

บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้



นาย คณิต ชัยวัฒนา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-149-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# AN ELECTRONIC DIMMING BALLAST FOR FLUORESCENT LAMPS



Mr. Kanit Chaiwattana

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2000  
ISBN 974-347-149-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้  
โดย : นาย คณิต ชัยวัฒนา  
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
( อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต )

.....กรรมการ  
( อาจารย์ สุวิทย์ นาคพิระยุทธ )

คณิต ชัยวัฒนา : บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ (AN ELECTRONIC DIMMING BALLAST FOR FLUORESCENT LAMPS) อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร. ยุทธนา กุลวิทิต, 148 หน้า ISBN 974-347-149-9

วิทยานิพนธ์นี้เสนอผลการศึกษาศีรษะยกรภาพการควบคุมแสงและวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่สามารถควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ การวิเคราะห์วงจรใช้สมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์และสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอดโดยใช้วงจรสมมูลสำหรับความถี่หลักมูลเพื่อคำนวณค่าความต้านทานพลวัตด้านออกและความไวในการควบคุมกระแสผ่านหลอดด้วยความถี่ของบัลลาสต์ที่ระดับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน การคำนวณค่าต่าง ๆ ของวงจรมีการคำนึงถึงผลของความต้านทานพลวัตที่เป็นลบของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการคำนวณด้วย ในส่วนของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ใช้วงจรเสมือนทอร์คได้มีการอธิบายการทำงานของวงจรที่แบ่งออกเป็น 4 ภาคการทำงาน และวิเคราะห์ผลของการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ต่อพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์โดยการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ การตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณทำโดยการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4070225521 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD :CONTROL STABILITY / LOW LIGHT INTENSITY / OUTPUT IMPEDANCE/  
QUASI-BOOST

KANIT CHAIWATTANA : AN ELECTRONIC DIMMING BALLAST FOR  
FLUORESCENT LAMPS.THESISADVISOR : YOUTHANA KULVITIT. Ph.D. 148  
pp. ISBN 974-347-149-9

Control stability in low light intensity range and power factor correction circuit of a single-stage high-power-factor electronic dimming ballast with frequency control was studied. Ballast V-I characteristic as well as lamp V-I characteristic were derived using fundamental frequency approximation analytical technique. Dynamic output impedance of the ballast and differential sensitivity of lamp current with respect to control frequency at the operating point were calculated. The effect of lamp's negative dynamic resistance was included in the calculations. Four operation modes of a quasi-boost power factor correction circuit were presented. The effects of dimming operation on the different performance characteristics were investigated using computer simulation. The theoretical calculations were verified experimentally.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....  
Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....  
Academic year.....2000.....Co- Advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และเอาใจใส่อย่างดีของอาจารย์ รศ. ดร. ยุทธนา กุลวิทิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา รวมทั้งอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ และกรุณาให้ยืมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อนและน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคน รวมทั้งสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ(สพช.) และสำนักงานกองทุนวิจัยแห่งชาติ(สกว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญเรื่อง

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญเรื่อง.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 ทฤษฎีการทำงานและหลักการพื้นฐาน.....	6
3 การวิเคราะห์หาสาเหตุ.....	35
4 ผลการทดลอง.....	98
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	120
รายการอ้างอิง.....	122
ภาคผนวก.....	126
ภาคผนวก ก.....	127
ภาคผนวก ข.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	148

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงขอบเขตอัตราส่วนของขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ผ่านมาตรฐาน IEC 1000-3-2.....	27
3.1 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 1.....	48
3.2 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 2.....	55
3.3 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 3.....	62
3.4 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 4.....	71
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม และค่าตัวประกอบยอดคลื่นกับ $C_y, C_x L$ และความถี่ จากการจำลองการทำงาน ด้วยคอมพิวเตอร์.....	96
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม และค่าตัวประกอบยอดคลื่นกับ $C_y, C_x L$ และความถี่จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และจากการทดลองจริง.....	117



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	7
2.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	9
2.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดันพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ต่างๆ.....	10
2.4 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของหลอดเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์กับกำลังที่หลอด.....	12
2.6 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์.....	13
2.7 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	14
2.8 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ .....	16
2.9 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	18
2.10 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตซ์ชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ( IC ).....	21
2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตซ์ชนิดที่อาศัยการป้อนกลับของกระแสไหลผ่านหม้อแปลงอิ่มตัว ( Saturable transformer ).....	22
2.12 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดัน โดยมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่จำกัดกระแส.....	23
2.13 ไดอะแกรมแสดงการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายแรงดัน.....	24
2.14 ไดอะแกรมของการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์.....	25
2.15 ไดอะแกรมของการปรับค่าความเหนี่ยวนำ ( L ) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้.....	26
2.16 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน.....	29
2.17 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน โดยใช้วงจรทบระดับ.....	30
2.18 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน.....	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	36
3.2 วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	37
3.3 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ สำหรับความถี่ต่างๆ.....	37
3.4 ขนาดความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ $R_{OB}$ .....	39
3.5 ขนาดความต้านทานพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์ $R_L$ .....	39
3.6 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ $R_{OB}$ และของความต้านทานพลวัตของหลอด $R_L$ ในย่านความถี่แสงกลางและสูง.....	40
3.7 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ $R_{OB}$ และของความต้านทานพลวัตของหลอด $R_L$ ในย่านความถี่ต่ำ.....	40
3.8 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงาน ของอินเวอร์เตอร์.....	42
3.9 ความสัมพันธ์ความไวของกระแสกับความถี่เทียบกับกระแส.....	43
3.10 วงจรทบระดับ.....	45
3.11 วงจรเสริมอนทบระดับ.....	46
3.12 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มี วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage .....	47
3.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคที่ 1.....	49
3.14 รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 1.....	53
3.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคที่ 2.....	56
3.16 รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 2.....	60
3.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคที่ 3.....	63
3.18 รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 3.....	68
3.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคที่ 4.....	72

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 4.....	77
3.21 รูปคลื่นการทำงานของวงจรสมมูล.....	80
3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sin \theta$ กับ $t_{fn}$ .....	83
3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำกับอัตราขยาย.....	83
3.24 ความสัมพันธ์ของความถี่กับแรงดันไฟฟ้า $V_B$ .....	84
3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ Cy เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	86
3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ Cx เมื่อ $C_y=47\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	86
3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ L เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $C_y=10\text{nF}$ $f=40\text{kHz}$ .....	87
3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับความถี่ เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $C_y=10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ กำลังออกลดลงจาก 37 W ถึง 6 W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz.....	88
3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ Cy เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	89
3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ Cy เมื่อ $C_y=10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	89
3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ L เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $C_y=10\text{nF}$ $f=40\text{kHz}$ .....	90
3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับความถี่ เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $C_y=10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ กำลังออกลดลงจาก 37 W ถึง 6 W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz.....	91

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดกับ $C_y$ เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	92
3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดกับ $C_x$ เมื่อ $C_y=10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	93
3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดกับ $L$ เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $C_y= 10 \text{ nF}$ $f=40\text{kHz}$ .....	94
3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดกับความถี่ เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $C_y= 10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ กำลังออกลดลงจาก 37 W ถึง 6 W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz.....	95
4.1 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์(ballast line) จากการคำนวณและทดลอง.....	99
4.2 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ จากการทดลองและการคำนวณ.....	100
4.3 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ $R_{OB}$ และของความต้านทานพลวัตของ หลอด $R_L$ ในย่านความเข้มแสงกลางและสูง.....	101
4.4 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ $R_{OB}$ และของความต้านทานพลวัตของ หลอด $R_L$ ในย่านความเข้มแสงต่ำ.....	102
4.5 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของ อินเตอร์เวอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้า ของอินเวอร์เตอร์ 230 V .....	104
4.6 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของ อินเตอร์เวอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้า ของอินเวอร์เตอร์ 280 V .....	104

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 350 V .....	105
4.8 ความสัมพันธ์ความไวของกระแสกับความถี่เทียบกับกระแสจากการคำนวณและจากการทดลอง.....	106
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ Cy จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cx=47nF L=5.85 mH f=40kHz.....	108
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ Cx จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cy=10nF L=5.85mH f=40kHz.....	109
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ L จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cx=47nF Cy=10nF f=40kHz.....	109
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับความถี่จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cx=47nF Cy=10nF L=5.85mH กำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz .....	110
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ Cy จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cx=47nF L=5.85mH f=40kHz.....	111
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ Cx จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cy=10nF L=5.85mH f=40kHz.....	112
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ L จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cx=47nF Cy=10nF f=40kHz.....	112
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับความถี่จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ Cx=47nF Cy=10nF L=5.85mH กำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz .....	113

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นกับ $C_y$ จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ $C_x=47\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	114
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นกับ $C_x$ จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ $C_y=10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ $f=40\text{kHz}$ .....	115
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นกับ $L$ จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ $C_x = 47\text{nF}$ $C_y=10\text{nF}$ $f=40\text{kHz}$ .....	115
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นกับความถี่ จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ $C_x = 47\text{nF}$ $C_y=10\text{nF}$ $L=5.85\text{mH}$ กำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz .....	116

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเบื้องต้น

การพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทำให้ความเป็นอยู่ของมนุษย์ในปัจจุบันมีความสะดวกสบายขึ้นเป็นอันมาก อุปกรณ์ให้แสงสว่างเป็นผลพวงของการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อุปกรณ์ให้แสงสว่างมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากหลอดเผาไส้ (Incandescent lamp) มาเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) สูงถึง 90 ลูเมนต่อวัตต์ (lm/W) ทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 4-5 เท่าในขณะที่ให้ปริมาณแสงสว่าง (lumen) เท่ากัน และมีอายุการใช้งานนานถึง 20,000 ชั่วโมง จึงพบว่าในปัจจุบันได้มีการนำหลอดฟลูออเรสเซนต์มาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อให้แสงสว่างภายในอาคารต่างๆ เช่น ที่พักอาศัย สำนักงาน เป็นต้น การใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นจำเป็นต้องใช้บัลลาสต์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้มีค่าที่เหมาะสมและทำงานร่วมกับสตาร์ทเตอร์เพื่อทำให้เกิดไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการหลอดฟลูออเรสเซนต์ในตอนเริ่มแรก บางครั้งในอาคารสำนักงานปริมาณแสงอาจจะมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น เนื่องจากอาจมีแสงจากธรรมชาติเข้ามาในอาคารเพิ่มเติมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์และในบางครั้งอาจมีความต้องการแสงสว่างไม่มากนัก ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะควบคุมแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้มีความเข้มตามความจำเป็นของการใช้งานเพื่อประหยัดพลังงาน การลดแสงสว่างจากหลอดฟลูออเรสเซนต์อาจจะทำได้โดยการปิดไฟแสงสว่างบางส่วน การลดแสงสว่างโดยวิธีนี้จะทำได้ง่าย แต่ไม่สามารถควบคุมให้ได้ตามต้องการและการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอ การควบคุมอีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมแสงที่ออกจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งกรณีของบัลลาสต์แกนเหล็ก การควบคุมแสงจะต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งในทางปฏิบัติจะยุ่งยากและย่านการควบคุมแสงจะแคบ แต่ถ้าใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงได้และมีการออกแบบที่เหมาะสมจะแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ปัจจุบันการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีทำกันอย่างแพร่หลายและสามารถทำได้หลายวิธี แต่ส่วนมากนิยมใช้การควบคุมแสงโดยวิธีปรับความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากสามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ มีย่านการควบคุมแสงควบคุมกว้าง การควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์มักจะมีปัญหาเรื่องเสถียรภาพการควบคุมในย่านความเข้มแสงต่ำกล่าวคือ หากขึ้นการเปลี่ยนความถี่มีค่ามากไปในย่านความเข้มแสงต่ำ จะมีผลทำ

ให้หลอดดับได้ ซึ่งเป็นปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้และมีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ร่วมด้วย ซึ่งลักษณะของวงจรจะมี 2 ลักษณะคือ แบบ two stage และ single stage แบบ two stage เป็นการต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) กับวงจรควบคุมความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแยกกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้ผลกระทบกระทั้งระหว่างสองวงจรมีจะน้อยกว่ากรณีที่เป็นแบบ single stage ซึ่งใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังร่วมกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ การศึกษาลักษณะวงจร two stage นั้นจะทำการศึกษาวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) กับวงจรควบคุมความเข้มแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แยกกัน ส่วนวงจรแบบ single stage จะมีข้อดีในการลดจำนวนสวิตช์ไวงานและวงจรขับนำสวิตช์ได้ โดยสามารถใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงได้ อย่างไรก็ตามการที่วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงได้ที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) แบบ single stage อาจจะมีผลกระทบกระทั้งต่อกันของวงจรทั้งสองเมื่อทำการปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์กรณีทำการควบคุมปริมาณแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เช่น ผลต่อแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ตัวประกอบยอดคลื่น เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบวงจรจึงจะต้องออกแบบอย่างเหมาะสม ซึ่งวงจร single stage ที่เลือกการศึกษานั้นมี ตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูง ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำ และใช้อุปกรณ์น้อยชิ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลการทำงานและพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงได้และมีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) แบบ single stage โดยจำแนกการศึกษาได้เป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

1. ศึกษาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำ
2. หาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

หลังจากนั้นได้กำหนดแนวทางในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมในย่านความเข้มแสงต่ำ และแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กรณีการควบคุมแสงของบัลลาสต์



อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) แบบ single stage ที่มีลักษณะวงจรแบบ Charge pump (Qian, Lee and Yamauchi, 1999) ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมปริมาณแสงของ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีปรับความถี่การสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสาเหตุของปัญหาและหาแนวทางแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะที่ทำการปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์
2. หาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาสาเหตุของปัญหาและหาแนวทางแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะที่ทำการปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์
2. หาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

## 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาและวิเคราะห์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมปริมาณแสงได้ และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง
2. ศึกษาสาเหตุของปัญหาเสถียรภาพของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะที่ทำการปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์
3. จำลองการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ Single stage
4. หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะที่ทำการปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์

5. หาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ Single stage
6. ทำการออกแบบและสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ Single stage
7. ทดลองและทดสอบการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ Single stage
8. วิเคราะห์ผลจากการทดลองและทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี
9. หาแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาจากผลการทดลองให้ดีขึ้น
10. ประเมินผลและเขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงสาเหตุและแนวทางแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะทำการปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์
2. ทราบแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง
3. ผลการศึกษา วิจัย และพัฒนา สามารถที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้

#### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1. บทนำ
2. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แนวทางในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC)
3. การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงและการศึกษาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ ศึกษาแนวทางในการออกแบบวงจรเพิ่มค่าประกอบกำลังแบบ single stage
4. ผลการทดลองของการทำงานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

5. สรุป วิจัย และข้อเสนอแนะ
6. ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

#### บทนำ

ปัจจุบันการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีทำกันอย่างแพร่หลาย และสามารถทำได้หลายวิธี แต่การควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์มักมีปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมในย่านความเข้มแสงต่ำ การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องเข้าใจการทำงานเบื้องต้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ และได้มีการพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้และมีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ต่อร่วมด้วย ซึ่งวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังมีหลายแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แนวทางการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบต่างๆ

#### 2.1 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (*Fluorescent lamp*)

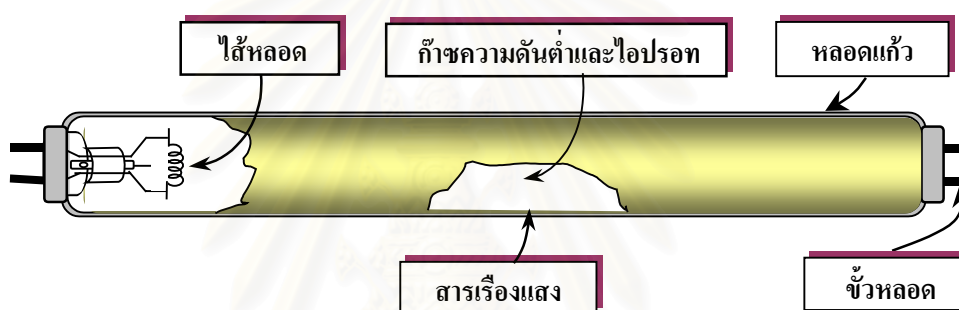
หลอดฟลูออเรสเซนต์คือหลอดคิซาร์ตไอปรอทความดันต่ำ (low pressure mercury gas discharge lamp) (J.R. Coaton and A.M.Marden, 1990) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแสงสว่าง โดยใช้คุณสมบัติการนำกระแสของก๊าซความดันต่ำ ไอปรอท และสารเรืองแสง ซึ่งจะแตกต่างจากหลอดแบบเผาไส้ (Incandescent lamp) ที่ใช้กระแสเผาไส้หลอดให้ร้อนเพื่อให้เกิดแสงสว่าง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

##### 2.1.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์มีองค์ประกอบหลายอย่างรวมกันเพื่อกำเนิดแสงสว่างที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ประกอบด้วยหลอดแก้วทรงกระบอกยาวภายในเคลือบด้วยสารเรืองแสง ขั้วหลอด ไส้หลอด ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์แต่ละส่วนมีลักษณะและการทำงานได้ดังนี้

### 2.1.1.1 หลอดแก้วทรงกระบอกยาว (Fluorescent tube)

ตัวหลอดแก้วทรงกระบอกยาวเป็นที่ยึดของอุปกรณ์และท่อหุ้มส่วนประกอบ การกำเนิดแสงไว้ภายใน ตัวหลอดทรงกระบอกยาวมีลักษณะเป็นหลอดแก้วที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน มีรหัสบอกลักษณะรูปร่างตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่นตัว T หมายถึงหลอดฟลูออเรสเซนต์พื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม และตามด้วยตัวเลขซึ่งแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดที่มีหน่วยเป็นนิ้ว (1/8 ของนิ้ว) เช่น หลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วหรือ 8 หุน สามารถเขียนรหัสของหลอดคือ T8 เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

### 2.1.1.2 ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Lamp terminal)

ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นส่วนรับพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเข้าภายในหลอด เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถกำเนิดแสงสว่างได้ ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของหลอด เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอุ่นไส้ (preheat) ต้องการขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในแต่ละข้างของหลอด

### 2.1.1.3 ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Filament lamp)

ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นขดลวดทังสเตนที่นำมาขดซ้อน ๆ กันและฉาบด้วยสารชนิดที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงนัก เนื่องจากโลหะทังสเตนจะปล่อยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิก่อนข้างสูงประมาณ 700 องศาเซลเซียส (Hammer E.E., 1999)

#### 2.1.1.4 ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท (Mercury vapour and gas discharge)

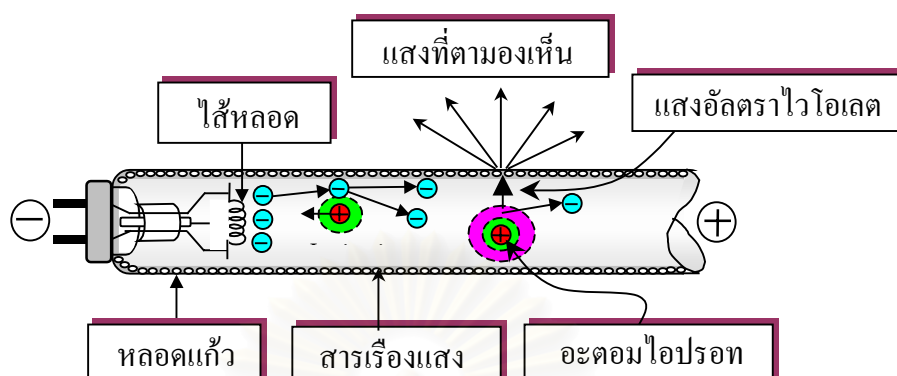
ก๊าซความดันต่ำและไอปรอททำหน้าที่กำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งเป็นแสงที่ตามองไม่เห็น เมื่อก๊าซความดันต่ำและไอปรอทถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า ก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์จะยังไม่นำกระแสเนื่องจากปกติแล้วก๊าซความดันต่ำและไอปรอทจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงพอจะเกิดการกระตุ้นให้มีการปล่อยประจุและสามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อก๊าซความดันต่ำและไอปรอทนำกระแสจะมีการปล่อยแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ออกมา แสงสว่างนี้ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แต่จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแสงในช่วงความถี่ที่ตามองเห็นได้ด้วยสารเรืองแสงซึ่งฉาบอยู่ภายในหลอด

#### 2.1.1.5 สารเรืองแสง (Phosphor)

สารเรืองแสงซึ่งฉาบด้านในของตัวหลอดแก้วเป็นสารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ตให้เป็นแสงที่ตามองเห็น ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของสารที่ฉาบภายในของหลอด การใช้ส่วนผสมที่แตกต่างกันไปทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีสีส้มต่าง ๆ กันได้ เมื่อยังไม่นำกระแสหลอดไฟจะยังคงมีสีขาวอยู่

#### 2.1.2 หลักการทำงานเบื้องต้น (Principle operation)

ก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ก๊าซความดันต่ำและไอปรอทภายในหลอดแก้วยังไม่นำกระแสจนกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงที่เพียงพอมากระตุ้นทำให้มีการปล่อยประจุออกมาจึงจะทำให้เริ่มนำกระแสได้และเกิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แสงอัลตราไวโอเล็ตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่ถูกฉาบไว้ภายในผิวหลอดแก้วให้กำเนิดแสงสว่างที่สามารถมองเห็นออกมา แสดงปรากฏการณ์การกำเนิดแสงสว่างดังกล่าวแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

### 2.1.3 การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ

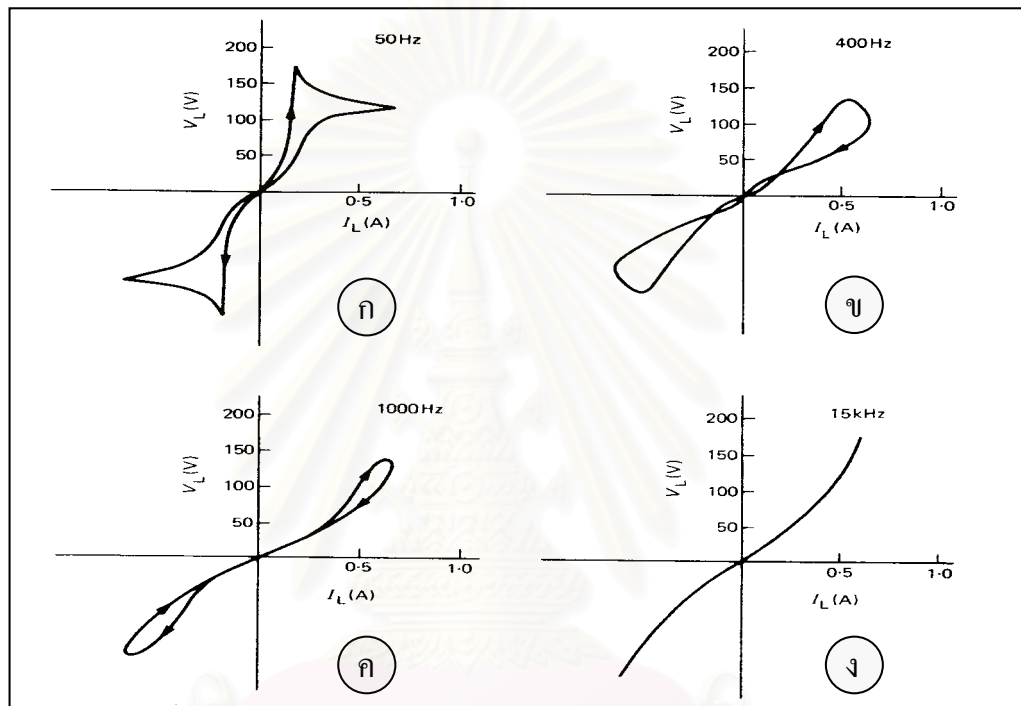
1. ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง
2. ช่วงทำงานปรกติ

ในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง ค่าความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ( $R_{lamp}$ ) จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นในการจุดหลอดให้ติดสว่างจะต้องใช้แรงดันที่มีขนาดสูง ( Striking voltage ;  $V_{ig}$  ) เพื่อจุดหลอดให้ติดสว่างซึ่งค่าแรงดันที่ใช้ในการจุดหลอดจะขึ้นอยู่กับ เส้นผ่านศูนย์กลาง, ความยาวของหลอด, อุณหภูมิและชนิดของขั้วอิเล็กโทรด เมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างแล้วจึงมีกระแสไหลผ่านหลอด ทำให้ความต้านทานของหลอดลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด

### 2.1.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดแก๊สดีสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสและความถี่ที่ผ่านหลอด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ( ก-ค ) โดยที่อิมพีแดนซ์ประสิทธิผล ( effective impedance ) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถประมาณเป็นตัวต้านทานสมมูลไม่เชิงเส้นที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำได้ ( Zwikker 1953 ) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแส จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ป้อนให้กับหลอด ความต้านทานของหลอดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องใน 1 รอบ ( cycle ) ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหลอดไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับหลอดทำให้

กระบวนการไอออไนเซชัน ( ionization ) สั้นมาก จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส ทำให้ความหนาแน่นของพลาสมา ( plasma ) เกือบคงที่ และอิมพีแดนซ์ประสิทธิผลทุกอย่างขณะเกือบคงที่ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ( linear ) โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ง)



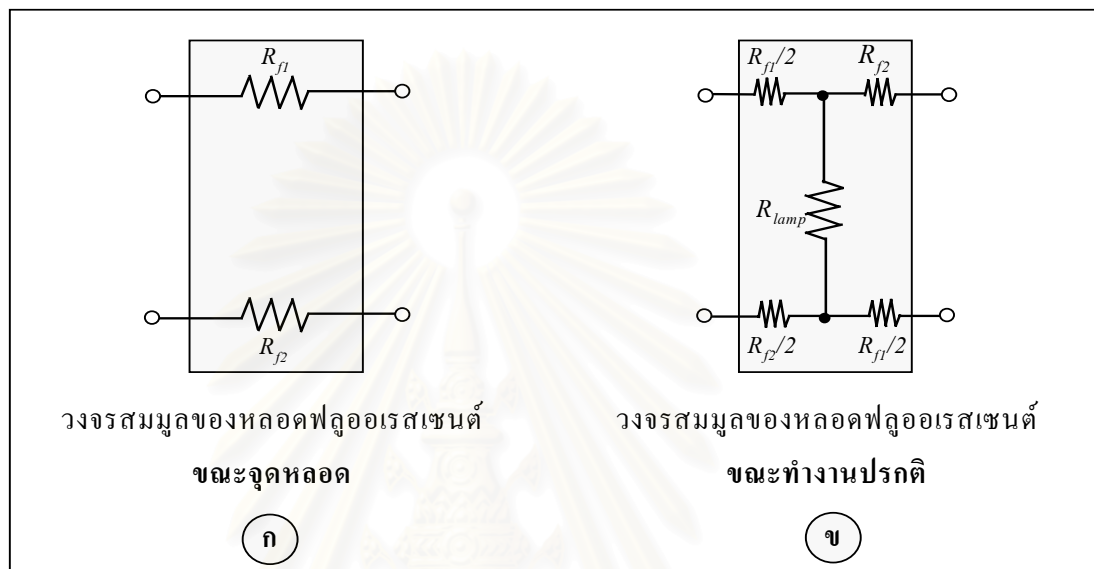
รูปที่ 2.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดันพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ค่าต่างๆ

### 2.1.5 วงจรสมมูลหลอดฟลูออเรสเซนต์

เนื่องจากการทำงานที่แตกต่างกันของหลอดก่อนและหลังการจุดหลอด ดังนั้นวงจรสมมูลจะขึ้นอยู่กับสภาพการทำงาน กล่าวคือก่อนการจุดหลอดจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ในขณะจุดหลอด ดังนั้นจึงแทนความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ( $R_{lamp}$ ) ด้วยวงจรเปิด แต่จะมีความต้านทานไ้หลอด ( $R_{fp}$ ,  $R_{r2}$ ) ในแต่ละข้างของขั้วหลอด ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะจุดหลอดได้ดังแสดงในรูป 2.4 (ก) และเมื่อหลอดติดสว่างค่าความต้านทานสมมูลของหลอด ( $R_{lamp}$ ) จะมีค่าลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด จึงสามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อหลอดติดสว่างได้ดังแสดงในรูป 2.4 (ข) เมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์กับแหล่ง



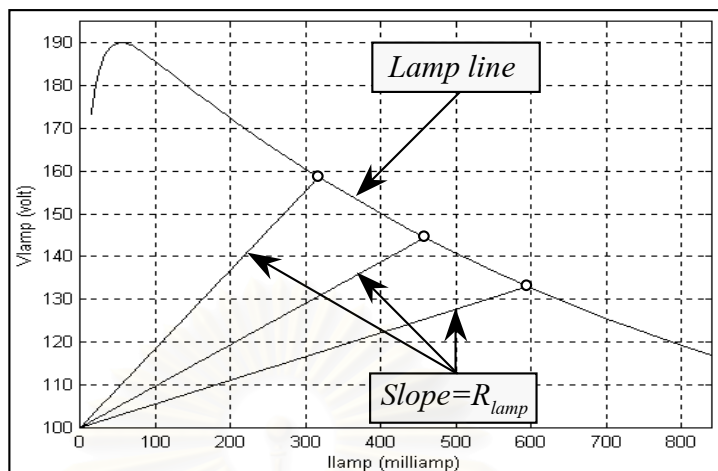
จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเราสามารถประมาณคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นตัวแทนแทนได้ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นโดยประมาณทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ถึงแม้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานกับความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่ค่าความต้านทานสมมูลของหลอด ( $R_{lamp}$ ) จะมีค่าไม่คงที่โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อกำลังด้านออกมีการเปลี่ยนแปลง ความชัน (Slope) ของกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

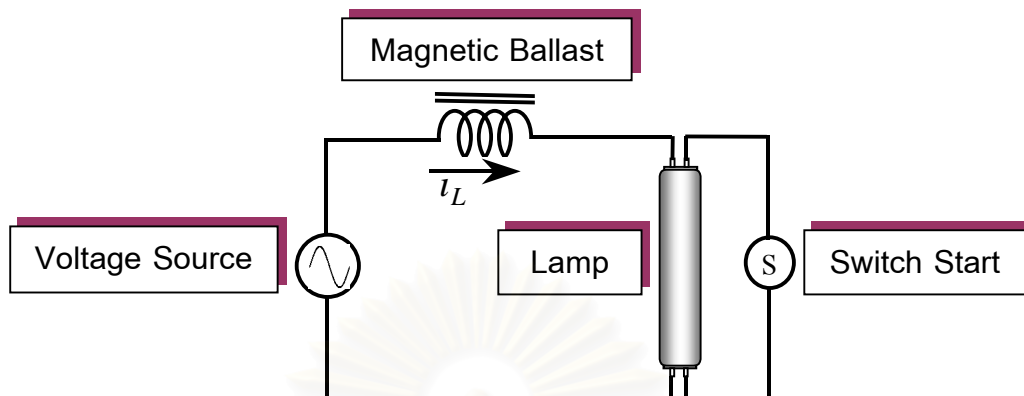


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของหลอดเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์กับกำลังที่หลอด

## 2.2 การใช้งานหลอดฟลูออเรสเซนต์กับบัลลาสต์แบบขดลวดพันบนแกนเหล็ก (fluorescent lamp working with Magnetic ballast)

เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งจ่ายกระแส เพื่อให้การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพ การทำให้แหล่งแรงดันมีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งกระแสจะทำให้โดยใช้อิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน อันเป็นผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสูงขึ้น จึงมีลักษณะสมบัติค่อนข้างต้านแหล่งจ่ายกระแส

โดยทั่วไปจะใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นอิมพีแดนซ์ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียในอิมพีแดนซ์มากเกินไป ดังนั้นลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเป็นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสแตร์ตเตอร์

การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อใช้ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสแตร์ตเตอร์มีลักษณะดังนี้คือ เมื่อเริ่มป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้วงจรในรูปที่ 2.6 หลอดฟลูออเรสเซนต์จะไม่นำกระแสทันที แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายส่วนใหญ่จะตกคร่อมสแตร์ตเตอร์ ทำให้เกิด glow discharge ขึ้นที่หน้าสัมผัสของสแตร์ตเตอร์ ทำให้หน้าสัมผัสร้อนขึ้นและต่อวงจร เมื่อหน้าสัมผัสของสแตร์ตเตอร์ที่เป็น bimetal ต่อวงจรแรงดันคร่อมสแตร์ตเตอร์จะลดลง glow discharge หยุดและหน้าสัมผัสของสแตร์ตเตอร์จะเย็นลง และตัดวงจรในช่วงที่สแตร์ตเตอร์ตัดวงจร บัลลาสต์แกนเหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันสูงคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ แรงดันนี้เรียกว่าแรงดันจุดหลอด (Striking Voltage,  $V_{ig}$ ) ถ้า  $V_{ig}$  ไม่สูงเพียงพอที่จะจุดหลอดให้ติดสว่าง ขบวนการจุดหลอดจะเริ่มต้นใหม่ แต่ถ้า  $V_{ig}$  สูงพอจะทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่าง แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์จะลดต่ำลง ทำให้แรงดันคร่อมสแตร์ตเตอร์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด glow discharge ได้อีก สแตร์ตเตอร์ก็จะเปิดวงจรอย่างนี้ตลอดไป ในช่วงทำงานปกติของหลอดฟลูออเรสเซนต์

### 2.3 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic ballast)

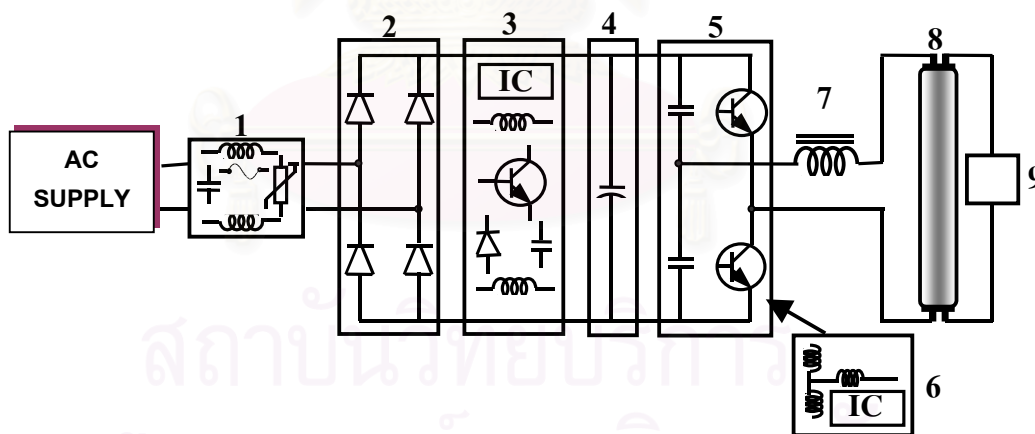
บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นแหล่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กและมีกำลังสูญเสียต่ำและราคาไม่แพงเกินไปได้ การทำงานที่ความถี่สูงนอกจากสามารถลดกำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นบัลลาสต์แล้ว ยังทำให้

ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สูงขึ้นตามความถี่การทำงานได้อีกด้วย

การให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานที่ความถี่สูง ถึงแม้จะช่วยลดกำลังสูญเสียในบัลลาสต์ และลดกำลังด้านเข้าของหลอดลงได้ก็จริง แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานโดยทั่วไปจะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50Hz หรือไม่ก็เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอินเวอร์เตอร์ (inverter) ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นในคอนเวอร์เตอร์เอง และเพื่อให้สามารถลดกำลังสูญเสียรวมของระบบลงได้ ตัวอินเวอร์เตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูง

### 2.3.1 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์(Construction of Electronic ballast)

โครงสร้างโดยทั่วไปของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะเป็นดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2.3.1.1 วงจรกรองด้านเข้า และวงจรป้องกัน ( Input filter and Protection Circuit ) มีหน้าที่ ลด EMI จากภายนอกที่จะเข้ามารบกวนบัลลาสต์และจากบัลลาสต์ที่จะออกไปยังสายส่ง และช่วยป้องกันกระแสกระชาก ( Surge current ) แรงดันเกินชั่วขณะในตอนเปิดไฟ

2.3.1.2 วงจรเรียงกระแส ( Rectifier ) มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

2.3.1.3 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ( Power Factor Correction Circuit ; PFC ) มีหน้าที่ปรับรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงกับ ( Sine ) เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิก และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง

2.3.1.4 วงจรกรองผ่านต่ำ ( Lowpass filter ) มีหน้าที่ ลดแรงดันกระเพื่อมของแรงดันไฟตรง ( $V_{dc}$ ) ด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์

2.3.1.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ( High frequency inverter ) มีหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้สวิตช์เรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ ( Zero Voltage Switch ; ZVS )

2.3.1.6 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการควบคุมกระแส ( Inductor ) มีหน้าที่ เป็นองค์ประกอบหนึ่งของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่สร้างแรงดันสูงในตอนเริ่มต้น และควบคุมกระแสผ่านหลอดให้มีค่าตามที่กำหนดในการทำงานปกติ

2.3.1.7 วงจรขับนำสวิตช์ ( Drive ) มีหน้าที่ กำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ อาจจำแนกตามลักษณะการกำเนิดสัญญาณได้ 2 ชนิด คือชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และชนิดที่ต้องอาศัยการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันด้านโหลดผ่านหม้อแปลง สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ จะควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยการควบคุมความถี่ ผ่านวงจรขับนำสวิตช์นี้

2.3.1.8 หลอดฟลูออเรสเซนต์ ( Fluorescent lamp ) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงสว่างซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ต้องการแรงดันสูงในการจุดหลอด, ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ลักษณะเป็นแหล่งกระแส, ในขณะที่ทำงานมีความต้านทานพลวัตเป็นลบ และปริมาณแสงแปรตามกระแสผ่านหลอด

2.3.1.9 ตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นทางผ่านของกระแสอ่อนไส้หลอด ( Capacitor ) ทำหน้าที่ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำในตอนเริ่มต้นเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเพื่อสร้างแรงดันสูงในการจุดหลอด และยังเป็นทางผ่านของกระแสที่ใช้ในการอุ่นไส้หลอดในภาวะปกติ

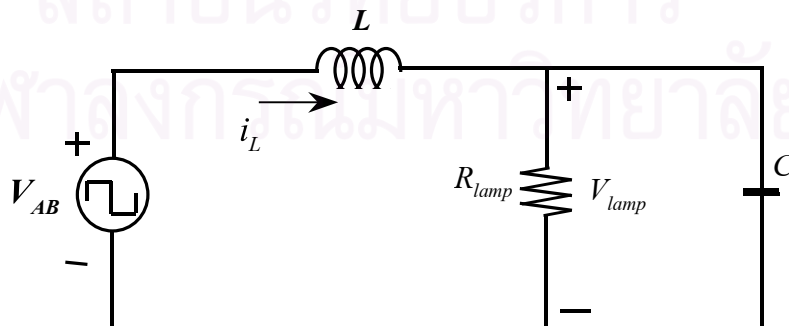
## 2.4 อินเวอร์เตอร์ ( Inverter )

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรืออินเวอร์เตอร์ ( inverter ) เป็น วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่

สูง ( ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 50 กิโลเฮิรตซ์ ) เพื่อป้องกันกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรอินเวอร์เตอร์มีหลายชนิดแต่ส่วนใหญ่นิยมใช้วงจรบริดจ์ หรือกึ่งบริดจ์ที่มี BJT หรือ FET เป็น สวิตช์ไวงานซึ่งในแต่ละกิ่งของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ต่อกันและจะสลับกันนำ กระแส เนื่องจากกระแสและแรงดันของหลอดมีเฟสต่างกัน ดังนั้นสวิตช์ที่ใช้จะต้องเป็นสวิตช์ที่นำ กระแสได้ 2 ทาง ซึ่งทำได้โดยการต่อไดโอดขนานกับสวิตช์ ดังรูปที่ 2.7 ทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ ส่งผ่านพลังงานไปสู่หลอดส่วนพลังงานจากหลอดที่ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟตรงจะไหล ผ่านไดโอด อย่างไรก็ดีในปัจจุบันนี้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปมักจะมีไดโอดต่อ อยู่แทบทั้งสิ้น การทำงานของสวิตช์ไวงานมักเป็นแบบโรเซนแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ (Zero voltage resonant switching,ZVS) ที่มีกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำ แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่ เหลี่ยมค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ วัฏจักรงานร้อยละ 50 เนื่องจากกำลังออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับ หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์ 1 หลอด มีค่าไม่สูงนักจึงเลือกใช้ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโครง สร้างแบบกึ่งบริดจ์ ( Half-bridge inverter )

## 2.5 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร

จากลักษณะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นโหลดสามารถ เขียนวงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรอินเวอร์เตอร์โรเซนแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนานได้ ดังรูปที่ 2.8 โดยที่  $V_{AB}$  คือแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์  $L$  คือตัวเหนี่ยวนำควบคุมกระแสผ่าน หลอดฟลูออเรสเซนต์  $R_{lamp}$  คือความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และ  $C$  คือตัวเก็บ ประจุสำหรับจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

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

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

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

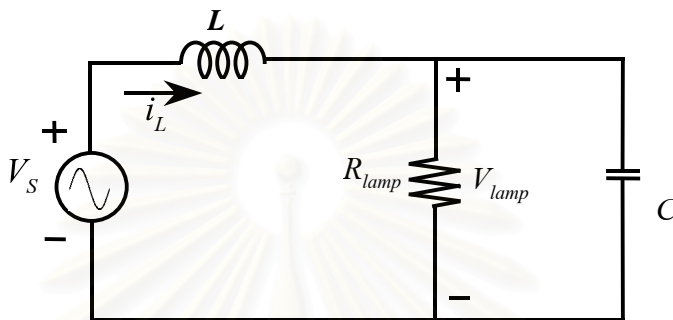
$$= \sum_{n=odd}^{\infty} V_{sn} \sin n\omega t \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\omega$  คือความถี่การสวิตช์  
 $V_{DC}$  คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

เนื่องจากวงจรโพลดีมีการต่อในลักษณะเป็นวงจรผ่านต่ำอันดับสอง (Second order low-pass filter) และมีความถี่การทำงานของวงจรอยู่รอบ ๆ ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamp natural frequency,  $f_o$ ) ทำให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมโหลดและกระแสผ่านโหลดมีรูปคลื่นใกล้เคียงกับความถี่หลักมูล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรจึงอาจจะวิเคราะห์โดยใช้แรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์แทนรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

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

ได้วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังรูปที่ 2.9 โดยที่  $V_s$  คือแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาดเท่ากับองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

## 2.6 วงจรและสมการของวงจรที่ทำงานปกติ

การทำงานในสภาวะอยู่ตัว หลังจากหลอดฟลูออเรสเซนต์จุดติดแล้วจะมีกระแสไหลผ่านหลอดทำให้ค่าความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ( $R_{lamp}$ ) ลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด ในขณะทำงานปกติซึ่งสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรในขณะทำงานปกติ ได้ดังนี้

- ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเป็นความถี่ขีดแบ่งระหว่างโหลดความแบบเหนี่ยวนำและโหลดแบบความจุ (resonant frequency which forms the boundary between capacitive and inductive loads)

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

- อิมพีแดนซ์ลักษณะ (characteristic impedance)

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



- ตัวประกอบคุณภาพของโหลดที่ความถี่หักมุม ( load quality factor at the corner frequency )

$$Q_p = \omega_o R_{lamp} C = \frac{R_{lamp}}{\omega_o L} = \frac{R_{lamp}}{Z_o} \quad (2.6)$$

- อิมพีแดนซ์ด้านอินพุตของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนาน (input impedance of the series resonant parallel load circuit )

$$\begin{aligned} Z &= LS + \left( \frac{R_{lamp} \cdot \frac{1}{CS}}{R_{lamp} + \frac{1}{CS}} \right) \\ Z &= j\omega_s L + \frac{R_{lamp} \frac{1}{j\omega_s C}}{R_{lamp} + \frac{1}{j\omega_s C}} \\ &= \frac{R_{lamp} \left[ 1 - \left( \frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 + j \left( \frac{1}{Q_p} \right) \left( \frac{\omega_s}{\omega_o} \right) \right]}{1 + jQ_p \left( \frac{\omega_s}{\omega_o} \right)} \\ &= |Z| \exp(j\phi) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\phi = \arctan \left\{ Q_p \left( \frac{\omega_s}{\omega_o} \right) \left[ \left( \frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 + \left( \frac{1}{Q_p^2} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2.8)$$

- ฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันคร่อมโหลด  $V_{lamp}(S)$  ต่อแรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์  $V_s(S)$

$$\frac{V_{lamp}(S)}{V_s(S)} = \frac{1}{(LC_{ig})S^2 + \left( \frac{L}{R_{lamp}} \right)S + 1} \quad (2.9)$$

$$\frac{V_{lamp}(j\omega)}{V_s(j\omega)} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o}\right)^2 + j\left(\frac{1}{Q_p}\right)\left(\frac{\omega_s}{\omega_o}\right)\right]} \quad (2.10)$$

จากฟังก์ชัน โอนย้ายของแรงดันคร่อมหลอด  $V_{lamp}(S)$  ต่อแรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์  $V_s(S)$  สามารถจัดรูปแบบสมการให้อยู่ในเทอมของตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และตัวเก็บประจุ  $C_{ig}$  ได้ดังนี้

$$\left[C^2\omega_s^4 + \left(\frac{\omega_s}{R_{lamp}}\right)^2\right]L^2 - (2C\omega_s^2)L + \left[1 - \left(\frac{V_s}{V_{lamp}}\right)^2\right] = 0 \quad (2.11)$$

จากสมการเราสามารถแสดงสมการเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ได้ดังนี้

$$L = \frac{(2C\omega_s^2) \pm \sqrt{(2C\omega_s^2)^2 - 4\left[C^2\omega_s^4 + \left(\frac{\omega_s}{R_{lamp}}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{V_s}{V_{lamp}}\right)^2\right]}}{2\left[C^2\omega_s^4 + \left(\frac{\omega_s}{R_{lamp}}\right)^2\right]} \quad (2.12)$$

แอมพลิจูดของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ ( $I_{lamp}$ )

$$I_{lamp} = \frac{2V_{dc}}{\pi Z_o \sqrt{Q_p^2 \left[1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o}\right)^2 + \left(\frac{\omega_s}{\omega_o}\right)^2\right]}} \quad (2.13)$$

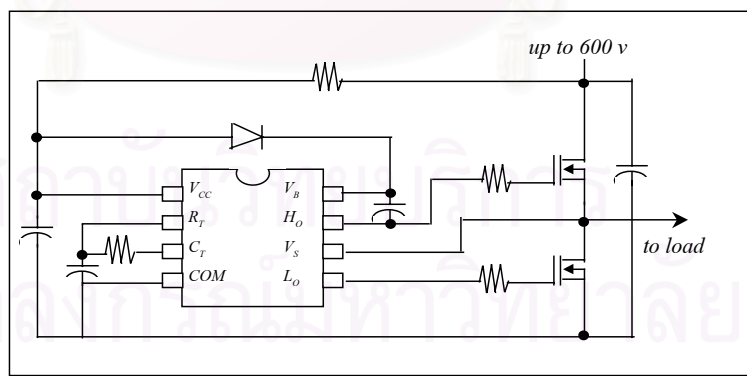
$$\text{ที่ } f_s = f_o \quad I_{lamp} \cong \frac{2V_{dc}}{\pi Z_o} = \frac{2V_{dc}}{\pi \omega_o L} = \frac{2V_{dc} \omega_o C_P}{\pi} \quad (2.14)$$

แต่  $I_{lamp}$  จะขึ้นอยู่กับความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์  $R_{lamp}$  ที่ความถี่การสวิตช์ เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_s = f_o$ )

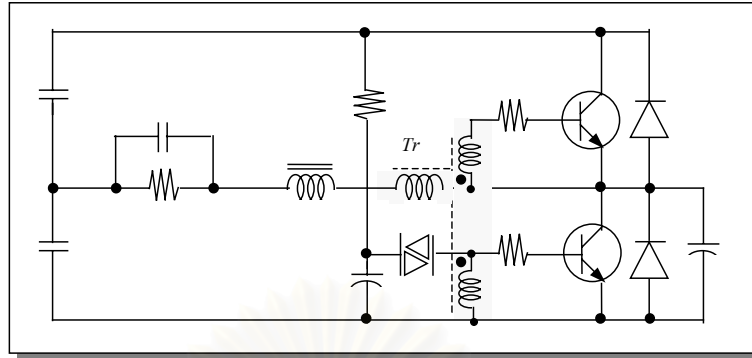
## 2.7 วงจรขับนำสวิตช์ของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ ( Drive circuit )

การขับนำสวิตช์ของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงที่ใช้สวิตช์เรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์จะต้องใช้วงจรขับนำที่มีช่วงเวลาพัก ( dead time ) ที่เหมาะสม ซึ่งช่วงเวลาพักของสัญญาณขับนำจะต้องยาวกว่าช่วงเวลาประจวบเหมาะเพื่อไม่ให้เกิดกระแสทะลุผ่าน ( Shoot-through ) และช่วงเวลาพักต้องสั้นกว่าผลรวมของช่วงเวลาประจวบเหมาะกับช่วงเวลาไดโอดคู่ประกอบนำกระแส นอกจากนี้วงจรขับนำสวิตช์ทั้งสองชุดในแต่ละกิ่งของวงจรกิ่งบริดจ์จะต้องมีการแยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างกัน ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์วงจรถูกอินเวอร์เตอร์กำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และชนิดที่ต้องอาศัยการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันด้านโหลดผ่านหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 2.11

วงจรถูกอินเวอร์เตอร์กำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ใช้วงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์มีข้อดีคือ ความถี่การทำงานจะไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด มีอิสระและความคล่องตัวในการควบคุมการทำงานสูง และสามารถควบคุมแสงด้วยวิธีการปรับความถี่การทำงานของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ได้ง่ายกว่า การใช้งานวงจรถูกอินเวอร์เตอร์กำเนิดสัญญาณที่อาศัยการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันโหลดผ่านหม้อแปลงอิมพัลส์มีข้อดีที่ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้มีการแยกโคจรกันทางไฟฟ้าได้ง่ายจึงสะดวกในการใช้งาน นอกจากนี้สัญญาณรบกวนจากภายนอกจะไม่ค่อยมีผลต่อการทำงานของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ที่ขับนำโดยใช้หม้อแปลงอิมพัลส์



รูปที่ 2.10 วงจรถูกอินเวอร์เตอร์กำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์ ( IC )



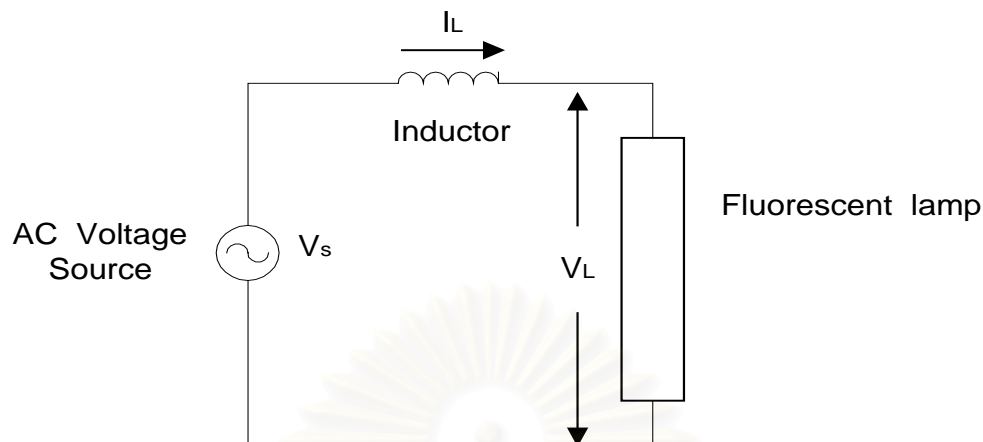
รูปที่ 2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิทช์ชนิดที่อาศัยการป้อนกลับของกระแสไหลคผ่านหม้อแปลงอิ่มตัว ( *Saturable transformer* )

จากโครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ทำให้ทราบถึงแนวทางในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

## 2.8 การศึกษาแนวทางในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ มีลักษณะสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความต้านทานพลวัตในภาวะการทำงานปกติเป็นลบ ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแส แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแส จะได้จากการใช้อิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียในอิมพีแดนซ์มากเกินไป จึงนิยมใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นอิมพีแดนซ์ ทำหน้าที่จำกัดกระแสดังแสดงในรูป 2.12

เมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง หลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีลักษณะเหมือนความต้านทานแบบเชิงเส้นโดยประมาณ กล่าวคือ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าความถี่สูงที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์เข้าไปในหลอดฟลูออเรสเซนต์ แรงดันคร่อมหลอดจะมีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์ แต่ขนาดของแรงดันคร่อมหลอดจะเปลี่ยนกับขนาดของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแบบไม่เชิงเส้น จากลักษณะดังกล่าวจึงสามารถเขียนสมการของวงจรในรูปที่ 2.12 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 ลักษณะการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดัน โดยมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่จำกัดกระแส

สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้ากระแสสลับได้ดังนี้คือ

$$I = \frac{V_s - V_L}{j\omega L} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$V_s$  = แรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

$V_L$  = แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์

$\omega$  = ความถี่เชิงมุมของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

$L$  = ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ

$I$  = กระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้หลอด

เนื่องจากปริมาณแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด ดังนั้นการควบคุมแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำได้ โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านหลอด ซึ่งจากสมการที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าสามารถทำได้ดังนี้คือ

- ปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายแรงดัน ( $V_s$ )
- ปรับค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้
- ปรับความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดัน ( $\omega$ )

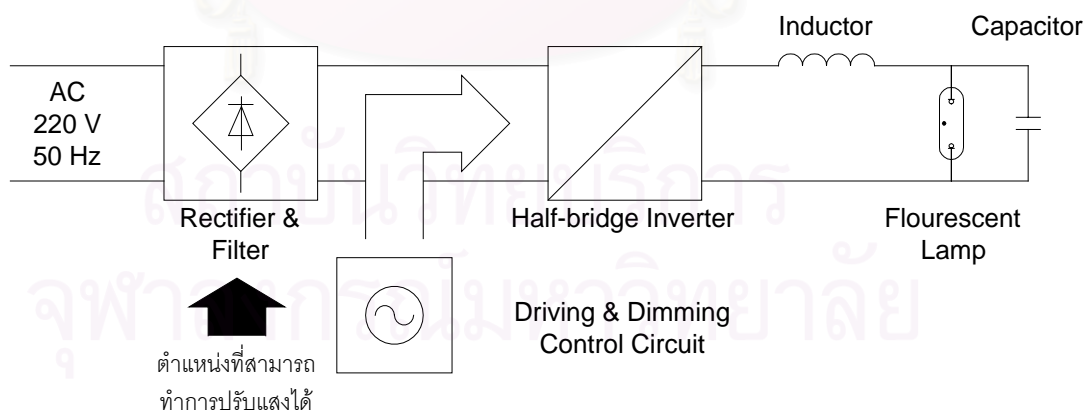
สำหรับแรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ผ่านหลอด ( $I$ )

## 2.9 วิธีการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากสมการที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าปริมาณแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด ดังนั้นการควบคุมแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านหลอด ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้คือ

### 2.9.1 การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายแรงดัน

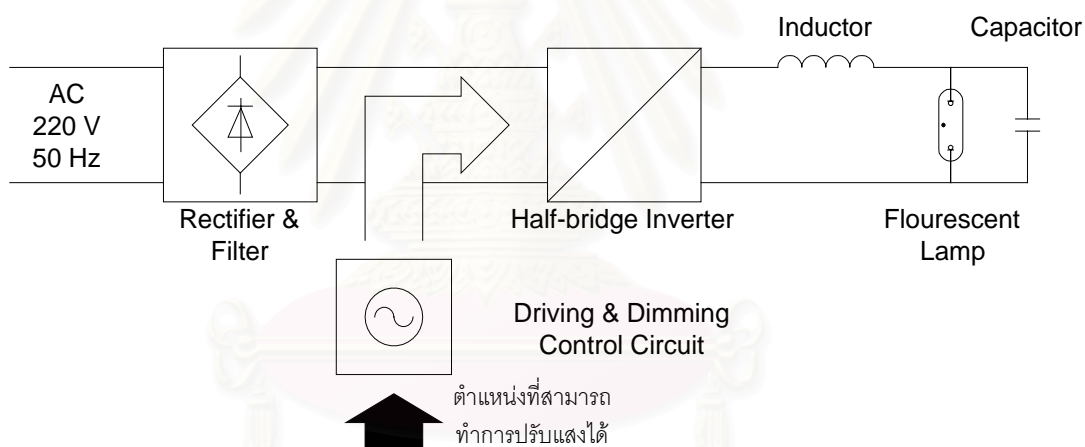
การควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายนั้นจะต้องควบคุมระดับแรงดันไฟตรงด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2.13 อาจทำได้โดยใช้วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบที่สามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ เช่น ในกรณีที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ และยังช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกด้านขาเข้า (Active Input Harmonic Filter) ด้วย และถ้าใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz การควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยวิธีนี้ ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่าย ซึ่งในทางปฏิบัติค่อนข้างยุ่งยาก



รูปที่ 2.13 ไคอะแกรมแสดงการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายแรงดัน

## 2.9.2 การควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์

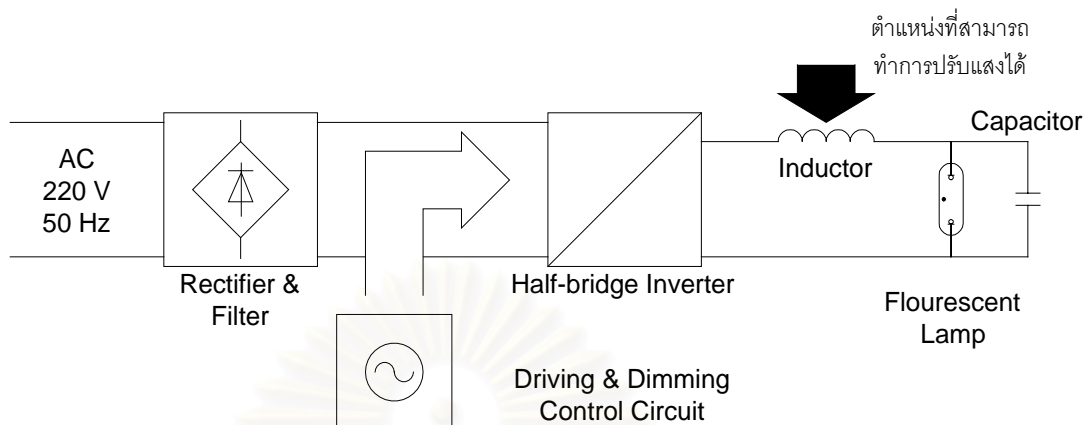
การควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ อาจทำได้โดยการควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง การควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ทำได้โดยการควบคุมความถี่ของสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยใช้วงจรควบคุมความถี่ของสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ดังนี้ คือวงจรกำเนิดสัญญาณแบบอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกำเนิดสัญญาณแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะมีช่วงเวลาที่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์หยุดทำงานก่อนที่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์อีกตัวจะทำงาน ( Dead Time ) นั้น จะต้องมีการปรับเวลาช่วงนี้ให้เหมาะสม เพราะถ้าไม่เหมาะสมอาจจะเป็นสาเหตุทำให้สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ทำงานผิดจังหวะกันได้ หรืออาจจะเกิดการที่สวิตช์ทั้งสองตัวนำกระแสพร้อมกัน ทำให้เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 2.14 ไอโอะแกรมของการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์

## 2.9.3 การปรับค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้

ในการปรับค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.15 นั้นจะต้องมีการเปลี่ยนขนาดโครงสร้างเชิงกลของตัวเหนี่ยวนำ โดยการปรับช่องว่างอากาศ ( air gap ) ของแกนที่ใช้ทำ ความเหนี่ยวนำ ซึ่งไม่สะดวกต่อการปรับแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมของการปรับค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้

ในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์อาจจะทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยเป็นการควบคุม duty cycle ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ (Branas, Azcondo and Bracho,1997) การควบคุมแสงโดยวิธีนี้จำเป็นใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ full bridge ทำให้ต้องใช้สวิตช์และวงจรจับนำสวิตช์เพิ่มขึ้น และยุ่งยากกว่า จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมกัน ซึ่งจากการพิจารณาแนวทางต่างๆ ในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเห็นได้ว่า การควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยการควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด การควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ทำได้โดยการควบคุมความถี่ของสัญญาณขับนำทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

#### 2.10 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ( Power factor correction circuit : PFC )

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง มีหน้าที่ปรับรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิก และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าโดยให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ( ในอดีตใช้ IEC 555-2 ) ดังนี้ ตัวประกอบกำลังต้องมากกว่า 90% ฮาร์มอนิกที่ 3 น้อยกว่า 27 % ของค่าองค์ประกอบหลักมูลและ ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก(THD) น้อยกว่า 32 % ซึ่งหาได้โดยการหารากที่สองของผลรวมของฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงตามตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 แสดงขอบเขตอัตราส่วนของขนาดกระแสฮาร์มอนิกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาตรฐาน IEC 1000-3-2

ฮาร์มอนิกอันดับที่ n ( Harmonic Order )	ขอบเขตค่าอัตราส่วนสูงสุด (%) ของค่ากระแสด้าน เข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่พื้นฐาน Maximum value expressed as a percentage of the input current at the fundamental frequency
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 < n < 39$	3

( $\lambda$  คือ ค่าตัวประกอบกำลังของวงจร )

การทำงานของวงจร ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- 1) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน ( Passive PFC )
- 2) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน ( Active PFC )

#### 2.10.1 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน

ลักษณะของวงจรจะใช้อุปกรณ์แบบเฉื่อยงานเช่น ไดโอด ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวต้านทานมาประกอบเป็นวงจร เพื่อให้กระแสด้านเข้าใกล้เคียงไซน์ ซึ่งคุณสมบัติโดยเฉลี่ยดังนี้ ตัวประกอบกำลังน้อยกว่า 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมมากกว่า 20 % (Spangler, Hussain and Behera,1991) ตัวอย่างของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน

#### ก) LC Filter before Bridge Rectifier

ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะอยู่ด้านหน้าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ซึ่งจะให้ค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ประมาณ 23 - 25 %

(Spangler, Hussain and Behera,1991) ลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.16 ข

ข) LC Filter after Bridge Rectifier

ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะถูวางหลังวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ในกรณีนี้ตัวเหนี่ยวนำจะต้องทนกระแสได้สูงกว่าแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอยู่หน้าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และต้องมีช่องอากาศใหญ่กว่า ค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 42 - 45 % (Spangler, Hussain and Behera,1991)ซึ่งมากกว่าแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอยู่หน้าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.16 ก

ค) Rippled or Valley fill PFC

วงจร Rippled or Valley fill PFC มีหลายรูปแบบ จากลักษณะการต่อไดโอดและตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.16 ค ตัวประกอบกำลังประมาณ 0.93 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 26 - 34 % (Spangler, Hussain and Behera,1991)

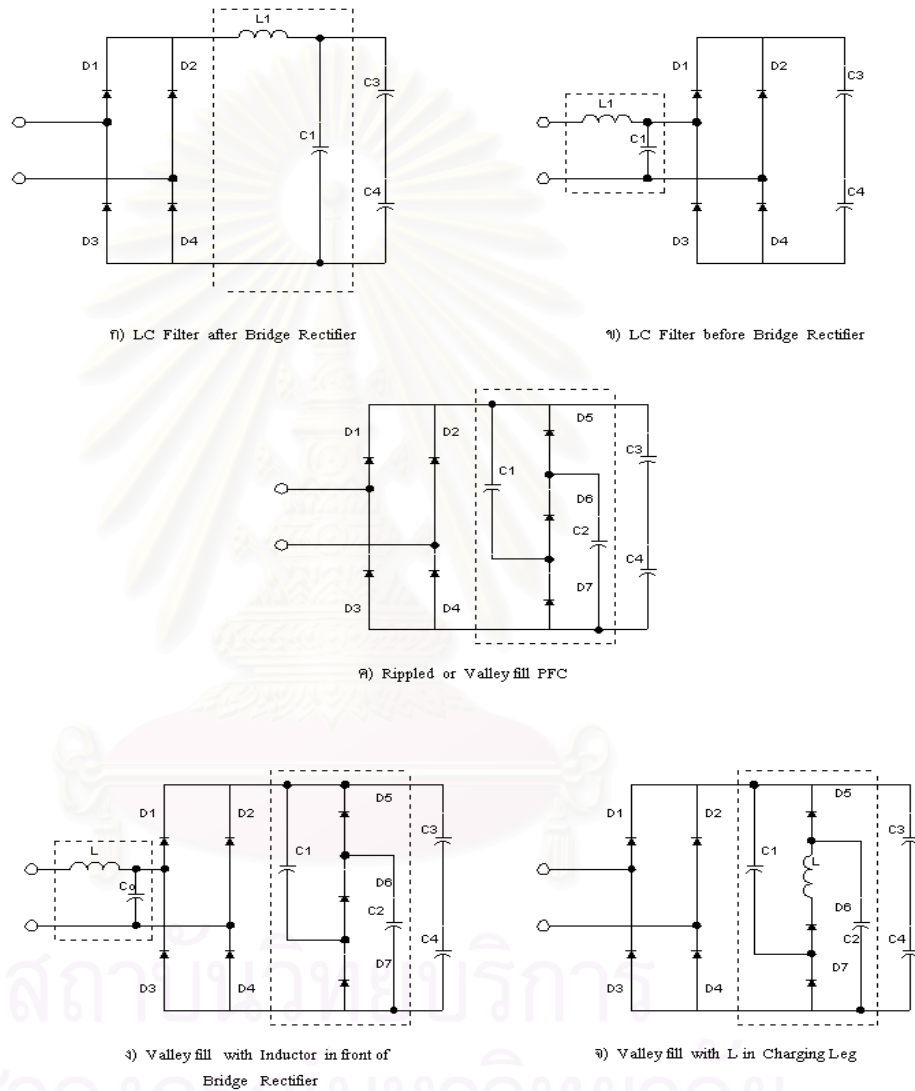
ง) Valley fill with inductor in charging leg

วงจร Valley fill with inductor in charging leg ลักษณะวงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำ ใน Charging leg ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ง มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 27 - 32 % (Spangler, Hussain and Behera,1991)

จ) Valley fill with inductor before Bridge Rectifier

วงจร Valley fill with inductor before Bridge Rectifier ตัวเหนี่ยวนำจะถูวางส่วนหน้าของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ดังรูปที่ 2.16จ ตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 27 - 32 % (Spangler, Hussain and Behera,1991) Valley fill with inductor in charging leg มีข้อดี 3 อย่างคือ จำกัดกระแสไหลพุ่ง (inrush current) เป็นตัวกรอง EMI และจำกัดค่ายอดของกระแสในระหว่างการประจุตัวเก็บประจุ

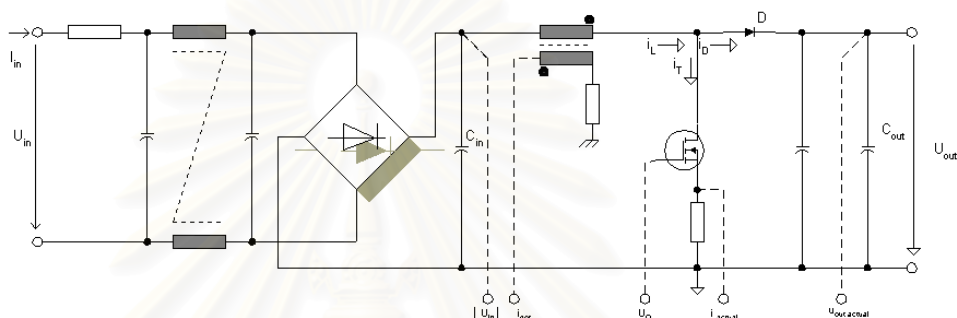
เมื่อพิจารณาวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงานดังที่กล่าวมาแล้ว ถ้ามีการออกแบบวงจรที่เหมาะสม ก็จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง และค่าเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมผ่านตามมาตรฐาน แต่ถ้าต้องการให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้นและค่าเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำลง จำเป็นต้องใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน



รูปที่ 2.16 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน

## 2.10.2 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

โดยส่วนใหญ่ใช้หลักการทำงานของ วงจรแปลงผันกำลัง แบบทบระดับ หรือ วงจรแปลงผันกำลัง ตัดแปลงจากวงจรทบระดับ



รูปที่ 2.17 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน โดยใช้วงจรทบระดับ

ลักษณะวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานยังแบ่งได้ 2 ลักษณะโดยพิจารณาจาก ลักษณะการต่อวงจร คือ

1. single stage
2. two stage

### 2.10.2.1 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ single stage

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ single stage นี้ จะมีการใช้สวิตช์ของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานร่วมกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะมีข้อดีคือสามารถลดจำนวนสวิตช์และวงจรขับนำลงได้ แต่จะมีความยุ่งยากในการออกแบบ หรือเลือกค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสม ตัวอย่างของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานแบบ single stage

ก) Charge Pump Power Factor Correction Circuit (CPPFC)

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ Charge Pump เช่น วงจร voltage-source (VS)CPPFC, current-source (CS) CPPFC และ continuous input current (CIC) CPPFC (Qian and LEE,2000) มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.99 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 11.3 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.54 ดังรูปที่ 2.18 ก

ข) Boost liked Operating in Critical Conduction mode

ลักษณะของวงจรจะประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนต่อกัน ในวงจรส่วนแรกจะเป็นวงจรเสมือนวงจรทบระดับซึ่งทำงานที่จัดแบ่งของกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง วงจรอีกส่วนจะเป็นอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อโหลดแบบขนาน มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.99 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 14.0 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.55 ( Co, Simonetti and Vieira,1996) ดังรูปที่ 2.18 ข

2.10.2.2 วงจรเพิ่มค่าประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ two stage

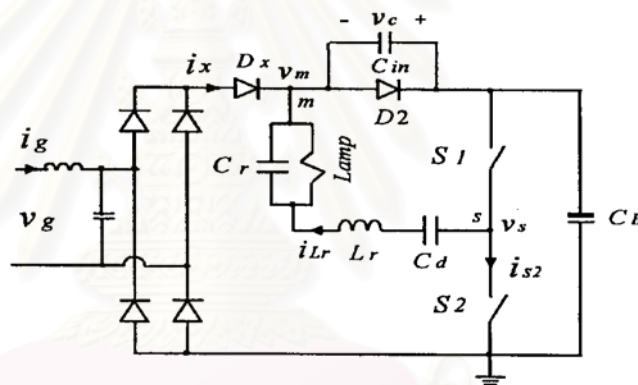
วงจรเพิ่มค่าประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ two stage นั้นจะมีการใช้สวิตช์ของวงจรเพิ่มค่าประกอบกำลังแบบไวงานแยกกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวอย่างของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานแบบ two stage คือ

ก) Improved Valley fill and Valley Boost Converter

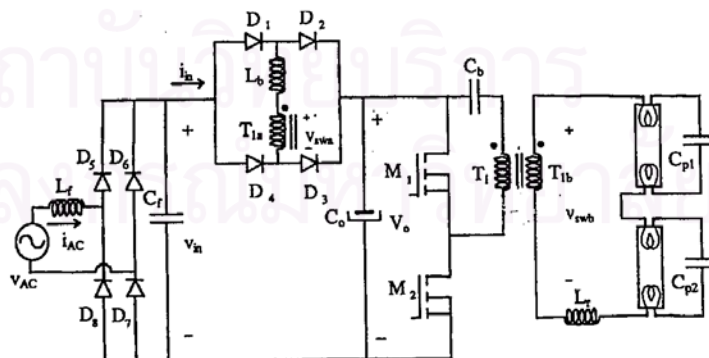
วงจร Improved Valley Fill (IVF) เป็นวงจรที่ได้ปรับปรุงจากวงจร Valley Fill เมื่อเทียบกับวงจร Valley Fill เดิม วงจร Improved Valley Fill (IVF) จะมีตัวคาปาซิเตอร์ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ ผลให้กระแสไซน์เรียบขึ้น ตัวประกอบกำลังสูงขึ้น และเมื่อนำวงจร Improved Valley Fill (IVF) มาต่อร่วมกับ Valley Boost Converter (VBC) ผลจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ได้ใกล้เคียง 1 คือประมาณ 0.997 ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำมาก ๆ ประมาณ 5 % และค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสโหลดดีดีมากประมาณ 1.5 (Youn, Chae and Cho,1997) ดังรูปที่ 2.18 ค

๗) Simplified Boost Converter

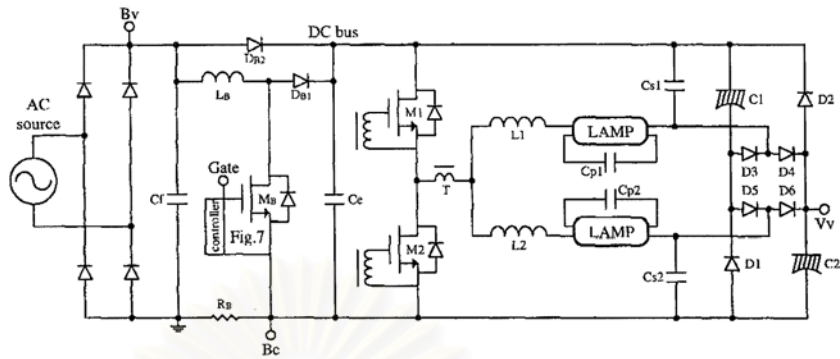
เป็นวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่เป็นวงจรทระดับทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง โดยใช้แนวคิดของการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ( Pulse- width- modulation,PWM) วงจร PWM ร่วมกับสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิงที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์เข้าด้วยกันกับสัญญาณป้อนกลับและป้อนไปหน้าเพื่อสร้างสัญญาณที่ตรงข้าม โดยใช้ทรานซิสเตอร์ต่อเป็นวงจรคาร์ลิงตันซึ่งจะใช้ขับมอสเฟตกำลัง ร่วมกับแนวคิดของการควบคุมสำหรับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่เป็นวงจรทระดับทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะให้ค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.992 ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมประมาณ 6.2 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.55 (Ganesh and Hesterman,1998) ดังรูปที่ 2.18 ง



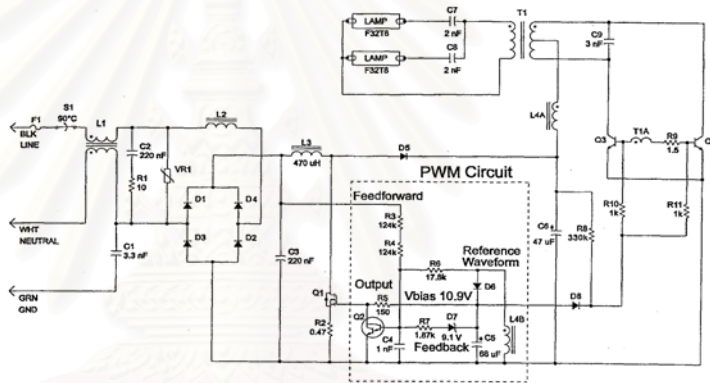
ก) Charge - pump Power Factor Correction



ข) Simplified Boost Converter



ก) Improved Valley fill and valley Boost Converter



ง) Simplified Boost Converter

รูปที่ 2.18 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังจากที่กล่าวมาแล้วนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน ซึ่ง วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานยังสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ แบบ single stage และ two stage แบบ two stage เป็นการต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้สวิทช์ของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานแยกกับสวิทช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้ผลกระทบกระทั้งระหว่างสองวงจรมีจะน้อยกว่ากรณีที่เป็นแบบ single stage ซึ่งใช้สวิทช์ของวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังแบบไวงานร่วมกับสวิทช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ การศึกษาลักษณะวงจร two stage นั้นจะทำการศึกษาวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แยกกัน ส่วน

วงจรแบบ single stage จะมีข้อดีในการลดจำนวนสวิทช์ไวงาน และวงจรขับนำสวิทช์ได้ โดยสามารถใช้สวิทช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) แบบ single stage อาจจะมีผลกระทบกระเทือนต่อกันของวงจรทั้งสองเมื่อทำการปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์กรณีทำการควบคุมปริมาณแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เช่น ผลของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ตัวประกอบยอดคลื่น เป็นต้น ทำให้การออกแบบวงจรนั้นจะต้องออกแบบให้เหมาะสม สำหรับหาแนวทางในการออกแบบและผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### การวิเคราะห์เสถียรภาพการควบคุมแสงและออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูงซึ่งควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้

#### บทนำ

ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แนวทางการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำ และการศึกษาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้และมีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

#### 3.1 เสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

การควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในย่านความเข้มแสงต่ำโดยวิธีควบคุมความถี่วงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์พบว่า หากขึ้นการเปลี่ยนความถี่มีค่ามากไปในย่านความเข้มแสงต่ำ จะมีผลทำให้หลอดดับได้ จากผลการทดลองดังกล่าวนำไปสู่การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของจุดทำงานและความไวของการควบคุม ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของปัญหาดังกล่าวในหัวข้อต่อไป

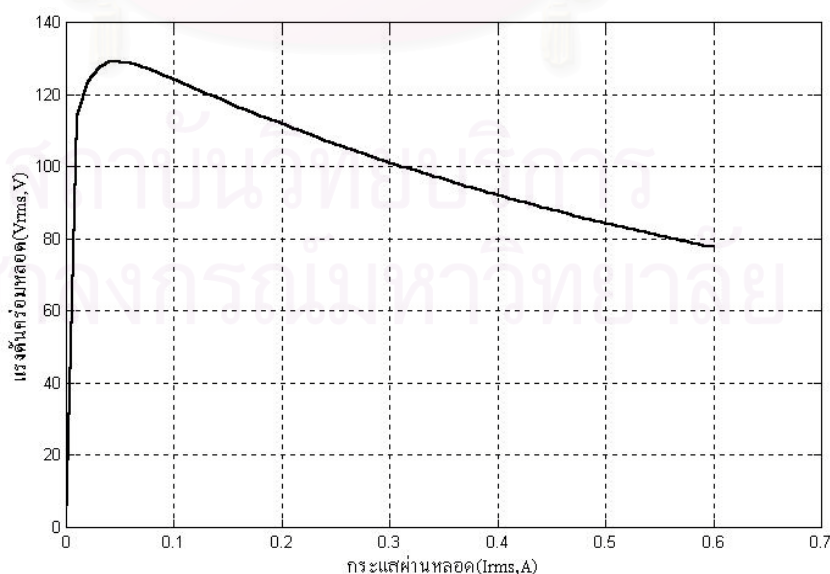
ถึงแม้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานกับความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่ขนาดค่าความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดที่จุดทำงานดังรูปที่ 3.1 การวิเคราะห์และแก้สมการโดยวิธีทางพีชคณิตของวงจรที่โหลดมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นนั้นทำได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการทางกราฟในการหาจุดทำงานของวงจรโดยใช้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันออก ( $V_B$ ) กับ กระแสออก ( $I_B$ ) ของบัลลาสต์สำหรับโหลดเป็นตัวต้านทานที่ค่าต่างๆกัน ซึ่งเรียกว่า *Ballast line* และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหลอดซึ่งเรียกว่า *Lamp line* ลักษณะการต่อวงจรในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเขียนสมการเคอร์ชอฟฟ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วออกของบัลลาสต์จะได้  $V_B = V_L$  และ  $I_B = I_L$  ดังนั้นจุดทำงานของวงจรก็คือจุด

ตัดของ Ballast line กับ Lamp line ดังรูปที่ 3.3 การเขียน Ballast line จะทำโดยการคำนวณหาแรงดันออกออก ( $V_B$ ) กับกระแสออก ( $I_B$ ) ของบัลลาสต์สำหรับความต้านทาน  $R$  ค่าต่างๆจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อได้มีการออกแบบค่าแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์และค่าอุปกรณ์ของวงจร(L,C) และความถี่การทำงานของบัลลาสต์  $f_s$  แล้ว ส่วน Lamp line ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ( $V_L$ )กับกระแส( $I_L$ )ซึ่งอาจจะเป็นค่ายอดหรืออาร์เอ็มเอสของหลอดสำหรับกำลังออกของหลอดต่างๆกันที่ได้จากการทดลองวัดจริง อย่างไรก็ตามเราสามารถหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันหลอด( $V_L$ )กับกระแสหลอด( $I_L$ )โดยวิธี Curve Fitting ได้สมการ Lamp line ของหลอดตามสมการที่ 3.3

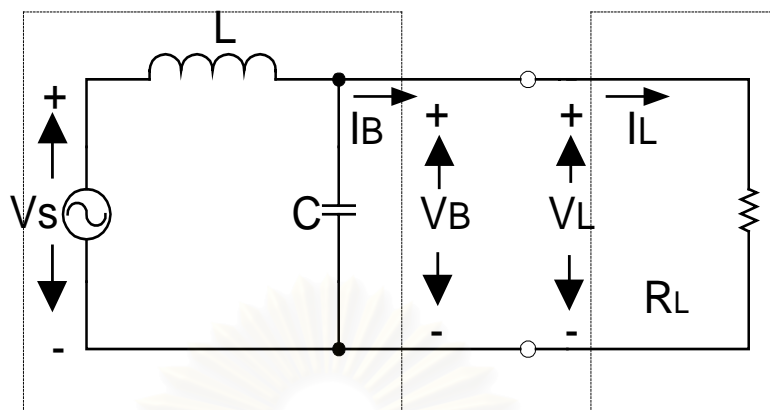
$$V_B = \frac{V_s}{\sqrt{(1 - LC(2\pi f_s)^2)^2 + \left(\frac{2\pi f_s L}{R}\right)^2}} \quad (3.1)$$

$$I_B = \frac{V_s}{R\sqrt{(1 - LC(2\pi f_s)^2)^2 + \left(\frac{2\pi f_s L}{R}\right)^2}} \quad (3.2)$$

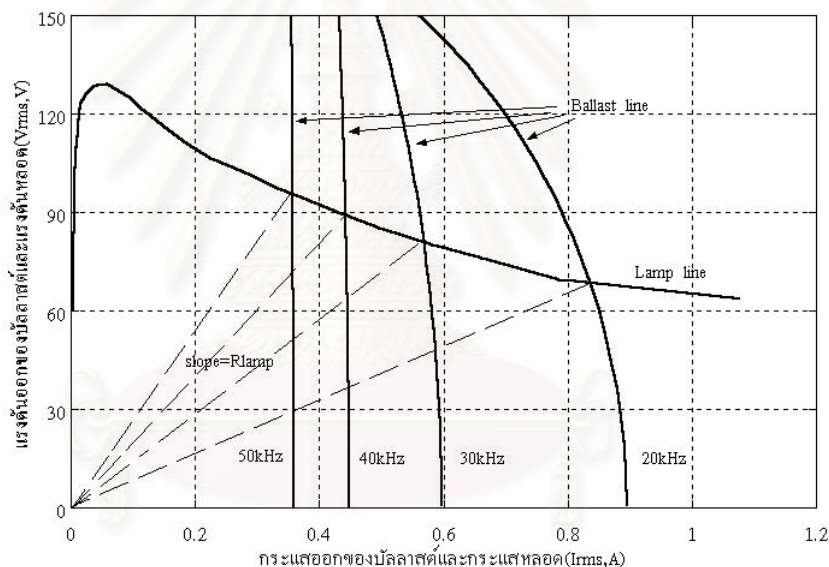
$$V_L = 39 + 99.9\exp(-1.58i_L) - 40\exp(-59i_L) - \frac{99}{1 + (250i_L)^5} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.1 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออโรเรสเซนต์



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และหลอดฟลูออเรสเซนต์สำหรับความถี่ต่างๆ

รูปที่ 3.3 แสดงกราฟของ Ballast line ซึ่งคำนวณโดยวิธีการดังกล่าวข้างต้น สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้  $L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF  $V_{dc}=350$ V  $V_s=157.6$ V ที่ความถี่การทำงาน 4 ค่า คือ 20 30 40 และ 50 kHz ตามลำดับและ Lamp line ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์ T10 จุดตัดของ Lamp line กับ Ballast line ทั้งสี่จะให้จุดทำงานที่มีกำลังออก 52, 44, 36 และ 32 W ตามลำดับ

### 3.1.1 เสถียรภาพของจุดทำงาน

เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าความต้านทานพลวัตเป็นลบ กล่าวคือเมื่อกระแสผ่านหลอดเพิ่มขึ้นแรงดันคร่อมหลอดจะลดลง ดังนั้นเพื่อให้หลอดทำงานอย่างมีเสถียรภาพจึงต้องต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์เข้ากับแหล่งจ่ายที่มีลักษณะใกล้เคียงแหล่งจ่ายกระแส โดยความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์จะต้องมีขนาดมากกว่าขนาดของความต้านทานพลวัตของหลอดซึ่งมีค่าเป็นลบและเนื่องจากความต้านทานพลวัตของบัลลาสต์มีค่าเท่ากับค่าลบของความชันของ ballast line ดังนั้นจะได้เงื่อนไขของจุดทำงานที่มีเสถียรภาพตามสมการที่ 3.4

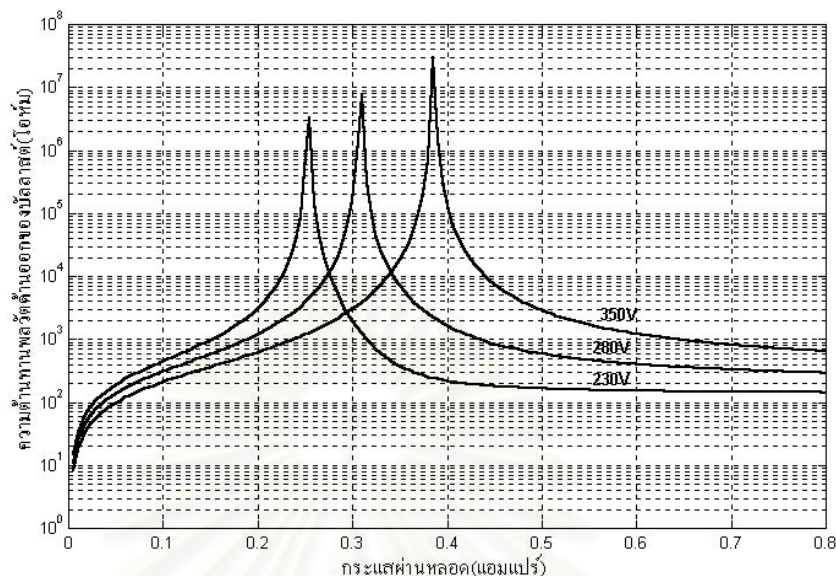
$$\frac{dV_L}{dI_L} > \frac{dV_B}{dI_B} \quad \text{หรือ} \quad \left| \frac{dV_B}{dI_B} \right| > \left| \frac{dV_L}{dI_L} \right| \quad (3.4)$$

เนื่องจากทั้ง lamp line และ ballast line มีแรงดันลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ( $\frac{dv}{di}$  เป็นลบ) เงื่อนไขเสถียรภาพในสมการที่ 3.4 บ่งชี้ว่าสำหรับจุดทำงานที่มีเสถียรภาพเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นการลดลงของแรงดันออกของบัลลาสต์จะต้องมากกว่าการลดลงของแรงดันคร่อมหลอด ซึ่งหมายความว่าบัลลาสต์ควรมีค่าความต้านทานพลวัตด้านออกสูงกว่าความต้านทานพลวัตของหลอด การที่บัลลาสต์มีความต้านทานพลวัตสูงแสดงถึงการมีลักษณะเข้าใกล้แหล่งกระแส ดังนั้นการเปรียบเทียบเสถียรภาพของจุดทำงานจะใช้การเปรียบเทียบขนาดความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ที่จุดทำงานกับความต้านทานพลวัตของหลอด ค่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกของบัลลาสต์เทียบกับกระแสด้านออกของบัลลาสต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลดของบัลลาสต์ กำหนดจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 จะได้ผลดังสมการที่ 3.5 [ภาคผนวก ก.3]

$$R_{OB} = -\frac{dV_B}{dI_B} = -\frac{\frac{dV_B}{dR}}{\frac{dI_B}{dR}} = \frac{(2\pi f_s L)^2}{R \left[ 1 - \left( \frac{f_s}{f_o} \right)^2 \right]^2} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  คือ ความถี่ธรรมชาติที่ไม่หน่วง

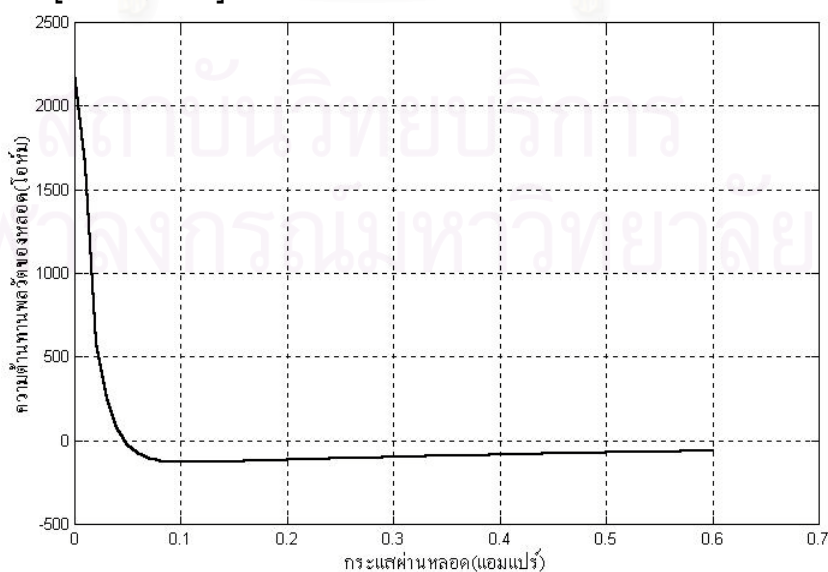
R คือความต้านทานสมมูลของหลอดที่จุดทำงาน



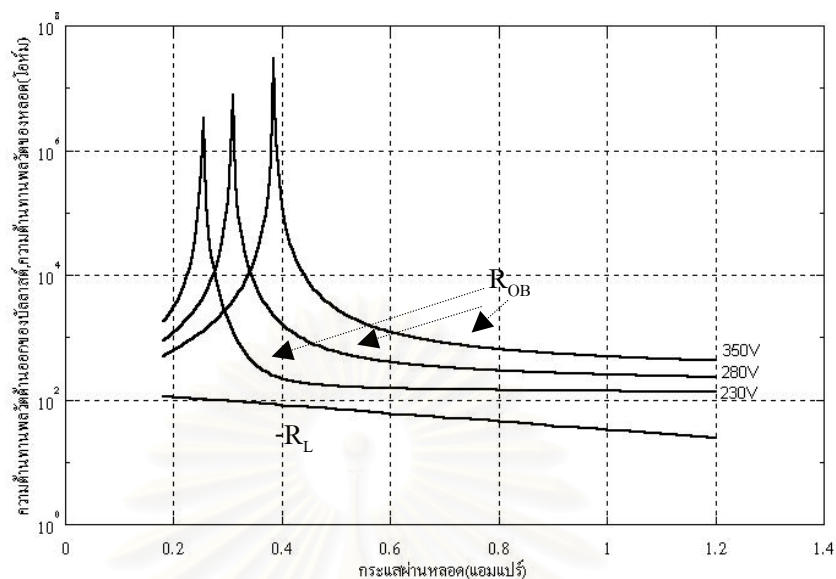
รูปที่ 3.4 ขนาดความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์  $R_{OB}$

รูปที่ 3.4 เป็นกราฟของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.5 สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้  $L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF เมื่อใช้แรงดันไฟตรงด้านเข้า 3 ค่า คือ  $V_{dc}=350$  V,  $V_{dc}=280$  V และ  $V_{dc}=230$  V ตามลำดับ ส่วนความต้านทานพลวัตหลอดจะคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 ได้ผลตามสมการที่ 3.6 และรูปที่ 3.5 [ภาคผนวก ก.4]

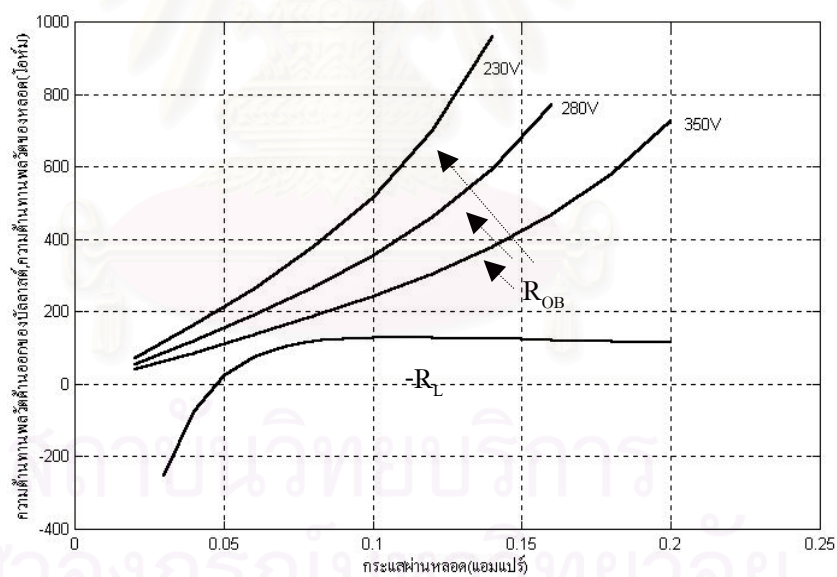
$$R_L = \frac{dv_L}{di_L} = \frac{5 \times 250^5 \times 99 \times i_L^4}{[(250i_L)^5 + 1]^2} - 157.842 \exp(-1.58i_L) + 2360 \exp(-59i_L) \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.5 ขนาดความต้านทานพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์  $R_L$



รูปที่ 3.6 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์  $R_{OB}$  และความต้านทานพลวัตของหลอด  $R_L$  ในย่านความถี่กลางและสูง



รูปที่ 3.7 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์  $R_{OB}$  และความต้านทานพลวัตของหลอด  $R_L$  ในย่านความถี่ต่ำ

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบขนาดค่าความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์กับขนาดความต้านทานพลวัตของหลอดเขียนบนกราฟเดียวกันแสดงดังรูปที่ 3.6 เป็นกราฟของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.5 สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้

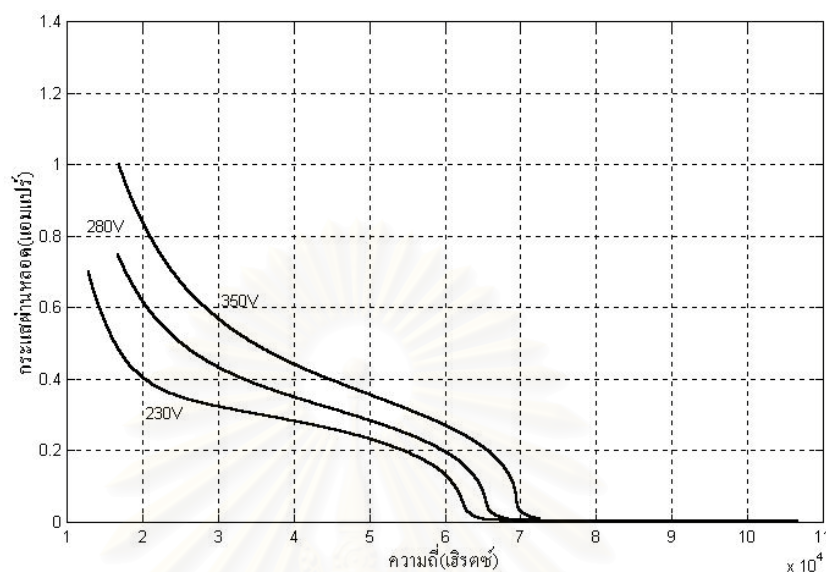
$L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF สำหรับแรงดันไฟตรงด้านเข้า 3 ค่า คือ  $V_{dc}=350V$ ,  $V_{dc}= 280V$  และ  $V_{dc}=230V$  ตามลำดับ ความต้านทานพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์  $R_L$  คำนวณจากสมการที่ 3.6 โดยจะนำวาดลงบนกราฟที่ 3.6 ด้วยค่าลบ ในย่านความเข้มแสงกลางและสูง เนื่องจากความต้านทานพลวัตมีค่าสูงมากในช่วงนี้จึงใช้แกนค่าความต้านทานเป็นลอการิทึม

รูปที่ 3.7 เป็นกราฟของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.5 สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้  $L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF แรงดันไฟตรงด้านเข้า 3 ค่า คือ  $V_{dc}=350V$ ,  $V_{dc}= 280V$  และ  $V_{dc}=230V$  ตามลำดับ และความต้านทานพลวัตของหลอดฟลูออเรสเซนต์  $R_L$  คำนวณจากสมการที่ 3.6 ในย่านความเข้มแสงต่ำ จากผลการคำนวณในรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าในย่านกระแสออกสูงความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์จะมีค่าสูงและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในย่านกระแสออกกลางๆและจะกลับลดลงในย่านกระแสออกต่ำๆอีกทั้งมีค่าเข้าใกล้ความต้านทานหลอด ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ถึงการลดลงของเสถียรภาพของจุดทำงานในย่านกระแสออกต่ำ อย่างไรก็ตามการที่ขนาดของความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์มีค่าสูงกว่าขนาดของความต้านทานพลวัตของหลอดแสดงว่าจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานที่ใช้ควบคุมแสง

### 3.1.2 ความไวในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เนื่องจากปริมาณแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด ดังนั้นการควบคุมแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านหลอด ซึ่งสามารถทำได้โดยควบคุมความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ 3.1 สามารถหาความถี่  $f_s$  ที่จุดทำงานต่างๆบน Lamp line  $V_L, I_L$  สำหรับค่าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์  $V_s$  และ  $L, C$  ค่าต่างๆกัน ได้ดังสมการที่ 3.7 [ภาคผนวก ก.5]

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\left(\frac{L^2 I^2 - 2LCV_L^2}{2L^2 C^2 V_L^2}\right) + \sqrt{\left(\frac{L^2 I^2 - 2LCV_L^2}{2L^2 C^2 V_L^2}\right)^2 - \left(\frac{V_L^2 - V_s^2}{L^2 C^2 V_L^2}\right)}} \quad (3.7)$$

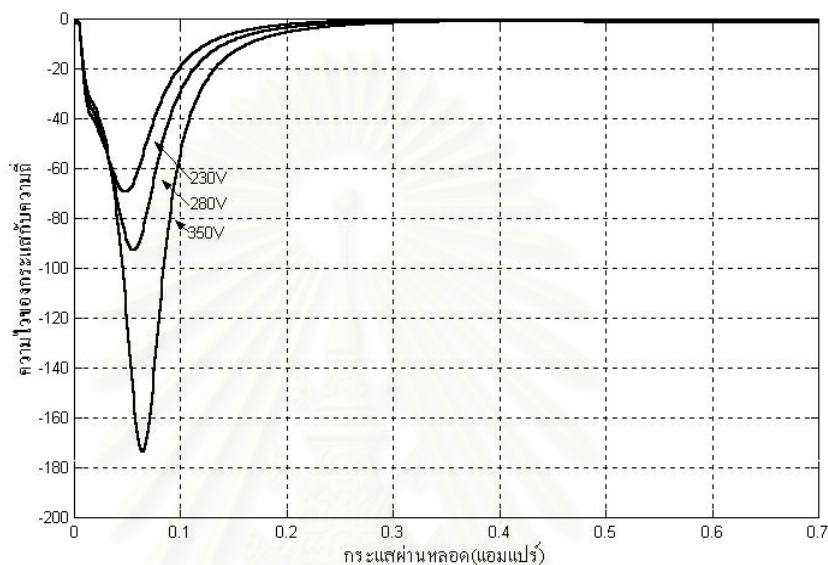


รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านโหลดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากสมการที่ 3.7 สามารถคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านโหลดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ รูปที่ 3.8 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านโหลดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.7 สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้  $L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF และ  $V_{dc}=230V$  280V และ 350V จากกราฟในรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าในย่านความเข้มแสงต่ำ ซึ่งกระแสผ่านโหลดมีค่าระหว่าง 20-200 mA ความเข้มแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเปลี่ยนแปลงกับความถี่รวดเร็วมาก จากการทดลองพบว่าหากขึ้นการเปลี่ยนความถี่มีค่ามากไปในย่านความเข้มของแสงต่ำ จะมีผลทำให้หลอดดับได้ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความไวในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยการควบคุมความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ในย่านความเข้มต่างๆกัน จึงได้คำนวณความไว (Sensitivity)  $s_{f_s}^{I_L}$  ของการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านโหลดกับความถี่ในย่านกระแสออกต่างๆกัน โดยใช้สมการที่ 3.2 และมีการคำนึงถึงผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานหลอดกับความถี่และผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันหลอดกับกระแสผ่านโหลดด้วยได้ค่าของ  $s_{f_s}^{I_L}$  ตามสมการที่ 3.8 [ภาคผนวก ก.6]



$$S_{f_s}^{I_L} = \frac{\partial I_L}{\partial f} \times \frac{f}{I_L} = \frac{\left[ 2\omega^2 LC(1-LC\omega^2) + \frac{\omega}{R} \frac{dR}{d\omega} (1-LC\omega^2)^2 - \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2 \right]}{\left[ (1-LC\omega^2)^2 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2 \right]} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.9 กราฟของความสัมพัทธ์ความไวของกระแสกับความถี่เทียบกับกระแส

รูปที่ 3.9 ค่าของความไวในการปรับกระแสผ่านโหลดด้วยความถี่ที่กระแสออกค่าต่างๆกัน คำนวณได้จากสมการที่ 3.8 สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้  $L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF  $V_{dc}=230V$  280V และ 350V จะเห็นได้ในย่านที่กระแสออกและกำลังออกจากโหลดมีค่ามาก ขนาดความไวในการควบคุมแสงจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อกระแสออกลดลงขนาดความไวในการควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะในย่านที่กระแสออกมีค่าระหว่าง 20-120 mA ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เพียงเล็กน้อย จะมีผลทำให้กระแสผ่านโหลดเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ผลการคำนวณดังกล่าวจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงการลดลงของเสถียรภาพการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในย่านความเข้มแสงต่ำๆอีกอย่างหนึ่ง

### 3.2 แนวทางการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากในย่านความเข้มแสงต่ำความต้านทานพลาสมาด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงมากจนมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานพลาสมาของโหลด ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสออกเปลี่ยนแปลง

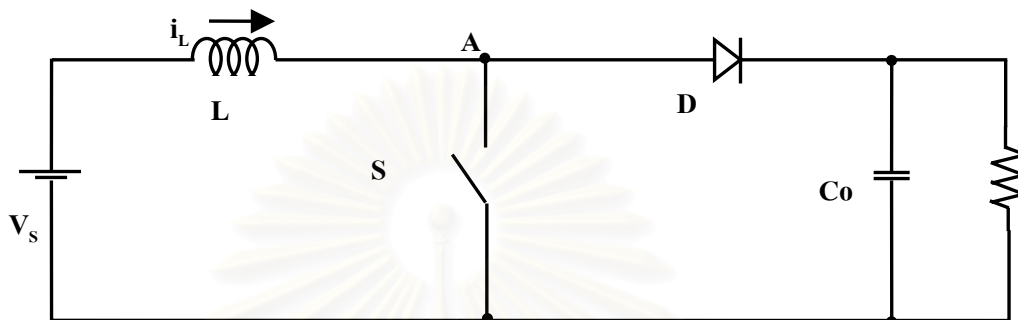
ตามคุณสมบัติของหลอดมากขึ้น นอกจากนั้นความไวในการเปลี่ยนแปลงกระแสออกกับความถี่จะมีค่าสูงกว่าในย่านความถี่กลางและสูงเป็นอย่างมากทำให้เป็นการยากต่อการควบคุมแสงให้มีค่าตามต้องการ ดังนั้นจึงน่าจะเป็นไปได้สูงว่าการลดลงของ  $R_{OB}$  และการเพิ่มขึ้นของความไว  $S_{fs}^L$  เป็นปัจจัยสำคัญต่อปัญหาในการควบคุมแสงในย่านความถี่ต่ำ แนวทางในการแก้ไขนั้นควรจะเพิ่มความละเอียดในการควบคุมปริมาณแสงในช่วงย่านความถี่ต่ำนั้น โดยการลดขนาดของชั้นการปรับความถี่ลงในย่านความถี่ต่ำให้ความละเอียดมากขึ้น

### 3.3 การวิเคราะห์วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้และมีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ร่วมด้วย ซึ่งรูปแบบวงจรจะมี 2 ลักษณะคือแบบ two stage และ single stage การทำงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงได้แบบ two stage นั้นโดยทั่วไปจะมีผลกระทบกระเทือนระหว่างสองวงจรมากกว่ากรณีที่เป็นแบบ single stage การศึกษาวงจรแบบ two stage นั้นจะศึกษาวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) และวงจรควบคุมความถี่ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แยกกัน ส่วนวงจรแบบ single stage จะมีข้อดีที่มีจำนวนสวิตช์ไวงานและวงจรจับนำสวิตช์น้อยลง เนื่องจากวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) จะใช้สวิตช์ไวงานร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงได้ อย่างไรก็ตามการที่บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงได้ใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) แบบ single stage อาจจะมีผลกระทบกระเทือนระหว่างกันของวงจรทั้งสองขณะปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมปริมาณแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ การปรับความถี่อาจมีผลต่อค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบขดคลื่น เป็นต้น จึงต้องนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบเพื่อให้วงจรทำงานอย่างเหมาะสม วงจร single stage ที่เลือกการศึกษานั้นเป็นแบบ Charge pump (Qian, Lee and Yamauchi, 1999) ที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูง ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำ และใช้อุปกรณ์น้อยชิ้น ดังรูปที่ 3.12

โครงสร้างโดยทั่วไปของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย วงจรกรองสัญญาณรบกวน (EMI filter) , วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) , วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC circuit) , วงจรกรองแรงดันไฟตรง (Voltage filter) , วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit) ดังได้กล่าวมาแล้วใน

บทที่ 2 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน ที่ทำหน้าที่ปรับรูปคลื่นของ กระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงกับ (Sine) เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิก และเพิ่มค่าตัวประกอบ กำลัง ส่วนใหญ่ใช้หลักการการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรงแบบทบระดับ ดังรูปที่ 3.10

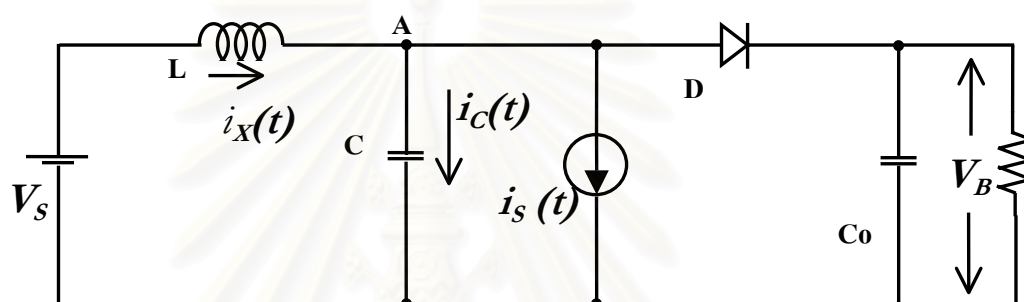


รูปที่ 3.10 วงจรทบระดับ

ลักษณะวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานอาจแบ่งได้ 2 แบบตามลักษณะการต่อ วงจร คือวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ two stage และแบบ single stage วงจรเพิ่มค่าตัว ประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ two stage นั้นใช้สวิตช์ไวงานของวงจร เพิ่มค่าประกอบกำลังแยกกับสวิตช์ไวงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง แบบนี้ ส่วนใหญ่ใช้หลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบทบระดับ (Boost converter) วงจร ทบระดับประกอบด้วย สวิตช์ไวงาน(S) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุด้านออก (Co) ดังแสดง ในรูปที่ 3.10 สวิตช์จะนำกระแสโดยมีวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ที่เหมาะสมเพื่อให้กระแสด้านเข้า มีลักษณะใกล้เคียงกับไซน์ ในช่วงที่สวิตช์ไวงานนำกระแส ศักดาที่จุด A จะลดลงต่ำกว่าแรงดันจากแหล่ง จ่ายไฟตรงด้านเข้า แรงดันจากแหล่งจ่ายจะทำให้กระแสและพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ (L) เพิ่มขึ้น ในช่วงที่สวิตช์ไวงานหยุดนำกระแส จะมีการส่งผ่านพลังงานจากแหล่งจ่ายและพลังงานที่สะสม ในตัวเหนี่ยวนำ (L) ให้กับตัวเก็บประจุ (Co) ด้านออก โดยผ่านไดโอดแบบทำงานเร็ว (fast diode,D) แรงดันออกตกคร่อมตัวเก็บประจุ (Co) ที่มีค่าสูงกว่าแรงดันแหล่งจ่ายด้านเข้า จะทำให้กระแสและ พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ (L) ลดลง

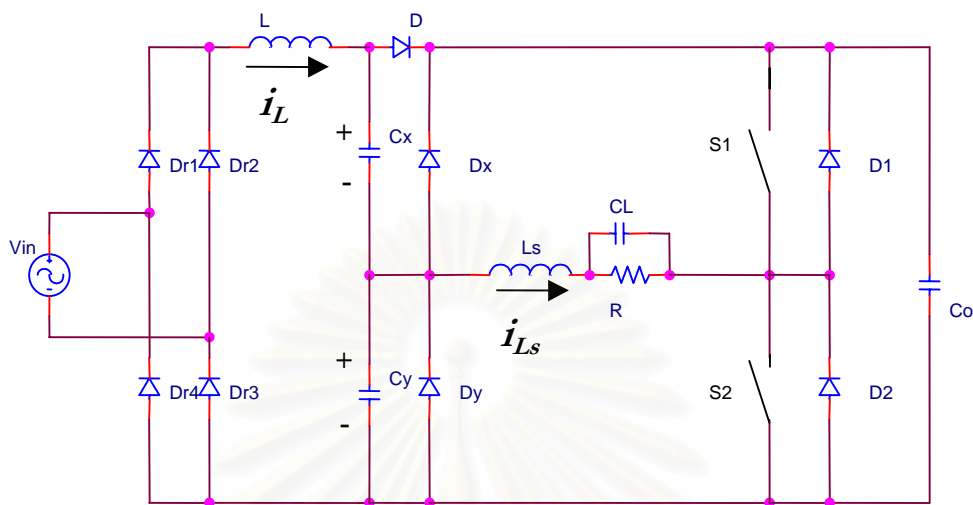
ส่วนวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ single stage ใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไวงานร่วมกับสวิตช์ไวงานของวงจรอิน เวอร์เตอร์ วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบนี้ใช้หลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบ เสมือนทบระดับ (Quasi- boost converter) ตามรูปที่ 3.11 การทำงานของวงจรเสมือนทบอาศัยการ ประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ ( C ) โดยแหล่งกระแส  $i_s$  เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงแรง

ต้นของจุด A เช่นเดียวกับวงจรทบทระดับโดยทั่วไป กล่าวคือในช่วงที่มีการคายประจุของตัวเก็บประจุ ( C ) จนศักดาที่จุด A ต่ำกว่าศักดาที่ด้านออกของแหล่งจ่ายไฟตรง กระแสและพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ (L)จะมีขนาดเพิ่มขึ้น ในช่วงที่ตัวเก็บประจุ ( C ) ถูกประจุจะมีแรงดันสูงกว่าแรงดันด้านออก (Vo) พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ (L) ก็จะจ่ายให้ตัวเก็บประจุด้านออก (Co) โดยผ่านไดโอดแบบทำงานเร็ว (fast diode,D) และแรงดันด้านออกที่มีค่าสูงกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายจะทำให้กระแสและพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำลดลงเช่นเดียวกันกับวงจรทบทระดับโดยทั่วไป



รูปที่ 3.11 วงจรเสมือนทบทระดับ

จะเห็นได้การทำงานของวงจรทบทระดับกับวงจรเสมือนทบทระดับจะเหมือนกัน โดยวงจรทบทระดับจะอาศัยสวิทช์ไวงานเพื่อให้เกิดการสะสมพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ(L) แต่วงจรเสมือนวงจรทบทระดับจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( C ) ที่ถูกประจุและคายประจุโดยแหล่งจ่ายกระแส  $i_s$  เพื่อให้เกิดการสะสมพลังงานและส่งผ่านพลังงานไปยังโหลด แหล่งกระแสที่ใช้ประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ ( C ) ในวงจรทบทระดับที่ใช้เป็นวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะอาศัยกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีลักษณะการต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังกับวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ดังในรูปที่ 3.12 โดยมีการเรียกชื่อว่าเป็นวงจร Charge pump power-factor-correction (Qian, Lee and Yamauchi, 1999) ซึ่งจะทำให้มีลักษณะการทำงานเหมือนกับวงจรสมมูลในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

รูปที่ 3.12 เป็นวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ ลักษณะวงจรเป็นวงจรแบบ charge pump power-factor-correction (Qian, Lee and Yamauchi, 1999) โดย ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ  $C_x$   $C_y$  ก็คือ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ในวงจรรูปที่ 3.11 ส่วนแหล่งกระแส  $i_{L_c}$  จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกระแส  $i_L$  ในวงจรรูปที่ 3.11 เมื่อพิจารณากระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  และ  $C_y$  มีภาคการทำงานได้หลายภาค ซึ่งจะกล่าวเพียง 4 ภาคการทำงานคือ

- ภาคที่ 1 ภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ต่อเนื่อง
- ภาคที่ 2 ภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่ต่อเนื่อง
- ภาคที่ 3 ภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่ต่อเนื่อง
- ภาคที่ 4 ภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่ต่อเนื่อง

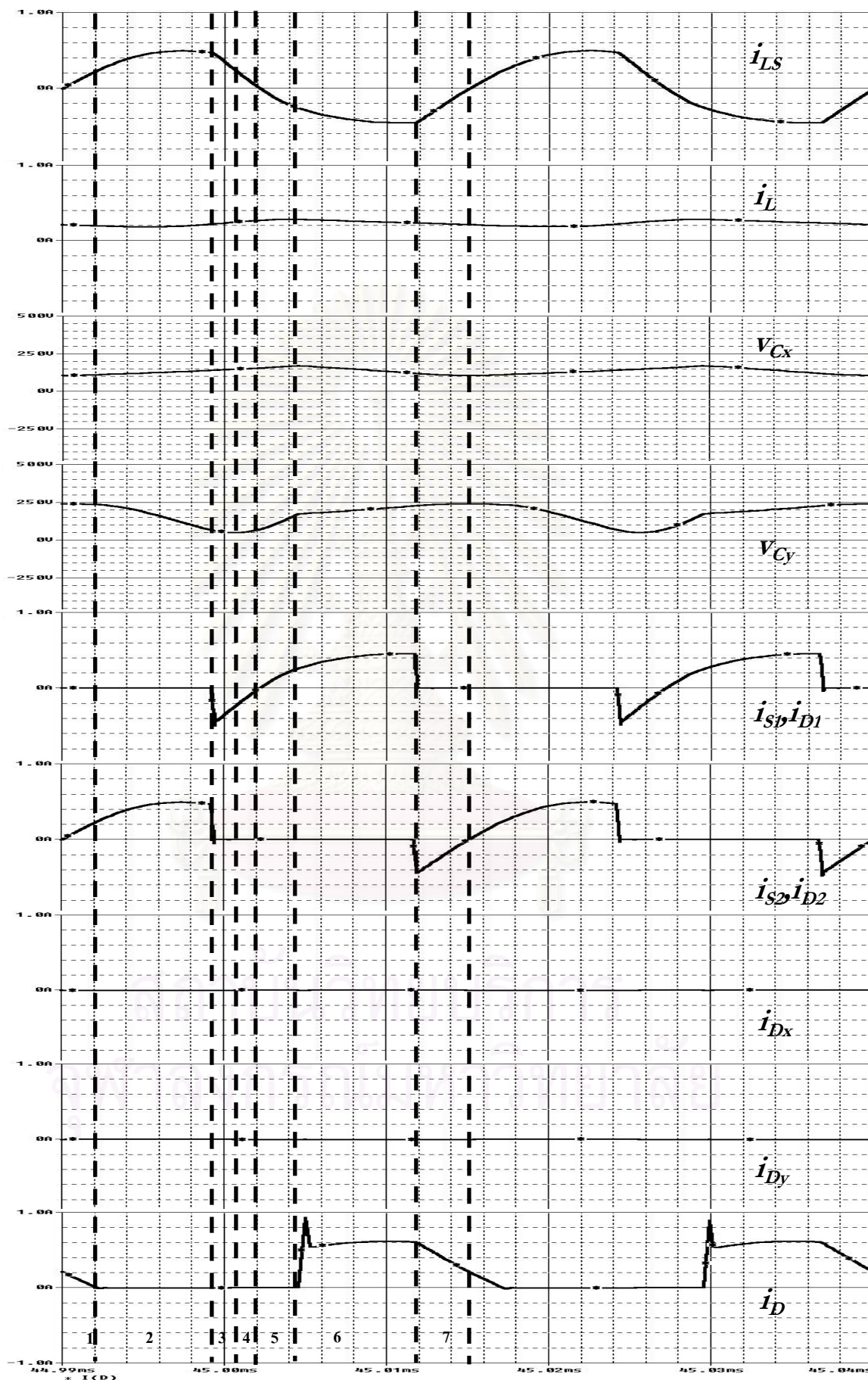
การทำงานในแต่ละภาคจะมีลักษณะการทำงานดังนี้

3.3.1 ภาคที่ 1 ภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cx ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cy ต่อเนื่อง

การทำงานของวงจรในภาคนี้ แบ่งออกเป็น 7 ช่วง ตามสถานะการนำกระแสของสวิตช์ดังในตารางที่ 3.1 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคนี้ มีลักษณะดังในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 ก-ข เป็นรูปวงจรแสดงทิศทางกระแสไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลา

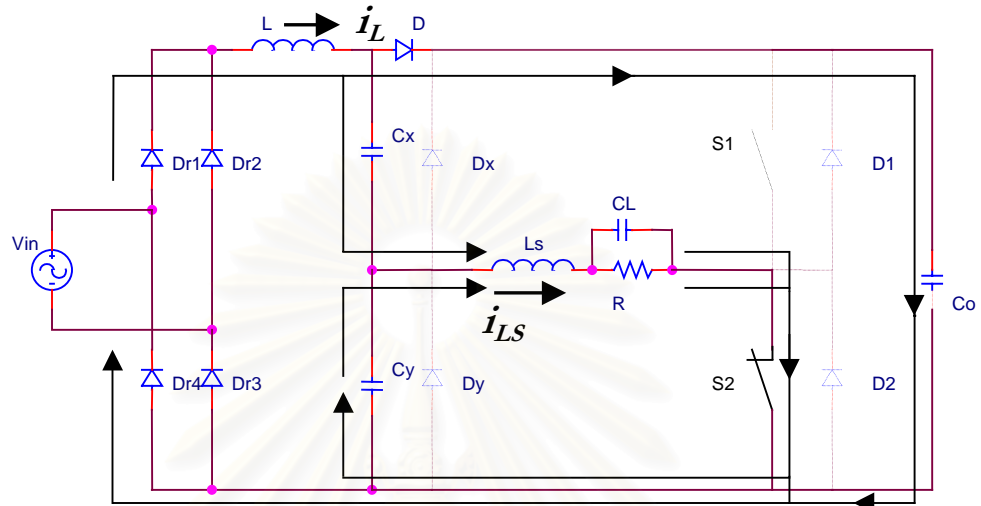
ตารางที่ 3.1 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dr</b>	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
<b>Dx</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>Dy</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D</b>	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
<b>S1</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
<b>D1</b>	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
<b>S2</b>	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D2</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

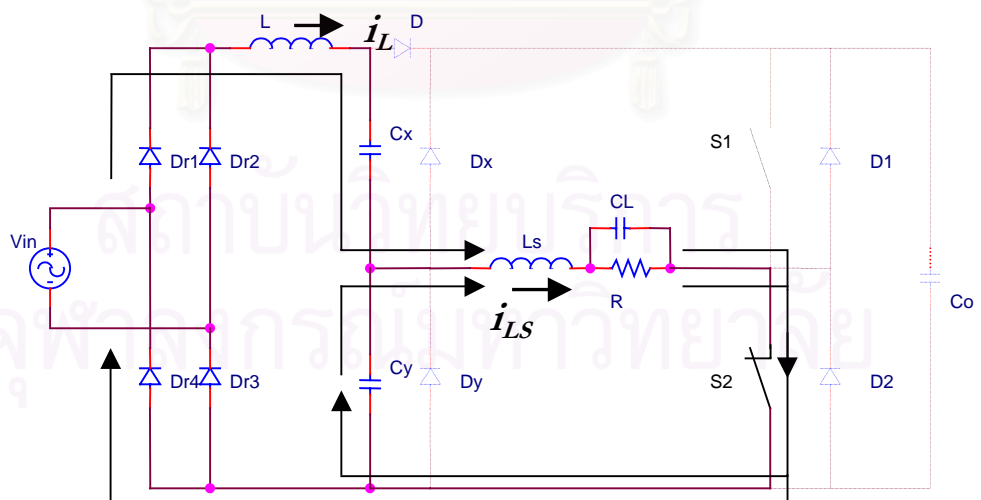


รูปที่ 3.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคที่ 1

จากตารางที่แสดงสภาวะการนำกระแสของสวิตช์ต่างๆ ที่ทำงานในภาคที่ 1 สามารถอธิบายการทำงานในแต่ละช่วงได้ดังนี้

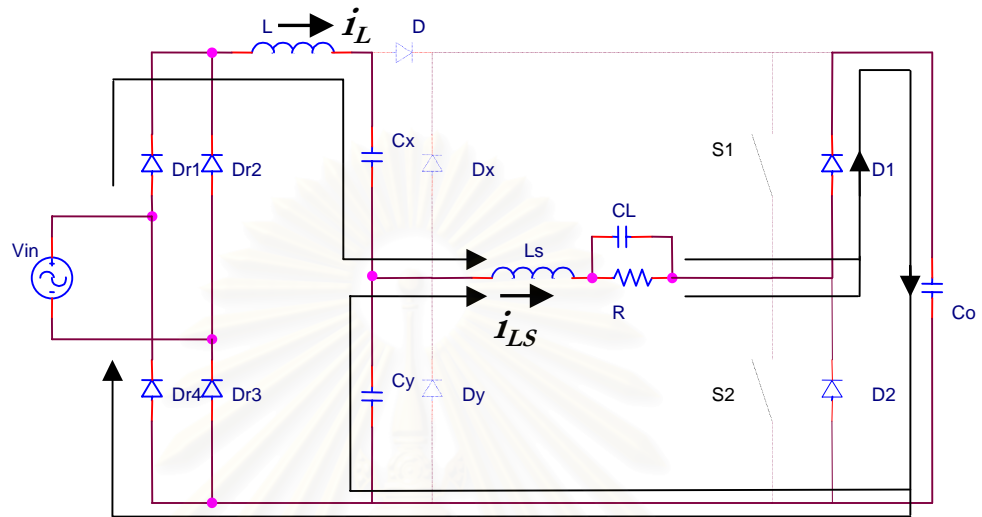


(ก) การทำงานในช่วงที่ 1  $i_{LS} < i_{L,D}$  และ S2 นำกระแส

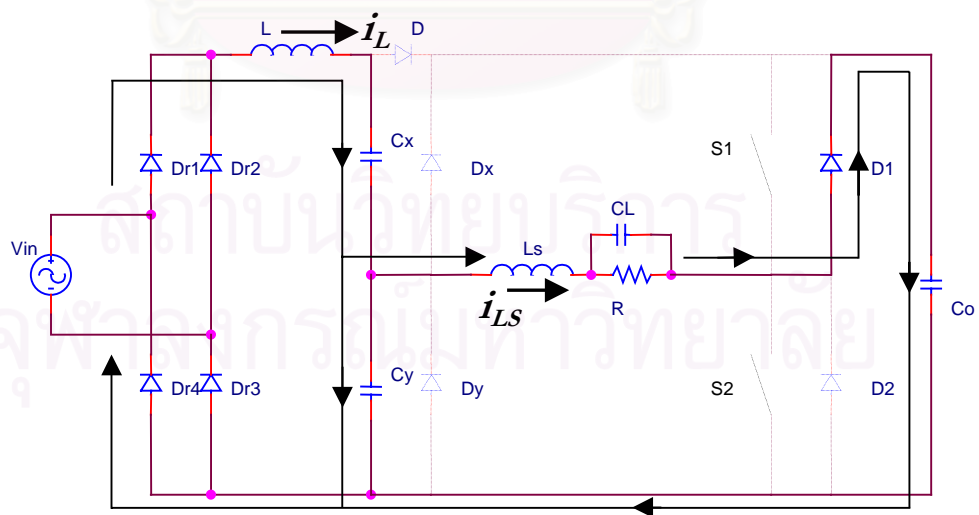


(ข) การทำงานในช่วงที่ 2  $i_{LS} > i_{L,D}$  หยุดนำกระแส

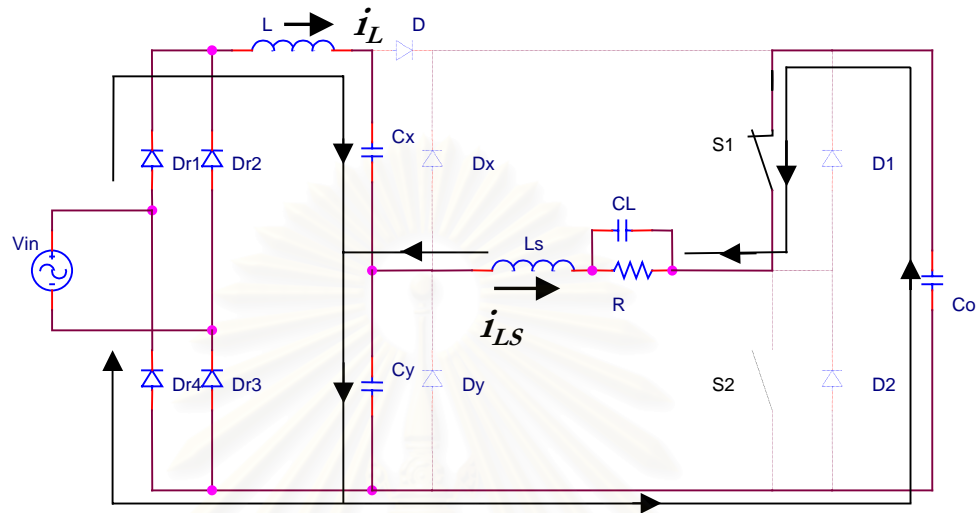




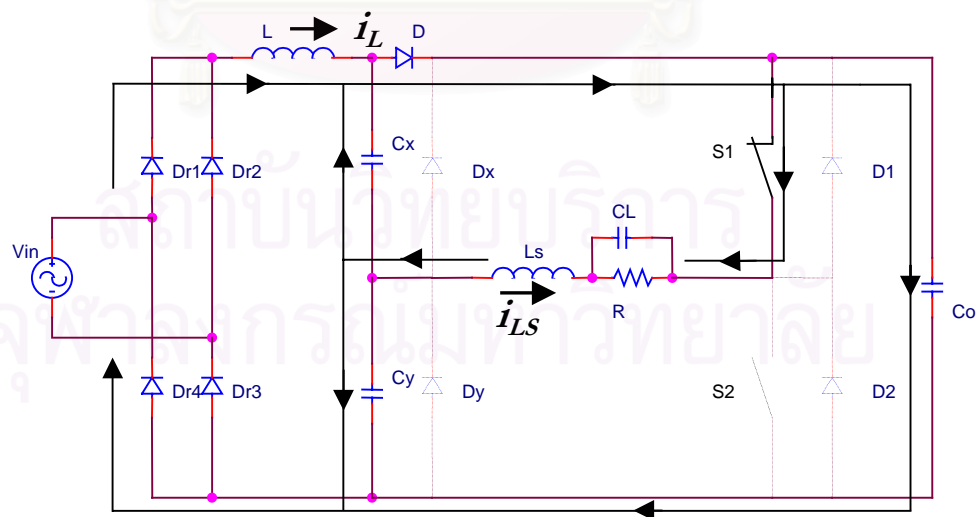
(ค) การทำงานในช่วงที่ 3 S2 หยุดนำกระแส , D1 นำกระแส



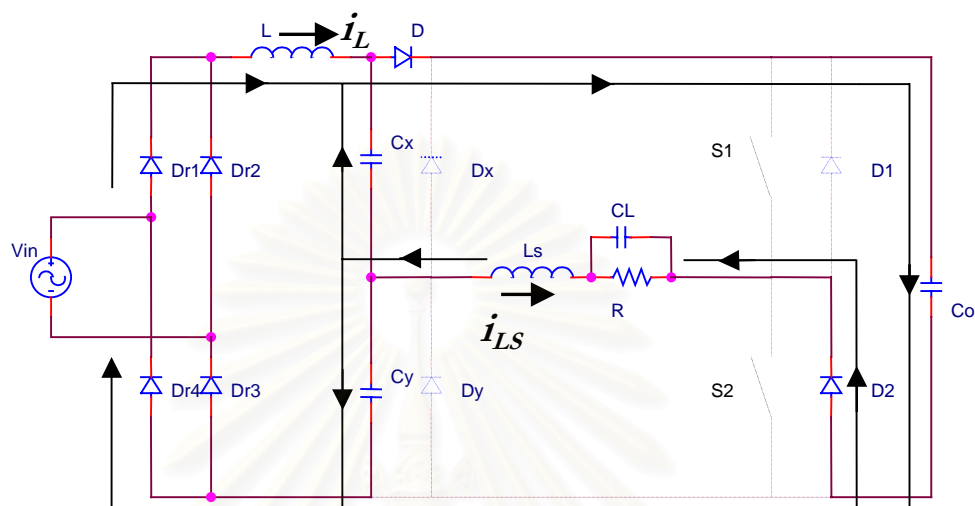
(ง) การทำงานในช่วงที่ 4  $i_{LS} < i_L$ , D1 นำกระแส



(จ) การทำงานในช่วงที่ 5  $i_{LS}$  เปลี่ยนทิศ, S1 นำกระแส, D1 หยุดนำกระแส



(ฉ) การทำงานในช่วงที่ 6  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$



(ข) การทำงานในช่วงที่ 7 S1 หยุดนำกระแส , D2 นำกระแส

รูปที่ 3.14 ก-ข รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 1

- ช่วง 1 : S2 ต่่วงจร ,  $i_{LS} < i_L$  , D นำกระแส

สวิตช์ S2 ต่่วงจร กระแสไหล  $i_{LS}$  ไหลผ่าน S2 เนื่องจาก  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  และกระแส  $i_L$  มีค่ามากกว่ากระแส  $i_{LS}$  ไดโอด D จะนำกระแสผ่านตัวเก็บประจุ  $C_o$  ตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะถูกประจุในขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_y$  จะคายประจุเพื่อให้  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  ผลบวกของกระแสประจุ  $C_x$  และกระแสจากการคายประจุ  $C_y$  จะมีค่าเท่ากับกระแส  $i_{LS}$  กระแสไหลผ่านไดโอด D จะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแสที่ใช้ประจุ  $C_x$

- ช่วง 2 :  $i_{LS} > i_L$  , S2 ต่่วงจร , D หยุดนำกระแส

เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_y$  คายประจุจน  $v_{Cx} + v_{Cy} < v_{Co}$  ไดโอด D หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะถูกประจุโดยกระแส  $i_L$  ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$  จะทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_y$  คายประจุ กระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านวงจรไหลและสวิตช์ S2

- ช่วง 3 :  $i_{LS} > i_L$ , S2 หยุดนำกระแส , D1 นำกระแส

สวิตช์ S2 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  จะไหลผ่านไดโอด D1 ที่ต่อขนานกับ S1 ผ่านตัวเก็บประจุ  $C_0$  ในขณะนั้น  $C_x$  ยังถูกประจุโดยกระแส  $i_L$  กระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_y$  คายประจุ โดยที่กระแสจากการคายประจุ  $C_y$  จะเท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$

- ช่วง 4 :  $i_{LS} < i_L$ ,  $C_y$  ถูกประจุ

เมื่อกระแส  $i_L$  มากกว่ากระแส  $i_{LS}$  ทำให้มีกระแสที่เป็นผลต่างของ  $i_L$  กับ  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_y$  ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_y$  จะถูกประจุ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  จะเพิ่มขึ้น กระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านไดโอด D1 และ ตัวเก็บประจุ  $C_0$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_x$  ยังถูกประจุโดย  $i_L$  ช่วงเวลานี้ สวิตช์ S1 จะถูกขั้วนำแต่กระแสยังคงไหลผ่านไดโอด D1 เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังไม่ไหลกลับทิศ

- ช่วง 5 :  $i_{LS}$  กลับทิศ , S1 นำกระแส , D1 หยุดนำกระแส

เมื่อกระแสไหลกลับ  $i_{LS}$  กลับทิศ กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายจาก D1 ไปไหลผ่านสวิตช์ S1 และ  $C_0$  กระแส  $i_L$  ยังคงมีค่ามากกว่า  $i_{LS}$  ผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_y$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะถูกประจุด้วยกระแสเหนี่ยวนำ  $i_L$  ต่อไป

- ช่วง 6 :  $v_{C_x} + v_{C_y} = v_{C_0}$ , D นำกระแส , S1 นำกระแส

เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_x$  และ  $C_y$  ถูกประจุจนทำให้  $v_{C_x} + v_{C_y} = v_{C_0}$  และกระแส  $i_L$  มากกว่ากระแส  $i_{LS}$  ไดโอด D จะนำกระแสผ่านตัวเก็บประจุ  $C_0$  เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มีค่าลบ ตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะคายประจุในขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_y$  จะถูกประจุ เพื่อให้  $v_{C_x} + v_{C_y} = v_{C_0}$  โดยที่ผลรวมของกระแสที่ประจุ  $C_y$  และกระแสที่คายประจุ  $C_x$  จะมีค่าเท่ากับ  $-i_{LS}$  กระแสผ่านไดโอด D เป็นผลรวมของกระแส  $i_L$  และกระแสคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_x$  กระแสที่ประจุ  $C_0$  เท่ากับผลบวกของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$

- ช่วง 7 : S1 หยุดนำกระแส , D2 นำกระแส

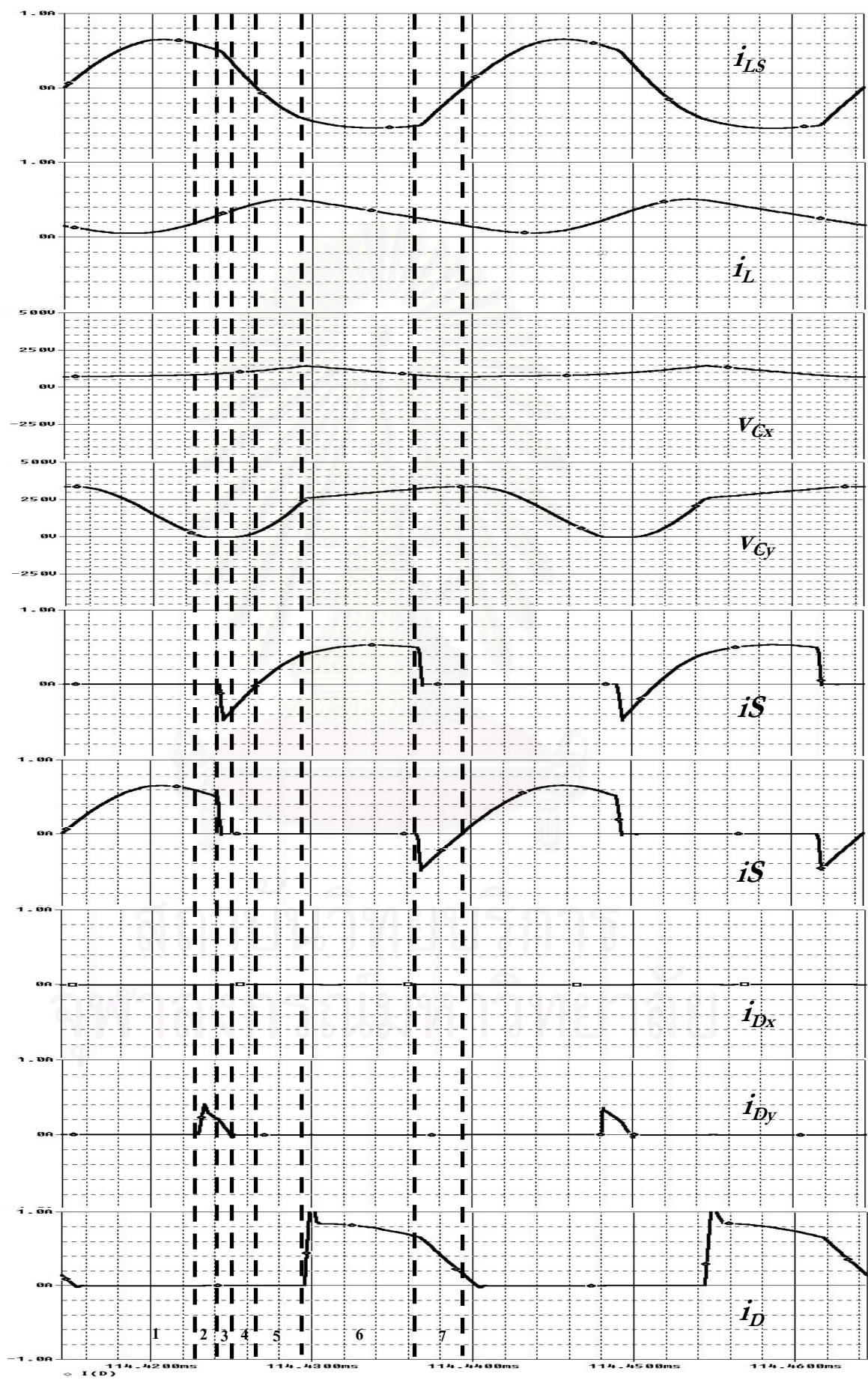
เมื่อสวิตช์ S1 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายจาก S1 มาไหลผ่าน D2 กระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_x$  ไดโอด D และตัวเก็บประจุ  $C_0$  กระแสที่เกิดจากการคายประจุตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะเท่ากับผลต่างของ  $i_{LS}$  กับกระแสที่ใช้ประจุตัวเก็บประจุ  $C_y$  ตัวเก็บประจุ  $C_y$  จะถูกประจุโดยกระแส  $i_L$

3.3.2 ภาคที่ 2 ภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่ต่อเนื่อง

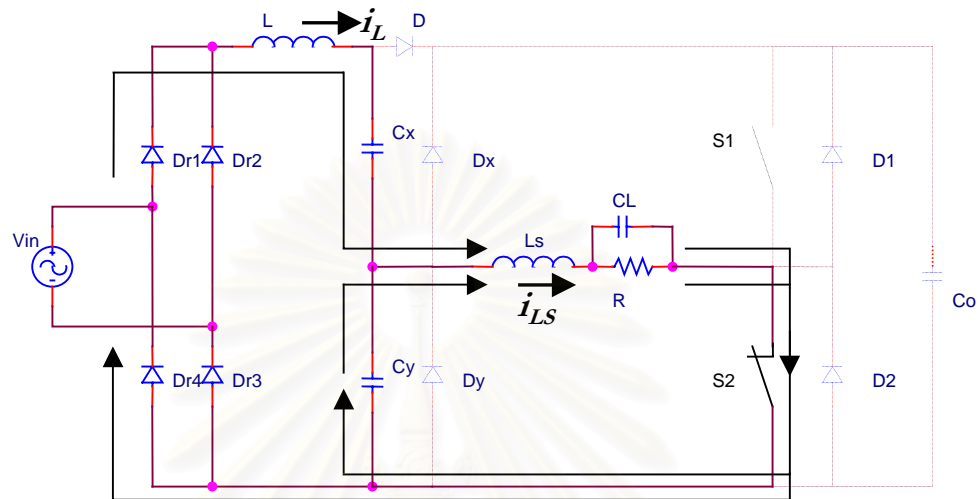
การทำงานของวงจรในภาคนี้ออกเป็น 7 ช่วง ตามสถานะการนำกระแสของสวิตช์ตั้งในตารางที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคนี้อมีลักษณะดังในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 ก-ข เป็นรูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 3.2 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 2

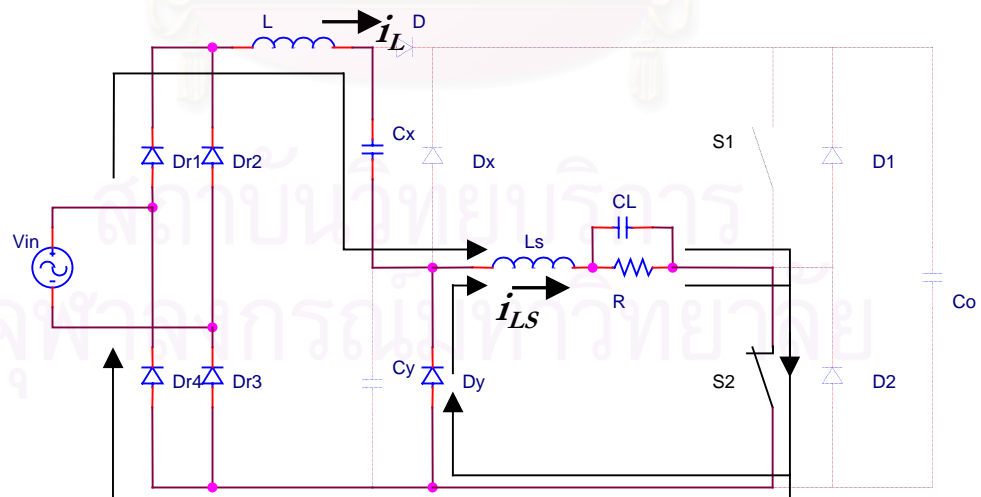
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Dr</b>	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
<b>Dx</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>Dy</b>	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
<b>S1</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
<b>D1</b>	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
<b>S2</b>	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D2</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON



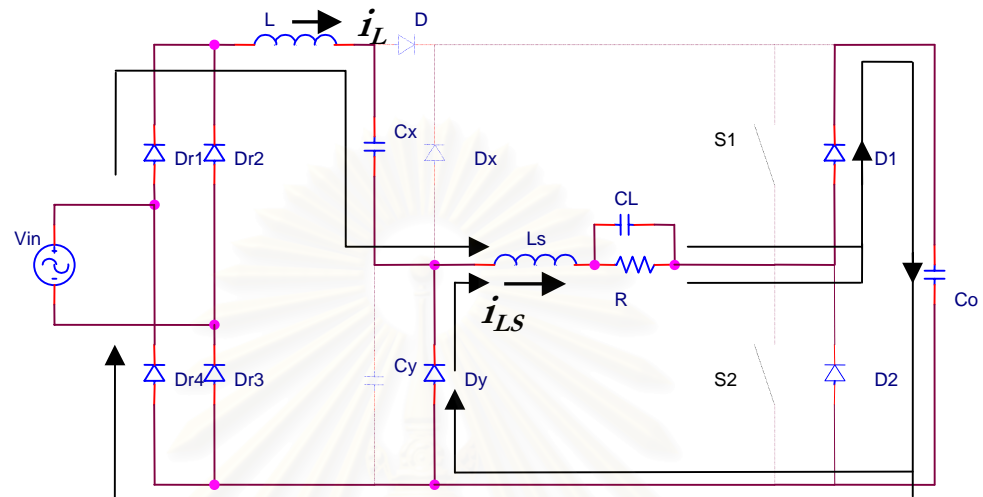
จากตารางที่แสดงสภาวะการนำกระแสของสวิตช์ต่างๆ ที่ทำงานในภาคที่ 2 สามารถอธิบายการทำงานในแต่ละช่วงได้ดังนี้



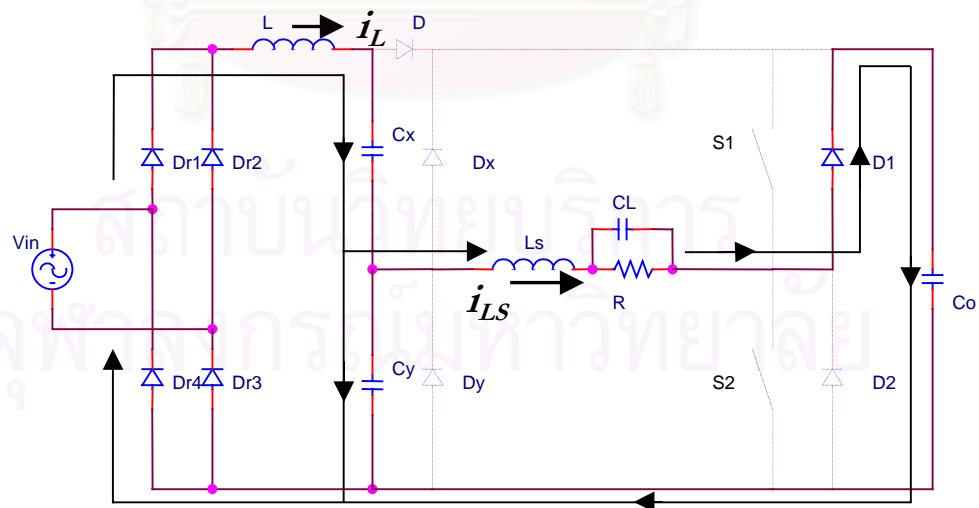
(ก) การทำงานในช่วงที่ 1  $i_{LS} > i_L, v_{Cy} > 0$ , S2 นำกระแส



(ข) การทำงานในช่วงที่ 2  $i_{LS} > i_L, v_{Cy} = 0$

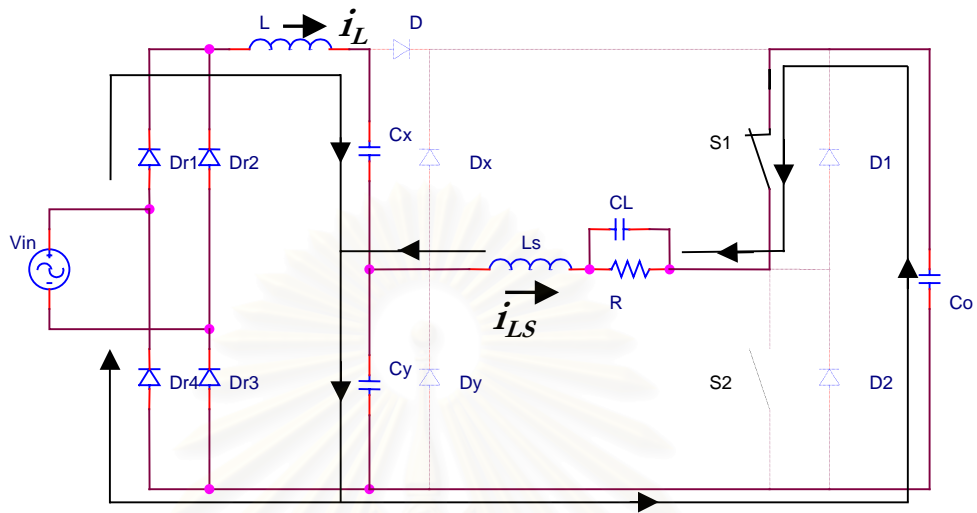


(ค) การทำงานในช่วงที่ 3  $i_{LS} > i_L$ , S2 หยุดนำกระแส, D1 นำกระแส

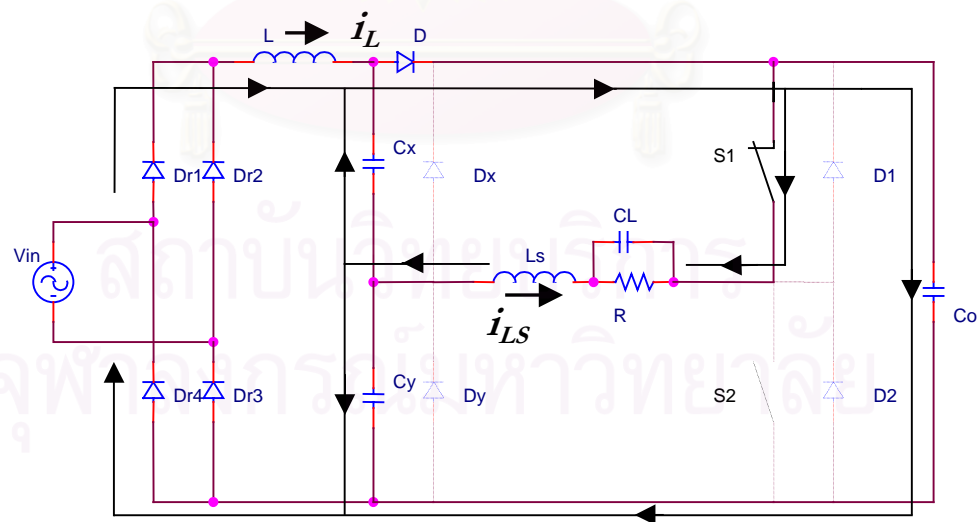


(ง) การทำงานในช่วงที่ 4  $i_{LS} < i_L$ , Dy หยุดนำกระแส

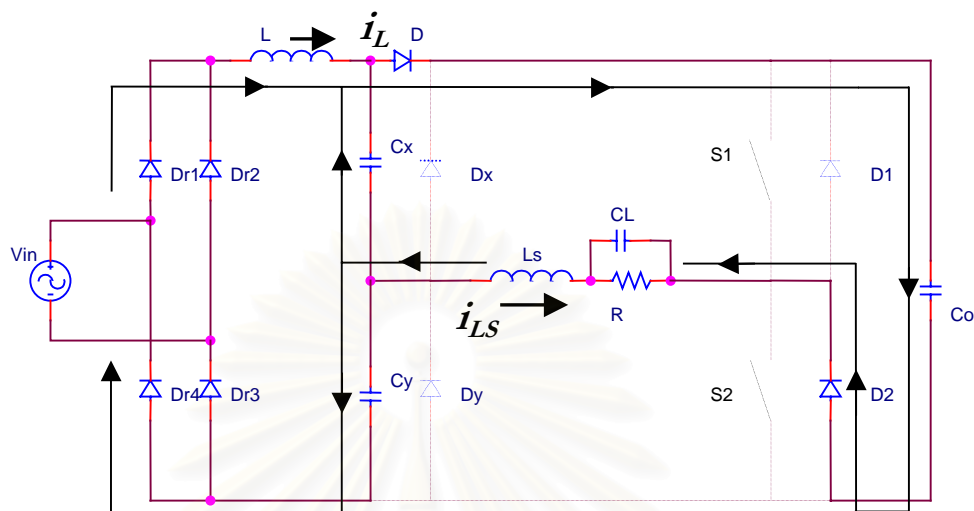




จ) การทำงานในช่วงที่ 5  $i_{LS} < 0$ , S1 นำกระแส



ฉ) การทำงานในช่วงที่ 6  $i_{LS} < 0, v_{Cx} + v_{Cy} > v_o$ , D นำกระแส



(ข) การทำงานในช่วงที่ 7  $i_{LS} < 0, v_{Cx} + v_{Cy} > v_o$ , S1 หยุดนำกระแส, D2 นำกระแส

รูปที่ 3.16 ก-ข รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 2

- ช่วง 1 :  $i_{LS} > i_L$ , S2 ต่อดวงจร

สวิตช์ S2 ต่อดวงจร กระแสไหล  $i_{LS}$  ไหลผ่านสวิตช์ S2 ตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะถูกประจุ โดยกระแส  $i_L$  ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$  จะทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_y$  คายประจุ ผลบวกของกระแสประจุ  $C_x$  และกระแสจากการคายประจุ  $C_y$  จะมีค่าเท่ากับกระแส  $i_{LS}$

- ช่วง 2 :  $D_y$  นำกระแส,  $v_{Cy}=0$

สวิตช์ S2 ยังคงนำกระแส เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_y$  คายประจุจนหมดแรงดันคร่อม  $C_y$  ลดลงเป็นศูนย์ เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังมากกว่ากระแส  $i_L$  กระแสจะไหลผ่านไดโอด  $D_y$  ในขณะนั้น  $C_x$  ยังถูกประจุด้วยกระแส  $i_L$  โดยที่กระแส  $i_{LS}$  จะเท่ากับผลรวมของกระแส  $i_L$  และกระแสที่ไหลผ่านไดโอด  $D_y$

- ช่วง 3 : S2 เปิดวงจร,  $D_1$  นำกระแส

สวิตช์ S2 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  ที่เคยไหลผ่าน S1 จะย้ายไปไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_o$  เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ดังนั้นจึงยังคงมีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_y$  ในขณะนั้น  $C_x$  ยังถูกประจุด้วยกระแส  $i_L$  ต่อไป โดยที่กระแส  $i_{LS}$  จะเท่ากับผลรวมของกระแส  $i_L$  กับกระแสที่ไหลผ่านไดโอด  $D_y$

- ช่วง 4 Dy หยุดนำกระแส

เมื่อกระแส  $i_{LS}$  ลดลงจนมีค่าเท่ากับกระแส  $i_L$  ไดโอด Dy จะหยุดนำกระแสและเมื่อกระแส  $i_{LS}$  มีค่าต่ำกว่า  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$  จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cy ทำให้ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุใหม่ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ Cy จะเพิ่มขึ้น กระแส  $i_{LS}$  ยังคงไหลผ่านไดโอด D1 และตัวเก็บประจุ Co ในขณะที่ Cx ยังถูกประจุโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $i_L$  ในช่วงเวลานี้ S1 จะถูกขับให้สามารถนำกระแสได้ แต่กระแสยังคงไหลผ่าน D1 เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังไม่ไหลกลับทิศ

- ช่วง 5 :  $i_{LS}$  กลับทิศ , S1 ต่อย่างจร

เมื่อกระแสไหล  $i_{LS}$  กลับทิศ กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายไปไหลผ่านสวิตช์ S1 และ Co กระแส  $i_L$  ยังคงมีค่ามากกว่า  $i_{LS}$  ทำให้ตัวเก็บประจุ Cy ยังคงถูกประจุอยู่ โดยที่กระแสที่ใช้ประจุตัวเก็บประจุ Cy เป็นผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$  ส่วนตัวเก็บประจุ Cx จะถูกประจุด้วยกระแส  $i_L$  ต่อไป

- ช่วง 6 :  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$ , D นำกระแส , S1 นำกระแส

เมื่อตัวเก็บประจุ Cx และ Cy ถูกประจุจน  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  และกระแส  $i_L$  มากกว่า กระแส  $i_{LS}$  ไดโอด D จะนำกระแสผ่านตัวเก็บประจุ Co เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มีค่าลบ ตัวเก็บประจุ Cx จะคายประจุในขณะที่ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุ เพื่อให้  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  โดยที่ผลรวมของกระแสที่ประจุ Cy และกระแสที่คายประจุ Cx จะมีค่าเท่ากับ  $-i_{LS}$  กระแสผ่านไดโอด D เป็นผลรวมของกระแส  $i_L$  และกระแสคายประจุของตัวเก็บประจุ Cx กระแสที่ประจุ Co เท่ากับผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$

- ช่วง 7 : S1 หยุดนำกระแส , D2 นำกระแส

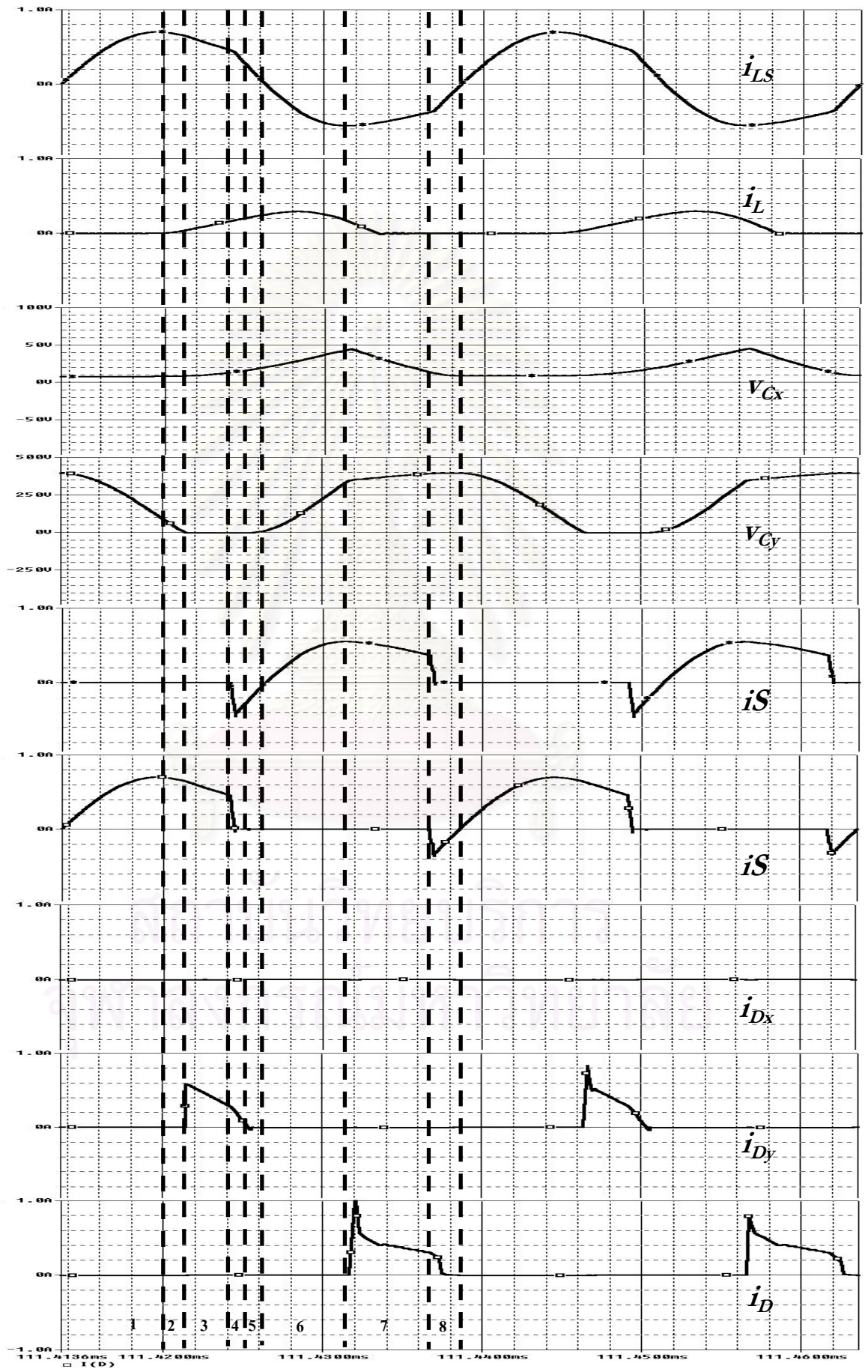
เมื่อสวิตช์ S1 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายจาก S1 มาไหลผ่าน D2 กระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cx ไดโอด D และตัวเก็บประจุ Co กระแสที่เกิดการจากคายประจุตัวเก็บประจุ Cx จะเท่ากับผลต่างของ  $i_{LS}$  กับกระแสที่ใช้ประจุตัวเก็บประจุ Cy ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุโดยกระแส  $i_L$

3.3.3 ภาคที่ 3 การทำงานภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cx ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cy ไม่ต่อเนื่อง

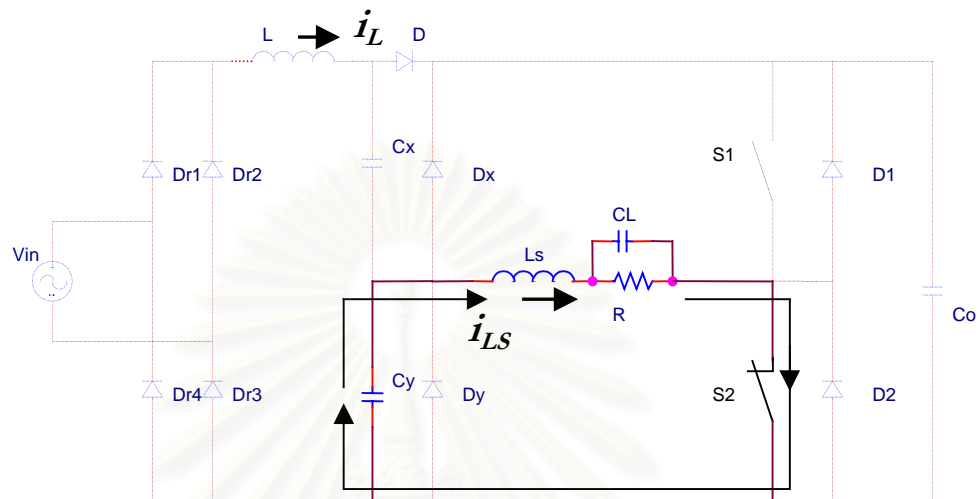
การทำงานของวงจรในภาคนี้ แบ่งออกเป็น 9 ช่วง ตามสถานะการนำกระแสของสวิตช์ดังในตารางที่ 3.3 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคนี้ มีลักษณะดังในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 ก-ฉ เป็นรูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 3.3 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 3

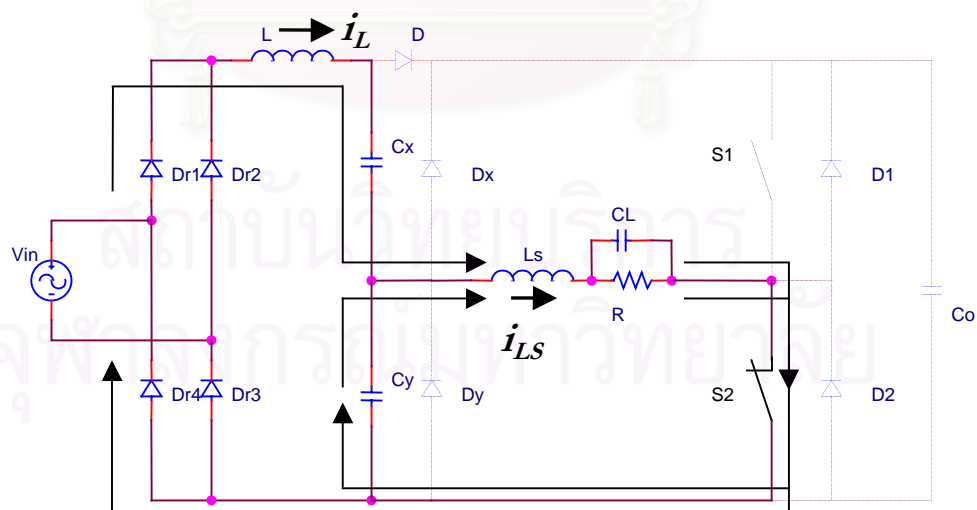
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Dr</b>	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
<b>Dx</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>Dy</b>	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
<b>S1</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
<b>D1</b>	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>S2</b>	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D2</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON



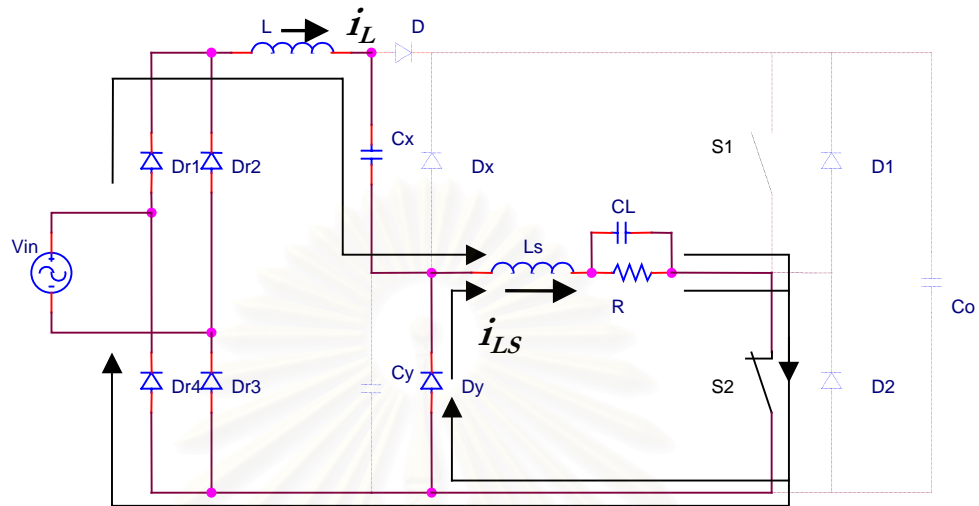
จากตารางที่แสดงสภาวะการนำกระแสของสวิตช์ต่างๆ ที่ทำงานในภาคที่ 3 สามารถอธิบายการทำงานในแต่ละช่วงได้ดังนี้



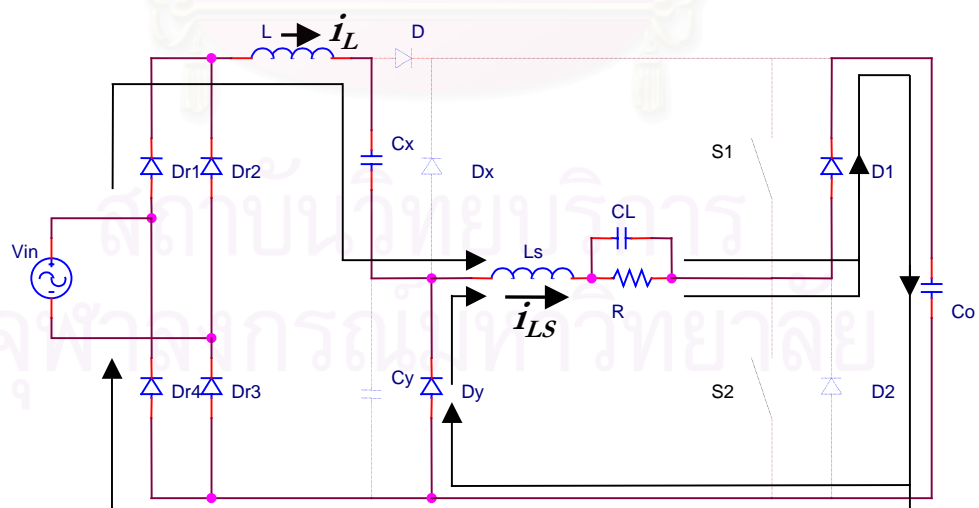
(ก) การทำงานในช่วงที่ 1  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$ , S2 นำกระแส



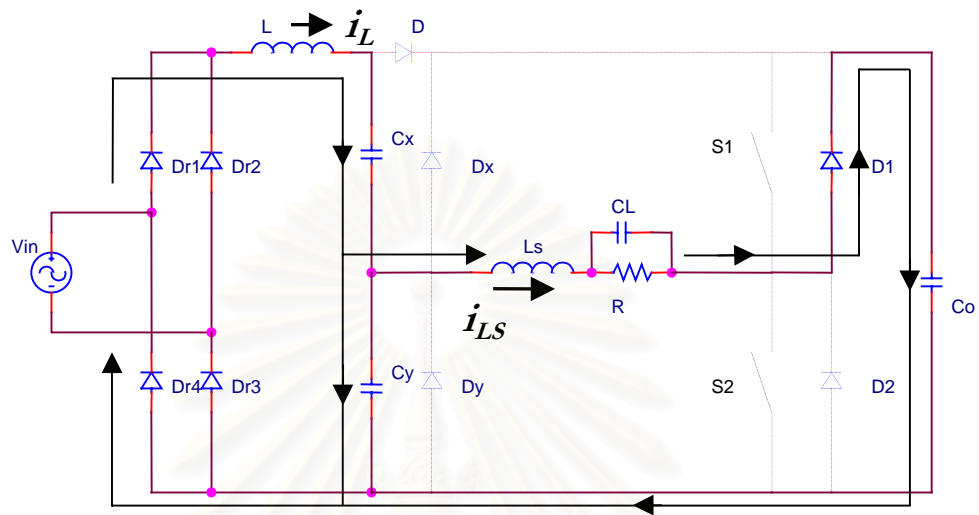
(ข) การทำงานในช่วงที่ 2  $i_{LS} > i_L, v_{Cy} > 0$ , S2 นำกระแส



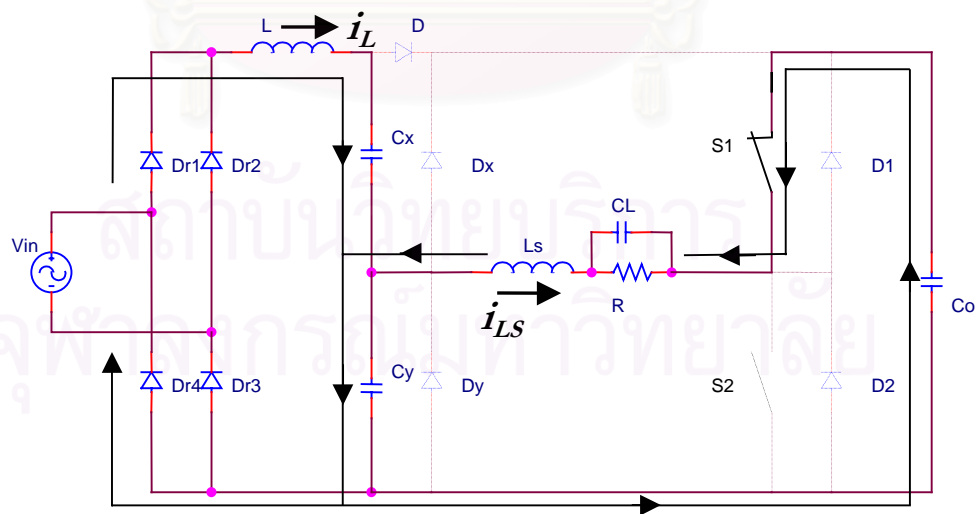
(ค) การทำงานในช่วงที่ 3  $i_{LS} > i_L, v_{Cy} = 0$



(ง) การทำงานในช่วงที่ 4  $v_{Cx} + v_{Cy} < v_{in}, i_{LS} > i_L, S2$  หยุคนำกระแส,  $D1$  นำกระแส

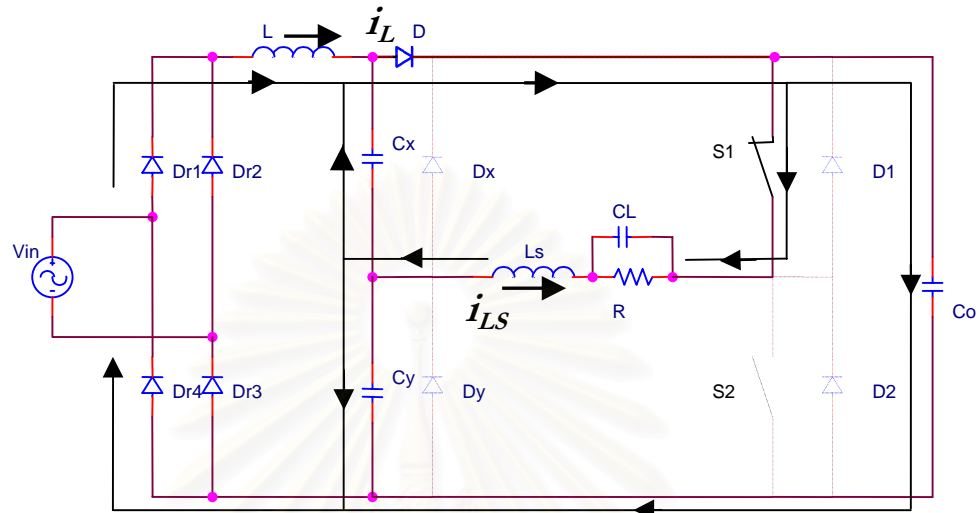


(จ) การทำงานในช่วงที่ 5  $i_{LS} < i_L$ ,  $D_y$  หยุคนำกระแส

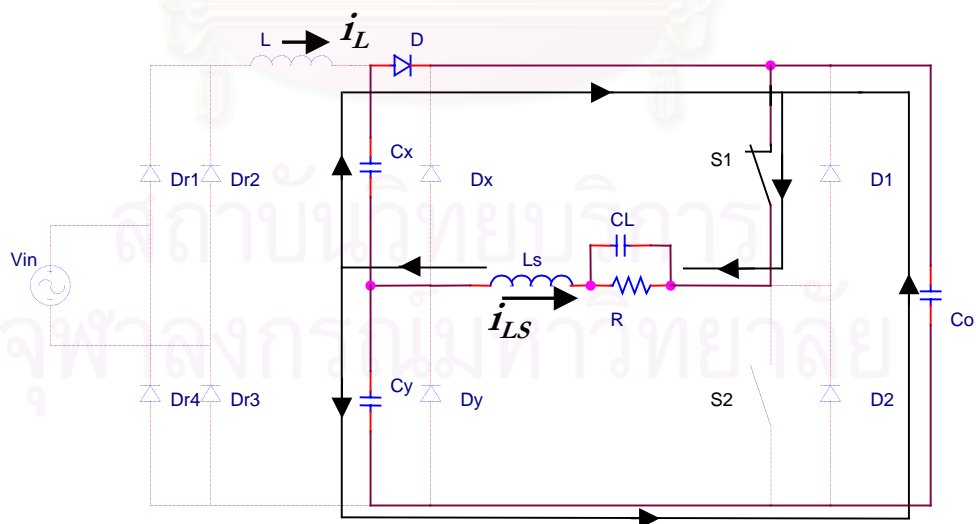


(ข) การทำงานในช่วงที่ 6  $i_{LS} < 0$ ,  $S_1$  นำกระแส

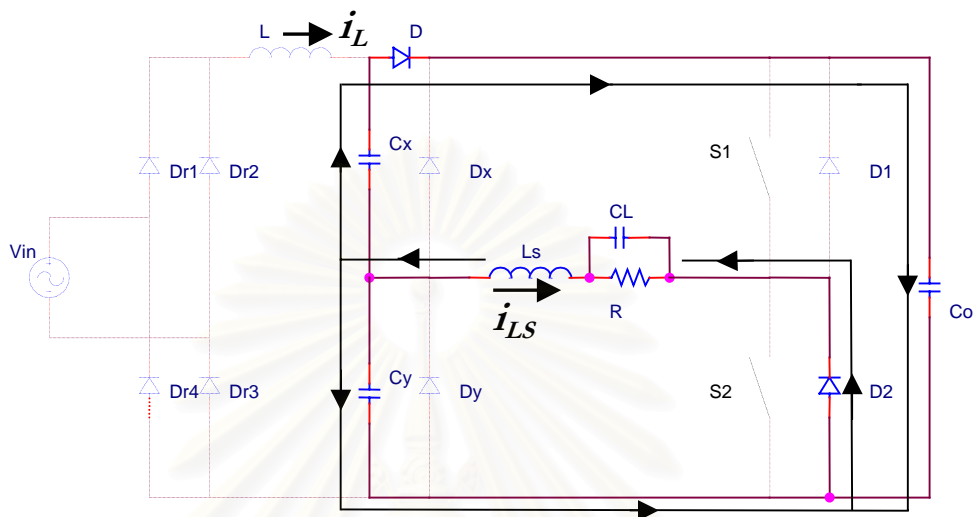




(๗) การทำงานในช่วงที่ 7  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$ , D นำกระแส, S1 นำกระแส



(๘) การทำงานในช่วงที่ 8  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$ , กระแส  $i_L$  หยุดไหล, D นำกระแส



(ฉ) การทำงานในช่วงที่ 9 S1 หยุดนำกระแส , D2 นำกระแส

รูปที่ 3.18 ก-ฉ รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 3

- ช่วง 1 :  $v_{CO} > v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$ , S2 นำกระแส, กระแส  $i_L$  เท่ากับ 0, D ไม่นำกระแส

กระแส  $i_L$  เท่ากับ 0,  $v_{CO} > v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$  ทำให้ไม่มีกระแส  $i_L$  ไหล ไดโอด D ไม่นำกระแส ในช่วงนี้สวิตช์ S2 ต่่วงจร ตัวเก็บประจุ  $C_y$  จะคายประจุผ่านสวิตช์ S2 ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ลดลง กระแส  $i_{LS}$  เท่ากับกระแสจากการคายตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่มีกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_x$

- ช่วง 2 :  $v_{CO} > v_{in} > v_{Cx} + v_{Cy}$ ,  $i_{LS} > i_L$ , S2 ต่่วงจร, กระแส  $i_L$  เริ่มไหล

เมื่อ  $v_{in} > v_{Cx} + v_{Cy}$  กระแส  $i_L$  เริ่มไหลแต่  $v_{Cx} + v_{Cy} < v_{CO}$  ไดโอด D จะไม่นำกระแส ตัวเก็บประจุ  $C_x$  จะถูกประจุโดยกระแส  $i_L$  ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$  จะทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_y$  คายประจุผ่านวงจรไหลและสวิตช์ S2 โดยกระแส  $i_{LS}$  จะเป็นผลรวมของกระแส  $i_L$  และกระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_y$

- ช่วง 3 : Dy นำกระแส,  $v_{Cy}=0$

เมื่อตัวเก็บประจุ Cy คายประจุจนหมดแรงดันคร่อม Cy ลดลงเป็นศูนย์ กระแสจะไหลผ่านไดโอด Dy สวิตช์ S2 ยังคงนำกระแส เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังมากกว่ากระแส  $i_L$  ในขณะนั้น Cx ยังถูกประจุด้วยโดยกระแส  $i_L$  โดยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D เท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$

- ช่วง 4 : S2 เปิดวงจร . D1 นำกระแส

สวิตช์ S2 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  ที่เคยไหลผ่าน S1 จะย้ายไปไหลผ่านไดโอด D1 ซึ่งเป็นไดโอดคู่ประกอบของ S1 และตัวเก็บประจุ Co เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ดังนั้นจึงยังคงมีกระแสไหลผ่านไดโอด Dy ในขณะนั้น Cx ยังถูกประจุโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $i_L$  ต่อไป โดยที่กระแสที่ไหลผ่านไดโอด Dy เท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$

- ช่วง 5 Dy หยุดนำกระแส

เมื่อกระแส  $i_{LS}$  ลดลงจนมีค่าเท่ากับกระแส  $i_L$  Dy จะหยุดนำกระแสและเมื่อกระแส  $i_{LS}$  มีค่าต่ำกว่า  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cy ทำให้ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุใหม่ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ Cy จะเพิ่มขึ้น กระแส  $i_{LS}$  ยังคงไหลผ่านไดโอด D1 และตัวเก็บประจุ Co ในขณะนั้น Cx ยังถูกประจุโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $i_L$  ในช่วงเวลานี้ S1 จะถูกขับให้สามารถนำกระแสได้ แต่กระแสยังคงไหลผ่าน D1 เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังไม่ไหลกลับทิศ

- ช่วง 6 :  $i_{LS}$  กลับทิศ , S1 นำกระแส

เมื่อกระแสไหลกลับ  $i_{LS}$  กลับทิศ กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายไปไหลผ่านสวิตช์ S1 และ Co กระแส  $i_L$  ยังคงมีค่ามากกว่า  $i_{LS}$  ผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cy ส่วนตัวเก็บประจุ Cx จะถูกประจุด้วยกระแส  $i_L$  ต่อไป

- ช่วง 7 :  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  , D นำกระแส , S1 นำกระแส

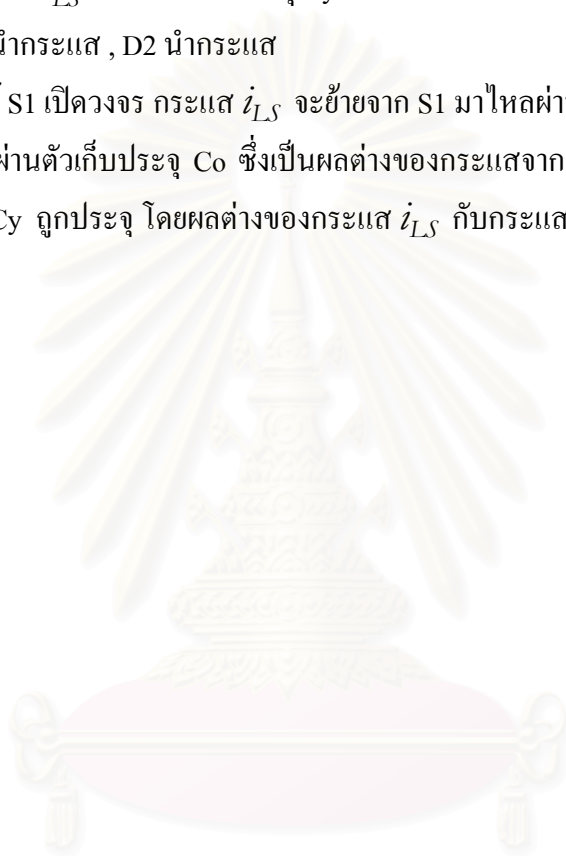
เมื่อตัวเก็บประจุ Cx และ Cy ถูกประจุจนทำให้  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  และกระแส  $i_L$  มากกว่ากระแส  $i_{LS}$  ไดโอด D จะนำกระแสผ่านตัวเก็บประจุ Co เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มีค่าลบ ตัวเก็บประจุ Cx จะคายประจุในขณะที่ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุ เพื่อให้  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  โดยที่ผลรวมของกระแสที่ประจุ Cy และกระแสที่คายประจุ Cx จะมีค่าเท่ากับ  $-i_{LS}$  กระแสผ่านไดโอด D เป็นผลรวมของกระแส  $i_L$  และกระแสคายประจุของตัวเก็บประจุ Cx กระแสที่ประจุ Co เท่ากับผลบวกของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$

- ช่วง 8 :  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{Co}$  , กระแส  $i_L$  หยุดไหล ,D นำกระแส

$v_{Cx} + v_{Cy} > v_{Co}$  จะทำให้กระแส  $i_L$  หยุดไหล โดยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D ก็คือผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $Co$  กระแสที่ประจุ  $Cy$  คือกระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $Co$  ตัวเก็บประจุ  $Cx$  จะคายประจุโดยมีกระแสออกเท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแสที่ประจุ  $Cy$

- ช่วง 9 : S1 หยุดนำกระแส , D2 นำกระแส

เมื่อสวิตช์ S1 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายจาก S1 มาไหลผ่าน D2 กระแสไหลผ่านไดโอด D คือกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $Co$  ซึ่งเป็นผลต่างของกระแสจากการประจุ  $Cy$  กับกระแส  $i_{LS}$  และตัวเก็บประจุ  $Cy$  ถูกประจุ โดยผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแสจากการคายประจุ  $Cx$



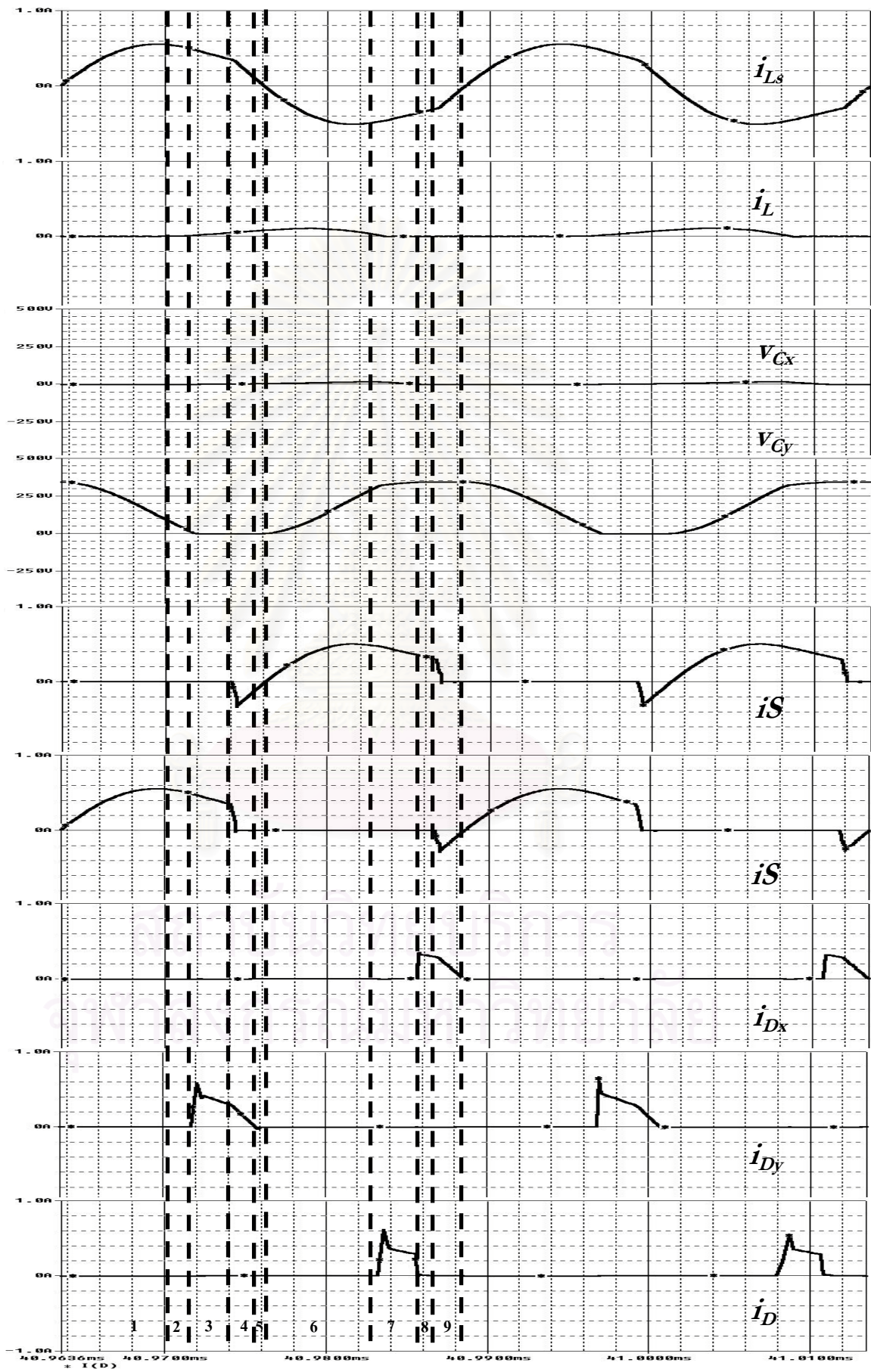
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.4 ภาคที่ 4 การทำงานภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่ต่อเนื่อง

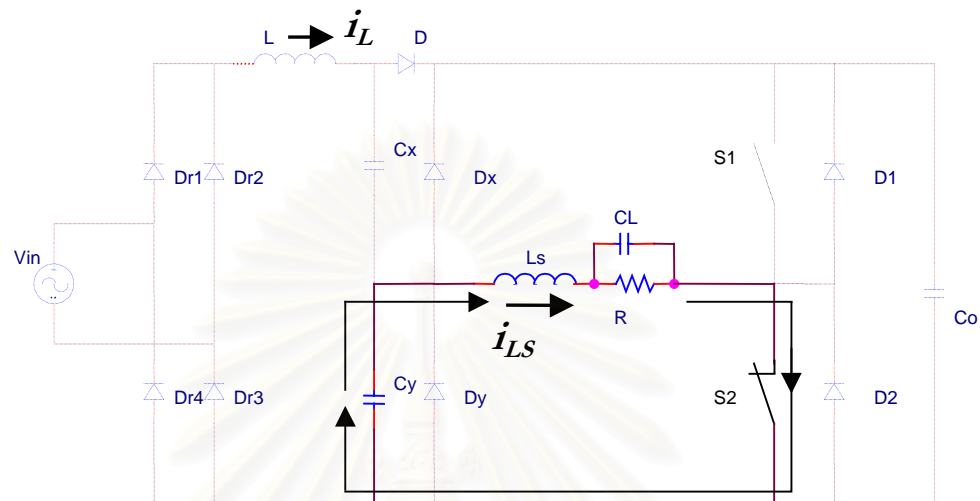
การทำงานของวงจรในภาคนี้ออกเป็น 10 ช่วง ตามสถานะการนำกระแสของสวิตช์ตั้งในตารางที่ 3.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันต่างๆของวงจรที่ทำงานในภาคนี้อมีลักษณะดังในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 ก-ญ เป็นรูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 3.4 สถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อวงจรทำงานในภาคที่ 4

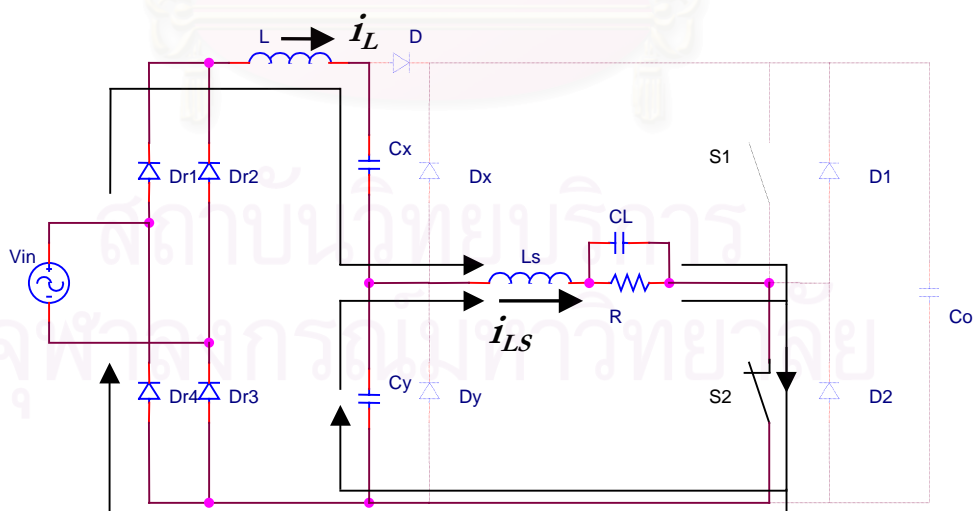
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Dr</b>	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
<b>Dx</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
<b>Dy</b>	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
<b>S1</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF
<b>D1</b>	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>S2</b>	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>D2</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON



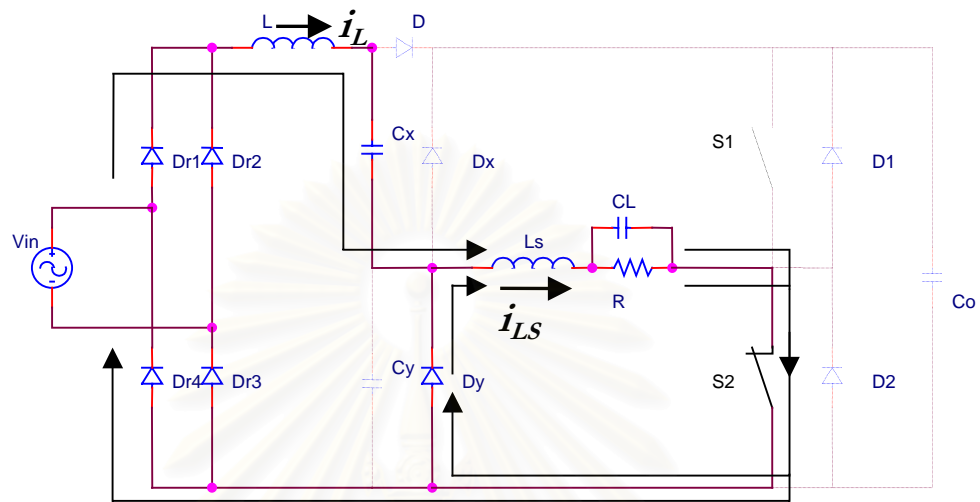
จากตารางที่แสดงสภาวะการนำกระแสของสวิตช์ต่างๆ ที่ทำงานในภาคที่ 4 สามารถอธิบายการทำงานในแต่ละช่วงได้ดังนี้



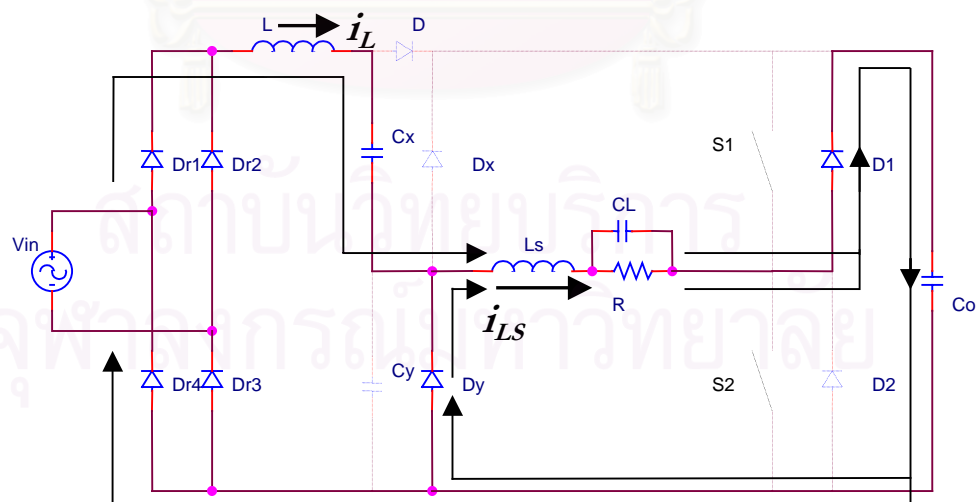
(ก) การทำงานในช่วงที่ 1  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$ , S2 นำกระแส



(ข) การทำงานในช่วงที่ 2  $i_{LS} > i_L, v_{Cy} > 0$ , S2 นำกระแส

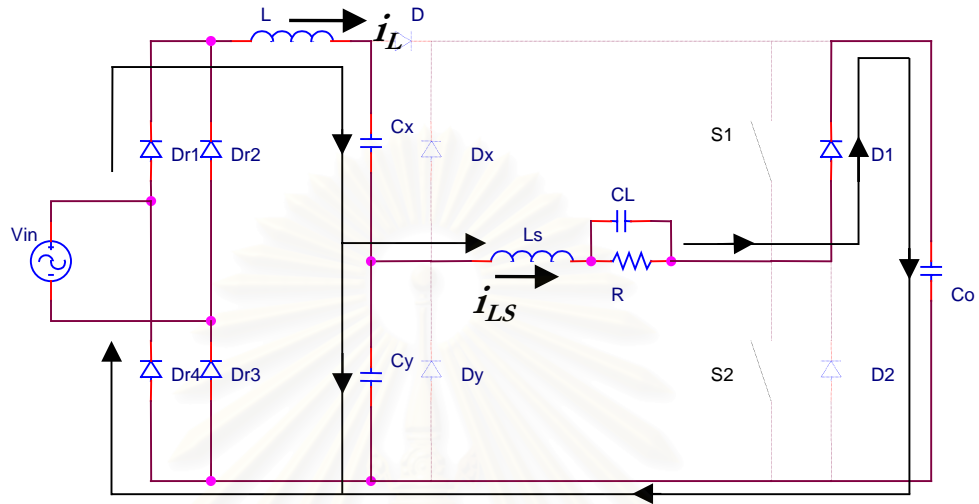


(ค) การทำงานในช่วงที่ 3  $i_{LS} > i_L, v_{Cy} = 0$

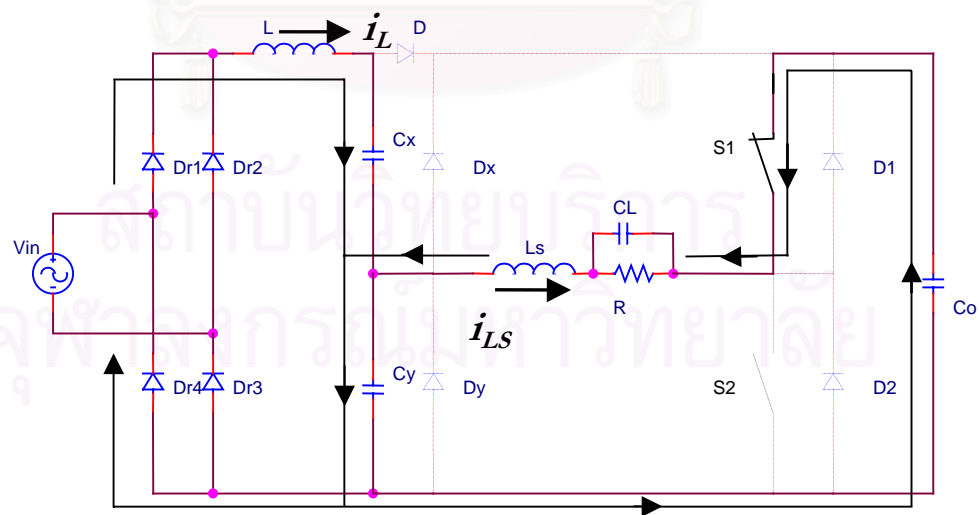


(ง) การทำงานในช่วงที่ 4  $i_{LS} > i_L, S2$  หยุดนำกระแส,  $D1$  นำกระแส

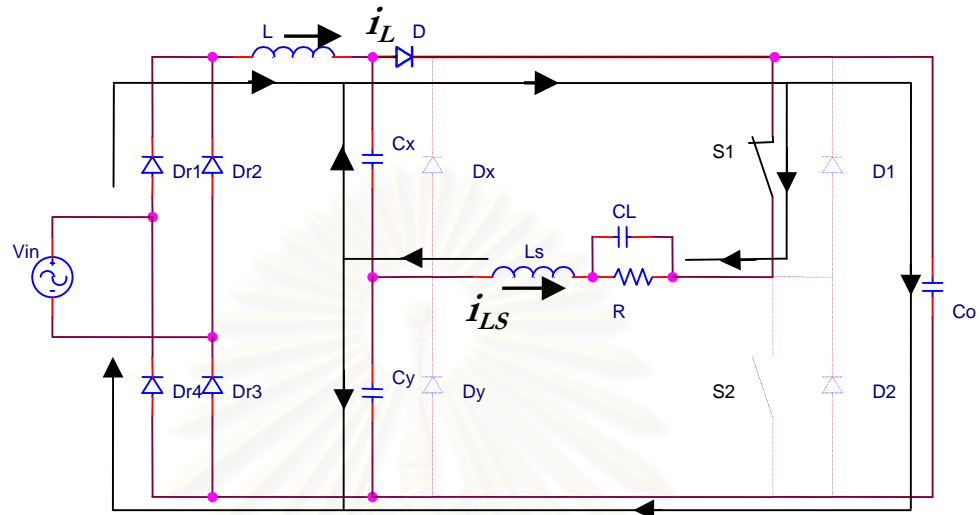




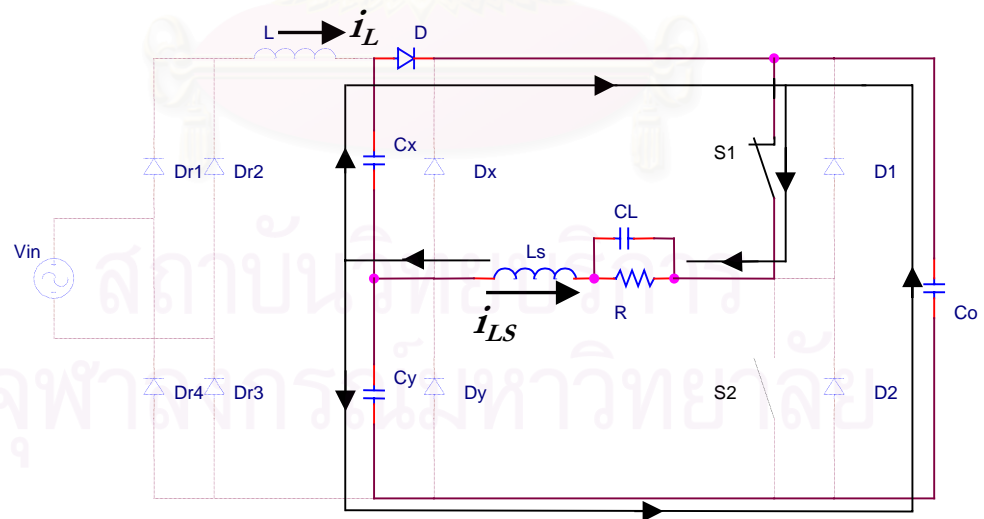
(จ) การทำงานในช่วงที่ 5  $i_{LS} < i_L$ ,  $D_y$  หยุดนำกระแส



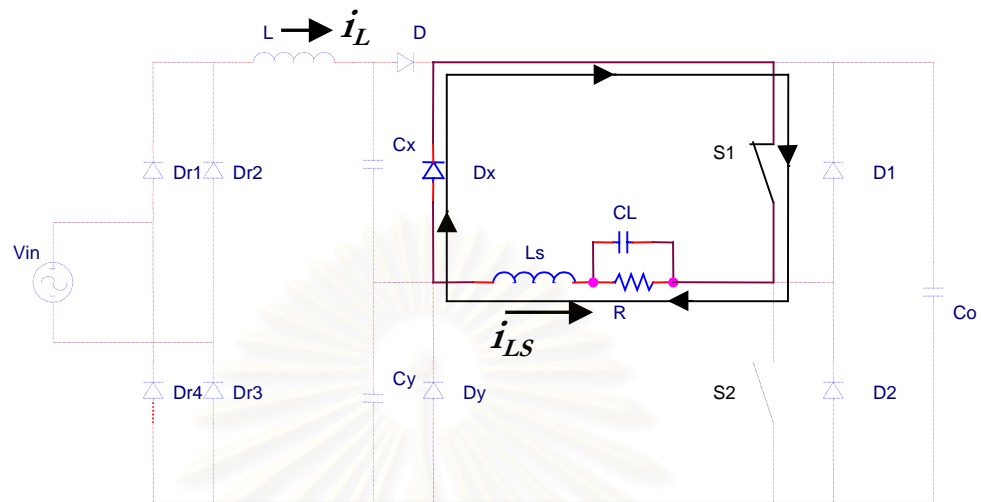
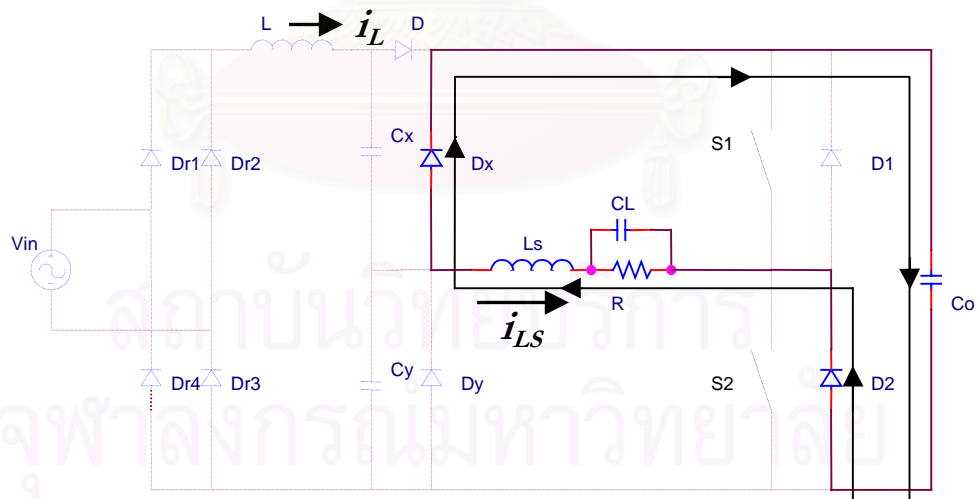
(ข) การทำงานในช่วงที่ 6  $i_{LS} < 0$ ,  $S_1$  นำกระแส



(๗) การทำงานในช่วงที่ 7  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  , D นำกระแส , S1 นำกระแส



(๘) การทำงานในช่วงที่ 8  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{Co}$  , กระแส  $i_L$  หยุดไหล, D นำกระแส

(ฉ) การทำงานในช่วงที่ 9  $D_x$  นำกระแส(ญ) การทำงานในช่วงที่ 10  $S_1$  หยุดนำกระแส,  $D_2$  นำกระแส

รูปที่ 3.20 ก-ญ รูปวงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสต่างๆในแต่ละช่วงเวลาของภาคที่ 4

- ช่วง 1 :  $v_{CO} > v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$ , S2 นำกระแส, กระแส  $i_L$  เท่ากับ 0, D ไม่นำกระแส  
 กระแส  $i_L$  เท่ากับ 0,  $v_{CO} > v_{Cx} + v_{Cy} > v_{in}$  ทำให้ไม่มีกระแส  $i_L$  ไคโอด D ไม่นำกระแส ในช่วงนี้สวิตช์ S2 ต่อดวงจร ตัวเก็บประจุ Cy จะคายประจุผ่านสวิตช์ S2 ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cy ลดลง กระแส  $i_{LS}$  เท่ากับกระแสจากการคายตัวเก็บประจุ Cy ไม่มีกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cx
- ช่วง 2 :  $v_{CO} > v_{in} > v_{Cx} + v_{Cy}$ ,  $i_{LS} > i_L$ , S2 ต่อดวงจร, กระแส  $i_L$  เริ่มไหล  
 เมื่อ  $v_{in} > v_{Cx} + v_{Cy}$  กระแส  $i_L$  เริ่มไหลแต่  $v_{Cx} + v_{Cy} < v_{CO}$  ไคโอด D จะไม่นำกระแส ตัวเก็บประจุ Cx จะถูกประจุโดยกระแส  $i_L$  ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$  จะทำให้ตัวเก็บประจุ Cy คายประจุผ่านวงจรถอดและสวิตช์ S2 โดยกระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ Cy จะเท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$
- ช่วง 3 : Dy นำกระแส,  $v_{Cy}=0$   
 เมื่อตัวเก็บประจุ Cy คายประจุจนหมดแรงดันคร่อม Cy ลดลงเป็นศูนย์ กระแสจะไหลผ่านไคโอด Dy สวิตช์ S2 ยังคงนำกระแส เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังมากกว่ากระแส  $i_L$  ในขณะนั้น Cx ยังถูกประจุด้วยกระแส  $i_L$  โดยกระแสที่ไหลผ่านไคโอด D เท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$
- ช่วง 4 : S2 เปิดวงจรถอด, D1 นำกระแส  
 สวิตช์ S2 เปิดวงจรถอด กระแส  $i_{LS}$  ที่เคยไหลผ่าน S2 จะย้ายไปไหลผ่านไคโอด D1 ซึ่งเป็นไคโอดคู่ประกอบของ S1 และตัวเก็บประจุ Co เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มากกว่ากระแส  $i_L$  ดังนั้นจึงยังคงมีกระแสไหลผ่านไคโอด Dy ในขณะนั้น Cx ยังถูกประจุโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $i_L$  ต่อไป โดยที่กระแสที่ไหลผ่านไคโอด Dy เท่ากับผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแส  $i_L$
- ช่วง 5 Dy หยุดนำกระแส  
 เมื่อกระแส  $i_{LS}$  ลดลงจนมีค่าเท่ากับกระแส  $i_L$  Dy จะหยุดนำกระแสและเมื่อกระแส  $i_{LS}$  มีค่าต่ำกว่า  $i_L$  ผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cy ทำให้ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุใหม่ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ Cy จะเพิ่มขึ้น กระแส  $i_{LS}$  ยังคงไหลผ่านไคโอด D1 และตัวเก็บประจุ Co ในขณะนั้น Cx ยังถูกประจุโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $i_L$  ในช่วงเวลานี้ S1 จะถูกขับให้สามารถนำกระแสได้ แต่กระแสยังคงไหลผ่าน D1 เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  ยังไม่ไหลกลับทิศ

- ช่วง 6 :  $i_{LS}$  กลับทิศ , S1 นำกระแส

เมื่อกระแสไหล  $i_{LS}$  กลับทิศ กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายไปไหลผ่านสวิตช์ S1 และ Co กระแส  $i_L$  ยังคงมีค่ามากกว่า  $i_{LS}$  ผลต่างของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cy ส่วนตัวเก็บประจุ Cx จะถูกประจุด้วยกระแส  $i_L$  ต่อไป

- ช่วง 7 :  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  , D นำกระแส , S1 นำกระแส

เมื่อตัวเก็บประจุ Cx และ Cy ถูกประจุจนทำให้  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  และกระแส  $i_L$  มากกว่ากระแส  $i_{LS}$  ไดโอด D จะนำกระแสผ่านตัวเก็บประจุ Co เนื่องจากกระแส  $i_{LS}$  มีค่าลบ ตัวเก็บประจุ Cx จะคายประจุในขณะที่ตัวเก็บประจุ Cy จะถูกประจุ เพื่อให้  $v_{Cx} + v_{Cy} = v_{Co}$  โดยที่ผลรวมของกระแสที่ประจุ Cy และกระแสที่คายประจุ Cx จะมีค่าเท่ากับ  $-i_{LS}$  กระแสผ่านไดโอด D เป็นผลรวมของกระแส  $i_L$  และกระแสคายประจุของตัวเก็บประจุ Cx กระแสที่ประจุ Co เท่ากับผลบวกของกระแส  $i_L$  กับกระแส  $i_{LS}$

- ช่วง 8 :  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{Co}$  , กระแส  $i_L$  หยุดไหล , D นำกระแส

เมื่อกระแส  $i_L$  ลดลงเป็นศูนย์และ  $v_{Cx} + v_{Cy} > v_{Co}$  ไดโอด D นำกระแส โดยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D ก็คือผลต่างของกระแส  $i_{LS}$  กับกระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ Co กระแสที่ประจุ Cy คือกระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ Co ตัวเก็บประจุ Cx จะคายประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ Cx จะเท่ากับกระแส  $i_{LS}$  รวมกับกระแสผ่านตัวเก็บประจุ Cy โดยมีค่าเป็นลบ

- ช่วง 9 :  $v_{Cx} = 0$  , Dx นำกระแส

ตัวเก็บประจุ Cx คายประจุจนหมดแรงดันลดลงเป็นศูนย์ ไดโอด Dx นำกระแส ในขณะที่สวิตช์ S1 ยังต่อวงจร กระแส  $i_{LS}$  ไหลผ่านไดโอด Dx สวิตช์ S1 และวงจรไหล ส่วนกระแสของตัวเก็บประจุ Cy และ Co จะมีค่าเป็นศูนย์

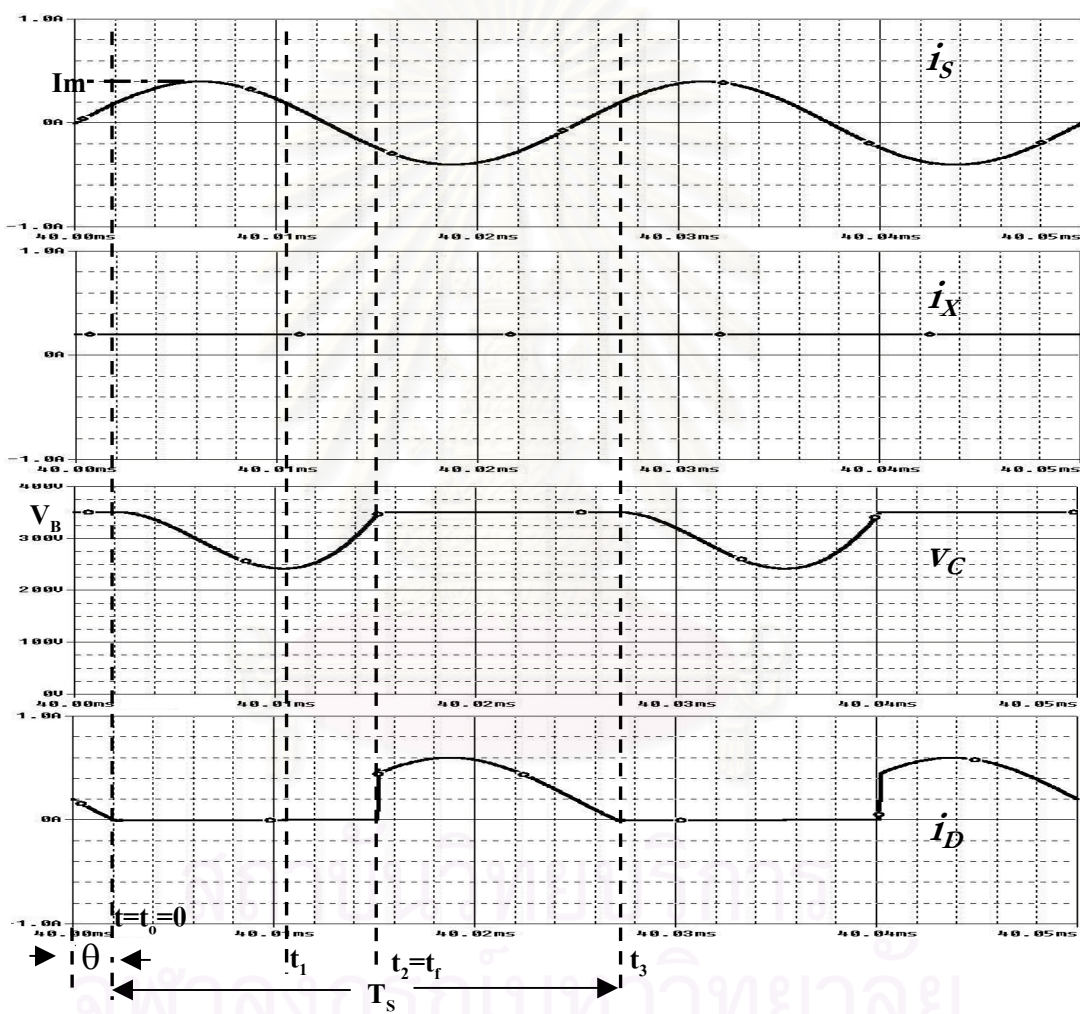
- ช่วง 10 : S1 หยุดนำกระแส , D2 นำกระแส

เมื่อสวิตช์ S1 เปิดวงจร กระแส  $i_{LS}$  จะย้ายไปไหลผ่าน D2 ไดโอด Dx และผ่านตัวเก็บประจุ Co ส่วนกระแสผ่านตัวเก็บประจุ Cy ยังคงมีค่าเป็นศูนย์

### 3.3.5 วงจรสมมูลของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage และการวิเคราะห์วงจร

ในการออกแบบวงจรที่ทำงานในภาคการทำงานที่ 1 ซึ่งเป็นภาคที่กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cx ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cy ต่อเนื่อง จะใช้วงจรในรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังในรูปที่ 3.12 ที่

ได้จากการแปลงเป็นวงจรเสมือนวงจรทระดับในรูปที่ 3.11 โดยใช้การแปลงรูปวงจร เมื่อแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงคือวงจรสมมูลของวงจรโพลด และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $V_s$  ในกรณีนี้จะใช้เงื่อนไขที่ตัวเหนี่ยวนำ  $L$  มีค่าใหญ่มากทำให้กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_x$ ) คงที่ ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าจะเป็นวงจรสมมูลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและวงจรเรียงกระแสที่เวลาต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.21 รูปคลื่นการทำงานของวงจรสมมูล

จากรูปที่ 3.21 ก่อนช่วงเวลา  $t_0$  กระแส  $i_s$  จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์แต่ยังน้อยกว่ากระแสตัวเหนี่ยวนำ  $i_x$  ในขณะนั้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  จะเท่ากับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_0$  ซึ่งเท่ากับ  $V_B$  ทำให้ไดโอด  $D$  นำกระแส โดยที่สมการ 3.9 เป็นสมการของแหล่งจ่ายกระแส  $i_s$  สม

การที่ 3.10 เป็นสมการของกระแสตัวเหนี่ยวนำ  $i_x$  และมุม  $\theta$  เป็นมุมที่กระแส  $i_s$  เริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์จนเท่ากับค่ากระแส  $i_x$

ช่วงที่ 1 ( $t_0-t_1$ ) : ที่เวลา  $t_0$  กระแส  $i_s$  จะมีค่าเท่ากับกระแส  $i_x$  เมื่อกระแส  $i_s$  เพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่ากระแส  $i_x$  ตัวเก็บประจุ C จะคายประจุทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ลดลง ไดโอด D จะหยุดนำกระแส กระแสจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C จะเท่ากับผลต่างของกระแส  $i_s$  กับกระแส  $i_x$

ช่วงที่ 2 ( $t_1-t_2$ ) : ที่เวลา  $t_1$  กระแส  $i_s$  ลดลงจนเท่ากับกระแส  $i_x$  ตัวเก็บประจุ C จะถูกประจุใหม่ ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C เพิ่มขึ้น

ช่วงที่ 3 ( $t_2-t_3$ ) : กระแส  $i_s$  ลดลงจนน้อยกว่ากระแส  $i_x$  ตัวเก็บประจุ C ถูกประจุจนมีแรงดันเท่ากับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_0$  ซึ่งเท่ากับ  $V_B$  ทำให้ไดโอด D นำกระแส วัฏจักรการทำงานและจะกลับมาเริ่มที่ช่วงเวลาที่ 1 ใหม่

จากรูปคลื่นการทำงานของวงจรสามารถหาสมการของมุม  $\theta$  ที่กระแส  $i_s$  เพิ่มจากศูนย์จนมีค่าเท่ากับกระแส  $i_x$  คือ

$$i_s(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (3.9)$$

$$i_x(t) = I_x \approx \text{คงที่} = I_m \sin \theta \quad (3.10)$$

ที่ node A ในช่วง  $t = t_0$  ถึง  $t = t_f$ ,  $V_C < V_B$

สามารถคำนวณหาค่า  $t_{fn}$  ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ C คายประจุ และประจุต่อคาบเวลา  $T_s$  ได้ตามสมการที่ 3.11 [ภาคผนวก ก.5]

$$t_{fn} = \frac{t_f}{T_s} = \frac{\cos \theta - \cos \left[ 2\pi \left( \frac{t_f}{T_s} \right) + \theta \right]}{2\pi \sin \theta} \quad (3.11)$$

$t_{fn}$  จะมีค่าแปรกับ  $\theta$  และตามสมการที่ 3.11 และเมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้กราฟดังในรูปที่ 3.22

จากรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่า เมื่อ  $\theta$  มีขนาดใหญ่ขึ้น ค่า  $t_{fn}$  จะมีค่าลดลง ขณะที่ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์  $T_s$  คงที่

สมการของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  ในช่วงเวลาต่างๆ จะมีค่าตามสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$v_c(t) = V_B + \frac{Im}{C} t \sin \theta + \frac{Im}{\omega C} \cos(\omega t + \theta) - \frac{Im}{\omega C} \cos \theta \quad \text{เมื่อ } 0 < t < t_f \quad (3.12)$$

$$v_c(t) = V_B \quad \text{เมื่อ } t_f < t < T_s \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.12 และ 3.13 หาค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  ได้ดังนี้

$$\langle v_c \rangle = V_B - \frac{Im \cos \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right) + \frac{\pi Im \sin \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right)^2 + \frac{Im}{2\pi\omega C} [\sin(\omega t_f + \theta) - \sin \theta] \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.14 และหลักการของสมดุลแรงดันไฟฟ้า-วินาที ในตัวเหนี่ยวนำจะได้  $\langle v_c \rangle = v_s$  และให้  $\frac{t_f}{T_s} = t_{fn}$  สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก  $V_B$  ได้ดังนี้

$$V_B = V_s + \frac{Im \cos \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right) - \frac{\pi Im \sin \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right)^2 - \frac{Im}{2\pi\omega C} [\sin(\omega t_f + \theta) - \sin \theta] \quad (3.15)$$

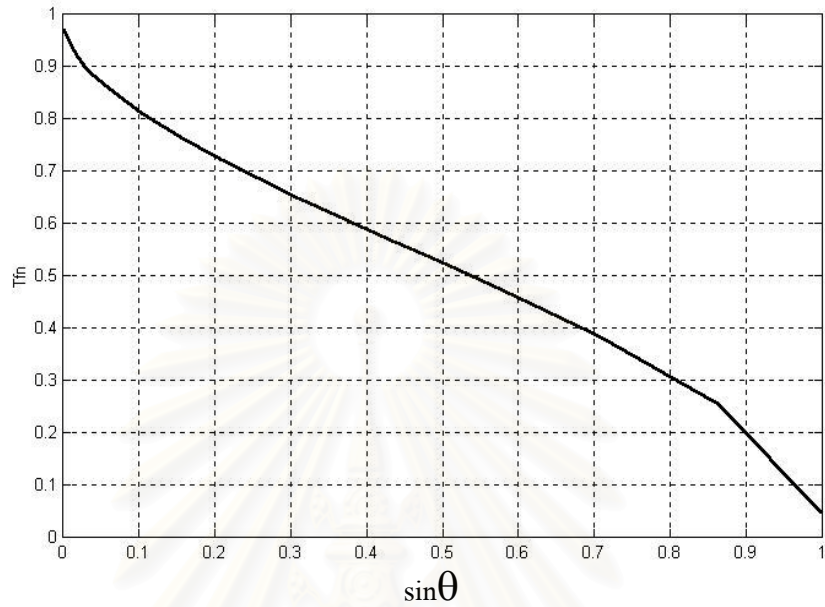
จากสมการที่ 3.15 และให้  $V_{cnn} = \frac{Im}{\omega C V_s}$  สามารถหาอัตราการแปลงผันแรงดันได้ดังนี้

$$M = \frac{V_B}{V_s}$$

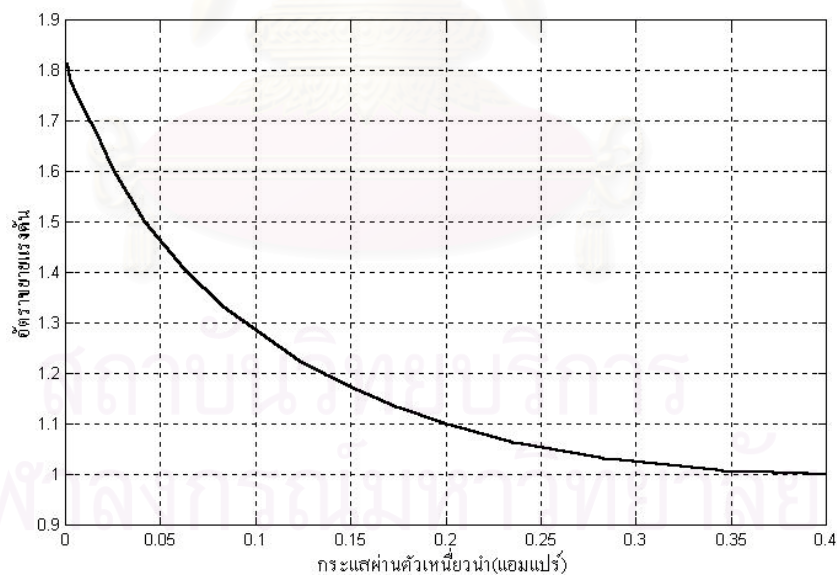
$$M = 1 + \left\{ V_{cnn} t_{fn} \cos \theta - \pi V_{cnn} \sin \theta \times t_{fn}^2 - \frac{V_{cnn}}{2\pi} [\sin(2\pi t_{fn} + \theta) - \sin \theta] \right\} \quad (3.16)$$



จากสมการที่ 3.16 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_x$  กับ  $M$  ได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sin \theta$  กับ  $t_{fm}$



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำกับอัตราขยายแรงดัน

จากรูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_x$  กับ  $M$  พบว่าเมื่อ  $I_x$  มีเพิ่มขึ้น อัตราขยายแรงดัน

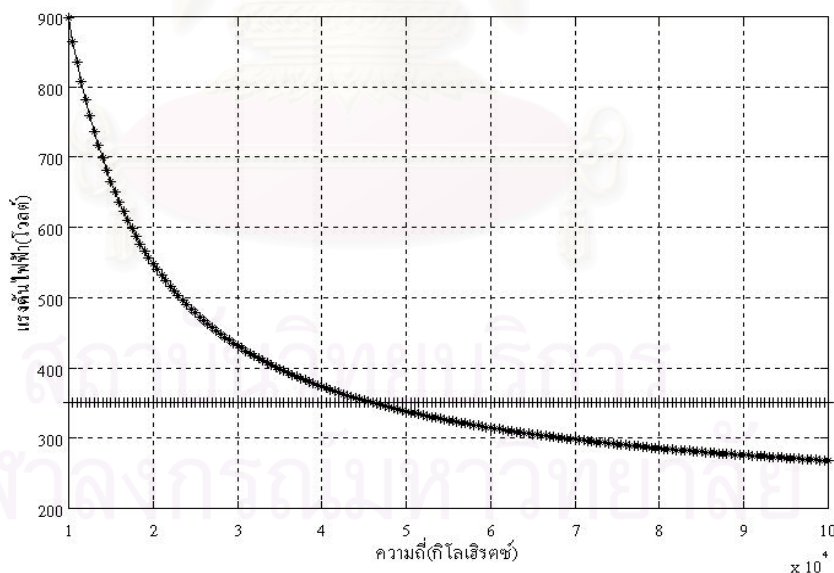
จะลดลง

### 3.3.6 แนวทางในการออกแบบวงจร

เนื่องจากสมการที่ช่วยในการออกแบบ สมการที่ 3.11 และ สมการที่ 3.16 เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อน การออกแบบวงจรจึงจำเป็นต้องใช้กราฟช่วยในการออกแบบ ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้  $V_S$ ,  $C$ ,  $I_m$ ,  $P_{output}$ , efficiency( $\eta$ ) และ  $\omega$
2. คำนวณค่ากำลังด้านเข้าได้จาก  $P_{input} = \frac{P_{output}}{\eta} = I_X V_S$ ,  $I_X = \frac{P_{output}}{\eta \times V_S}$
3. จากค่า  $I_X$  ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 2 และค่า  $I_m$  สามารถหาค่ามุม  $\theta$  ได้จากสมการที่ 3.9 และค่า  $t_{fn}$  ได้จากสมการที่ 3.10 โดยใช้เทคนิคทางกราฟ
4. จากค่า  $V_S$ ,  $C$ ,  $I_m$ ,  $\omega$ ,  $\theta$  และ  $t_{fn}$  สามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดัน ( $M$ ) จากสมการที่ 3.16
5. จากค่า  $M$  และ  $V_S$  สามารถคำนวณหาค่า  $V_B$  ได้

ในทำนองกลับกัน สามารถหาความถี่ของการสวิตช์ เพื่อให้ได้  $V_B$  ตามที่กำหนดได้ โดยอาศัยกราฟ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของความถี่กับความถี่แรงดันไฟฟ้า  $V_B$

จากรูปที่ 3.24 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการกำหนดค่า  $V_B$  ให้เท่ากับ 350 V สามารถหาความถี่ได้จากการตัดกันของกราฟสองเส้น ความถี่ที่ได้ประมาณ 45 kHz โดยที่ค่า  $V_S = 198$  V ,  $P_{\text{output}} = 32$  W, efficiency = 95%,  $I_m = 0.8$  A , ตัวเก็บประจุ 10 nF

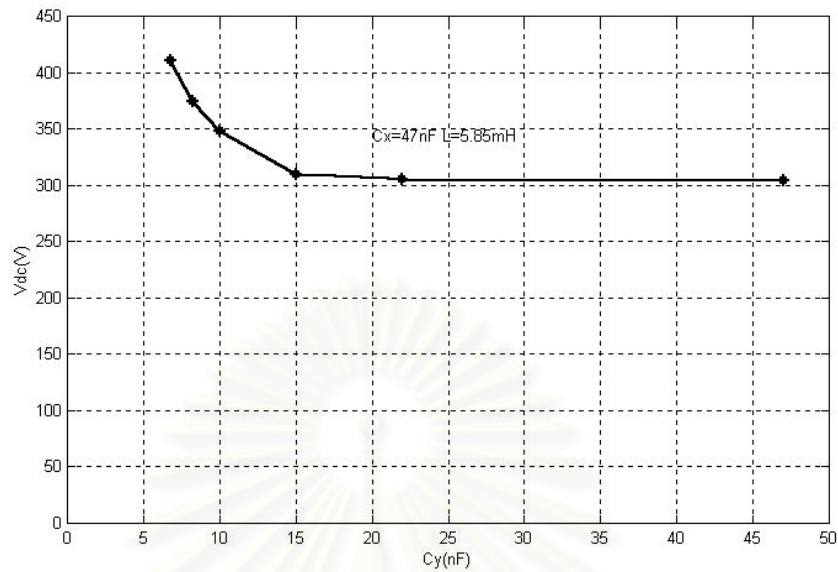
โดยอาศัยหลักการทำนองเดียวกันอาจจะออกแบบวงจรได้โดยการกำหนดค่าความถี่ที่พิกัดแต่ให้ค่าตัวเก็บประจุ C เป็นตัวแปรที่ต้องออกแบบ

### 3.3.7 การจำลองการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

เนื่องจากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 มีภาคการทำงานที่ซับซ้อนถึง 4 ภาค การวิเคราะห์วงจรได้วิเคราะห์เพียงภาคการทำงานที่ 1 เพียงภาคเดียวและบางเงื่อนไขเท่านั้น การออกแบบอย่างครบถ้วนจะทำได้ยากมากดังนั้น การออกแบบจึงจำเป็นต้องใช้ค่าจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรคือ  $C_x$   $C_y$  L และ ความถี่ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม และค่าตัวประกอบยอดคลื่น โดยจะมีการเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองเพื่อหาแนวทางในการออกแบบวงจรซึ่งจะอยู่ในบทถัดไป

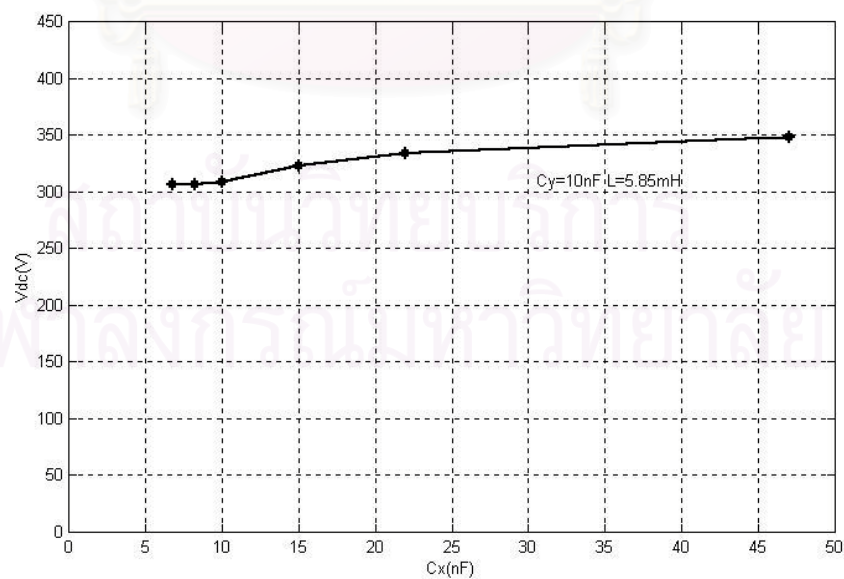
#### 3.3.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ $V_{dc}$ กับ $C_y$ , $C_x$ , L และ ความถี่

วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 มีการทำงานเหมือนวงจรทบระดับ ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สูงกว่าแรงดันไฟด้านเข้า ได้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆคือค่า  $C_y$   $C_x$  L และความถี่ในวงจรกับแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยวิธีการจำลองการทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 3.25-3.27 โดยให้กำลังออกที่โหลดคงที่เท่ากับ 32 วัตต์ ซึ่งทำได้โดยปรับค่า  $L_s$  ส่วนในกรณีการปรับความถี่เพื่อควบคุมกำลังออกตามรูปที่ 3.28 จะไม่มีการปรับค่า  $L_s$  เพื่อรักษากำลังออก เนื่องจากการควบคุมกำลังออก จาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz



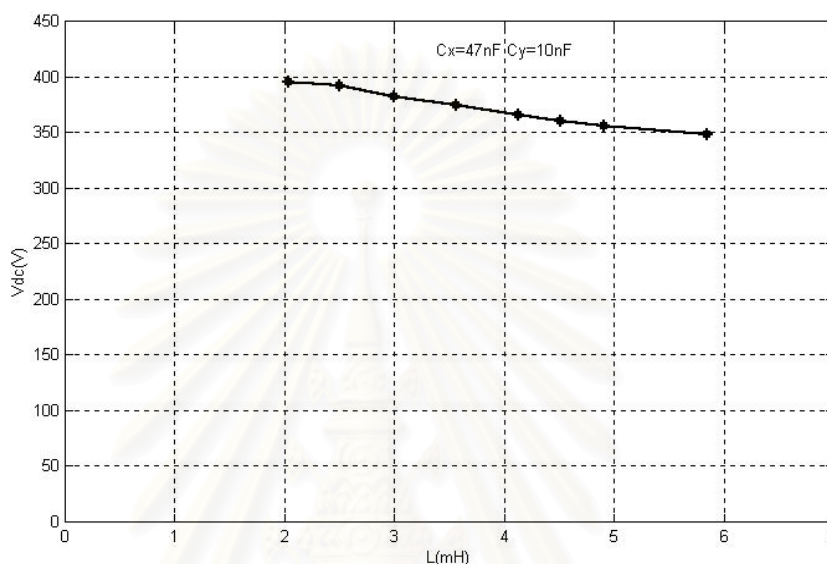
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ( $V_{dc}$ ) กับ  $C_y$  เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

รูปที่ 3.25 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $C_y$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อ  $C_y$  มีค่าใหญ่ขึ้น แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  จะลดลง ในช่วงแรกและมีแนวโน้มจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ  $C_y$  มีค่ามากกว่า 15 nF



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $C_x$  เมื่อ  $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

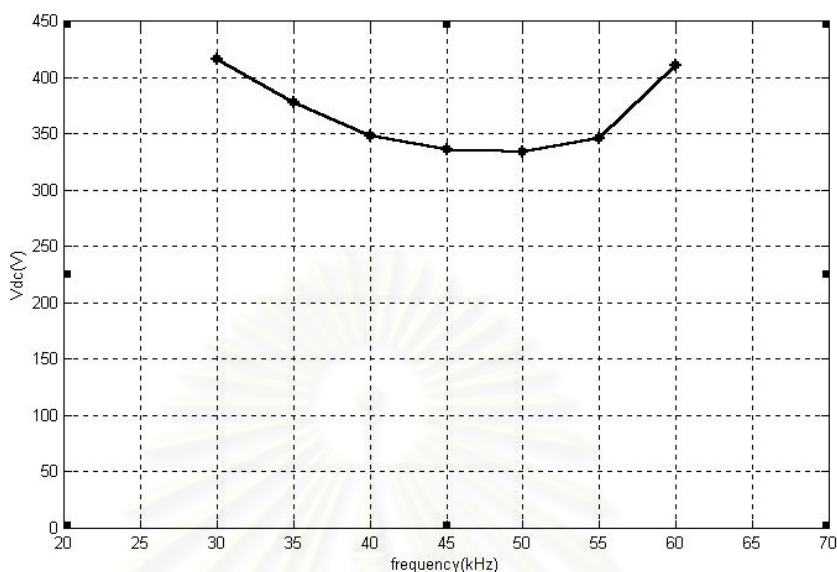
รูปที่ 3.26 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $C_x$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อ  $C_x$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  มีค่าสูงขึ้น แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยเฉพาะเมื่อ  $C_x$  มีค่ามากกว่า 30 nF



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $L$  เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $f=40\text{kHz}$

รูปที่ 3.27 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $L$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อ  $L$  มีค่ามากจะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

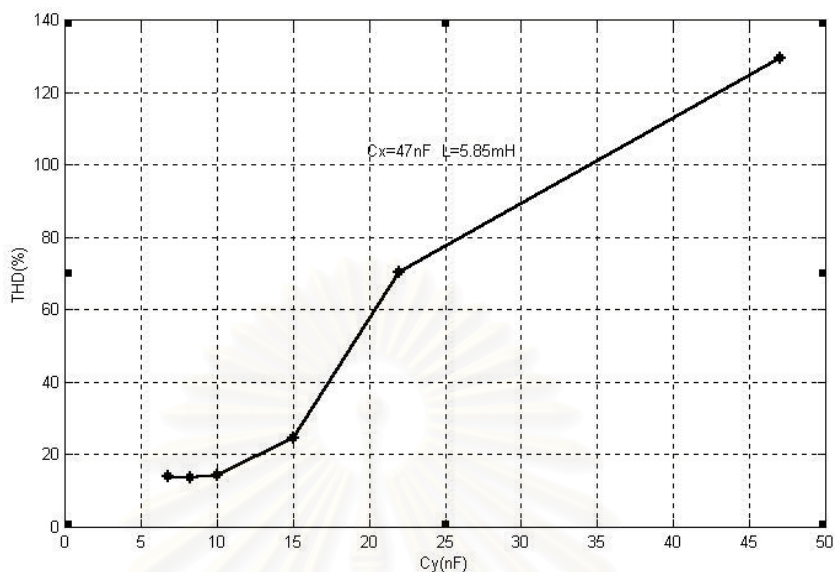


รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ V<sub>dc</sub> กับความถี่ เมื่อ C<sub>x</sub>=47nF C<sub>y</sub>=10nF L=5.85mHกำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz

รูปที่ 3.28 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ V<sub>dc</sub> กับความถี่ จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ประมาณ 30 kHz แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ 420 V เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นไป แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะเริ่มตรงลงมาแล้วจะกลับเพิ่มขึ้นไปอีก เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 kHz

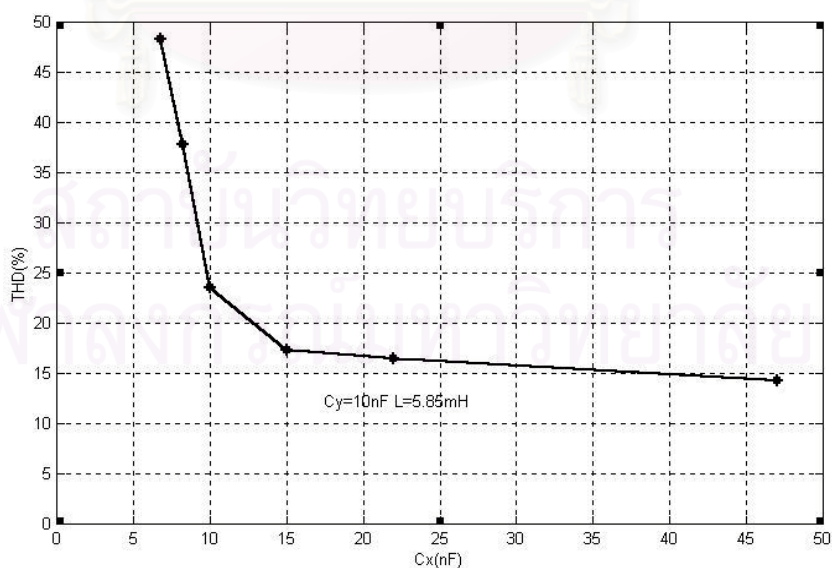
### 3.3.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิก THD กับ C<sub>y</sub>, C<sub>x</sub>, L และความถี่

วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังจะหน้าที่ปรับรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เพื่อลดกระแสฮาร์โมนิก และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าโดยให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ตามตารางที่ 2.1 วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือค่า C<sub>y</sub> C<sub>x</sub> L และความถี่การทำงานของวงจรกับค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกโดยวิธีการจำลองการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.29-3.31 โดยให้กำลังออกที่โหลดคงที่เท่ากับ 32 วัตต์ ซึ่งทำได้โดยปรับค่า L<sub>s</sub> ส่วนในกรณีการปรับความถี่เพื่อควบคุมกำลังออกตามรูปที่ 3.32 จะไม่มีการปรับค่า L<sub>s</sub> เพื่อรักษากำลังออก เนื่องจากการควบคุมกำลังออก จาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz



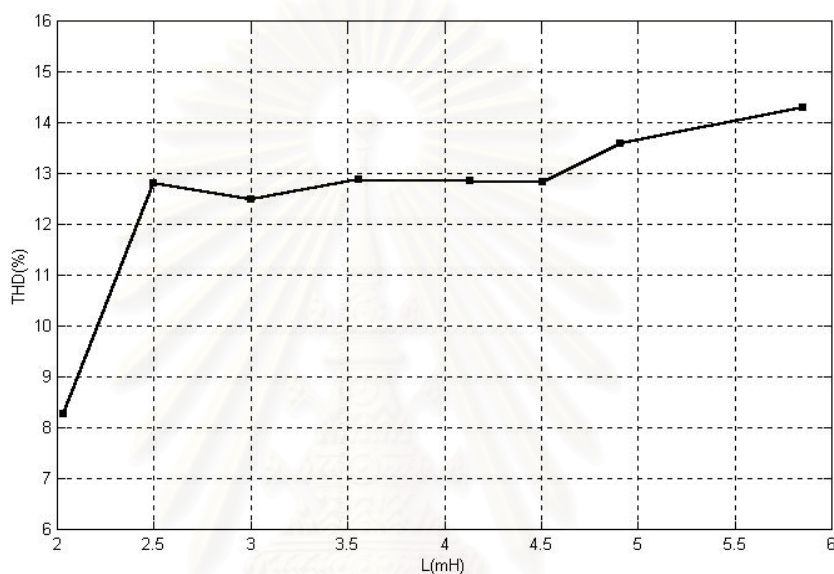
รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ  $C_y$  เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   
 $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

จากรูปที่ 3.29 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ  $C_y$  จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อ  $C_y$  มีค่าต่ำกว่า 10 nF จะทำให้ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD มีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่ม  $C_y$  มากกว่า 10 nF ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD จะเพิ่มขึ้นอย่างมากกับ  $C_y$



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ  $C_x$  เมื่อ  $C_y=10\text{nF}$   
 $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

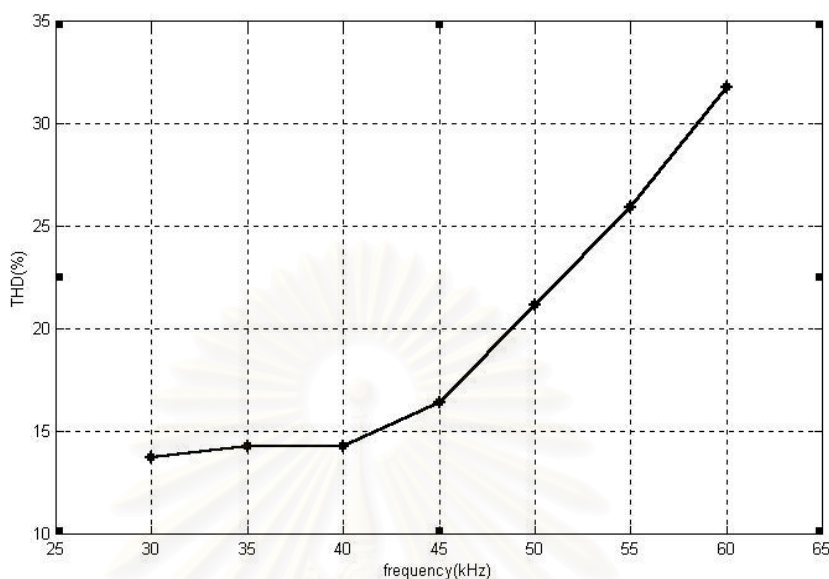
รูปที่ 3.30 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ  $C_x$  จากกราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อ  $C_x$  มีค่าต่ำความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD จะมีค่าสูง แต่จะมีค่าลดลงเมื่อ  $C_x$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อ  $C_x$  มีค่ามากกว่า 20 nF การเพิ่มขึ้นของ  $C_x$  จะมีผลทำให้ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD ลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ L เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $f=40\text{kHz}$

รูปที่ 3.31 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ L จากกราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อ L มีค่าต่ำ จะทำให้ ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการ ให้ L มีค่าสูง





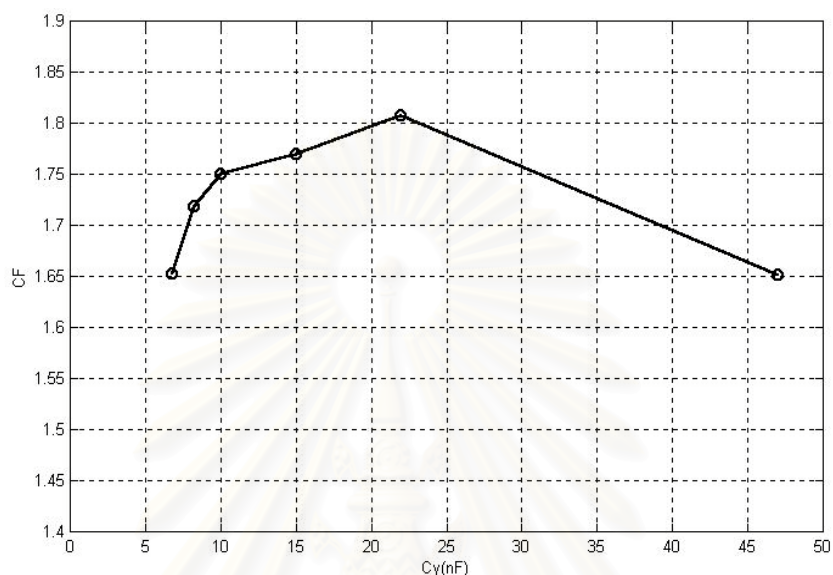
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับความถี่ เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   
 $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$  กำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz

รูปที่ 3.32 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับความถี่ จากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ต่ำกว่า 40 kHz ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD จะมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นสูงกว่า 40 kHz ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD จะมีค่าสูงขึ้นจนมีค่าประมาณ 30 % ที่ความถี่ 60 kHz

### 3.3.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดลวดของกระแสผ่านโหลด กับ $C_y$ , $C_x$ , $L$ และ ความถี่

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรมีตัวประกอบขดลวดของกระแสผ่านโหลดฟลูออเรสเซนต์ไม่เกิน 1.7 กรณีกระแสไฟสลับรูปไซน์จะมีค่าตัวประกอบขดลวดของกระแสผ่านโหลดใกล้เคียง 1.414 จะช่วยให้โหลดมีอายุการใช้งานยาวนาน มีการสึกหรองของไส้หลอดน้อย วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือค่า  $C_y$   $C_x$   $L$  และความถี่ในวงจรกับค่าตัวประกอบขดลวด โดยวิธีการจำลองการทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 3.33-3.35 โดยให้กำลังออกที่โหลดคงที่เท่ากับ 32 วัตต์ ซึ่งทำได้โดยปรับค่า  $L_s$  ส่วนในกรณีการปรับความถี่เพื่อควบคุม

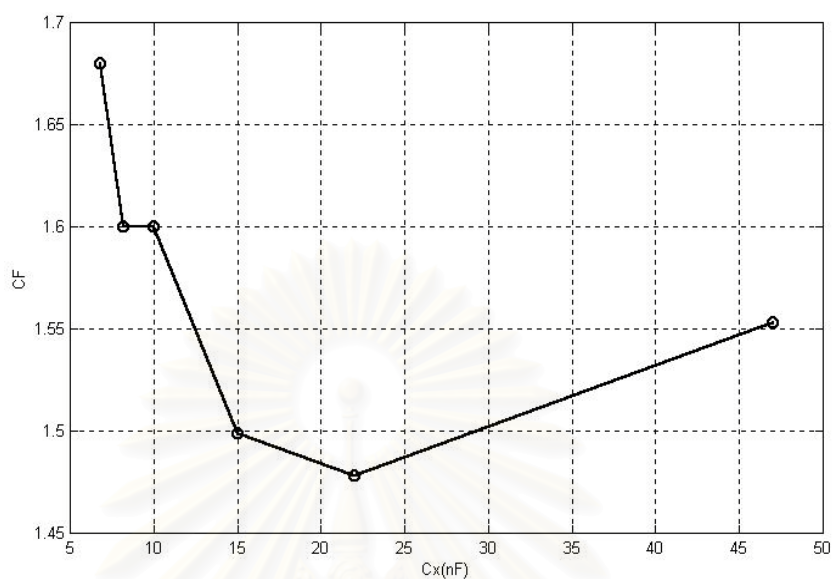
กำลังออกตามรูปที่ 3.36 จะไม่มีการปรับค่า  $L_s$  เพื่อรักษากำลังออก เนื่องจากเป็นการควบคุมกำลังออก จาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz



รูปที่ 3.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านโหลด กับ  $C_y$  เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

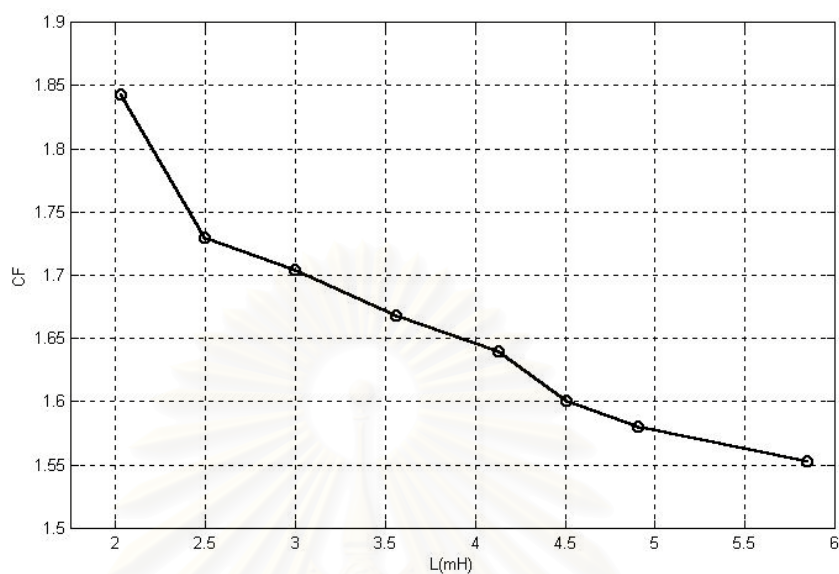
รูปที่ 3.33 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านโหลด กับ  $C_y$  จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านโหลดจะอยู่ในช่วง 1.6-1.8 โดยมีค่าต่ำ เมื่อ  $C_y$  มีค่าต่ำและค่าสูง แต่จะมีค่าสูงสุดที่ค่า 1.8 เมื่อ  $C_y$  มีค่ากลางๆประมาณ 23 nF

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



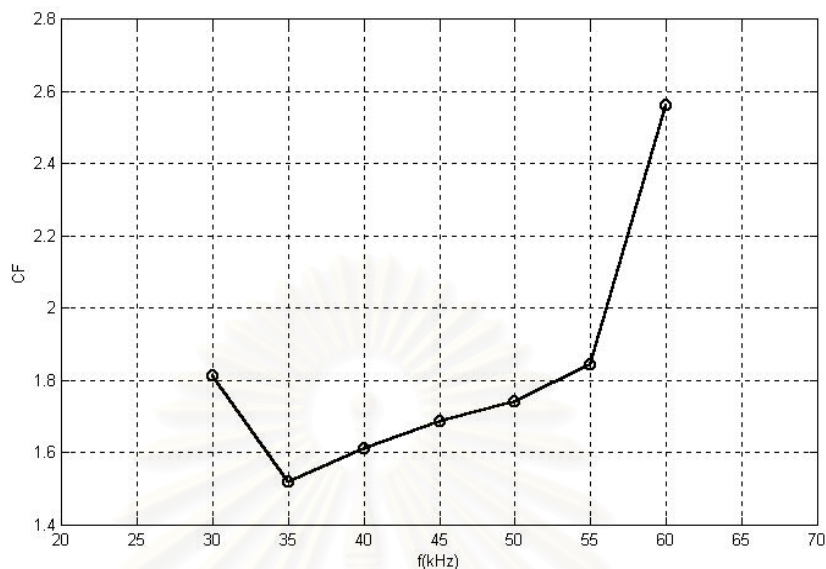
รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านโหลด กับ  $C_x$  เมื่อ  $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านโหลด กับ  $C_x$  จะเห็นว่าค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านโหลดจะอยู่ในช่วง 1.45-1.7 โดยมีค่าสูงสุดที่ค่า  $C_x$  ต่ำๆ จากนั้นจะมีค่าลดลงต่ำสุดที่  $C_x$  ประมาณ 22 nF และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อ  $C_x$  เพิ่มขึ้น จาก 25 nF ถึง 47 nF



รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอด กับ L เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   
 $C_y= 10 \text{ nF}$   $f=40\text{kHz}$

รูปที่ 3.35 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง L กับ ตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดจะอยู่ในช่วง 1.55-1.85 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.85 เมื่อ L มีค่า 2 mH และลดลง เมื่อ L มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.55 เมื่อ L มีค่าประมาณ 6 mH



รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดกับความถี่ เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$  กำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz

รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดกับความถี่ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดจะอยู่ในช่วง 1.5-2.6 โดยมีค่าประมาณ 1.8 เมื่อความถี่ 20 kHz และลดลงต่ำสุดที่ความถี่ประมาณ 30 kHz จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับความถี่ จนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.6 เมื่อความถี่มีค่าเท่ากับ 60 kHz

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3.8 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก รวม และค่าตัวประกอบยอดคลื่น กับ $C_y, C_x, L$ และความถี่

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก รวม และค่าตัวประกอบยอดคลื่น กับ  $C_y, C_x, L$  และความถี่จากการจำลองการทำงานด้วย คอมพิวเตอร์

	$C_y$ เพิ่มขึ้น	$C_x$ เพิ่มขึ้น	$L$ เพิ่มขึ้น	ความถี่เพิ่มขึ้น
Vdc	↓	↗	↘	∪
THD	↑	↓	↗	↑
CF	∩	∪	↘	∪

- ↓ หมายถึง การลดลงอย่างมาก
- ↑ หมายถึง การเพิ่มขึ้นอย่างมาก
- ↗ หมายถึง การเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- ↘ หมายถึง การลดลงเพียงเล็กน้อย
- ∪ หมายถึง การลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้น
- ∩ หมายถึง การเพิ่มขึ้นแล้วกลับมาลดลง

จากตารางที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มค่า  $C_y$  จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ลดลงอย่างมาก ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นอย่างมาก และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะเพิ่มขึ้นแล้วกลับมาลดลง

เมื่อเพิ่มค่า  $C_x$  จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมลดลงอย่างมาก และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มค่า  $L$  จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ลดลงเพียงเล็กน้อย ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะลดลงเพียงเล็กน้อย

เมื่อเพิ่มความถี่จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้นอีก ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นอย่างมาก และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้นอีก

### 3.3.9 สรุปการวิเคราะห์หับลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าแบบไวงานที่มีลักษณะวงจรแบบ single stage

ในการวิเคราะห์วงจรนั้น เนื่องจากวงจรมีการทำงานถึง 4 ภาคการทำงาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำงานวิเคราะห์วงจรในภาคที่ 1 คือการทำงานภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ต่อเนื่อง ในช่วงการทำงานที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่ลดลงเป็นศูนย์ โดยมีการประมาณให้กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำคงที่ หาค่ามุม  $\theta$  และอัตราขยายแรงดัน ได้ตามสมการที่ 3.11 และ 3.16 เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวงจร และได้ใช้การจำลองการทำงานของวงจรเพื่อดูผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรคือ  $C_x$   $C_y$   $L$  และความถี่กับ ค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม และตัวประกอบยอดคลื่น ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทถัดไป จากการจำลองการทำงานของวงจรพบว่าควรเลือกค่า  $C_x$  มีค่าสูง  $C_y$  มีค่าต่ำ และ  $L$  มีค่าต่ำ เพื่อที่วงจรจะมีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำ ค่าตัวประกอบยอดคลื่นต่ำ ตัวอย่างค่าที่เหมาะสมจากการจำลองการทำงาน เช่น เลือกค่า  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{ mH}$  และความถี่ 40 kHz จะได้ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม 14.2 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.53 และแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 348 V

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

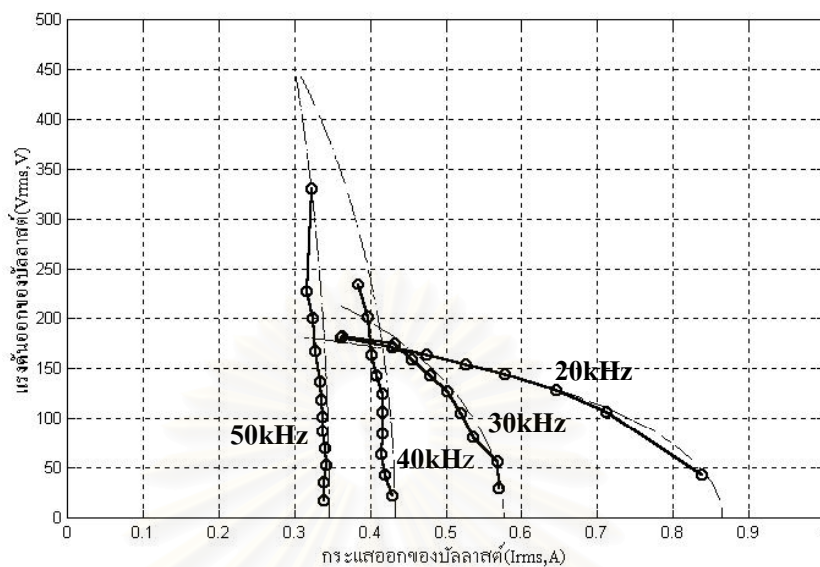
#### บทนำ

ในบทที่ 3 ได้วิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ในย่านความเข้มแสงต่ำ ซึ่งประกอบด้วยวิเคราะห์เสถียรภาพของจุดทำงานและความไวในการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตลอดจนแนวทางแก้ไข และหาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ single stage ในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำและผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ single stage และแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ single stage โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นหัวข้อ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 เสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจาก Ballast line คือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออก ( $V_B$ ) กับ กระแสออก ( $I_B$ ) ของบัลลาสต์สำหรับโหลดตัวต้านทานที่ค่าต่างๆกัน ดังนั้นการเขียน Ballast line จะทำโดยการคำนวณหาแรงดันออก ( $V_B$ ) กับกระแสออก ( $I_B$ ) ของบัลลาสต์สำหรับความต้านทาน R ค่าต่างๆจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อได้มีการออกแบบค่าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์และค่าอุปกรณ์ของวงจร(L,C)และกำหนดความถี่การทำงานของบัลลาสต์  $f_s$  แล้ว เพื่อทดสอบผลการคำนวณทางทฤษฎีรูปที่ 4.1 เปรียบเทียบ ballast line ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้  $L=1.43$  mH,  $C=8200$  pF,  $V_{dc}=350$ V ที่ความถี่การทำงาน 4 ค่า คือ 20 30 40 และ 50 kHz ตามลำดับจากขวามาซ้าย จากรูปจะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี แต่ในการคำนวณค่าต่างๆทางทฤษฎีได้มีการละเลยกำลังสูญเสีย จึงมีผลให้เกิดความต่างกันของค่าที่ได้จากการทดลองและผลจากการคำนวณทางทฤษฎี

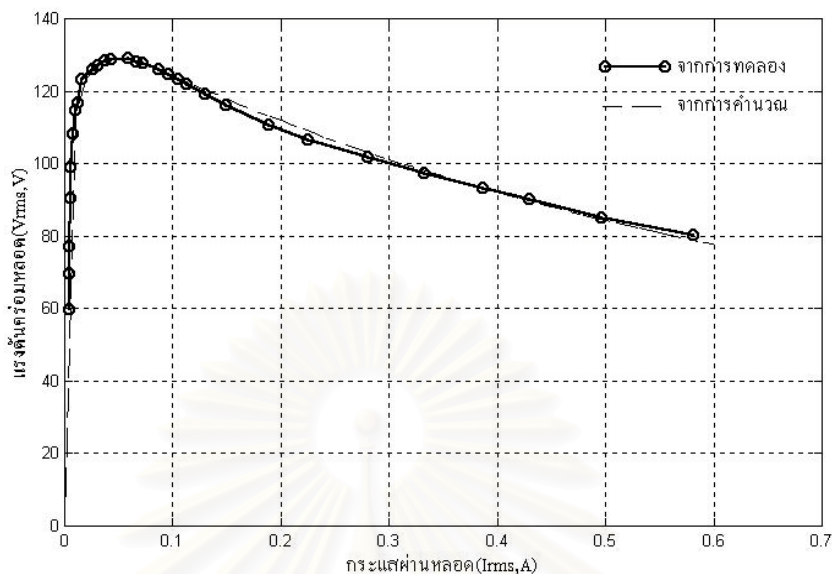




รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์(ballast line) จากการคำนวณและทดลอง

ส่วน lamp line ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน( $V_L$ )กับกระแส( $I_L$ )ของหลอดสำหรับกำลังออกของหลอดต่างๆกัน จะได้จากการทดลองวัดจริง และสามารถหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันหลอด( $V_L$ )กับกระแสหลอด( $I_L$ )โดยวิธี Curve Fitting ได้สมการ Lamp line ของหลอดตามสมการที่ 3.3 lamp line จากการทดลองและการคำนวณ จะแสดงในรูปที่ 4.2

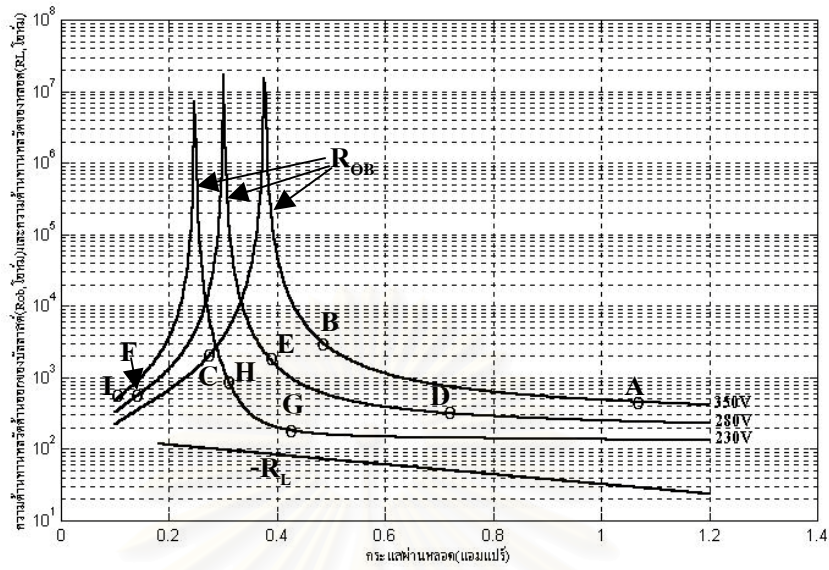
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



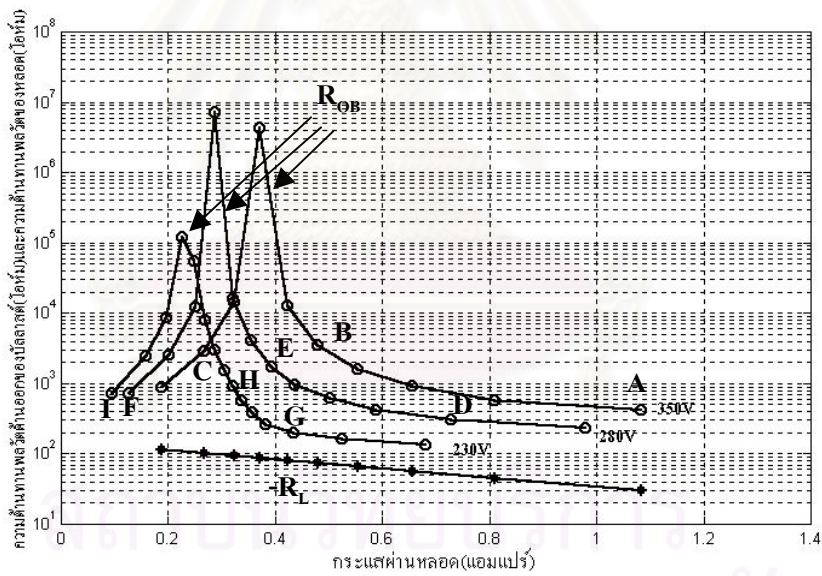
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์จากการทดลองและการคำนวณ

#### 4.1.1 เสถียรภาพของจุดทำงาน

เพื่อทดสอบความถูกต้องของการคำนวณเสถียรภาพการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำได้ทดลองวัดค่า  $R_{OB}$ ,  $R_L$  ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าอุปกรณ์เหมือนกับที่ใช้ในการคำนวณค่าทางทฤษฎี รูปที่ 4.3 และ 4.4 เป็นผลการวัดค่า  $R_{OB}$  และ  $R_L$  ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ความเข้มแสงกลางถึง สูง และที่ความเข้มแสงต่ำตามลำดับ เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบจึงได้นำผลการคำนวณจากบทที่แล้วกับผลการทดลองแสดงเปรียบเทียบกัน



(ก) จากการคำนวณ



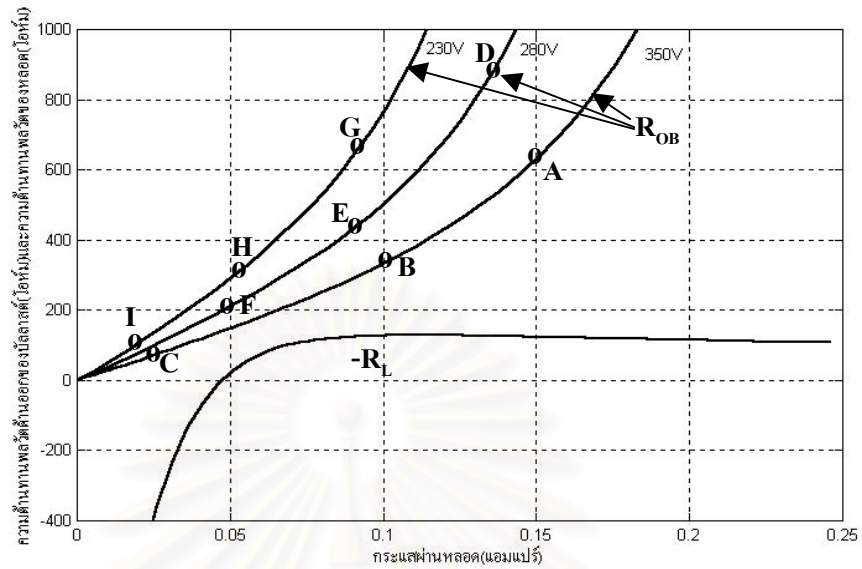
(ข) จากการทดลอง

ที่ 350 V จุด A  $f=14\text{kHz}$ , จุด B  $f=34\text{kHz}$ , จุด C  $f=60\text{kHz}$ ,

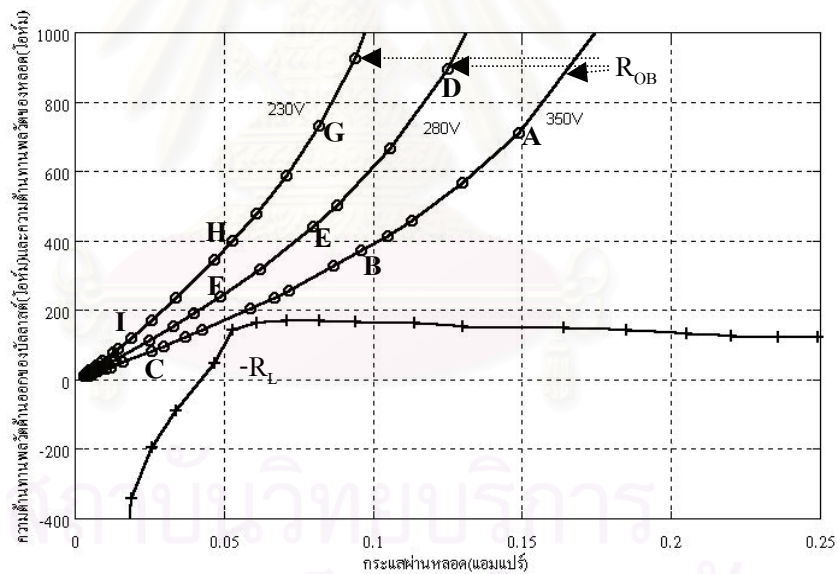
ที่ 280 V จุด D  $f=14\text{kHz}$ , จุด E  $f=34\text{kHz}$ , จุด F  $f=60\text{kHz}$ ,

ที่ 230 V จุด G  $f=14\text{kHz}$ , จุด H  $f=34\text{kHz}$ , จุด I  $f=60\text{kHz}$ ,

รูปที่ 4.3 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์  $R_{0B}$  และความต้านทานพลวัตของโหลด  $R_L$  ในย่านความเข้มแสงกลางและสูง



(ก) จากการคำนวณ



- ที่ 350 V จุด A  $f=62\text{kHz}$ , จุด B  $f=63\text{kHz}$ , จุด C  $f=65\text{kHz}$ ,
- ที่ 280 V จุด D  $f=59\text{kHz}$ , จุด E  $f=60\text{kHz}$ , จุด F  $f=61\text{kHz}$ ,
- ที่ 230 V จุด G  $f=57\text{kHz}$ , จุด H  $f=58\text{kHz}$ , จุด I  $f=59\text{kHz}$ ,

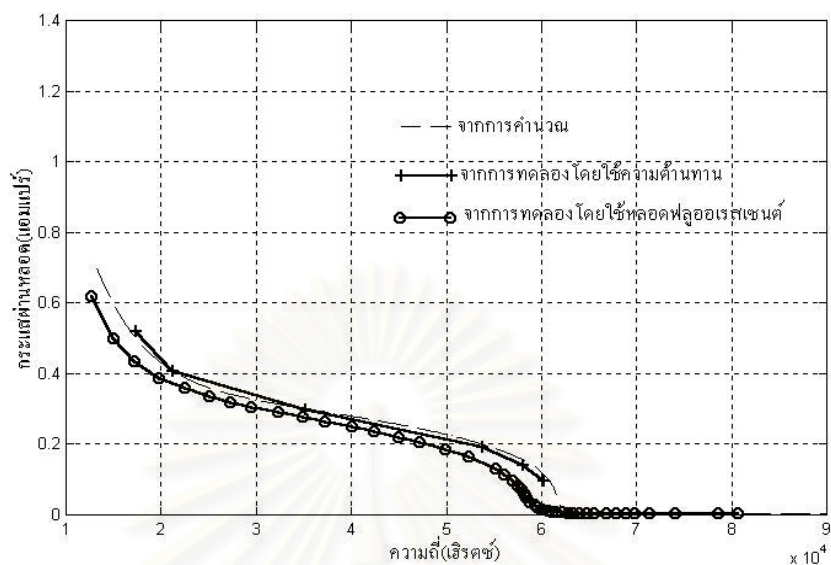
(ข) จากทดลอง

รูปที่ 4.4 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์  $R_{OB}$  และความต้านทานพลวัตของหลอด  $R_L$  ในย่านความเข้มแสงต่ำ

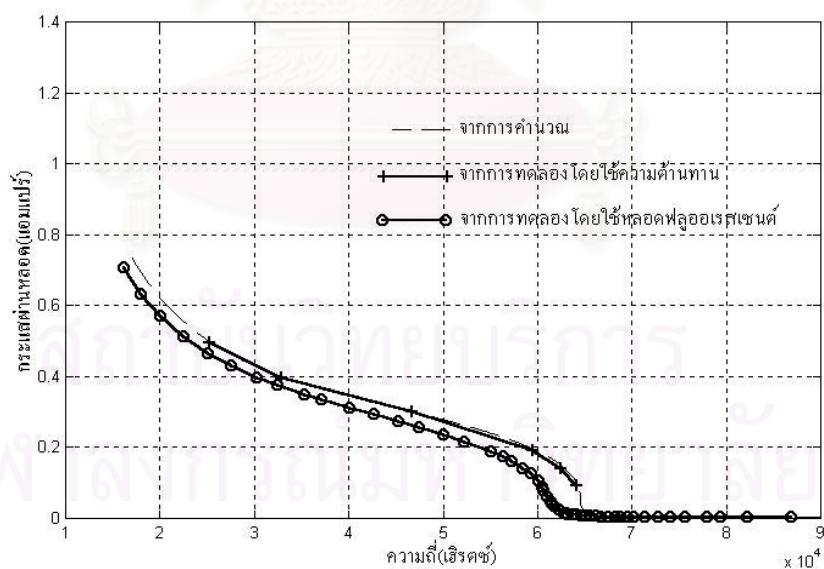
จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีโดยเฉพาะในย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำ ส่วนในย่านความถี่กลางๆจะมีความแตกต่างของผลการคำนวณกับผลการทดลองค่อนข้างมากซึ่งน่าจะเป็นผลเนื่องมาจาก ในย่านดังกล่าวการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้ความถี่ธรรมชาติที่ไม่หน่วง ( $f_0$ ) ซึ่งเป็นย่านที่ค่าตัวประกอบกำลังคุณภาพ(Q)มีผลอย่างมากต่อผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลอง ในการคำนวณค่าต่างๆทางทฤษฎี ได้มีการละเลยกำลังสูญเสียจึงมีผลให้มีความต่างกันของค่าของอุปกรณ์ และการวัดกระแสผิดเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้มีความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลองในย่านดังกล่าว

#### 4.1.2 ความไวในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์

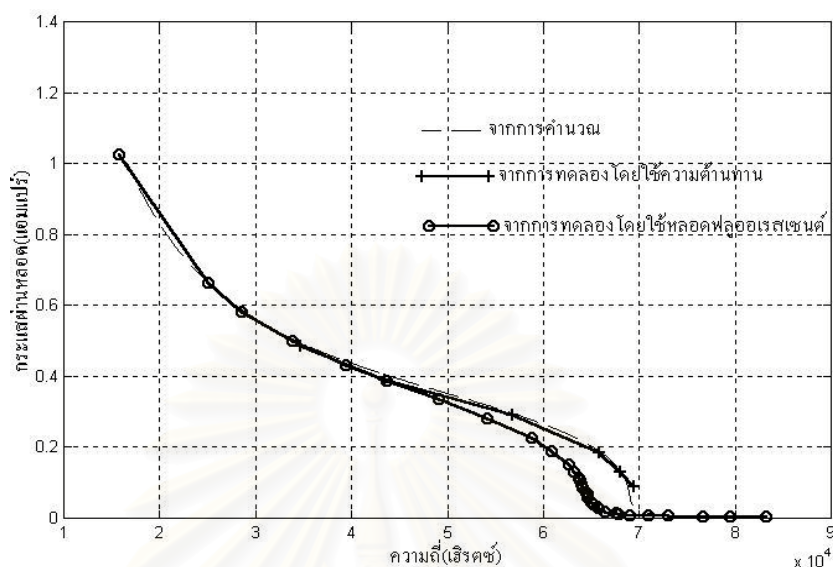
การควบคุมแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านหลอด ผ่านการควบคุมความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ได้ทดลองหาความถี่  $f_s$  ที่จุดทำงานต่างๆบน Lamp line ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าอุปกรณ์เหมือนกับที่ใช้ในการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการที่ 3.7 คือ  $L=1.43 \text{ mH}$   $C=8200\text{pF}$  และแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 230 280 และ 350 โวลต์ ตามลำดับ เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบจึงได้นำผลการคำนวณจากบทที่แล้วกับผลการทดลองแสดงเปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสด้านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 230 V



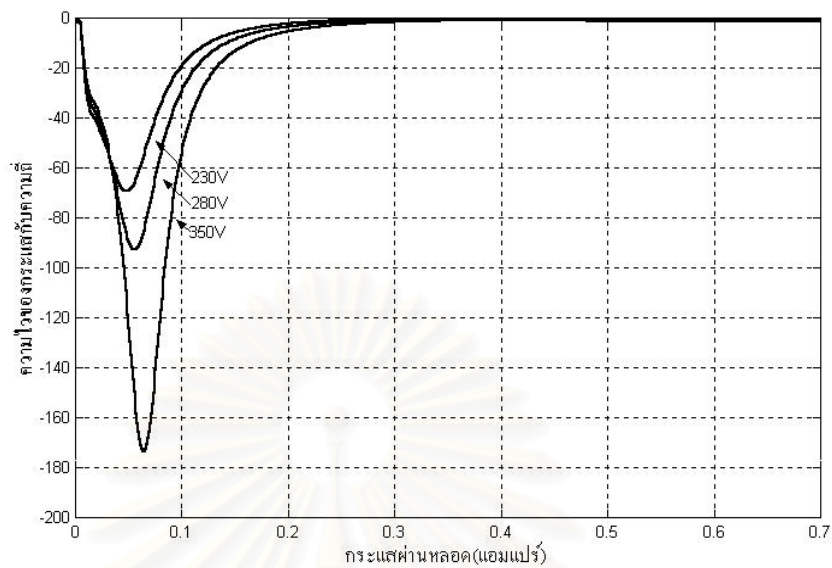
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสด้านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 280 V



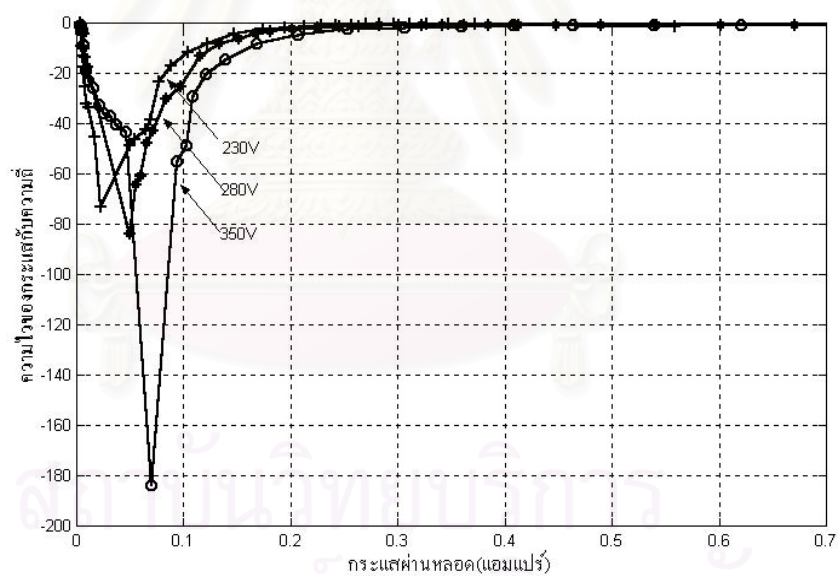
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 350 V

จากรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์กับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์จากการทดลองและคำนวณที่แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 230 280 และ 350 V ตามลำดับ พบว่าในการทดลองโดยใช้ตัวต้านทานกับการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น อันเป็นผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์

การวิเคราะห์ความไวของการควบคุมแสงของบัลลาสต์ เพื่อทดสอบความถูกต้องของการคำนวณจึงได้ทดลองวัดค่า  $S_{f_s}^{I_L}$  ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าอุปกรณ์เหมือนกันกับที่ใช้ในการคำนวณค่าทางทฤษฎี รูปที่ 4.8 แสดงผลการวัดความไวการควบคุมความถี่สำหรับกระแสออกค่าต่างๆกัน เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบจึงได้นำผลการคำนวณจากบทที่ 3 กับผลการทดลองแสดงเปรียบเทียบกัน



(ก) จากการคำนวณ



(ข) จากทดลอง

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ความไวของกระแสกับความถี่เทียบกับกระแส รูป (ก) จากการคำนวณและรูป (ข) จากการทดลอง



จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีโดยเฉพาะในย่านความเข้มสูงและความเข้มกลาง ส่วนในย่านความเข้มต่ำๆจะมีความแตกต่างของผลการคำนวณกับผลการทดลองกันบ้าง ซึ่งน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากย่านดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านหลอดเมื่อทำการควบคุมแสง โดยควบคุมความถี่ค่อนข้างมากทำให้เกิดการผิดพลาดจากการวัด ประกอบกับความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งในย่านดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของหลอดกับความถี่มาก ในการคำนวณค่าต่างๆทางทฤษฎี ได้มีการละเลยกำลังสูญเสียจึงมีผลให้มีความต่างกันของค่าแตกต่างๆของอุปกรณ์ และการวัดกระแสผิดเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้มีความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลองในย่านดังกล่าว

#### 4.2 สรุปผลการทดสอบเสถียรภาพการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

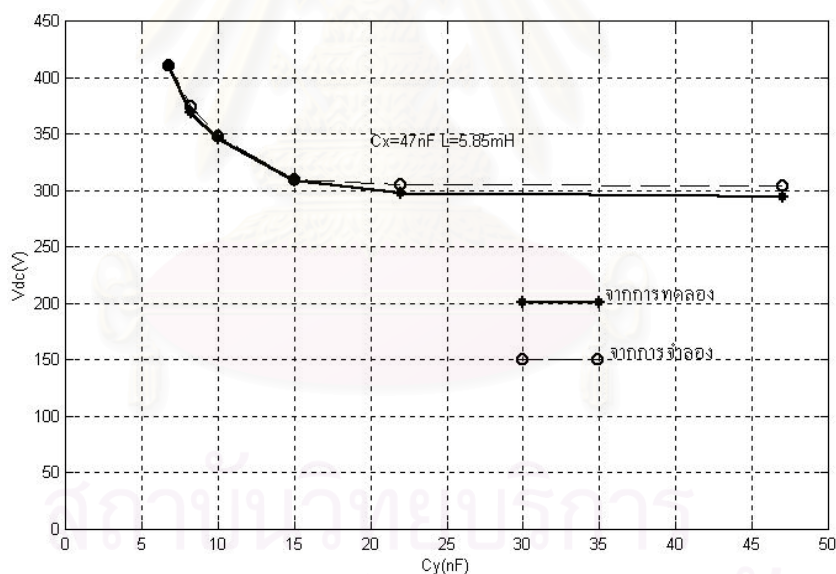
ผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกันจะเห็นได้ว่าในย่านความเข้มแสงต่ำความต้านทานหลอดด้านนอกของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงมากจนมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานหลอด ซึ่งจะส่งผลทำให้กระแสออกเปลี่ยนแปลงกับคุณสมบัติของหลอดมากขึ้น นอกจากนั้นความไวในการเปลี่ยนแปลงกระแสออกกับความถี่จะมีค่าสูงกว่าในย่านความเข้มแสงกลางและสูงเป็นอย่างมากทำให้เป็นการยากต่อการควบคุมแสงให้มีค่าตามต้องการ ดังนั้นจึงน่าจะเป็นไปได้สูงว่าการลดลงของ  $R_{OB}$  และการเพิ่มขึ้นของความไว  $S'_{fs}$  เป็นปัจจัยสำคัญต่อปัญหาในการควบคุมแสงในย่านความเข้มแสงต่ำ

#### 4.3 ผลการทดลองบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

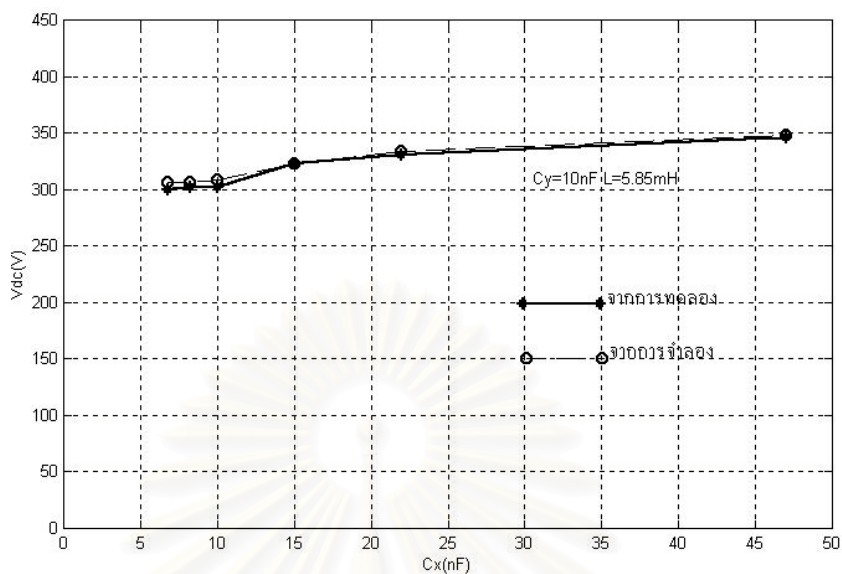
เนื่องจากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 มีภาคการทำงานที่ซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้ค่าจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ประกอบกับค่าจากการทดลองเพื่อพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรคือ  $C_x$   $C_y$   $L$  และ ความถี่ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ค่าความถี่เพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก และค่าตัวประกอบยอดคลื่น โดยจะมีการเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองการทำงานในบทที่ 3 กับผลการทดลองเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ให้เหมาะสม โดยจะแบ่งตามหัวข้อดังนี้

#### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ $V_{dc}$ กับ $C_y$ , $C_x$ , $L$ และความถี่

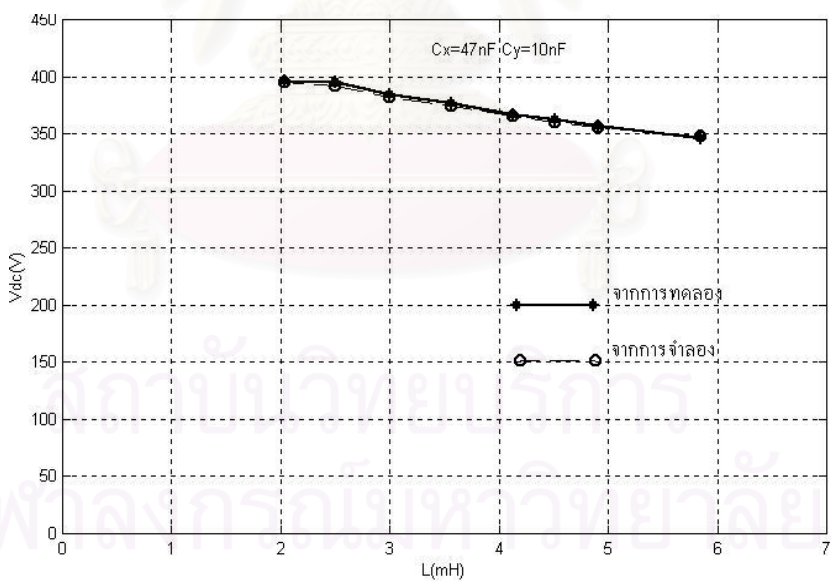
วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 มีการทำงานเหมือนวงจรทระดับ ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟตรงด้านออกของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังซึ่งเป็นแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สูงกว่าแรงดันไฟด้านเข้า ได้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือค่า  $C_y$ ,  $C_x$ ,  $L$  และความถี่ในวงจรกับแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยวิธีการจำลองการทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 3.25-3.28 และผลการทดลองเปรียบเทียบกับกรจำลองการทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 4.9-4.11 โดยให้กำลังออกที่โหลดคงที่เท่ากับ 32 วัตต์ ซึ่งทำได้โดยปรับค่า  $L_s$  ส่วนในกรณีการปรับความถี่เพื่อควบคุมกำลังออกตามรูปที่ 4.12 จะไม่มีการปรับค่า  $L_s$  เพื่อรักษากำลังออก เนื่องจากการควบคุมกำลังออกจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz



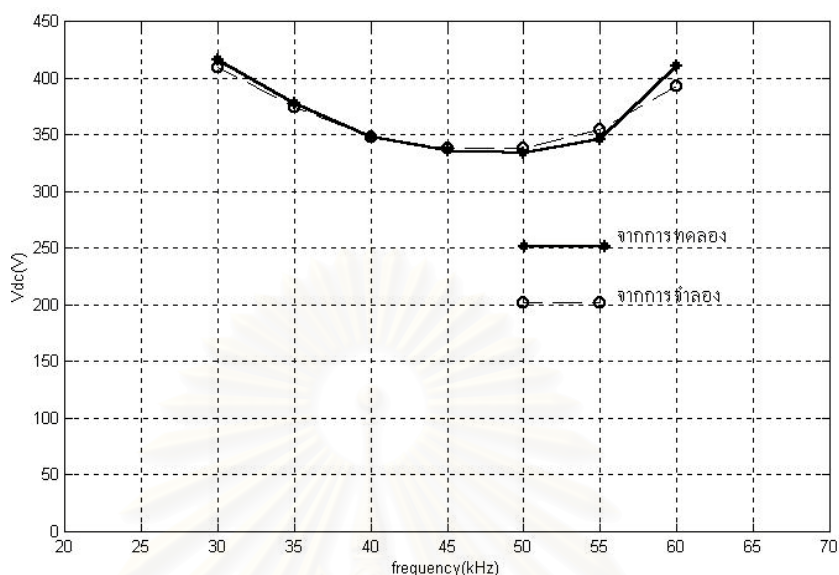
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $C_y$  จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$ ,  $L=5.85\text{ mH}$ ,  $f=40\text{kHz}$



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ Cx จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ Vdc กับ L จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $f=40\text{kHz}$

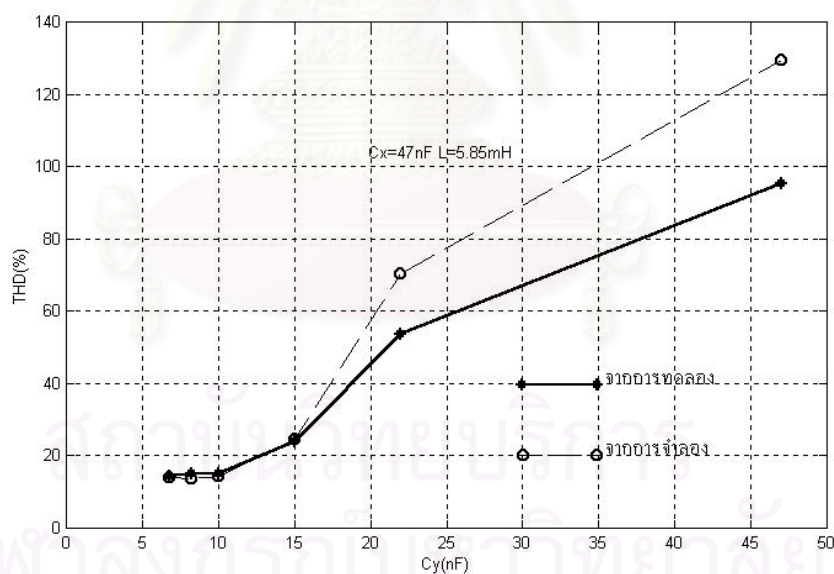


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับความถี่ จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$  กำลังออกลดลงจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz

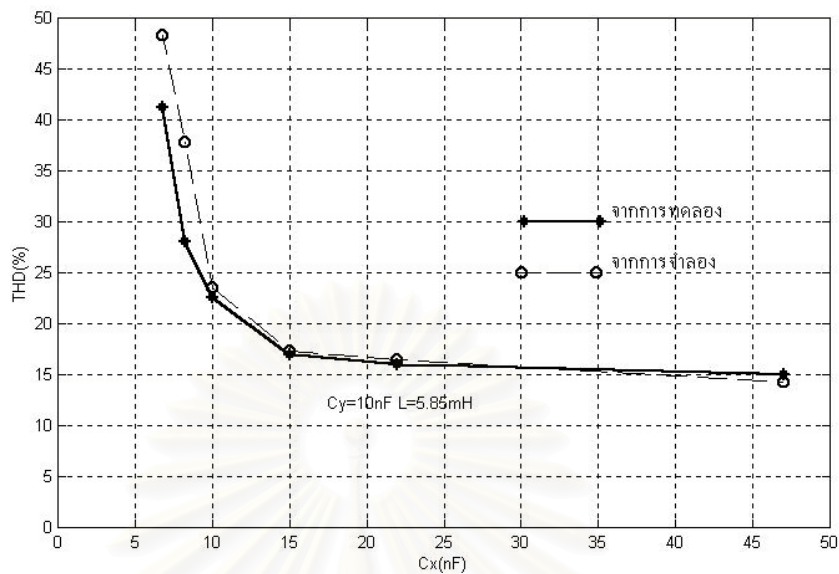
รูปที่ 4.9-4.12 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  กับ  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $L$  และความถี่ จากการทดลองและจากการจำลองตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการทดลอง มีความสอดคล้องกับการจำลอง ค่า  $C_y$  และ  $L$  มีค่ามากขึ้น แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จะลดลง แต่เมื่อ  $C_x$  มีค่ามากขึ้น แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้น การควบคุม แสงโดยการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ สำหรับค่าพิกัด 32 W ที่ความถี่ 40 kHz เมื่อทำการควบคุมให้ความเข้มแสงสูงขึ้น นั่นก็คือลดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ จะพบว่า แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าควบคุมแสงให้ลดลง คือการเพิ่มความถี่ของอินเวอร์เตอร์พบว่า แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะลดลงช่วงแรกแล้วจะกลับเพิ่มขึ้นมาอีก

#### 4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ $C_y$ , $C_x$ , $L$ และความถี่

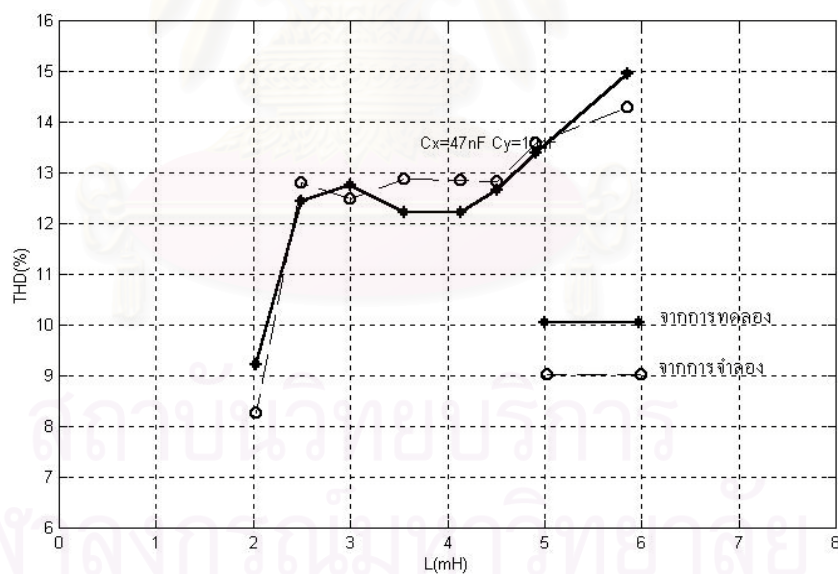
วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังจะหน้าที่ปรับรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เพื่อลดกระแสฮาร์โมนิก และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าโดยให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ตามตารางที่ 2.1 วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือค่า  $C_y$ ,  $C_x$ ,  $L$  และความถี่การทำงานของวงจรกับค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมโดยวิธีการจำลองการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.29-3.32 และผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงาน ในรูปที่ 4.13-4.15 โดยให้กำลังออกที่โหลดคงที่เท่ากับ 32 วัตต์ ซึ่งทำได้โดยปรับค่า  $L_s$  ส่วนในกรณีการปรับความถี่เพื่อควบคุมกำลังออกตามรูปที่ 4.16 จะไม่มีการปรับค่า  $L_s$  เพื่อรักษากำลังออก เนื่องจากเป็นการควบคุมกำลังออก จาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz



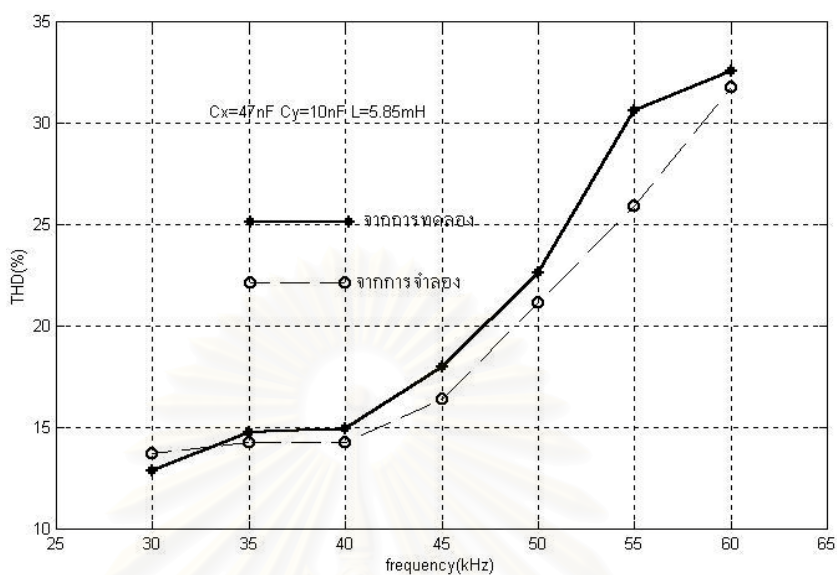
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ  $C_y$  จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ Cx จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD กับ L จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $f=40\text{kHz}$



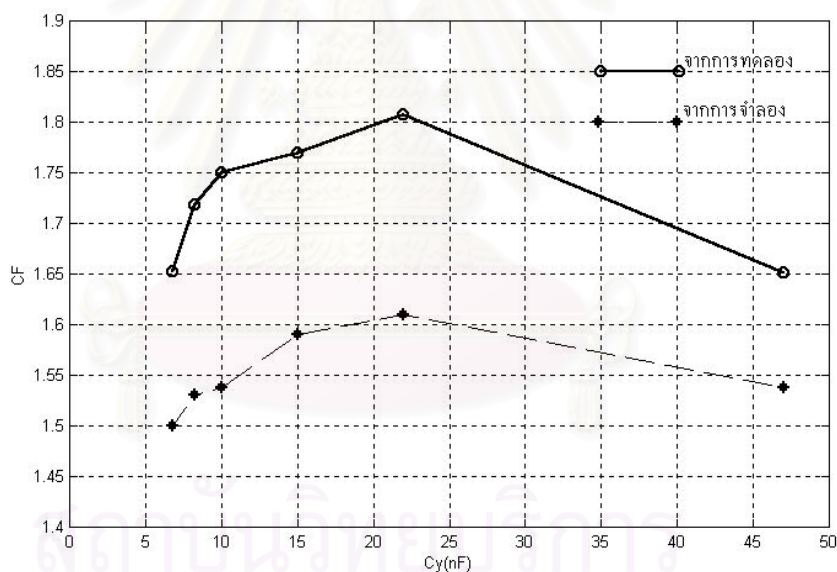
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับความถี่ จกการทดลองและ จกการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$  กำลังออกทดลองจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่ จาก 30-60 kHz

รูปที่ 4.13-4.16 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม THD กับ  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $L$  และความถี่ จกการทดลองและจกการจำลองตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการจำลอง ค่า  $C_y$  และ  $L$  มีค่ามากขึ้น ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมจะเพิ่มขึ้น  $C_x$  มีค่ามากขึ้น ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมจะลดลง การควบคุมแสงโดยการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ สำหรับค่าพิกัด 32 W ที่ความถี่ 40 kHz เมื่อทำการควบคุมให้ความเข้มแสงสูงขึ้น นั่นก็คือลดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ จะพบว่า ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมจะลดลง แต่ถ้าควบคุมแสงให้ลดลง คือการเพิ่มความถี่ของอินเวอร์เตอร์พบว่า ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมจะเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

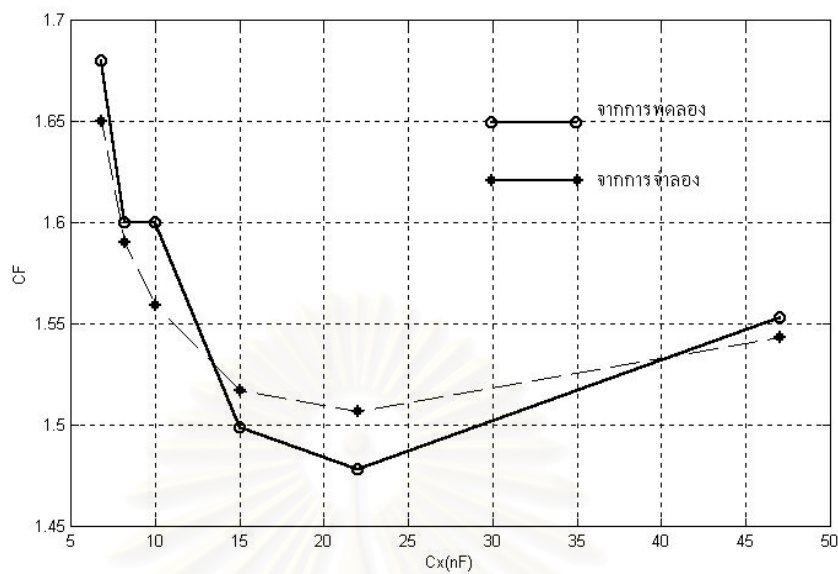
#### 4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่นกับ $C_y$ , $C_x$ , $L$ และความถี่

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรมีตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่เกิน 1.7 กรณีกระแสไฟสลับรูปไซน์จะมีค่า ตัวประกอบขดคลื่นของกระแสผ่านหลอดใกล้เคียง 1.414 จะช่วยให้หลอดมีอายุการใช้งานยาวนาน มีการสีกหรือของไส้หลอดน้อย วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือค่า  $C_y$   $C_x$   $L$  และความถี่ในวงจรกับค่าตัวประกอบขดคลื่น โดยวิธีการจำลองการทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 3.33-3.36 และผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 4.17-4.19 โดยให้กำลังออกที่โหลดคงที่เท่ากับ 32 วัตต์ ซึ่งทำได้โดยปรับค่า  $L_s$  ส่วนในกรณีการปรับความถี่เพื่อควบคุมกำลังออกตามรูปที่ 4.20 จะไม่มีการปรับค่า  $L_s$  เพื่อรักษากำลังออก เนื่องจากการควบคุมกำลังออก จาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz

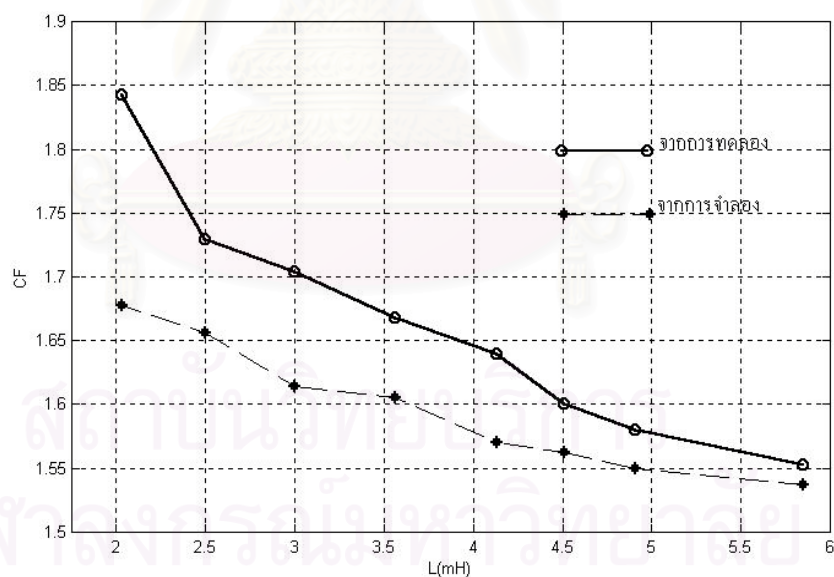


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดคลื่น กับ  $C_y$  จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x=47\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$

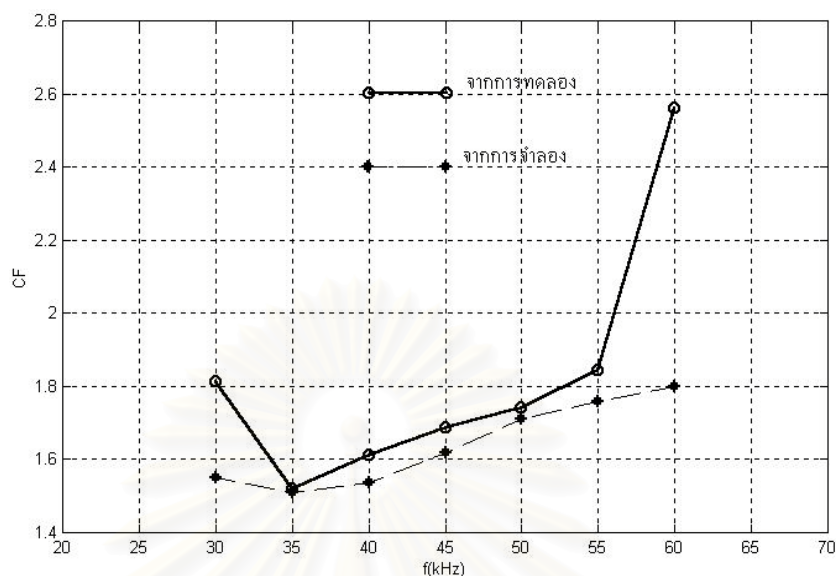




รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขอดคลี่กับ  $C_x$  จากการทดลองและจากการจำลอง  
เมื่อ  $C_y=10\text{nF}$   $L=5.85\text{mH}$   $f=40\text{kHz}$



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขอดคลี่กับ  $L$  จากการทดลองและจากการจำลอง  
เมื่อ  $C_x = 47\text{nF}$   $C_y=10\text{nF}$   $f=40\text{kHz}$



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดลวดกับความถี่ จากการทดลองและจากการจำลอง เมื่อ  $C_x = 47\text{nF}$   $C_y = 10\text{nF}$   $L = 5.85\text{mH}$  กำลังออกทดลองจาก 37 ถึง 6W เมื่อปรับความถี่จาก 30-60 kHz

รูปที่ 4.17-4.20 เป็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบขดลวดของกระแสผ่านหลอดกับ  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $L$  และความถี่ จากการทดลองและจากการจำลองตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการจำลองการทำงาน แต่มีค่าผิดพลาดบ้างเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหลอดฟลูออเรสเซนต์

#### 4.4 แนวทางในการเลือกค่าอุปกรณ์

จากวงจรรูปที่ 3.12 การทำงานของวงจรจับซ้อนมีการทำงานถึง 4 ภาคการทำงาน การวิเคราะห์ด้วยสมการทำได้บางภาคการทำงานดังเช่น ภาคการทำงานภาคกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_x$  ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_y$  ไม่ต่อเนื่อง โดยสมมติให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L$  มีค่าใหญ่มากทำให้กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $I_x$ ) คงที่ และให้แหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ง่ายกับการวิเคราะห์ เพื่อหาอัตราการผลิตแรงดันทำให้ทราบว่า มีตัวแปรใดบ้างมีผลบ้าง การเลือกค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสมจะอาศัยการจำลองและทดลองกับวงจรจริง โดยพิจารณาผลค่าอุปกรณ์  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $L$  และความถี่ กับแรงดันไฟตรงด้าน

เข้าของอินเวอร์เตอร์  $V_{dc}$  ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD และค่าตัวประกอบยอดคลื่น CF จากหัวข้อที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม และค่าตัวประกอบยอดคลื่น กับ  $C_y, C_x, L$  และความถี่จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และจากการทดลองจริง

	$C_y$ เพิ่มขึ้น	$C_x$ เพิ่มขึ้น	$L$ เพิ่มขึ้น	ความถี่เพิ่มขึ้น
$V_{dc}$	↓	↗	↘	∪
THD	↑	↓	↗	↑
CF	∩	∪	↘	∪

- ↓ หมายถึง การลดลงอย่างมาก
- ↑ หมายถึง การเพิ่มขึ้นอย่างมาก
- ↗ หมายถึง การเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- ↘ หมายถึง การลดลงเพียงเล็กน้อย
- ∪ หมายถึง การลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้น
- ∩ หมายถึง การเพิ่มขึ้นแล้วกลับมาลดลง

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มค่า  $C_y$  จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ลดลงอย่างมาก ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นอย่างมาก และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะเพิ่มขึ้นแล้วกลับมาลดลง

เมื่อเพิ่มค่า  $C_x$  จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมลดลงอย่างมาก และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มค่า  $L$  จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ลดลงเพียงเล็กน้อย ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะลดลงเพียงเล็กน้อย

เมื่อเพิ่มความถี่จะทำให้แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้นอีก ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นอย่างมาก และค่าตัวประกอบยอดคลื่นจะลดลงแล้วกลับมาเพิ่มขึ้นอีก

#### 4.4.1 แนวทางในการเลือก Cy

ในการเลือก Cy นั้นควรให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD น้อยกว่า 20 % และตัวประกอบยอดคลื่น CF น้อยกว่า 1.7 จากรูปที่ 4.13 และ 4.17 จะเห็นได้ว่า Cy ควรจะมีค่าประมาณ 6.8-10nF

#### 4.4.2 แนวทางในการเลือก Cx

ในการเลือก Cx นั้นควรให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD น้อยกว่า 20 % และตัวประกอบยอดคลื่น CF น้อยกว่า 1.7 จากรูปที่ 4.14 และ 4.18 จะเห็นได้ว่า Cx ควรจะมีค่ามากกว่า 20nF

#### 4.4.3 แนวทางในการเลือก L

ในการเลือก L นั้นควรให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD น้อยกว่า 20 % และตัวประกอบยอดคลื่น CF น้อยกว่า 1.7 จากรูปที่ 4.15 และ 4.19 จะเห็นได้ว่า L ควรจะมีค่าประมาณ 3-6mH

#### 4.5 สรุปแนวทางในการเลือกค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสม

จากวงจรรูปที่ 3.12 และผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าในการเลือกค่าอุปกรณ์นั้นเพื่อที่จะให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม THD มีค่าต่ำ นั่นก็คือ ควรเลือกค่า Cx มีค่ามากกว่า 20nF ค่า Cy มีประมาณ 6.8-10nF และค่า L มีค่าประมาณ 3-6 mH ตัวอย่างค่าที่เหมาะสมจากการทดลองเช่นเลือกค่า Cx=47nF Cy=10nF L=5.85 mH และความถี่ 40 kHz ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก รวม 14.9 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.55 และแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 345 V และจากการจำลองการทำงานจะได้ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม 14.2% ตัวประกอบยอดคลื่น

1.53 และแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ 348 V ทั้งจากการทดลองและจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากและเป็นค่าที่เหมาะสม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำและหาแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และศึกษาผลของการควบคุมแสงต่อวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

การศึกษาเสถียรภาพของการควบคุมแสงประกอบด้วยการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเสถียรภาพของการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำและแนวทางการแก้ไข ซึ่งประกอบด้วย ปัญหาเสถียรภาพของจุดทำงานและความไวของการควบคุม ปัญหาเสถียรภาพของจุดทำงานในย่านกระแสออกต่ำนั้นเกิดจากการลดลงของความต้านทานพลวดด้านออกของบัลลาสต์ในย่านกระแสออกต่ำๆอีกทั้งมีค่าเข้าใกล้ความต้านทานหลอด ทำให้ความเป็นแหล่งกระแสของแหล่งลดลง อย่างไรก็ตามการที่ขนาดของความต้านทานพลวดด้านออกของบัลลาสต์มีค่าสูงกว่าขนาดของความต้านทานพลวดของหลอดแสดงว่าจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กับหลอดฟลูออเรสเซนต์มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานที่ใช้ควบคุมแสง กรณีความไวของการเปลี่ยนแปลงกระแสกับความถี่นั้นพบว่าในย่านที่กระแสออกและกำลังออกจากหลอดมีค่ามากขนาดความไวในการควบคุมแสงจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อกระแสออกลดลงขนาดความไวในการควบคุมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะในย่านที่กระแสออกมีค่าระหว่าง 20-120 mA ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เพียงเล็กน้อย จะมีผลทำให้กระแสผ่านหลอดเปลี่ยนไปอย่างมาก ผลการคำนวณดังกล่าวจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงการลดลงของเสถียรภาพการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในย่านความเข้มแสงต่ำๆอีกอย่างหนึ่ง สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ซึ่งใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังร่วมกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะมีข้อดีในการลดจำนวนสวิตช์ไวงาน และวงจรขับนำสวิตช์ได้ โดยสามารถใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมแสงได้ อย่างไรก็ตามวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงได้ที่ใช้ วงจรเพิ่มค่า

ตัวประกอบกำลัง (PFC) แบบ single stage จะมีผลกระทบกระทั่งระหว่างวงจรทั้งสองเมื่อทำการปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์กรณีที่ทำการควบคุมปริมาณแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เช่น ผลต่อแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก ตัวประกอบขดคลื่น เป็นต้น ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการออกแบบวงจรจึงจะต้องออกแบบอย่างเหมาะสม เนื่องจากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ตามรูปที่ 3.12 มีโหมดการทำงานที่ซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ประกอบกับผลจากการทดลองวงจรเพื่อพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage ให้เหมาะสม

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

1. ในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ได้ละเลยผลของกระแสฮาร์มอนิกโดยคิดเฉพาะความถี่หลัก มวลขอแรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าทางทฤษฎีได้และได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ เพื่อให้ผลการคำนวณทางทฤษฎีมีความถูกต้องมากขึ้น ควรหาวิธีการคำนวณโดยนำผลของกระแสฮาร์มอนิกมาพิจารณาร่วมด้วย
2. ในการวิเคราะห์วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage เพื่อหาแนวทางในการออกแบบนั้น เนื่องจากวงจรมีการทำงานหลายภาคการทำงาน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถวิเคราะห์วงจรได้เพียงภาคการทำงานที่ 1 เพียงภาคเดียว และบางเงื่อนไข เท่านั้น ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ การวิเคราะห์จะมีความสมบูรณ์ หากได้มีการพิจารณาการทำงานในภาคการทำงานที่แตกต่างกันอย่างครบถ้วน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

คณิต ชัยวัฒนา ยุทธนา กุลวิทิต . "เสถียรภาพการควบคุมแสงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความเข้มแสงต่ำ". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543, หน้า 245-248.

โคทม อารียา. "เอกสารประกอบการสอนวิชา Power Electronic." ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2537.

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

ยุทธนา กุลวิทิต. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับโหลดฟลูออเรสเซนต์ชนิดที่รีแสงได้.

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กองเศรษฐกิจการพลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 2536.

ยุทธนา กุลวิทิต จิโรจน์ พรวัฒนา. "ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเข้าต่อความน่าเชื่อถือได้ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543, หน้า 249-252.

ยุทธนา กุลวิทิต, เจิดกุล โสภานิตย์. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับโหลดฟลูออเรสเซนต์.

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กองเศรษฐกิจการพลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 2535.

ยุทธนา กุลวิทิต ไพศาล บุญเยี่ยม . "วิธีเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543, หน้า 253-256.

สมชาย เปรมรุ่งพันธ์ ยุทธนา กุลวิทิต . "การศึกษาความไวการเปลี่ยนแปลงกำลังออกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 (EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543, หน้า 261-264.



ภาษาอังกฤษ

- Chin S.Moo., Hung L. Cheng., Tsai F. Lin and Hau C. Yen. “Designing a dimmable electronic ballast with voltage control for fluorescent lamp”. ISIE 1999 , pp 786-791.
- E. Deng and S. Cuk, “Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps”. IEEE Applied Power Electronics Conference, 1997 Record.
- Gluskin E. “A contribution to the theory of fluorescent lamp circuits”. IEEE Circuit and system. 1988 , pp 1385-1388.
- Gluskin E. “On the theory of fluorescent lamp circuits”. IEE science, Measurement and Technology 1990 , pp 201-208.
- Hammer, E.E. "Effects of changing line voltage with various fluorescent systems". Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 24 4 , July-Aug. 1988 , pp 692 –699.
- John G. Kassakian, Martin F. Schlecht, George C. Verghese “Principles of Power Electronics ” addison-wesley publishing 1991.
- J. R. Coaton and A. M. Marsden. “Lamps and Lighting Forurth Edition” A. member of the hodder Headline Group. Arnold and contributors 1997.
- J.R. Coaton, A.M. Marsden. Lamp and Lighting ,(n.p.): John Wiley and sons , 1990.
- Marian K. Kazimierczuk, Dariusz Czarkowski. Resonant Power Converters,(n.p.): John Wiley and sons , 1995.
- Mark Sun, Bryce L. Hesterman. “Pspice high-frequency dynamic fluorescent lamp model”. IEEE transaction on power electronics, Vol.13 No.2 , 1998.
- Mohan, Undeland, Robbins “Power Electronics converter, appications and design” johnwilil & sons , 1989.
- Moo C.S., Cheng H.L., Chen H.N. and Yen H.C. “Designing dimmable electronic ballast with Frequency control”. APEC Annual meeting .1999 , pp 727-733.
- Motorola semiconductor application note “Electronic Lamp Ballast Design” 1995.
- Onishi N., Shiomi T., Okude A. and Yamauchi T. “A Fluorescent lamp model for high frequency wide range dimming electronic ballast simulation”. IEEE APEC conference record , 1999 , pp 1001-1005.

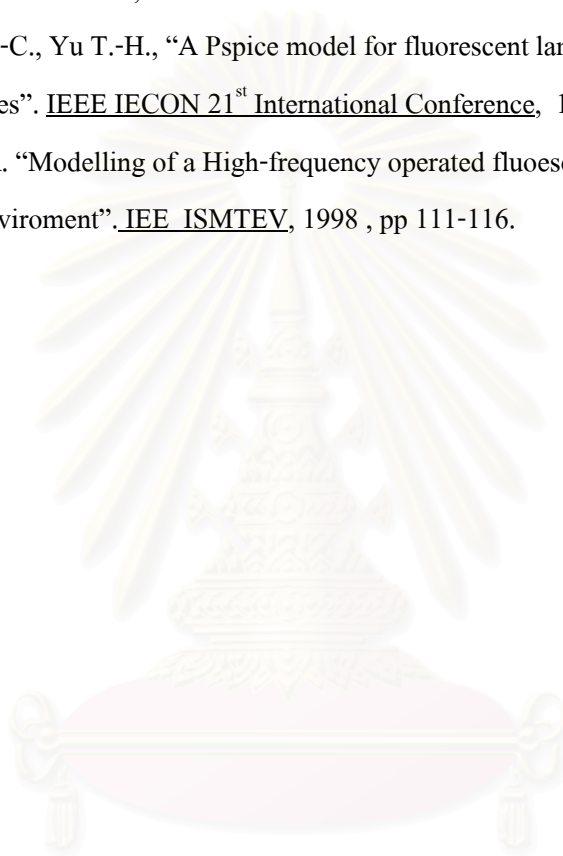
- Qian J.; Lee F.C. and Yamauchi T., "Current source charge pump power factor correction electronic ballast". IEEE Power Electronic Specialists Conf., 1997 , pp433-441.
- Qian J.; Lee F.C. and Yamauchi T., "New Continuous-Input Current Charge Pump Power-Factor-Correction Electronic Ballast". IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.35 No.2 , 1999 ,pp433-441.
- Qian J. and Lee F.C., "Charge pump power-factor-correction technologies.I. Concept and principle,". IEEE Transaction on Power Electronic, Vol.15 No.1 , 2000 , pp121-129.
- Qian J. and Lee F.C., "Charge pump power-factor-correction technologies. Part II. Ballast Applications,". IEEE Transaction on Power Electronic, Vol.15 No.1 , 2000, pp130-139.
- Philiy T. Krein " Elements of Power Electronics", New York Oxford, 1998.
- R. S. Ramshaw, " Power Electronics Semiconductor Switches" . chapman & hall 1993.
- Ribas J.; Alonso J.M.; Corominas E.L.; Calleja A.J. and Rico-Secades M."Design considerations for optimum ignition and dimming of fluorescent lamps using a resonant inverter operating open loop". Industry Applications Conference, 1998., pp2068-2075.
- Robert W. Erickson " Fundamentals of Power Electronics" . johnwilil & sons 1997.
- Santi E.; Zhang Z. and Cuk S., "High frequency electronic ballast provides line frequency lamp current," IEEE Power Electronics Specialists Conference(PESC), 1998 Record., pp2047-2054.
- Spangler J.; Hussain B. and Behera A.K., "Electronic Fluorescent Ballast using a Power Factor Correction Tcchniques for Loads Greater than 300 Watts" . APEC Annual meeting , 1991 , pp 393-399.
- T. Liu, K.J. Tseng and D.M. Vilathgamuwa. "A Pspice model for the electrical characteristics of fluorescent lamp". IEEE/IAS conference record , 1998.
- Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A new high-frequency fluorescent lamp model". IEEE IAS Annual meeting , 1998 , pp 2094-2098.
- Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A New model for high-frequency electronic ballast design". Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting , 1997 , pp 2334-2339.
- Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A New procedure for high-frequency electronic ballast design". Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting ,1997.

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

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

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

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



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

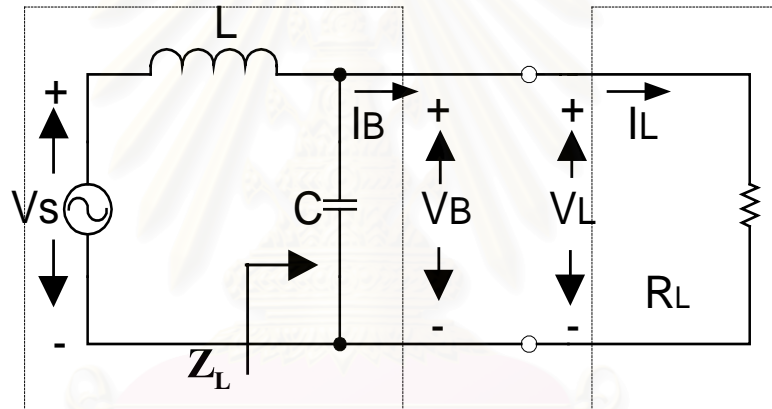
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

#### สมการการวิเคราะห์และออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ภาคผนวก ก.1 สมการจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อให้ตัวต้านทานเป็นโหลดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์

ในการหาสมการจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อให้ตัวต้านทานเป็นโหลดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยการคำนวณหาแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ( $V_o$ ) และกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ ( $I_o$ ) ตามสมการที่ 3.2 และ 3.3 จะได้ตามสมการที่ ก.1.2 และ ก.1.3 ตามลำดับ



รูปที่ ก.1 วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์

$$Z_L = \frac{R}{RCS + 1}$$

อิมพีแดนซ์รวม

$$Z = Z_L + LS = \frac{R + RLCS^2 + LS}{RCS + 1} \quad (\text{ก.1.1})$$

$$V_o = \frac{Z_L}{Z_L + Z} V_s = \frac{1}{LCS^2 + \frac{L}{R}S + 1} V_s$$

ให้  $S = j\omega$

$$V_o = \frac{V_s}{LC(j\omega)^2 + \frac{L}{R}j\omega + 1} = \frac{V_s}{[1 - LC\omega^2] + j\frac{\omega L}{R}}$$

หาแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์และมุมของแรงดันอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

$$V_o = \frac{V_s}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2}}, \angle V_o = -\arctan\left[\frac{\left(\frac{L\omega}{R}\right)}{(1 - LC\omega^2)}\right] \quad (\text{ก.1.2})$$

หากระแสออกของอินเวอร์เตอร์และมุมของกระแสออกอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_s/R}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2}}, \angle I_o = -\arctan\left[\frac{\left(\frac{L\omega}{R}\right)}{(1 - LC\omega^2)}\right] \quad (\text{ก.1.3})$$

### ภาคผนวก ก.2 ความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์

เสถียรภาพของจุดทำงานจะใช้การเปรียบเทียบขนาดความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์ที่จุดทำงาน การคำนวณค่าความต้านทานพลวัตของบัลลาสต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลดของบัลลาสต์ คำนวณจากสมการที่ 3.2 และ 3.3 จะได้ผลดังสมการที่ ก.2.3

จากสมการที่ ก.1.2 หาอนุพันธ์ของแรงดันออกของบัลลาสต์เทียบกับความต้านทาน

$$\frac{dV_o}{dR} = \frac{(L\omega)^2 V_s}{R^3 \left[ (1 - LC\omega^2)^2 + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{ก.2.1})$$

จากสมการที่ ก.2.1 หาอนุพันธ์ของกระแสออกของบัลลาสต์เทียบกับความต้านทาน

$$\frac{dI_o}{dR} = \frac{V_s [(1-LC\omega^2)^2 R]}{[(1-LC\omega^2)^2 R^2 + (L\omega)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{ก.2.2})$$

จากสมการที่ ก.2.1 และ ก.2.2 สามารถหาความต้านทานออกของบัลลาสต์ได้ดังนี้

$$R_{OB} = \frac{dV_o}{dI_o} = \frac{dV_o}{dR} \times \frac{dR}{dI_o} = \frac{(L\omega)^2 V_s}{R^3 \left[ (1-LC\omega^2)^2 + \left( \frac{L\omega}{R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{[(1-LC\omega^2)^2 R^2 + (L\omega)^2]^{\frac{3}{2}}}{V_s [(1-LC\omega^2)^2 R]}$$

$$R_{OB} = \frac{-(L\omega)^2}{R \left[ (1-LC\omega^2)^2 \right]} = \frac{-(L\omega)^2}{R \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 \right]^2} \quad (\text{ก.2.3})$$

ภาคผนวก ก.3 ความถี่  $f_s$  ที่จุดทำงานต่างๆบน Lamp line

การควบคุมแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านหลอด ซึ่งสามารถทำได้โดยปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ ก.1.2 สามารถหาความถี่  $f_s$  ที่จุดทำงานต่างๆบน Lamp line ได้ดังสมการที่ ก.3.

จากรูปที่ ก.1 เมื่อเขียนสมการเคอร์ชอฟฟ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วออกของบัลลาสต์จะได้  $V_B = V_L$  และ  $I_B = I_L$  จะได้

$$V^2 = \frac{V_s^2}{(1-LC\omega^2)^2 + \frac{(L\omega)^2}{\frac{V^2}{I^2}}}$$

$$L^2 C^2 V^2 \omega^4 + (L^2 I^2 - 2LCV^2) \omega^2 + V^2 - V_s^2 = 0$$

$$\omega^4 + \left( \frac{L^2 I^2 - 2LCV^2}{L^2 C^2 V^2} \right) \omega^2 + \frac{V^2 - V_s^2}{L^2 C^2 V^2} = 0 \quad (\text{ก.3.1})$$

จากสมการที่ ก.3.1 สามารถแก้สมการหาคำตอบ  $\omega$  ได้ดังนี้

$$\omega = \pm \sqrt{-\left(\frac{L^2 I^2 - 2LCV^2}{2L^2 C^2 V^2}\right)} \pm \sqrt{\left(\frac{L^2 I^2 - 2LCV^2}{2L^2 C^2 V^2}\right)^2 + \left(\frac{V_S^2 - V^2}{L^2 C^2 V^2}\right)} \quad (\text{ก.3.2})$$

จากสมการที่ ก.3.2 พบว่ามีคำตอบของสมการได้ 4 คำตอบ แต่มีคำตอบเพียงคำตอบที่เป็นจริงคือ

$$\omega = \sqrt{-\left(\frac{L^2 I^2 - 2LCV^2}{2L^2 C^2 V^2}\right) + \sqrt{\left(\frac{L^2 I^2 - 2LCV^2}{2L^2 C^2 V^2}\right)^2 + \left(\frac{V_S^2 - V^2}{L^2 C^2 V^2}\right)}} \quad (\text{ก.3.3})$$

#### ภาคผนวก ก.4 ความไวในการควบคุมแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ความไว (Sensitivity)  $s_{f_s}^{I_L}$  ของการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านหลอดกับความถี่ในกระแส ออกต่าง ๆ กัน เริ่มจากสมการที่ ก.1.2 และมีการคำนึงถึงผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานหลอดกับความถี่และผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันหลอดกับกระแสผ่านหลอดด้วยได้ค่าของ  $s_{f_s}^{I_L}$  ตามสมการที่

$$I_o = \frac{V_s / R}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2}}$$

$$I^2 \left[ R^2 (1 - LC\omega^2)^2 + (\omega L)^2 \right] = V_s^2$$

$$2I \frac{dI}{d\omega} \left[ R^2 (1 - LC\omega^2)^2 + (\omega L)^2 \right] +$$

$$I^2 \left[ R^2 (1 - LC\omega^2) (-4LC\omega) + (1 - LC\omega^2)^2 2R \frac{dR}{d\omega} + 2\omega L^2 \right] = 0$$



$$\frac{dI}{d\omega} = \frac{-I \left[ R^2(-2LC\omega)(1-LC\omega^2) + R \frac{dR}{d\omega} (1-LC\omega^2)^2 + \omega L^2 \right]}{\left[ R^2(1-LC\omega^2)^2 + (\omega L)^2 \right]} \quad (\text{ก.4.1})$$

จากสมการที่ ก.4.1 สามารถหาความไวของการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านหลอดกับความถี่ในกระแสออกต่าง ๆ กัน ได้ดังนี้

$$S_{\omega}^I = \frac{dI}{d\omega} \times \frac{\omega}{I} = \frac{-I \left[ R^2(-2LC\omega)(1-LC\omega^2) + R \frac{dR}{d\omega} (1-LC\omega^2)^2 + \omega L^2 \right]}{\left[ R^2(1-LC\omega^2)^2 + (\omega L)^2 \right]} \times \frac{\omega}{I}$$

$$S_{\omega}^I = \frac{2\omega^2 LC(1-LC\omega^2) - \frac{\omega}{R} \frac{dR}{d\omega} (1-LC\omega^2)^2 - \left( \frac{\omega L}{R} \right)^2}{\left[ (1-LC\omega^2)^2 + \left( \frac{\omega L}{R} \right)^2 \right]} \quad (\text{ก.4.2})$$

ภาคผนวก ก.5 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ที่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ single stage

จากรูปที่ 3.10 แสดงวงจรสมมูล และรูปที่ 3.21 รูปคลื่นการทำงานของวงจรสามารถหาสมการของมุม  $\theta$  และอัตราขยายแรงดันได้ดังนี้

$$i_s(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{ก.5.1})$$

$$i_x(t) = \langle I_x \rangle \approx \text{คองที่} = I_m \sin \theta \quad (\text{ก.5.2})$$

ที่ node A ในช่วง  $t = t_o$  ถึง  $t = t_f$ ,  $V_C < V_B$  ไดโอด D ไม่นำกระแส

$$i_x(t) = i_c(t) + i_s(t) \quad \text{จะได้} \quad i_c(t) = i_x(t) - i_s(t) \quad (\text{ก.5.3})$$

แทนสมการ (ก.5.3) ด้วยสมการที่ (ก.5.1) และ (ก.5.2) จะได้

$$C \frac{dv_c(t)}{dt} = \text{Im} \sin \theta - \text{Im} \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{ก.5.4})$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{\text{Im}}{C} \sin \theta - \frac{\text{Im}}{C} \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{ก.5.5})$$

จากสมการ ก.5.5 หา  $v_c(t)$  ที่เวลา  $t = t_o = 0$   $v_c(0) = v_B$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t=0}^{t=t_f} \text{Im} \sin \theta dt - \frac{1}{C} \int_{t=0}^{t=t_f} \text{Im} \sin(\omega t + \theta) dt + V_B \quad (\text{ก.5.6})$$

$$v_c(t) = \left[ \left( \frac{\text{Im}}{C} \sin \theta \times t \right) \right]_0^{t_f} + \left[ \left( \frac{\text{Im}}{C} \frac{\cos(\omega t + \theta)}{\omega} \right) \right]_0^{t_f} + V_B \quad (\text{ก.5.7})$$

$$v_c(t) = V_B + \frac{\text{Im}}{C} t \sin \theta + \frac{\text{Im}}{\omega C} \cos(\omega t + \theta) - \frac{\text{Im}}{\omega C} \cos \theta \quad (\text{ก.5.8})$$

จากสมการ ก.5.8 ณ เวลา  $t = t_f, v_c(t) = V_B$

$$V_B = \frac{\text{Im}}{C} \sin \theta \times t_f + \frac{\text{Im}}{\omega C} \cos(\omega t_f + \theta) - \frac{\text{Im}}{\omega C} \cos \theta + V_B$$

$$t_f = \frac{\cos \theta - \cos(\omega t_f + \theta)}{\omega \sin \theta}$$

$$2\pi f t_f = \frac{\cos \theta - \cos(2\pi \frac{t_f}{Ts} + \theta)}{\sin \theta}$$

$$t_{fn} = \frac{t_f}{T_s} = \frac{\cos \theta - \cos \left[ 2\pi \left( \frac{t_f}{T_s} \right) + \theta \right]}{2\pi \sin \theta} \quad (\text{ก.5.8})$$

หาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C ได้ดังนี้

$$v_c(t) = V_B + \frac{\text{Im}}{C} t \sin \theta + \frac{\text{Im}}{\omega C} \cos(\omega t + \theta) - \frac{\text{Im}}{\omega C} \cos \theta \quad \text{เมื่อ } 0 < t < t_f \quad (\text{ก.5.9})$$

$$v_c(t) = V_B \quad \text{เมื่อ } t_f < t < T_s \quad (\text{ก.5.10})$$

จากสมการที่ ก.5.9 และ ก.5.10 หาค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C ได้ดังนี้

$$\langle v_c \rangle = V_B - \frac{\text{Im} \cos \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right) + \frac{\pi \text{Im} \sin \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right)^2 + \frac{\text{Im}}{2\pi \omega C} [\sin(\omega t_f + \theta) - \sin \theta] \quad (\text{ก.5.11})$$

จากสมการที่ ก.5.11 และหลักการของสมดุลแรงดันไฟฟ้า-วินาที ในตัวเหนี่ยวนำจะได้  $\langle v_c \rangle = v_s$  และให้  $\frac{t_f}{T_s} = t_{fn}$  สามารถหาอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$V_B = V_s + \frac{\text{Im} \cos \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right) - \frac{\pi \text{Im} \sin \theta}{\omega C} \left( \frac{t_f}{T_s} \right)^2 - \frac{\text{Im}}{2\pi \omega C} [\sin(\omega t_f + \theta) - \sin \theta] \quad (\text{ก.5.12})$$

จากสมการที่ ก.5.12 และให้  $V_{cmn} = \frac{\text{Im}}{\omega C V_s}$  สามารถหาอัตราขยายแรงดันได้ดังนี้

$$M = \frac{V_B}{V_s}$$

$$M = 1 + \left\{ V_{cmn} t_{fn} \cos \theta - \pi V_{cmn} \sin \theta \times t_{fn}^2 - \frac{V_{cmn}}{2\pi} [\sin(2\pi t_{fn} + \theta) - \sin \theta] \right\} \quad (\text{ก.5.13})$$

### ภาคผนวก ข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสมการการวิเคราะห์และออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้  
โปรแกรม matlab

ภาคผนวก ข.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับ ballast line

```
Vdc=350;
fs=20000;
L=1.4e-3;
C=8.2e-9;
Ws=2*pi*fs;
Wo=1/sqrt(L*C);
Wn=Ws/Wo;
Vs=sqrt(2)*Vdc/pi;
R=1:10:50000;
IBo=(Vs./R);
Wx=(Ws*L)./R;
IB=IBo./sqrt((1-Wn^2)^2+(Wx).^2);
VB=Vs./sqrt((1-Wn^2)^2+(Wx).^2);
plot(IB,VB,'k-')
hold on
```

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับ Lamp line

I=0:0.01:0.6; %Fluorescent Lamp dc model

A0=39;

A1=99.9;

A2=1.58;

A3=40;

A4=59;

B2=-A2\*(I);

B4=-A4\*(I);

E2=exp(B2);

E4=exp(B4);

S0=9900./(100+100\*(I\*1000/4).^5);

S1=A1.\*E2;

S2=A3.\*E4;

V=A0+S1-S2-S0;

plot(I,V,'k-')

hold on

ภาคผนวก ข.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับความต้านทานพลวัตด้านออกของบัลลาสต์

I=0.1:5:1200; %I in milliamperes

A0=39;

A1=99.9;

A2=1.58;

A3=40;

A4=59;

B2=-A2\*(I/1000);

```

B4=-A4*(I/1000);
E2=exp(B2);
E4=exp(B4);
S0=9900./(100+100*(I/4).^5);
S1=A1.*E2;
S2=A3.*E4;
V=A0+S1-S2-S0; %Calculated Lamp Voltage by curve fitting
R=V./(I./1000);
Vdcx=350;
Vsx=sqrt(2)*Vdcx/pi;
Lx=1.5e-3;
Cx=9e-9;
f0x=sqrt(1/(Lx*Cx))/(2*pi);
R0x=sqrt(Lx/Cx);
bx=((R0x./R).^2)-2;
cx=(1-(Vsx./V).^2);
fnx=0.5*(-bx+sqrt(bx.^2-4*cx)); %fnx= (fsx/f0x)^2
fsx=f0x*sqrt(fnx);
wsx=2*pi*fsx;
Rux=((wsx*Lx).^2)./R;
Rdx=(1-fnx).^2;
Rx=Rux./Rdx;
semilogy(I/1000,Rx,'g*-');
hold on
Vdcy=280;
Vsy=sqrt(2)*Vdcy/pi;
Ly=1.5e-3;
Cy=9e-9;

```

```
f0y=sqrt(1/(Ly*Cy))/(2*pi);
```

```
R0y=sqrt(Ly/Cy);
```

```
by=((R0y./R).^2)-2;
```

```
cy=(1-(Vsy./V).^2);
```

```
fny=0.5*(-by+sqrt(by.^2-4*cy)); %fny= (fsy/f0y)^2
```

```
fsy=f0y*sqrt(fny);
```

```
wsy=2*pi*fsy;
```

```
Ruy=((wsy*Ly).^2)./R;
```

```
Rdy=(1-fny).^2;
```

```
Ry=Ruy./Rdy;
```

```
semilogy(I/1000,Ry,'c*-');
```

```
hold on
```

```
Vdcz=230;
```

```
Vsz=sqrt(2)*Vdcz/pi;
```

```
Lz=1.5e-3;
```

```
Cz=9e-9;
```

```
f0z=sqrt(1/(Lz*Cz))/(2*pi);
```

```
R0z=sqrt(Lz/Cz);
```

```
bz=((R0z./R).^2)-2;
```

```
cz=(1-(Vsz./V).^2);
```

```
fnz=0.5*(-bz+sqrt(bz.^2-4*cz)); %fnz= (fsz/f0z)^2
```

```
fsz=f0z*sqrt(fnz);
```

```
wsz=2*pi*fsz;
```

```
Ruz=((wsz*Lz).^2)./R;
```

```
Rdz=(1-fnz).^2;
```

```
Rz=Ruz./Rdz;
```

```
semilogy (I/1000,Rz,'m*-');
```

```
hold on
```

ภาคผนวก ข.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับความต้านทานพลวัตของหลอด

```

I=0.1:5:1200; %I in milliamperes
A0=39;
A1=99.9;
A2=1.58;
A3=40;
A4=59;
B2=-A2*(I/1000);
B4=-A4*(I/1000);
E2=exp(B2);
E4=exp(B4);
S0=9900./(100+100*(I/4).^5);
S1=A1.*E2;
S2=A3.*E4;
V=A0+S1-S2-S0; %Calculated Lamp Voltage by curve fitting
DV=gradient(V);
DI=gradient(I/1000);
RL=-(DV./DI);
plot(I/1000,-RL,'r+-')
hold on

```



ภาคผนวก ข.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับกราฟความสัมพันธ์ของกระแสผ่านหลอดกับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์

I=0.01:0.001:0.8; %I in milliamperes

A0=39;

A1=99.9;

A2=1.58;

A3=40;

A4=59;

B2=-A2\*(I);

B4=-A4\*(I);

E2=exp(B2);

E4=exp(B4);

S0=9900./(100+100\*(I\*1000/4).^5);

S1=A1.\*E2;

S2=A3.\*E4;

V=A0+S1-S2-S0;

Vdc=350;

L=1.4e-3;

C=8.2e-9;

R=V./I;

Vs=(sqrt(2)\*Vdc)/(pi);

a1=(L\*(I)).^2;

b1=2\*L\*C\*V.^2;

c1=(L\*C\*V).^2;

A=-((a1-b1)/(2\*c1));

B=((a1-b1)/(2\*c1)).^2;

D=(V.^2-Vs^2)/(c1);

f1=(1/(2\*pi))\*sqrt(A+sqrt(B-D));

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

plot(f1,I,'r*-')
hold on
Vdc2=280;
R2=V./I;
Vs2=(sqrt(2)*Vdc2)/(pi);
a12=(L*(I)).^2;
b12=2*L*C*V.^2;
c12=(L*C*V).^2;
A2=-((a12-b12)./(2*c12));
B2=((a12-b12)./(2*c12)).^2;
D2=(V.^2-Vs2^2)./(c12);
f1=(1/(2*pi))*sqrt(A2+sqrt(B2-D2));
plot(f12,I,'r*-')
hold on
Vdc3=230;
R3=V./I;
Vs3=(sqrt(2)*Vdc3)/(pi);
A13=(L*(I)).^2;
b13=2*L*C*V.^2;
c13=(L*C*V).^2;
A3=-((a13-b13)./(2*c13));
B3=((a13-b13)./(2*c13)).^2;
D3=(V.^2-Vs3^2)./(c13);
f13=(1/(2*pi))*sqrt(A3+sqrt(B3-D3));
plot(f13,I,'r*-')
hold on

```

ภาคผนวก ข.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับความไวของการเปลี่ยนแปลงกระแสผ่านหลอดกับ  
ความถี่

I=0.01:0.001:0.8; %I in milliamperes

A0=39;

A1=99.9;

A2=1.58;

A3=40;

A4=59;

B2=-A2\*(I);

B4=-A4\*(I);

E2=exp(B2);

E4=exp(B4);

S0=9900./(100+100\*(I\*1000/4).^5);

S1=A1.\*E2;

S2=A3.\*E4;

V=A0+S1-S2-S0;

Vdc=350;

L=1.4e-3;

C=8.2e-9;

R=V./I;

Vs=(sqrt(2)\*Vdc)/(pi);

a1=(L\*(I)).^2;

b1=2\*L\*C\*V.^2;

c1=(L\*C\*V).^2;

A=-((a1-b1)/(2\*c1));

B=((a1-b1)/(2\*c1)).^2;

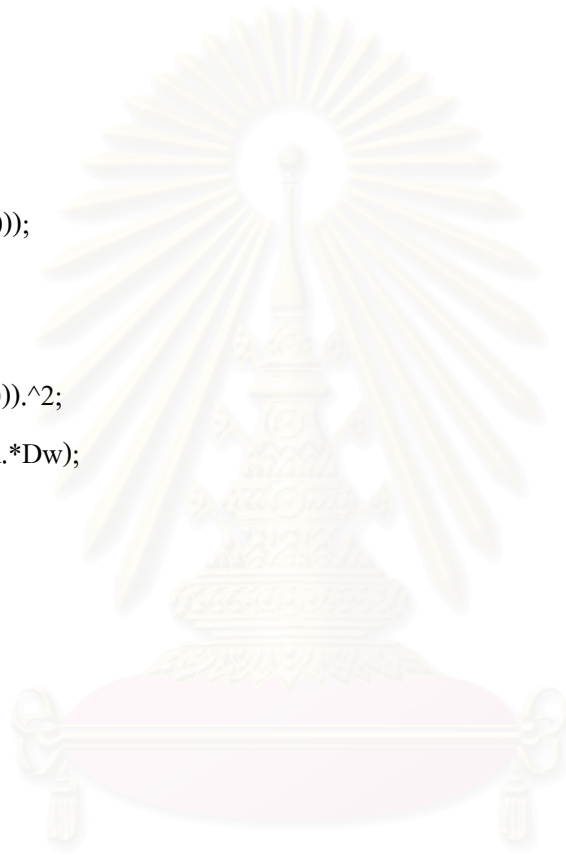
D=(V.^2-Vs^2)/(c1);

สถาบันวิทยบริการ  
สภามหาวิทยาลัย

```

f1=(1/(2*pi))*sqrt(A+sqrt(B-D));
w=2*pi*f1;
Df=gradient(f1);
DI=gradient(I);
DR=gradient(R);
Dw=gradient(w);
S=(DI/Df)*(f1/I);
A1=(1-(L*C*(w.^2)));
A11=2*w.^2*L*C;
A111=A1.*A11;
B1=(1-(L*C*(w.^2))).^2;
A2=w.*DR.*B1./(R.*Dw);
A3=(w.*L).^2;
A33=(A3./(R.^2));
AT=A111-A2-A33;
BT=B1+A33;
S1=AT/BT;
plot(I,S1,'go')
hold on
Vdc2=280;
R2=V./I;
Vs2=(sqrt(2)*Vdc2)/(pi);
a12=(L*(I)).^2;
b12=2*L*C*V.^2;
c12=(L*C*V).^2;
A2=-((a12-b12)/(2*c12));
B2=((a12-b12)/(2*c12)).^2;
D2=(V.^2-Vs^2)/(c12);

```



สถาบันวิทยบริการ  
สงขลานครินทร์มหาวิทยาลัย

$$F2=(1/(2*\pi))*\text{sqrt}(A2+\text{sqrt}(B2-D2));$$

$$W2=2*\pi*f2;$$

$$Df2=\text{gradient}(f2);$$

$$DI2=\text{gradient}(I);$$

$$DR2=\text{gradient}(R);$$

$$Dw2=\text{gradient}(w2);$$

$$S2=(DI2./Df2).*(f2./I);$$

$$A12=(1-(L*C*(w2.^2)));$$

$$A112=2*w2.^2*L*C;$$

$$A1112=A12.*A112;$$

$$B12=(1-(L*C*(w2.^2))).^2;$$

$$A22=w.*DR2.*B12./(R2.*Dw2);$$

$$A32=(w2.*L).^2;$$

$$A332=(A32./(R2.^2));$$

$$AT2=A1112-A22-A332;$$

$$BT2=B12+A332;$$

$$S12=AT2./BT2;$$

plot(I,S12,'go')

hold on

$$Vdc3=230;$$

$$R3=V./I;$$

$$Vs3=(\text{sqrt}(2)*Vdc3)/(\pi);$$

$$a13=(L*(I)).^2;$$

$$b13=2*L*C*V.^2;$$

$$c13=(L*C*V).^2;$$

$$A3=-((a13-b13)/(2*c13));$$

$$B3=((a13-b13)/(2*c13)).^2;$$

$$D3=(V.^2-Vs3^2)/(c13);$$

```

f13=(1/(2*pi))*sqrt(A3+sqrt(B3-D3));
w3=2*pi*f1;
Df3=gradient(f13);
DI3=gradient(I);
DR3=gradient(R3);
Dw3=gradient(w3);
S3=(DI3./Df3).*(f13./I);
A13=(1-(L*C*(w3.^2)));
A113=2*w3.^2*L*C;
A1113=A1.*A11;
B13=(1-(L*C*(w3.^2))).^2;
A23=w3.*DR3.*B13./(R3.*Dw3);
A33=(w3.*L).^2;
A333=(A33./(R3.^2));
AT3=A1113-A23-A333;
BT3=B13+A333;
S13=AT3./BT3;
plot(I,S13,'go')
hold on

```

ภาคผนวก ข.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณสัมพันธระหว่าง  $\sin \theta$  กับ  $t_{fn}$

Vb=350; % Vb = dc output voltage in volts

Im=0.4; % Im in Amperes

C=10e-9; % C in Farad

f=40e3; % f in Hertz

T=1/f; % T=period

Teta=[1.5708 1.0472 0.7854 0.62832 0.5236 0.4488 0.3927 0.34907 0.31416 0.20944 ...

```

0.15708 0.10472 0.06283 0.03927 0.03142 0.02094 0.01571 0.00628 0.00314];% Angle in radian
Ix=[0.4 0.346 0.28284 0.23511 0.2 0.17355 0.15307 0.13681 0.12361 0.08316 0.06257 ...
0.04181 0.02512 0.0157 0.01256 0.00838 0.00628 0.00251 0.00126]; %input current in Ampere
Tfn=[0.0469 0.2525 0.3839 0.4665 0.5241 0.567 0.6005 0.6274 0.65 0.7222 ...
0.76318 0.8089 0.8549 0.8862 0.897 0.9175 0.9287 0.9551 0.9682]; %Tfn=normalized Tf by T
W=2*pi*f; % W in radian per second
An=asin(Ix/Im); %An delay angle
A=sin(An);
plot(A,Tfn,'k*-')
hold on

```

ภาคผนวก ข.7 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำกับอัตราขยาย

%file name QBgain

Vb=350; % Vb = dc output voltage in volts

Im=0.4; % Im in Amperes

C=10e-9; % C in Farad

f=40e3; % f in Hertz

T=1/f; % T=period

Vs=[350.04 348.843 340.534 331.023 320.136 311.0 302.746 294.439 288.625 266.774 ...

252.836 237.479 220.854 207.374 206.1 203.7 202.73 199.2 194.2]; % Vs= dc input voltage

Teta=[1.5708 1.0472 0.7854 0.62832 0.5236 0.4488 0.3927 0.34907 0.31416 0.20944 ...

0.15708 0.10472 0.06283 0.03927 0.03142 0.02094 0.01571 0.00628 0.00314];% Angle in radian

Ix=[0.4 0.346 0.28284 0.23511 0.2 0.17355 0.15307 0.13681 0.12361 0.08316 0.06257 ...

0.04181 0.02512 0.0157 0.01256 0.00838 0.00628 0.00251 0.00126]; %input current in Ampere

Tfn=[0.0469 0.2525 0.3839 0.4665 0.5241 0.567 0.6005 0.6274 0.65 0.7222 ...

0.76318 0.8089 0.8549 0.8862 0.897 0.9175 0.9287 0.9551 0.9682]; %Tfn=normalized Tf by T

Mcal=Vb./Vs; %Voltage gain obtained from Orcad circuit simulation

W=2\*pi\*f; % W in radian per second

```

Vcmn=Im./(W*C*Vs); % Normalize capacitor peak voltage
An=asin(Ix/Im); %An delay angle
A=sin(An);
M=1+Vcmn.*cos(An).*Tfn-pi*Vcmn.*sin(An).*(Tfn.^2)-(Vcmn/(2*pi)).*(sin((2*pi*Tfn)+An)-sin
(An));
plot(Ix,M,'k-',Ix,Mcal,'g+-')
hold on

```

ภาคผนวก ข.8 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ความสัมพันธ์ของความถี่กับแรงดันไฟฟ้า  $V_B$

```

%Input parameters are VB, Im, Ix, C, W
Vs=198; %dc input voltage in volt
Pout=32; %Ballast output power in watt
eff=0.95; %Converter efficiency
Vs=198; %dc input voltage in volt
Pout=32; %Ballast output power in watt
eff=0.95; %Converter efficiency
Vb=350; % Vb = dc output voltage in volts
Im=0.8; % Im = peak sinusoidal inverter current in Amperes
Pin=Pout/eff; % Pin = input power in watt
Ix=Pin/Vs;% Ix= average input current
Theta=asin(Ix/Im);
Tx=0:0.005:1;
Tfxn=(cos(Theta)-cos((2*pi*Tx)+Theta))/(2*pi*sin(Theta));
Tfn=0.719; % Tfn =Tf/T at the given Ix and Im
C=10e-9; % C in Farad
I=1:0.05:10;
f=I*10e3; % f in Hertz

```



```

T=1./f; % T=period
W=2*pi*f; % W in radian per second
Vcmn=Im./(W*C*Vs); % Normalize capacitor peak voltage
An=Theta; %simplify the symbol of the delay angle
M=1+Vcmn*cos(An)*Tfn-pi*Vcmn*sin(An)*(Tfn^2)-(Vcmn/(2*pi))*(sin((2*pi*Tfn)+An)-sin(An));
Vout=M*Vs; %output voltage
plot(f,Vout,'k*-',f,Vb,'k+-')
xlabel('frequency')
ylabel('output voltage')
title('Output voltage vs. frequency')
grid on
hold on

```



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียน

นาย คณิต ชัยวัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2516 ที่อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ( ไฟฟ้ากำลัง ) เกียรตินิยม อันดับ 2 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ( อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย