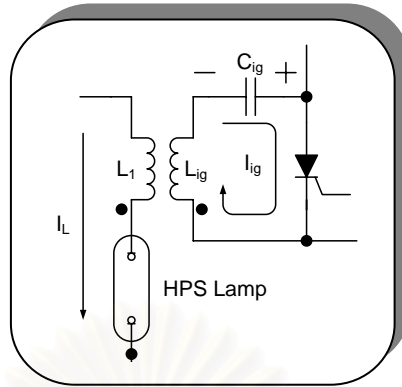


(A) ตำแหน่งการใช้งาน



(B) โครงสร้างภายในของอุปกรณ์จุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์





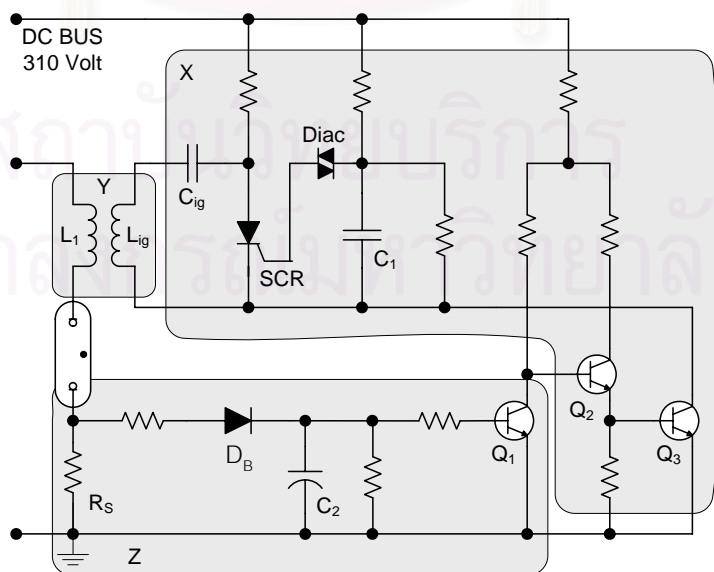
(C) ส่วนที่สำคัญต่อการทำงาน

รูปที่ 2.24 โครงสร้างวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์

### 2.8.2 การทำงานของวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 2.24 (B) สามารถแสดงส่วนต่างๆที่มีหน้าที่การทำงาน 3 ส่วนด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.25

- (X) เป็นส่วนของการเก็บพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุพร้อมทั้งจุดสัญญาณทริกเกอร์ เพื่อปล่อยพลังงาน (Capacitor Discharge)
- (Y) เป็นส่วนของการสร้างแรงดันสูงชั่วขณะของหม้อแปลงพัลส์
- (Z) เป็นส่วนที่หยุดการทำงานของส่วน (X) หลังจากจุดหลอดเสร็จสิ้น



รูปที่ 2.25 โครงสร้างภายในของวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานของวงจรเป็นดังนี้คือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กระแสไฟฟ้าจาก DC Bus จะไหลเข้าวงจร 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนของวงจรจุดหลอด กับส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งส่วนของวงจรจุดหลอดจะทำงานก่อนวงจรอินเวอร์เตอร์เสมอ เนื่องจากวงจรไหลดมีลักษณะเป็นวงจรเปิด (High Impedance) ดังนั้นวงจรจุดหลอดต้องทำการจุดหลอดให้ติดก่อน จากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์จึงจะทำงานได้ตามลำดับ

การทำงานของแต่ละส่วน คือ ช่วงแรก (X) กระแสจะไหลเข้าตัวเก็บประจุ( $C_{ig}$ )กับตัวเก็บประจุ( $C_1$ ) โดย( $C_{ig}$ )ต้องเก็บพลังงานเร็วกว่า( $C_1$ )เสมอ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงพัลส์มีขนาดสูงสุดได้ จากนั้นเมื่อ( $C_1$ )มีขนาดแรงดันถึงแรงดันพังทลาย(Breakdown Voltage)ของไดโอดแล้ว ไดโอดจะต่อวงจรทำให้เกิดกระแสจุดชนวนให้SCRต่อวงจรให้ตัวเก็บประจุ( $C_{ig}$ )จ่ายพลังงานไปยังหม้อแปลงพัลส์ได้ ดังนั้นช่วงเวลาการทำงานทั้งหมดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดและการออกแบบเป็นสำคัญ

สำหรับช่วงต่อมา (Y) เมื่อ ( $C_{ig}$ ) คายพลังงานไปสู่หม้อแปลงพัลส์ด้านปฐมภูมิ ( $L_{ig}$ ) แรงดันชั่วขณะเกิดขึ้นที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงพัลส์ จะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นแบบทันทีทันใดไปสู่ด้านทุติยภูมิ จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงชั่วขณะขึ้นทางด้านทุติยภูมิ ( $L_1$ ) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบทวีแรงดัน (ประมาณ 2,000 โวลต์ซึ่งคิดผลของแรงดันสูญเสียแล้ว) ดังนั้นจึงทำให้การจุดหลอดเริ่มต้นขึ้นได้

ช่วงต่อมา (Z) เมื่อหลอดถูกจุดติดแล้วทำให้หลอดโซเดียมความดันสูงมีค่าความต้านทานที่ค่าต่ำทันที (ประมาณ10โอห์มซึ่งก่อนจุดหลอดจะมีลักษณะเป็นวงจรเปิด) จากนั้นสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการขับนำสวิตช์รออยู่แล้วสามารถทำงานได้ทันที ดังนั้นจึงทำให้กระแสไหลผ่านวงจรรีโซแนนซ์ไหลดอนุกรมได้ ทำให้หลอดเริ่มสว่างขึ้นจนถึงสภาวะอยู่ตัวของระบบ ในขณะที่เดียวกันวงจรจุดหลอดก็จะไม่มีการทำงานอีกต่อไป เนื่องจากกระแสจะไหลผ่านตัวต้านทาน ( $R_s$ )ของวงจรจุดหลอดซึ่งทำหน้าที่จับแรงดันตกคร่อมตัวมันเอง ทำให้กระแสลับความถี่สูงไหลผ่านไดโอด( $D_B$ ) เพื่อทำหน้าที่ให้สัญญาณแรงดันช็อกบวกผ่านเข้าสู่ตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันให้เรียบขึ้น จากนั้นทรานซิสเตอร์ ( $Q_1$ ) จะทำงานทำให้กระแสเบสของทรานซิสเตอร์( $Q_2$ )หยุดการไหล เนื่องจากกระแสจะไหลผ่านคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์( $Q_1$ )ออกทางอิมิตเตอร์( $Q_1$ )แทน เพื่อครบวงจร จึงทำให้ทรานซิสเตอร์( $Q_2$ )และ( $Q_3$ )หยุดการทำงาน ดังนั้นวงจรจุดหลอดจึงไม่มีการทำงานอีกต่อไป

### 2.8.3 สมการการออกแบบขั้วปกรณณ์จุดหลอด

สามารถกำหนดสมการการออกแบบขั้วปกรณณ์จุดหลอดเฉพาะส่วนที่สำคัญตามรูปที่ 2.26 ได้ดังนี้

- ความถี่ในขณะจุดหลอด (Ignition Frequency)

$$f_{ig} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ig}C_{ig}}} \quad (2.19)$$

- ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านหลอดและตัวเหนี่ยวนำ

จากกฎอนุรักษ์พลังงานของตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงพัลส์

$$\frac{1}{2}I_{ig}^2L_{ig} = \frac{1}{2}I_L^2L_1$$

$$\frac{L_{ig}}{L_1} = \left(\frac{I_L}{I_{ig}}\right)^2$$

ดังนั้น Turn Ratio:

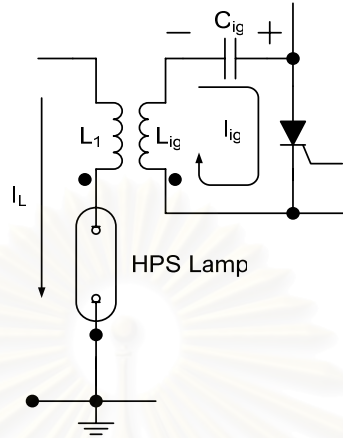
$$\sqrt{\frac{L_{ig}}{L_1}} = \left(\frac{I_L}{I_{ig}}\right) = \frac{V_{Lig}}{V_{L1}} = \frac{1}{n} \quad (2.20)$$

- กระแสจุดหลอดสูงสุด (Peak Current Ignition)

$$\frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}LI^2$$

$$ดังนั้น I_{Peak(ig)} = \frac{V_{BUS}}{\sqrt{\frac{L_{ig}}{C_{ig}}}} \quad (2.21)$$

โดย  $V_{Lig}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงพัลส์ (Low Voltage)  
 $I_{Lig}$  คือ กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงพัลส์ (High Current)  
 $V_{L1}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงพัลส์ (High Voltage)  
 $I_{L1}$  คือ กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงพัลส์ (Low Current)

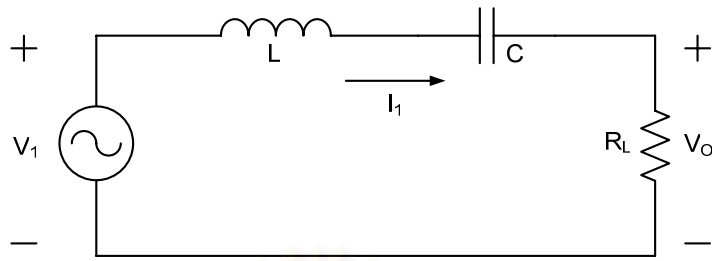


รูปที่ 2.26 โครงสร้างที่สำคัญของอุปกรณ์จุดหลอด

## 2.9 แนวทางการปรับความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

เนื่องจากหลอดโซเดียมความดันสูงนั้นมีลักษณะสมบัติเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยมีความต้านทานพลวัตในสภาวะการทำงานปกติเป็นทั้งบวกและลบ ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงมีเสถียรภาพได้ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งได้จากการใช้อิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียในอิมพีแดนซ์มากเกินไป จึงนิยมใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นอิมพีแดนซ์ ทำหน้าที่จำกัดกระแส โดยมีลักษณะการต่อวงจรดังในรูปที่ 2.27

เมื่อใช้หลอดโซเดียมความดันสูงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง หลอดโซเดียมความดันสูง จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานแบบเชิงเส้นโดยประมาณกล่าวคือ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์เข้าไปในหลอดโซเดียมความดันสูง แรงดันคร่อมหลอดจะมีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์เช่นกัน



รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 2.27 สามารถคำนวณหาสมการของกระแสที่ไหลผ่านโหลด

$$\text{จากสมการที่ 2.8 ; } I_1 = \frac{V_1}{Z} = \frac{V_1}{R_L \left[ 1 + jQ_o \left( \omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right]} \quad (2.22)$$

$V_1$  = แรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูล

$V_o$  = แรงดันคร่อมโหลดโซเดียมความดันสูง

$\omega_n$  = ความถี่ที่สถานะ (Normalize Frequency)

$Q_o$  = Quality factor

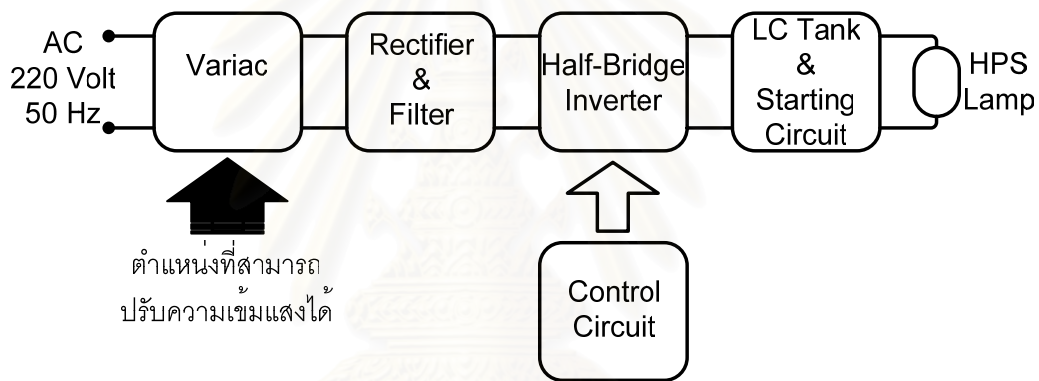
ปริมาณความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอด ดังนั้นการปรับความเข้มแสงสว่างของหลอดโซเดียมความดันสูง ทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านหลอด จากสมการที่ 2.22 สามารถทำได้ 3 กรณี คือ

- ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายแรงดัน ( $V_1$ )
- ปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ( $\omega_n$ )
- ปรับค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้

### 2.9.1 การปรับขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่าย

การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงของแหล่งจ่ายนั้น ทำได้โดยควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ มีโครงสร้างของระบบดังรูปที่ 2.28 การ

ปรับแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ ( $V_i$ ) จะมีผลทำให้ขนาดของกระแสเปลี่ยนแปลงตามขนาดของแรงดัน ส่งผลให้ความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงเปลี่ยนแปลงตามขนาดของกระแสด้วยเช่นกัน สำหรับการปรับความเข้มแสงของโซเดียมความดันสูงด้วยวิธีนี้ ต้องใช้หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำของสายกำลัง ซึ่งการทดลองสามารถใช้ได้ค่อนข้างดี แต่เมื่อต้องการปรับความเข้มแสงให้มีค่าต่ำลงจากการปรับแรงดันสายกำลัง พบว่าเมื่อลดแรงดันถึงจุดๆหนึ่งจะมีผลทำให้หลอดดับได้ เนื่องจากจุดทำงานจะขาดเสถียรภาพ เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงสาเหตุที่ทำให้หลอดดับ ต้องทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่ความเข้มแสงต่ำ



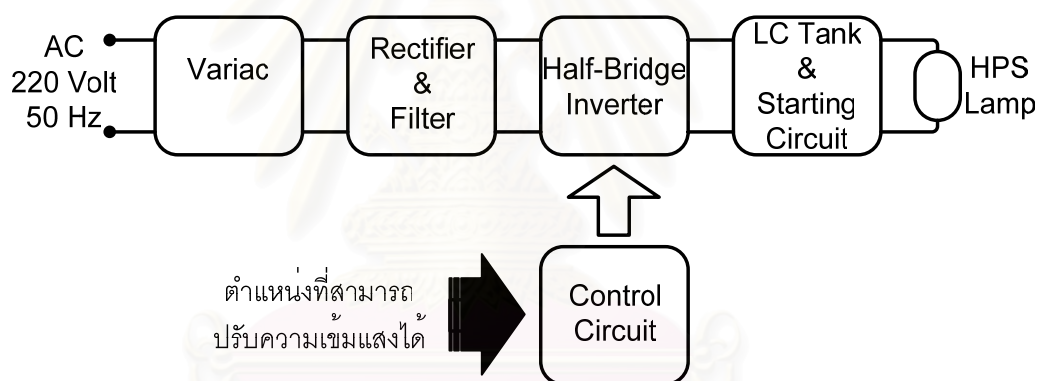
รูปที่ 2.28 โครงสร้างของการปรับความเข้มแสงโดยการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

## 2.9.2 การควบคุมความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์

การควบคุมกระแสผ่านหลอดโซเดียมความดันสูง อาจทำได้โดยการควบคุมความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยมีโครงสร้างของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งทำได้โดยการใช่วงจรกำเนิดสัญญาณแบบอิเล็กทรอนิกส์ (IC) เนื่องจากวงจรถ่ายสัญญาณแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถออกแบบได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง แต่จะต้องมีการแยกโดดระหว่างวงจรขับนำกับส่วนของวงจรถ่าย เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของแรงดันบัลในขณะอินเวอร์เตอร์ทำงาน รวมถึงจะต้องมีช่วงเวลาที่ไม่สวิตซ์ทั้งสองของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์หยุดนำกระแสพร้อมกัน (Dead Time) และจะต้องมีการปรับเวลาช่วงนี้ให้เหมาะสม เพราะถ้าไม่เหมาะสมอาจจะเกิดสาเหตุทำให้สวิตซ์ของ

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ทำงานผิดปกติหรืออาจเกิดการที่สวิตช์ทั้งสองตัวนำกระแสพร้อมกันทำให้เกิดความเสียหายได้

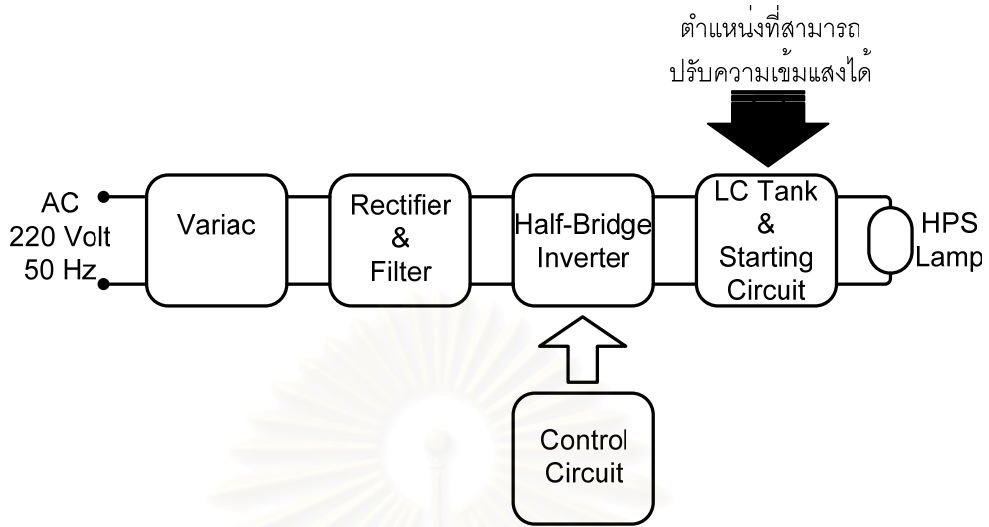
การควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง สามารถปรับความเข้มแสงได้อย่างต่อเนื่องและมีช่วงของการปรับความเข้มแสงที่กว้าง โดยสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำได้ แต่พบว่าจะมีปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงเกิดขึ้นในย่านความเข้มแสงสูงได้ เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงสาเหตุปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสง ต้องทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่ความเข้มแสงสูง



รูปที่ 2.29 โครงสร้างของการปรับความเข้มแสงโดยการควบคุมความถี่การทำงาน

### 2.9.3 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ (L1) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้

การควบคุมความเข้มแสงวิธีนี้ ทำได้โดยปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรีโซแนนซ์ ซึ่งมีโครงสร้างของระบบดังรูปที่ 2.30 สำหรับการใช้นั้นจะต้องมีการเปลี่ยนขนาดโครงสร้างเชิงกลของตัวเหนี่ยวนำ โดยการปรับช่องว่างอากาศ (air gap) ของแกนเฟอร์ไรท์ ซึ่งไม่สะดวกต่อการนำไปควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง และมีความยุ่งยากในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.30 โครงสร้างการปรับความเข้มแสงโดยการควบคุมค่าความเหนี่ยวนำ ( $L_1$ )

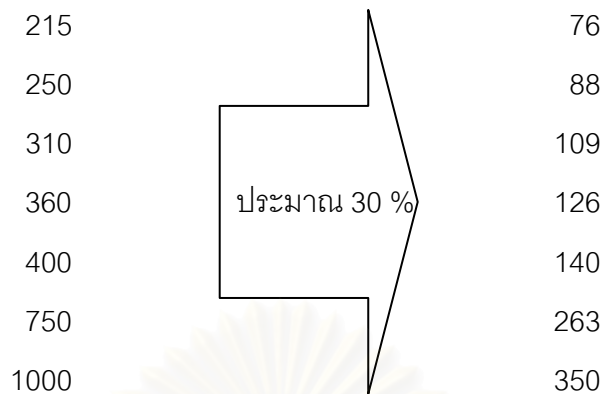
## 2.10 ขอบเขตการปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง (Dimming Range)

ตามมาตรฐานของหลอด HID โดยทั่วไปนั้นจะมีการกำหนดขอบเขตพิกัดกำลังไฟฟ้าของหลอดทุกชนิดในตระกูล HID เพื่อให้เข้าใจถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานในส่วนของการประหยัดพลังงาน โดยให้การควบคุมความเข้มแสงสว่างเป็นไปอย่างเหมาะสมตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นตามมาตรฐานได้กำหนดย่านการปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าของหลอดตั้งแต่ 35 -1000 วัตต์ ดังนี้

<u>Lamp Power Rating(Watts)</u>	<u>Minimum Lamp Operating Power(Watts)</u>
35	13
50	18
70	25
95	34
100	35
110	39
125	44
150	53
200	70

ประมาณ 30 %





โดยข้อมูลที่นำเสนอนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากมาตรฐานการทดลองของบัลลาสต์แกนเหล็ก กับหลอดโซเดียมความดันสูงจากการควบคุมความเข้มแสงโดยควบคุมแรงดันด้านแหล่งจ่าย สำหรับการวิจัยนี้ใช้หลอดโซเดียมความดันสูงที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ ซึ่งมีย่านการปรับความเข้มแสงได้ต่ำสุด 53 วัตต์ หรือมีย่านการปรับความเข้มแสงประมาณ 30% - 100% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าที่หลอดตามที่กำหนดไว้

สำหรับวิธีการควบคุมความเข้มแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้วิธีการควบคุมความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งวิธีนี้สามารถปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้ในช่วงกว้างประมาณ 5%-100% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าที่หลอด รวมถึงทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเสถียรภาพการควบคุมความเข้มแสงตลอดย่านการปรับความเข้มแสงได้ แต่จะมีปัญหาความไวในการปรับความเข้มแสงเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขและปรับปรุงต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

## เกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด ปรับความเข้มแสงได้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของหลอดโซเดียมความดันสูงที่ประกอบด้วย โครงสร้างของหลอด คุณลักษณะทางไฟฟ้าของหลอดในแต่ละช่วงการทำงาน การทำงานของหลอดเมื่อใช้งานร่วมกับบัลลาสต์ธรรมดาและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงจำแนกสมการต่างๆจากวงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และแนวทางในการควบคุมความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในส่วนประกอบและการทำงานของบัลลาสต์ ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างเหมาะสม สำหรับการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีการกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง และปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงที่เกิดขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการกำหนดเกณฑ์ในออกแบบค่าอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรหลอดของอินเวอร์เตอร์และวงจรจุดหลอดสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้ การออกแบบนั้นต้องพิจารณาเกณฑ์ในการออกแบบและผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วย ข้อกำหนดในการออกแบบ ชี้ดจำกัดในการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการกำหนดค่าอุปกรณ์ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ชี้ดจำกัด และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งได้แก่ ย่านความถี่การทำงาน ปัญหาเสถียรภาพของจุดทำงานตลอดย่านการควบคุมความเข้มแสง และปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสง

งานวิจัยนี้ใช้หลอดโซเดียมความดันสูงที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ เมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จะมีค่าแรงดันคร่อมหลอดประมาณ 85 โวลต์ และกระแสผ่านหลอดประมาณ 1.76 แอมป์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า โดยเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ เนื่องจากได้มีการละเลยการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน-กระแสที่หลอดตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น สำหรับการกำหนดความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องคำนึงถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย กล่าวคือหากใช้ความถี่การทำงานต่ำกว่า 20 KHz อาจก่อให้เกิดเสียงรบกวนแก่ผู้ใช้

ขณะเดียวกันหากใช้ความถี่การทำงานสูงกว่า 50 KHz อาจเพิ่มปัญหาในด้านการรบกวนความถี่วิทยุและกำลังสูญเสียของวงจรจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเลือกความถี่การทำงานในสภาวะอยู่ตัวที่พิกัดกำลังไฟฟ้าที่โหลด ถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 20 KHz – 50 KHz แต่ทั้งนี้ในช่วงที่มีการปรับความเข้มแสงให้มีค่าลดลงนั้น ความถี่การทำงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 120 KHz โดยพิจารณาให้เป็นพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามเงื่อนไขของการควบคุมความเข้มแสง เพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สามารถปรับความเข้มแสงให้ต่ำลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับโหลดโซเดียมความดันสูงที่สภาวะอยู่ตัวของพิกัดกำลังไฟฟ้าที่โหลด 35 KHz (เป็นช่วงระหว่าง 20 KHz – 50 KHz) ขั้นตอนการออกแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 3.1 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเกณฑ์พื้นฐานที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ข้อกำหนดและขีดจำกัดของการออกแบบ จากนั้นจะพิจารณาเกณฑ์ในการออกแบบ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่นอกเหนือจากข้อกำหนดและขีดจำกัด โดยมักจะเป็นพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะการทำงานที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับบัลลาสต์แกนเหล็กที่เป็นมาตรฐานการใช้งานทั่วไป ดังนั้นการออกแบบจะแบ่งเกณฑ์การออกแบบต่างๆได้ดังนี้

#### 3.1.1 ข้อกำหนดของการออกแบบ

ข้อกำหนดของการออกแบบเป็นเกณฑ์พื้นฐานที่ต้องพิจารณาประกอบการออกแบบ ได้แก่

- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า (Vac)
- กำลังไฟฟ้าที่โหลด ( $P_o$ )
- แรงดันคร่อมโหลด ( $V_L$ )
- กระแสผ่านโหลด ( $I_L$ )
- ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้า (Power factor)

### 3.1.2 ขีดจำกัดของการออกแบบ

ขีดจำกัดของการออกแบบเป็นเกณฑ์ที่ผู้ออกแบบจะต้องนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบ เพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีการทำงานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งประกอบด้วย

- แรงดันจุดหลุด (Pulse Voltage)
- มุมเฟสของกระแสกับแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ (Phase Angle)

### 3.1.3 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาเป็นเกณฑ์พิจารณาประกอบการออกแบบ โดยเป็นลักษณะการทำงานของวงจรที่ขึ้นอยู่กับค่าอุปกรณ์ในวงจรที่ผู้ออกแบบมีอิสระในการเลือก โดยจะใช้พฤติกรรมการทำงานต่างๆที่อาจจะมีลักษณะเสริมกันหรือขัดแย้งกัน เพื่อใช้ในการกำหนดค่าอุปกรณ์ที่มีอิสระในการเลือก ซึ่งพฤติกรรมการทำงานต่างๆ ได้แก่

- ความถี่การทำงาน (Operating Frequency)
- ย่านการปรับความเข้มแสง (Dimming Range)
- ความถี่การทำงาน (Operating Frequency)
- ย่านความถี่การทำงาน (Frequency Range)
- เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง (Stability Control Light Intensity)
- ความไวในการควบคุมความเข้มแสง (Sensitivity Control Light Intensity)

สำหรับในงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ โดยจะพิจารณาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง ซึ่งพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อทำการควบคุมความเข้มแสง คือ ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ (หลอดดับ) และ ปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงสูง (การควบคุมความเข้มแสงไม่นุ่มนวล) ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ปัญหาที่เกิดขึ้น 2 ปัญหาดังกล่าว มาใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอด

โซเดียมความดันสูงอย่างมีประสิทธิภาพได้ สำหรับตารางที่ 3.1 เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ ซีดีจำกัดในออกแบบ รวมถึงพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	หมายเหตุ
กำลังไฟฟ้าที่โหลด (Po)	150 วัตต์	ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่โหลด
แรงดันไฟตรงด้านเข้า (Vdc)	280 โวลต์	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz ร่วมกับวงจรกรองแรงดัน
แรงดันคร่อมโหลด (V <sub>o</sub> )	85 โวลต์	ขณะทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้า
กระแสผ่านโหลด (I <sub>L</sub> )	1.76 แอมป์	ขณะทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้า
ความต้านทานโหลด (R <sub>L</sub> )	48 โอห์ม	ขณะทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้า
แรงดันจุดโหลด (V <sub>ig</sub> )	2,000 โวลต์	มีค่าต่ำสุดที่สามารถจุดโหลดได้
ความถี่การทำงาน (fs)	35 กิโลเฮิร์ตซ์	เลือกค่าระหว่าง 20 - 50 kHz
ย่านความถี่การทำงาน	35 – 120 กิโลเฮิร์ตซ์	กำหนดจากวงจรขับนำสวิตช์
เสถียรภาพของการควบคุม ความเข้มแสง	มีเสถียรภาพตลอด ย่านการปรับแสง	การปรับความถี่มีผลทำให้ระบบ มีเสถียรภาพการทำงานได้
ความไวในการควบคุมความ เข้มแสง	ไม่เกิน 5 Watts/1kHz	เป็นค่าเหมาะสมที่ได้จากการ ทดลองถึงพฤติกรรมการทำงาน

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแรงดันคร่อมโหลดกับกระแสผ่านโหลดจากตารางที่ 3.1 ได้มีการละเอียดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสที่โหลดตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความยุ่งยากแก่การออกแบบ ดังนั้นจึงใช้การประมาณค่าเป็นข้อกำหนดการออกแบบ

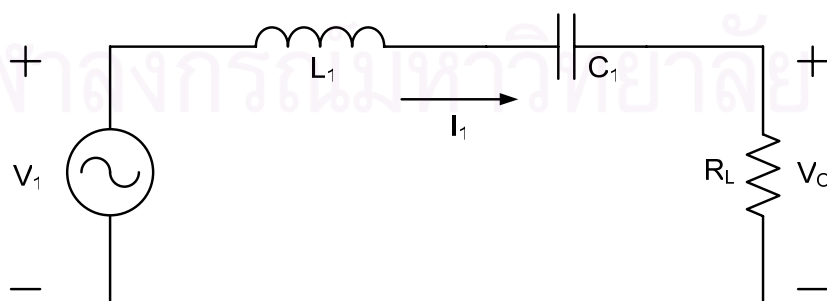
### 3.2 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยพิจารณาพฤติกรรมการทำงานเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ

การออกแบบเริ่มจากการใช้ข้อกำหนดและขีดจำกัดต่างๆในการออกแบบเป็นเกณฑ์ในการเลือกค่าอุปกรณ์ ซึ่งในที่นี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์ของวงจรโวลต์อินเวอร์เตอร์ โดยหากเลือกได้หลายแบบ จะสามารถนำพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามที่กล่าวมาประกอบการพิจารณาเลือกค่าอุปกรณ์เพื่อให้ได้พฤติกรรมการทำงานที่เหมาะสมที่สุดเท่าที่ทำได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้มีพฤติกรรมการทำงานที่นำมาพิจารณาประกอบการออกแบบดังนี้

- ย่นความถี่การทำงาน
- เสถียรภาพของจุดทำงานตลอดย่านการควบคุมความเข้มแสง
- ความไวในการควบคุมความเข้มแสง

#### 3.2.1 การออกแบบวงจรเรโซแนนซ์โวลต์อนุกรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการออกแบบนั้น จะเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบวงจรเรโซแนนซ์โวลต์อนุกรม (Series Resonant Inverter) ซึ่งการออกแบบและการวิเคราะห์วงจรนั้นจะใช้สมการของวงจรสมมูลสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ตามที่กล่าวมาจากบทที่ 2 โดยลักษณะการออกแบบวงจร จะใช้การประมาณด้วยความถี่หลักมูลของสัญญาณรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยม (Fundamental Frequency Approximation) ดังรูปที่ 3.1



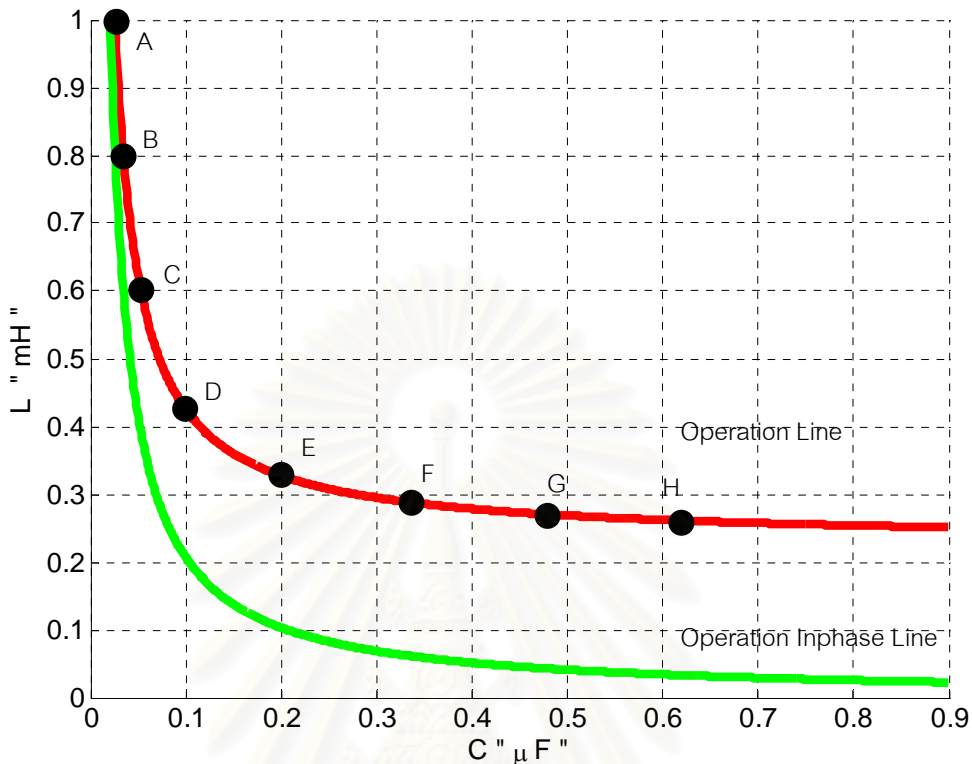
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลที่ใช้ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

สำหรับการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์โพลีโทรมนั้น จะเป็นการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ ) กับค่าตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) ที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานของบัลลาสต์ โดยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้องสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนดของการออกแบบ ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้า ( $V_{dc}$ ) ค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ( $P_O$ ) ค่าความถี่การทำงานที่พิกัด ( $f_s$ ) ค่าความต้านทานของหลอดที่พิกัด ( $R_L$ ) ค่ากระแสผ่านหลอดที่พิกัด ( $I_L$ ) ค่าแรงดันคร่อมหลอดที่พิกัด ( $V_O$ ) และค่าแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูลของสัญญาณรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยม ( $V_1$ )

โดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ ดังที่กล่าวมาจากบทที่ 2 ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 3.1 จากนั้นใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากตารางที่ 3.1 เป็นข้อกำหนดในการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่พิกัดการทำงานได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่พิกัดการทำงาน (Operation Line) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนกรณีเส้นที่ 2 (Operation Inphase Line) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับความถี่การทำงานที่พิกัด ( $f_s = f_o$ ) ดังนั้นจึงเป็นเงื่อนไขสำหรับการพิจารณามุมเฟสของวงจรให้กระแสล้าหลังแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ ทำงานที่ความถี่การทำงานสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_s > f_o$ ) ทำให้การทำงานของสวิตช์ไวงานเป็นแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Resonant Switching, ZVS) ทำให้มีกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำ

$$L = \frac{1}{\omega_s^2 C} + \sqrt{\frac{1}{\omega_s^4 C^2} - \frac{R_L^2}{\omega_s^2} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_O} \right)^2 + \frac{1}{(\omega_s C R_L)^2} \right]} \quad (3.1)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุที่พิกัดการทำงาน

สำหรับการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่หนึ่งจะให้กำลังออกที่พิกัด แต่พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์จะมีความแตกต่างกัน ซึ่งพฤติกรรมการทำงานที่แตกต่างกันนี้ จะส่งผลต่อย่านความถี่ของการควบคุมความเข้มแสง รวมถึงเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง และความไวในการควบคุมความเข้มแสงด้วย ดังนั้นต้องเลือกค่าที่เหมาะสมโดยการพิจารณาจากเกณฑ์ในการออกแบบเป็นเงื่อนไขที่สำคัญ จากรูปที่ 3.2 จะพิจารณาค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ จาก A - H เพื่อเลือกให้เหมาะสมสำหรับเกณฑ์การออกแบบดังต่อไปนี้

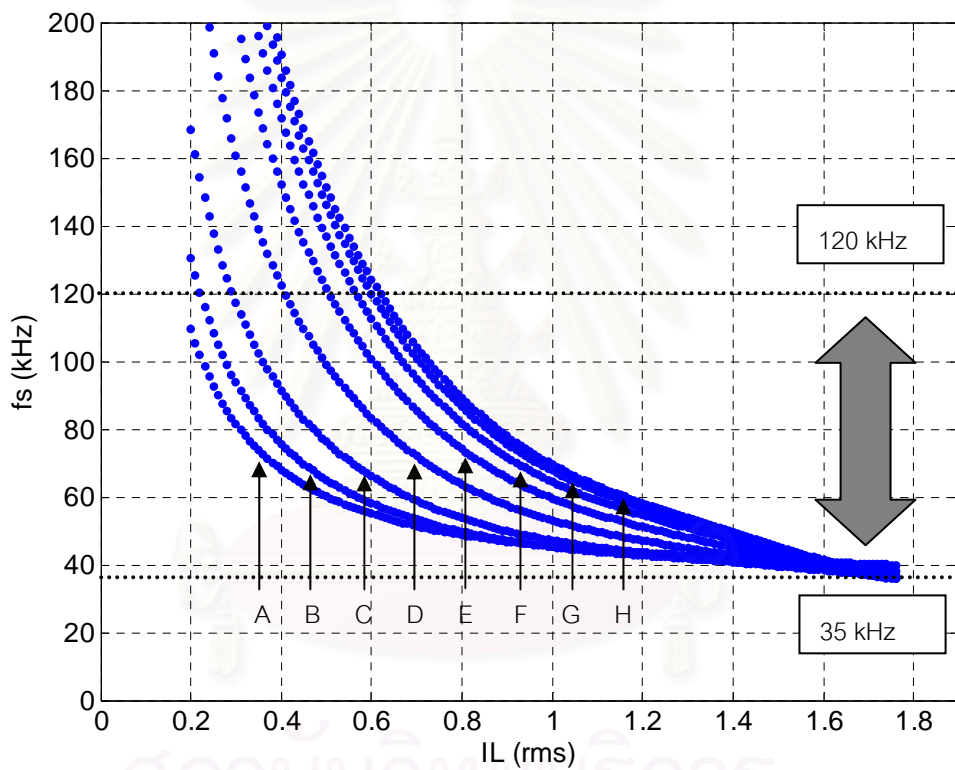
### 3.2.1.1 ย่านความถี่ของการควบคุมความเข้มแสง

สำหรับย่านความถี่การควบคุมความเข้มแสงจากรายที่ 3.1 มีค่าในช่วง 35 - 120 kHz ซึ่งสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การทำงานกับกระแสผ่านหลอดที่ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ได้ สมการที่ 3.2 จะใช้เป็นเกณฑ์ประกอบการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ได้ แสดงดังในรูปที่ 3.3



จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การทำงานกับกระแสออกของบัลลาสต์

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left(V_1^2 - V_o^2 + \frac{2L.I_L^2}{C}\right) + \sqrt{\left(\left(V_o^2 - V_1^2 - \frac{2L.I_L^2}{C}\right)^2 - \frac{4L^2.I_L^4}{C^2}\right)}}{(2L^2.I_L^2)}} \quad (3.2)$$



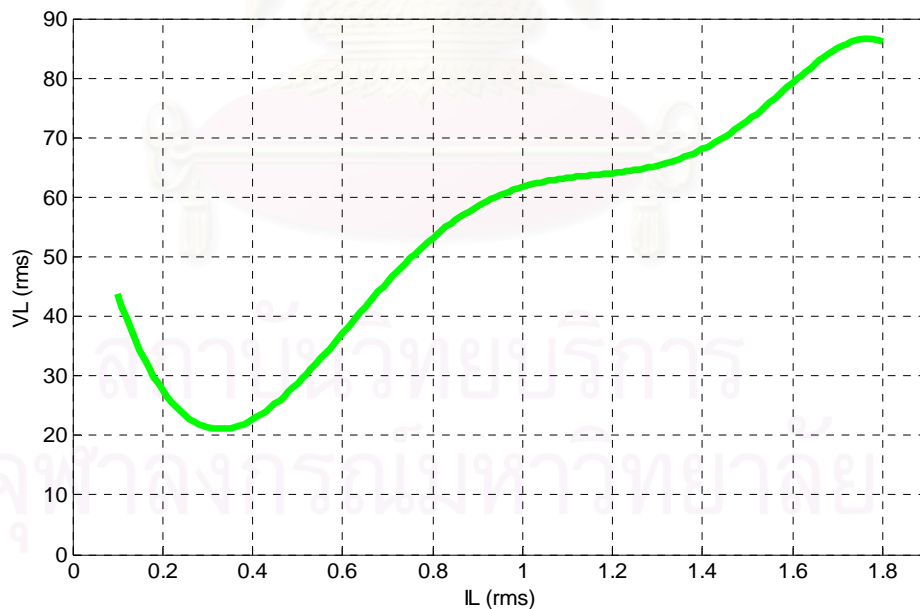
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การทำงานกับกระแสออกที่ค่า L, C แต่ละคู่

รูปที่ 3.3 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การทำงานกับกระแสออก ตามสมการที่ 3.2 ซึ่งช่วงความถี่ที่ใช้ในการควบคุมความเข้มแสงจากค่าที่พิกัดจนถึงค่าต่ำสุดจะแตกต่างกันสำหรับค่า L, C แต่ละคู่ ลักษณะดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบได้ส่วนหนึ่ง แต่ต้องพิจารณาถึงเกณฑ์เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงและเกณฑ์ความไวในการควบคุมความเข้มแสง ดังจะกล่าวต่อไป

### 3.2.1.2 เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง

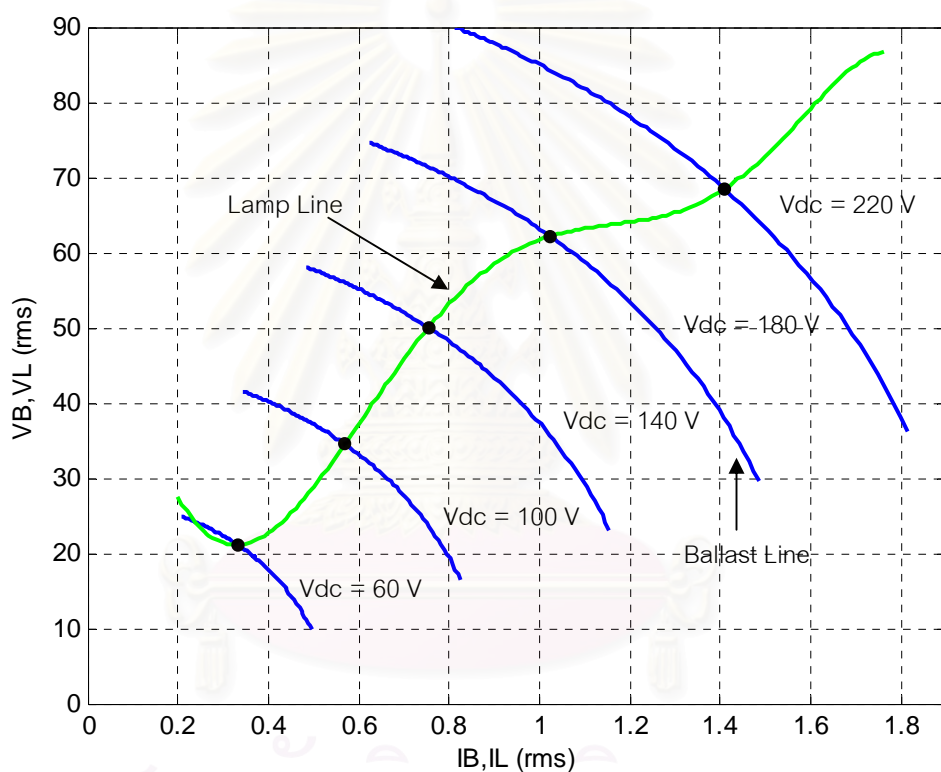
การควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง โดยใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีหลายวิธีด้วยกัน สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การทดลองอยู่ 2 วิธี คือ การปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า และการปรับความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ การควบคุมความเข้มแสงโดยใช้วิธีปรับแรงดันด้านเข้า จากการทดลองพบว่าหลอดจะมีปัญหาด้านเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวจะนำไปสู่การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงที่เกิดขึ้น

เมื่อหลอดโซเดียมความดันสูงทำงานที่ความถี่สูง จะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่ขนาดค่าความต้านทานสมมูลของหลอดโซเดียมความดันสูงจะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นกับกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดที่จุดทำงานดังรูปที่ 3.4 การวิเคราะห์วงจรโดยการแก้สมการพีชคณิตของวงจรที่ไหลมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นนั้นมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงใช้วิธีการวิเคราะห์ทางกราฟเพื่อการวิเคราะห์วงจร



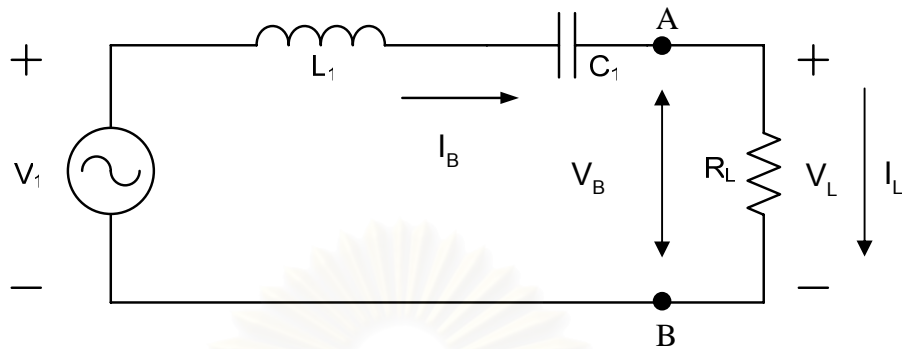
รูปที่ 3.4 ลักษณะสมบัติกระแสผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดของหลอดโซเดียมความดันสูง

การวิเคราะห์โดยวิธีการทางกราฟเพื่อหาจุดทำงานจะทำให้เข้าใจพฤติกรรมการทำงานของวงจรได้ง่ายกว่าการคำนวณโดยใช้สมการทางพีชคณิต การวิเคราะห์การทำงานของบัลลาสต์ที่มีหลอดโซเดียมความดันสูงเป็นโหลด โดยวิธีการทางกราฟทำได้โดยการเขียน Ballast line ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับกระแสด้านออกของบัลลาสต์ลงบนกราฟเดียวกับ Lamp line ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอดกับกระแสผ่านหลอด ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ที่จุดทำงานต่างๆ

รูปที่ 3.5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) กับ Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) สำหรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าค่าต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมความเข้มแสงจากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า ( $V_{dc}$ ) ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จุดทำงานของ Ballast Line กับ Lamp Line ได้จากรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ที่จุดทำงานของ Ballast Line กับ Lamp Line

เห็นได้ว่าเมื่อเขียนสมการเคอร์ชอฟฟ์ของแรงดันและกระแสที่หัวออกของบัลลาสต์จะได้  $V_B = V_L$  และ  $I_B = I_L$  ดังนั้นจุดทำงานของวงจรก็คือจุดตัดของ Ballast line กับ Lamp line เนื่องจาก Ballast line คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออก ( $V_B$ ) กับ กระแสด้านออก ( $I_B$ ) ของบัลลาสต์สำหรับโหลดความต้านทานที่ค่าต่างๆ ดังนั้นการเขียน Ballast line จะทำโดยการคำนวณแรงดันด้านออก ( $V_B$ ) กับกระแสด้านออก ( $I_B$ ) ของบัลลาสต์สำหรับความต้านทาน  $R_L$  ค่าต่างๆจากสมการที่ 3.3 และ 3.4 ส่วน Lamp line ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอาร์เอ็มเอสของโหลดแรงดันคร่อมโหลด ( $V_L$ ) กับกระแสผ่านโหลด ( $I_L$ ) สำหรับกำลังออกของโหลดค่าต่างๆ ซึ่งได้จากการทดลองวัดจริง ดังนั้นเราสามารถหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมโหลด ( $V_L$ ) กับกระแสผ่านโหลด ( $I_L$ ) โดยวิธี Curve Fitting แบบ Polynomial ได้ ตามสมการที่ 3.5 จาก [5]และ[6]

- สมการของ Ballast Line แสดงได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$V_B = \frac{V_1 \cdot R_L}{\sqrt{\left( R_L^2 + (2\pi f_s L)^2 + \left( \frac{1}{2\pi f_s C} \right)^2 - \left( \frac{2L}{C} \right) \right)}} \quad (3.3)$$

$$I_B = \frac{V_1}{\sqrt{\left( R_L^2 + (2\pi f_s L)^2 + \left( \frac{1}{2\pi f_s C} \right)^2 - \left( \frac{2L}{C} \right) \right)}} \quad (3.4)$$

- สมการของ Lamp Line แสดงได้ดังสมการที่ 3.5

$$V_L = -111.8I_L^6 + 505.2I_L^5 - 657.5I_L^4 - 58.25I_L^3 + 659.9I_L^2 - 348I_L + 72.114 \quad (3.5)$$

โดยค่าแรงดันคร่อมหลอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่การคำนวณได้มีการละเลยผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เนื่องจากจะมีความยุ่งยากในการออกแบบ

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line นั้น จำเป็นต้องกำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุ จึงจะสามารถวิเคราะห์จุดทำงานของบัลลาสต์ได้ โดยจะวิเคราะห์เสถียรภาพการควบคุมความเข้มแสงก่อน โดยใช้ผลรวมระหว่างความต้านทานพลวัตระหว่างจุด (ที่จุด A กับจุด B) ซึ่งเป็นแรงดันด้านออกของบัลลาสต์ ( $V_B$ ) กับแรงดันคร่อมหลอด ( $V_L$ ) ดังแสดงจากรูปที่ 3.6 โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันออกของบัลลาสต์ ( $dV_B$ ) กับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสออกของบัลลาสต์ ( $dI_B$ ) หรือ  $(R_{OB}) = (dV_B) / (dI_B)$
- ความต้านทานพลวัตที่หลอด ( $R_L$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมหลอด ( $dV_L$ ) กับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านหลอด ( $dI_L$ ) หรือ  $(R_L) = (dV_L) / (dI_L)$

โดยเงื่อนไขการมีเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงนั้น พบว่าผลรวมระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) กับความต้านทานพลวัตที่หลอด ( $R_L$ ) ต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ จึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ โดยแสดงได้จากสมการที่ 3.6

$$\sum (R_{OB}, R_L) = \text{Positive (Stable)} \quad (3.6)$$

จากรูปที่ 3.4 พบว่าหลอดโซเดียมความดันสูงมีค่าความต้านทานเป็นทั้งบวกและลบ ซึ่งในย่านความเข้มแสงของหลอดมีค่าสูงถึงปานกลาง เมื่อกระแสผ่านหลอดมีค่าลดลง จะมีผลให้แรงดันคร่อมหลอดลดลงเช่นกัน ในช่วงนี้ค่าความต้านทานของหลอดจะเป็นบวก (Positive Dynamic Resistance) และบัลลาสต์จะมีเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงเสมอ เนื่องจากบัลลาสต์จะมีปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงได้นั้น ค่าความต้านทานของหลอดต้องเป็นลบเท่านั้น พิจารณารูปที่ 3.4 ที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มแสงของหลอดมีค่าต่ำ ค่าความต้านทานของหลอดจะมีค่าเป็นลบ โดยกระแสผ่านหลอดลดลง แรงดันคร่อมหลอดมีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3.4 เส้น Lamp Line จะมีความชันของเส้นเป็นลบ ดังนั้นเพื่อให้หลอดทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ต้องให้หลอดโซเดียมความดันสูงทำงานกับแหล่งจ่ายที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งกระแส และทำให้ค่าความต้านทานพลวัตของบัลลาสต์ที่หลอดมีค่าเป็นบวก และมีขนาดใหญ่กว่าขนาดความต้านทานพลวัตของหลอดเสมอ เพื่อให้ผลรวมของค่าความต้านทานพลวัตภายในวงจรมีค่าเป็นบวก (Overall Resistance Positive) การทำงานจึงจะมีเสถียรภาพได้ตามที่กล่าวมา

เราสามารถคำนวณหาสมการค่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ได้ จากการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านออกของบัลลาสต์เทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสด้านออกของบัลลาสต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของหลอด ซึ่งสามารถคำนวณความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 ได้ผลดังสมการที่ 3.7

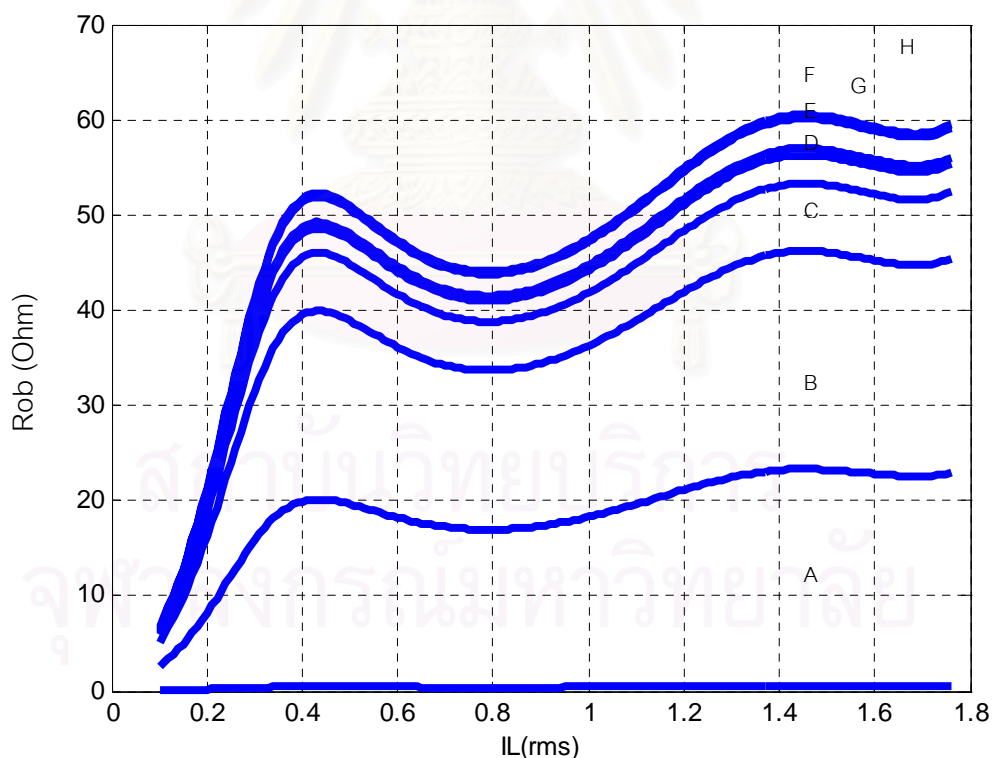
$$R_{ob} = - \frac{dv_B}{di_B} = - \frac{\left( \frac{dv_B}{dR_L} \right)}{\left( \frac{di_B}{dR_L} \right)} = \frac{(\omega_s L)^2 + (1/\omega_s C)^2 - 2L/C}{R_L} > 0 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $R_{ob}$  คือ ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์  
 $R_l$  คือ ความต้านทานหลอด

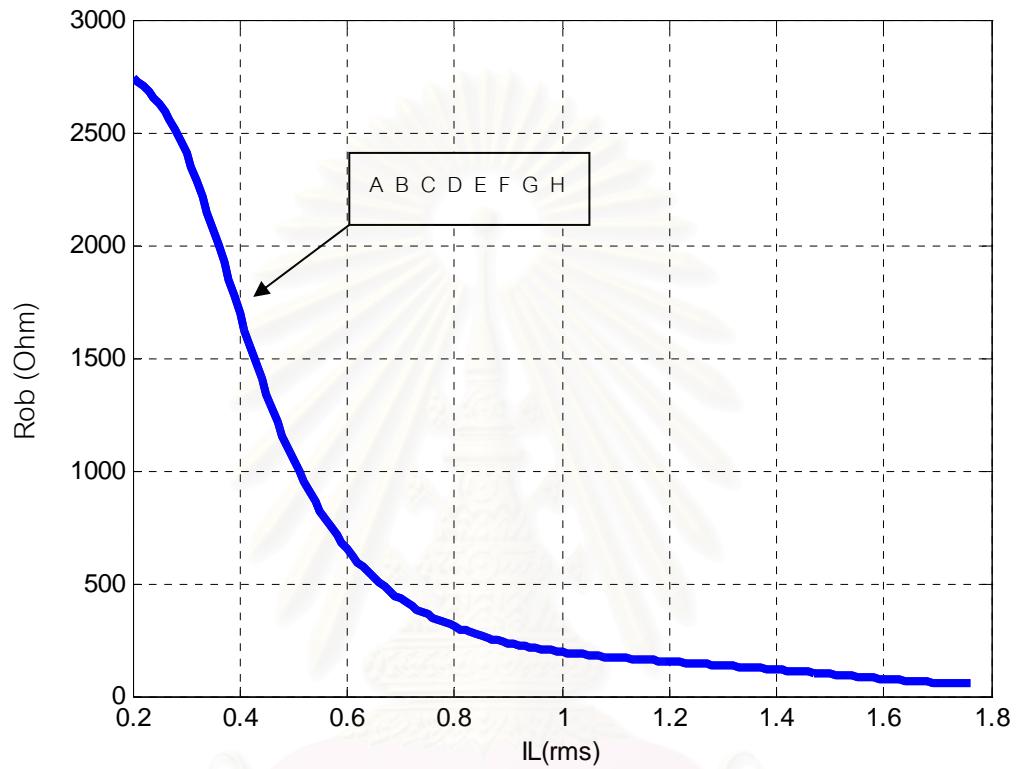
สำหรับความต้านทานพลวัตที่โหลด( $R_l$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5 โดยคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมโหลดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านโหลด ซึ่งได้ผลตามสมการที่ 3.8

$$R_l = \frac{dV_L}{dI_L} = -670.8I_L^5 + 2526I_L^4 - 2630I_L^3 - 174.75I_L^2 + 1319.8I_L - 348 \quad (3.8)$$

จากนั้นคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์กับกระแสผ่านโหลดจากสมการที่ 3.7 เมื่อใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ ตามที่กล่าวมาข้างต้น ผลการคำนวณกรณีควบคุมความเข้มแสงโดยปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า แสดงในกราฟรูปที่ 3.7 และผลการคำนวณกรณีควบคุมความเข้มแสงโดยปรับความถี่การทำงาน แสดงในกราฟรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) จากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่

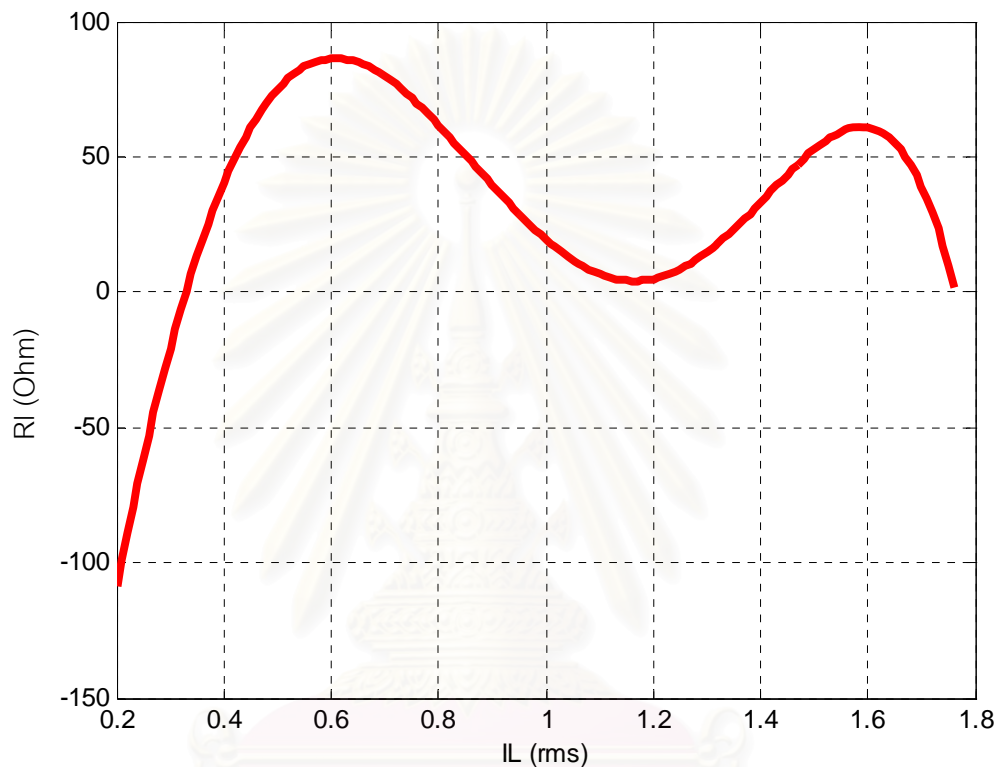


รูปที่ 3.8 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) จากการปรับความถี่การทำงาน  
ที่ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตที่หลุดกับกระแสผ่านหลุดจากสมการที่ 3.8 ซึ่งการควบคุมความเข้มแสงโดยการปรับแรงดันด้านเข้า และการปรับความถี่การทำงานจะให้ค่าความต้านทานพลวัตที่มีลักษณะเหมือนกัน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ค่าความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_i$ )

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์( $R_{ob}$ ) เมื่อให้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ นั้น มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถใช้ค่าที่แตกต่างกันนี้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบได้ แต่ต้องคำนึงถึงเกณฑ์ในการออกแบบอีกส่วนหนึ่งคือ เกณฑ์ของความไวในการควบคุมความเข้มแสง โดยจะกล่าวต่อไป

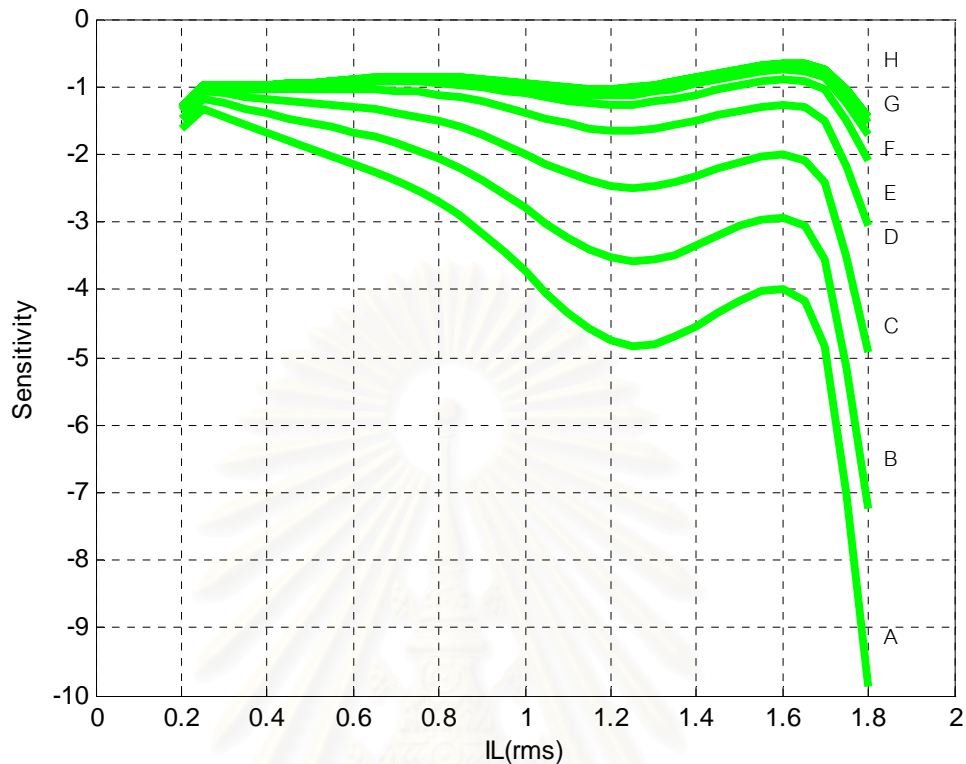
### 3.2.1.3 ความไวในการควบคุมความเข้มแสง

เนื่องจากปริมาณความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด ดังนั้นการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงทำได้โดย

การควบคุมกระแสที่ผ่านโหลดตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งอาจจะทำได้โดยควบคุมแรงดันไฟตรงด้านเข้า (Vdc) หรือควบคุมความถี่การทำงานของวงจรรินเวอร์เตอร์ ซึ่งการควบคุมความเข้มแสงโดยวิธีควบคุมความถี่การทำงานของวงจรรินเวอร์เตอร์นั้น จะมีปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงเกิดขึ้นในย่านความเข้มแสงสูง ทำให้การควบคุมความแสงไม่นุ่มนวล

ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความไวในการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ด้วยการควบคุมความถี่การทำงานของวงจรรินเวอร์เตอร์ในย่านความเข้มต่างกัน จึงได้คำนวณความไวในการควบคุมความเข้มแสง (Sensitivity)  $s_{f_s}^{I_L}$  ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านโหลดกับอัตราเปลี่ยนแปลงความถี่ในย่านกระแสออกค่าต่างๆ ตามสมการที่ 3.9 โดยมีการคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโหลดที่เป็นผลจากการเปลี่ยนค่ากระแสผ่านโหลดเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่การทำงาน ผลการคำนวณแสดงในกราฟรูปที่ 3.10

$$s_{\omega_s}^{I_L} = \left( \frac{\frac{\partial I_L}{I_L}}{\frac{\partial \omega_s}{\omega_s}} \right) = - \left[ \frac{(\omega_s L)^2 - \left( \frac{1}{(\omega_s C)} \right)^2 + \left( R_L \omega_s \frac{\partial R_L}{\partial \omega_s} \right)}{(R_L)^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{(\omega_s C)} \right)^2 - 2 \left( \frac{L}{C} \right)} \right] \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการควบคุมความเข้มแสงโดยการแปรค่าความถี่เทียบกับกระแสผ่านหลอดเมื่อใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่

จากผลการคำนวณความไวในการควบคุมความเข้มแสงโดยการแปรค่าความถี่สำหรับกระแสผ่านหลอดค่าต่างๆกัน โดยใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ จะเห็นได้ว่าในย่านที่กระแสออกและกำลังออกจากหลอดมีค่าน้อย ขนาดของความไวในการควบคุมแสงจะมีค่าน้อย แต่เมื่อกระแสออกเพิ่มขึ้น ขนาดความไวในการควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะกรณีค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุคู่ A ซึ่งหมายความว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เพียงเล็กน้อย จะมีผลทำให้กระแสผ่านหลอดเปลี่ยนไปอย่างมาก ผลการคำนวณดังกล่าวบ่งชี้ถึงความไม่แน่นอนของการควบคุมแสงของหลอด HPS ในย่านความเข้มแสงสูง

ผลการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ได้เกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้สำหรับประกอบการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ โดยพิจารณาพฤติกรรมการทำงานต่างๆที่กล่าวมา ซึ่งการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่จะมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน การออกแบบนั้นต้องเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสม เพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สามารถ

ทำงานได้ตามเกณฑ์ที่ออกแบบไว้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาได้จากตารางที่ 3.4 เป็นแนวทางในการออกแบบได้

### 3.3 การเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุโดยพิจารณาพฤติกรรมการทำงานเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ

ข้อกำหนดและขีดจำกัดในการออกแบบสามารถให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่สามารถเลือกได้ ดังนั้นการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่ได้นั้นจะอาศัยการพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นเกณฑ์การเลือกค่า L, C ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ซึ่งประกอบด้วย ยานความถี่การทำงานของการควบคุมความเข้มแสง เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง และความไวในการควบคุมความเข้มแสง

โดยการเลือกจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการทำงานต่างๆของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เทียบกับกระแสผ่านหลอด เนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ จะให้ลักษณะและพฤติกรรมการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ต้องพิจารณาค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุให้มีความเหมาะสมต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ตารางที่ 3.2,3.3 และ 3.4 แสดงลักษณะพฤติกรรมการทำงานที่แตกต่างกัน เมื่อเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่ โดยพฤติกรรมการทำงานต่างๆ สามารถพิจารณา ได้จากการปรับความเข้มแสง 2 แบบ คือ การปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้ากับการปรับความถี่การทำงาน ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ประกอบการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ L, C แต่ละคู่ จากการควบคุมความเข้มแสงโดยปรับความถี่การทำงาน

พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์	ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่							
	A	B	C	D	E	F	G	H
ย่านความถี่ของการควบคุมความเข้มแสง	narrow ← Moderate →				wide →			
เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง หรือ ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์	Low ← Moderate →				High →			
ความไวในการควบคุมความเข้มแสง	High ← Moderate →				Low →			

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า ถ้าพิจารณาย่านความถี่ของการทำงานที่สามารถควบคุมความเข้มแสงที่เหมาะสมนั้นจะเป็นกรณีค่า A, B, C และ D ส่วนเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงโดยพิจารณาจากความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) มีลักษณะไม่ขึ้นกับการเลือกค่า L, C เนื่องจากการคำนวณจะให้ผลเป็นค่าเดียวกันตลอด ส่วนความไวในการควบคุมความเข้มแสงได้ค่าที่เหมาะสมจะเป็นกรณีค่า E, F, G และ H ดังนั้นพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์จากการควบคุมความเข้มแสงโดยการปรับความถี่การทำงาน ค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงคู่ตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุที่ D และ E ดังนั้นผู้ออกแบบมีอิสระในการเลือกค่าอุปกรณ์ตามความเหมาะสม แต่ต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานที่ได้จากการควบคุมความเข้มแสงโดยการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าจากตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ประกอบการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ L, C แต่ละคู่ จากการควบคุมความเข้มแสงโดยปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า

พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์	ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่							
	A	B	C	D	E	F	G	H
ย่านแรงดันไฟตรงด้านเข้าจากการควบคุมความเข้มแสง	narrow ← Moderate → wide							
เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง หรือ ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์	Low ← Moderate → High							
ความไวในการควบคุมความเข้มแสง	High ← Moderate → Low							

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ถ้าพิจารณาย่านของแรงดันไฟตรงด้านเข้ากับความไวในการควบคุมความเข้มแสง จะให้ผลจากการคำนวณที่มีลักษณะไม่ขึ้นกับการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุ เนื่องจากจะให้ผลเป็นค่าเดียวกันตลอด ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบได้ ส่วนเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงโดยพิจารณาจากความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) สามารถเลือกค่า L, C ได้ โดยค่าที่เหมาะสมจะเป็นกรณีค่า E, F, G และ H ดังนั้นพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์จากการควบคุมความเข้มแสงโดยการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า ค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงคู่ตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุที่ E, F, G และ H ดังนั้นผู้ออกแบบมีอิสระในการเลือกค่าอุปกรณ์ตามความเหมาะสม ซึ่งจากพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ทั้ง 2 กรณี สามารถกำหนดค่า L, C ได้ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ที่สามารถนำมาเป็นเกณฑ์ประกอบการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ L, C แต่ละคู่ จากการควบคุมความเข้มแสงทั้ง 2 แบบ

พฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์	ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุแต่ละคู่							
	A	B	C	D	E	F	G	H
ย่านแรงดันไฟตรงด้านเข้าจากการควบคุมความเข้มแสง(จากการปรับความถี่)	narrow ← Moderate →				wide →			
เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงหรือความต้านทานพลวัตด้านออก(จากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า)	Low ← Moderate →				High →			
ความไวในการควบคุมความเข้มแสง(จากการปรับความถี่)	High ← Moderate →				Low →			

จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์จากการควบคุมความเข้มแสงทั้ง 2 กรณีซึ่งได้แก่ การควบคุมความเข้มแสงจากการปรับความถี่การทำงาน และการควบคุมความเข้มแสงจากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า สามารถให้เกณฑ์ประกอบการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความเข้มแสงได้ทั้งการปรับด้วยความถี่การทำงานและการปรับด้วยแรงดัน โดยจะได้ค่า L, C ที่เหมาะสม (D และ E) ซึ่งผู้ออกแบบมีอิสระในการเลือกค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมได้

โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกค่าที่จุด D จากรูปที่ 3.2 มีค่าดังนี้

- ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็น 0.42 มิลลิเฮนรี
- ตัวเก็บประจุมีค่าเป็น 0.1 ไมโครฟารัด

### 3.4 การออกแบบวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบวงจรจุดหลอดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้สมการจากบทที่ 2 ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของหม้อแปลงสร้างแรงดันสูงที่มีความสำคัญต่อการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากเนื่องจากมีหน้าที่ 2 อย่างด้วยกันคือ ทำหน้าที่กำเนิดแรงดันสูงชั่วขณะ และทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมในขณะทำงาน โดยการออกแบบจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดจากตารางที่ 3.5 เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรจุดหลอด จาก [7],[8],[9]และ[13]

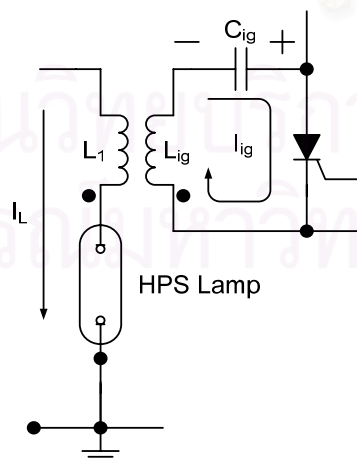
สามารถหาค่าตัวเหนี่ยวนำจุดหลอดจากสมการอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงจาก

$$\sqrt{\frac{L_{ig}}{L_1}} = \left( \frac{I_L}{I_{ig}} \right) = \frac{V_{Lig}}{V_{L1}} = \frac{n_p}{n_s} \quad (3.10)$$

$n_p$  = จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$n_s$  = จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ

ส่วนประกอบของโครงสร้างที่สำคัญในรูปที่ 3.11 นั้น สามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำจุดหลอด ( $L_{ig}$ ) จากสมการที่ 3.10 ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากตารางที่ 3.5 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 โครงสร้างที่สำคัญของอุปกรณ์จุดหลอด



จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 เป็นสมการของกฎอนุรักษ์พลังงานด้านปฏิกิริยา และความถี่ของแรงดันจุดหลุด โดยค่าเวลาที่ใช้ในการจุดหลุดนั้นได้มาจากผลการทดลองตัวจุดหลุดที่ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็กซึ่งมีค่าประมาณ 2 ไมโครวินาที (จากบทที่ 2) และจาก [10] และ [12]

$$\frac{1}{2} L_{ig} I_{ig}^2 = \frac{1}{2} C_{ig} V_{dc}^2 \quad (3.11)$$

$$\omega_{ig} = \frac{1}{\sqrt{L_{ig} C_{ig}}} \quad (3.12)$$

โดยสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบวงจรจุดหลุดจากสมการที่ 3.10, 3.11 และ 3.12 ซึ่งแสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตารางที่ 3.5

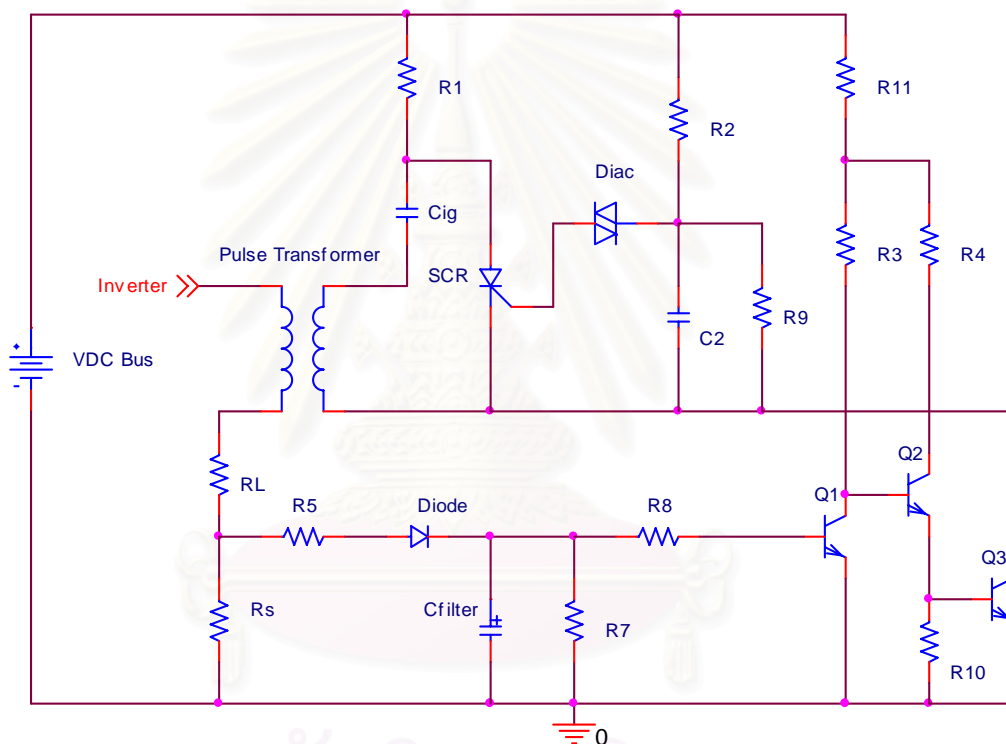
ตารางที่ 3.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบหม้อแปลงสร้างแรงดันสูงชั่วคราว

พารามิเตอร์	รายละเอียด	ค่าที่กำหนด	ค่าคำนวณ
$L_1$	ตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ	0.42 mH	-
$V_{Lig}$	ขนาดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ	280 Volt	-
$V_{L1}$	ขนาดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ	2,000 $V_{PEAK}$	-
$I_L$	ขนาดกระแสผ่านหลอด	2.12 $A_{PEAK}$	-
$n$	อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง (เพื่อ Loss)	-	10
$L_{ig}$	ตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ	-	4.2 $\mu H$
$I_{ig}$	ขนาดกระแสจุดหลุด	-	21.2 $A_{PEAK}$
$C_{ig}$	ตัวเก็บประจุที่จ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลง	-	24 nF
$f_{ig}$	ความถี่ขณะจุดหลุด	$T = 2 \mu Sec$	--

โดยคำนวณหาตัวเก็บประจุที่จ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลงสร้างแรงดันสูง จากสมการกระแสจุดหลุดสูงสุด

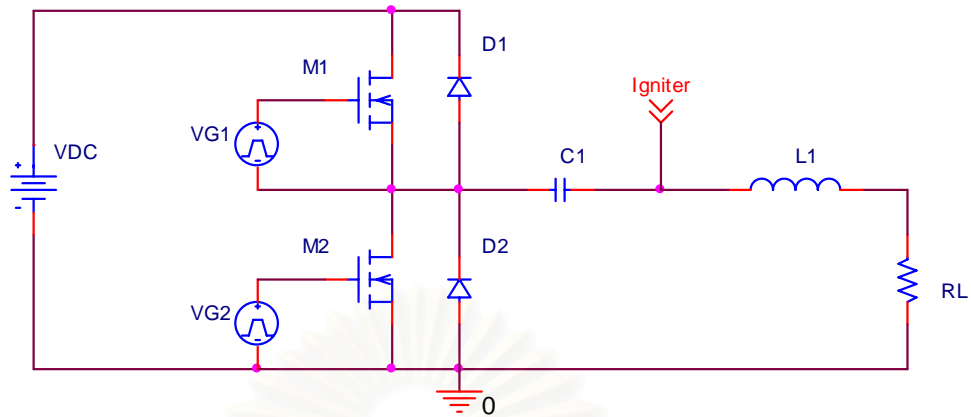
$$I_{Peak(ig)} = \frac{V_{BUS}}{\sqrt{\frac{L_{ig}}{C_{ig}}}} \quad (3.13)$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณสำหรับจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Orcad เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยได้ลักษณะการทำงานและพฤติกรรมของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น อาทิเช่น แรงดันจุดหลอด กระแสจุดหลอด เป็นต้น ซึ่งจะให้แนวทางที่สอดคล้องกับการออกแบบในทางปฏิบัติที่ถูกต้องได้ รูปที่ 3.12 - 3.13 เป็นรูปวงจรที่ใช้สำหรับการจำลองการทำงานของวงจรจุดหลอดกับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม Orcad จาก [11]



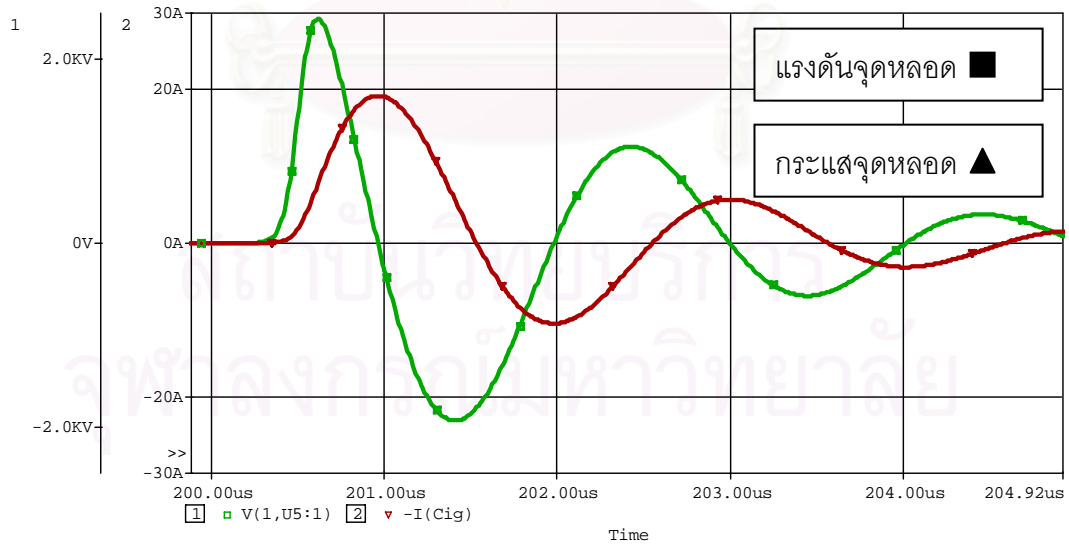
รูปที่ 3.12 การจำลองวงจรจุดหลอดจากโปรแกรม Orcad

สงวนลิขสิทธิ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

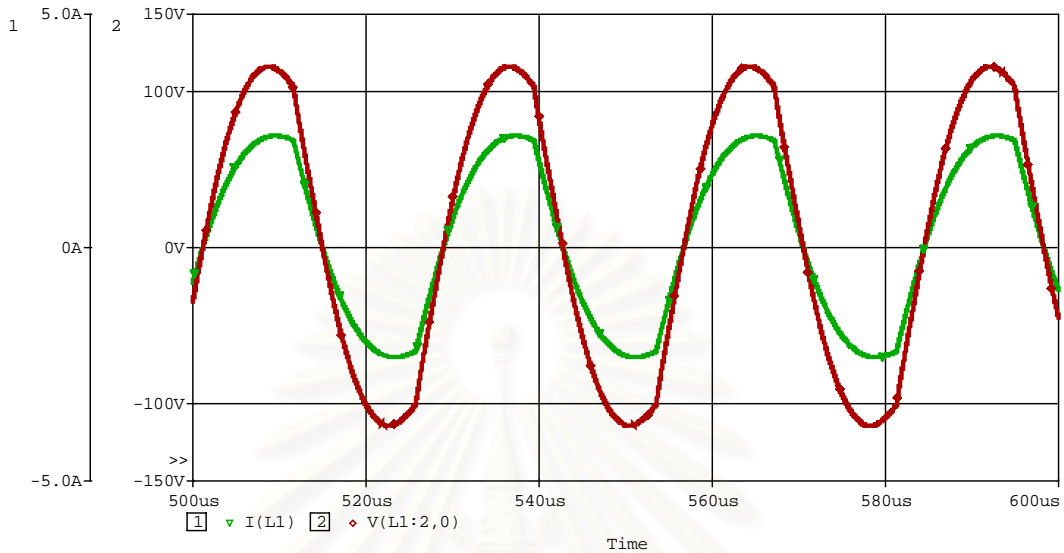


รูปที่ 3.13 การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์จากโปรแกรม Orcad

รูปที่ 3.12 – 3.13 เป็นผลการจำลองวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยโปรแกรม Orcad การทำงานของวงจรจุดหลอดจะทำงานร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้วงจรถับนำเป็นแบบวงจรประมวลสัญญาณ โดยแสดงแรงดันจุดหลอด กระแสจุดหลอด ดังรูปที่ 3.14 และ แรงดันคร่อมหลอด กระแสผ่านหลอด ในสภาวะอยู่ตัว ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 กระแส-แรงดันจุดหลอดของวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์จากโปรแกรม Orcad



รูปที่ 3.15 กระแส-แรงดันที่ไหลในตัวขดลวดของวงจรอินเวอร์เตอร์จากโปรแกรม Orcad ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าโดยมีความถี่การทำงานที่ 35 kHz

### 3.5 สรุปผลการพิจารณาเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

สำหรับเกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นพฤติกรรมการทำงานของวงจรนั้น เป็นเงื่อนไขที่นอกเหนือจากข้อกำหนดและขีดจำกัด หรือเป็นข้อกำหนดเพิ่มเติมในการออกแบบ โดยเกณฑ์ที่ใช้ประกอบการพิจารณาการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูง ประกอบด้วย

- ย่านความถี่ของการควบคุมความเข้มแสง (Frequency Range)
- เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง (Stability)
- ความไวในการควบคุมความเข้มแสง (Sensitivity)

ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์นั้น จะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งได้แก่ ข้อกำหนดในการออกแบบ ขีดจำกัดในการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ (เกณฑ์ในการออกแบบ) โดยส่วนของการออกแบบที่สำคัญคือ วงจรอินเวอร์เตอร์ มีลักษณะเป็น

แบบวงจรเรโซแนนซ์ไหลดอนุกรม โดยมีตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบของวงจร ดังนั้นการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่ใช้งานแต่ละคู่ นั้น จะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก ซึ่งถือว่าเป็นเกณฑ์ในการออกแบบดังที่กล่าวทั้ง 3 กรณี ดังนั้นในการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมนั้น จะมีผลทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างเหมาะสมตามเกณฑ์ในการออกแบบได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 3 ที่ผ่านมาเป็นการกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จากการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุในวงจรเรโซแนนซ์ไหลดอนุกรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ กับวงจรจุดหลอดอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม ในบทนี้จะเป็นการทดลองวัดคุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากออกแบบดังกล่าว โดยทำการบันทึกค่าของกระแสและแรงดันที่ส่วนต่างๆของวงจรในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลองตามการออกแบบ สำหรับการควบคุมความเข้มแสงจะมี 2 แบบ คือ การควบคุมความเข้มแสงโดยการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า และ การควบคุมความเข้มแสงโดยปรับค่าความถี่การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์ โดยนำผลการทดลองที่ได้นั้นไปวิเคราะห์ถึงปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ และวิเคราะห์ถึงปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงสูง ซึ่งทำให้สามารถเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้

#### 4.1 การทดลองบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จากเกณฑ์ในการออกแบบ

เมื่อได้มีการออกแบบและสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ตามเกณฑ์ในการออกแบบที่กำหนดไว้แล้ว จะทำการทดลองวัดและคำนวณลักษณะพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์ 2 กรณีที่สำคัญ คือ เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง และ ความไวในการควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้จากการบันทึกค่าของกระแสและแรงดันที่จุดทำงานต่างๆ นำมาวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการควบคุมความเข้มแสงได้อย่างถูกต้อง

##### 4.1.1 เสถียรภาพการควบคุมความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

การทดลองด้านเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์นั้น ทำได้โดยปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงให้อยู่ในช่วงความเข้มแสงต่ำ หรือเป็นช่วงที่เกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง และบันทึกค่ากระแสออกของบัลลาสต์ ( $I_B$ ) กับแรงดันด้านออกของบัลลาสต์ ( $V_B$ ) ทั้งในสถานะอยู่ตัว กับ

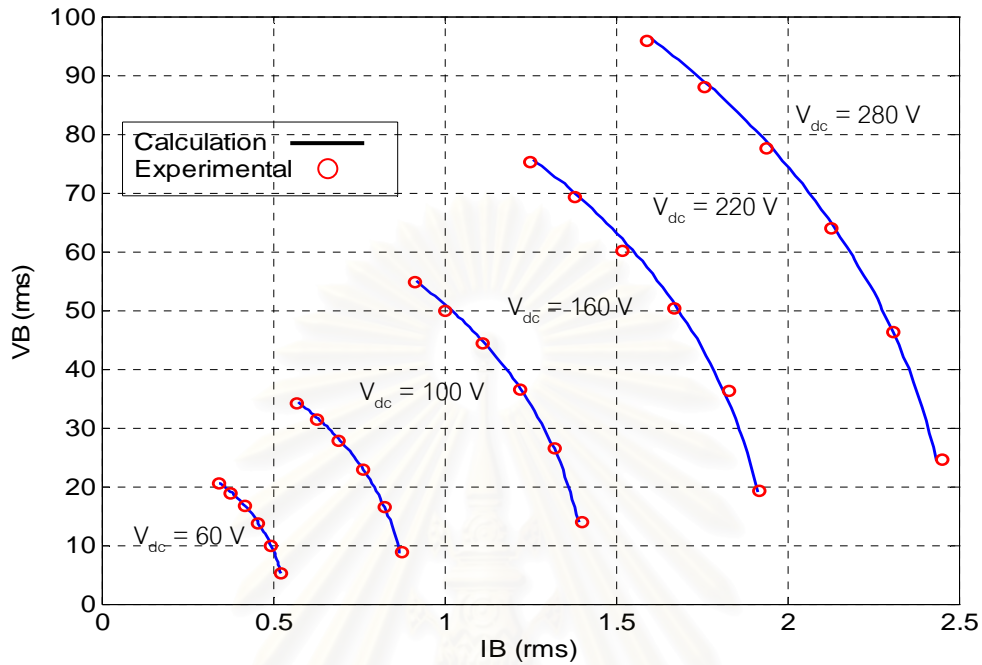
สภาวะเชิงพลวัต จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณอีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับความต้านทานพลวัตของหลอด ( $R_l$ ) หรือสามารถกล่าวได้ว่าการที่บัลลาสต์จะมีเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงได้นั้นผลรวมระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับความต้านทานพลวัตที่หลอด ( $R_l$ ) ต้องเป็นบวกเสมอ จึงทำให้มีเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง ซึ่งพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวได้จากการคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกของบัลลาสต์ ( $V_B$ ) และกระแสออกของบัลลาสต์ ( $I_B$ ) หรือ (Ballast Line) กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมหลอด ( $V_L$ ) และกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) หรือ (Lamp Line) โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

การควบคุมความเข้มแสงตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมี 2 แบบด้วยกัน คือ

- ควบคุมความเข้มแสงจากการควบคุมแรงดันไฟตรงด้านเข้าโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่ (Variable Voltage Constant Frequency)
- ควบคุมความเข้มแสงจากการควบคุมความถี่การทำงานโดยให้แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าคงที่ (Variable Frequency Constant Voltage)

ซึ่งการควบคุมความเข้มแสงทั้ง 2 แบบนี้ จะให้ผลลัพธ์ออกมามีลักษณะแตกต่างกัน จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในช่วงที่มีการปรับความเข้มแสงในแต่ละแบบได้

รูปที่ 4.1 เป็นผลการทดลองวัด Ballast Line จากการควบคุมความเข้มแสงโดยปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งจากเกณฑ์ในการออกแบบนั้นกำหนดให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 0.42 มิลลิเฮนรี , ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครฟารัด, ความถี่การทำงานมีค่าคงที่เท่ากับ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ซึ่งเป็นค่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าที่หลอดและปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า 4 ค่า คือ 280, 220, 160 และ 100 โวลต์ ตามลำดับ โดยการทดลองจะใช้ตัวต้านทานค่าคงที่เป็นโหลดแทนหลอดโซเดียมความดันสูง โดยมีค่าตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โอห์ม ตามลำดับ

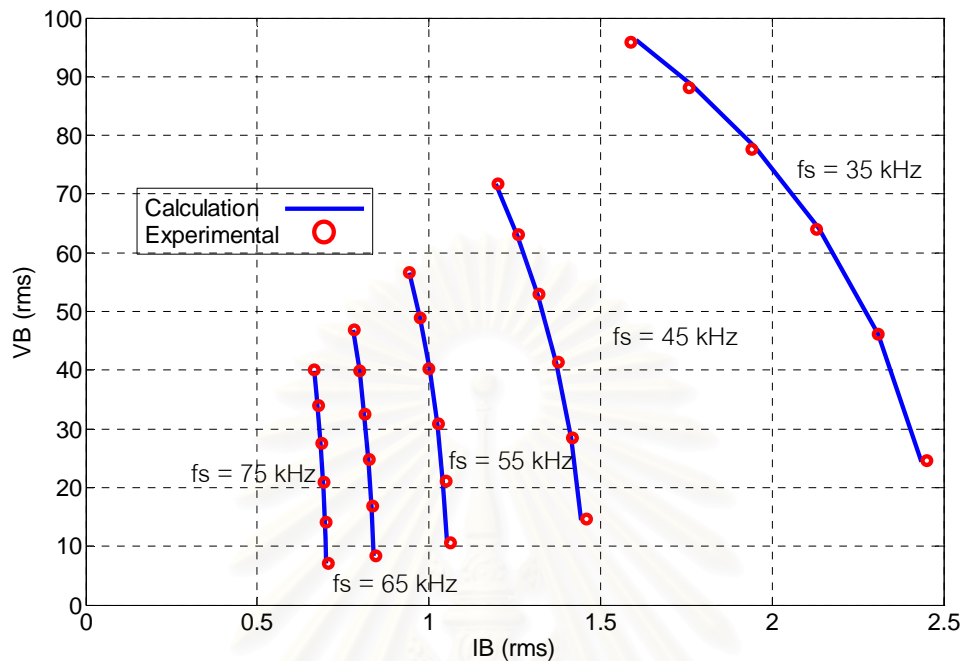


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านออก ( $I_B$ ) – แรงดันด้านออก ( $V_B$ ) ของบัลลาสต์ (Ballast line) จากการคำนวณและการทดลองโดยให้ความสำคัญการทำงานมีค่าคงที่ และปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าเพื่อควบคุมความเข้มแสง

ส่วนในรูปที่ 4.2 เป็นการทดลองเพื่อหา Ballast Line จากการควบคุมความเข้มแสงโดยปรับความถี่การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จากเกณฑ์ในการออกแบบนั้นให้แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าคงที่ 280 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ปลอดภัย และปรับความถี่การทำงาน 5 ค่าคือ 35, 45, 55, 65 และ 75 กิโลเฮิร์ตซ์ รวมถึงใช้ตัวต้านทานค่าคงที่เป็นโหลดแทนหลอดโซเดียมความดันสูง โดยมีค่าตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โอห์ม ตามลำดับ

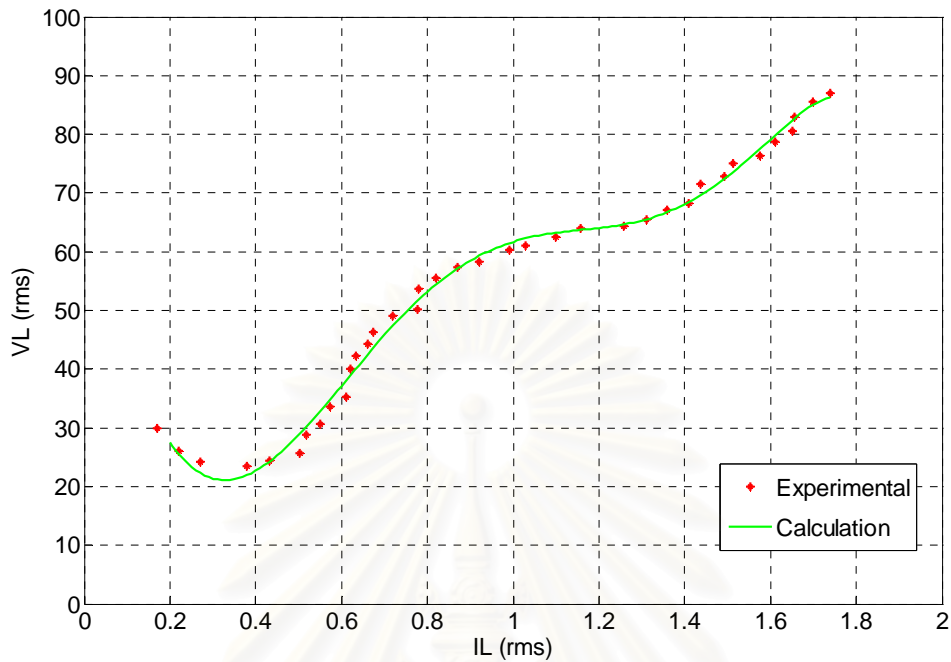
จากผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่ามีความสอดคล้องกันมาก แต่มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการคำนวณค่าต่างๆทางทฤษฎีได้มีการละเลยกำลังสูญเสีย รวมถึงการปรับความถี่การทำงานจากการทดลองนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ จึงทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกัน





รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านออก ( $I_B$ ) – แรงดันด้านออก ( $V_B$ ) ของบัลลาสต์ (Ballast line) จากการคำนวณและการทดลองโดยให้แรงดันด้านเข้ามีค่าคงที่ และปรับความถี่การทำงานเพื่อควบคุมความเข้มแสง

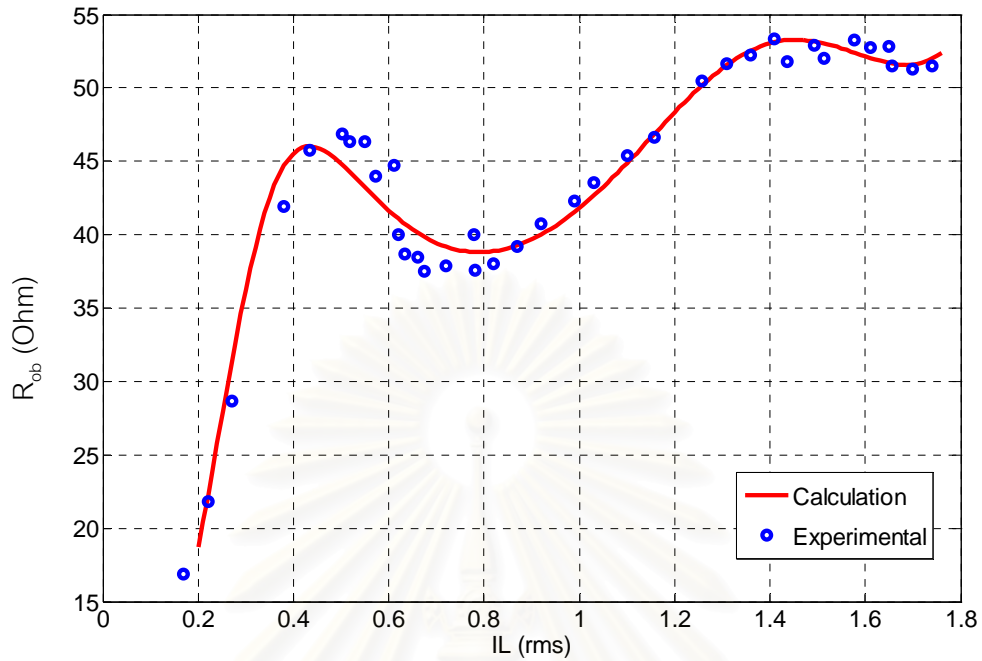
ส่วน Lamp Line เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ( $V_L$ ) กับกระแส ( $I_L$ ) ของหลอดโซเดียม ความดันสูงที่กำลังออกของหลอดค่าต่างๆ โดยได้จากการทดลองวัดจริง ซึ่งเป็นการปรับกำลังไฟฟ้าที่หลอดโซเดียมความดันสูงจากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลอง ทำการหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันหลอด ( $V_L$ ) กับกระแสหลอด ( $I_L$ ) โดยวิธี Curve Fitting แบบ Polynomial Equation ได้สมการ Lamp line ของหลอดตามสมการที่ 3.5 ในบทที่ 3 และได้ผลจากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 4.3



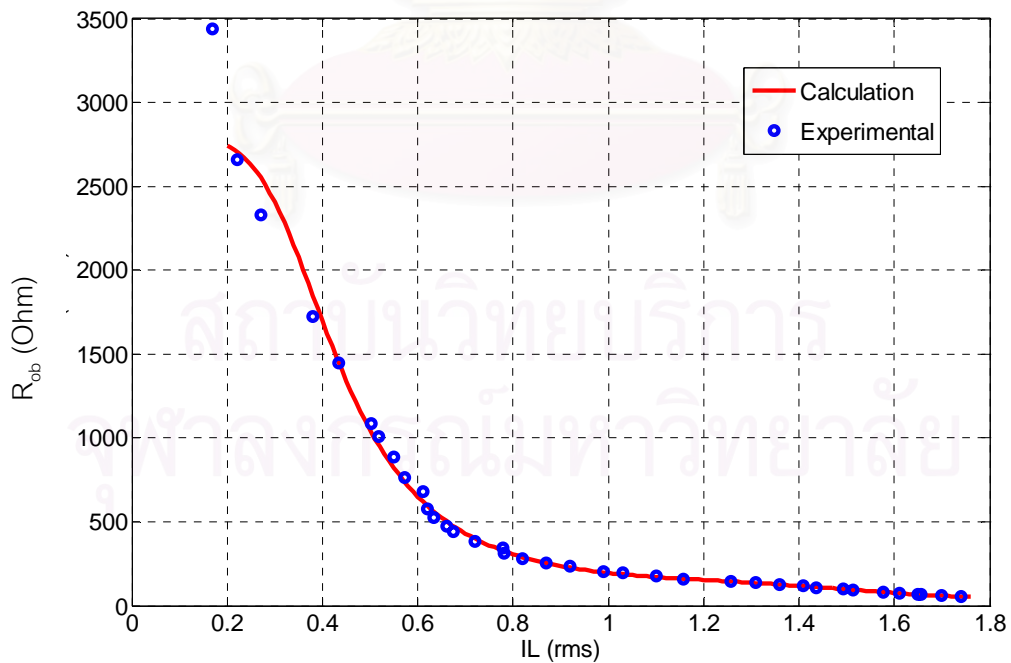
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) – แรงดันคร่อมหลอด ( $V_L$ ) ของหลอดโซเดียมความดันสูงจากการทดลองและการคำนวณ

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงในย่านความเข้มแสงต่างๆ พิจารณาได้จากการวัดค่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าอุปกรณ์ ค่าพิกัดแรงดัน และค่าความถี่การทำงานเหมือนกับที่ใช้ในการคำนวณค่าทางทฤษฎี ในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 เป็นผลการวัดค่ากระแสออกของบัลลาสต์ ( $I_b$ ) กับแรงดันด้านออกของบัลลาสต์ ( $V_b$ ) ในเชิงพลวัต (Amplitude Modulation; โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในลักษณะสัญญาณขนาดเล็กร่วมกับแรงดันไฟตรงด้านเข้า เพื่อบันทึกค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกของบัลลาสต์ ( $V_b$ ) กับกระแสออกของบัลลาสต์ ( $I_b$ ))

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณอีกครั้ง เพื่อหาค่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) ที่ความเข้มแสงสูง ที่ความเข้มแสงกลาง และที่ความเข้มแสงต่ำตามลำดับ และนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีของ  $R_{ob}$  จากสมการที่ 3.7 ในบทที่ 3 แสดงดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่และปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าเพื่อควบคุมความเข้มแสง

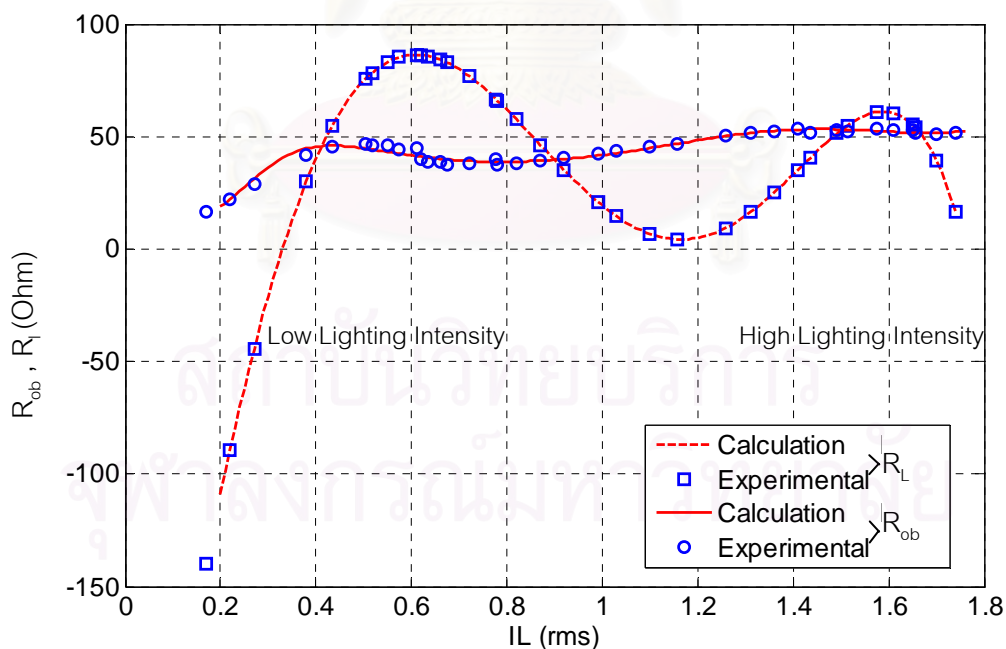


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยให้แรงดันไฟตรงด้านมีค่าคงที่ และปรับความถี่การทำงานเพื่อควบคุมความเข้มแสง

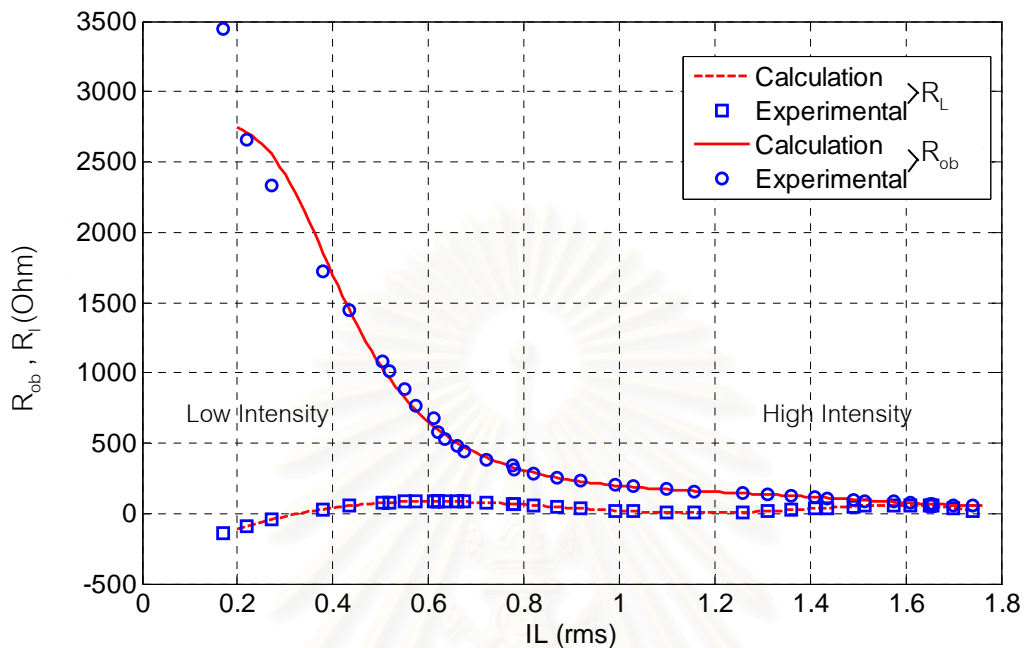
จากนั้นเป็นการเปรียบเทียบความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_l$ ) โดยแบ่งเป็นผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งมีการกำหนดการปรับความเข้มแสงไว้ 2 แบบตามผลการทดลองที่ผ่านมา คือ

- ปรับความเข้มแสงจากการควบคุมแรงดันไฟตรงด้านเข้าโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่ (Variable Voltage Constant Frequency)
- ปรับความเข้มแสงจากการควบคุมความถี่การทำงานโดยให้แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าคงที่ (Variable Frequency Constant Voltage)

ผลในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 สามารถทำการเปรียบเทียบความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับความต้านทานพลวัตของหลอด ( $R_l$ ) โดยแสดงในรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ซึ่งความแตกต่างของความต้านทานพลวัตทั้ง 2 แบบ สามารถบ่งชี้ถึงการมีเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในช่วงการทำงานต่างๆ ได้



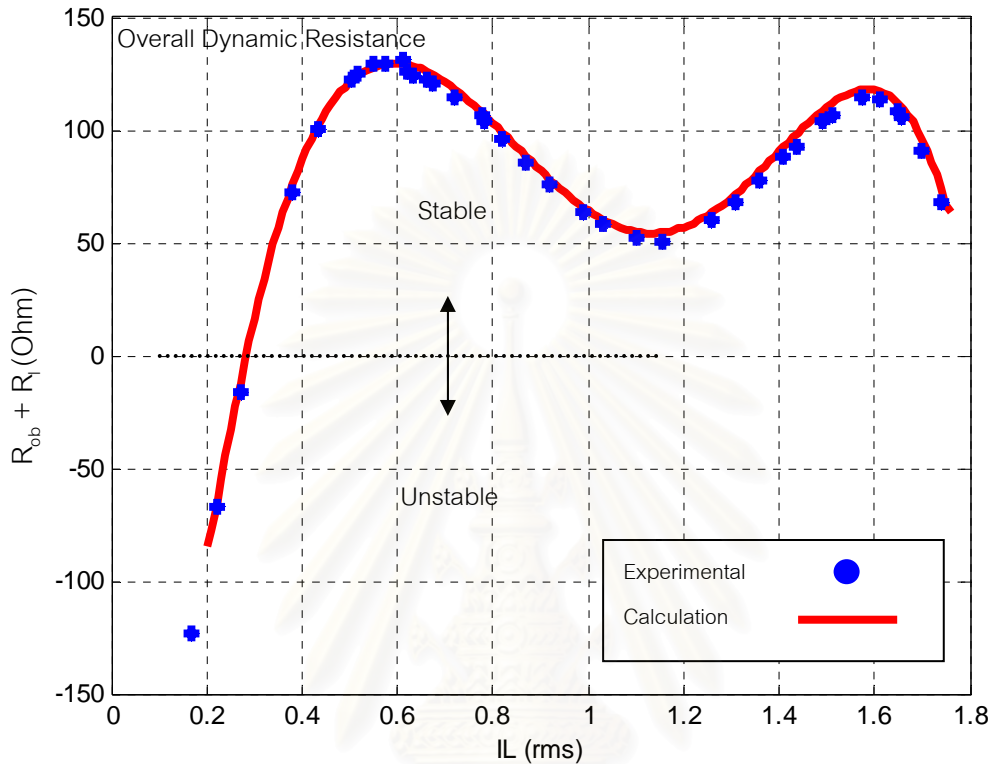
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) และความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_l$ ) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่และปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) และความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_l$ ) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลอง โดยให้แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าคงที่และปรับความถี่การทำงาน

จากการทดลองที่ผ่านมา สามารถวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้ว่า มีสาเหตุมาจากลักษณะของขนาดความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) กับขนาดความต้านทานพลวัตของหลอด ( $R_l$ ) มีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงโดยปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าและให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่ จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาช่วงที่ความต้านทานพลวัตของหลอดมีค่าเป็นลบ (Negative Resistance) ในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีความเข้มแสงต่ำหรือกระแสผ่านหลอดมีค่าลดลงนั้น ขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์จะมีขนาดลดลง แต่ในขณะที่ความต้านทานพลวัตของหลอดมีค่าเป็นและมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความต้านทานรวมของวงจรมีค่าเป็นลบ หรือความต้านทานพลวัตด้านแหล่งจ่ายมีขนาดน้อยกว่าความต้านทานพลวัตด้านโหลด ดังนั้นจึงทำให้บัลลาสต์เกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงในย่านความเข้มแสงต่ำ (หลอดดับ) ได้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 ความต้านทาน

รวมระหว่าง  $R_{ob}$  กับ  $R_l$  จากรูปที่ 4.8 ในช่วงความเข้มแสงต่ำนั้นจะมีค่าเป็นลบ (Overall Dynamic Resistance Negative) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเสถียรภาพ

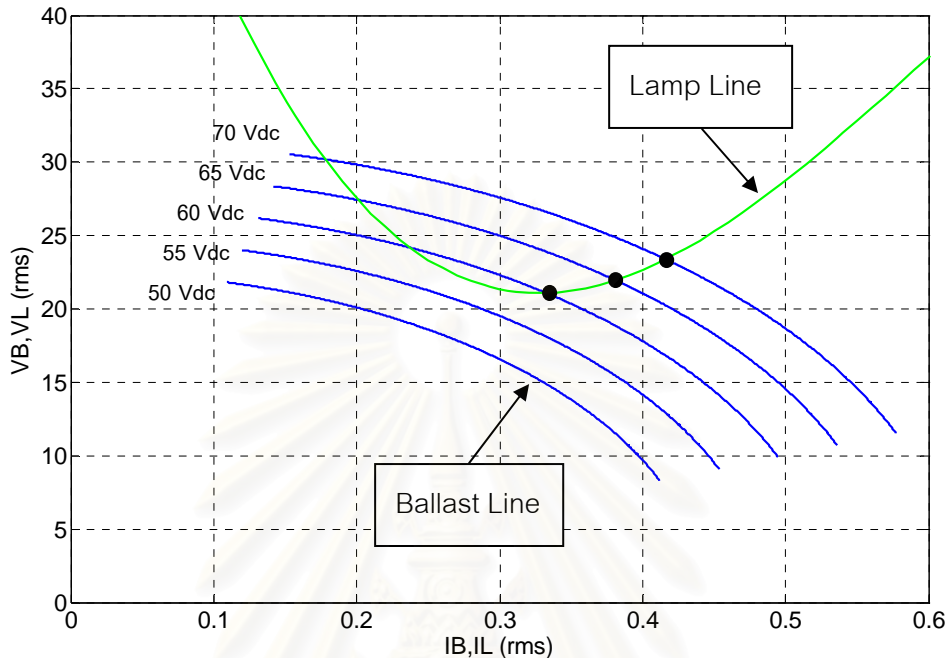


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ ) และความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง( $R_L$ )หรือ (Overall Dynamic Resistance) กับกระแสผ่านหลอด ( $I_L$ ) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จากการคำนวณและการทดลองโดยให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่และปรับแรงดันไฟตรง

#### 4.1.2 เสถียรภาพที่จุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่ผ่านระหว่าง Ballast Line กับ Lamp Line สามารถอธิบายถึงสาเหตุของการเกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำได้ ในการพิจารณาถึงเสถียรภาพจุดทำงานในย่านความเข้มแสงต่ำ จะใช้ผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมาประกอบการอธิบาย ดังแสดงในรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ดังนี้

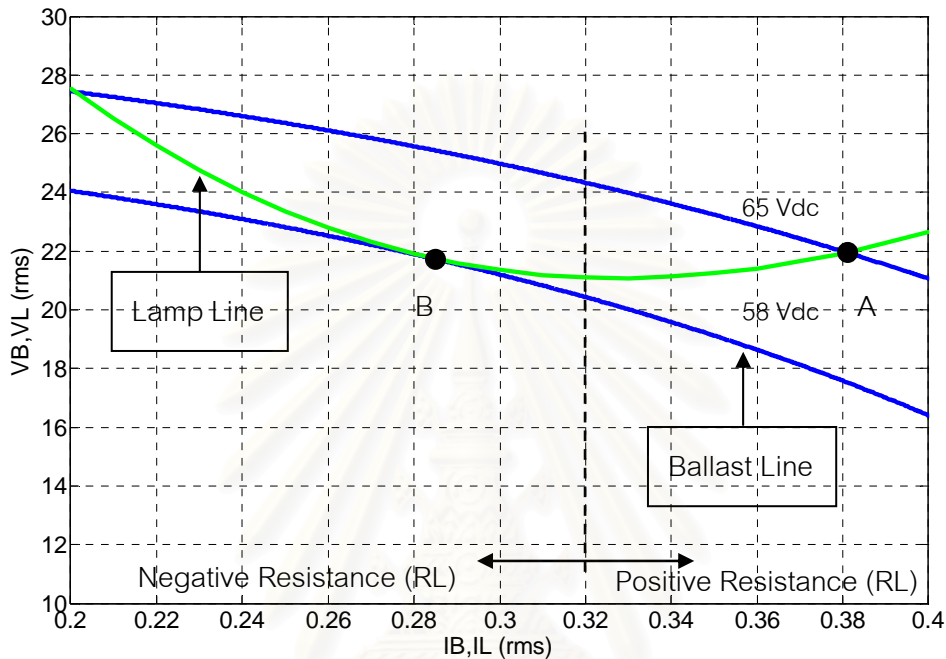
#### 4.1.2.1 การควบคุมความเข้มแสงจากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B$ ,  $I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L$ ,  $I_L$ ) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีควบคุมความเข้มแสงจากการปรับแรงดันในย่านความเข้มแสงต่ำ

การทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำนั้น จากรูปที่ 4.9 เป็นการควบคุมความเข้มแสงโดยวิธีปรับแรงดันด้านเข้า จะเห็นได้ว่า Ballast Line ( $V_B$ ,  $I_B$ ) มีความชันเกือบคงที่ ( $R_{ob}$  มีขนาดเกือบคงที่) เมื่อปรับแรงดันให้มีค่าต่ำลง แต่ความชันของ Lamp Line ( $V_L$ ,  $I_L$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น (ในช่วงความชันเป็นลบ; Negative Resistance) จากลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่า ขนาดของความต้านทานพลวัตของหลอดจะมีค่าสูงขึ้น (มีค่าเป็นลบมากขึ้น) จนกระทั่งมีขนาดสูงกว่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_l > R_{ob}$ ) หรือผลรวมระหว่างค่าความต้านทานพลวัตทั้ง 2 มีค่าเป็นลบ จะมีผลทำให้บัลลาสต์เกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงได้ (หลอดดับ) จากรูปที่ 4.9 สามารถแสดงช่วงของการเกิดปัญหาเสถียรภาพที่จุดทำงานได้ 2 กรณี โดยแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ดังนี้

- กรณีแรก บัลลาสต์มีจุดทำงานซึ่งจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ
  - มีเสถียรภาพ
  - ไม่มีเสถียรภาพ

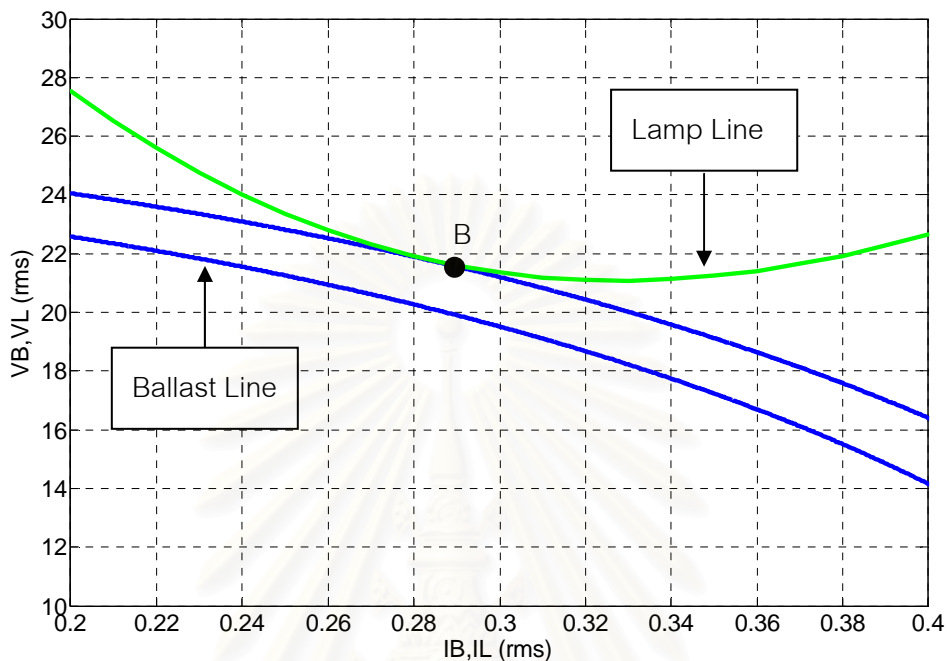


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) จากการปรับแรงดันด้านเข้า ในช่วงที่มีจุดทำงานปกติ (A) และ ช่วงที่มีจุดทำงานที่ขอบเขต (B)

จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถพิจารณาถึงเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงจากการปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้าได้ว่าคุณลักษณะของ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) มี 2 ลักษณะคือความต้านทานเป็นบวก และ ความต้านทานเป็นลบ ซึ่งในช่วงที่ความต้านทานพลวัตเป็นบวกนั้น กล่าวได้ว่าบัลลาสต์จะมีเสถียรภาพการทำงานเสมอ (จุด A เป็นจุดทำงานที่มีเสถียรภาพ) ถึงแม้ว่าความต้านทานพลวัตของหลอดโซเดียมความดันสูง ( $R_L$ ) จะมีขนาดมากกว่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) ก็ตาม เนื่อง จากผลของความต้านทานรวมในวงจรมีค่าเป็นบวกตลอดเวลา ดังนั้นปัญหาเสถียรภาพจะเกิดขึ้นในช่วงที่ความต้านทานของหลอดเป็นลบเท่านั้น ซึ่งที่จุด B เป็นจุดทำงานที่ขอบเขต โดยจุดทำงานนี้เป็นจุดที่อาจมีเสถียรภาพหรือไม่เสถียรภาพก็ได้ กล่าวได้ว่าเป็นจุดทำงานวิกฤต (Critical Point) จุดทำงานนี้มีค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าประมาณ 58 โวลต์ ดังนั้นหากแรงดันถูกปรับให้ต่ำไปกว่านี้จะมีผลทำให้หลอดดับทันที เนื่องจากไม่มีจุดทำงาน ดังจะกล่าวในกรณีต่อไป



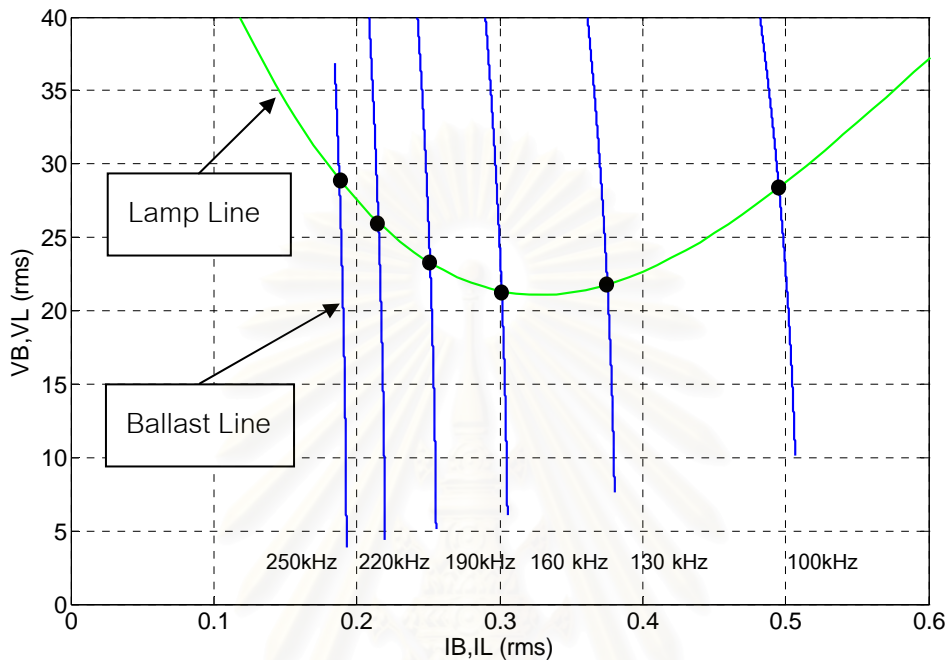
- กรณีที่ 2 บัลลาสต์ไม่มีจุดทำงาน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) จากการปรับแรงดันด้านเข้า ในช่วงที่มีจุดทำงานวิกฤต (B) และ ช่วงที่ไม่มีจุดทำงาน

หากไม่มีจุดตัดระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ซึ่งจะเป็นในกรณีที่ไม่มีจุดทำงาน พบว่าช่วงสภาวะนี้หลอดจะดับ แต่ไม่สามารถกล่าวได้ว่ามีสาเหตุมาจากการเกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงหรือไม่ เพราะในช่วงที่ไม่มีจุดทำงานนี้ ขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าขนาดของความต้านทานพลวัตที่หลอด ( $R_l$ ) ก็ได้ ( $R_{ob} > R_l$  หรือ  $R_{ob} < R_l$ ) ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จึงเป็นกรณีที่ไม่มีจุดทำงาน

#### 4.1.2.2 การควบคุมความเข้มแสงจากการปรับความถี่การทำงาน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) กับ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความควบคุมความเข้มแสงจากการปรับความถี่การทำงาน

การทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำนั้น จากรูปที่ 4.12 เป็นการควบคุมความเข้มแสงโดยวิธีปรับความถี่การทำงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของ Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) มีความชันของเส้นเพิ่มขึ้น เมื่อปรับความถี่การทำงานให้มีค่าสูงขึ้น (ความเข้มแสงมีค่าลดลง) โดยความชันของ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน (ในช่วงความชันเป็นลบ; Negative Resistance) แต่ความชันของ Lamp Line ( $V_L, I_L$ ) นั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าความชันของ Ballast Line ( $V_B, I_B$ ) ดังนั้นลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่า ขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ จะมีค่าสูงกว่าขนาดของความต้านทานพลวัตของหลอด ( $R_{ob} > R_l$ ) เสมอ (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) หรือมีค่าความต้านทานพลวัตรวมเป็นบวกมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเสถียรภาพการทำงานได้ตลอดเวลา ซึ่งจากการทดลองโดยวิธีปรับความถี่การทำงานนี้พบว่าสามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดเวลา แต่การทดลองที่ความถี่การทำงานสูงๆนั้น ไม่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน เนื่องจากจะเกิดปัญหาการรบกวนย่านความถี่วิทยุ (RFI) และเกิดกำลังสูญเสียที่สวิตช์ค่อนข้างมาก

#### 4.1.3 การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียม ความดันสูงในย่านความเข้มแสงต่ำ

เงื่อนไขที่ทำให้จุดทำงานมีเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงจากบทที่ 3 เป็นดังนี้ คือ

$$\sum(R_{ob}, R_l) = \text{Positive (Stable)}$$

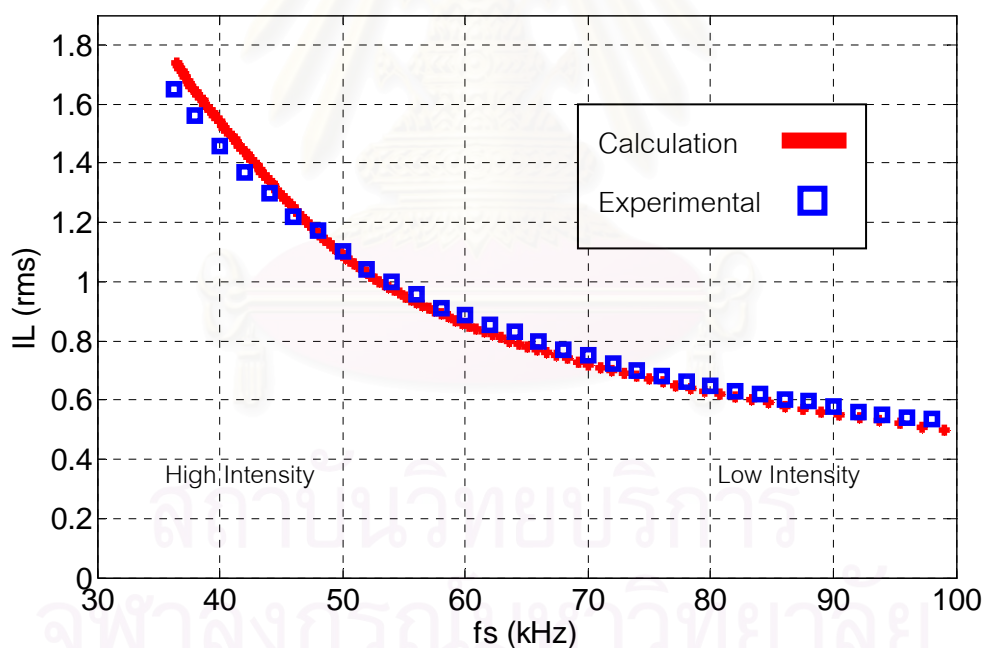
เมื่อผลรวมระหว่างความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์กับความต้านทานพลวัตของหลอดมีค่าเป็นบวกแล้ว จะทำให้การทำงานของบัลลาสต์มีเสถียรภาพโดยสามารถควบคุมความเข้มแสงได้ทุกย่านการทำงาน ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงโดยวิธีการปรับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถควบคุมความเข้มแสงได้ เนื่องจากสามารถทำให้การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเงื่อนไขตามสมการที่กล่าวมาข้างต้น โดยพิสูจน์ได้จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.7 หรือ รูปที่ 4.12 พบว่าในย่านความเข้มแสงต่ำนั้นขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์จะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นเสมอ ซึ่งเห็นได้จากลักษณะของ Ballast Line ( $V_{B,lg}$ ) มีความชันเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.2

ดังนั้นจึงมีข้อสรุปเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงได้ดังนี้ การควบคุมความเข้มแสงโดยปรับแรงดันไฟตรงด้านเข้านั้น จะทำให้เกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำได้ แต่เมื่อใช้วิธีปรับความถี่การทำงานพบว่าสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งขณะปรับความถี่การทำงานให้มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น (ความเข้มแสงมีค่าลดลง) จะมีผลทำให้ความชันของ Ballast Line มีค่าเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของความถี่การทำงาน จึงทำให้ขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ถึงแม้ว่าในย่านความเข้มแสงต่ำนี้ขนาดของความต้านทานพลวัตของหลอดจะมีค่าเป็นลบและมีขนาดเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ยังทำให้ผลรวมของความต้านทานพลวัตทั้งสองมีค่าเป็นบวกได้ จึงทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดมาข้างต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการควบคุมความเข้มแสงจากการปรับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีเสถียรภาพการทำงานได้ตลอดเวลา ทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สามารถควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้อย่างมีเสถียรภาพในทุกย่านการทำงาน

แต่ปัญหาที่ตามมาจากการควบคุมความเข้มแสงด้วยความถี่การทำงานนั้น จะมีปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงเกิดขึ้นได้ โดยจะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป

#### 4.2 ผลการทดลองวัดความไวในการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงในย่านความเข้มแสงสูง

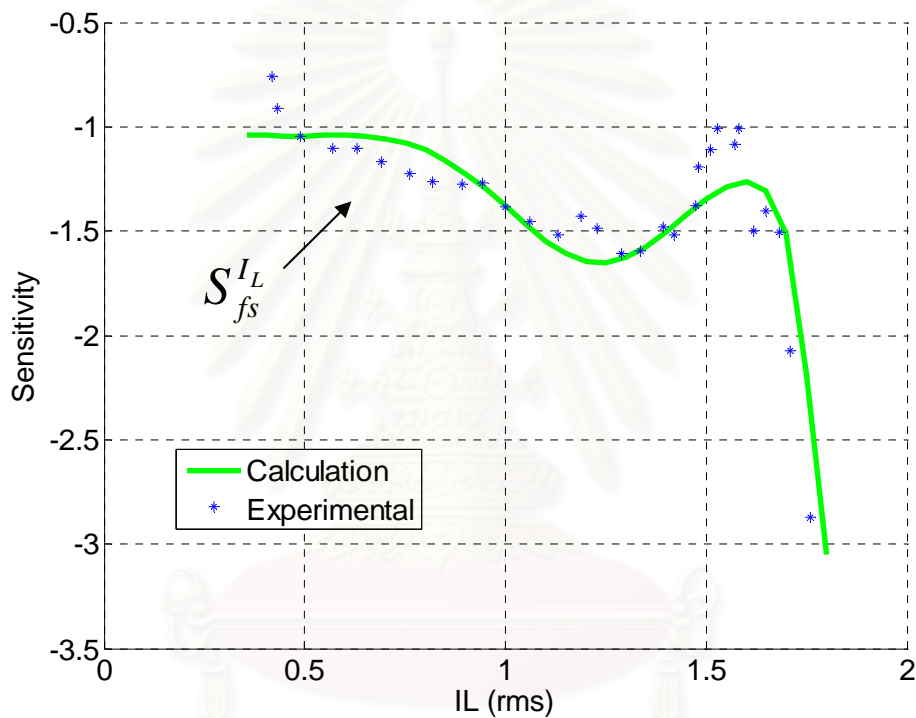
ปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงที่เกิดขึ้นในย่านความเข้มแสงสูงนั้น โดยการปรับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจากการคำนวณจากบทที่ 3 บ่งชี้ได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านหลอดกับความถี่การทำงานกับมีค่าแตกต่างกันในแต่ละย่านการทำงาน โดยจะมีค่าสูงในย่านความเข้มแสงสูง ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดกับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองและผลการคำนวณตามทฤษฎีข้างต้น พบว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากในย่านความเข้มแสงสูงดังกล่าวการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีค่าเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติที่ไม่หน่วง ( $f_0$ ) ซึ่งเป็นย่านที่ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีผลอย่างมากต่อผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลอง

การวิเคราะห์ความไวในการควบคุมความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทดสอบความถูกต้องของผลการคำนวณจึงได้ทดลองวัดค่า  $S_{f_s}^{I_L}$  ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากเกณฑ์ในการออกแบบ โดยค่าอุปกรณ์เหมือนกันกับที่ใช้ในการคำนวณทางทฤษฎี จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการวัดค่าความไวในการควบคุมความถี่สำหรับกระแสออกค่าต่างๆกัน เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบจึงได้นำผลการคำนวณจากบทที่ 3 กับผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน โดยให้แรงดันไฟตรงด้านเข้ามีค่าเป็น 280 โวลต์ และมีการปรับความถี่การทำงานตั้งแต่ 35 kHz – 120 kHz



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวของกระแสกับความถี่เทียบกับกระแสผ่านหลอดในย่านความเข้มแสงต่างๆ

จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี โดยเฉพาะในย่านความเข้มต่ำและความเข้มกลาง ส่วนในย่านความเข้มสูงจะมีความแตกต่างของผลการคำนวณกับผลการทดลองกันเล็กน้อย ซึ่งน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากย่านดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านหลอดกับความถี่การทำงานค่อนข้างมาก จึงทำให้เกิดการผิดพลาดจากการวัดค่าต่างๆได้ และในการคำนวณค่าต่างๆทางทฤษฎี ได้มีการละเลยกำลังสูญเสีย ของอุปกรณ์ ซึ่งการวัดกระแสที่ผิดพลาดเพียงเล็กน้อย สามารถส่งผลให้มีความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากผลการทดลองในย่านดังกล่าวได้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เกณฑ์การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงได้นั้น ประกอบด้วย ข้อกำหนดในการออกแบบ ชีตจำกัดในการออกแบบ และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาในส่วนของพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นเกณฑ์ในการออกแบบที่พิจารณาพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมความเข้มแสงได้ ซึ่งได้แก่

- ยานความถี่การทำงาน
- เสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสง
- ความไวในการควบคุมความเข้มแสง

โดยในการออกแบบจะพิจารณาถึงการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ ที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยคำนวณจากข้อกำหนดในการออกแบบ และ ชีตจำกัดในการออกแบบ จากนั้นพบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่มีหลายคู่ ซึ่งแต่ละคู่จะมีผลทำให้เกิดข้อดี - ข้อเสียที่แตกต่างกันของเกณฑ์ในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 กรณี ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสมต่อเกณฑ์ในการออกแบบตามที่กำหนดได้ โดยขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นสำคัญ

การทดลองบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบจากเกณฑ์ในการออกแบบนั้น ให้ผลการทดลองที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลทางด้านทฤษฎี อาทิเช่น ผลจากข้อกำหนด ผลจากชีตจำกัดและผลจากพฤติกรรมการทำงานต่างๆของบัลลาสต์ โดยนำผลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาถึงปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ(หลอดดับ) พบว่าการที่บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงได้นั้น มี 2 กรณีคือ กรณีที่จุดทำงานมีขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{ob}$ ) น้อยกว่าขนาดความต้านทาน

พลวัตของหลอด (R) ที่มีค่าเป็นลบ โดยเป็นจุดทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ และกรณีที่จุดทำงานไม่มี จึงเป็นผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมความเข้มแสงขึ้นได้ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว นั้นสามารถแก้ไขได้ โดยการควบคุมความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงที่ใช้งานกับบัล ลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธีปรับความถี่การทำงานซึ่งเป็นผลให้จุดทำงานมีขนาดของความ ต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลัสต์( $R_{ob}$ ) สูงกว่าขนาดของความต้านทานพลวัตที่หลอด(R) ที่มี ค่าเป็นลบ และรวมถึงทำให้ค่าของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลัสต์( $R_{ob}$ ) มีค่าเป็นบวก เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าความต้านทานพลวัตที่หลอด (R) จะมีค่าเป็นลบก็ตาม แต่ก็สามารถทำให้ ผลรวมของความต้านทานพลวัตทั้งสองมีค่าเป็นบวกได้เสมอ จึงทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขสำหรับ การมีเสถียรภาพของบัลลัสต์ได้ ส่วนปัญหาความไวในการควบคุมความเข้มแสงจะเกิดขึ้นใน ยานความเข้มแสงสูง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยขึ้นอยู่กับทางเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ กับค่าตัวเก็บประจุของวงจร ดังนั้นเกณฑ์ในการออกแบบบัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ศึกษามานี้ สามารถใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการเลือกพฤติกรรมการทำงานต่างๆของบัลลัสต์ อิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์ไหลของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นสำคัญ

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย

1. ควรพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานของบัลลัสต์อย่างอื่น อาทิเช่น ความเค้นของ สวิตช์ไวงานในขณะที่มีการปรับความเข้มแสง ราคาของบัลลัสต์ เป็นต้น ซึ่งเป็นเกณฑ์ในการ ออกแบบที่นอกเหนือจากงานวิจัยนี้

2. ควรพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานของหลอดโซเดียมความดันสูงประกอบการ พิจารณาถึงข้อกำหนดในการออกแบบ โดยพบว่าจากการใช้งานแต่ละครั้งของหลอดโซเดียม ความดันสูง ค่าแรงดันคร่อมหลอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งควรนำมาพิจารณา เป็นเงื่อนไขในการออกแบบ

3. การออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การคำนวณโดยพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบหลักมูล ของรูปคลื่นแรงดันออกของบัลลัสต์และกระแสผ่านหลอดเท่านั้น เพื่อที่จะให้ผลการคำนวณ ถูกต้องควรพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของแรงดันอินเวอร์เตอร์

## รายการอ้างอิง

- [1] โคทม อารียา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 และ 2. กรุงเทพมหานคร ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2544.
- [2] ไชยะ แซ่มซ้อย. พื้นฐานวิศวกรรมเครื่องกลเล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร เอ็มและอี, 2544.
- [3] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช. การออกแบบระบบแสงสว่าง. กรุงเทพมหานคร ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด, 2521
- [4] ชาญศักดิ์ อภัยนิพัฒน์. เทคนิคการออกแบบระบบแสงสว่าง. กรุงเทพมหานคร . สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
- [5] คณิต ชัยวัฒนา, ยุทธนา กุลวิฑิต, เสถียรภาพการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำ, EECON-23, pp.245-248, 2543.
- [6] วีระ ราศรีจันทร์, ยุทธนา กุลวิฑิต, เสถียรภาพการควบคุมความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง, EECON-27, pp.389-392, 2547.
- [7] Shmuel Ben-Yaakov, "Design and Performance of Electronic Ballast for HPS Lamps," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, no. 4, August 1997, pp. 546-560.
- [8] F.J. Ferrero, Cecilio Blanco, Manuel R. Secades, "A Pspice Model for HPS Lamp Operated at High Frequency," IEEE Transactions, pp.3423-3427, 2000
- [9] Wang Wei , Zhang Weigiang, Gao Guoan, Zu Dianguo, " A Study Of An Electronic Ballast for HPS Lamp," Harbin Institute of technology, Harbin, 150001, P.R. China pp. 1056-1060.
- [10] Allen Morinec, Jame Worley, " Applying HID High Pressure Sodium Lamps In A Variable – Voltage Invironment, "IEEE Transactions, pp.2059-2065, 1995
- [11] Christian Branas, Francisco J. Azcondo, Salvador Bracho, " Electronic Ballast for HPS Lamps with Dimming Control by variation of the Switching Frequency. Soft Start – up Method for HPS and Fluorescent Lamps, "IEEE Transactions, pp. 953 – 958, 1998
- [12] Xn Dianguo, Zhang Weiqiang, Bao Zhiyum, Liu Gang, "Novel control strategies for HPS Lamps driven by electronic ballast, "IEEE Transactions, pp. 1852-1855, 2002
- [13] Prof. Chi Hwan Lee, "Electronic Ballast (E-B) for HID Lamps",  
[www.digitalballast.com](http://www.digitalballast.com) , [www.pwm.pe.kr](http://www.pwm.pe.kr)





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

สมการความถี่การทำงาน (fs)

### Frequency Equation

จากสมการแรงดันออกของบัลลาสต์ จากสมการที่ 3.3 ในบทที่ 3

$$V_B = \frac{V_1 R_L}{\left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{ก.1})$$

$$(V_B)^2 = \frac{\left( V_1 \left( \frac{V_B}{I_B} \right) \right)^2}{\left( \left( \frac{V_B}{I_B} \right)^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right)} \quad (\text{ก.2})$$

$$(V_B)^2 + (I_B \omega_s L)^2 + \left( \frac{I_B}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} I_B^2 - V_1^2 = 0 \quad (\text{ก.3})$$

$$(I_B L)^2 \omega_s^4 + \left( V_B^2 - V_1^2 - \frac{2L}{C} I_B^2 \right) \omega_s^2 + \left( \frac{I_B}{C} \right)^2 = 0 \quad (\text{ก.4})$$

### Quadratic Equation

$$\omega_s^2 = \frac{\left( V_1^2 - V_B^2 + \frac{2L}{C} I_B^2 \right) \pm \sqrt{\left( V_B^2 - V_1^2 - \frac{2L}{C} I_B^2 \right)^2 - 4(I_B L)^2 \left( \frac{I_B}{C} \right)^2}}{2(I_B L)^2} \quad (\text{ก.5})$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left( V_1^2 - V_B^2 + \frac{2L}{C} I_B^2 \right) + \sqrt{\left( V_B^2 - V_1^2 - \frac{2L}{C} I_B^2 \right)^2 - 4(I_B L)^2 \left( \frac{I_B}{C} \right)^2}}{2(I_B L)^2}}; I_B = I_L \quad (\text{ก.6})$$

## ภาคผนวก ข

สมการความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ ( $R_{OB}$ )

Dynamic Resistance output ballast ( $R_{OB}$ )

$$R_{OB} = - \left( \frac{\frac{dV_B}{dR_L}}{\frac{dI_L}{dR_L}} \right) \quad (ข.1)$$

จากสมการแรงดันออกกับกระแสออกของบัลลาสต์ จากสมการที่ 3.3 – 3.4 ในบทที่ 3

$$V_B = \frac{V_1 R_L}{\left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (ข.2)$$

$$I_L = \frac{V_1}{\left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (ข.3)$$

$$a = \left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right) \quad (ข.4)$$

$$\frac{dV_B}{dR_L} = \frac{V_1}{(a)^{\frac{1}{2}}} \left( 1 - \frac{R_L^2}{a} \right) \quad (ข.5)$$

$$\frac{dI_L}{dR_L} = - \frac{V_1}{(a)^{\frac{3}{2}}} R_L \quad (ข.6)$$

$$R_{OB} = - \left( \frac{\frac{dV_B}{dR_L}}{\frac{dI_L}{dR_L}} \right) = \frac{a}{R_L} - R_L = \left( \frac{(\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C}}{R_L} \right) \quad (ข.7)$$

## ภาคผนวก ค

สมการความไวในการควบคุมความเข้มแสง

### Sensitivity Equation

$$S_{\omega_s}^{I_L} = \left( \frac{\frac{\partial I_L}{\partial \omega_s}}{\frac{I_L}{\omega_s}} \right) \dots \dots \dots \text{normalized} \quad (\text{ค.1})$$

จากสมการกระแสผ่านหลอด จากสมการที่ 3.4 ในบทที่ 3

$$I_L = \frac{V_1}{\left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{ค.2})$$

$$I_L^2 \left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right) - V_1^2 = 0 \quad (\text{ค.3})$$

Partial Derivative equation:

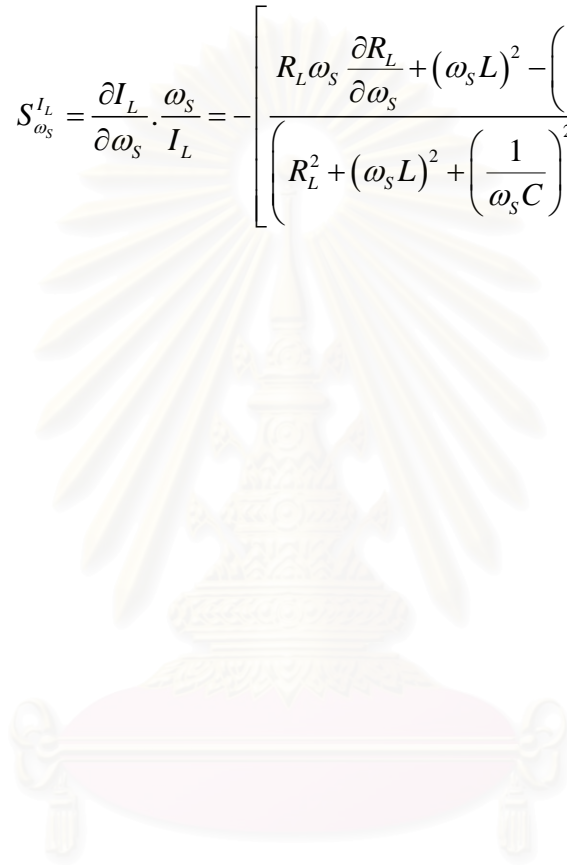
$$\frac{\partial}{\partial \omega_s} \left( I_L^2 \left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right) - V_1^2 \right) = 0 \quad (\text{ค.4})$$

$$2I_L \left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right) \frac{\partial I_L}{\partial \omega_s} + (2R_L I_L^2) \frac{\partial R_L}{\partial \omega_s} + \left( 2\omega_s L^2 - \frac{2}{\omega_s^3 C^2} \right) I_L^2 \frac{\partial \omega_s}{\partial \omega_s} = 0$$

$$-\frac{\partial I_L}{\partial \omega_s} = \frac{R_L I_L \frac{\partial R_L}{\partial \omega_s} + \left( \omega_s L^2 - \frac{1}{\omega_s^3 C^2} \right) I_L}{\left( R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left( \frac{1}{\omega_s C} \right)^2 - \frac{2L}{C} \right)} \quad (\text{ค.5})$$

$$S_{\omega_s}^{I_L} = -\frac{\partial I_L}{\partial \omega_s} \cdot \frac{\omega_s}{I_L} = \frac{R_L \omega_s \frac{\partial R_L}{\partial \omega_s} + (\omega_s L)^2 - \left(\frac{1}{\omega_s C}\right)^2}{\left(R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left(\frac{1}{\omega_s C}\right)^2 - \frac{2L}{C}\right)} \quad (\text{ค.6})$$

$$S_{\omega_s}^{I_L} = \frac{\partial I_L}{\partial \omega_s} \cdot \frac{\omega_s}{I_L} = -\left[ \frac{R_L \omega_s \frac{\partial R_L}{\partial \omega_s} + (\omega_s L)^2 - \left(\frac{1}{\omega_s C}\right)^2}{\left(R_L^2 + (\omega_s L)^2 + \left(\frac{1}{\omega_s C}\right)^2 - \frac{2L}{C}\right)} \right] \quad (\text{ค.8})$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

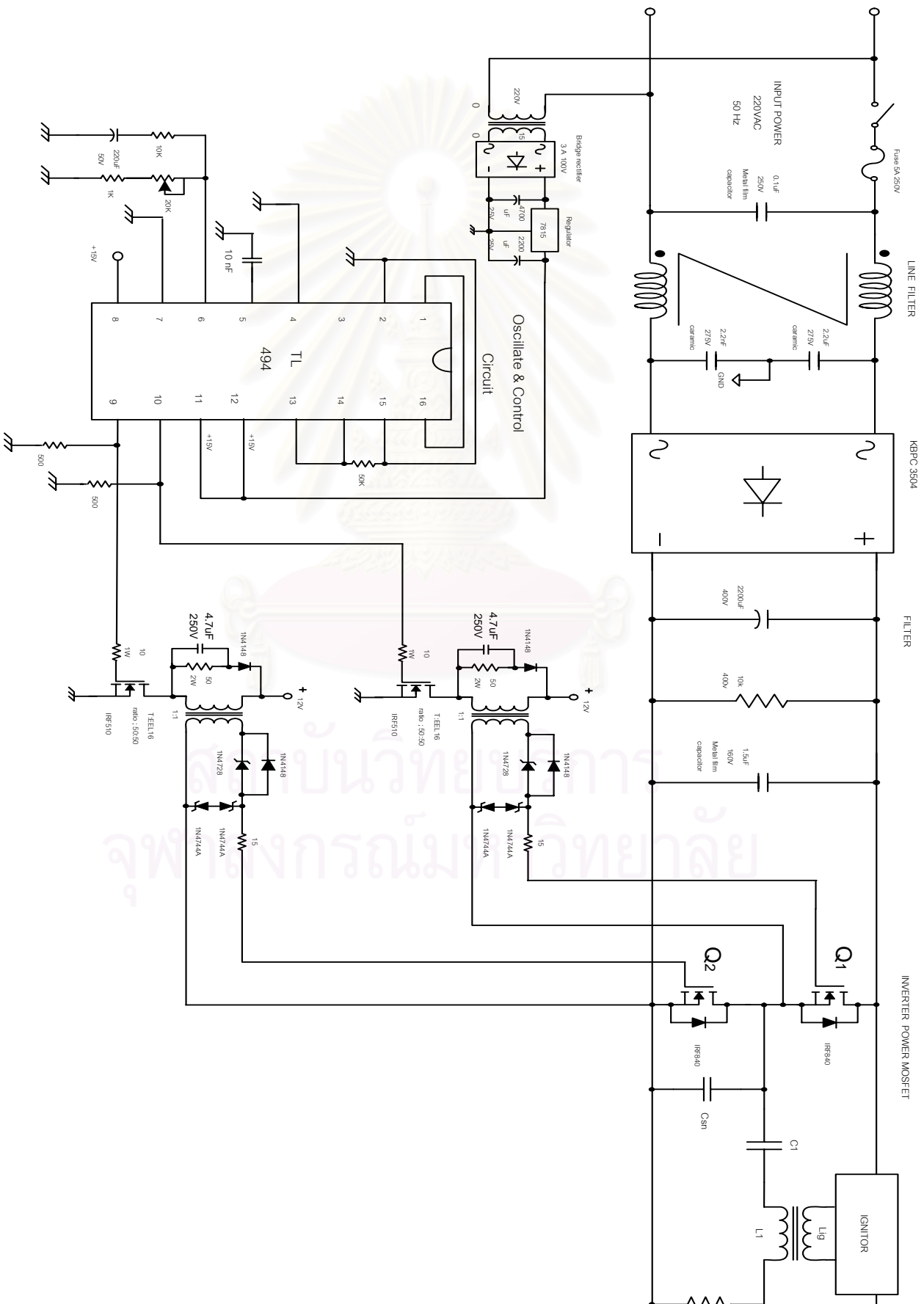
## ภาคผนวก ง

### โครงสร้างวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

รูปที่ ง.1 แสดงวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดปรับความเข้มแสงของหลอดโซเดียมความดันสูงได้ ในวงจรใช้วงจรประมวลผลสำหรับสร้างสัญญาณขับนำ เบอร์ TL 494 ซึ่งใช้วงจรแยกโดดที่มีลักษณะเป็นแบบ Fly Back Converter โดยวงจรอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นแบบวงจร Half - Bridge Inverter เนื่องจากพิกัดกำลังไฟฟ้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีพิกัดไม่สูงมากนัก และใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงด้านเข้าที่มีขนาด 280 V เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว Fast recovery diode เบอร์ MUR 820 (Ultra fast Rectifier 8A,200V) สวิตช์ไงานเป็นแบบ MOSFET เบอร์ IRF840 ( $V_{DSS} = 500 \text{ V}$  ,  $I_D = 8 \text{ A}$ ) และใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำกับค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากเกณฑ์ในการออกแบบ มาเป็นส่วนประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTRONIC DIMMING BALLAST HPS LAMP



รูปที่ ง.1 โครงสร้างวงจรมัลติสแต็กทรอนิกส์  
สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีระ ราศรีจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคต้นของปีการศึกษา 2545

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ธีระ ราศรีจันทร์ และ ยุทธนา กุลวิฑิต “ เสถียรภาพการควบคุมความเข้มแสงของ บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง “ การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, พฤศจิกายน 2547 หน้า 88 – 91.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย