

บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่



นาย คัมภีร์ ชีราวิทย์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

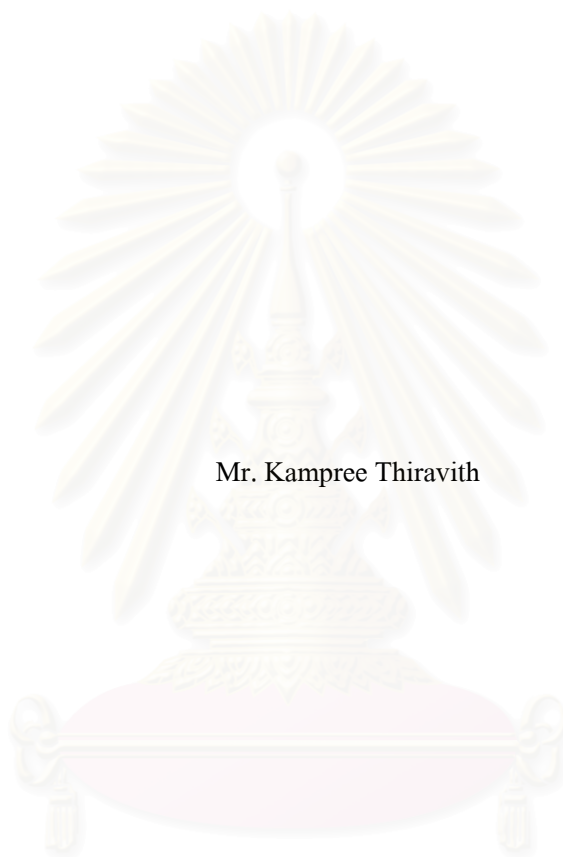
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0042-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A HIGH POWER FACTOR ELECTRONIC BALLAST
USING TWIN BOOST CONVERTER**



Mr. Kampree Thiravith

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 2001

ISBN 974-17-0042-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตอิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
โดย นายคัมภีร์ ชีราวิทย์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

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

.....กรรมการ
(อาจารย์สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คัมภีร์ ธีราวิทย์ : บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
(A HIGH POWER FACTOR ELECTRONIC BALLAST USING TWIN BOOST
CONVERTER)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต, 148 หน้า. ISBN 974-17-0042-3

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการทำงาน การวิเคราะห์และออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่เป็นวงจรเพิ่มกำลังประกอบกำลัง วงจรทระดับแบบคู่เป็นวงจรแปลงผันที่ทำหน้าที่ป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้วงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ป้อนกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทั้งวงจรแปลงผันและวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้สวิตช์ไวงานที่ถูกควบคุมให้ทำงานที่วิญจักรงาน 0.5 ร่วมกัน ได้มีการคำนวณคุณสมบัติด้านออกของวงจรแปลงผันและคุณสมบัติด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์พบว่า แรงดันออกของวงจรแปลงผันจะแปรตามกระแสออกมาก ส่วนกระแสด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะแปรตามแรงดันเข้าเพียงเล็กน้อย ในการออกแบบจะต้องทราบคุณสมบัติด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ก่อน ดังนั้นจึงต้องออกแบบและทดลองวัดคุณสมบัติด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ก่อนเพื่อใช้ในการออกแบบวงจรแปลงผัน ได้มีการออกแบบและสร้างวงจรทั้งสองและประกอบเข้าด้วยกันเป็นวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูง และทดลองวัดคุณสมบัติต่าง ๆ และนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170245121 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD : ELECTRONIC BALLAST / TWIN BOOST CONVERTER / HIGH POWER FACTOR

KAMPREE THIRAVITH : A HIGH POWER FACTOR ELECTRONIC BALLAST

USING TWIN BOOST CONVERTER. THESIS ADVISOR : Assoc.Prof. YUTANA KULVITIT,Ph.D. 148pp.ISBN 974-17-0042-3

This thesis presents circuit operation, circuit analysis and design of a single-stage high power factor electronic ballast using twin boost converter. Twin boost converter functions as a front-end power factor correction circuit or PFC supplying dc power to the inverter. The inverter inverts dc power into ac power feeding fluorescent lamp. Both the front-end ac to dc converter and the inverter share the same set of controlled switches operating at 0.5 duty cycle. Front-end ac to dc converter's output characteristic as well as the input characteristic of the inverter loaded with fluorescent lamp were calculated. The output voltage of ac to dc converter is highly dependent on load current while the input characteristic of the inverter vary slightly with input voltage. In order to design the ac to dc converter, the input characteristic of the inverter must be known beforehand. The inverter was designed, built and tested. Input characteristic of the inverter is used for designing ac to dc converter. Both inverter and converter were combined as a single stage high power factor electronic ballast. Experimental and theoretical data were compared to verify the theoretical calculation.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....ELECTRICAL ENGINEERING... Student's signature.....

Faculty of study ..ELECTRICAL ENGINEERING... Advisor's signature.....

Academic year2001..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเสมอมา รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้ ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน และรุ่นพี่และรุ่นน้องห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคน ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์.....	6
2.2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	6
2.2.2 หลักการทำงานเบื้องต้น.....	8
2.2.3 การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	9
2.2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	9
2.2.5 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	10
2.3 การใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็กกับหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	12
2.4 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic ballast).....	13
2.4.1 โครงสร้างและการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Structure of Electronic ballast).....	13
2.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	15
2.6 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร.....	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 วงจรและสมการของวงจรในภาวะทำงานปกติ.....	18
2.8 วงจรขับนำสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ (Drive circuit).....	20
2.9 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง.....	21
2.10 ทฤษฎีการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วง จรทระดับแบบคู่.....	30
2.11 สมการคุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์.....	50
2.12 เสถียรภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับ แบบคู่.....	55
3 การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่.....	64
3.1 ขั้นตอนการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่.....	66
3.2 คุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	66
3.3 การหาคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์.....	68
3.4 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่.....	76
4 การทดลองและเปรียบเทียบผล.....	80
4.1 การหาคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	80
4.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์และการหาคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	83
4.2.1 การออกแบบวงจร โหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	84
4.2.2 การหาคุณสมบัติด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	86
4.3 การทดลองหาคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่.....	92
4.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีอินเวอร์เตอร์เป็นโหลด.....	99
4.4.1 การทำงานที่แรงดันไฟตรงพิกัด 280 VDC.....	99
4.4.1.1 การหาจุดทำงานที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	99
4.4.1.2 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ที่แรงดัน ไฟตรง 280 VDC.....	100
4.4.1.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันด้านเข้าโดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	104

4.4.2 การทำงานที่แรงดันไฟตรงพิกัด 300 VDC.....107

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.2.1 การหาจุดทำงานที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....107

4.4.2.2 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ที่แรงดัน
ไฟตรง 300 VDC.....108

4.4.2.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันด้านเข้าโดย
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....112

4.4.3 การทำงานที่แรงดันไฟตรงพิกัด 350 VDC.....115

4.4.3.1 การหาจุดทำงานที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....115

4.4.3.2 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ที่แรงดัน
ไฟตรง 350 VDC.....116

4.4.3.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันด้านเข้าโดย
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....120

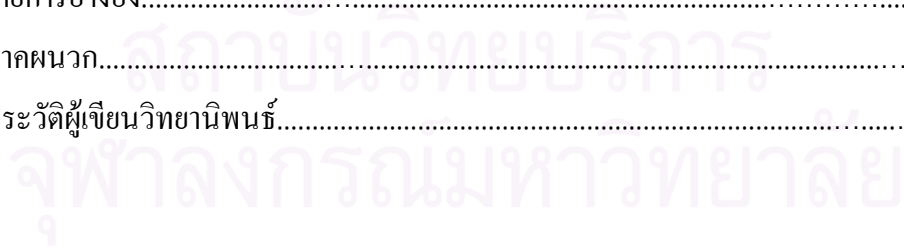
4.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูง
ที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่.....123

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... 128

รายการอ้างอิง.....130

ภาคผนวก.....133

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....144



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงขอบเขตอัตราส่วนของขนาดกระแสฮาร์โมนิกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่าน มาตรฐาน IEC 1000-3-2.....	22
2.2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง..	58
4.1 ผลการทดลองหา Lamp Line โดยการแปรค่าความถี่.....	81
4.2 การเลือกค่าของ L_i และ C_n ที่ระดับค่าแรงดันไฟตรงต่างกัน.....	85
4.3 การเลือกค่า L ($L1 = L2$) ที่ได้จากการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันไฟตรงและกระแส ไฟตรงด้านออกต่างกัน.....	92

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	7
2.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	8
2.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ต่างๆ.....	10
2.4 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของหลอดเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง(มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์).....	11
2.6 ลักษณะการต่อวงจรเมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์.....	12
2.7 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	14
2.8 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	16
2.9 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	16
2.10 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	18
2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตซ์ชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรรีเลย์ทรอนิกส์ หรือวงจรรวม (Intregrated Circuit, IC).....	21
2.12 วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำสวิตซ์ชนิดที่อาศัยการป้อนกลับของกระแสไหลย้อนผ่านหม้อแปลงอิ่มตัว (Saturable transformer)	21
2.13 LC Filter before Bridge Rectifier	23
2.14 LC Filter after Bridge Rectifier	23
2.15 Rippled or Valley fill PFC	24
2.16 Valley fill with inductor in charging leg	24
2.17 Valley fill with inductor before Bridge Rectifier	25
2.18 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานโดยใช้วงจรทบระดับ	26
2.19 วงจร Charge - pump Power Factor Correction.....	27
2.20 วงจร Boost liked Operating in Critical Conduction mode	27
2.21 Improved Valley fill and valley Boost Converter	28
2.22 Simplified Boost Converter	29
2.23 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรแปลงผันทบระดับแบบคู่.....	30

2.24 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่1(เส้นทึบ)และตัวเหนี่ยวนำตัวที่2(เส้นประ).....31

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 ช่วงที่ S1 เริ่มต่อวงจร S2 ตัดวงจร.....	32
2.26 ช่วงที่ S1 ต่อวงจร S2 ตัดวงจร	36
2.27 ช่วงที่ S1 ตัดวงจร S2 เริ่มต่อวงจร.....	40
2.28 ช่วงที่ S1 ตัดวงจร S2 ต่อวงจร.....	43
2.29 การทำงานของวงจรในช่วงที่แรงดันจากสายกำลังเป็นลบ.....	48
2.30 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันต่างๆของ วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	49
2.31 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเป็นวงจรทระดับแบบคู่.....	50
2.32 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	54
2.33 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรแปลงผันทระดับแบบคู่...55	55
2.34 วงจรสมมูลที่ได้จากการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้ วงจรแปลงผันทระดับแบบคู่.....	56
2.35 วงจรทระดับ.....	56
2.36 กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง.....	57
2.37 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง.....	58
2.38 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $d = 0$	59
2.39 วงจรสมมูลอย่างง่ายที่ได้จากการใช้ทฤษฎีเทวินิน.....	59
2.40 วงจรสมมูลอย่างง่าย.....	60
2.41 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจร ทระดับแบบคู่.....	61
3.1 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่.....	64
3.2 พิจารณาแยกวงจรออกเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์.....	65
3.3 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของโหลดฟลูออเรสเซนต์.....	67
3.4 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อร่วมกับโหลดบัลลาสต์.....	68
3.5 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	70
3.6 ความสัมพันธ์ของ L_i และ C_n ที่ทำให้โหลดมีกำลังด้านออกเท่ากับพิกัด.....	71
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n ที่ทำให้ได้ขีดจำกัดตามที่กำหนด.....	73

3.8	วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	73
3.9	การตัดกันของ Ballast Line และ Lamp Line ที่ความถี่การทำงาน 4 ค่า.....	74

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	อินเวอร์เตอร์ไลน์ที่คำนวณได้.....	76
3.11	คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่.....	77
3.12	กราฟคุณสมบัติการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่.....	78
3.13	จุดตัดกันระหว่างกราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่และกราฟ คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์.....	79
4.1	ความสัมพันธ์กระแส(rms)และแรงดัน(rms)ของหลอดฟลูออเรสเซนต์จากการทดลอง.....	83
4.2	ความสัมพันธ์ของ L_i และ C_n ที่ทำให้หลอดมีกำลังด้านออกเท่ากับพิกัด.....	84
4.3	ความสัมพันธ์ของ L_i และ C_n ที่ทำให้ได้ขีดจำกัดตามที่กำหนด.....	85
4.4	คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี.....	86
4.5	คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จากการจำลองการทำงาน.....	87
4.6	คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จากการทดลอง.....	88
4.7	คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลอง ที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC.....	89
4.8	คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรง(E_d) 300VDC.....	90
4.9	คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรง(E_d) 350 VDC.....	91
4.10	คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎีที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280VDC 300 VDC และ 350 VDC.....	93
4.11	คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลองการทำงานวงจรที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC.....	94
4.12	คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการทดลองที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC.....	95
4.13	คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวง จร และการทดลองที่แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) 280 VDC.....	96
4.14	คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวง	

จร และการทดลองที่แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) 300 VDC.....	97
4.15 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวง	
สารบัญภาพ(ต่อ)	
รูปที่	หน้า
จร และการทดลองที่แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) 350VDC.....	98
4.16 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การ	
จำลองการทำงาน และการทดลองที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC.....	99
4.17 แรงดันและกระแสที่โหลด (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	101
4.18 แรงดันและกระแสด้านเข้า (50 V/DIV 500 A/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC	101
4.19 แรงดันและกระแสด้านเข้าภาพขยาย (50 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง	
280 VDC.....	102
4.20 แรงดันและกระแสที่สวิทช์ (100 V/DIV 1A/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC	102
4.21 แรงดันไฟตรงและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์(100 V/DIV 500 mA/DIV)ที่	
แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	103
4.22 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	103
4.23 แรงดันและกระแสด้านเข้าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	104
4.24 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	105
4.25 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC....	105
4.26 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	106
4.27 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC....	106
4.28 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี	
การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรง(E_d) 300 VDC.....	107
4.29 แรงดันและกระแสที่โหลด (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....	109
4.30 แรงดันและกระแสด้านเข้า (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 300	
VDC.....	109
4.31 แรงดันและกระแสด้านเข้าภาพขยาย (50 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง	
300 VDC.....	110
4.32 แรงดันและกระแสที่ สวิทช์ (100 V/DIV 1A/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC	
.....	110

4.33 แรงดันไฟตรงและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์(100 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....111

4.34 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....111

4.35 แรงดันและกระแสด้านเข้าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....112

4.36 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....113

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC....	113
4.38 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....	114
4.39 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC....	114
4.40 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรง(<i>E_d</i>) 350 VDC.....	115
4.41 แรงดันและกระแสที่โหลด (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	117
4.42 แรงดันและกระแสด้านเข้า (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	117
4.43 แรงดันและกระแสด้านเข้าภาพขยาย(50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC	118
4.44 แรงดันและกระแสที่ สวิตซ์ (100 V/DIV 1A/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC	118
4.45 แรงดันไฟตรงและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์(100 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	119
4.46 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC	119
4.47 แรงดันและกระแสด้านเข้าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350VDC.....	120
4.48 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	121
4.49 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC....	121
4.50 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	122
4.51 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC....	122
4.52 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กลงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่.....	123

4.53	ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	125
4.54	ตัวเหนี่ยวนำจริงที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC.....	126
4.55	ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....	128
4.56	ตัวเหนี่ยวนำจริงที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC.....	128

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.57	ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	130
4.58	ตัวเหนี่ยวนำจริงที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC.....	131

สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

V_{AB}	แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์.....(V)
ω_s	ความถี่การสวิตช์.....(rad/s)
V_{DC}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....(V)
ω_o	ความถี่เรโซแนนซ์.....(rad/s)
Z_o	อิมพีแดนซ์ลักษณะ.....(Ω)
Q_p	ตัวประกอบคุณภาพของโหลดที่ความถี่หักมุม
Q_L	ตัวประกอบคุณภาพของโหลด
R_{lamp}	ความต้านทานที่หลอดฟลูออเรสเซนต์.....(Ω)
R_f	ความต้านทานใส่หลอด.....(Ω)
V_{lamp}	แรงดันที่หลอดฟลูออเรสเซนต์.....(V)
I_{lamp}	กระแสที่หลอดฟลูออเรสเซนต์.....(A)
V_S	แรงดันที่แหล่งจ่าย.....(V)
$L1$	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับตัวที่ 1.....(H)
$L2$	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับตัวที่ 2.....(H)
L_i	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์.....(H)
$C1$	ตัวเก็บประจุทางด้านแหล่งจ่ายตัวที่ 1.....(F)
$C2$	ตัวเก็บประจุทางด้านแหล่งจ่ายตัวที่ 2.....(F)
$C3$	ตัวเก็บประจุที่กรองแรงดันไฟตรง.....(F)
$CH1$	ตัวเก็บประจุทางด้านโหลดตัวที่ 1.....(F)
$CH2$	ตัวเก็บประจุทางด้านโหลดตัวที่ 2.....(F)
C_n	ตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์.....(F)
i_s	กระแสไฟฟ้าสลับด้านเข้า.....(A)
Ed	แรงดันไฟตรงที่ตัวเก็บประจุ C3.....(V)
Id	กระแสไฟตรงไปที่โหลด.....(A)
i_{L1}	กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรทระดับตัวที่ 1.....(A)
i_{L2}	กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรทระดับตัวที่ 2.....(A)

i_{Li}	กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์.....(A)
v_s	แรงดันของแหล่งจ่ายชั่วขณะ.....(V)

สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

i_{Sa}	กระแสแอกทีฟที่ไหลผ่านเข้าไปในวงจรคอนเวอร์เตอร์.....(A)
i_{Sc}	กระแสรีแอกทีฟที่ไหลเข้าไปประจุ C1 และ C2.....(A)
i_{c1}	กระแสชั่วขณะผ่านตัวเก็บประจุ C1.....(A)
i_{c2}	กระแสชั่วขณะผ่านตัวเก็บประจุ C2.....(A)
v_{C1}	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1.....(V)
v_{C2}	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2.....(V)
i_{CH1}	กระแสชั่วขณะผ่านตัวเก็บประจุ CH1.....(A)
i_{CH2}	กระแสชั่วขณะผ่านตัวเก็บประจุ CH2.....(A)
D1	ไดโอดของวงจรเรียงกระแสไฟตรงแบบบริดจ์ตัวที่ 1
D2	ไดโอดของวงจรเรียงกระแสไฟตรงแบบบริดจ์ตัวที่ 2
D3	ไดโอดของวงจรเรียงกระแสไฟตรงแบบบริดจ์ตัวที่ 3
D4	ไดโอดของวงจรเรียงกระแสไฟตรงแบบบริดจ์ตัวที่ 4
d1	ไดโอดที่เป็นคู่ประกอบของสวิตช์ไวงานตัวที่ 1
d2	ไดโอดที่เป็นคู่ประกอบของสวิตช์ไวงานตัวที่ 2
S1	สวิตช์ไวงานตัวที่ 1
S2	สวิตช์ไวงานตัวที่ 2
Cs	ตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นสแน็บเบอร์ให้กับสวิตช์ไวงาน
Im1	ค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1.....(A)
Im2	ค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2.....(A)
f_s	ความถี่ของการสวิตช์.....(Hz)
T_{sw}	คาบเวลาของการสวิตช์.....(s)
t_1	เวลาของการทำงานของวงจรตั้งแต่เริ่มจนจบช่วงที่ 1.....(s)
t_2	เวลาของการทำงานของวงจรตั้งแต่เริ่มจนจบช่วงที่ 2.....(s)
t_3	เวลาของการทำงานของวงจรตั้งแต่เริ่มจนจบช่วงที่ 3.....(s)

t_4	เวลาของการทำงานของวงจรตั้งแต่เริ่มจนจบช่วงที่ 4.....(s)
D	วิธจักรงาน
D''	ช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสแต่ยังมีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอยู่

สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

\bar{i}_S	กระแสด้านเข้าเฉลี่ยในหนึ่งคาบของการสวิตช์.....(A)
\bar{i}_{L1}	กระแสที่ไหลผ่าน L1 เฉลี่ยในหนึ่งคาบของการสวิตช์.....(A)
\bar{i}_{L2}	กระแสที่ไหลผ่าน L2 เฉลี่ยในหนึ่งคาบของการสวิตช์.....(A)
\bar{i}_1	กระแสเฉลี่ยด้านเข้าของสวิตช์ PWM.....(A)
\bar{i}_2	กระแสเฉลี่ยด้านออกของสวิตช์ PWM.....(A)
\bar{V}_1	แรงดันเฉลี่ยด้านเข้าของสวิตช์ PWM.....(V)
\bar{V}_2	แรงดันเฉลี่ยด้านออกของสวิตช์ PWM.....(V)
\hat{i}_1	สัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสด้านเข้าสวิตช์ PWM.....(A)
\hat{i}_2	สัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสด้านออกเข้าสวิตช์ PWM.....(A)
\hat{d}	สัญญาณขนาดเล็กลงของวิธจักรงาน
I_p	ค่ายอดของกระแสตัวเหนี่ยวนำ.....(A)
R_{inv}	ความต้านทานพลวัตของอินเวอร์เตอร์.....(Ω)
R_{con}	ความต้านทานพลวัตของอินเวอร์เตอร์.....(Ω)
V_{th}	แรงดันสมมูลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีเทวินิน.....(V)
V_o	แรงดันด้านออก.....(V)
Z_{th}	อิมพีแดนซ์สมมูลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีเทวินิน.....(Ω)
R_{th}	ความต้านทานสมมูลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีเทวินิน.....(Ω)
XL_{th}	รีแอกแตนซ์ที่ได้จากการใช้ทฤษฎีเทวินิน.....(Ω)
L_{th}, L_e	ตัวเหนี่ยวนำสมมูล.....(H)
ω_0	ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamped Natural Frequency).....(rad/s)
ξ	สัมประสิทธิ์ Damping
ωd	ความถี่ธรรมชาติที่มีการหน่วง (Damped Natural Frequency).....(rad/s)
V_{ig}	แรงดันจุดหลอด.....(V)

η	ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์
f_o	ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง.....(Hz)
R_o	ความต้านทานลักษณะ.....(Ω)
f_n	ความถี่ที่สถานะ.....(Hz)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

ความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่เกิดจากการพัฒนาและความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มีผลทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น พลังงานส่วนหนึ่งที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ที่นับวันจะมีการใช้เพิ่มขึ้น ก็คือพลังงานที่ใช้ไปในเรื่องของแสงสว่าง พลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะมาจากแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เพื่อชลอปปัญหาดังกล่าว จึงได้นำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานและได้ประโยชน์สูงสุดจากพลังงานที่ใช้ ในเรื่องของการใช้พลังงานทางด้านแสงสว่าง อุปกรณ์ให้แสงสว่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันก็คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp) ซึ่งเป็นหลอดก๊าซฉะจารังที่นำมาใช้แทนหลอดแบบเผาไส้ (Incandescent Lamp) ทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 4-5 เท่า ในขณะที่ให้ความส่องสว่าง (Lumen) เท่ากัน การใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีความยุ่งยากกว่าหลอดแบบเผาไส้ เนื่องจากต้องใช้ร่วมกับบัลลาสต์ (Ballast) และสตาร์ทเตอร์ (Starter) เพื่อเผาไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เกิดอิเล็กตรอนอิมิสชัน (electron emission) กำเนิดแรงดันสูงเพื่อจุดหลอด และควบคุมกระแสผ่านหลอดให้มีเสถียรภาพ

ที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะใช้บัลบัลลาสต์แกนเหล็ก (Magnetic Ballast) กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ต่อมาได้มีความพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของบัลลาสต์ เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน โดยได้เริ่มพัฒนาและใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Ballast) ในราวปี ค.ศ. 1968 (Marian K.Kazimierzok, 1993) ในอดีตการใช้งานบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากปัญหาด้านราคา และความทนทาน แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้พัฒนามากขึ้น มีผลทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีราคาลดลง ในขณะที่มีความทนทานมากขึ้นมีผลทำให้มีการนำบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานเพิ่มขึ้น เช่น ในเครื่องถ่ายภาพเอกสาร ในงานที่ต้องการการปรับหรี่แสงสว่าง และในงานที่ต้องการแสงสว่างที่ไม่เกิดการกระพริบที่ความถี่สายกำลัง นอกจากนี้แล้วบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยังช่วยในการประหยัดพลังงาน เนื่องจากช่วยลดกำลังที่จ่ายให้หลอดแต่ให้ความสว่างเท่าเดิม และลดกำลังการสูญเสียที่ตัวบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เอง บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะมีน้ำหนักเบากว่า เมื่อเทียบกับบัลลาสต์แกนเหล็ก และเนื่องจากทำงานที่ความถี่สูงประมาณ 20-50 กิโลเฮิรตซ์ จึงให้แสงที่ได้นุ่มนวลกว่าการใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก เนื่องจากสามารถออกแบบเพื่อ

กำจัดปรากฏการณ์สโตรโบสโคปิก (Stroboscopic effect) ได้ด้วย แต่อย่างไรก็ดี การใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันก็ยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เนื่องจากสาเหตุต่างๆหลายประการ กล่าวคือ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใช้อุปกรณ์มีความสลับซับซ้อนมาก และมีความละเอียดอ่อนกว่าบัลลาสต์แกนเหล็ก ถ้าทำการออกแบบวงจรไม่เหมาะสมก็จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของวงจร (Stability) ความเชื่อถือได้ (Reliability) ทำให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานต่ำกว่าบัลลาสต์แกนเหล็ก และที่สำคัญคือทางด้านราคาที่ยังสูงกว่าบัลลาสต์แกนเหล็กอยู่มาก โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส (Rectifier) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor correction circuit ; PFC) วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High Frequency Inverter) รวมทั้งตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุสำหรับวงจรส่วนโหลดของบัลลาสต์ จากโครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวนี้ จะส่งผลกระทบต่อราคาของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์หลายชิ้น ปัจจุบันบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยังคงมีราคาค่อนข้างแพง ทำให้มีต้นทุนของการเริ่มต้นใช้งานสูง นอกจากนี้แล้วยังมีปัญหการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference ; EMI) การรบกวนคลื่นวิทยุ (Radio Frequency interference ; RFI) สูงกว่าบัลลาสต์แกนเหล็ก และยังเป็นแหล่งกำเนิดกระแสมอเตอร์ที่มีผลให้ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต่ำ ในกรณีที่ไม่มีวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง

ปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีค่าตัวประกอบสูง และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของกระแสต่ำโดยใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ใช้งานมีหลายแบบ มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน การเลือกใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบใด ขึ้นกับระดับคุณภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ ถ้าต้องการให้มีคุณภาพในระดับที่ดีมาก ราคาก็จะสูงตามไปด้วย แต่ถ้าต้องการคุณภาพในระดับที่พอใช้ได้ราคาก็จะต่ำลงมา แต่ราคาของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ก็ยังคงมีสูงกว่าบัลลาสต์แกนเหล็ก ได้มีความพยายามที่จะพัฒนาวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสมอเตอร์ต่ำและตัวประกอบกำลังด้านเข้าสูง โดยใช้อุปกรณ์น้อยชิ้น และให้มีผลกระทบต่อการทำงานของวงจร รวมทั้งพิกัดของอุปกรณ์ให้น้อยที่สุดเพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีความทนทานในการใช้งาน วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังมีหน้าที่ในการปรับปรุงรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เพื่อลดกระแสมอเตอร์ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC1000-3-2 สามารถแบ่งวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังออกเป็น 2 ลักษณะคือวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ (Passive Power Factor Correction Circuit) และวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบไวแอกทีฟ (Active Power Factor Correction Circuit)

วงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบเหนี่ยวนำ จะมีการต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เพิ่มเข้าทางด้านหน้าหรือด้านหลังของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ซึ่งตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้ จะทำงานที่ความถี่สายกำลัง จึงทำให้มีค่าและขนาดใหญ่ ถ้าต้องการค่าตัวประกอบกำลังสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเหนี่ยวนำจะมีค่าตัวประกอบกำลังน้อยกว่า 0.95 และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก รวมมากกว่า 20 %

วงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงกว่า 0.99 และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมน้อยกว่า 10% วงจรดังกล่าวจะใช้สวิทช์ไวงาน (Active Switch) ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และวงจรขั้วนำสวิทช์ โดยมากแล้วจะใช้หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังแบบทบระดับหรือวงจรแปลงผันกำลังแบบทอน-ทบระดับ ทำให้วงจรจะมีความซับซ้อนมากขึ้น มีผลให้ทั้งขนาดและราคาของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ต้องใช้สวิทช์ไวงานเพิ่ม เรียกว่าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ ซึ่งวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกัน สามารถที่จะใช้สวิทช์ไวงานที่วัฏจักรงาน 0.5 ร่วมกัน และเป็นสวิทช์ที่ทำงานในภาคแรงดันศูนย์ วงจรนี้ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ ซึ่งประกอบด้วยวงจรทบระดับ 2 วงจรทำหน้าที่เป็นวงจร PFC ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะให้รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าใกล้เคียงไซน์มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนของแรงดัน ไฟตรงด้านออกต่อแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีค่าสูง สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ 36 W แรงดันไฟตรงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 300-400V ดังนั้นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรแปลงผันทบระดับแบบคู่จึงเหมาะสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า 110 V

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่
2. วิเคราะห์วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่และวงจรบัลลาสต์
3. ออกแบบและศึกษาเสถียรภาพของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่

4. สร้างวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โครงสร้างวงจรทระดับแบบคู่ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎีและวิเคราะห์เสถียรภาพ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. วิเคราะห์และหาแบบจำลองของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
2. ออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
3. ทดสอบเสถียรภาพของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
2. ศึกษาวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าแบบต่างๆที่ใช้กับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
3. ศึกษาการทำงาน วิเคราะห์และจำลองการทำงานของวงจรทระดับแบบคู่
4. ศึกษาการทำงาน วิเคราะห์และจำลองการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
5. สร้างวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
6. ทำการทดลองและเก็บผล
7. สร้างแบบจำลองของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ เพื่อศึกษาด้านเสถียรภาพ
8. ศึกษาด้านเสถียรภาพจากวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ที่สร้างขึ้น
9. ปรับปรุง และ แก้ไขข้อบกพร่องของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
10. ประเมินและสรุปผลการทดลอง
11. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนคุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2. ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
3. สามารถที่จะทำการออกแบบสร้างวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูง และมีกระแสรบกวนต่ำได้ โดยใช้โครงสร้างวงจรทระดับแบบคู่ได้ตามต้องการ
4. เป็นความรู้พื้นฐานในการวิจัยและพัฒนา สามารถนำไปใช้ในการผลิตของภาคอุตสาหกรรมได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อประเทศในด้านการประหยัดพลังงาน
5. ทำให้ได้แนวทางของการสร้างแบบจำลอง เพื่อการวิเคราะห์วงจร
6. รู้ข้อดีข้อเสียเกี่ยวกับวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1. บทนำ
2. ทฤษฎีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงสำหรับโหลดฟลูออเรสเซนต์
3. การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่
4. การทดลองและเปรียบเทียบผล
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ
6. ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.1 บทนำ

เพื่อที่จะเข้าใจการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จำเป็นต้องเข้าใจการทำงานขององค์ประกอบต่างๆที่ประกอบเป็นบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่หลอดฟลูออเรสเซนต์และวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เสียก่อน ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบต่างๆเสียก่อน หลังจากนั้นจึงจะกล่าวถึงการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่เป็นลำดับต่อไป

2.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp)

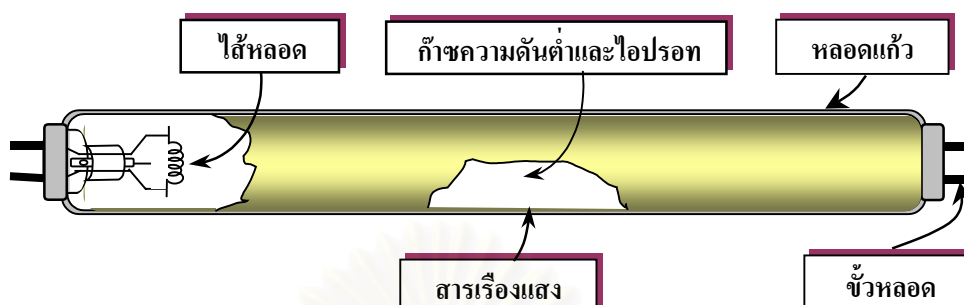
หลอดฟลูออเรสเซนต์คือหลอดคิสซาร์ตไอปรอทความดันต่ำ (low pressure mercury gas discharge lamp) (J.R. Coaton and A.M.Marden, 1990) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสง โดยใช้คุณสมบัติการนำกระแสของก๊าซความดันต่ำ ไอปรอท และสารเรืองแสง ซึ่งจะแตกต่างจากหลอดแบบเผาไส้ (Incandescent lamp) ที่ใช้กระแสเผาไส้หลอดให้ร้อน เพื่อให้เกิดแสงสว่าง หลอดฟลูออเรสเซนต์มีโครงสร้างและลักษณะการทำงานดังนี้

2.2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์มีองค์ประกอบหลายอย่างรวมกัน เพื่อกำเนิดแสงสว่างที่ทำให้ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ประกอบด้วยหลอดแก้วทรงกระบอกยาวภายในเคลือบด้วยสารเรืองแสง ขั้วหลอด ไส้หลอด ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท ดังในรูปที่ 2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์แต่ละส่วนมีลักษณะและการทำงานดังนี้

ก. หลอดแก้วทรงกระบอก (Fluorescent tube)

ตัวหลอดแก้วทรงกระบอกเป็นที่ยึดของอุปกรณ์และห่อหุ้มส่วนประกอบการกำเนิดแสงไว้ภายใน ตัวหลอดทรงกระบอกเป็นหลอดแก้วที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะการใช้งานว่าจะนำไปใช้ในงานอะไร เช่นนำไปใช้ในการประดับตกแต่ง ก็อาจมีการตัดให้เป็นรูปโค้ง เป็นรูปร่างตามต้องการ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ข. ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Lamp terminal)

ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นส่วนที่รับพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก เข้าสู่ภายในหลอดเพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถกำเนิดแสงสว่างได้

ค. ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Filament lamp)

ไส้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นขดลวดทังสเตนขดซ้อน ๆ กัน และฉาบด้วยสารที่สามารถปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงนัก เนื่องจากโลหะทังสเตนจะปล่อยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิก่อนข้างสูงประมาณ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป (Hammer E.E., 1998)

ง. ก๊าซความดันต่ำและไอปรอท (Mercury vapour and gas discharge)

เมื่อไอปรอทที่ผสมอยู่ในก๊าซความดันต่ำถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจะให้กำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นแสงที่ตาเปล่ามองไม่เห็น แต่ก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้ติดสว่าง ก๊าซความดันต่ำและไอปรอทนี้จะยังไม่นำกระแส เนื่องจากว่า ปกติแล้วก๊าซความดันต่ำและไอปรอทจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ถ้าใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงพอจะสามารถกระตุ้นให้มีการปล่อยประจุและสามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อก๊าซความดันต่ำและไอปรอทนำกระแส ไอปรอทจะปล่อยแสงอัลตราไวโอเล็ตออกมา แสงนี้ไม่สามารถที่จะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจะมีการเปลี่ยนให้เป็นแสงในช่วงความถี่ที่ตามองเห็นได้ด้วยสารเรืองแสงซึ่งฉาบอยู่ภายในหลอด

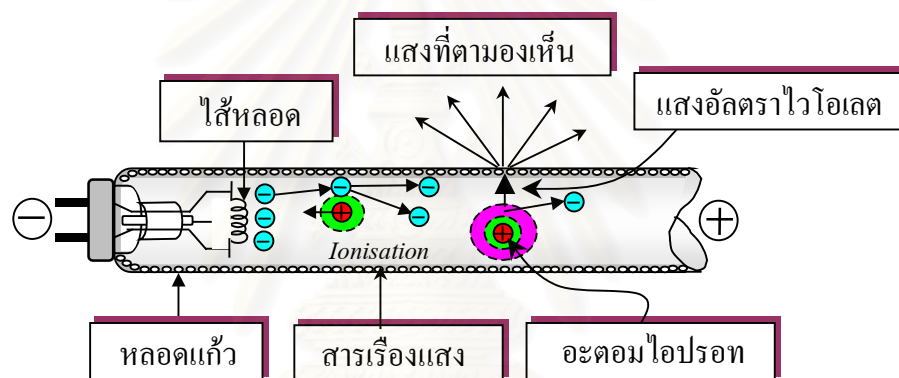
จ. สารเรืองแสง (Phosphor)

สารเรืองแสงซึ่งฉาบอยู่ด้านในของตัวหลอดแก้ว เป็นสารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ตให้เป็นแสงที่ตาเปล่าสามารถมองเห็นได้ ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ขึ้นกับส่วน

ประกอบทางเคมีของสารที่ใช้ภายในของหลอดแก้ว การใช้ส่วนผสมที่แตกต่างกันไปจะทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีสีสันต่าง ๆ กันไป เมื่อยังไม่นำกระแสหลอดไฟจะยังคงเป็นสีขาวอยู่

2.2.2 หลักการทำงานเบื้องต้น (Operation Principle)

ก่อนจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ถ้าความดันต่ำและไอปรอทภายในหลอดแก้วยังไม่นำกระแสจนกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงที่เพียงพอมากระตุ้นทำให้มีการปล่อยประจุออกมา จึงทำให้เริ่มนำกระแส และเกิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แสงอัลตราไวโอเล็ตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่ถูกฉาบไว้ภายในผิวหลอดแก้ว ให้กำเนิดแสงสว่างที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าออกมา ปรากฏการณ์การกำเนิดแสงสว่างดังกล่าวแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.2.3 การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

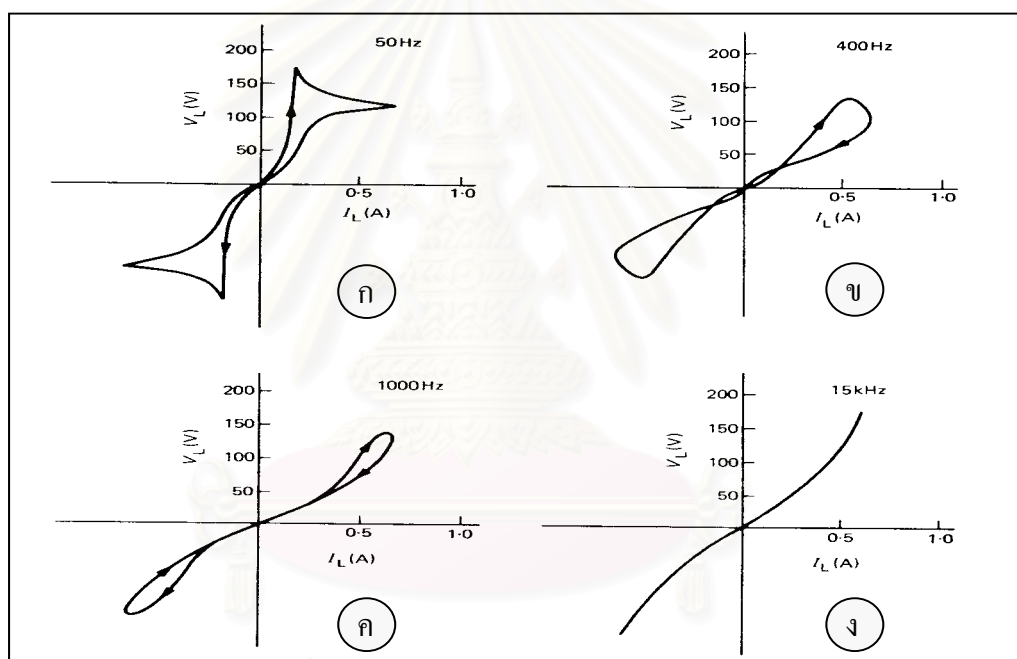
การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ

1. ช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง ในช่วงก่อนจุดหลอดให้ติดสว่าง ค่าความต้านทานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (R_{lamp}) จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นการจุดหลอดให้ติดสว่างจะต้องใช้แรงดันที่มีขนาดสูง (Striking voltage ; V_{ig}) เพื่อจุดหลอดให้ติดสว่างซึ่งค่าแรงดันที่ใช้ในการจุดหลอดจะขึ้นอยู่กับ เส้นผ่านศูนย์กลาง, ความยาวของหลอด, อุณหภูมิและชนิดของขั้วอิเล็กทรอนิกส์

2. ช่วงทำงานปกติ เมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างแล้ว จะมีกระแสไหลผ่านหลอด ทำให้ความต้านทานของหลอดลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด

2.2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส แรงดัน และความถี่ที่ให้กับหลอด ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก-ค) โดยที่อิมพีแดนซ์ประสิทธิผล (effective impedance) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถประมาณเป็นตัวต้านทานสมมูลไม่เชิงเส้นที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำได้ (Zwicker 1953) การเพิ่มขึ้นของกระแส จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และเป็นแบบไม่เชิงเส้นเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ ที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ป้อนให้กับหลอด ความต้านทานของหลอดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องใน 1 รอบ (cycle) ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหลอดไม่เป็นเชิงเส้น แต่เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับหลอด ทำให้อิมพีแดนซ์ประสิทธิผลทุกๆขณะ มีค่าเกือบคงที่ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (linear) โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ง)

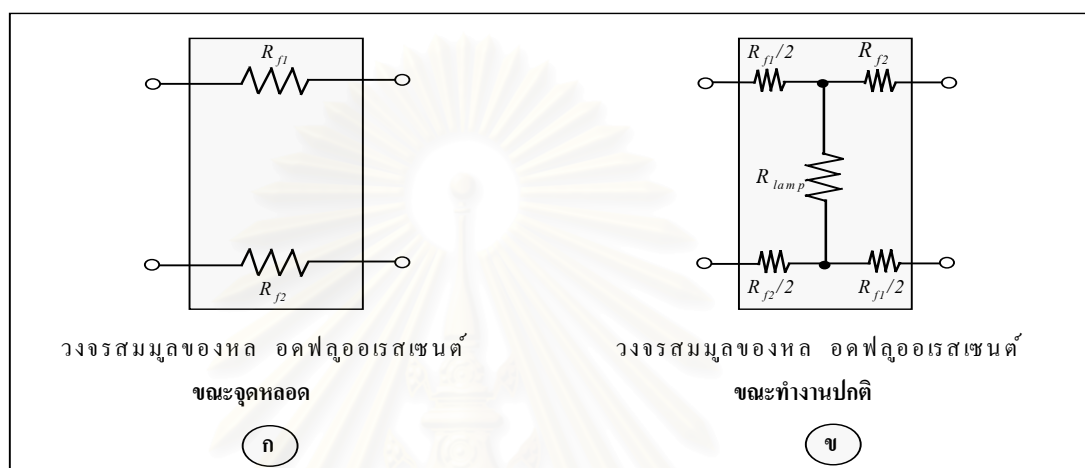


รูปที่ 2.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ความถี่ค่าต่างๆ

2.2.5 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันของหลอดก่อนและหลังการจุดหลอด ทำให้ได้วงจรสมมูลที่แตกต่างกัน กล่าวคือก่อนการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์จะไม่นำกระแสไฟฟ้า จึงแทนความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (R_{lamp}) ด้วยวงจรเปิด แต่จะมีความต้านทานไส้หลอด (R_{f1}, R_{f2}) ในแต่ละข้างของขั้วหลอด ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขณะจุดหลอดได้ ดังแสดงในรูป 2.4 (ก) และเมื่อหลอดติดสว่างแล้ว ค่าความต้านทานสมมูลของหลอด (R_{lamp}) จะมีค่าลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด จึงสามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อหลอดติดสว่างแล้วได้ดังแสดงในรูป 2.4 (ข)

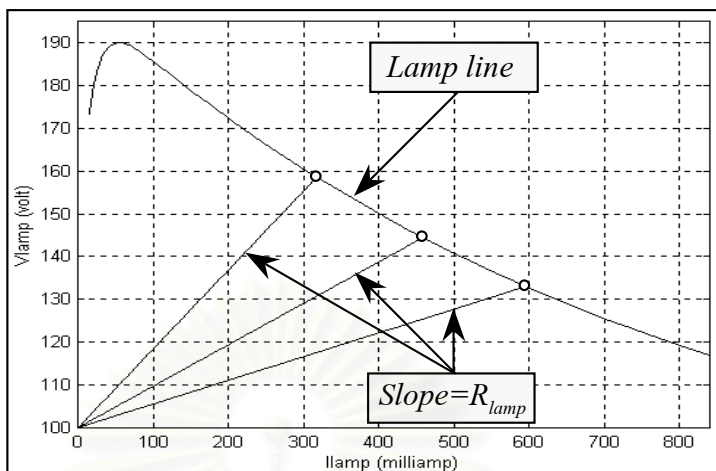
การใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ทำให้สามารถที่จะประมาณคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นตัวต้านทานได้ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอดมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นโดยประมาณ ทำให้สามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยค่า R_{lamp} ขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานว่าทำงานในขณะจุดหลอด หรือ ขณะทำงานปกติ



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์

แม้ว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานกับความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่ค่าความต้านทานสมมูลของหลอด (R_{lamp}) จะมีค่าไม่คงที่โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังออกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ เมื่อกำลังออกมีการเปลี่ยนแปลงไป ค่าความต้านทานสมมูลของหลอดเปลี่ยนแปลงไปด้วย กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกระแสแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเป็นกราฟคุณสมบัติเฉพาะตัวของหลอดฟลูออเรสเซนต์แต่ละหลอด มีลักษณะดังในรูปที่ 2.5

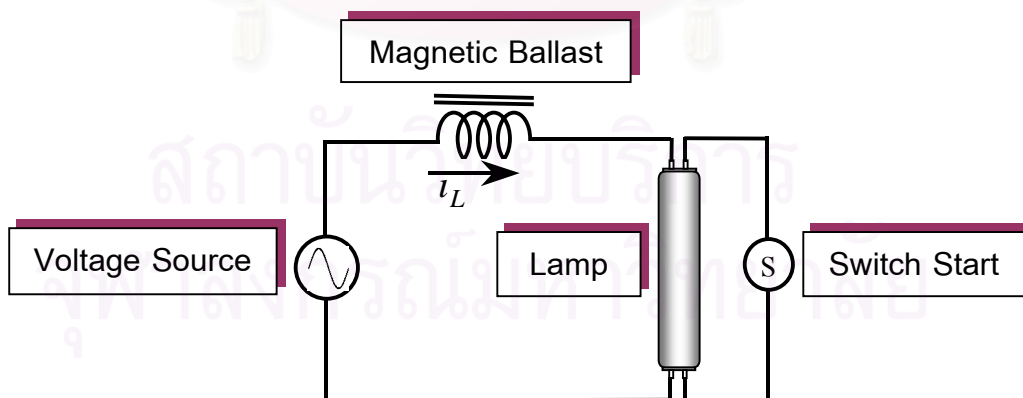
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของหลอดเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์)

2.3 การใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็กกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

บัลลาสต์แบบแกนเหล็กที่ใช้ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่าใหญ่ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อทำหน้าที่จำกัดกระแสผ่านหลอดและทำหน้าที่ร่วมกับสตาร์ทเตอร์ (Starter) ซึ่งเป็นสวิตช์แบบ bimetal เพื่อสร้างแรงดันสูงที่ใช้ในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้ติดสว่าง การใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์ มีลักษณะการต่อวงจรดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะการต่อวงจร เมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์

การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อใช้ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กและสตาร์ทเตอร์มีลักษณะดังนี้ เมื่อเริ่มจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้วงจร หลอดฟลูออเรสเซนต์จะไม่นำกระแสทันที แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายส่วน

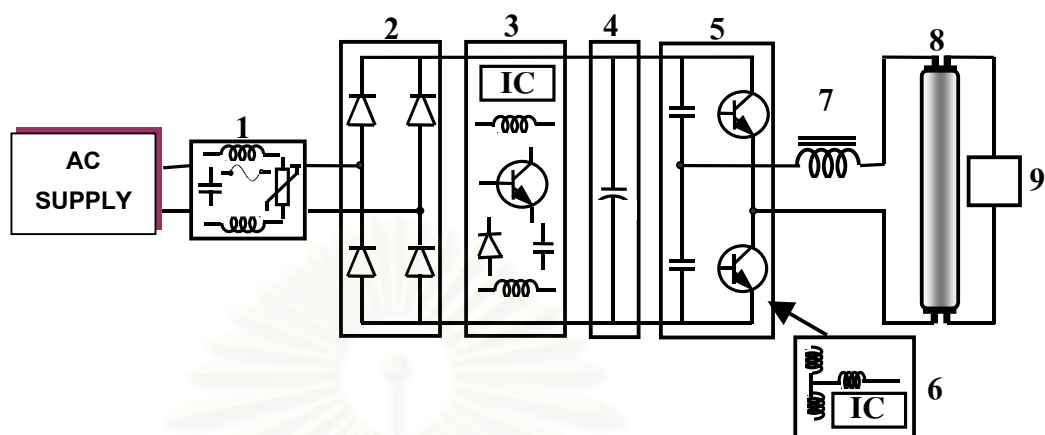
ใหญ่จะตกคร่อมสตาร์ทเตอร์ ทำให้เกิด glow discharge ขึ้นที่หน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์ หน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์จะร้อนขึ้นและต่อวงจร เมื่อหน้าสัมผัสของ สตาร์ทเตอร์ที่เป็น bimetal ต่อวงจรทำให้มีกระแสเผาไส้หลอดจนเกิดการ glow ของไส้หลอดทั้งสองข้าง เมื่อหน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์เย็นลงหน้าสัมผัสของสตาร์ทเตอร์จะแยกจากกันและตัดวงจร ในช่วงที่สตาร์ทเตอร์ตัดวงจร บัลลาสต์แกนเหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันสูงคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ แรงดันนี้เรียกว่าแรงดันจุดหลอด(Striking Voltage, V_{st}) ถ้าแรงดันจุดหลอดไม่สูงเพียงพอที่จะจุดหลอดให้ติดสว่างได้ ขบวนการจุดหลอดจะเริ่มต้นใหม่ แต่ถ้าแรงดันจุดหลอดสูงพอจะทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์จุดติดสว่างได้ แรงดันคร่อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ก็จะลดต่ำลง ทำให้แรงดันคร่อมสตาร์ทเตอร์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด glow discharge ได้อีก สตาร์ทเตอร์ก็จะเปิดวงจรตลอดไปในช่วงทำงานปกติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์แกนเหล็กจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสผ่านหลอด ทำให้การทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความต้านทานพลวัตเป็นลบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic ballast)

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์คืออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สายกำลังเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ติดสว่างและมีเสถียรภาพ การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงช่วยลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กลงและมีกำลังสูญเสียต่ำ การทำงานที่ความถี่สูงนอกจากสามารถลดกำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นบัลลาสต์แล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficacy) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้สูงขึ้นกับความถี่การทำงานอีกด้วย

2.4.1 โครงสร้างและการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Structure of Electronic ballast)

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเพื่อจ่ายให้แก่หลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างที่เป็นส่วนประกอบ 9 ส่วนประกอบด้วยกัน ส่วนประกอบแต่ละส่วนของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ก็จะมีหน้าที่แตกต่างกันไป ทำงานร่วมกันเป็นวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่จุดทำงานหนึ่ง และให้กำลังออกที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่จุดพิกัด โครงสร้างโดยทั่วไปของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังรูปที่ 2.7 ส่วนประกอบแต่ละส่วนมีหน้าที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

1) วงจรกรองด้านเข้า และวงจรป้องกัน (Input filter and Protection Circuit) มีหน้าที่ ลด EMI จากภายนอกที่จะเข้ามารบกวนบัลลาสต์และจากบัลลาสต์ที่จะออกไปยังสายส่ง และช่วยป้องกันกระแสกระชาก (Surge current) แรงดันเกินชั่วขณะ เมื่อเปิดไฟ

2) วงจรเรียงกระแส (Rectifier) มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

3) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction Circuit ; PFC) มีหน้าที่ปรับปรุงรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ (Sine) เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิก และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้า

4) วงจรกรองผ่านต่ำ (Lowpass filter) มีหน้าที่กรองแรงดันค่าระรอกออกไป เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟตรง (V_{dc}) ด้านเข้าที่จ่ายให้วงจรอินเวอร์เตอร์

5) วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High frequency inverter) มีหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้การสวิตช์แบบสวิตช์แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switch ; ZVS)

6) วงจรขับนำสวิตช์ (Drive) มีหน้าที่ กำเนิดสัญญาณขับนำสวิตช์ อาจจำแนกตามลักษณะการกำเนิดสัญญาณได้ 2 ชนิด คือชนิดที่กำเนิดสัญญาณขับนำอย่างอิสระ โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และชนิดที่ต้องอาศัยการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันด้านโหลดผ่านหม้อแปลงอิมตัว

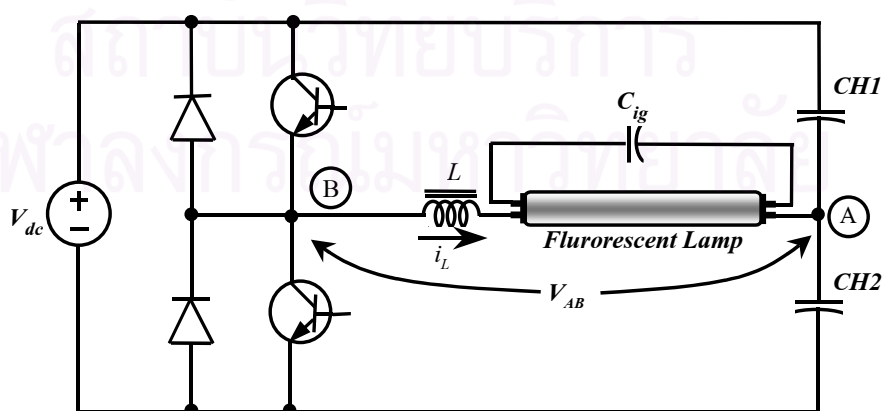
7) ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) มีหน้าที่ เป็นองค์ประกอบหนึ่งของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่สร้างแรงดันสูงในตอนเริ่มต้น และควบคุมกระแสผ่านหลอดให้มีค่าตามที่กำหนดในการทำงานปกติ

8) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นแสงสว่างที่มีคุณสมบัติ ดังนี้คือ ต้องใช้แรงดันสูงในการจุดหลอดให้สว่าง ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส มีความต้านทานพลวัตเป็นลบ และปริมาณแสงแปรตามกระแสผ่านหลอด

9) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ทำหน้าที่ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำในตอนเริ่มต้นเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเพื่อสร้างแรงดันสูงในการจุดหลอด และยังเป็นทางผ่านของกระแสที่ใช้ในการอุ่นไส้หลอดในภาวะปกติ

2.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

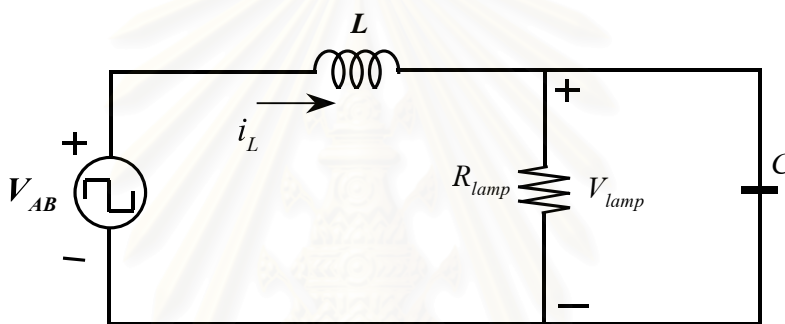
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรืออินเวอร์เตอร์ (inverter) เป็น วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (โดยทั่วไปจะทำงานที่ความถี่ในช่วง 20 – 50 กิโลเฮิรตซ์) เพื่อป้อนให้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ วงจรอินเวอร์เตอร์มีหลายชนิดแต่ส่วนใหญ่นิยมใช้วงจรบริดจ์ หรือกึ่งบริดจ์ โดยในแต่ละกิ่งของวงจรบริดจ์ประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ต่อกันและสลับกันนำกระแส เนื่องจากกระแสและแรงดันของโหลดมีเฟสต่างกัน ดังนั้นสวิตช์ที่ใช้จะต้องเป็นสวิตช์ที่นำกระแสได้ 2 ทาง ซึ่งทำได้โดยการต่อไดโอดขนานกับสวิตช์ ดังรูปที่ 2.8 สวิตช์ไวงานจะทำหน้าที่ส่งพลังงานไปสู่โหลด ส่วนพลังงานจากโหลดที่ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟตรงจะไหลผ่านไดโอด อย่างไรก็ตามสวิตช์ไวงานที่ใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปมักจะมีไดโอดค่ออยู่แทบทั้งสิ้น การทำงานของสวิตช์ไวงานจะเป็นการสวิตช์แบบสวิตช์แรงดันศูนย์ ที่มีกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำ แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ วัฏจักรงาน 0.5



รูปที่ 2.8 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2.6 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์และสมการของวงจร

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดฟลูออเรสเซนต์เป็นโหลดสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ V_{AB} คือแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ L คือตัวเหนี่ยวนำ ทำหน้าที่ควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ R_{lamp} คือความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และ C คือตัวเก็บประจุสำหรับจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์

V_{AB} เป็นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ มีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม มีค่า ณ เวลาต่าง ๆ กันดังในสมการที่ 2.1

สามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3

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

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

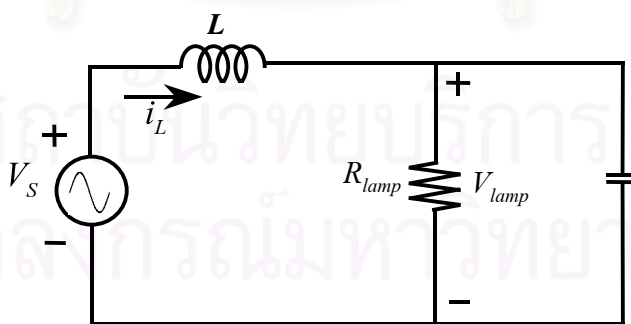
$$= \sum_{n=odd}^{\infty} V_{sn} \sin n\omega_s t \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \omega_s &= \text{ความถี่การสวิตช์} \\ V_{DC} &= \text{แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า} \end{aligned}$$

เนื่องจากวงจรโหลดมีการต่อในลักษณะเป็นวงจรกรองอันดับสอง (Second order) และมีความถี่การทำงานของวงจรอยู่รอบ ๆ ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamp natural frequency, f_o) รูปคลื่นของแรงดันคร่อมโหลดและกระแสผ่านโหลดมีรูปคลื่นใกล้เคียงกับไซน์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นการวิเคราะห์ห้วงจรจึงอาจจะวิเคราะห์โดยการประมาณแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ด้วยรูปคลื่นไซน์แทนรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

- 1) ละเลยการสูญเสียในสวิตช์ไวงาน
- 2) ละเลย Reverse recovery ของ ไดโอด
- 3) ถือว่าตัวเก็บประจุ CH_1 และ CH_2 มีค่าสูง ทำให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงด้านเข้ามีน้อย
- 4) ค่า Q_L มีค่าสูงเพียงพอ ที่จะทำให้สามารถละเลยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์
- 5) ละเลยความต้านทานของไส้หลอด

ได้วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอด ฟลูออเรสเซนต์ ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ V_s คือแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาดเท่ากับองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.7 วงจรและสมการของวงจรในภาวะทำงานปกติ

การทำงานในสภาวะอยู่ตัว หลังจากหลอดฟลูออเรสเซนต์จุดติดแล้วจะมีกระแสไหลผ่านหลอดทำให้ค่าความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (R_{lamp}) ลดลงเท่ากับค่าที่พิกัด ในขณะที่ทำงานปกติซึ่งสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรในขณะทำงานปกติ ได้ดังนี้

- ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเป็นความถี่ขีดแบ่งระหว่างอินดักทีฟโหลด และคาปาซิทีฟโหลด (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)

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

- อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนาน (impedance of the series resonant parallel load circuit)

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

$$|Z| = \sqrt{\frac{(R_{lamp})^2 \left[\left(1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{1}{Q_p} \frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 \right]}{1 + \left(Q_p \frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2}} \quad (2.8)$$

$$\phi = \arctan \left\{ Q_p \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right) \left[\left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 + \left(\frac{1}{Q_p^2} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2.9)$$

- ฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันคร่อมหลอด $V_{lamp}(S)$ ต่อแรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์ $V_S(S)$

$$\frac{V_{lamp}(S)}{V_S(S)} = \frac{1}{(LC_{ig})S^2 + \left(\frac{L}{R_{lamp}} \right)S + 1} \quad (2.10)$$

$$\frac{V_{lamp}(j\omega)}{V_S(j\omega)} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 + j \left(\frac{1}{Q_p} \right) \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right) \right]} \quad (2.11)$$

ขนาดค่าขดของกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ (I_{lamp})

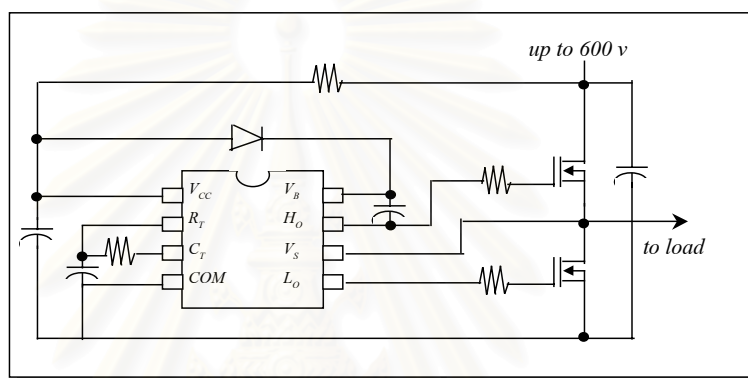
$$I_{lamp} = \frac{2V_{dc}}{\pi Z_o \sqrt{Q_p^2 \left[\left(1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega_s}{Q_p \omega_o} \right)^2 \right]}} \quad (2.12)$$

$$\text{ที่ } f_s = f_o \quad I_{lamp} \cong \frac{2V_{dc}}{\pi Z_o} = \frac{2V_{dc}}{\pi \omega_o L} = \frac{2V_{dc} \omega_o C_P}{\pi} \quad (2.13)$$

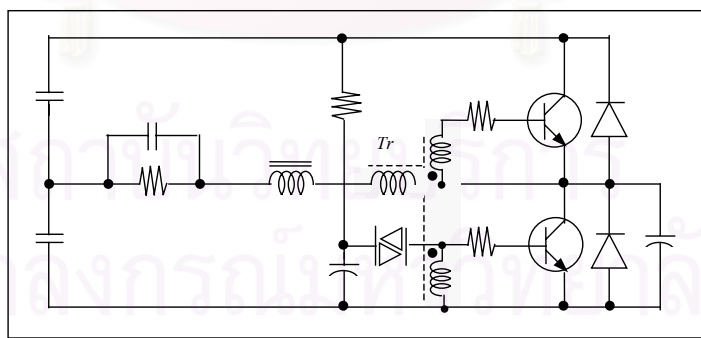
2.8 วงจรขับนำสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ (*Drive circuit*)

การขับนำสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงที่ใช้การสวิตช์แบบสวิตช์แรงดันศูนย์ จะต้องใช้วงจรขับนำที่มีช่วงเวลาพัก (dead time) ที่เหมาะสม ซึ่งช่วงเวลาพักของสัญญาณขับนำจะต้องยาวกว่าผลรวมของช่วงเวลาประจุสะสมของสวิตช์กับช่วงเวลาประจุของสแน็บเบอร์เพื่อไม่ให้เกิดกระแสทะลุผ่าน (Shoot-through) และช่วง

เวลาพักต้องสั้นกว่าผลรวมของช่วงเวลาประจุสะสมของสวิตช์ ช่วงเวลาประจุของสับเบอ์และช่วงเวลาไดโอด คู่ประกอบที่นำกระแส นอกจากนี้แล้ววงจรขั้วนำสวิตช์ทั้งสองชุดในแต่ละกิ่งของวงจรกึ่งบริดจ์จะต้องมีการแยก โดคทางไฟฟ้าระหว่างกัน ในบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์วงจรกำเนิดสัญญาณขั้วนำสวิตช์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ 1) ชนิดที่กำเนิดสัญญาณขั้วนำอย่างอิสระโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือวงจรรวม (Intregrated circuit,IC) ดังแสดง ในรูปที่ 2.11 2) ชนิดที่ต้องอาศัยการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันด้าน โหลดผ่านหม้อแปลงอิมตัวดังแสดงใน รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณขั้วนำสวิตช์ชนิดที่กำเนิดสัญญาณขั้วนำอย่างอิสระ โดยใช้วงจร อิเล็กทรอนิกส์ หรือวงจรรวม (Intregrated Circuit, IC)



รูปที่ 2.12 วงจรกำเนิดสัญญาณขั้วนำสวิตช์ชนิดที่อาศัยการป้อนกลับของกระแส โหลดผ่านหม้อ แปลงอิมตัว (Saturable transformer)

2.9 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor correction circuit : PFC)

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังมีหน้าที่ปรับรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกและเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้า ให้เป็นไปตามมาตรฐานของ IEC 1000-3-2 (ในอดีตใช้ IEC 555-2) ค่าตัวประกอบกำลังต้องมากกว่า 0.9 ฮาร์มอนิกที่ 3 น้อยกว่า 27% ของค่าองค์ประกอบหลักมูล และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) น้อยกว่า 32 % ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงขอบเขตอัตราส่วนของขนาดกระแสฮาร์มอนิกของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาตรฐาน IEC 1000-3-2

ฮาร์มอนิกอันดับที่ n (Harmonic Order)	ขอบเขตค่าอัตราส่วนสูงสุด (%) ของค่ากระแสด้านเข้าของ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่พื้นฐาน 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

(λ คือ ค่าตัวประกอบกำลังของวงจร)

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ

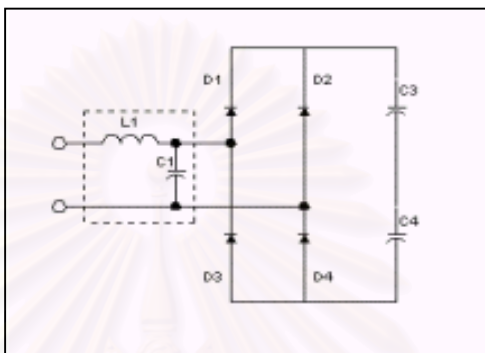
- 1) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน (Passive PFC)
- 2) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน (Active PFC)

1) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน

ลักษณะของวงจรจะใช้อุปกรณ์แบบเฉื่อยงานเช่น ไดโอด ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวต้านทานมาประกอบเป็นวงจร เพื่อให้กระแสด้านเข้าใกล้เคียงไซน์ ซึ่งคุณสมบัติโดยเฉลี่ยดังนี้ ตัวประกอบกำลังน้อยกว่า 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมมากกว่า 20 % ตัวอย่างของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน เช่น

ก) LC Filter before Bridge Rectifier

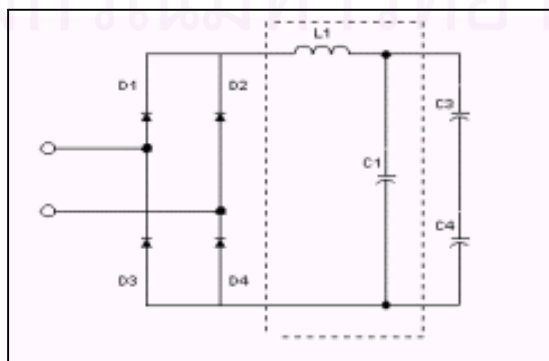
ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะอยู่ด้านหน้าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ซึ่งจะให้ค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ประมาณ 23 - 25 % (Spangler, Hussain and Behera,1991) ลักษณะวงจรแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่2.13 LC Filter before Bridge Rectifier

ข) LC Filter after Bridge Rectifier

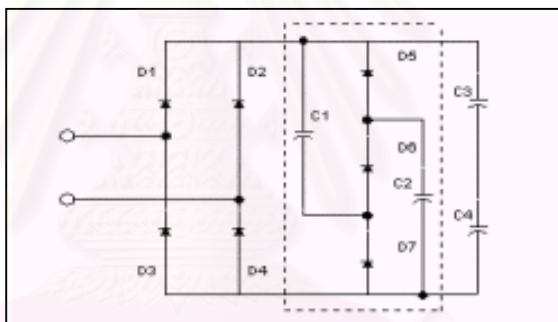
ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะถูกวางหลังวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ดังรูปที่ 2.14 ในลักษณะนี้ตัวเหนี่ยวนำจะต้องทนกระแสได้สูงกว่าแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอยู่หน้าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และต้องมีช่องอากาศใหญ่กว่า วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบนี้มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 42 - 45 % (Spangler, Hussain and Behera,1991) ซึ่งมากกว่าวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอยู่หน้าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์



รูปที่ 2.14 LC Filter after Bridge Rectifier

ค) Rippled or Valley fill PFC

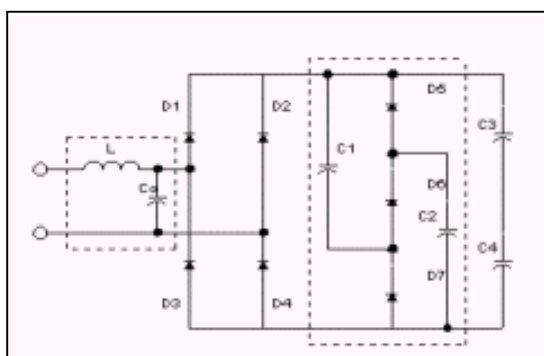
วงจร Rippled or Valley fill PFC มีลักษณะวงจรแสดงดังรูปที่ 2.15 วงจรนี้จะมีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.93 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 26 - 34 % (Spangler, Hussain and Behera, 1991)



รูปที่ 2.15 Rippled or Valley fill PFC

ง) Valley fill with inductor in charging leg

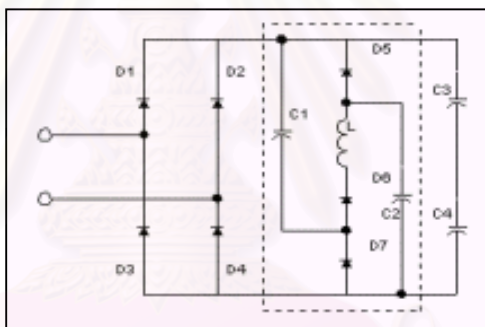
วงจร Valley fill with inductor in charging leg มีลักษณะวงจรแสดงดังรูปที่ 2.16 ลักษณะวงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำ ใน Charging leg มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.92 - 0.95 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 27 - 32 % (Spangler, Hussain and Behera, 1991)



รูปที่ 2.16 Valley fill with inductor in charging leg

จ) Valley fill with inductor before Bridge Rectifier

วงจร Valley fill with inductor before Bridge Rectifier ลักษณะวงจรมีดังรูปที่ 2.17 ตัวเหนี่ยวนำจะถูกรวมส่วนหน้าของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 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

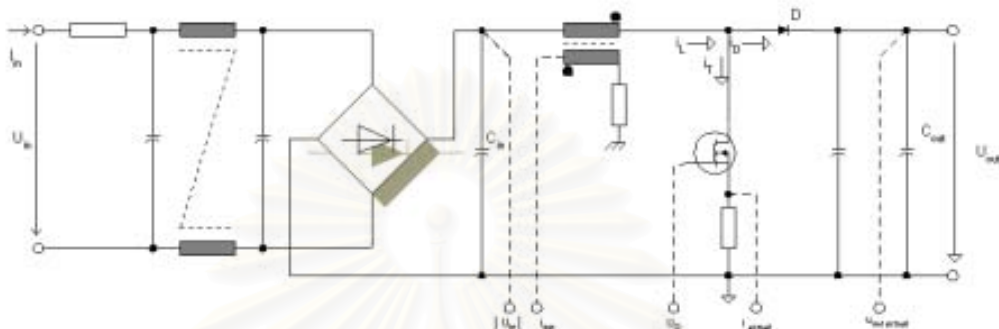


รูปที่ 2.17 Valley fill with inductor before Bridge Rectifier

พิจารณาจากวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเลื่อนงานที่กล่าวมาแล้ว เมื่อมีการออกแบบวงจรที่เหมาะสมก็จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังและค่าเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมได้ค่าตามมาตรฐาน แต่ถ้าต้องการให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้นและมีค่าเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ต่ำลง ก็จำเป็นต้องใช้วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

2) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานส่วนใหญ่จะใช้หลักการทํางานของวงจรแปลงผันกำลังแบบทบระดับหรือวงจรแปลงผันกำลังที่ดัดแปลงจากวงจรทบระดับ



รูปที่ 2.18 วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน โดยใช้วงจรทบระดับ

ลักษณะของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานยังแบ่งได้อีกเป็น 2 ลักษณะ โดยพิจารณาจากลักษณะการต่อวงจรโดยแบ่งเป็น

- 1) วงจรแบบภาคเดียว (single stage)
- 2) วงจรแบบสองภาค (two stage)

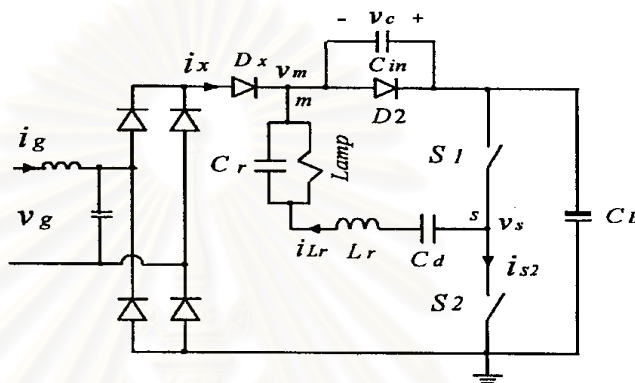
1) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีการต่อวงจรเป็นแบบ single stage

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ single stage นั้นจะใช้สวิทช์ของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานร่วมกับสวิทช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ มีข้อดีคือสามารถลดจำนวนสวิทช์และวงจรขับนำลง และช่วยลดความยุ่งยากในการควบคุมสวิทช์ลง แต่มีความยุ่งยากในการออกแบบหรือเลือกค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสม ตัวอย่างของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานแบบ single stage เช่น

ก) วงจร Charge Pump Power Factor Correction Circuit (CPPFC)

วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบ Charge Pump เช่น วงจร voltage source (VS)CPPFC,

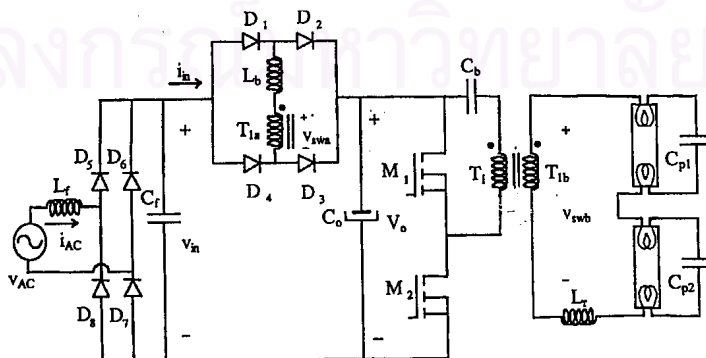
current source (CS) CPPFC และ continuous input current (CIC) CPPFC (Qian and LEE,2000) มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.99 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 11.3 % ตัวประกอบค่ายอดคลื่น (Crest factor ;CF = ค่ายอด / ค่า RMS) 1.54 วงจรแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจร Charge - pump Power Factor Correction

ข) วงจร Boost liked Operating in Critical Conduction mode

ลักษณะของวงจรจะประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนต่อกัน วงจรแสดงดังรูปที่ 2.20 ในวงจรส่วนแรกจะเป็นวงจรเสมือนวงจรทบระดับซึ่งทำงานที่ขีดแบ่งของภาคกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง วงจรอีกส่วนจะเป็นอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมต่อโหลดแบบขนาน มีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.99 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 14.0 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.55 (Co, Simonetti and Vieira,1996)



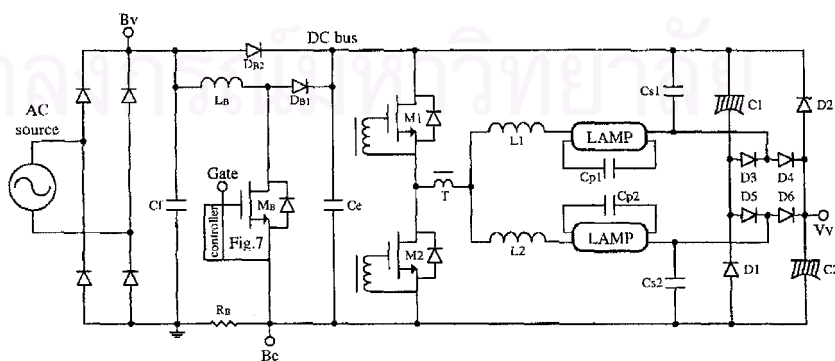
รูปที่ 2.20 วงจร Boost liked Operating in Critical Conduction mode

2) วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีการต่อวงจรเป็นแบบ two stage

วงจรเพิ่มค่าประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ two stage นั้นจะมีการใช้สวิตช์ของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานแยกกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวอย่างของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน แบบ two stage เช่น

ก) วงจร Improved Valley fill and Valley Boost Converter

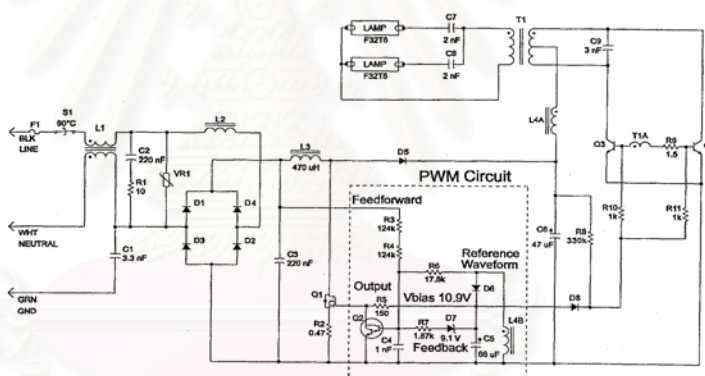
วงจร Improved Valley Fill (IVF) เป็นวงจรที่ได้รับการปรับปรุงจากวงจร Valley Fill เมื่อเทียบกับวงจร Valley Fill เดิม วงจร Improved Valley Fill (IVF) จะมีตัวเก็บประจุต่อร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ ส่งผลให้กระแสไซน์เรียบขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น และเมื่อนำวงจร Improved Valley Fill (IVF) มาต่อร่วมกับ Valley Boost Converter (VBC) ผลก็คือจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ได้ใกล้เคียง 1 คือประมาณ 0.997 ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำมากๆ ประมาณ 5 % และค่าตัวประกอบขดคลื่นของกระแสโหลดดีมาก ประมาณ 1.5 (Youn, Chae and Cho, 1997) วงจรแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 Improved Valley fill and valley Boost Converter

ข) วงจร Simplified Boost Converter

เป็นวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่เป็นวงจรทระดับทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง โดยใช้แนวคิดของการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation ,PWM) วงจร PWMรวมกับสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิงที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์เข้าด้วยกันกับสัญญาณป้อนกลับและป้อนไปหน้าเพื่อสร้างสัญญาณที่ตรงข้าม โดยใช้ทรานซิสเตอร์ต่อเป็นวงจรคาร์ลิงตันซึ่งจะใช้ขั้วมอสเฟตกำลัง ร่วมกับแนวคิดของการควบคุมสำหรับวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่เป็นวงจรทระดับทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะให้ค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.992 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมประมาณ 6.2 % ตัวประกอบยอดคลื่น 1.55 (Ganesh and Hesterman,1998) วงจรแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Simplified Boost Converter

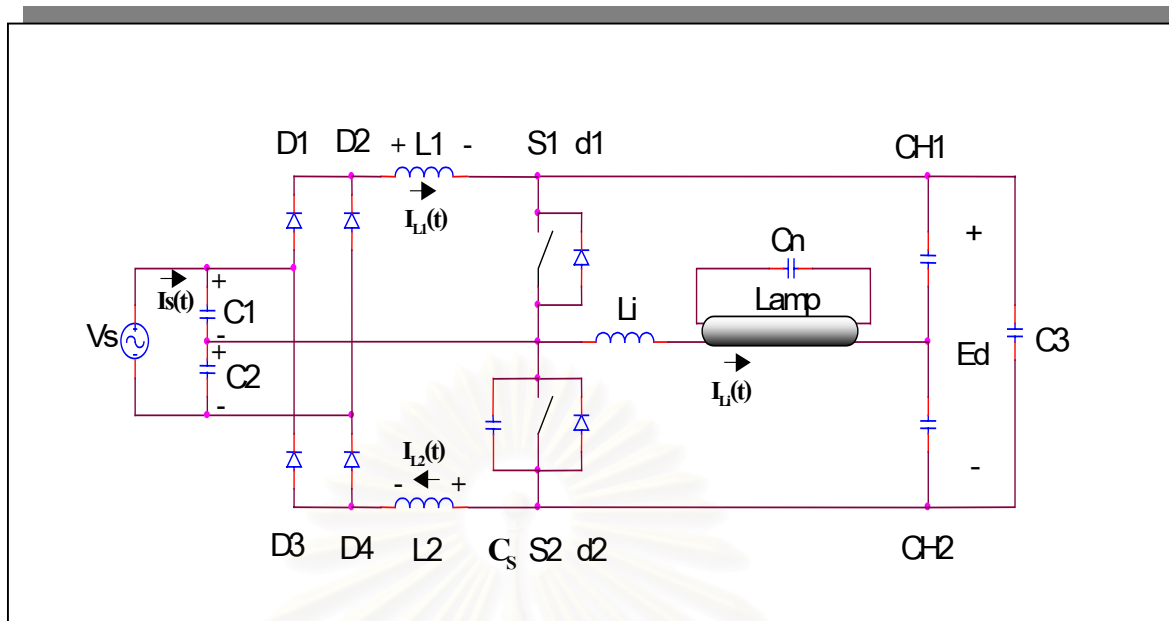
วงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังจากที่กล่าวมาแล้วนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทคือวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบเฉื่อยงาน และวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงาน ซึ่งวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบ single stage และ two stage

วงจรเพิ่มค่าประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ two stage นั้นจะมีการใช้สวิตช์ของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานแยกกับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้ต้องใช้สวิตช์ไวงานเพิ่ม เกิดความยุ่งยากในการควบคุมสวิตช์ไวงาน เนื่องจากต้องใช้วงจรขับนำเพิ่มขึ้น ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ ไม่เป็นการประหยัด ส่วนวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังแบบไวงานที่มีลักษณะการต่อเป็นแบบ single stage จะมีข้อดีในการลดช่วยจำนวนสวิตช์ไวงาน และวง

จรจับนำสวิตช์ได้ โดยสามารถใช้สวิตช์ไวงานของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) ร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ไม่มีปัญหาในการควบคุมสวิตช์ไวงานที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดทั้งขนาดและราคาของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ให้ลดลงอีกด้วย ดังนั้นด้วยคุณสมบัติที่ดีดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ต้องใช้สวิตช์ไวงานเพิ่มที่มีการต่อวงจรเป็นแบบภาคเดียว เรียกว่าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ ซึ่งมีวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกัน โดยใช้สวิตช์ไวงานร่วมกันที่วัฏจักรงาน 0.5 และทำงานแบบสวิตช์แรงดันศูนย์ การออกแบบวงจรมันจะต้องออกแบบให้เหมาะสม เพื่อให้ได้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูง และมีเสถียรภาพในการทำงาน ทฤษฎีการทำงานและเสถียรภาพของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่จะกล่าวถึงในส่วนต่อจากนี้ไป

2.10 ทฤษฎีการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่

วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่แสดงดังในรูปที่ 2.23 จะมีลักษณะเป็นวงจรทบระดับ 2 วงจร ทำงานแบบวงจรคู่ประกอบ วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ดังกล่าวนี้ ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสไดโอดแบบบริดจ์ (D1 - D4) และตัวเก็บประจุ (C1, C2) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงของวงจรทบระดับ โดยมีตัวเหนี่ยวนำ (L1, L2) ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบระดับ ที่ใช้สวิตช์ไวงานสองตัว (S1, S2) สวิตช์ไวงานทั้งสองจะสลับกันตัดต่อวงจรในลักษณะคู่ประกอบ

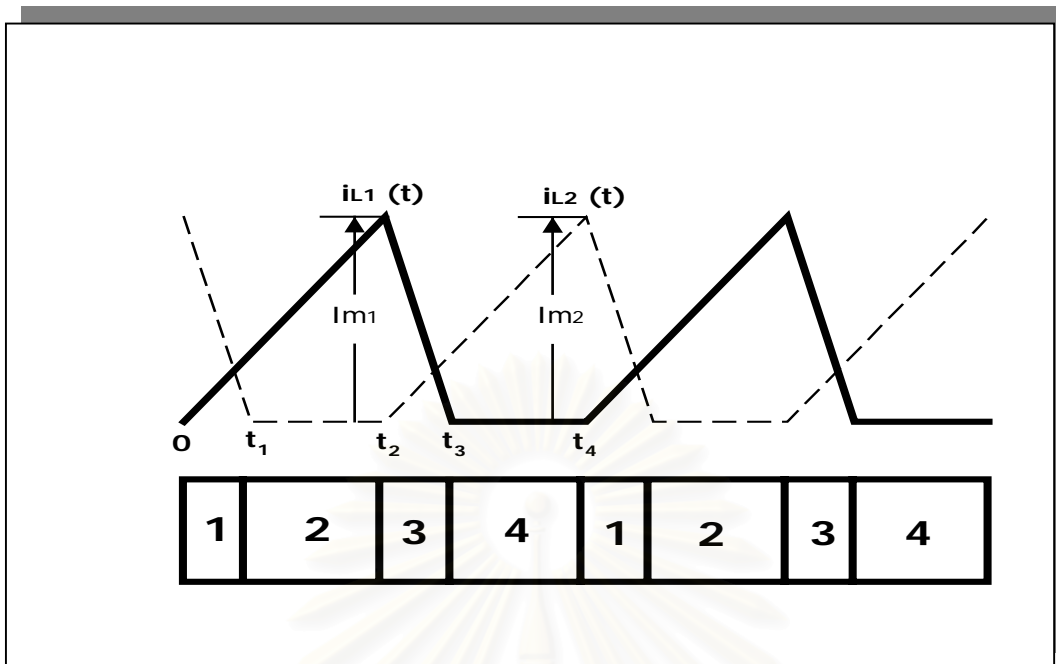


รูปที่ 2.23 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรแปลงผันทระดับแบบคู่

วงจรทระดับ 2 วงจรต่อกัน โดยจ่ายพลังงานให้ตัวเก็บประจุ CH1 และ CH2 ของวงจรอินเวอร์เตอร์ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรทระดับทั้งสองผลัดกันทำงานเป็นคู่ประกอบร่วมกัน โดยการตัดต่อวงจรของสวิตช์ไวงาน S1 และ S2 ขณะเดียวกันสวิตช์ไวงาน S1 และ S2 ยังทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย ทำให้ต้องมีวัฏจักรงานคงที่เท่ากับ 0.5

ในการวิเคราะห์เพื่อหาสมการของวงจรในเบื้องต้นจะนิยามตัวแปรทิศทางของกระแสและแรงดันได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L1 &= \text{ตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับตัวที่ 1} \\
 L2 &= \text{ตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับตัวที่ 2} \\
 Li &= \text{ตัวเหนี่ยวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์} \\
 i_s(t) &= \text{กระแสไฟฟ้าสลับด้านเข้า ณ เวลาขณะใดๆ} \\
 Ed &= \text{แรงดันไฟตรงด้านออกที่ตัวเก็บประจุ C3} \\
 i_{L1}(t) &= \text{กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรทระดับตัวที่ 1} \\
 i_{L2}(t) &= \text{กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรทระดับตัวที่ 2} \\
 i_{Li}(t) &= \text{กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.24 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (เส้นทึบ) และตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2 (เส้นประ)

พิจารณารูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในหนึ่งคาบการสวิตช์ในรูปที่ 2.24 (หมายเลขในกรอบข้างใต้แสดงช่วงการทำงานของวงจร)

กระแสจากแหล่งจ่าย $i_s(t)$ ประกอบด้วยกระแสแอกทีฟ $i_{s_a}(t)$ และกระแสรีแอกทีฟ $i_{s_c}(t)$ กระแสแอกทีฟ $i_{s_a}(t)$ เป็นกระแสที่ไหลผ่านเข้าไปในวงจรคอนเวอร์เตอร์ กระแสรีแอกทีฟ $i_{s_c}(t)$ เป็นกระแสที่ไหลเข้าไปประจุ C1 และ C2 เพื่อให้มีแรงดันเปลี่ยนแปลงตามแหล่งจ่าย $v_s(t)$ การเขียนสมการในแต่ละช่วง จะพิจารณาเฉพาะส่วนของกระแสแอกทีฟของคอนเวอร์เตอร์ โดยในขั้นตอนสุดท้ายต้องนำกระแสรีแอกทีฟ $i_{s_c}(t)$ เข้ามารวมกับกระแสแอกทีฟ $i_{s_a}(t)$ ที่ไหลผ่าน C1 และ C2 ส่วนด้านโหลดจะประมาณว่าแรงดันที่ C3 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก C3 มีค่าใหญ่มาก ทิศทางของลูกศรแสดงการไหลของกระแสในรูปประกอบต่อไปนี้ เป็นทิศทางการไหลของกระแสที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละช่วงการทำงาน ไม่ใช่ทิศทางอ้างอิงของกระแสที่ใช้ในการคำนวณทิศทางอ้างอิงของกระแสและแรงดันที่ใช้คำนวณ แสดงไว้ในรูปที่ 2.23

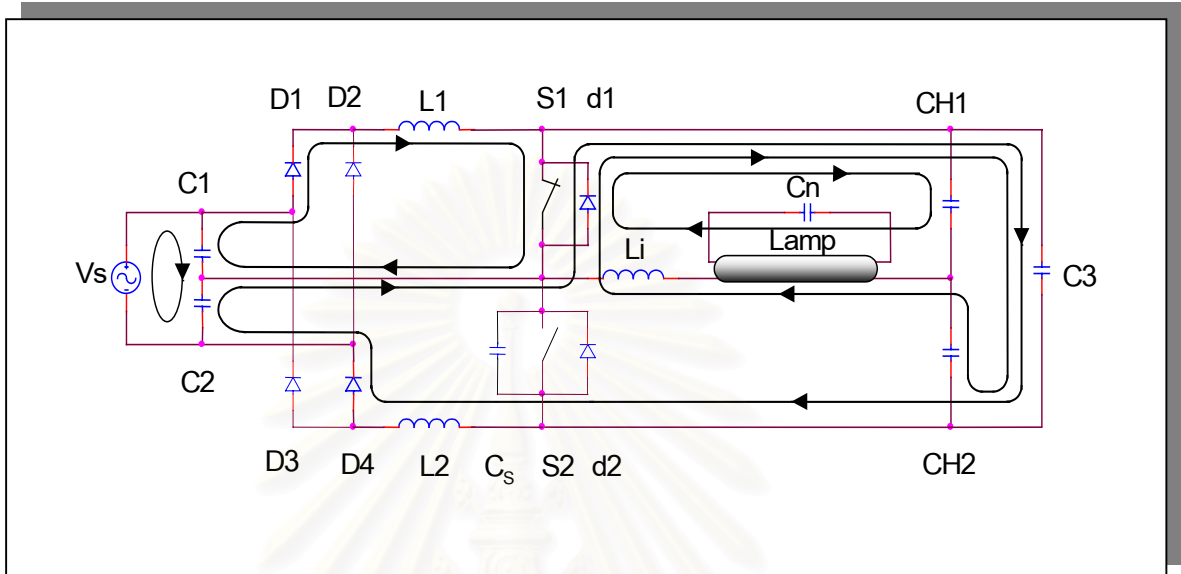
กำหนดให้

$$i_{c1}(t) = \text{กระแสชั่วขณะผ่านตัวเก็บประจุ C1 ที่เวลาใดๆ}$$

$$i_{c2}(t) = \text{กระแสชั่วขณะผ่านตัวเก็บประจุ C2 ที่เวลาใดๆ}$$

การทำงานของวงจรประกอบด้วยการทำงาน 4 ช่วงหลัก

ช่วงที่ 1 $0 < t < t_1$



รูปที่ 2.25 ช่วงที่ S1 เริ่มต่อวงจร S2 ตัดวงจร

ก่อนเวลา $t=0$ S1 เปิดวงจร $i_{L1}(t) = 0$, S2 ต่่วงจร $i_{L2}(t) > 0$ ที่เวลา $t=0$ S2 เปิดวงจร กระแสที่ไหลผ่าน S2 จะประจุตัวเก็บประจุ C_s จนมีแรงดันเท่ากับ E_d จากนั้นกระแส $i_{L2}(t)$ จะไหลผ่าน $L2$, $C2$, $d1$ และ $C3$ แรงดันคร่อม $L2$ จะมีค่าเท่ากับ $v_{C2}(t) - E_d$ ซึ่งมีค่าเป็นลบกระแส $i_{L2}(t)$ จะลดลงแบบเชิงเส้น ส่วนแรงดันคร่อม $L1$ จะมีค่าเท่ากับ $v_{C1}(t)$ ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ กระแส $i_{L1}(t)$ จะไหลผ่าน S1 ที่เสมือนนำกระแส และกระแส $i_{L1}(t)$ จะมีค่าเพิ่มในแบบเชิงเส้น ตัวเก็บประจุ CH2 จะจ่ายพลังงานออก ส่วน CH1 และ C3 จะรับพลังงานเข้า สามารถเขียนสมการของกระแสต่างๆได้นี้

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{v_{C1}(t)}{L1} > 0$$

$$\frac{di_{L2}(t)}{dt} = \frac{v_{C2}(t) - E_d}{L2} < 0$$

ทางด้านแหล่งจ่าย ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ K

$$v_{C1}(t) + v_{C2}(t) = K$$

$$\Delta v_{C1}(t) = -\Delta v_{C2}(t)$$

$$\begin{aligned}\frac{i_{c1}(t)}{C1} \Delta t &= -\frac{i_{c2}(t)}{C2} \Delta t \\ i_{c1}(t) &= -\frac{C1}{C2} i_{c2}(t)\end{aligned}$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$\begin{aligned}i_{L1}(t) - i_{L2}(t) &= i_{c2}(t) - i_{c1}(t) \\ i_{L1}(t) - i_{L2}(t) &= i_{c2}(t) + \frac{C1}{C2} i_{c2}(t) \\ i_{L1}(t) - i_{L2}(t) &= -\frac{C2}{C1} i_{c1}(t) - i_{c1}(t)\end{aligned}$$

เนื่องจาก $C1 = C2$ ดังนั้น

$$\begin{aligned}i_{c1}(t) &= \frac{i_{L2}(t) - i_{L1}(t)}{2} \\ i_{c2}(t) &= \frac{i_{L1}(t) - i_{L2}(t)}{2} \\ i_S(t) &= i_{Sa}(t) + i_{Sc}(t)\end{aligned}$$

จาก KCL ที่จุดบน

$$\begin{aligned}i_{Sa}(t) &= i_{c1}(t) + i_{L1}(t) \\ i_{Sa}(t) &= \frac{i_{L1}(t) + i_{L2}(t)}{2}\end{aligned}$$

จาก KCL ที่จุดล่าง

$$\begin{aligned}i_{Sa}(t) &= i_{c2}(t) + i_{L2}(t) \\ i_{Sa}(t) &= \frac{i_{L1}(t) + i_{L2}(t)}{2}\end{aligned}$$

ทางด้านโหลด

$$v_{CH1}(t) + v_{CH2}(t) = K1, \quad K1 =$$

ค่าคงที่

$$\Delta v_{CH1}(t) = -\Delta v_{CH2}(t)$$

$$\frac{i_{CH1}(t)}{CH1} \Delta t = -\frac{i_{CH2}(t)}{CH2} \Delta t$$

$$i_{CH1}(t) = -\frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t)$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$i_{Li}(t) = i_{CH2}(t) - i_{CH1}(t)$$

$$i_{Li}(t) = i_{CH2}(t) + \frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t)$$

$$i_{Li}(t) = -\frac{CH2}{CH1} i_{CH1}(t) - i_{CH1}(t)$$

$$i_{CH1}(t) = -\frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH2}{CH1}\right)}$$

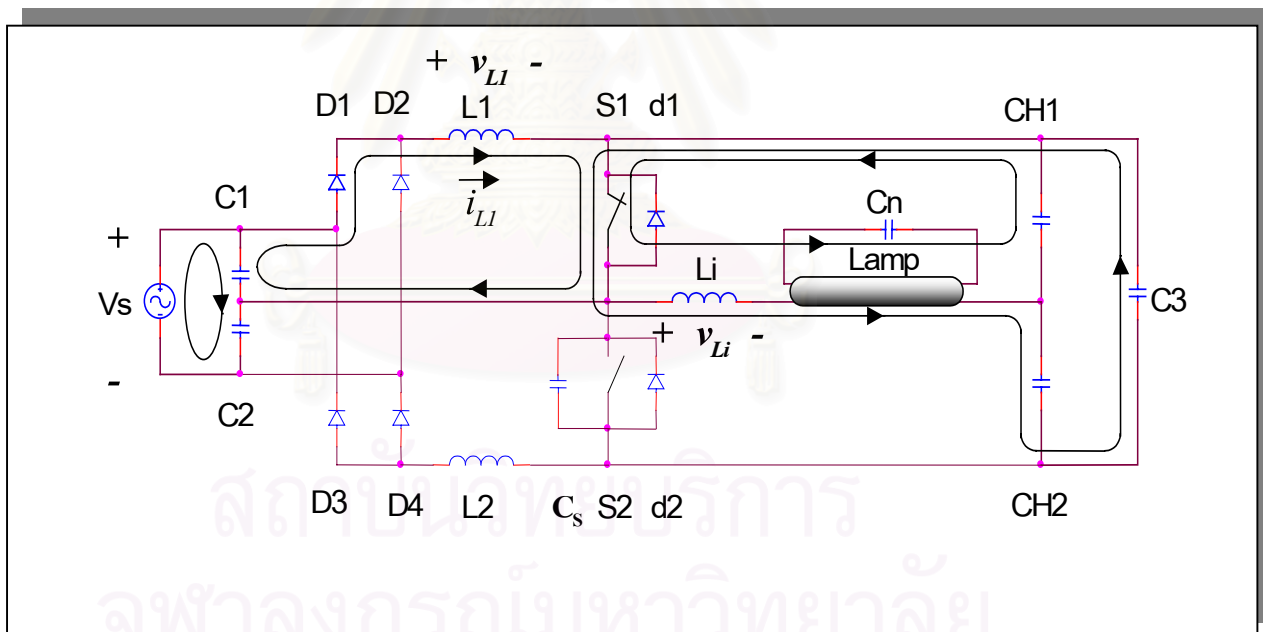
$$i_{CH2}(t) = \frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH1}{CH2}\right)}$$

เนื่องจาก $CH1 = CH2$ ดังนั้น

$$i_{CH1}(t) = -\frac{i_{Li}(t)}{2}$$

$$i_{CH2}(t) = \frac{i_{Li}(t)}{2}$$

ช่วงที่ 2 $t_1 < t < t_2$



รูปที่ 2.26 ช่วงที่ S1 ต่อกจร S2 ตัดวงจร

ที่เวลา $t = t_1$ $i_{L2}(t)$ ลดลงเป็นศูนย์ และยังคงมีค่าเป็นศูนย์ต่อไป ส่วน $i_{L1}(t)$ จะยังคงมีค่าเพิ่มเป็นแบบเชิงเส้น ในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ C3 และ CH1 จะคายพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ CH2 จะรับพลังงาน สามารถเขียนสมการของกระแสต่างๆ ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{v_{C1}(t)}{L1}$$

$$i_{L2}(t) = 0$$

ทางด้านแหล่งจ่าย ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ K

$$v_{C1}(t) + v_{C2}(t) = K$$

$$\Delta v_{C1}(t) = -\Delta v_{C2}(t)$$

$$\frac{i_{c1}(t)}{C1} \Delta t = -\frac{i_{c2}(t)}{C2} \Delta t$$

$$i_{c1}(t) = -\frac{C1}{C2} i_{c2}(t)$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$i_{L1}(t) = i_{c2}(t) - i_{c1}(t)$$

$$i_{L1}(t) = i_{c2}(t) + \frac{C1}{C2} i_{c2}(t)$$

$$i_{L1}(t) = -\frac{C2}{C1} i_{c1}(t) - i_{c1}(t)$$

$$i_{c1}(t) = -\frac{i_{L1}(t)}{\left(1 + \frac{C2}{C1}\right)}$$

$$i_{c2}(t) = \frac{i_{L1}(t)}{\left(1 + \frac{C1}{C2}\right)}$$

เนื่องจาก $C1 = C2$ ดังนั้น

$$i_{c1}(t) = \frac{i_{L1}(t)}{2}$$

$$i_{c2}(t) = \frac{i_{L1}(t)}{2}$$

$$i_S(t) = i_{Sa}(t) + i_{Sc}(t)$$

จาก KCL ที่จุดบน

$$i_{Sa}(t) = i_{c1}(t) + i_{L1}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{i_{L1}(t)}{2} + i_{L1}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{3i_{L1}(t)}{2}$$

จาก KCL ที่จุดล่าง

$$i_{Sa}(t) = i_{c2}(t) + i_{L2}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{i_{L1}(t)}{2}$$

ทางด้านโหลด

$$v_{CH1}(t) + v_{CH2}(t) = K1, K1 = \text{ค่าคงที่}$$

$$\Delta v_{CH1}(t) = -\Delta v_{CH2}(t)$$

$$\frac{i_{CH1}(t)}{CH1} \Delta t = -\frac{i_{CH2}(t)}{CH2} \Delta t$$

$$i_{CH1}(t) = -\frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t)$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$i_{Li}(t) = i_{CH2}(t) - i_{CH1}(t)$$

$$i_{Li}(t) = -\frac{CH2}{CH1} i_{CH1}(t) - i_{CH1}(t)$$

$$i_{Li}(t) = i_{CH2}(t) + \frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t)$$

$$i_{CH1}(t) = -\frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH2}{CH1}\right)}$$

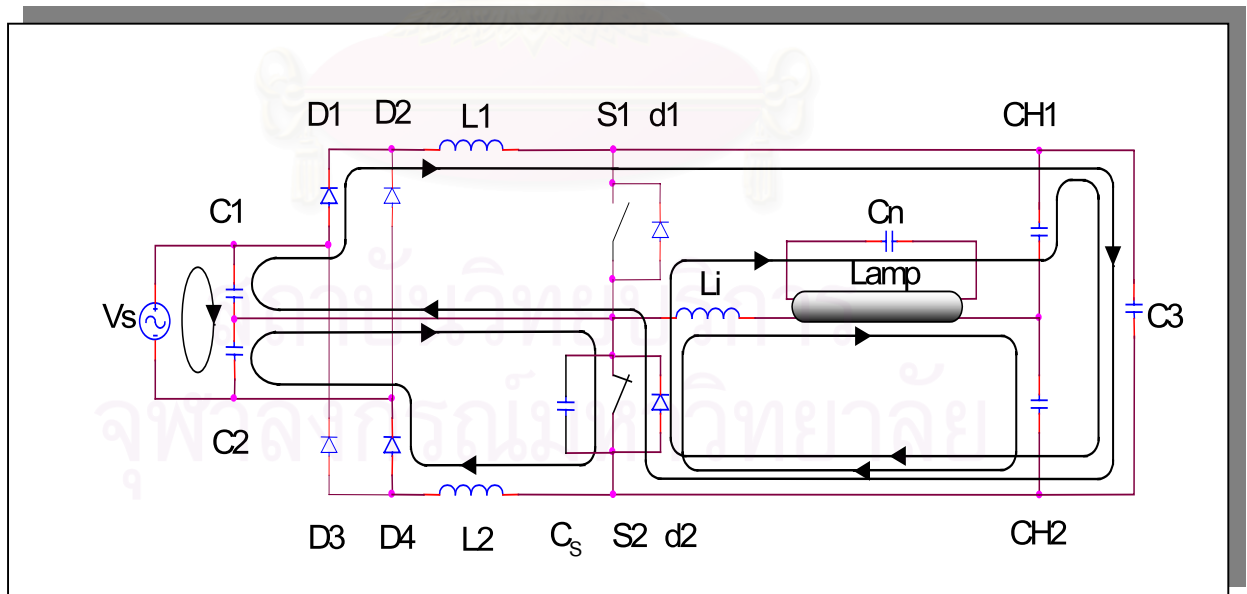
$$i_{CH2}(t) = \frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH1}{CH2}\right)}$$

เนื่องจาก $CH1 = CH2$ ดังนั้น

$$i_{CH1}(t) = -\frac{i_{Li}(t)}{2}$$

$$i_{CH2}(t) = \frac{i_{Li}(t)}{2}$$

ช่วงที่ 3 $t_2 < t < t_3$



รูปที่ 2.27 ช่วงที่ S1 ตัดวงจร S2 เริ่มต่อวงจร

ที่เวลา $t = t_2$ S1 เปิดวงจร กระแสที่เดิมเคยไหลผ่าน S1 จะทำให้ C_s คายประจุจนมีแรงดันลดลงเป็นศูนย์ จากนั้น $i_{Li}(t)$ จะไหลผ่าน $L1, C3, d2$ และ $C1$ แรงดันคร่อม $L1$ จะมีค่าเท่ากับ $v_{C2}(t) - Ed$ ซึ่งมีค่าเป็นลบ

$i_{L1}(t)$ จะลดลงแบบเชิงเส้น ส่วนแรงดันคร่อม $L2$ จะมีค่าเท่ากับ $v_{C2}(t)$ ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ $i_{L2}(t)$ จะไหลผ่าน $S2$ ที่เสมือนนำกระแส กระแส $i_{L2}(t)$ จะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น ตัวเก็บประจุ $CH1$ จะคายพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ $C3$ และ $CH2$ จะรับพลังงาน สามารถเขียนสมการของกระแสต่างๆ ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{v_{C1}(t) - Ed}{L1} < 0$$

$$\frac{di_{L2}(t)}{dt} = \frac{v_{C2}(t)}{L2}$$

ทางด้านแหล่งจ่าย ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ K

$$v_{C1}(t) + v_{C2}(t) = K$$

$$\Delta v_{C1}(t) = -\Delta v_{C2}(t)$$

$$\frac{i_{c1}(t)}{C1} \Delta t = -\frac{i_{c2}(t)}{C2} \Delta t$$

$$i_{c1}(t) = -\frac{C1}{C2} i_{c2}(t)$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$i_{L1}(t) - i_{L2}(t) = i_{c2}(t) - i_{c1}(t)$$

$$i_{L1}(t) - i_{L2}(t) = i_{c2}(t) + \frac{C1}{C2} i_{c2}(t)$$

$$i_{L1}(t) - i_{L2}(t) = -\frac{C2}{C1} i_{c1}(t) - i_{c1}(t)$$

เนื่องจาก $C1 = C2$ ดังนั้น

$$i_{c1}(t) = \frac{i_{L2}(t) - i_{L1}(t)}{2}$$

$$i_{c2}(t) = \frac{i_{L1}(t) - i_{L2}(t)}{2}$$

$$i_S(t) = i_{Sa}(t) + i_{Sc}(t)$$

จาก KCL ที่จุดบน

$$i_{Sa}(t) = i_{c1}(t) + i_{L1}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{i_{L1}(t) + i_{L2}(t)}{2}$$

จาก KCL ที่จุดล่าง

$$i_{Sa}(t) = i_{c2}(t) + i_{L2}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{i_{L1}(t) + i_{L2}(t)}{2}$$

ทางด้านโหลด

$$v_{CH1}(t) + v_{CH2}(t) = K1, \quad K1 =$$

ค่าคงที่

$$\Delta v_{CH1}(t) = -\Delta v_{CH2}(t)$$

$$\frac{i_{CH1}(t)}{CH1} \Delta t = -\frac{i_{CH2}(t)}{CH2} \Delta t$$

$$i_{CH1}(t) = -\frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t)$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$i_{Li}(t) = i_{CH2}(t) - i_{CH1}(t)$$

$$i_{Li}(t) = i_{CH2}(t) + \frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t)$$

$$i_{Li}(t) = -\frac{CH2}{CH1}i_{CH1}(t) - i_{CH1}(t)$$

$$i_{CH1}(t) = -\frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH2}{CH1}\right)}$$

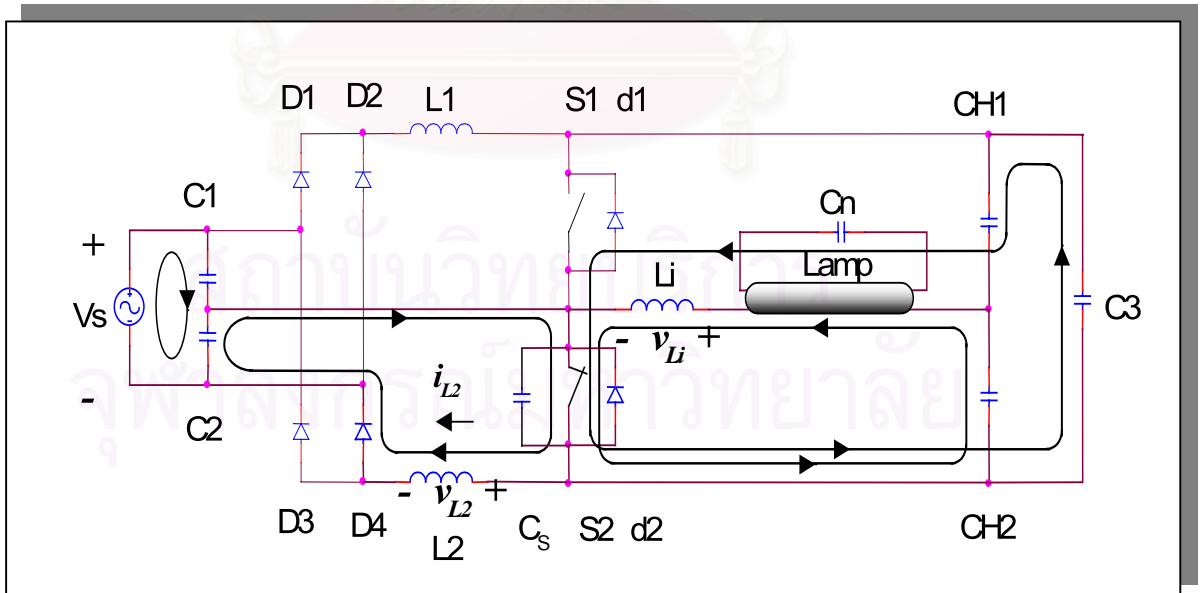
$$i_{CH2}(t) = \frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH1}{CH2}\right)}$$

เนื่องจาก CH1 = CH2 ดังนั้น

$$i_{CH1}(t) = -\frac{i_{Li}(t)}{2}$$

$$i_{CH2}(t) = \frac{i_{Li}(t)}{2}$$

ช่วงที่ 4 $t_3 < t < t_4$



รูปที่ 2.28 ช่วงที่ S1 ตัดวงจร S2 ต่อวงจร

ที่เวลา $t = t_3$ $i_{L1}(t)$ จะลดลงเป็นศูนย์ และยังคงมีค่าเป็นศูนย์ต่อไป ส่วน $i_{L2}(t)$ จะยังคงมีค่าเพิ่มเป็นแบบเชิงเส้น ในขณะที่ตัวเก็บประจุ C3 และ CH2 จะคายพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ CH1 จะรับพลังงาน สามารถเขียนสมการของกระแสต่างๆ ได้ดังนี้

$$i_{L1}(t) = 0$$

$$\frac{di_{L2}(t)}{dt} = \frac{v_{C2}(t)}{L2}$$

ทางด้านแหล่งจ่าย ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ K

$$v_{C1}(t) + v_{C2}(t) = K$$

$$\Delta v_{C1}(t) = -\Delta v_{C2}(t)$$

$$\frac{i_{c1}(t)}{C1} \Delta t = -\frac{i_{c2}(t)}{C2} \Delta t$$

$$i_{c1}(t) = -\frac{C1}{C2} i_{c2}(t)$$

จาก KCL ที่จุดกลาง

$$i_{L2}(t) = i_{c1}(t) - i_{c2}(t)$$

$$i_{L2}(t) = -\frac{C1}{C2} i_{c2}(t) - i_{c2}(t)$$

$$i_{L2}(t) = i_{c1}(t) + \frac{C2}{C1} i_{c1}(t)$$

$$i_{c1}(t) = \frac{i_{L2}(t)}{\left(1 + \frac{C2}{C1}\right)}$$

$$i_{c2}(t) = -\frac{i_{L2}(t)}{\left(1 + \frac{C1}{C2}\right)}$$

เนื่องจาก $C_1 = C_2$ ดังนั้น

$$i_{c1}(t) = \frac{i_{L2}(t)}{2}$$

$$i_{c2}(t) = -\frac{i_{L2}(t)}{2}$$

$$i_S(t) = i_{Sa}(t) + i_{Sc}(t)$$

จาก KCL ที่จุดบน

$$i_{Sa}(t) = i_{c1}(t) + i_{L1}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{i_{L2}(t)}{2}$$

จาก KCL ที่จุดล่าง

$$i_{Sa}(t) = i_{c2}(t) + i_{L2}(t)$$

$$i_{Sa}(t) =$$

$$-\frac{i_{L2}(t)}{2} + i_{L2}(t)$$

$$i_{Sa}(t) = \frac{i_{L2}(t)}{2}$$

ทางด้านโหลด

$$v_{CH1}(t) + v_{CH2}(t) = K1, \quad K1 = \text{ค่าคงที่}$$

$$\begin{aligned} \Delta v_{CH1}(t) &= -\Delta v_{CH2}(t) \\ \frac{i_{CH1}(t)}{CH1} \Delta t &= -\frac{i_{CH2}(t)}{CH2} \Delta t \\ i_{CH1}(t) &= -\frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t) \end{aligned}$$

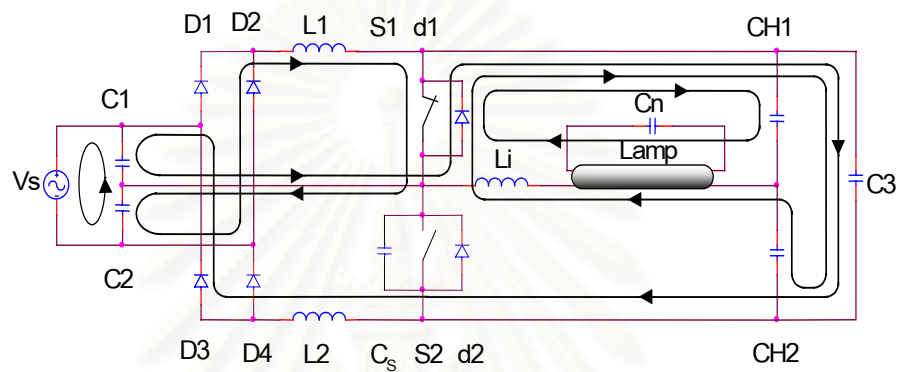
จาก KCL ที่จุดกลาง

$$\begin{aligned} i_{Li}(t) &= i_{CH2}(t) - i_{CH1}(t) \\ i_{Li}(t) &= \frac{CH2}{CH1} i_{CH1}(t) - i_{CH1}(t) \\ i_{Li}(t) &= i_{CH2}(t) + \frac{CH1}{CH2} i_{CH2}(t) \\ i_{CH1}(t) &= -\frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH2}{CH1}\right)} \\ i_{CH2}(t) &= \frac{i_{Li}(t)}{\left(1 + \frac{CH1}{CH2}\right)} \end{aligned}$$

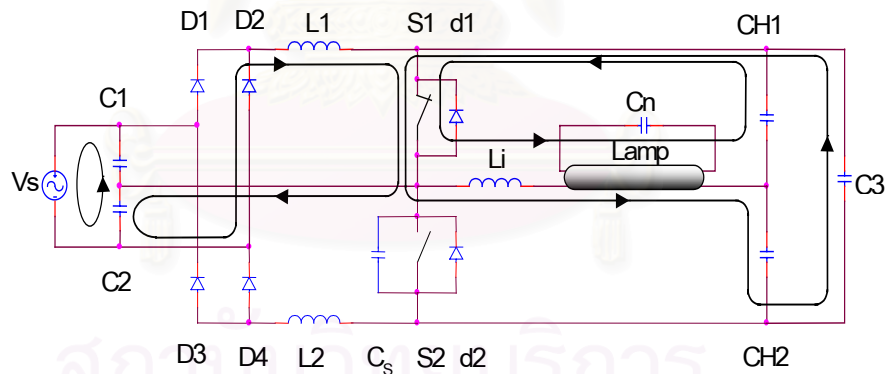
เนื่องจาก $CH1 = CH2$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} i_{CH1}(t) &= -\frac{i_{Li}(t)}{2} \\ i_{CH2}(t) &= \frac{i_{Li}(t)}{2} \end{aligned}$$

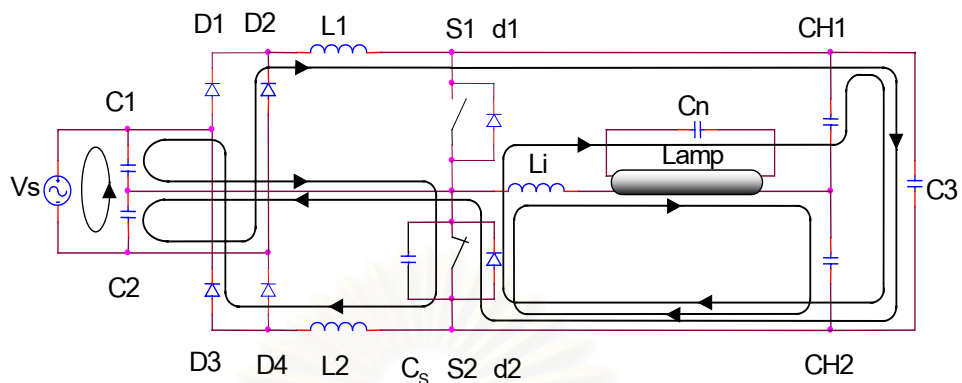
การทำงานทั้ง 4 ช่วงที่กล่าวไว้ข้างต้นเป็นช่วงการทำงานหลักของ วงจร ซึ่งมีการทำงานต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆจากช่วงที่ 1 ถึง 4 แล้วจะวนกลับมาเริ่มช่วงที่ 1 ใหม่ เมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากสายกำลังเปลี่ยนทิศ ในแต่ละคาบของการทำงานของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานที่ความถี่สูงจะทำงานตั้งแต่ช่วง 1 ถึง 4 วนสลับกันไปเรื่อยๆเช่นเดิม ดังรูปที่ 2.29 ต่างกันที่กระแสไหลผ่านไดโอด D2, D3 แทนการไหลผ่านไดโอด D1, D4 เดิม



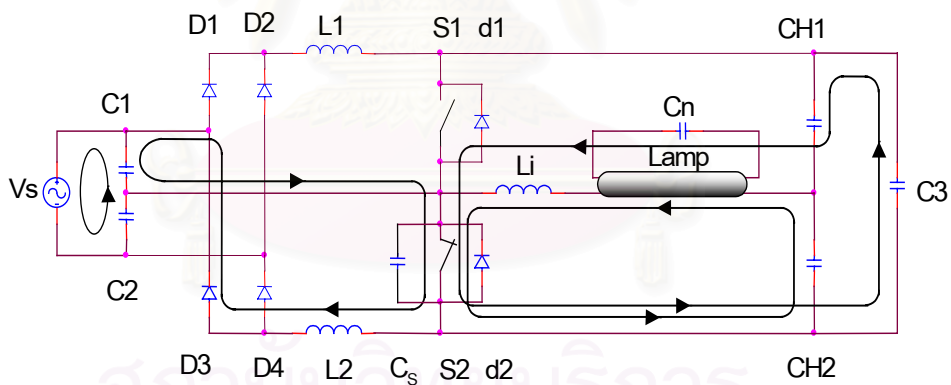
รูปก. ช่วงที่ S1 เริ่มต่อวงจร S2 ตัดวงจร



รูปข. ช่วงที่ S1 ต่อวงจร S2 ตัดวงจร



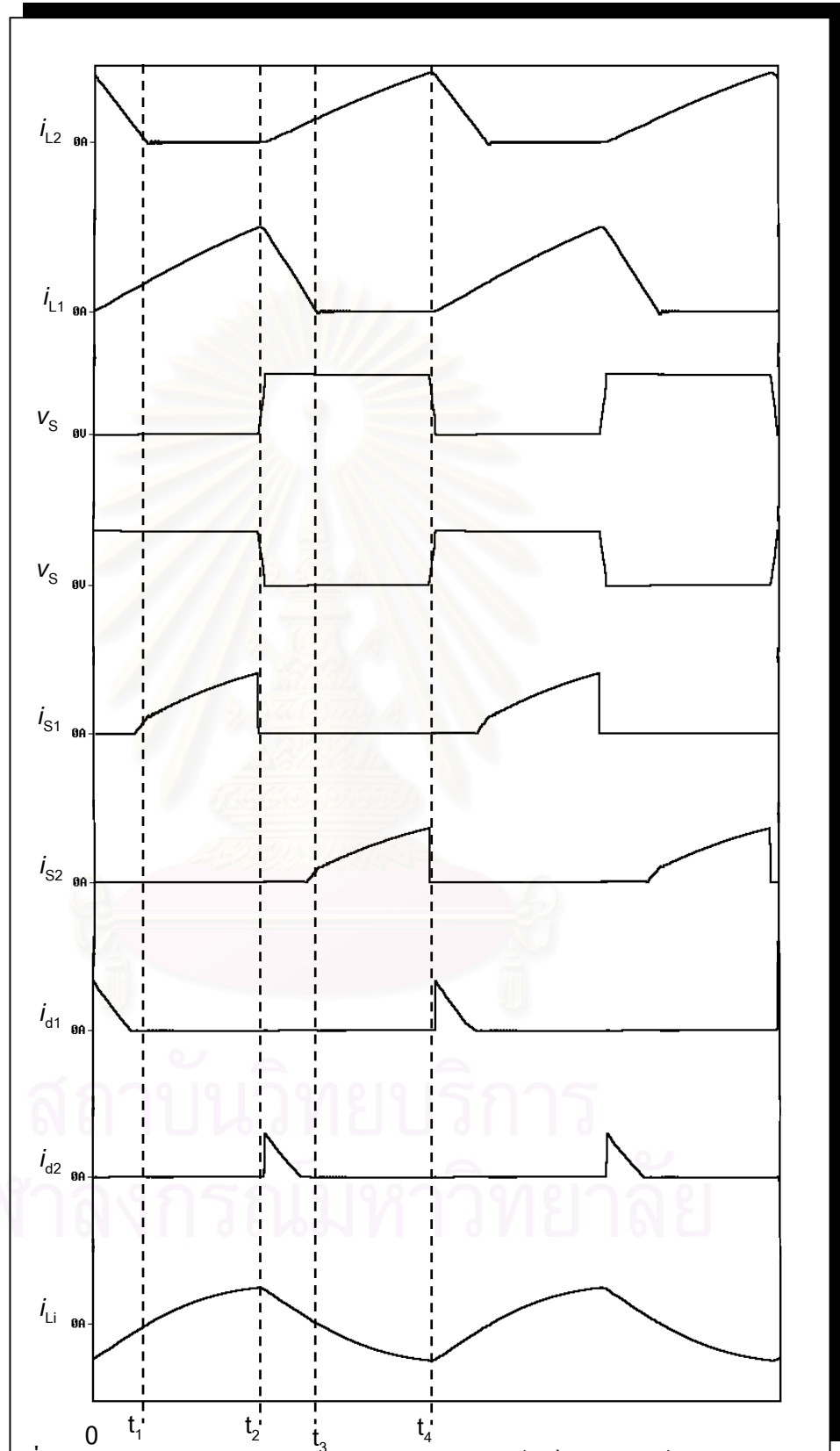
รูปก. ช่วงที่ S1 ตัดวงจร S2 เริ่มต่อวงจร



รูปง. ช่วงที่ S1 ตัดวงจร S2 ต่อวงจร

รูปที่ 2.29 การทำงานของวงจรในช่วงที่แรงดันจากสายกำลังเป็นลบ

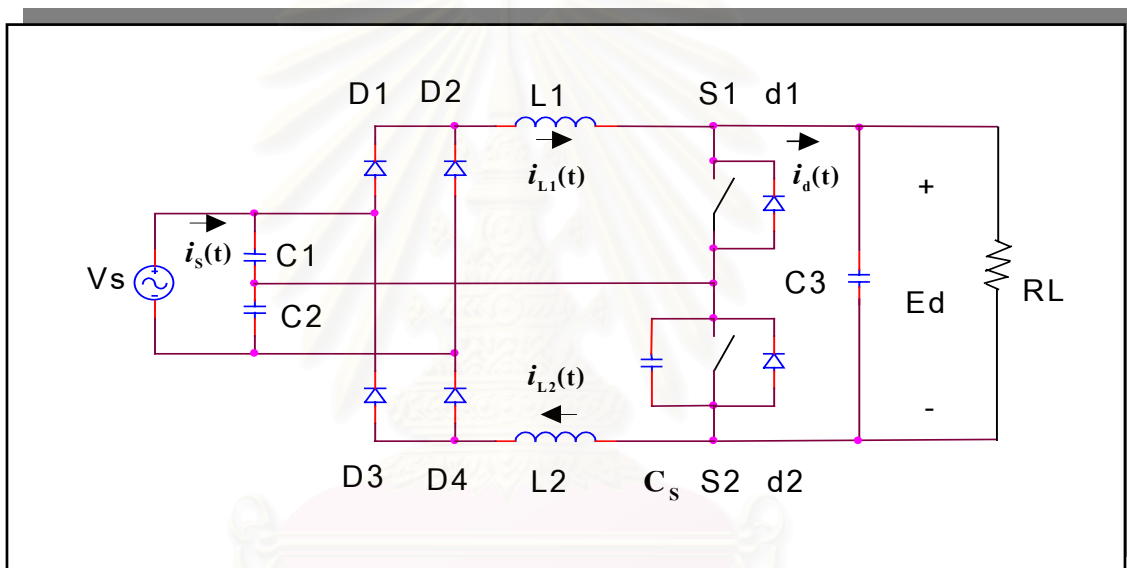
จากที่ได้อธิบายการทำงานของวงจรในช่วงต่างๆทั้ง 4 ช่วง สามารถที่จะแสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันในส่วนต่างๆของวงจร แสดงได้ดังในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันต่างๆของ วงจรบัลลาสต์ต่อเด็กทรอนิกส์

2.11 สมการคุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ที่วัฏจักรงาน 0.5 แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) มีค่าสูงกว่าค่ายอดของแรงดันไฟสลับด้านเข้าวงจรแปลงผันไฟตรง วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่มีลักษณะเป็นวงจรทบระดับแบบคู่ ที่แทนวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยความต้านทานสมมูล RL แสดงได้ดังรูปที่ 2.31



รูปที่2.31 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเป็นวงจรทบระดับแบบคู่

จากลักษณะการทำงานดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่2.10 สามารถที่จะคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน $L1$ และ $L2$ ในแต่ละช่วงการทำงานได้ดังนี้

ช่วงที่1
$$i_{L1}(t) = \frac{v_s(t)}{2LI} \cdot t \quad (0 < t < t_1) \quad (2.14)$$

$$i_{L2}(t) = I_{m2}(t) - \frac{1}{L2} \left(E_d - \frac{v_s(t)}{2} \right) (t) \quad (0 < t < t_1) \quad (2.15)$$

ช่วงที่2
$$i_{L1}(t) = \frac{v_s(t)}{2LI} \cdot (t) \quad (t_1 < t < t_2) \quad (2.16)$$

$$i_{L2}(t) = 0 \quad (t_1 < t < t_2) \quad (2.17)$$

$$\text{ช่วงที่ 3} \quad i_{L1}(t) = \text{Im1}(t) - \frac{1}{L1} \left(Ed - \frac{v_S(t)}{2} \right) (t - t_2) \quad (t_2 < t < t_3) \quad (2.18)$$

$$i_{L2}(t) = \frac{v_S(t)}{2L2} \bullet (t - t_2) \quad (t_2 < t < t_3) \quad (2.19)$$

$$\text{ช่วงที่ 4} \quad i_{L1}(t) = 0 \quad (t_3 < t < t_4) \quad (2.20)$$

$$i_{L2}(t) = \frac{v_S(t)}{2L2} \bullet (t - t_2) \quad (t_3 < t < t_4) \quad (2.21)$$

$$\text{Im1}(t) = \frac{v_S(t)}{2L1} 0.5T_{sw} \quad (2.22)$$

$$\text{Im2}(t) = \frac{v_S(t)}{2L2} 0.5T_{sw} \quad (2.23)$$

จากสมการข้างต้นจะได้ว่า

จากสมการที่ (2) และ (10) สามารถคำนวณหา t_1 ได้ดังนี้

$$t_1 = \frac{v_S(t)}{2Ed - v_S(t)} 0.5T_{sw} \quad (2.24)$$

$$t_2 = 0.5T_{sw} \quad (2.25)$$

$$t_3 = \frac{Ed}{2Ed - v_S(t)} T_{sw} \quad (2.26)$$

$$t_4 = T_{sw} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.16) และ (2.22) สามารถคำนวณหา $t_3 - t_2$ ได้ดังนี้

$$t_3 - t_2 = \frac{v_S(t)}{2Ed - v_S(t)} 0.5T_{sw} \quad (2.28)$$

โดยที่ $\text{Im1}(t)$ = ค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 ที่เวลาใดๆ

$\text{Im2}(t)$ = ค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2 ที่เวลาใดๆ

$v_S(t)$ = แรงดันของสายกำลังที่เวลาใดๆ

Ed = แรงดันไฟตรงด้านออก

T_{sw} = คาบเวลาของการสวิตช์

จากรูปที่ 2.31 จะได้ว่า

$$i_S(t) = i_{Sc}(t) + i_{L1}(t)$$

$$\begin{aligned}
 i_S(t) &= i_{Sc}(t) + i_{L2}(t) \\
 i_S(t) &= \frac{1}{2} [2i_{Sc}(t) + i_{L1}(t) + i_{L2}(t)] \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned}
 \Delta v_{C1}(t) + \Delta v_{C2}(t) &= \Delta v_S(t) \\
 \frac{i_{Sc}(t)}{C1} \Delta t + \frac{i_{Sc}(t)}{C2} \Delta t &= \Delta v_S(t) \\
 i_{Sc}(t) + i_{Sc}(t) = 2i_{Sc}(t) &= C \frac{\Delta v_S(t)}{\Delta t} \quad ; \quad C1 = C2 = C
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$i_S(t) = \frac{1}{2} \left[i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + C \frac{\Delta v_S(t)}{\Delta t} \right] \quad (2.30)$$

ค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบของการสวิตช์ ของ $i_S(t) = \bar{i}_S(t)$

ในกรณีที่เลือก $L1 = L2 = L$

$$\begin{aligned}
 \bar{i}_S(t) &= \frac{1}{2} (\bar{i}_{L1} + \bar{i}_{L2}) + \frac{C}{2} \frac{\Delta v_S(t)}{\Delta t} \\
 \bar{i}_{L1} &= \frac{1}{T_{SW}} \frac{1}{2} \text{Im } 1(t_3) \\
 \bar{i}_{L1} &= \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{v_S T_{SW}}{2L} \right) \left(\frac{2Ed T_{SW}}{2Ed - v_S} \right)}{T_{SW}} \\
 \bar{i}_{L1} &= \frac{1}{8} \frac{T_{SW} v_S Ed}{L(2Ed - v_S)} \quad (2.31) \\
 \bar{i}_{L2} &= \frac{1}{T_{SW}} \frac{1}{2} \text{Im } 2(t_1 + t_4 - t_2) \\
 \bar{i}_{L2} &= \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{v_S T_{SW}}{2L} \right) \left(\frac{2Ed T_{SW}}{2Ed - v_S} \right)}{T_{SW}}
 \end{aligned}$$

$$\bar{i}_{L2} = \frac{1}{8} \frac{T_{sw} v_s Ed}{L(2Ed - v_s)} \quad (2.32)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\bar{i}_s(t) = \frac{T_{sw}}{16L} v_s \left[\frac{2Ed}{2Ed - v_s} \right] + C \frac{dV_s(t)}{2dt} \quad (2.33)$$

เขียนค่าเฉลี่ยของกระแสในรูปอนุกรมเรขาคณิต

$$\bar{i}_s(t) = \frac{T_{sw}}{16L} v_s \left[1 + \frac{v_s}{2Ed} + \left(\frac{v_s}{2Ed} \right)^2 + \dots \right] + C \frac{dV_s(t)}{2dt} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) ได้ว่ากระแสเฉลี่ยในหนึ่งคาบการสวิตช์มีค่าขึ้นกับ $v_s(t)$ ถ้าต้องการทำให้ความเพี้ยนของกระแสด้านเข้ามีค่าต่ำ เพื่อให้กระแสฮาร์มอนิกมีค่าน้อยจึงควรออกแบบให้ v_s/Ed มีค่าน้อย

การคำนวณกระแสเฉลี่ยด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ คำนวณจากกระแสเฉลี่ย $\bar{i}_s(t)$ ของสมการที่ (2.33) ในครึ่งคาบของความถี่สายกำลัง สมการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \langle I_d \rangle &= \frac{2}{T} \frac{T_{sw}}{8L} \int_0^{T/2} \frac{V_s^2 \sin^2 \omega t}{2Ed - V_s \sin \omega t} dt = \frac{T_{sw} V_s}{4TL} \int_0^{T/2} \frac{\sin^2 \omega t}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} dt \\ \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{-8Ed^2}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] + \frac{V_s}{\omega} \cos \omega t - 2Edt \right]_0^{T/2} \\ \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed} \right) + \frac{8Ed}{V_s \sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \quad (2.35) \end{aligned}$$

จากสมการ(2.35) กำหนดให้

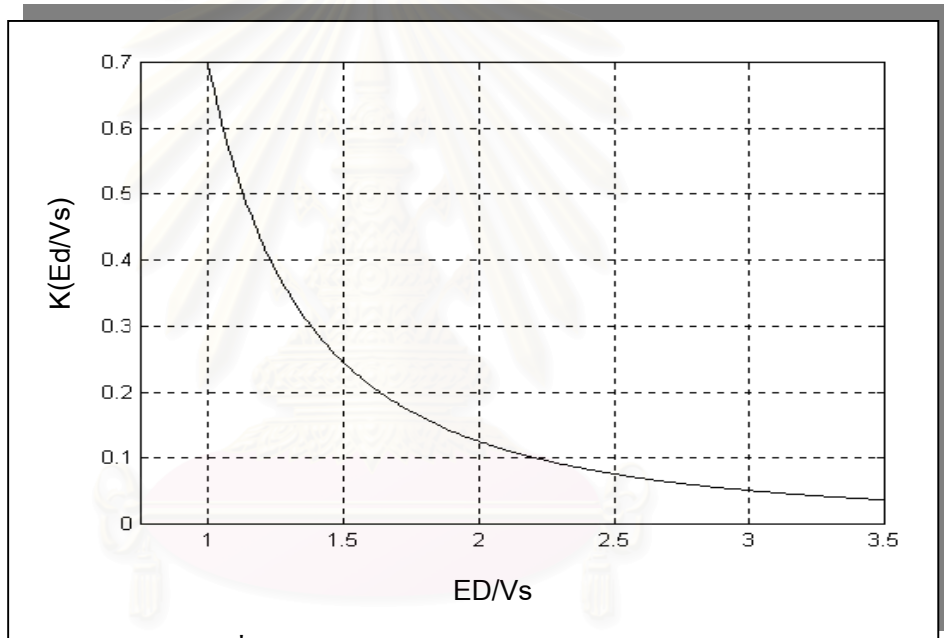
$$K \left(\frac{Ed}{V_s} \right) = -\left(\pi + \frac{V_s}{Ed} \right) + \frac{8Ed}{V_s \sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \quad (2.36)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4\pi L} K \left(\frac{Ed}{V_s} \right) \\ L &= \frac{T_{sw} Ed}{4\pi \langle I_d \rangle} K \left(\frac{Ed}{V_s} \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

สมการที่ (2.37) ใช้เป็นสมการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ เมื่อได้กำหนดค่ากระแสเฉลี่ยด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ (I_d) แรงดันไฟตรงด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ (Ed) ความถี่ในการสวิตช์ (f_s) และแรงดันไฟสลับที่แหล่งจ่าย (V_s)

สมการที่ (2.36) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดคุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์ ขึ้นอยู่กับ Ed/V_s มีลักษณะแสดงดังกราฟในรูปที่ 2.32

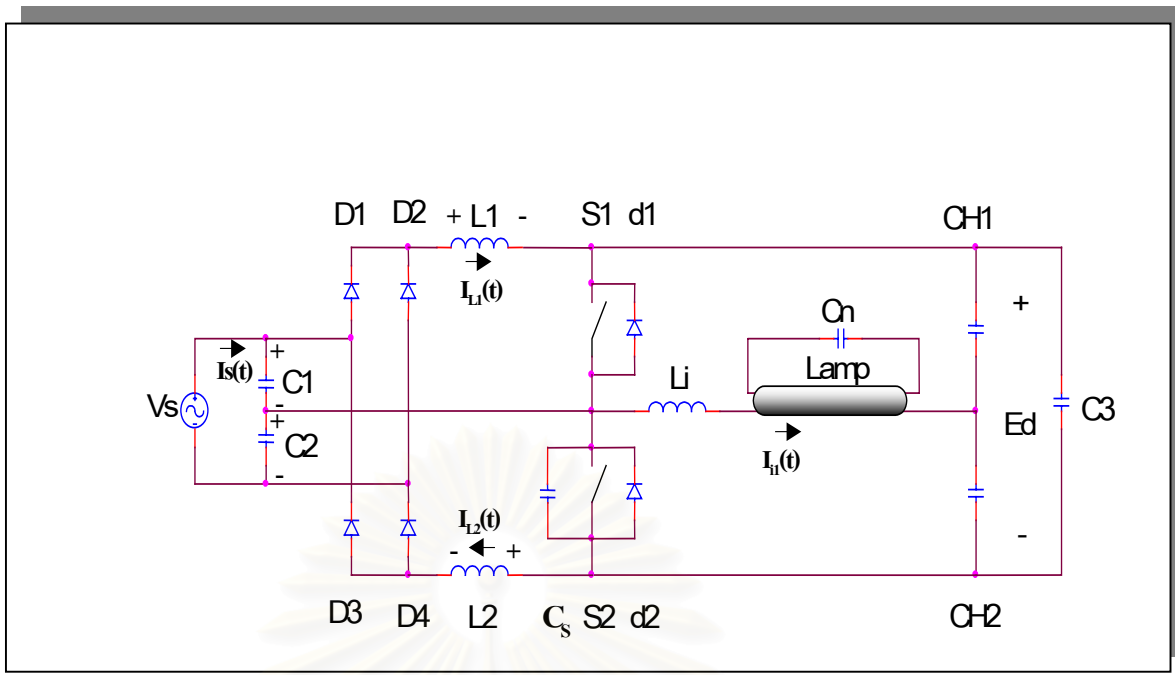


รูปที่ 2.32 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์

2.12 เสถียรภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

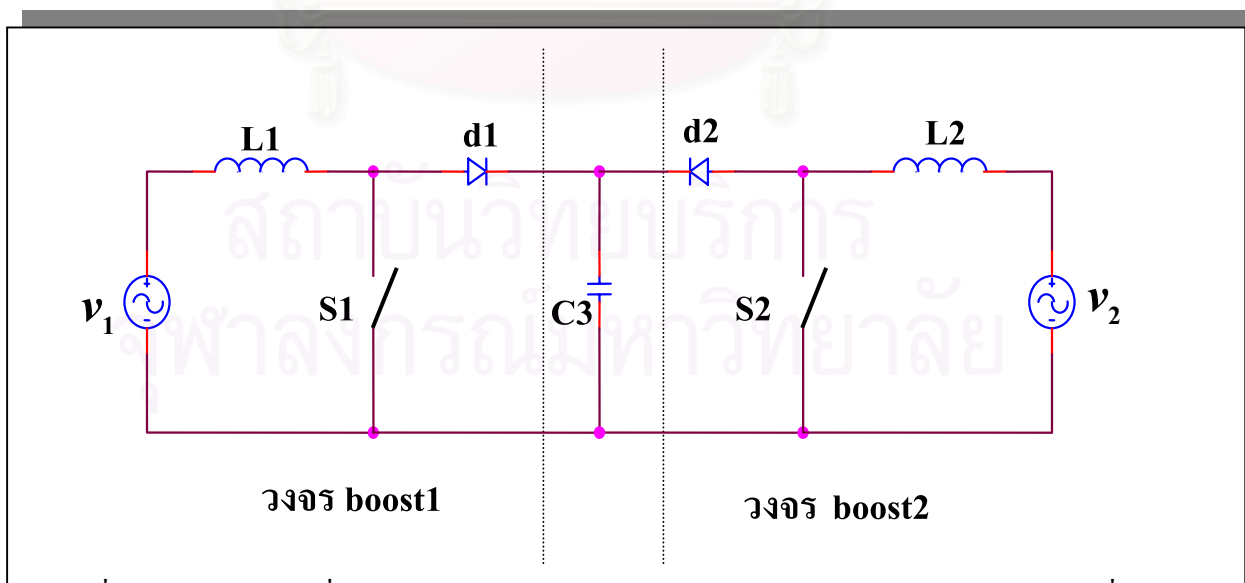
ในการพิจารณาเสถียรภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ เป็นการอธิบายถึงความมีเสถียรภาพของระบบที่เกิดการรบกวนของสัญญาณขนาดเล็กของแรงดันค่าระลอก (ripple voltage) ของแรงดันด้านเข้าขนาดความถี่ 100 Hz และ ฮาร์โมนิกต่างๆของแรงดันค่าระลอกนี้

พิจารณาการทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรแปลงผันทระดับแบบคู่

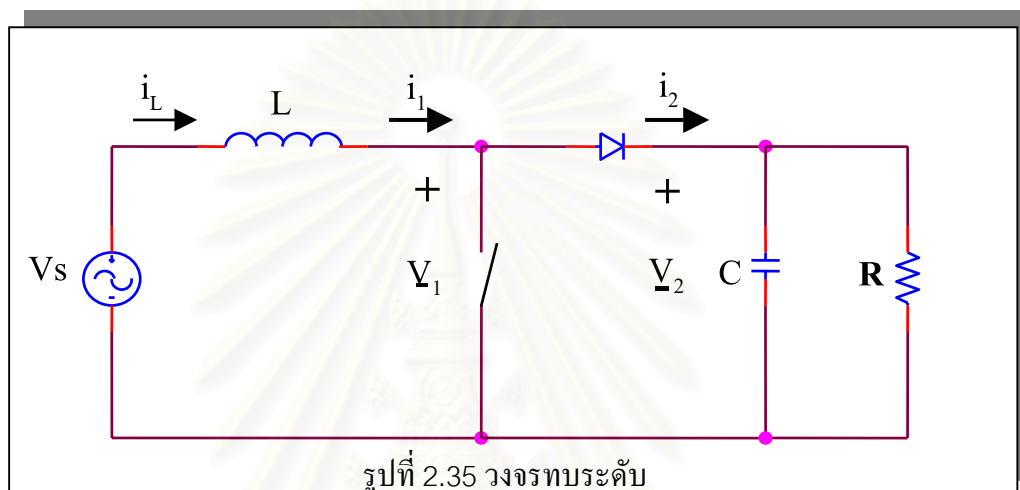
การทำงานของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่จะมีลักษณะเป็นการทำงานของวงจรทระดับ (boost) 2 วงจรสลับกันจ่ายพลังงานให้กับโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 2.34



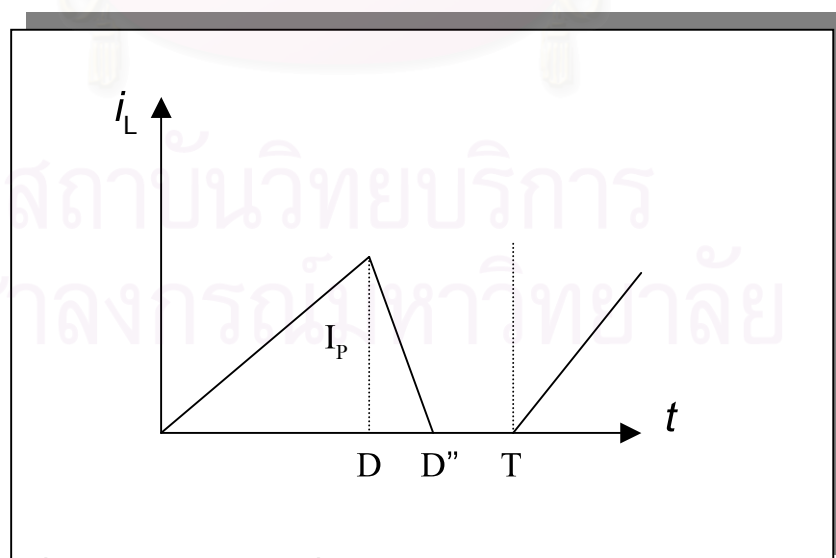
รูปที่ 2.34 วงจรสมมูลที่ได้จากการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรแปลงผันทระดับแบบคู่

เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลที่ได้ จึงเป็นเหมือนวงจรทระดับ 2 วงจรต่อขนานกันอยู่ และเป็นวงจรทระดับที่ทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นในการแบบหาจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Model) ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จึงแทนได้ด้วยแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับ 2 วงจรขนานกัน

ในการหาแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับ สามารถที่จะหาได้โดยการพิจารณาจากวงจรทระดับในรูปที่ 2.35 ซึ่งทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง



การหาวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กต่อกัน สำหรับภาคกระแสไม่ต่อเนื่องนั้นเทคนิคที่นิยมใช้คือคำนวณกระแสเฉลี่ยด้านเข้า \bar{i}_1 และกระแสเฉลี่ยด้านออก \bar{i}_2 ของสวิตช์ PWM ในฟังก์ชันของ d ตลอดจนแรงดันเฉลี่ยด้านเข้า \bar{V}_1 และด้านออก \bar{V}_2 ของสวิตช์ PWM จากนั้นจึงคำนวณสัญญาณขนาดเล็ก \hat{i}_1 และ \hat{i}_2



รูปที่ 2.36 กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง

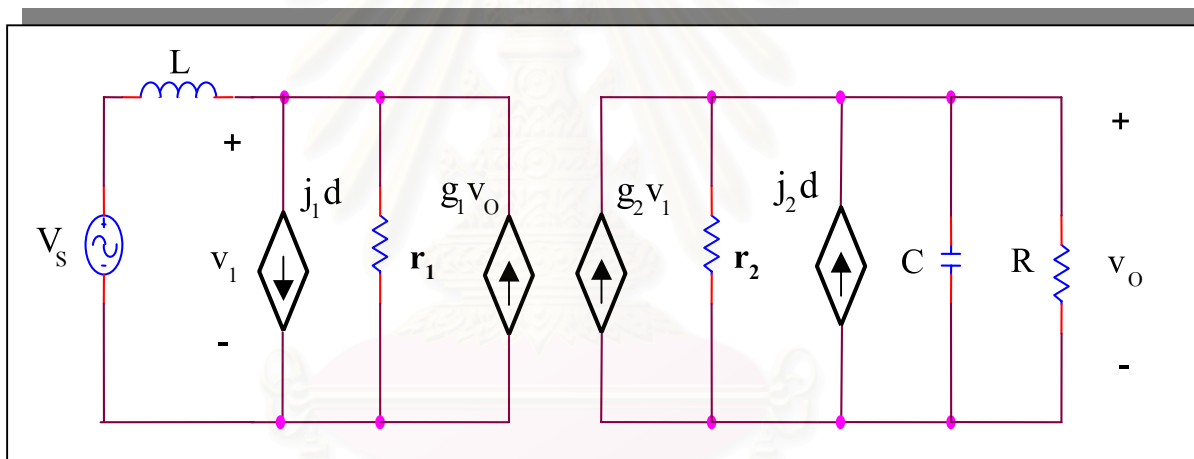
จากรูปที่ 2.36 สามารถเขียนสมการพื้นฐานของวงจรทระดับได้ดังนี้

ค่ายอดของกระแสตัวเหนี่ยวนำ $I_p = \frac{\bar{v}_1 d T}{L} = \frac{(\bar{v}_2 - \bar{v}_1) d'' T}{L}$

ค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้า $\bar{i}_1 = \frac{(d + d'') I_p}{2} = \frac{(d^2 T / 2L) \bar{v}_2 \bar{v}_1}{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}$

ค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้าออก $\bar{i}_2 = \frac{d'' I_p}{2} = \frac{(d^2 T / 2L) \bar{v}_1^2}{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}$

จากสมการพื้นฐานที่ได้ นำไปทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) จะได้วงจรสมมูล และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการคำนวณ แทนค่าลงในแบบจำลองได้ดังรูปที่ 2.37 และ ตารางที่ 2.2



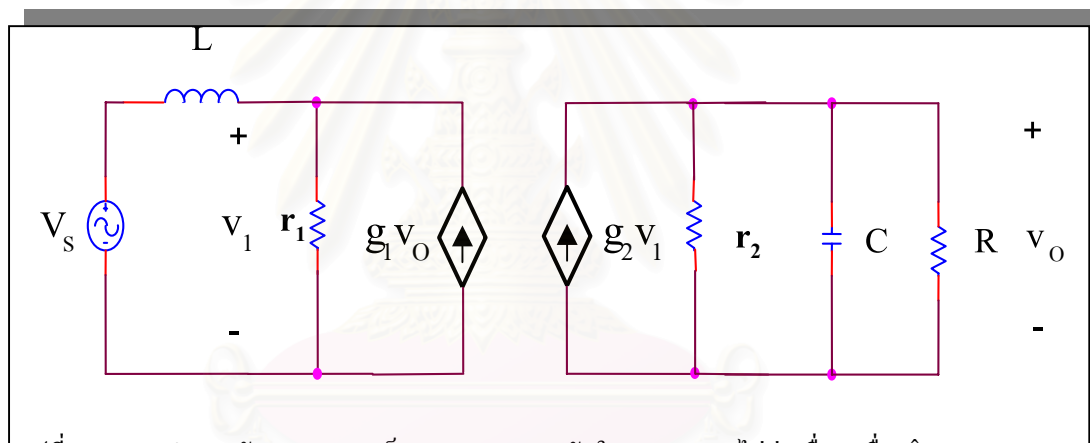
รูปที่ 2.37 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	ค่าตัวแปรของวงจรระดับ
M	$\frac{D + D''}{D''}$
r ₁	$\frac{(M - 1)R}{M^3}$
g ₁	$\frac{M}{(M - 1)R}$
j ₁	$\left(\frac{2V_o}{R}\right) \sqrt{\frac{M}{2\tau_L (M - 1)}}$

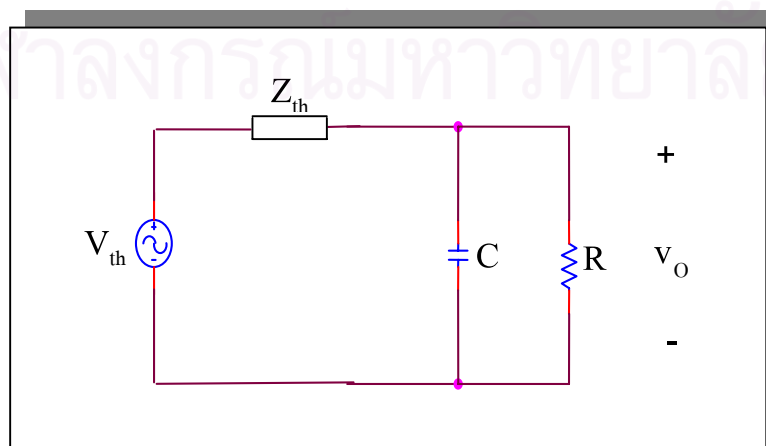
r_2	$\frac{(M-1)R}{M}$
g_2	$\frac{M(2M-1)}{(M-1)R}$
j_2	$\frac{2V_o/R}{\sqrt{2\tau_L M(M-1)}}$

เนื่องจากการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่มีการทำงาน ที่วัฏจักรงานคงที่ 0.5 ดังนั้นในแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง $\hat{d} = 0$ ทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กในดังในรูปที่ 3.38



รูปที่ 2.38 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $\hat{d} = 0$

จากแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กในรูปที่ 2.38 หางจรสมมูล เพื่อทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายโดยใช้ทฤษฎีเทวินิน (Thevinin theory) จะได้วงจรดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 วงจรสมมูลอย่างง่ายที่ได้จากการใช้ทฤษฎีเทวินิน

โดยที่

$$V_{th} = \frac{r_1 r_2 g_2}{r_1 + j(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L} \hat{V}_s \quad (2.38)$$

$$Z_{th} = \frac{r_1 r_2 + j r_2 X_L}{r_1 + j(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L} \quad (2.39)$$

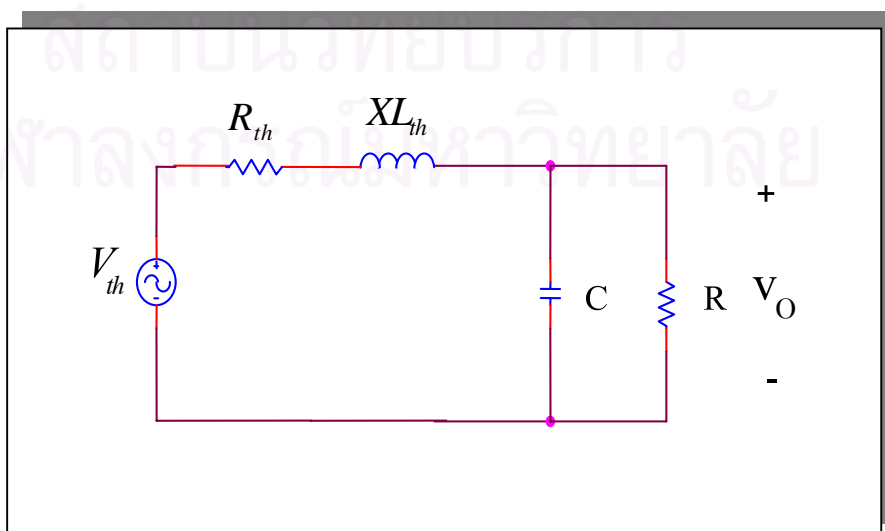
มอง Z_{th} เป็น 2 ส่วน คือส่วนจริง (Real) และส่วนจินตภาพ (Imaginary) จะได้ว่า

$$Z_{th} = \frac{r_2 [r_1^2 + (1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L^2]}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2} + j \frac{r_1^2 r_2^2 g_1 g_2 X_L}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2}$$

$$R_{th} = \frac{r_2 [r_1^2 + (1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L^2]}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2} \quad (2.40)$$

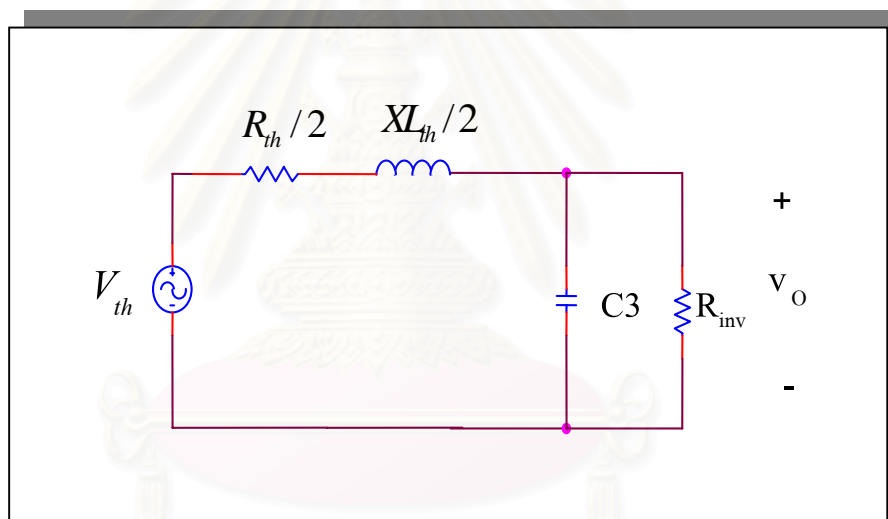
$$XL_{th} = \frac{r_1^2 r_2^2 g_1 g_2 X_L}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2} \quad (2.41)$$

จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 วงจรสมมูลอย่างง่าย

คอนเวอร์เตอร์ของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เกิดจากการต่อวงจรทบทระดับ 2 วงจรขนานกัน ดังนั้นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่ ได้จากแบบจำลองอย่างง่ายที่หาได้ 2 วงจรต่อขนานกัน เพื่อจ่ายพลังงานให้แก่โหลด ซึ่งก็คือวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจะสามารถแทนได้ด้วยค่าความต้านทานพลวัต (Dynamic Resistance) ค่าหนึ่งคือ R_{inv} ดังนั้นจะได้รูปของแบบจำลองของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่ ที่เป็นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่

จากรูปที่ 2.41 สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาถึงความมีเสถียรภาพของวงจรได้ ซึ่งจากรูป วงจรจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาในรูปของฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ของแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า จะได้ว่า เป็นวงจรอันดับสอง (Second Order) แสดงได้ดังสมการที่ 2.42

$$\frac{\hat{V}_o}{V_{th}} = \frac{\frac{2}{L_{th} C_3}}{S^2 + \left(\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{R_{inv} L_{th} C_3} \right) S + \left(\frac{2R_{inv} + R_{th}}{R_{inv} L_{th} C_3} \right)} \quad (2.42)$$

เทียบกับสมการโอนย้ายมาตรฐานของวงจรอันดับสองในส่วนของโพล (Pole)

$$S^2 + 2\xi\omega_0 S + \omega_0^2$$

โดยที่

$$\omega_0 = \text{ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamped Natural Frequency)}$$

$$\xi = \text{สัมประสิทธิ์ Damping}$$

$$\omega_d = \text{Damped Natural Frequency} \left(\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \right)$$

และจะพบว่าถ้า

$2\xi\omega_0 < 0$ จะเกิดการแกว่ง (Oscillation) โดยมีการขยายขนาดสัญญาณเพิ่มขึ้นกับเวลา แสดงถึงว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ

$2\xi\omega_0 = 0$ จะเกิดการแกว่ง (Oscillation) โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ แสดงถึงว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ

$2\xi\omega_0 > 0$ จะเกิดการแกว่ง (Oscillation) โดยมีการลดลงของสัญญาณเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวในที่สุด แสดงถึงว่าระบบมีเสถียรภาพ

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อเกิดการแกว่งของสัญญาณ แล้วมีการลดลงของสัญญาณเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว (Steady State) ในที่สุด

เมื่อพิจารณาจากฟังก์ชันโอนย้ายที่ได้จากวงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ที่อยู่ในรูปของสมการอันดับสองจะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$S^2 + \left(\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{R_{inv} L_{th} C_3} \right) S + \left(\frac{2R_{inv} + R_{th}}{R_{inv} L_{th} C_3} \right)$$

$$S^2 + 2 \left(\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{2\sqrt{2R_{inv} + R_{th}} \sqrt{R_{inv} L_{th} C_3}} \right) \left(\sqrt{\frac{2R_{inv} + R_{th}}{R_{inv} L_{th} C_3}} \right) S + \left(\sqrt{\frac{2R_{inv} + R_{th}}{R_{inv} L_{th} C_3}} \right)^2$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2R_{inv} + R_{th}}{R_{inv} L_{th} C_3}}$$

$$\xi = \frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{2\sqrt{2R_{inv} + R_{th}} \sqrt{R_{inv} L_{th} C_3}}$$

$$\omega d = \sqrt{\frac{2R_{inv} + R_{th}}{R_{inv} L_{th} C_3}} \sqrt{1 - \left(\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{2\sqrt{2R_{inv} + R_{th}} \sqrt{R_{inv} L_{th} C_3}} \right)^2}$$

โดยที่ถ้า

$\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{R_{inv} L_{th} C_3} < 0$ จะเกิดการแกว่ง (Oscillation) โดยมีการขยายขนาดสัญญาณเพิ่มขึ้นกับเวลาแสดงถึงว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ

$\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{R_{inv} L_{th} C_3} = 0$ จะเกิดการแกว่ง (Oscillation) โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแสดงถึงว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ

$\frac{L_{th} + R_{th} R_{inv} C_3}{R_{inv} L_{th} C_3} > 0$ จะเกิดการแกว่ง (Oscillation) โดยมีการลดลงของสัญญาณเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุดแสดงถึงว่าระบบมีเสถียรภาพ

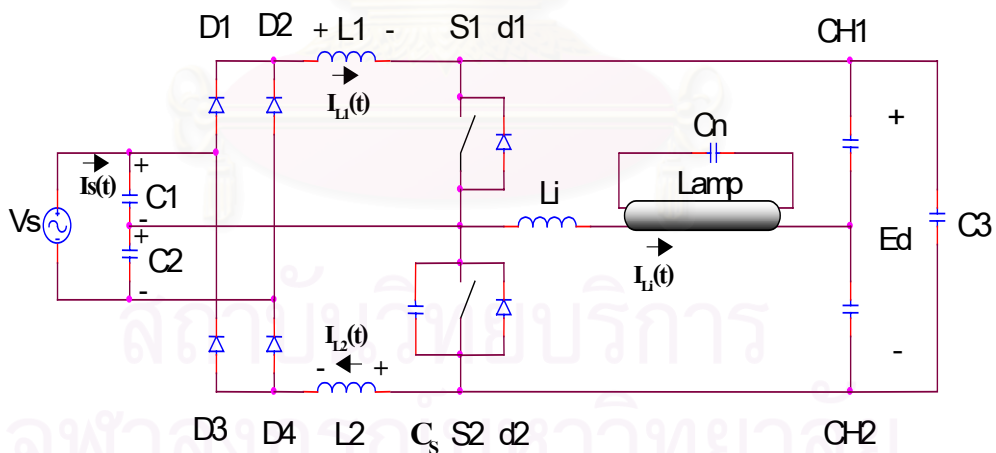
จากแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ เมื่อแทนค่าต่างๆของวงจรลงไป และใช้หลักเกณฑ์การพิจารณาในเรื่องเสถียรภาพของวงจรถัดกล่าวข้างต้น ก็จะสามารถบอกถึงความมีเสถียรภาพของวงจรได้ ว่าวงจรมีเสถียรภาพหรือไม่ ผลการทดสอบอยู่ในบทที่

บทที่ 3

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

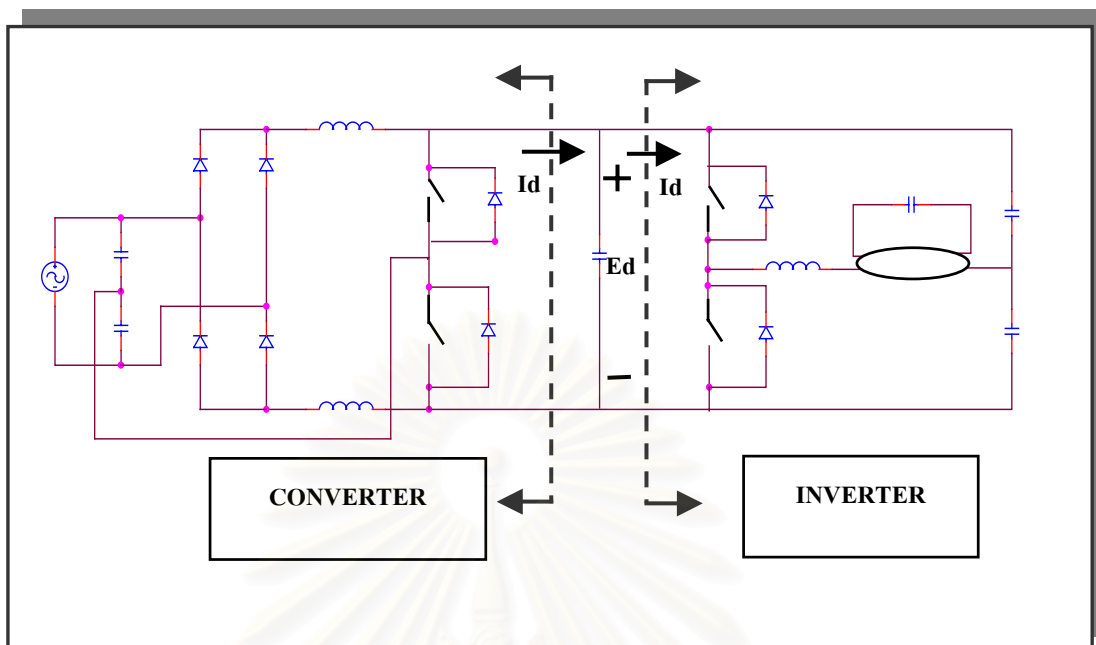
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ชนิดของวงจรเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง (PFC) และการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ รวมทั้งสมการของวงจรสำหรับวิเคราะห์ ออกแบบและการจำลองสำหรับศึกษาเสถียรภาพของวงจร บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ทำให้เข้าใจถึงทฤษฎีการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่เป็นอย่างดีแล้ว ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงแนวทางในการออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ เพื่อให้ได้ค่ากำลังออกตามค่าพิกัดที่ต้องการ โดยมีการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า ความถี่ในการสวิตช์ และกำลังออกที่โหลด

บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จะประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นเหมือนแหล่งจ่าย และวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจร โหลดต่อร่วมกัน โดยใช้สวิตช์ชุดเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

จากรูปที่ 3.1 สามารถที่จะแยกพิจารณาวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ กับส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 พิจารณาแยกวงจรออกเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์

ดังนั้นในการออกแบบจะแยกพิจารณาการออกแบบออกเป็น 2 ส่วน คือออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นโหลด และวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ที่เป็นแหล่งจ่าย แยกกัน จากนั้นจึงนำทั้ง 2 ส่วนมารวมเข้าด้วยกัน โดยจุดทำงานของทั้ง 2 วงจรจะเป็นจุดทำงานที่มีความสอดคล้องกันของกระแสและแรงดันของทั้งสองวงจร และจะเป็นจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ โดยจะหาคุณสมบัติกระแสและแรงดันด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ และลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์ในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟตรง (E_d) และกระแสไฟตรง (I_d) จากการพิจารณาวจรในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่ากระแสออกของคอนเวอร์เตอร์จะเท่ากับกระแสด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ และแรงดันออกของคอนเวอร์เตอร์จะต้องเท่ากับแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นเมื่อเขียนเส้นกราฟที่แสดงคุณสมบัติการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่จะเรียกว่า คอนเวอร์เตอร์ไลน์ (Converter Line) และเส้นกราฟที่แสดงคุณสมบัติการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะเรียกว่า อินเวอร์เตอร์ไลน์ (Inverter Line) ไว้ในกราฟเดียวกัน จุดตัดกันระหว่างเส้นกราฟคอนเวอร์เตอร์ไลน์ และเส้นกราฟอินเวอร์เตอร์ไลน์จะเป็นจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

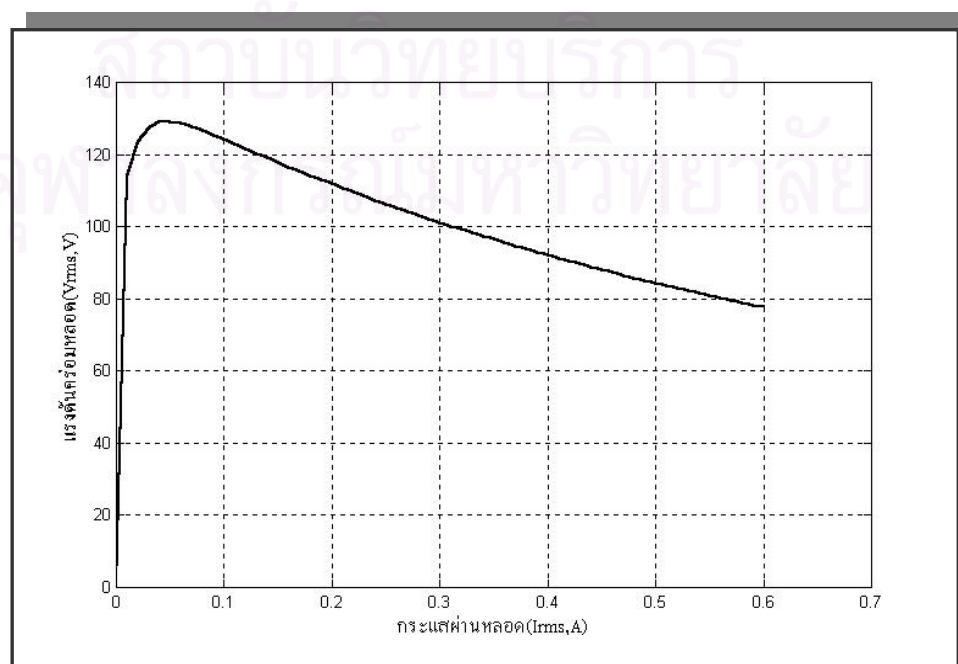
ก่อนที่จะทำการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ได้นั้น จะต้องรู้คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เสียก่อน ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบหาค่า L_i และ C_n ที่เป็นโหลดในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์เสียก่อน เพื่อจะได้สามารถหาคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ได้

3.1 ขั้นตอนการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วงจรระดับแบบคู่

- 1) หาคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ได้เส้น Lamp Line ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์
- 2) ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งได้จากการกำหนดจุดทำงานบนเส้น Lamp Line ให้มีกำลังออกที่พิกัด 32 W ทำให้ได้ค่า R_{lamp} ที่พิกัด นำไปคำนวณหา L และ C โดยใช้ฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันที่หลอด (V_{lamp}) ต่อแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูล (Fundamental Approximation) หลังจากนั้นจึงนำไปคำนวณหาเส้นอินเวอร์เตอร์ไลน์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะใช้เป็นโหลดของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรระดับแบบคู่
- 3) ออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรระดับแบบคู่ โดยกำหนดจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่อยู่บนเส้นอินเวอร์เตอร์ไลน์ เพื่อใช้ออกแบบค่า L ของคอนเวอร์เตอร์โดยอาศัยจากสมการที่ 2.37 ในบทที่ 2

3.2 คุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์

หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานกับความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น ดังที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 2 แต่ขนาดของความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเป็น ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอด โดยมีลักษณะของความต้านทานพลวัตเป็นลวดรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ในการหาคุณสมบัติกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือ Lamp Line นั้น สามารถทำได้ โดยการนำหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปต่อเป็น โหลดของบัลลาสต์ แล้วทำการแปรค่ากระแสและแรงดันหลอดได้ 2 วิธี คือ

- 1) วิธีการแปรค่าแรงดันไฟตรง
- 2) วิธีการแปรค่าความถี่การสวิตช์

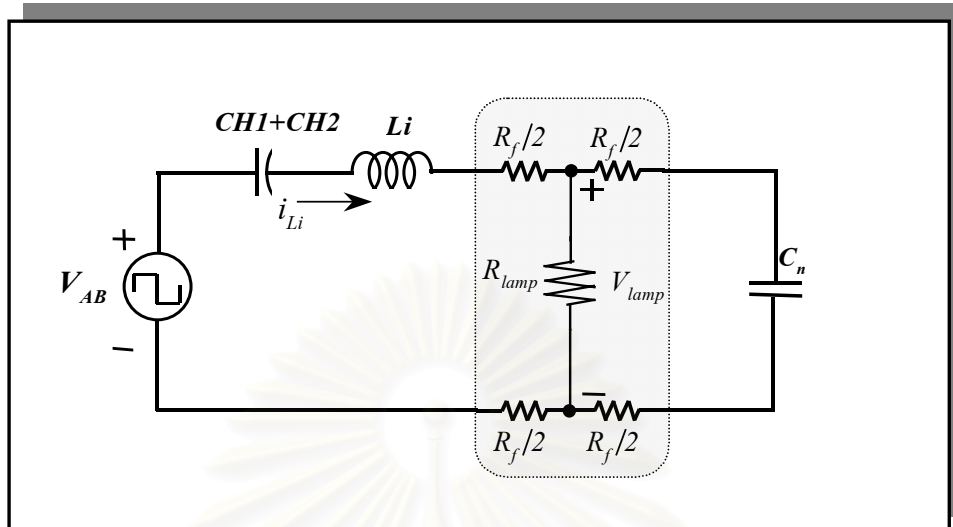
หลังจากนั้นทำการวัดค่ากระแสที่ผ่านหลอดและแรงดันที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ นำผลที่ได้ มาเขียนเป็นกราฟก็จะ ได้ Lamp Line ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I_{lamp}) และแรงดัน (V_{lamp}) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์แต่ละหลอด

หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36W เมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงกำลังที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ให้แสงสว่างฟลักซ์มีค่าประมาณ 32W โดยจะมี $V_{lamp}=100V$ และ $I_{lamp}=320mA$ โดยประมาณ การกำหนดความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องคำนึงถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย กล่าวคือหากความถี่การทำงานที่ต่ำกว่า 20 kHz อาจก่อให้เกิดเสียงรบกวนแก่ผู้ใช้ได้ ขณะเดียวกันความถี่สูงกว่า 50 kHz อาจเพิ่มปัญหาในด้านการรบกวนความถี่วิทยุและกำลังสูญเสียก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรเลือกความถี่อยู่ในช่วง 20 kHz – 50 kHz ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกความถี่การทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้งานระดับแบบคู่ 33 kHz

3.3 การหาคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์

หลังจากที่ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์แล้ว ก็จะนำคุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์มาใช้ในการออกแบบโหลดของบัลลาสต์ เพื่อหาค่า Li และ Cn

ในการออกแบบหาความสัมพันธ์ระหว่าง Li และ Cn จะพิจารณาในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นสามารถที่จะเขียนวงจรมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์ เรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนานได้ ดังรูปที่ 3.4 โดยที่ V_{AB} คือแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ $CH1$ และ $CH2$ คือตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ Li คือตัวเหนี่ยวนำควบคุมกระแสผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ R_f คือความต้านทานไส้หลอด R_{lamp} คือความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์ Cn คือตัวเก็บประจุที่ช่วยในการจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อร่วมกับโหลดบัลลาสต์

V_{AB} ซึ่งเป็นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่มีค่า ณ เวลาต่าง ๆ กันดังในสมการที่ 3.1 สามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$V_{AB} = \begin{cases} \frac{Ed}{2}, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_s} \\ -\frac{Ed}{2}, & \frac{\pi}{\omega_s} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega_s} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_{is}(t) = \frac{Ed}{2} \left\{ \frac{4}{\pi} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{\sin n\omega_s t}{n} \right\} \quad (3.2)$$

$$= \sum_{n=odd}^{\infty} V_{isn} \sin n\omega_s t \quad (3.3)$$

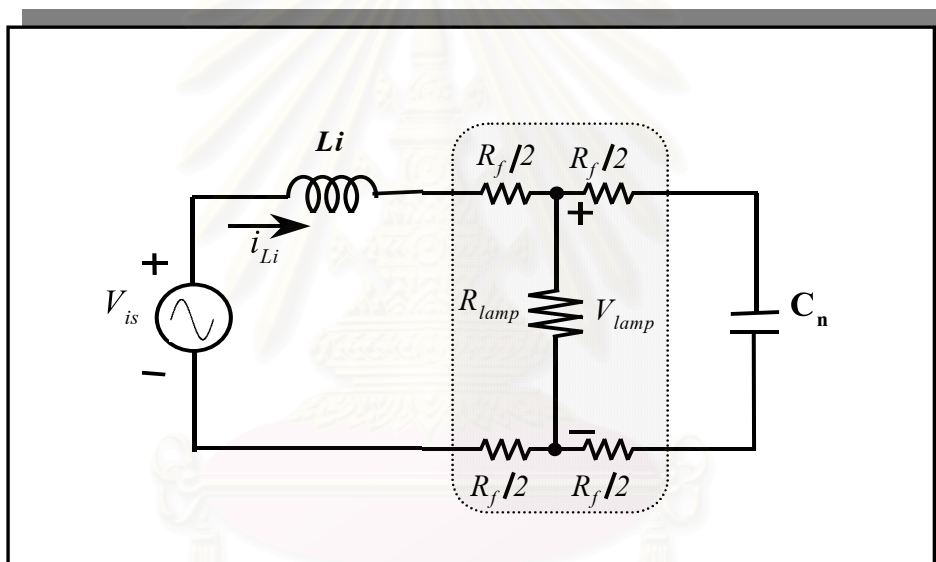
เมื่อ

ω_s คือความถี่การสวิตช์

Ed คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าที่ได้จากวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับ

แบบคู่

เนื่องจากวงจรโพลดีมีการต่อในลักษณะเป็นวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสอง (Second Order Low Pass Filter) และมีความถี่การทำงานของวงจรอยู่รอบ ๆ ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง (Undamp Natural Frequency, f_o) ทำให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหลอดและกระแสผ่านหลอดมีรูปคลื่นใกล้เคียงกับความถี่หลักมูล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรจึงอาจจะวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณ โดยใช้แรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์แทนรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ได้วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อร่วมกับหลอด ฟลูออเรสเซนต์ดังรูปที่ 3.5 โดยที่ V_{is} คือแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาดเท่ากับองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เริ่มต้นจากการพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติของแหล่งจ่ายได้แก่ แรงดันไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์ (DC Voltage, E_d) ซึ่งได้จากแรงดันไฟตรงด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช่วงจรทระดับแบบคู่ คุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้แก่ ความต้านทานไส้หลอด (R) และกำลังที่หลอด

ฟลูออเรสเซนต์ (Power Output) ชีตจำกัดของการออกแบบประกอบด้วย แรงดันจุดหลอด (Ignition voltage, V_{ig}) และมุมเฟสของกระแสออกที่ต้องล่าหลังแรงดัน V_{is} ของอินเวอร์เตอร์ทั้งช่วงก่อนและขณะจุดหลอดให้ติดสว่างและขณะทำงานปกติ เพื่อให้สวิตช์เรโซแนนซ์เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching, ZVS) และประสิทธิภาพการทำงานต้องมีค่าที่เหมาะสม

การออกแบบตามเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้นจะใช้สมการสำหรับการออกแบบที่คำนวณจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.5

สมการที่ใช้ในการออกแบบตามข้อกำหนด ชีดจำกัด และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแทนค่าพิกัดต่างๆลงในสมการที่ 3.4 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L_i กับ C_n ที่ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีกำลังออกเท่ากับพิกัดสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าที่กำหนด (E_d) รูปที่ 3.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_i กับ C_n ที่คำนวณจากสมการที่ 3.5 สำหรับ E_d ที่กำหนด 3 ค่า

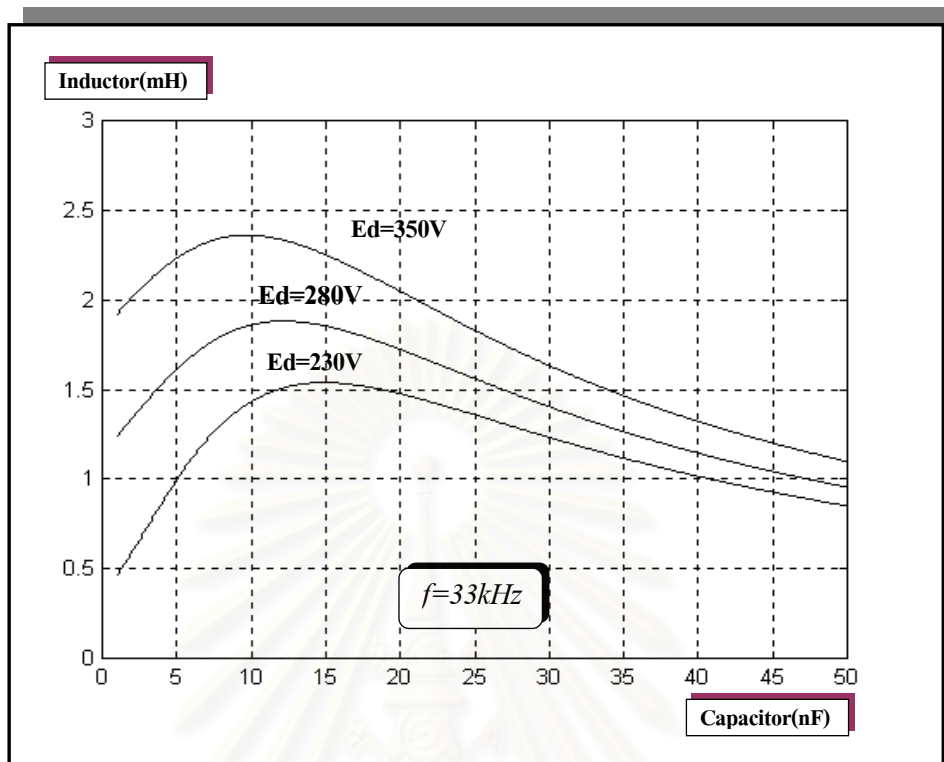
$$\left[\frac{V_{lamp}}{V_{is}} \right]^2 = \frac{\left[\frac{R_{lamp}}{R_{lamp} + R_f} \right]^2 + \left[\frac{\omega R_f R_{lamp} C_n}{R_{lamp} + R_f} \right]^2}{\left[1 - \omega^2 L_i C_n \right]^2 + \left[\frac{\omega L}{R_{lamp} + R_f} + \frac{\omega (2R_{lamp} R_f) R_f C_n}{R_{lamp} + R_f} \right]^2} \quad (3.4)$$

$$L_i = \frac{-b(C_n) \pm \sqrt{b^2(C_n) - 4a(C_n)k(C_n)}}{2a(C_n)} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} a(C_n) &= \omega^2 + (\omega^2 C_n (R_{lamp} + R_f))^2 \\ b(C_n) &= -2\omega^2 R_{lamp}^2 C_n \\ k(C_n) &= (R_{lamp} + R_f)^2 + \omega^2 ((2R_{lamp} + R_f) R_f C_n)^2 \\ &\quad - \left(R_{lamp}^2 + (\omega R_{lamp} R_f C_n)^2 \right) \left| \frac{V_{is}}{V_{lamp}} \right|^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของ L_i และ C_n ที่ทำให้หลอดมีกำลังด้านออกเท่ากับพิกัด

สำหรับการออกแบบตามเงื่อนไขของขีดจำกัดประกอบด้วย แรงดันจุดหลอดที่กำหนด (Constant open circuit voltage, V_{ig}) มุมเฟสของกระแสออกต้องต่ำกว่าแรงดัน V_{is} ของอินเวอร์เตอร์ในช่วงก่อนและขณะจุดหลอดให้ติดสว่าง และขณะทำงานปกติเพื่อให้สวิตช์โซลิดสเตตเริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (zero voltage switching, ZVS) จากสมการที่ 3.7 สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n สำหรับแรงดันจุดหลอดที่กำหนด ได้สมการเช่นเดียวกับสมการที่ 3.5 โดยมีสัมประสิทธิ์ a , b , และ k ดังสมการที่ 3.8

$$\left[\frac{V_{ig}}{V_{is}} \right]^2 = \frac{1 + (\omega R_f C_n)^2}{(1 - \omega^2 L_i C_n)^2 + (2\omega R_f C_n)^2} \quad (3.7)$$

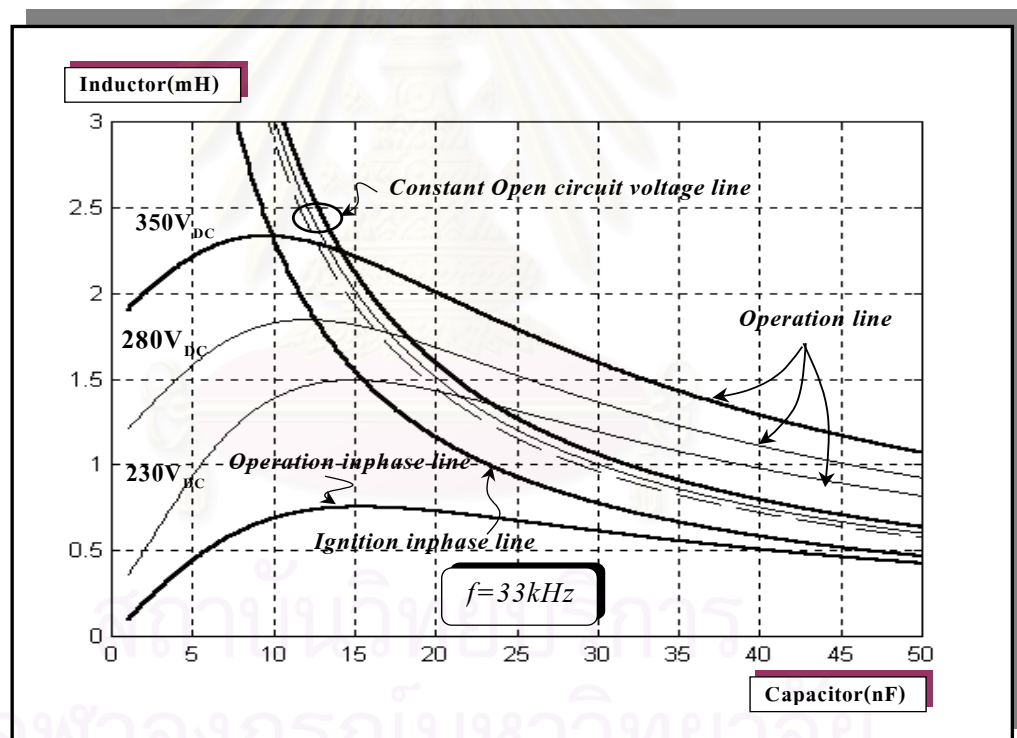
$$\left. \begin{aligned} a(C_n) &= \omega^4 C_n^2 \\ b(C_n) &= -(2C_n \omega^2) \\ k(C_n) &= 1 + (2\omega R_f C_n)^2 - \left(1 + (\omega R_f C_n)^2\right) \left| \frac{V_{is}}{V_{ig}} \right|^2 \end{aligned} \right\} (3.8)$$

สำหรับเงื่อนไขขีดจำกัดของมุมเฟสขณะจุดหลอดและขณะทำงานปกติจะคำนวณได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

$$\omega L_i \geq \frac{I}{\omega C_n} \quad (3.9)$$

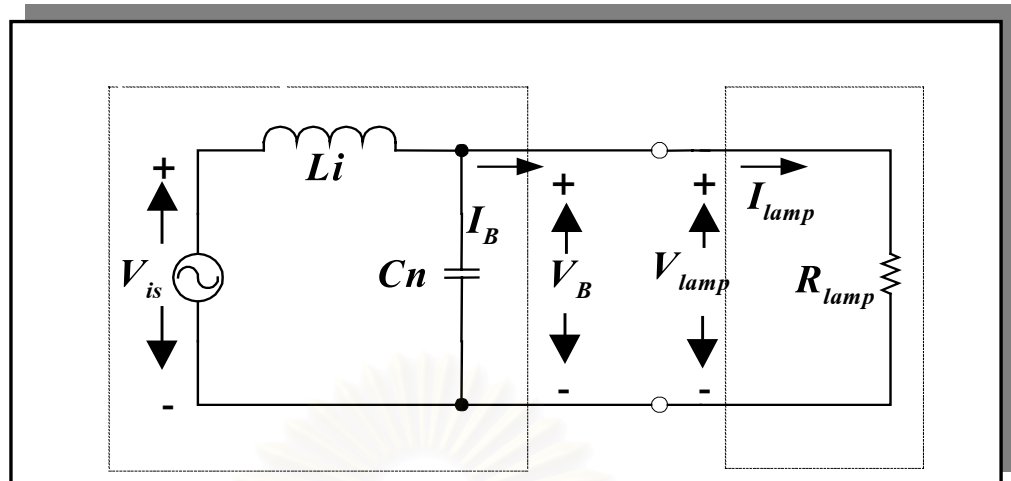
$$\omega L_i \geq \frac{\omega C_n R_{lamp}^2}{1 + \omega^2 C_n^2 R_{lamp}^2} \quad (3.10)$$

รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n ตามเงื่อนไขในสมการที่ 3.5, 3.7, 3.9 และสมการที่ 3.10 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดแรงดันจุดหลอดที่กำหนด และมุมเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ที่ขณะจุดหลอดและขณะทำงานปกติสำหรับ E_d ที่กำหนด 3 ค่า จะเห็นได้ว่า ช่วงของค่า L_i และ C_n จะถูกจำกัดให้แคบลงอยู่ในช่วงระหว่างเงื่อนไขของมุมเฟสของกระแสออกกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขณะจุดหลอด และแรงดันจุดหลอดที่กำหนดสูงสุด



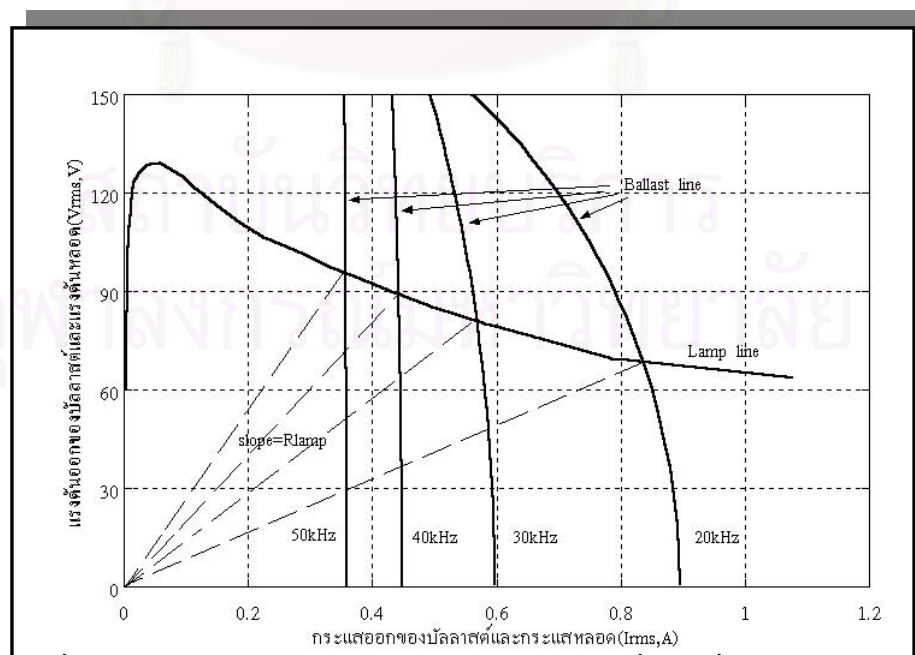
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n ที่ทำให้ได้ขีดจำกัดตามที่กำหนด

จากกราฟในรูปที่ 3.7 ทำให้สามารถที่จะออกแบบหาค่า L_i และ C_n ที่เหมาะสมได้ เมื่อได้ค่า L_i และ C_n ตามที่ต้องการออกแบบแล้ว นำไปต่อเข้ากับบัลลาสต์เป็นวงจรโวลตาจของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ได้กำลังออกที่หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่พิกัดตามต้องการ ซึ่งจะได้วงจรที่จะใช้พิจารณาในการหาคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ เพื่อหาอินเวอร์เตอร์ไลน์ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันออก (V_B) กับ กระแสออก (I_B) ของบัลลาสต์สำหรับ โหลดเป็นตัวต้านทานที่ค่าต่างๆกันเรียกว่า *Ballast line* และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของหลอดเรียกว่า *Lamp line* จากวงจรในรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อเขียนสมการเคอร์ชอฟฟ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วออกของบัลลาสต์จะได้ $V_B = V_{lamp}$ และ $I_B = I_{lamp}$ ดังนั้นจุดทำงานของวงจรก็คือจุดตัดกันของ Ballast line กับ Lamp line ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงการตัดกันของ Ballast Line และ Lamp Line ที่ความถี่การทำงาน 4 ค่า ได้แก่ 20 kHz 30 kHz 40 kHz และ 50 kHz ตามลำดับ จุดตัดของ Lamp line กับ Ballast line ทั้งสี่จะให้จุดทำงานที่มีกำลังออกต่างกันคือ 52 W 44 W 36 W และ 32 W ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 การตัดกันของ Ballast Line และ Lamp Line ที่ความถี่การทำงาน 4 ค่า

จากรูปที่ 3.8 สามารถที่จะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง V_B กับ V_{is} และ I_B กับ V_{is} ได้ดังสมการที่ 3.11 และ 3.12 โดยละเลยความต้านทานไส้หลอด R_f

$$V_B = \frac{V_{is}}{\sqrt{(1 - L_i C_n (2\pi f_s)^2)^2 + \left(\frac{2\pi f_s L_i}{R_{lamp}}\right)^2}} \quad (3.11)$$

$$I_B = \frac{V_{is}}{R_{lamp} \sqrt{(1 - L_i C_n (2\pi f_s)^2)^2 + \left(\frac{2\pi f_s L_i}{R_{lamp}}\right)^2}} \quad (3.12)$$

จากสมการ 3.11 และ 3.12 สามารถที่จะนำไปใช้คำนวณหาคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไซน์กับแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แล้วแปลงให้เป็นแรงดันไฟตรง (Ed) ที่คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทบระดับแบบคู่จ่ายให้ ดังนั้นจะได้สมการที่เป็นคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ 3.13 และ 3.14 ซึ่งก็คือการอินเวอร์เตอร์ไลน์นั่นเอง

$$Ed = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi V_{lamp} \sqrt{(1 - f_n^2)^2 + f_n^2 \left(\frac{R_o}{R_{lamp}}\right)} \quad (3.13)$$

$$Id = \frac{P_{lamp}}{\eta Ed} \quad (3.14)$$

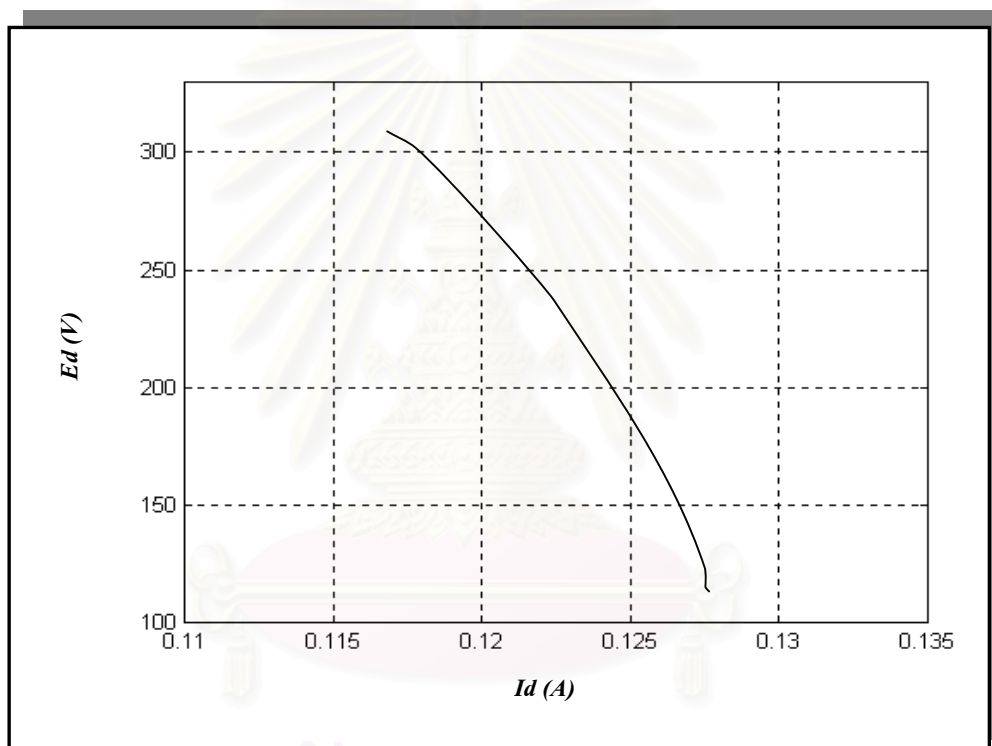
โดยที่

η = ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ 95 %

$$R_o = \sqrt{\frac{L_i}{C_n}} \quad ; \quad f_n = \frac{f_s}{f_o}$$

f_s = ความถี่ในการสวิตช์

จากสมการที่ 3.13 และ 3.14 จะทำให้สามารถที่จะคำนวณหาเส้นอินเวอร์เตอร์ไลน์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าและกระแสไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มี Lamp Line ดังในรูปที่ 3.9 ได้ รูปที่ 3.10 แสดงอินเวอร์เตอร์ไลน์ที่คำนวณได้



รูปที่ 3.10 อินเวอร์เตอร์ไลน์ที่คำนวณได้

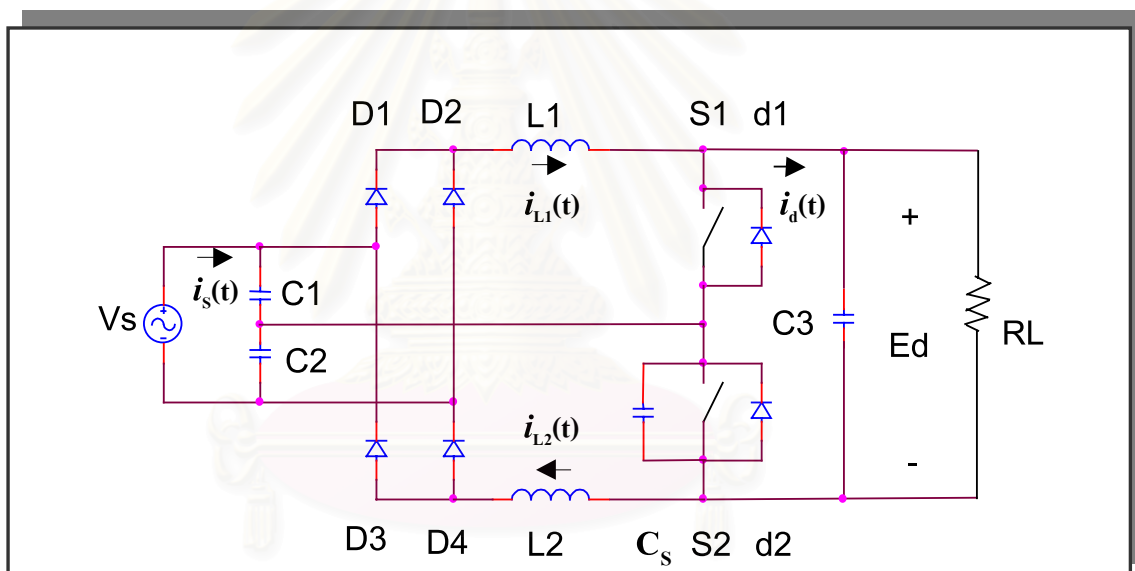
เมื่อทราบคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์แล้ว โดยพิจารณาจากอินเวอร์เตอร์ไลน์ ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของโหลดที่จะนำมาต่อเข้ากับคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ ทำให้สามารถที่จะออกแบบแหล่งจ่ายคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ เพื่อจ่ายกำลังให้แก่อินเวอร์เตอร์ได้

3.4 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่

การที่จะออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ได้นั้น จะต้องทราบคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ที่จะนำมาเป็นโหลดของคอนเวอร์เตอร์ จากผลการคำนวณในหัวข้อที่ 3.3 ทำให้ทราบคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงสามารถที่จะออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ได้ตามการพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบ

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ นั้น เริ่มต้นจากการพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติของแหล่งจ่าย ได้แก่ แรงดันไฟสลับจากสายกำลัง (AC Voltage, V_s) คุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ (E_d) และ กระแสไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ (I_d) ที่จุดทำงาน สุดท้ายคือความถี่การทำงานของสวิตช์

การออกแบบตามเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้น เป็นการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่

สมการที่ใช้ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ ในรูปที่ 3.11 แสดงได้ดังสมการที่ 3.16

$$\langle I_d \rangle = \frac{T_{sw} E_d}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{E_d} \right) + \frac{8E_d}{V_s \sqrt{4\left(\frac{E_d}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\frac{2E_d}{V_s} - 1}{\sqrt{4\left(\frac{E_d}{V_s}\right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{E_d}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \quad (3.15)$$

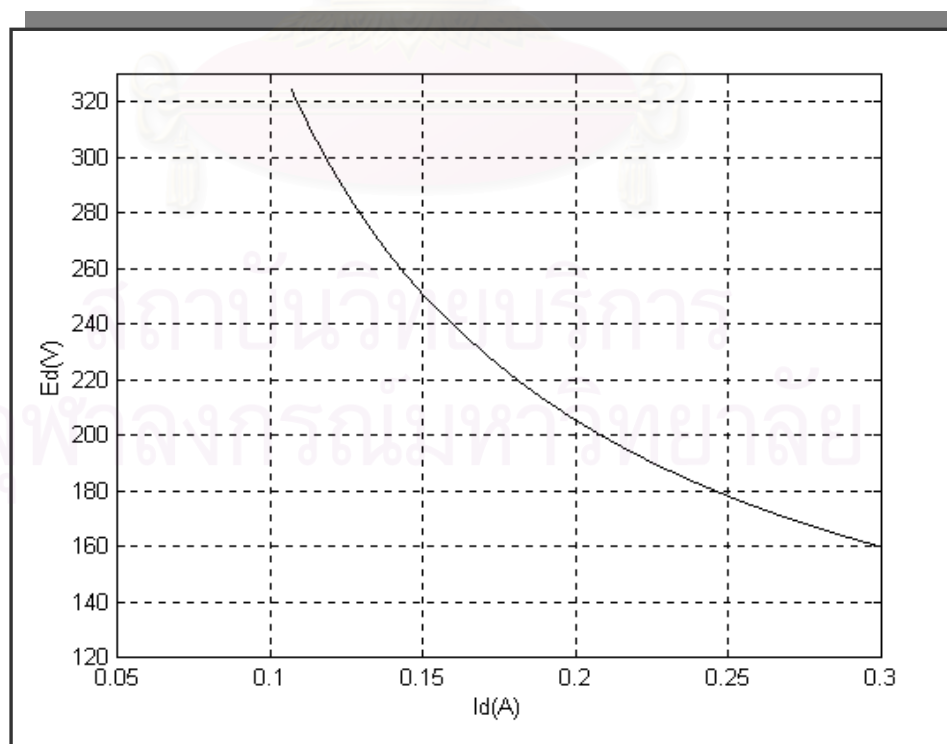
$$L = \frac{T_{sw} E d}{4 \pi \langle Id \rangle} \bullet K \left(\frac{E d}{V_s} \right) \quad (3.16)$$

โดยที่

$$K \left(\frac{E d}{V_s} \right) = - \left(\pi + \frac{V_s}{E d} \right) + \frac{8 E d}{V_s \sqrt{4 \left(\frac{E d}{V_s} \right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\frac{2 E d}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{E d}{V_s} \right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{E d}{V_s} \right)^2 - 1}} \right]$$

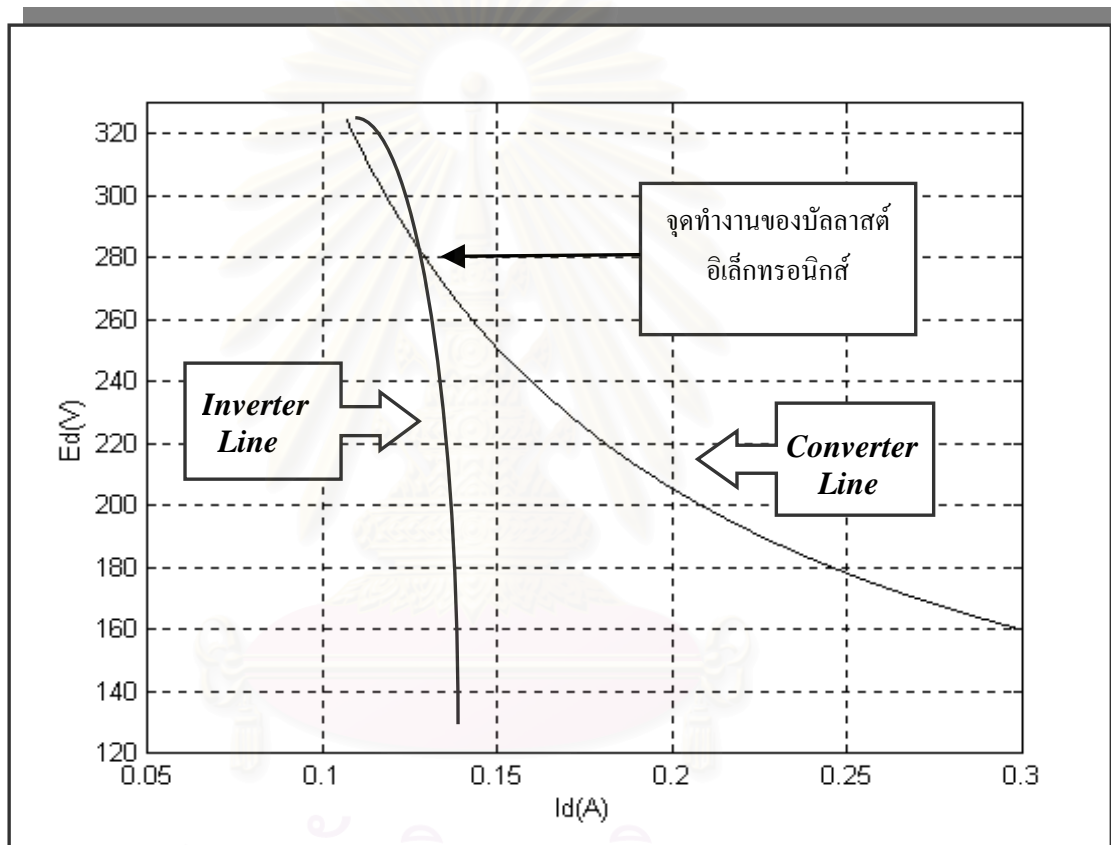
การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ จะต้องรู้ค่าความถี่สวิตช์ แรงดันไฟตรงด้านออก ($E d$) และกระแสไฟตรงด้านออก ($I d$) เสียก่อน แรงดันไฟตรงและกระแสไฟตรงด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ได้มาจากกราฟคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.10

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์เป็นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ ส่วนการออกแบบตัวเก็บประจุ ($C1$ และ $C2$) จะใช้ ripple ของแรงดันเป็นตัวกำหนดค่า C การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ใช้สมการที่ 3.16 โดยจะให้ค่า $L1$ และ $L2$ เท่ากัน เท่ากับ L ที่จุดทำงานพิกัด จากค่า L ที่คำนวณได้ เมื่อแทนลงในสมการที่ 3.15 ก็จะสามารถคำนวณคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกและแรงดันออกของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ ดังในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟคุณสมบัติการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่

รูปที่ 3.12 เป็นการแสดงถึงคุณสมบัติการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ จุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ก็คือจุดตัดกันระหว่างกราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่และวงจรถืออินเวอร์เตอร์ รูปที่ 3.13 แสดงจุดตัดกันระหว่างกราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ รูปที่ 3.12 และกราฟคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.13 จุดตัดกันระหว่างกราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่และกราฟคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์

เมื่อนำทั้งส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ และส่วนที่เป็นอินเวอร์เตอร์มาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้สวิตช์ไวงานร่วมกัน ทำงานที่วิญจักรงาน 0.5 ก็จะได้วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งช่วยลดจำนวนสวิตช์ไวงานลง ทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องการควบคุมสวิตช์ไวงาน ได้วงจรที่ไม่ซับซ้อน และจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่จะมีจุดทำงานตามที่ต้องการออกแบบ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.13

เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าระบบไม่น่าที่จะมีเสถียรภาพได้ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ไลน์ที่เป็นโหลดมีความชันที่(เป็นลบ)มากกว่าคอนเวอร์เตอร์ไลน์ที่เป็นแหล่งจ่าย แต่ในความเป็นจริงแล้วระบบกลับมีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถอธิบายและทำการทดสอบวงจรที่ออกแบบไว้ โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ลงในแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรบัลลาสต์ที่ทำได้ ตามทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่2 แล้ว ก็จะทำให้สามารถบอกได้ว่าวงจรที่ออกแบบไว้มีเสถียรภาพหรือไม่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดลองและเปรียบเทียบผล

ในบทที่ 2 และ 3 ได้อธิบายถึงทฤษฎีและแนวทางในการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่มาแล้ว ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองการออกแบบสร้างบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ซึ่งประกอบด้วย ผลการคำนวณ ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และผลการทดลอง รวมทั้งการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ด้วย

ในการทดลองออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จะออกแบบโดยกำหนดพิกัดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ดังนี้ มีแรงดันไฟสลับด้านเข้า 110 V ความถี่ 50 Hz แรงดันไฟตรงด้านออก (E_d) ที่พิกัด 3 ค่าคือ 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC มีความถี่ในการสวิตซ์ 33 kHz กำลังออกที่โหลดฟลูออเรสเซนต์ที่พิกัด 32 วัตต์ การทดลองออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จะเริ่มที่การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโหลดฟลูออเรสเซนต์ แล้วเลือกจุดทำงานที่พิกัด 32 W เพื่อนำไปออกแบบอินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ตามลำดับ เพื่อเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องทางทฤษฎี

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จะแบ่งการทดลองและการแสดงผลการทดลองออกเป็นหัวข้อ ดังต่อไปนี้

4.1 การหาคุณสมบัติของโหลดฟลูออเรสเซนต์

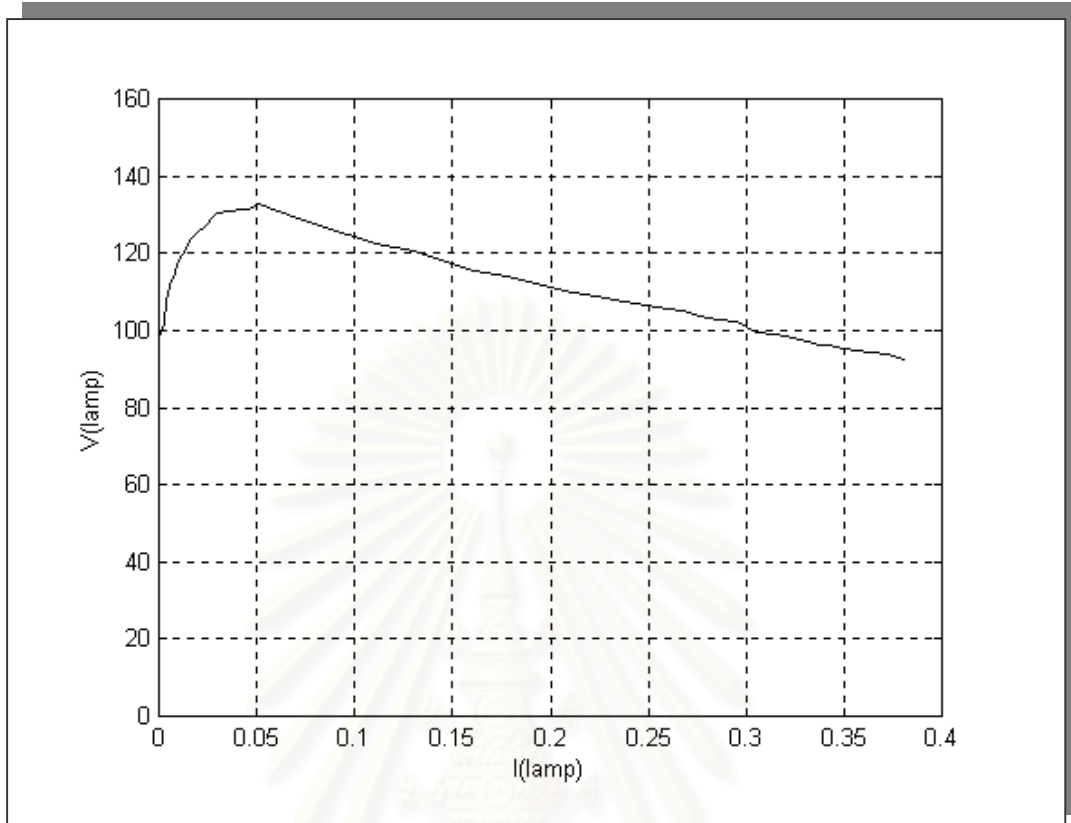
Lamp Line ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (V_{lamp}) กับกระแส (I_{lamp}) ของโหลดฟลูออเรสเซนต์ สำหรับกำลังออกของหลอดต่างๆกัน สามารถหาได้จากการทดลองวัดจริง Lamp Line ที่ได้จากการทดลองนี้ สามารถแสดงผลการทดลองในรูปของตารางและในรูปของกราฟได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ตามลำดับ โดยในการทดลองหา Lamp Line นี้จะอาศัยการแปรค่าความถี่ โดยรักษาแรงดันไฟตรงด้านเข้าให้คงที่

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหา Lamp Line โดยการแปรค่าความถี่ ($E_d = 300$ VDC , $L_i = 1.81$ mH , $C_n = 15$ nF ,แปรความถี่จาก 30 ถึง 46.30 kHz)

$V_{lamp}(V_{rms})$	$I_{lamp}(A_{rms})$	$P_{lamp}(W)$
92.56	0.381	35.00
93.69	0.372	34.60
94.39	0.364	34.10
94.72	0.356	33.40
95.24	0.350	33.00
95.96	0.342	32.50
96.03	0.337	32.00
97.65	0.328	31.70
98.54	0.320	31.20
98.79	0.314	30.70
99.41	0.305	30.00
102.16	0.296	29.80
102.76	0.285	28.90
103.87	0.276	28.30
104.91	0.268	27.70
105.34	0.260	27.00
106.40	0.249	25.90
107.27	0.237	24.90
108.68	0.224	23.90
110.02	0.212	22.80
111.56	0.196	21.40
113.86	0.178	19.70
115.56	0.161	18.10
120.41	0.130	15.10
122.34	0.111	13.10

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหา Lamp Line โดยการแปรค่าความถี่ (ต่อ) ($E_d = 300$ VDC , $L_i = 1.81$ mH, $C_n = 15$ nF ,แปรความถี่จาก 30 ถึง 46.30 kHz)

$V_{lamp}(V_{rms})$	$I_{lamp}(A_{rms})$	$P_{lamp}(W)$
126.84	0.085	10.30
127.18	0.082	9.90
129.62	0.068	8.30
130.74	0.061	7.50
132.79	0.051	6.30
131.58	0.046	5.50
131.53	0.042	4.80
130.70	0.037	4.10
130.35	0.030	3.20
128.58	0.026	2.40
127.82	0.025	2.30
126.53	0.023	2.10
125.20	0.019	1.70
123.41	0.016	1.40
121.50	0.014	1.20
119.71	0.012	1.00
117.38	0.009	0.80
115.17	0.008	0.70
111.54	0.006	0.50
109.11	0.005	0.40
108.10	0.004	0.30
101.91	0.003	0.20
101.08	0.002	0.15
98.56	0.001	0.10



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส(rms)และแรงดัน(rms)ของหลอดฟลูออเรสเซนต์จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานกับความถี่สูงจะมีลักษณะสมบัติโดยประมาณเป็นความต้านทานแบบเชิงเส้น แต่ขนาดค่าความต้านทานสมมูลของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของกระแสที่ไหลผ่านหลอดและแรงดันคร่อมหลอด และมีลักษณะของความต้านทานพลวัตเป็นลบ

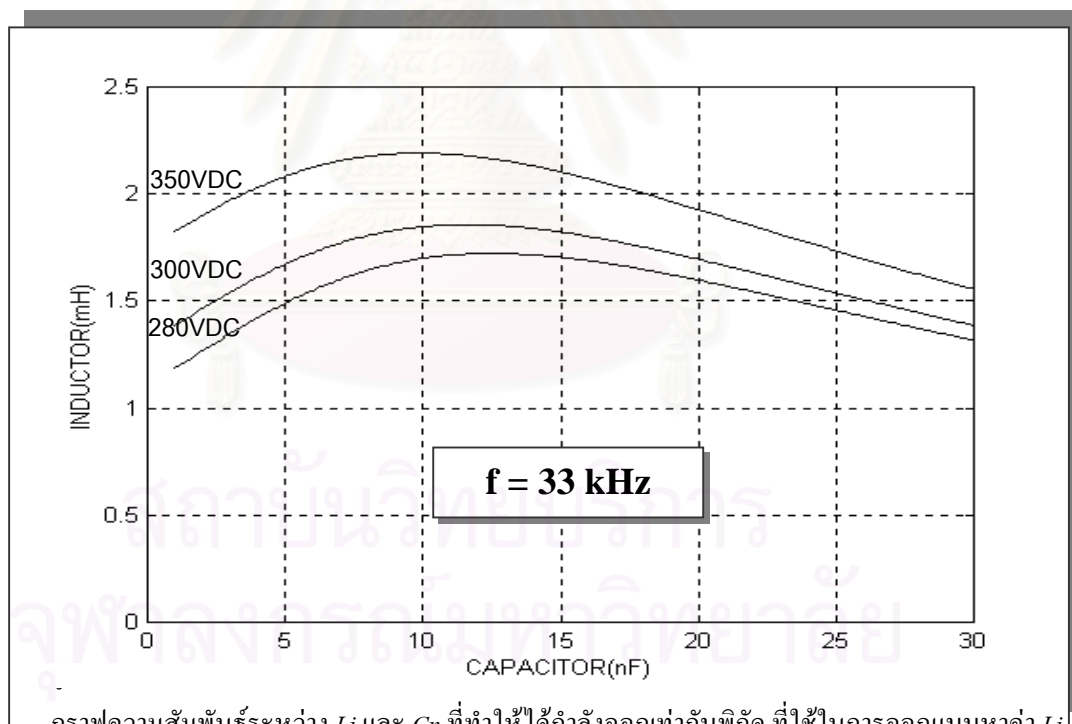
4.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์และการหาคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์

การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ จะออกแบบให้กำลังออกของหลอดเท่ากับค่าพิกัด 32 W การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย 2 เรื่องคือ

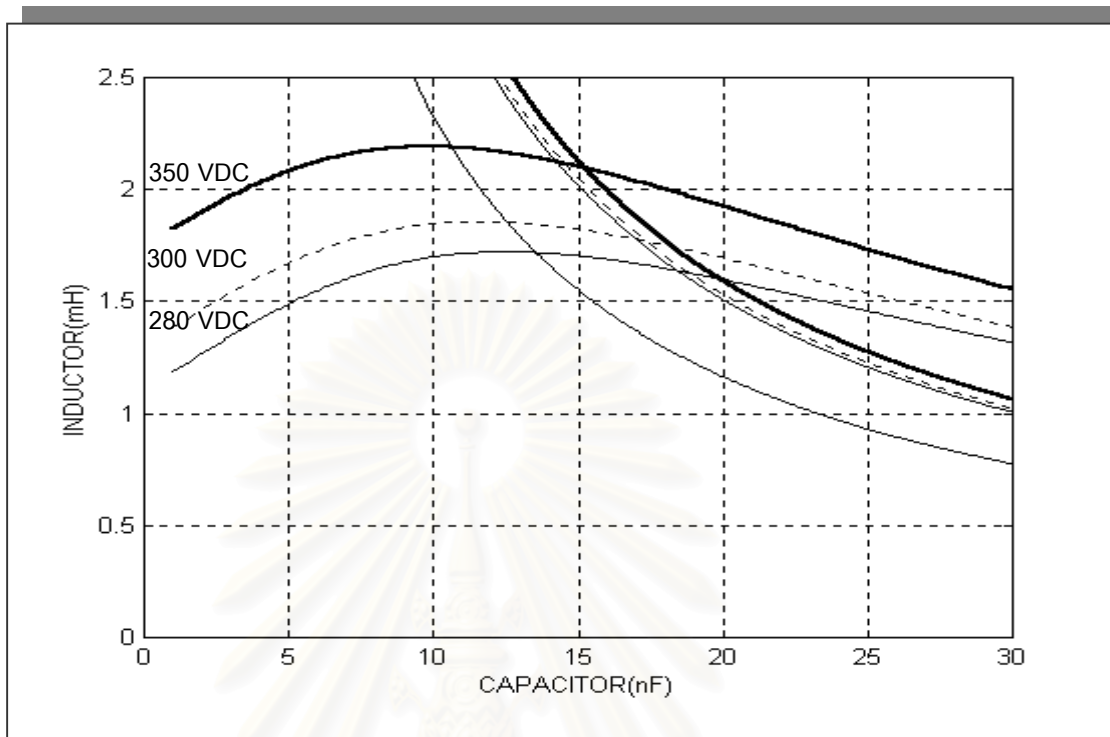
- 1) การหาวงจรโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ Li และ Cn
- 2) การหาคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์(อินเวอร์เตอร์ไลน์) เพื่อกำหนดจุดทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่

4.2.1 การออกแบบวงจร โหลดวงจรอินเวอร์เตอร์

เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (V_{lamp}) กับกระแส (I_{lamp}) ของหลอดฟลูออเรสเซนต์แล้ว ก็จะนำความสัมพันธ์คุณสมบัติของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ได้จากการทดลอง มาใช้ในการออกแบบวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์เพื่อหาค่า L_i และ C_n โดยในการออกแบบหาความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n โดยใช้สมการที่ใช้ในการออกแบบตามข้อกำหนด ชิดจำกัด และพฤติกรรมการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อแทนค่าแรงดันที่พิกัดในสมการที่ 3.4 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง L_i กับ C_n ดังสมการที่ 3.5 ที่ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์มีกำลังออกเท่ากับพิกัดสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าที่กำหนด (E_d) ในที่นี้กำหนดให้เป็น 280V 300V และ 350 V ตามลำดับ และสำหรับการออกแบบตามเงื่อนไขของขีดจำกัดประกอบด้วย แรงดันจุดหลอด 600 V (Constant open circuit voltage, V_{ig}) และมุมเฟสของกระแสออกต้องล่าหลังแรงดัน V_{is} ของอินเวอร์เตอร์ทั้งช่วงก่อนและขณะจุดหลอดให้ติดสว่าง และขณะทำงานปกติ เพื่อให้สวิตซ์เรโซแนนซ์เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ (zero voltage switching, ZVS) จะได้จากสมการที่ 3.7 และ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ของ L_i และ C_n ที่ทำให้หลอดมีกำลังด้านออกเท่ากับพิกัด โดยมีแรงดันไฟตรงด้านเข้า (E_d) 280V 300V และ 350 V ตามลำดับ แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.2



กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n ที่ทำให้ได้กำลังออกเท่ากับพิกัด ที่ใช้ในการออกแบบหาค่า L_i และ C_n โดยมีแรงดันไฟตรงด้านเข้า (E_d) 280V 300V และ 350 V ตามลำดับ ที่ได้จากสมการการออกแบบความสัมพันธ์ระหว่าง L_i และ C_n ร่วมกับสมการการออกแบบตามเงื่อนไขของขีดจำกัด แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของ L_i และ C_n ที่ทำให้ได้ขีดจำกัดตามที่กำหนด

ในการออกแบบค่าอุปกรณ์ในวงจรโพลของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยอาศัยตามข้อกำหนด ขีดจำกัดที่ความถี่การทำงานเท่ากับ 33 kHz จะได้ช่วงของ L_i และ C_n ดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นจะเลือกค่า L_i และ C_n ที่ระดับแรงไฟตรงต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2

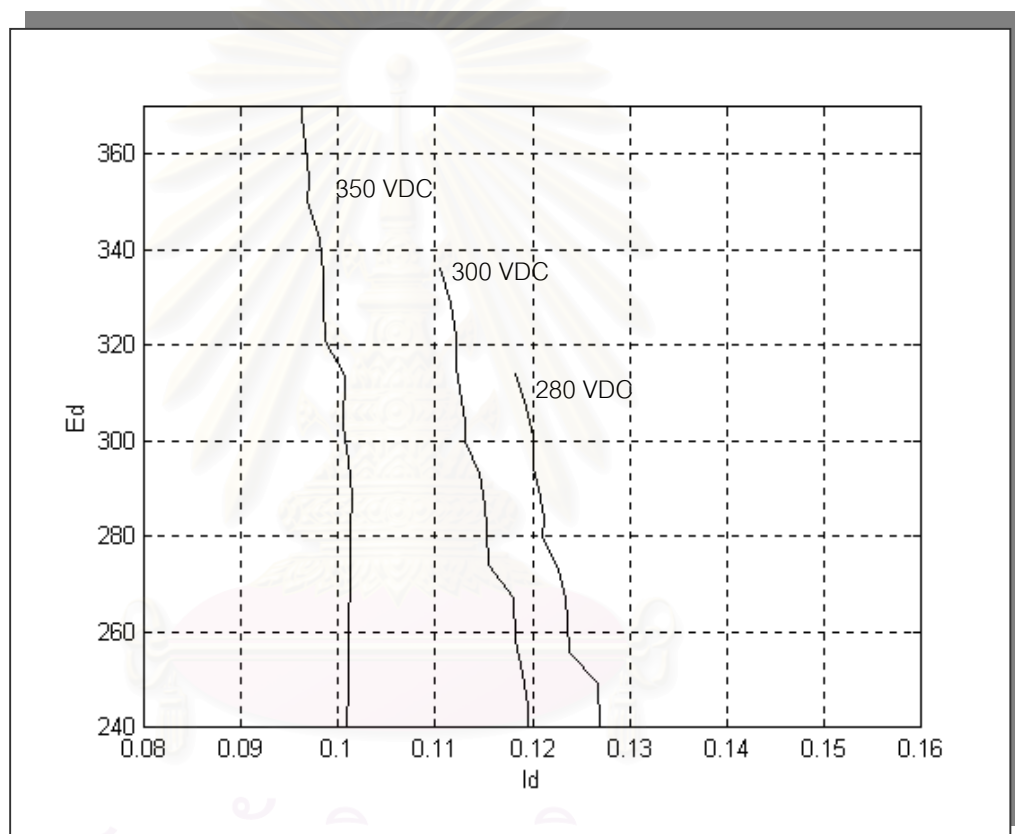
ตารางที่ 4.2 การเลือกค่าของ L_i และ C_n ที่ระดับค่าแรงดันไฟตรงต่างๆกัน

VDC(V)	L_i (mH)	C_n (nF)
280	1.70	15
300	1.81	15
350	2.10	15

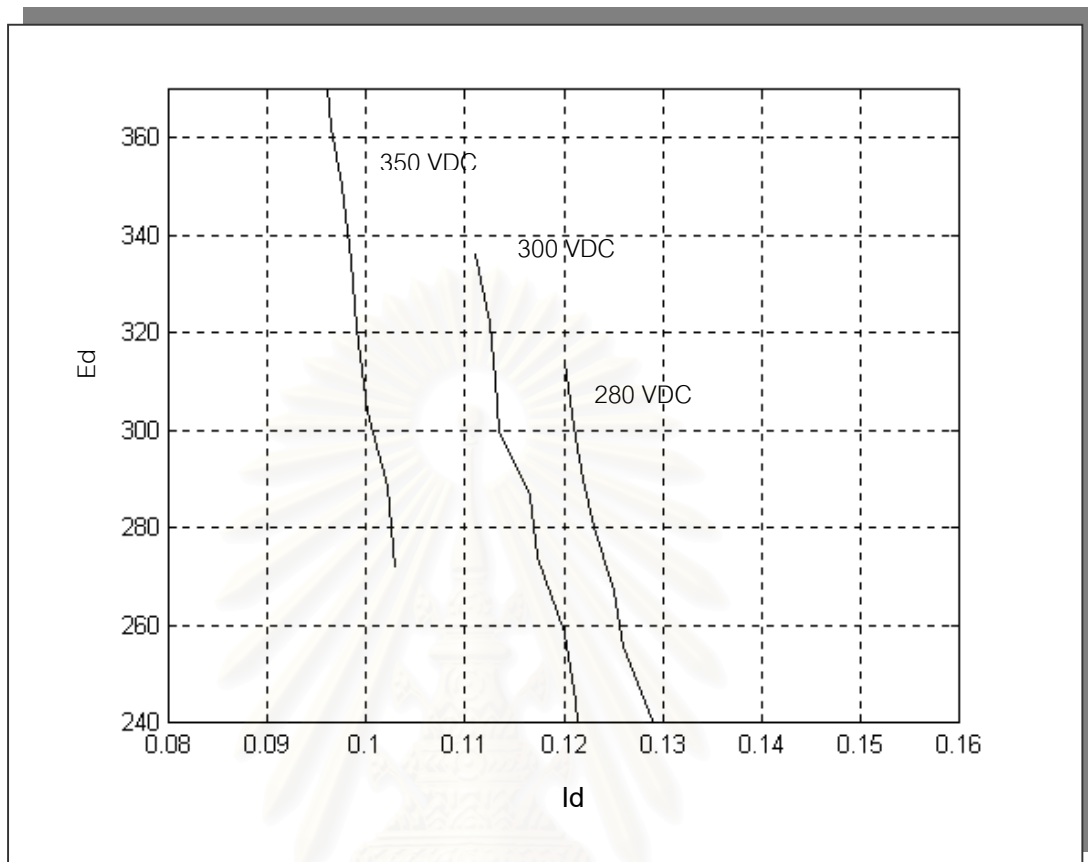
4.2.2 การหาค่าคุณสมบัติด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์

เมื่อได้วงจรโพลของวงจรอินเวอร์เตอร์แล้ว สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ได้ที่แรงดันไฟ

ตรง(E_d) 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC โดยใช้สมการ 3.13 และ 3.14 นอกจากนี้แล้วเพื่อขึ้น
 ยันความถูกต้องของการคำนวณ จะมีการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพื่อหาคุณสมบัติด้าน
 เข้าของอินเวอร์เตอร์ และตามด้วยการทดลองหาคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ โดยทำการ
 ทดลองจากวงจรจริง

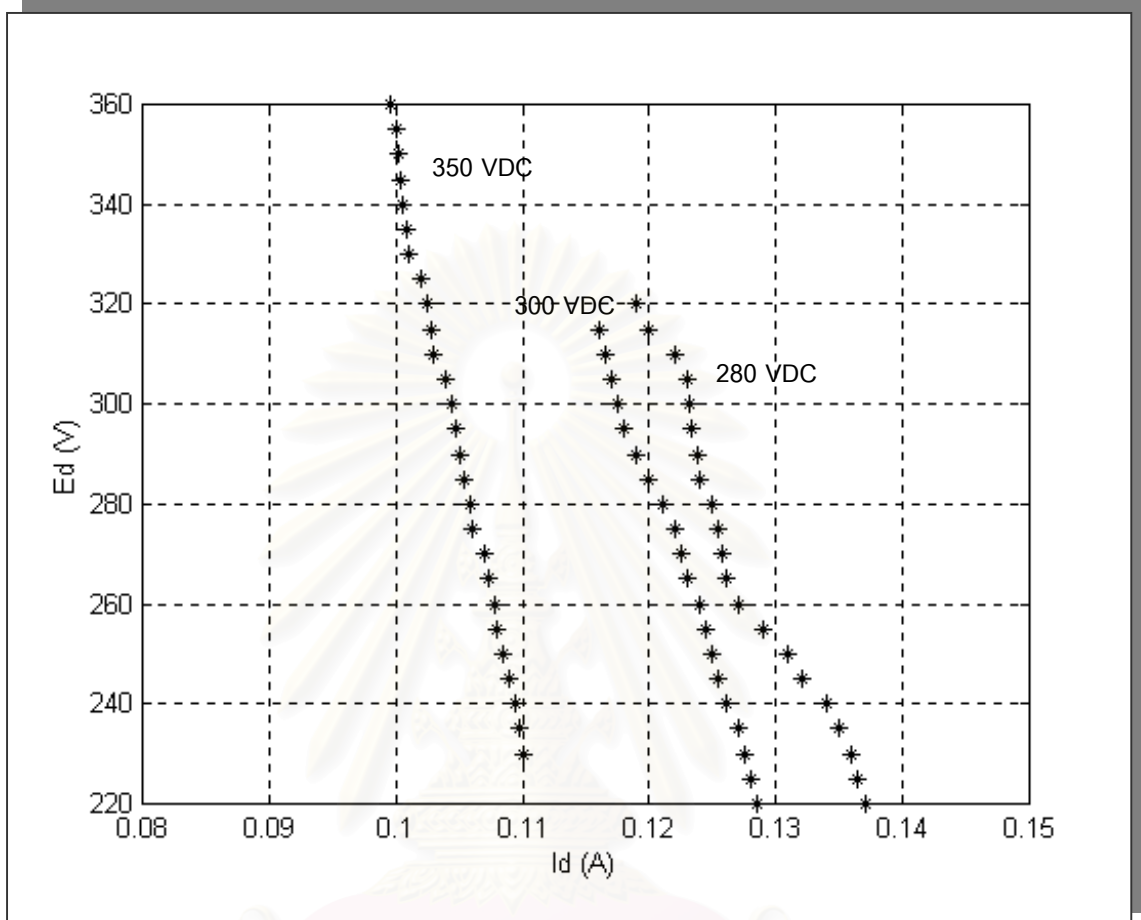


รูปที่ 4.4 คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 4.5 คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จากการจำลองการทำงานของวงจร

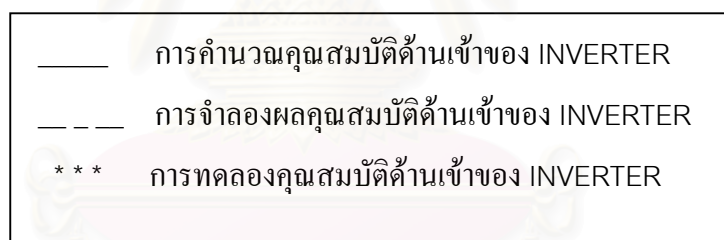
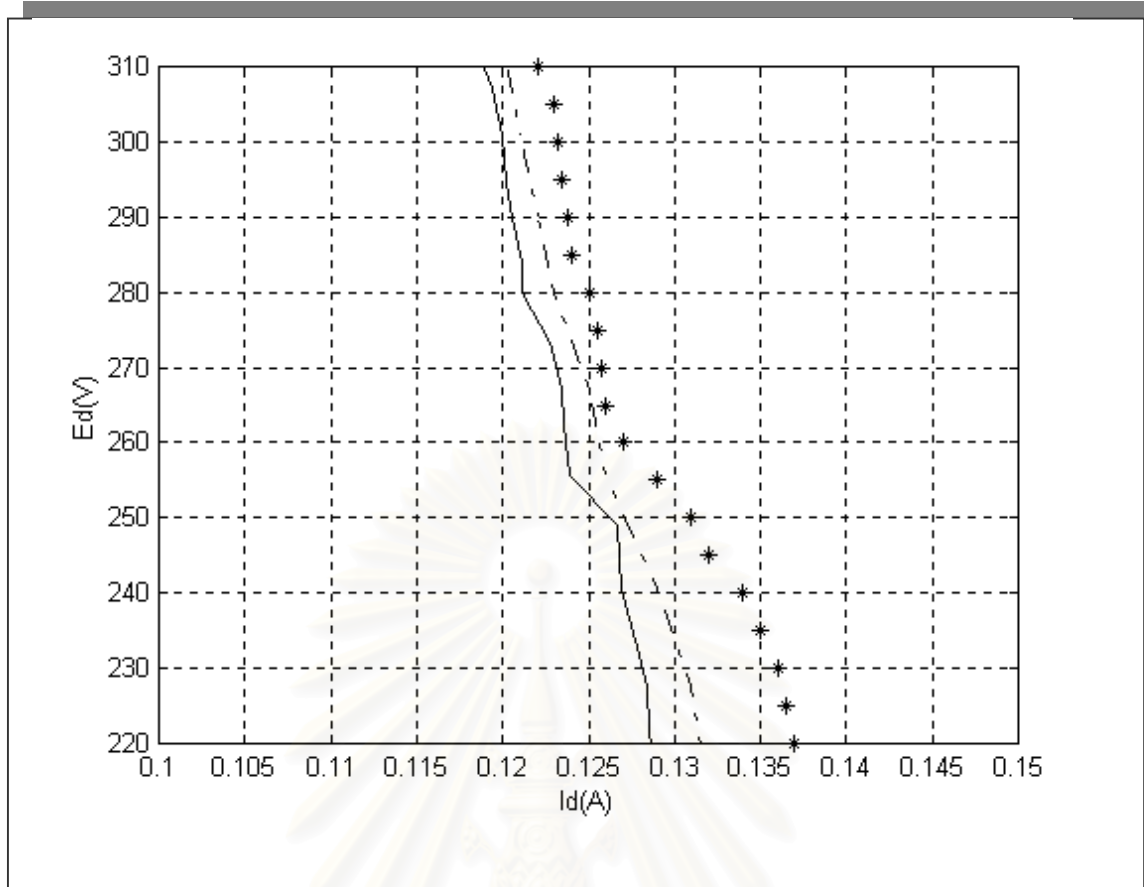
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จากการทดลอง

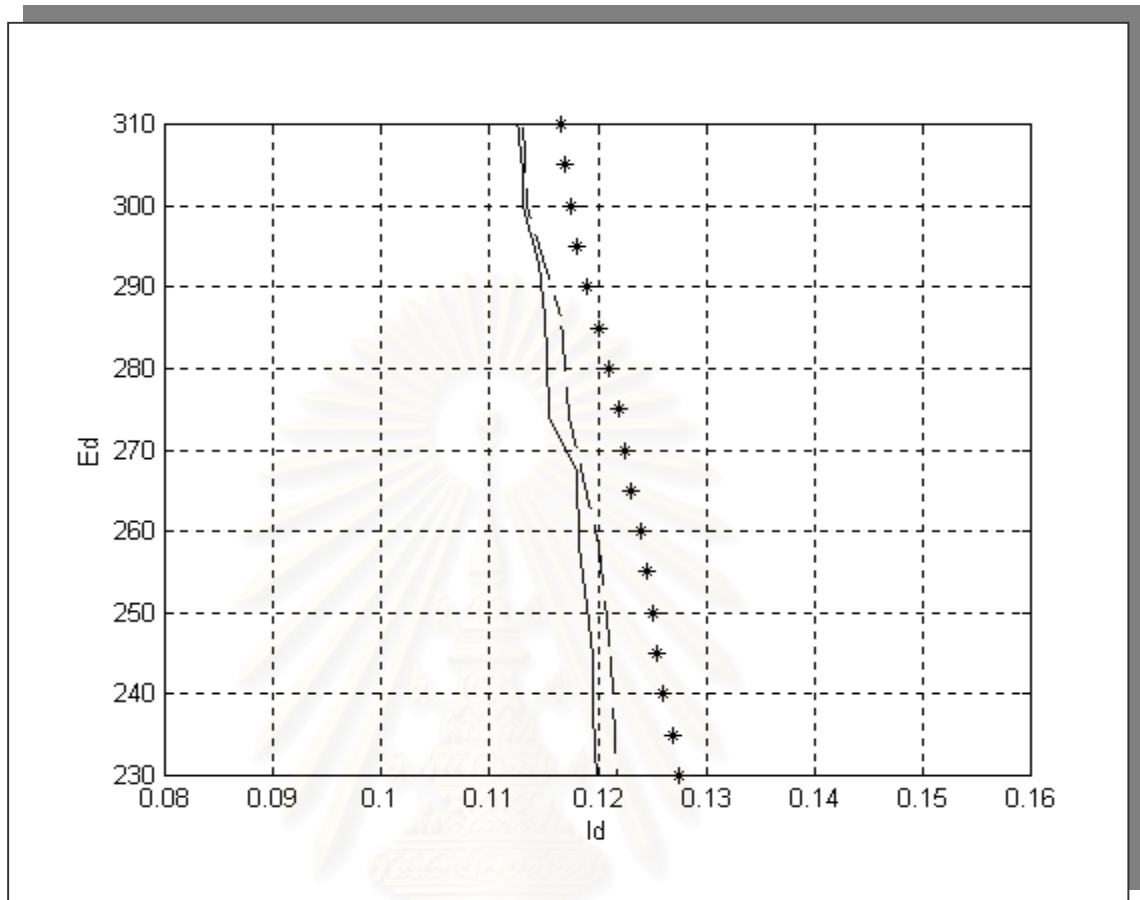
รูปที่ 4.4 เป็นคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยการคำนวณ รูปที่ 4.5 เป็นคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยการจำลองผลการทำงาน และรูปที่ 4.6 เป็นคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยการทดลอง แสดงเปรียบเทียบกันที่แรงดันไฟตรง 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า อินเวอร์เตอร์ที่มีตัวเหนี่ยวนำที่เป็น โหลดบัลลาสต์ที่มีค่าน้อย จะประพฤติตัวเป็น โหลดกระแสที่มากกว่า อินเวอร์เตอร์ที่มีตัวเหนี่ยวนำที่เป็น โหลดบัลลาสต์ที่มีค่ามาก



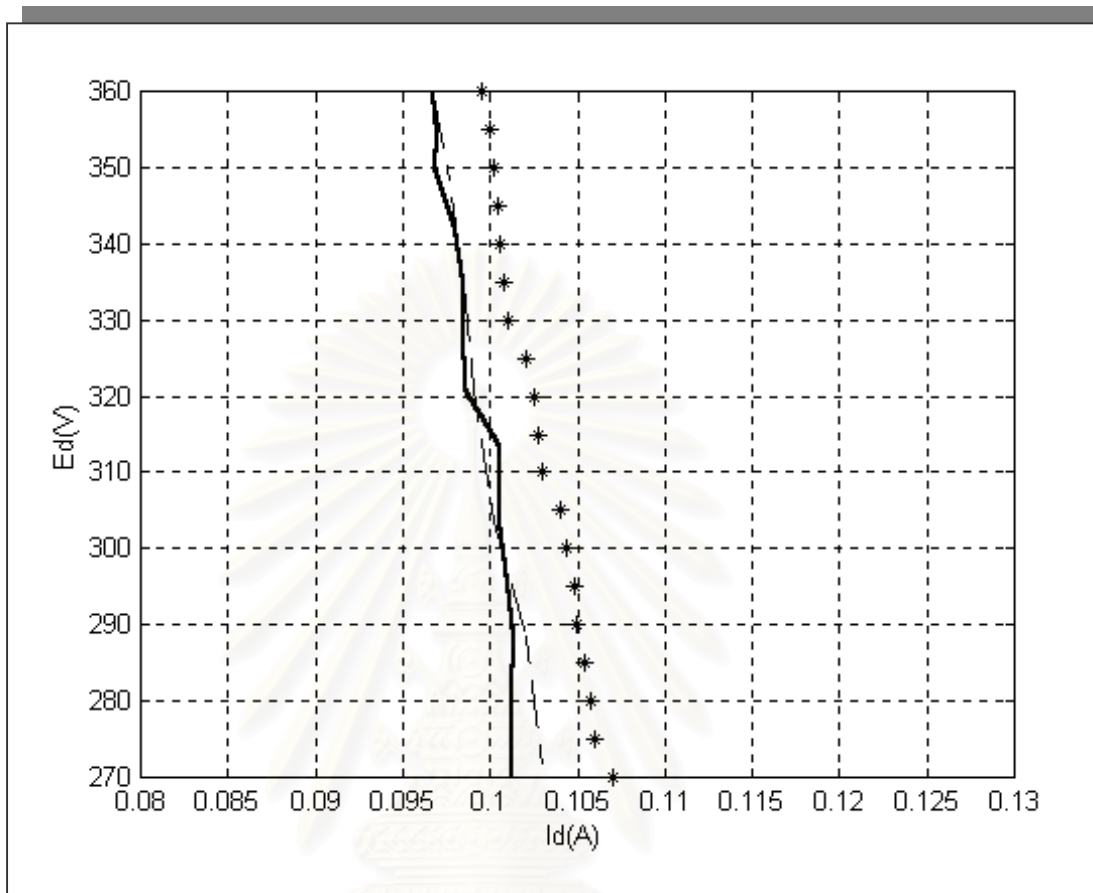
รูปที่ 4.7 คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลอง ที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



— การคำนวณคุณสมบัติด้านเข้าของ INVERTER
 - - - การจำลองผลคุณสมบัติด้านเข้าของ INVERTER
 * * * การทดลองคุณสมบัติด้านเข้าของ INVERTER

รูปที่ 4.8 คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลอง ที่แรงดันไฟตรง (E_d) 300 VDC



—	การคำนวณคุณสมบัติด้านเข้าของ INVERTER
- - -	การจำลองผลคุณสมบัติด้านเข้าของ INVERTER
***	การทดลองคุณสมบัติด้านเข้าของ INVERTER

รูปที่ 4.9 คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลอง ที่แรงดันไฟตรง(E_d) 350 VDC

รูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 เป็นคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ โดยการคำนวณ การจำลองผลการทำงาน และการทดลอง ที่แรงดัน 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการคำนวณ การจำลองผลการทำงาน และการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่จะมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งน่าจะเป็นผลจากกำลังสูญเสียในวงจรอินเวอร์เตอร์

4.3 การทดลองหาค่าคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่

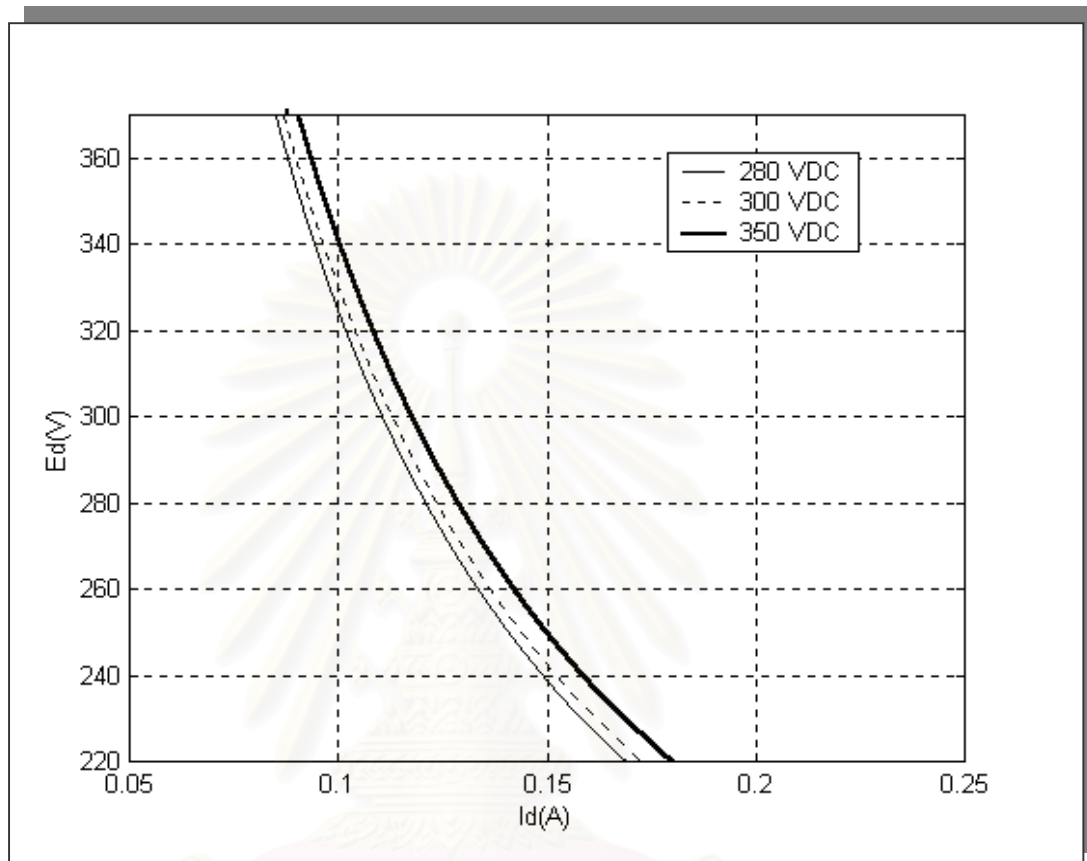
การออกแบบคอนเวอร์เตอร์เป็นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ L1 และ L2 ที่แรงดันด้านเข้า 110 V ความถี่ 33 kHz ส่วนการออกแบบตัวเก็บประจุ C3 จะใช้ ripple ของแรงดันเป็นตัวกำหนดค่า C3 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์จะใช้สมการในบทที่ 3 ซึ่งจะใช้ค่า L1 และ L2 เท่ากัน เพื่อให้ได้จุดทำงานที่พิกัด ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ นั้นจะต้องทราบคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ที่จะนำมาต่อเป็น โหลดให้กับคอนเวอร์เตอร์เสียก่อน จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้สามารถที่จะหาค่าคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ได้ ดังนั้นจึงสามารถที่จะทำการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ได้จากการพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบ

ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ นั้น เริ่มต้นจากการพิจารณาข้อกำหนดการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติของแหล่งจ่ายได้แก่ แรงดันไฟสลับด้านเข้า (AC Voltage, $V_s = 110$ V) คุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ได้แก่ แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ($E_d = 280$ VDC, 300 VDC และ 350 VDC) และ กระแสไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ($I_d = 0.121$ A, 0.113 A และ 0.097) ที่จุดทำงาน สุดท้ายคือความถี่สวิตซ์ในการทำงาน ($f = 33$ kHz) จากคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์โดยการคำนวณ ทำให้สามารถเลือกจุดทำงานเพื่อออกแบบคอนเวอร์เตอร์ได้ ดังนั้นสามารถทำการออกแบบคอนเวอร์เตอร์โดยเลือกค่า L (จะใช้ L1 และ L2 เท่ากัน) ของคอนเวอร์เตอร์ที่มีจุดทำงานที่แรงดันไฟตรงและกระแสไฟตรงด้านออกต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเลือกค่า L ($L1 = L2$) ที่ได้จากการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันไฟตรงและกระแสไฟตรงด้านออกต่างๆกัน

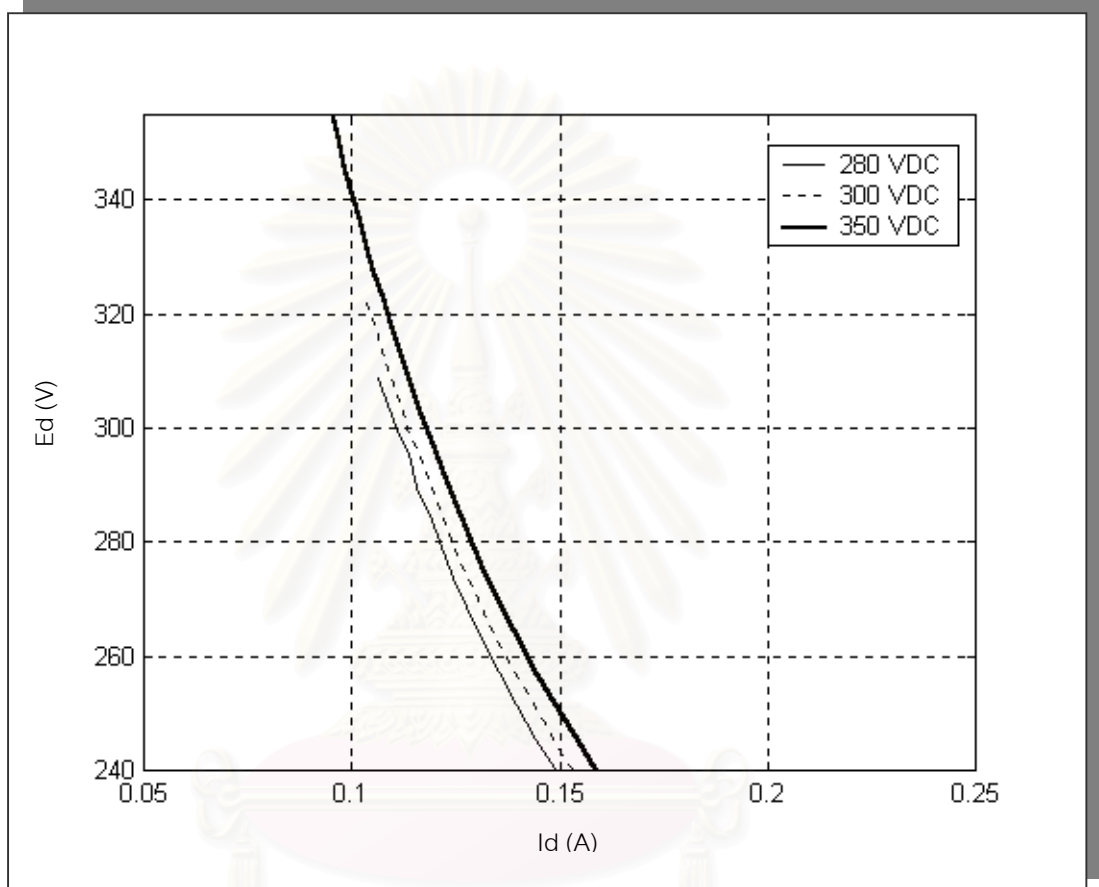
แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d)	กระแสไฟตรงด้านเข้า(I_d)	L ($L1=L2$) ของคอนเวอร์เตอร์
280 VDC	0.121 A	0.89 mH
300 VDC	0.113 A	0.87 mH
350 VDC	0.097 A	0.83 mH

เมื่อออกแบบ L ของคอนเวอร์เตอร์ที่พิกัดต่างๆได้แล้ว ก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ได้ที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC นอกจากนี้แล้วเพื่อยืนยันความถูกต้องของการคำนวณ จะมีมีการจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์เพื่อหาค่าคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ และการทดลองวัดคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากวงจรจริง



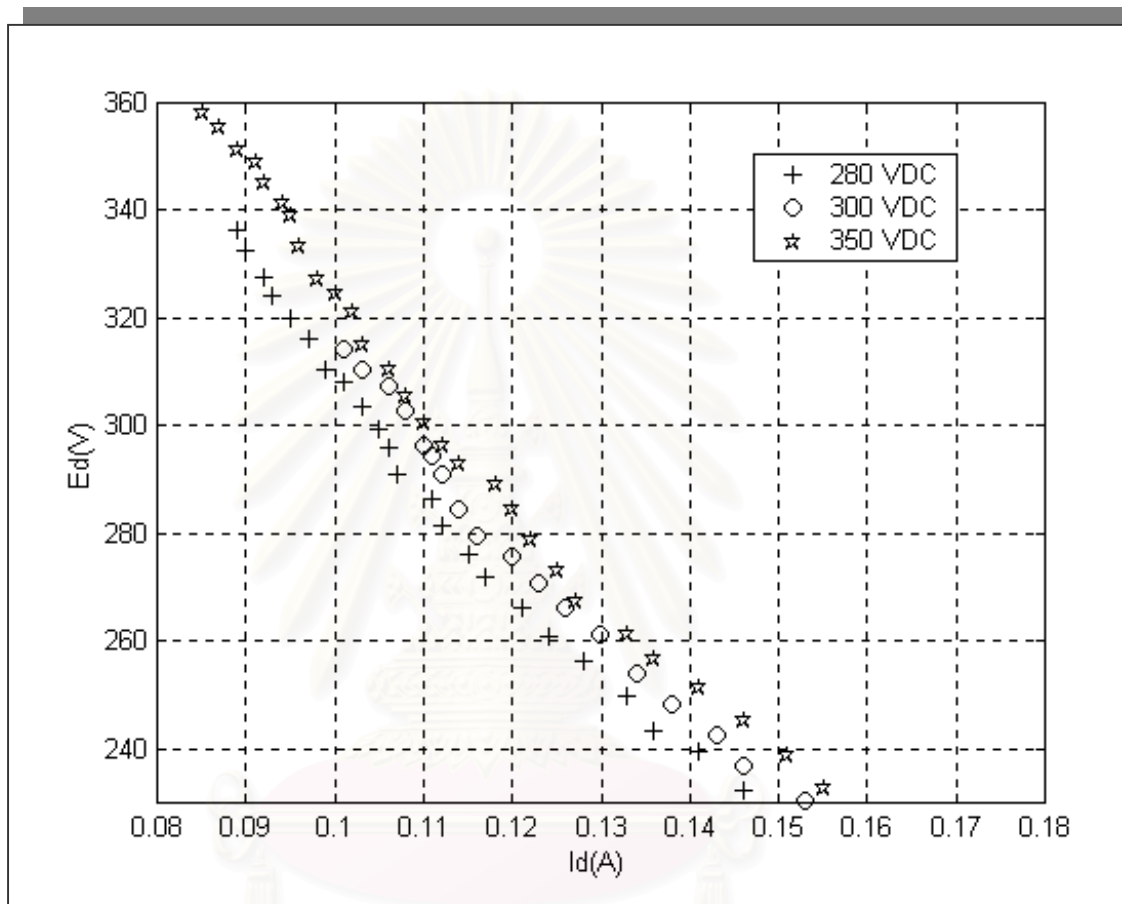
รูปที่ 4.10 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎีที่แรงดันไฟตรง(E_d)
280 VDC 300 VDC และ 350 VDC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่4.11 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลองการทำงานของวงจรถูกแรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC

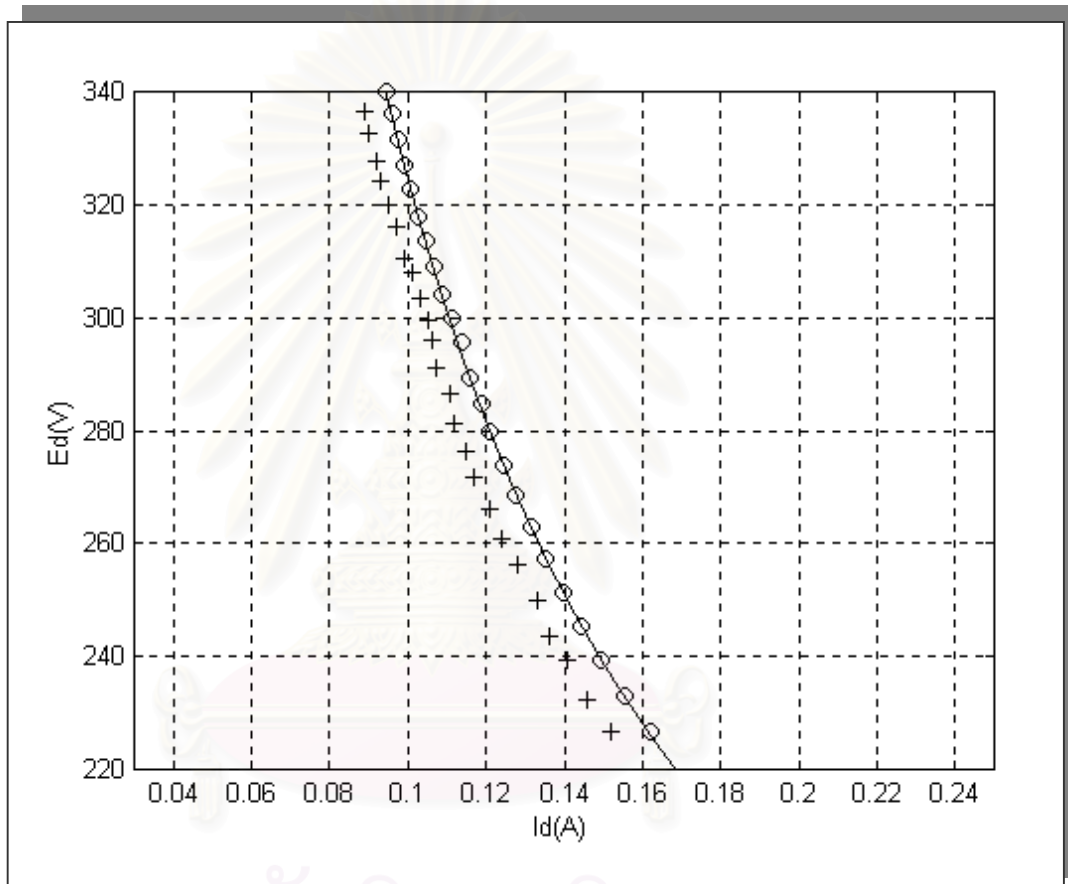
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่แรงดันไฟตรง (E_d)
280 VDC 300 VDC และ 350 VDC

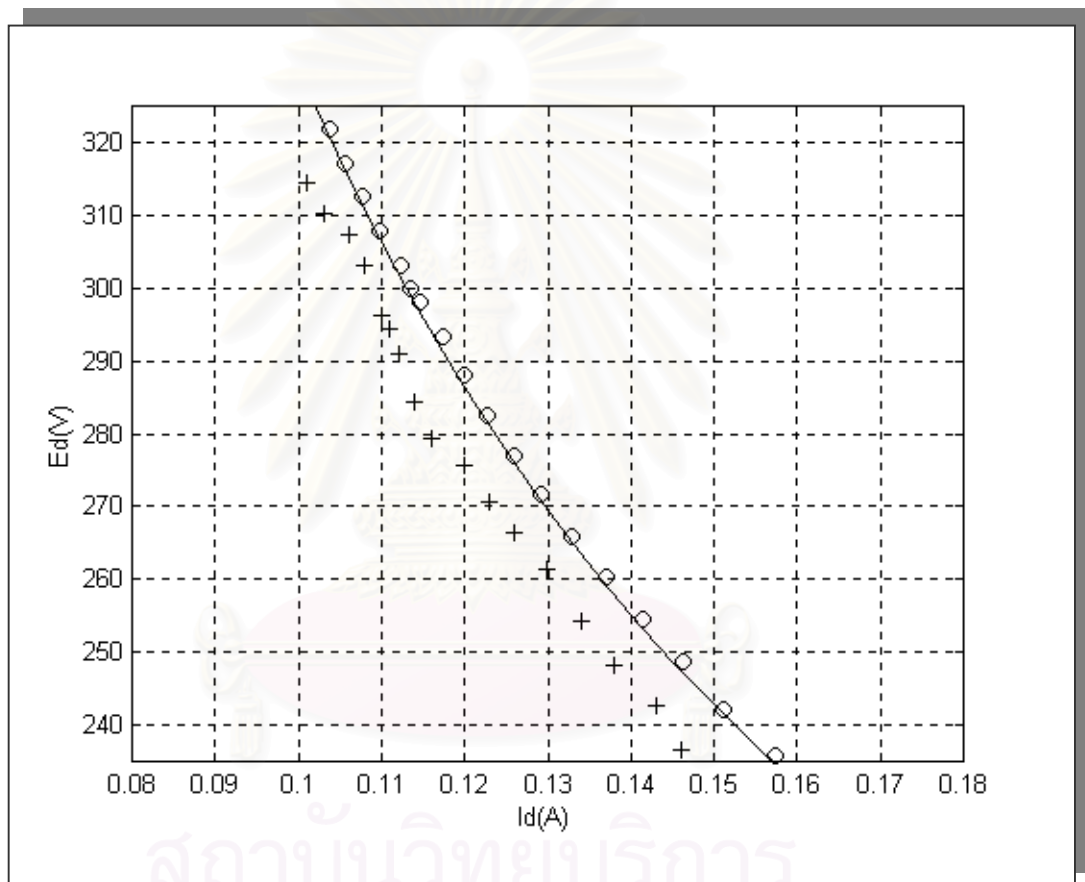
รูปที่ 4.10 เป็นคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์โดยการคำนวณ รูปที่ 4.11 เป็นคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์โดยการจำลองผลการทำงาน และรูปที่ 4.12 เป็นคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์โดยการทดลอง แสดงเปรียบเทียบกันที่แรงดันไฟตรง 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าคอนเวอร์เตอร์ที่มีตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ จะให้แรงดันไฟตรง (E_d) ด้านออกสูงกว่าคอนเวอร์เตอร์ที่มีตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง



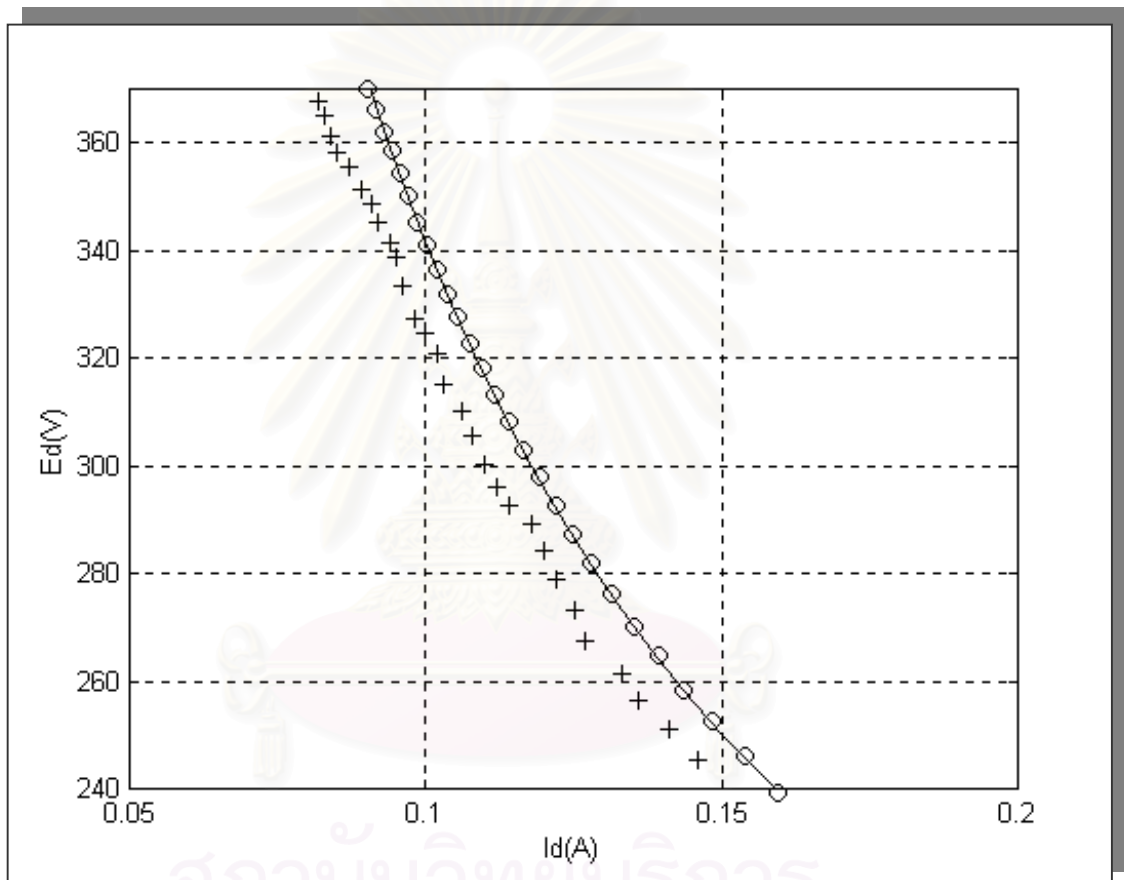
- การคำนวณคุณสมบัติด้านออกของ Converter
- O การจำลองผลคุณสมบัติด้านออกของ Converter
- + การทดลองคุณสมบัติด้านออกของ Converter

รูปที่ 4.13 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) 280 VDC



- การคำนวณคุณสมบัติด้านออกของ Converter
- O การจำลองผลคุณสมบัติด้านออกของ Converter
- + การทดลองคุณสมบัติด้านออกของ Converter

รูปที่ 4.14 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงาน
ของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) 300 VDC



- การคำนวณคุณสมบัติด้านออกของ Converter
- O การจำลองผลคุณสมบัติด้านออกของ Converter
- + การทดลองคุณสมบัติด้านออกของ Converter

รูปที่ 4.15 คุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรงด้านออก(E_d) 350 VDC

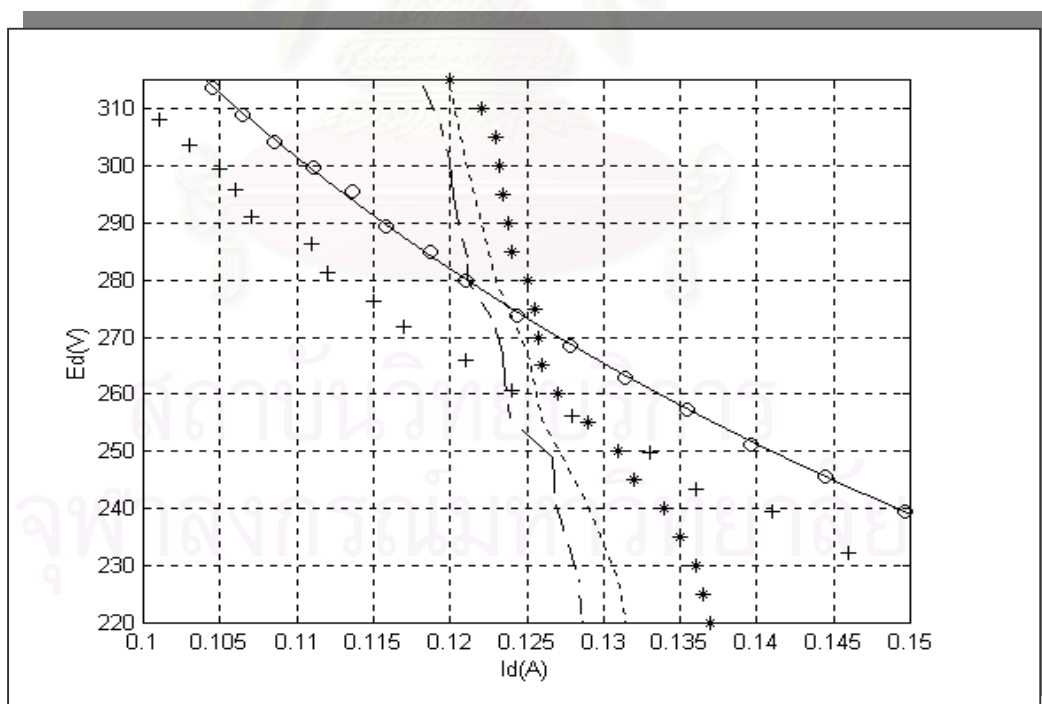
รูปที่ 4.13 รูปที่4.14 และ รูปที่4.15 เป็นคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์โดยการคำนวณ การจำลองผลการทำงาน และการทดลอง ที่แรงดัน 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการคำนวณ การจำลองผลการทำงาน และการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่ผลการทดลองที่ได้จะแตกต่างจากการคำนวณ ก็เนื่องจากว่าเกิดความสูญเสียขึ้นในวงจรที่ทดลอง แต่ในการคำนวณไม่ได้มีการชดเชยความสูญเสียอันนี้

4.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีอินเวอร์เตอร์เป็นโหลด

เมื่อต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์เข้าด้วยกันเป็นวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จะสามารถพิจารณาจุดทำงานของบัลลาสต์ได้โดยการพิจารณาจากจุดที่ตัดกันระหว่างกราฟคุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ และกราฟคุณสมบัติด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ โดยสามารถทำนายจุดทำงานจากกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังนี้

4.4.1 การทำงานที่แรงดันไฟตรงพิกัด 280 VDC

4.4.1.1 การหาจุดทำงานที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



O	การจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์
—	การคำนวณของคอนเวอร์เตอร์
+	การทดลองของคอนเวอร์เตอร์
---	การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์
----	การคำนวณของอินเวอร์เตอร์
*	การทดลองของอินเวอร์เตอร์

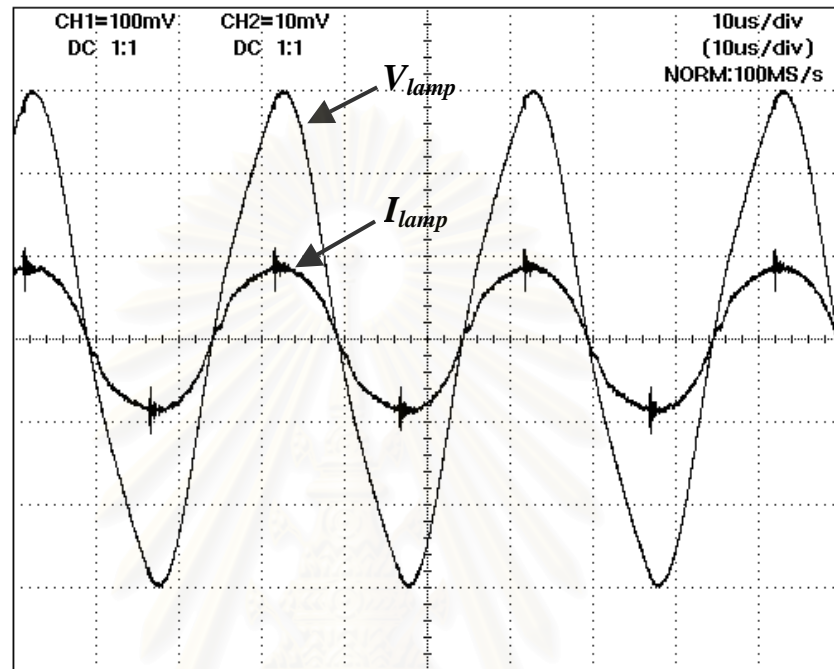
รูปที่ 4.16 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงาน และการทดลองที่แรงดันไฟตรง(E_d) 280 VDC

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าจุดตัดของกราฟที่ได้จากการทดลอง อยู่ต่ำกว่าจุดตัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยการคำนวณทางทฤษฎีจะให้จุดตัดที่ 280 V แต่จากการทดลองจะให้จุดตัดที่ 255 V ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการคำนวณของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ เมื่อต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์เข้าด้วยกัน พบว่าจุดทำงานมีแรงดันไฟตรง(E_d) 251.04 V กำลังออกที่โหลด 29.8 W แรงดันและกระแสที่โหลดเท่ากับ 102.97 V และ 0.293 A ตามลำดับ

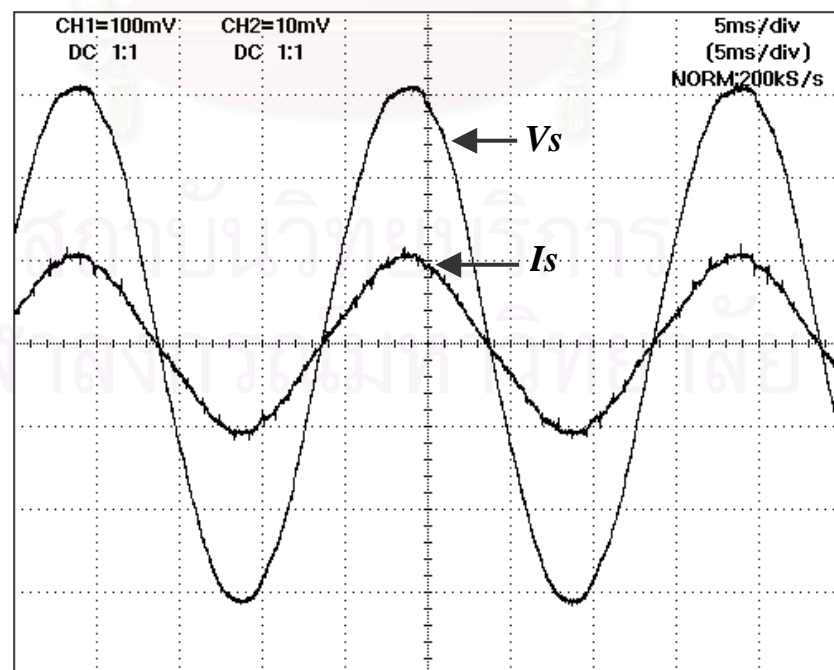
ดังนั้นในการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงควรจะต้องมีการชดเชยค่ากำลังสูญเสียนี้ เพื่อจะได้จุดตัดของกราฟคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ตามที่ต้องการได้ ทำการชดเชยในรูปของประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ กับค่า L ที่ออกแบบไว้ ก็จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L ใหม่ที่มีการชดเชยประมาณเท่ากับ 0.80 mH ใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำมาสร้างเป็นวงจรบัลลาสต์ ทำการทดลองได้ค่าพิกัดแรงดันไฟตรงเท่ากับ 278.15 V ให้กำลังออกที่โหลด 32.1 W แรงดันและกระแสที่โหลดเป็น 97.12 V และ 0.332 A ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ต้องการออกแบบ

4.4.1.2 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC

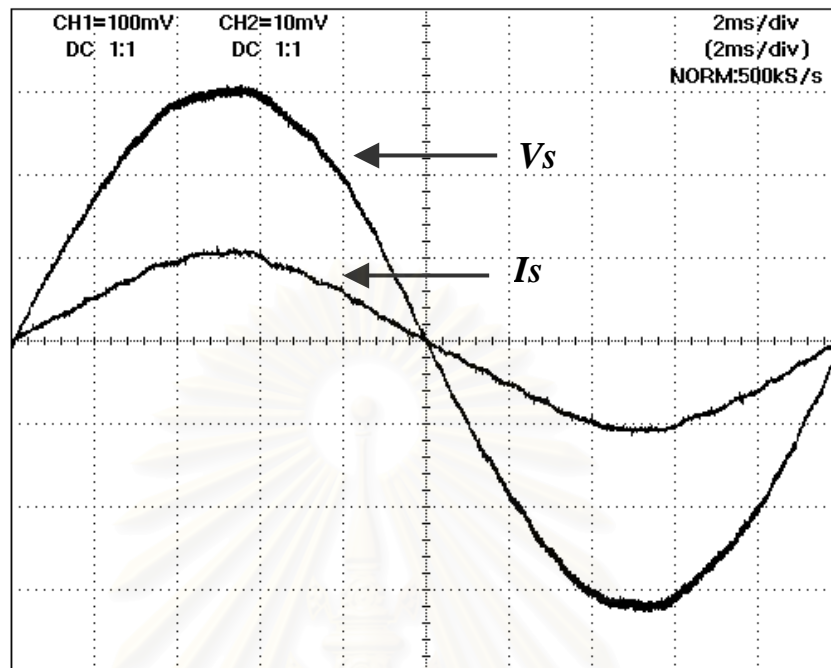
จากรูปคลื่นของกระแสด้านเข้าที่ได้ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสด้านเข้าจะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ยื่นยื่นถึงคุณสมบัติของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แสดงในรูปที่ 4.18 รูปที่ 4.19 กระแสด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ รูปที่ 4.20 แสดงการทำงานของสวิตช์ ที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบสวิตช์แรงดันศูนย์ และรูปที่ 4.17 แสดงกระแสและแรงดันที่โหลด



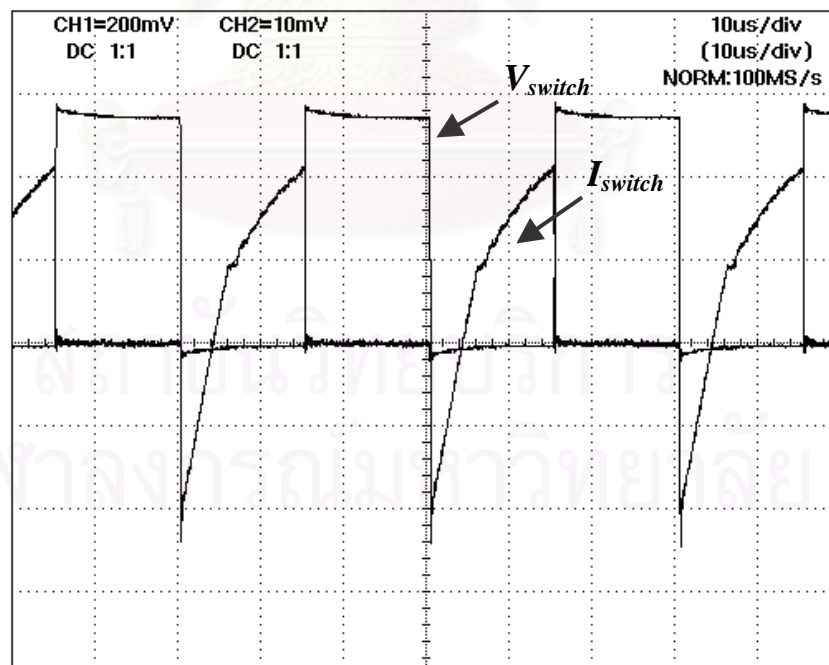
รูปที่4.17 แรงดันและกระแสที่หลอด (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



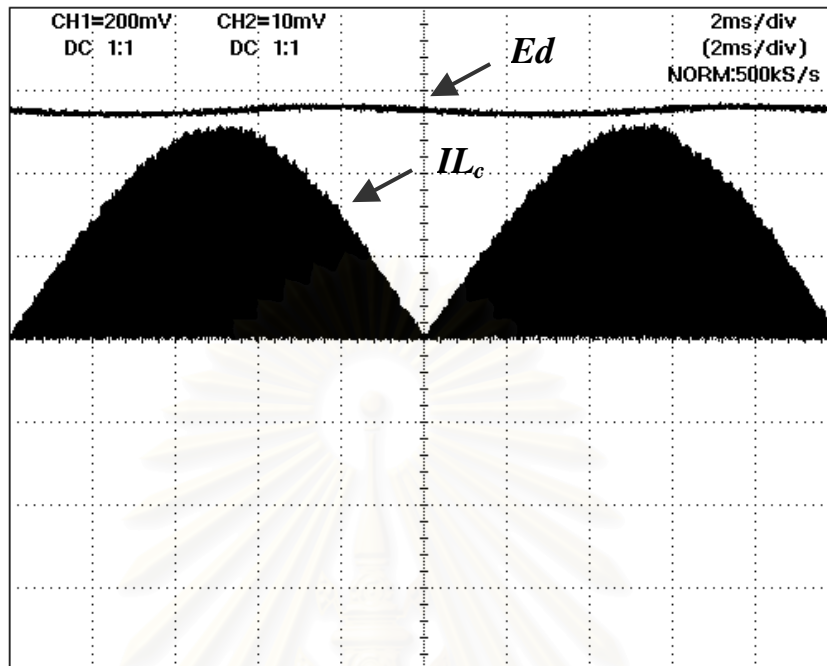
รูปที่4.18 แรงดันและกระแสด้านเข้า (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



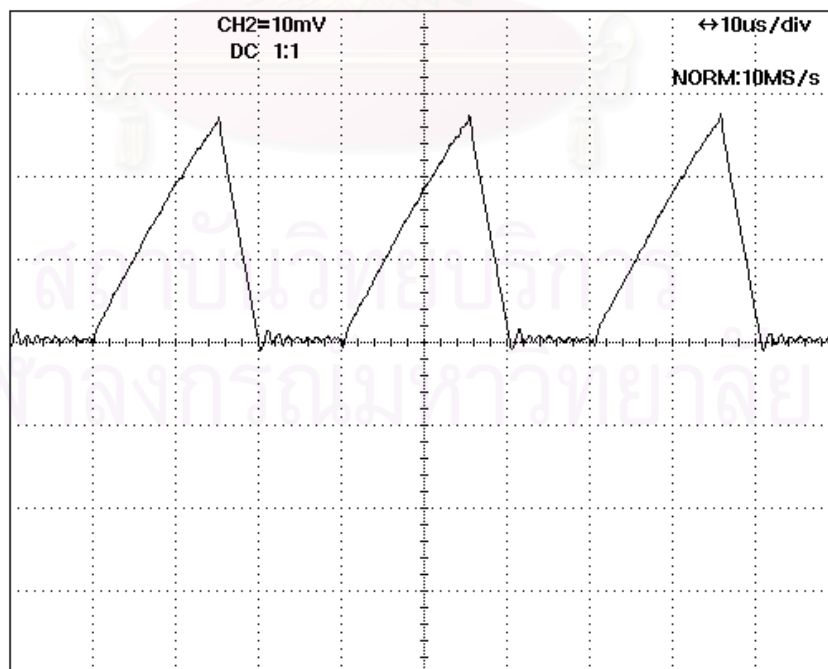
รูปที่4.19 แรงดันและกระแสด้านเข้าภาพขยาย (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



รูปที่4.20 แรงดันและกระแสที่สวิตช์ (100 V/DIV 1A/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



รูปที่4.21 แรงดันไฟตรงและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์(100 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC

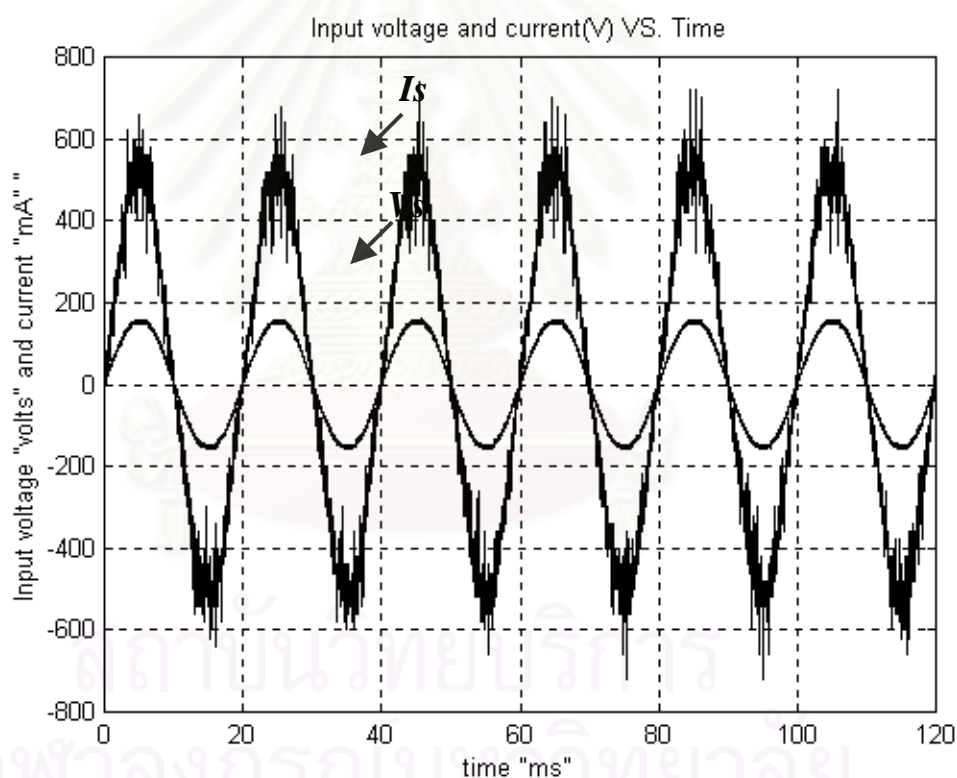


รูปที่4.22 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (500 mA/DIV)ที่แรงดัน 280 VDC

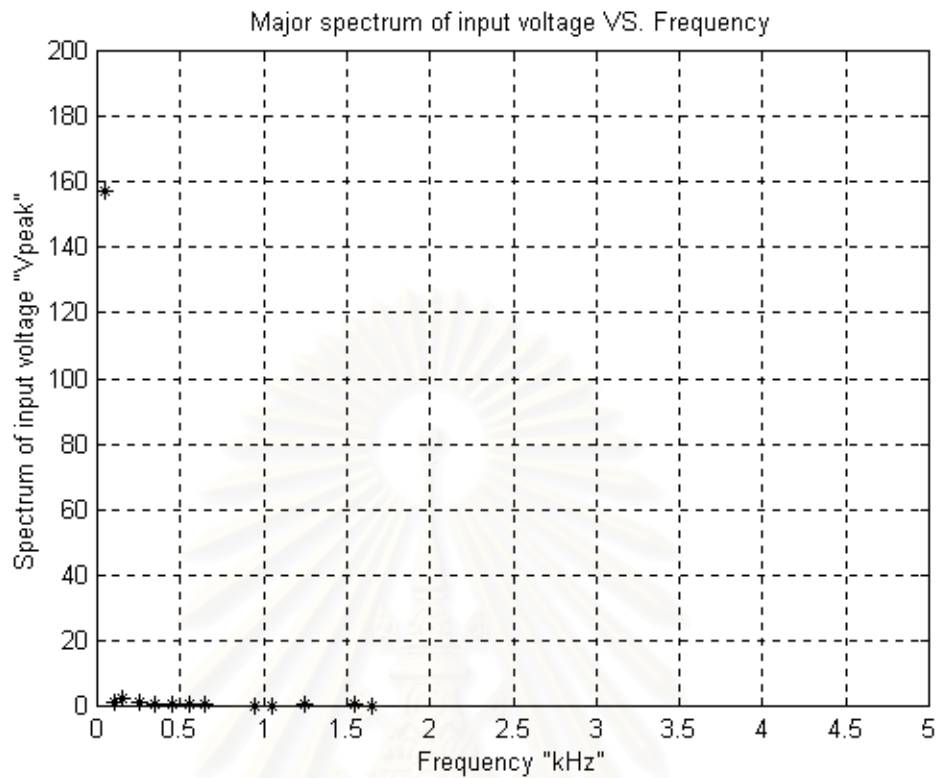
การทดลองวัดค่าความเพี้ยนกระแสด้านเข้าและค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ให้ค่าคือ THD เท่ากับ 5.64 % และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.995

4.4.1.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันด้านเข้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC

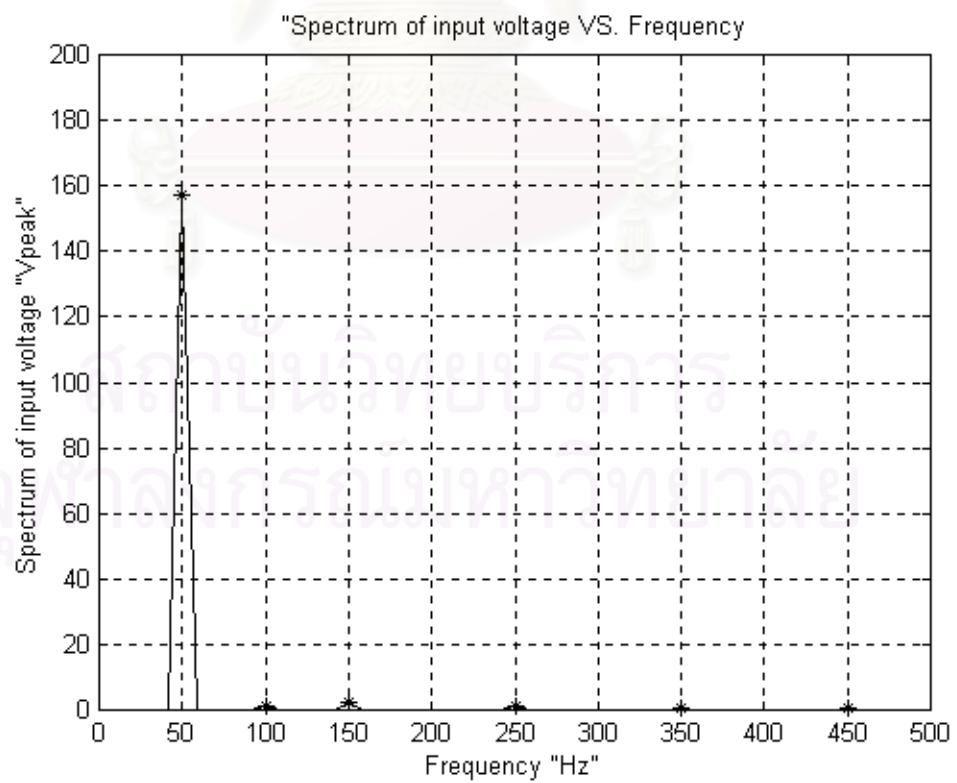
ทำการเก็บข้อมูลจากมิเตอร์ในรูปของ binary file แล้วทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงดันและกระแสด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ดังนี้



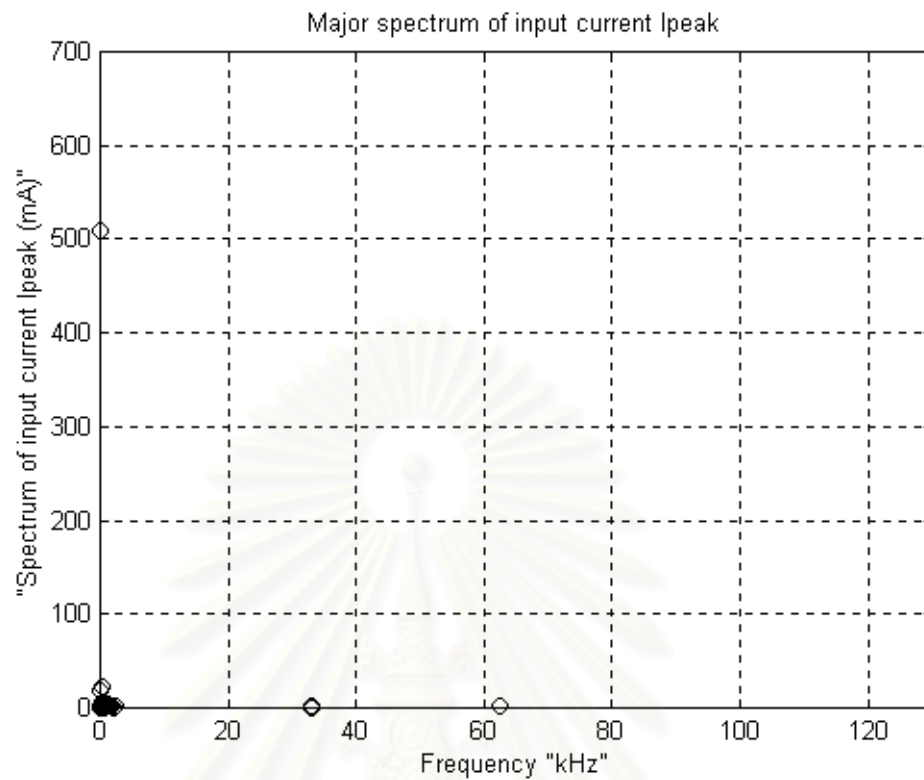
รูปที่ 4.23 แรงดันและกระแสด้านเข้าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



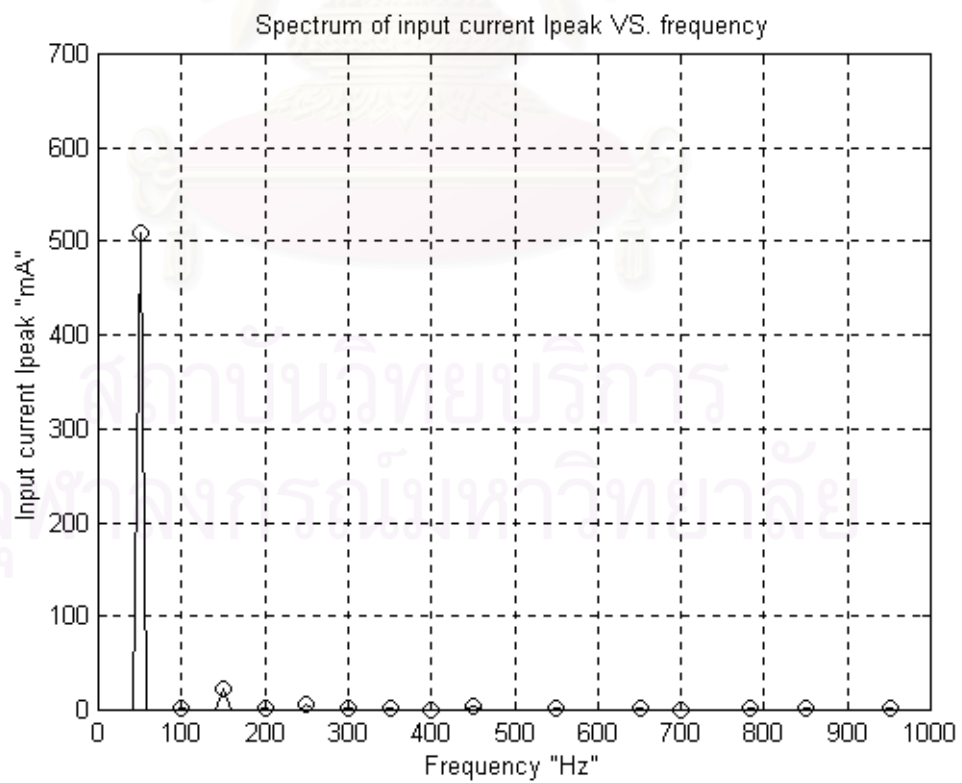
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC

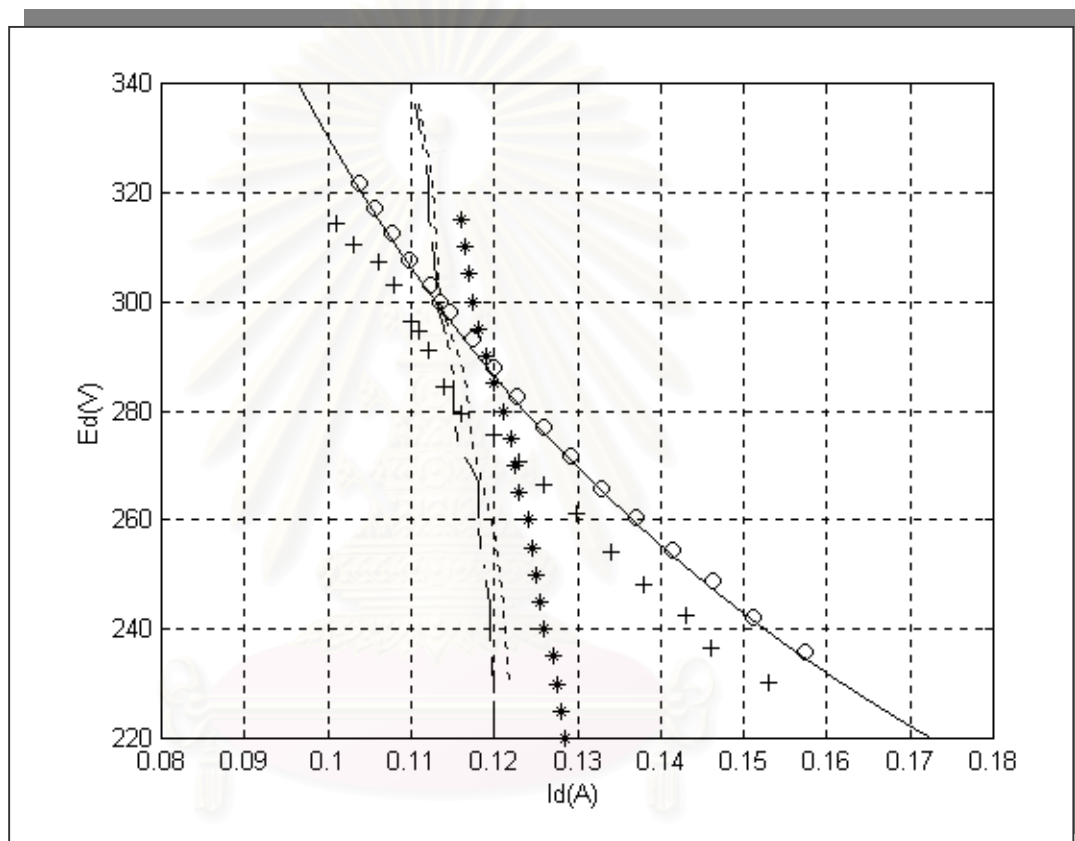


รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย) ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC

คำนวณค่าตัวประกอบกำลังได้ 0.9971 และค่า THD ของกระแสได้เท่ากับ 5.44 % จะได้ว่าค่าที่คำนวณได้และค่าที่วัดได้ต่างกันอยู่บ้าง แต่ไม่มาก

4.4.2 การทำงานที่แรงดันไฟตรงพิกัด 300 VDC

4.4.2.1 การหาจุดทำงานที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



O	การจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์
—	การคำนวณของคอนเวอร์เตอร์
+	การทดลองของคอนเวอร์เตอร์
---	การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์
---	การคำนวณของอินเวอร์เตอร์
*	การทดลองของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.28 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงาน และการทดลองที่แรงดันไฟตรง (E_d) 300 VDC

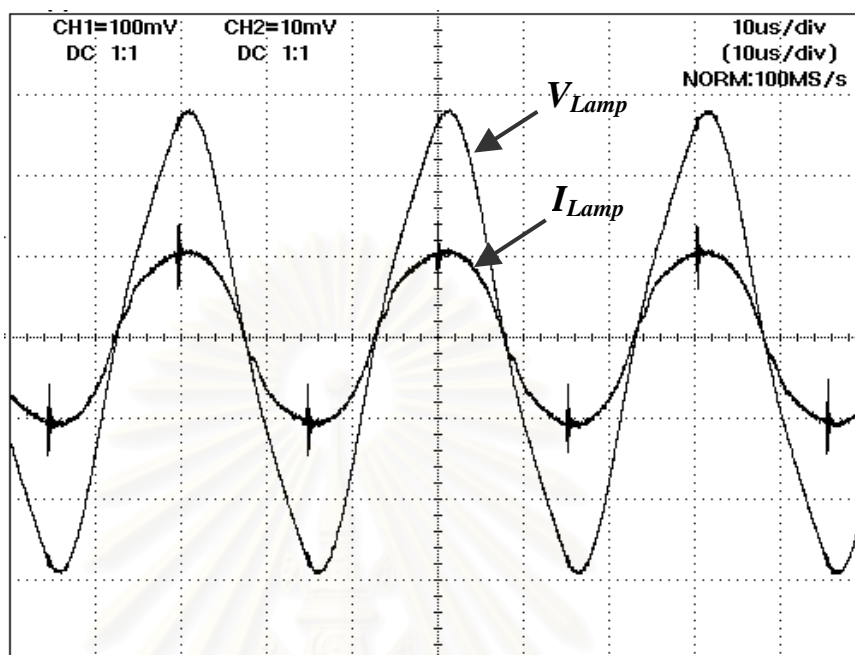
จากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าจุดตัดของกราฟที่ได้จากการทดลอง อยู่ต่ำกว่าจุดตัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยการคำนวณทางทฤษฎีจะให้จุดตัดที่ 300 V แต่จากการทดลองจะให้จุดตัดที่ 271.84 V ซึ่งน่าจะเป็นผลจากกำลังสูญเสียของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ เมื่อต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์เข้าด้วยกัน พบว่าจุดทำงานมีแรงดันไฟตรง (Ed) 270.50 V กำลังออกที่โหลด 30 W แรงดันและกระแสที่โหลดเท่ากับ 100.35 V และ 0.302 A ตามลำดับ

ดังนั้นในการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงควรจะต้องมีการชดเชยค่ากำลังสูญเสียนี้ เพื่อจะได้จุดตัดของกราฟคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ตามทีออกแบบไว้ ทำการชดเชยในรูปของประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ กับค่า L ที่ออกแบบไว้ ก็จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L ใหม่ที่มีการชดเชยประมาณเท่ากับ 0.78 mH ใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำมาสร้างเป็นวงจรบัลลาสต์ ทำการทดลองได้ค่าพิกัดแรงดันไฟตรงเท่ากับ 297.5 V ให้กำลังออกที่โหลด 32.1 W แรงดันและกระแสที่โหลดเป็น 96.73 V และ 0.335 A ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ต้องการออกแบบ

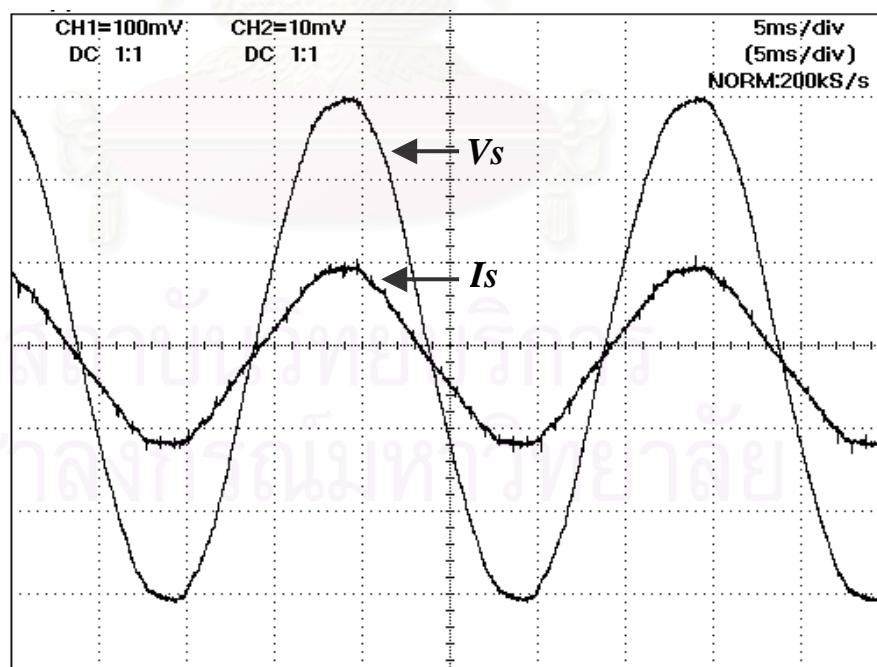
4.4.2.2 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC

รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ยืนยันถึงคุณสมบัติอันดีของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แสดงในรูปที่ 4.30 รูปที่ 4.31 แสดงกระแสด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.32 แสดงการทำงานของสวิตช์ ที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบสวิตช์แรงดันศูนย์ และรูปที่ 4.29 แสดงกระแสและแรงดันที่โหลด

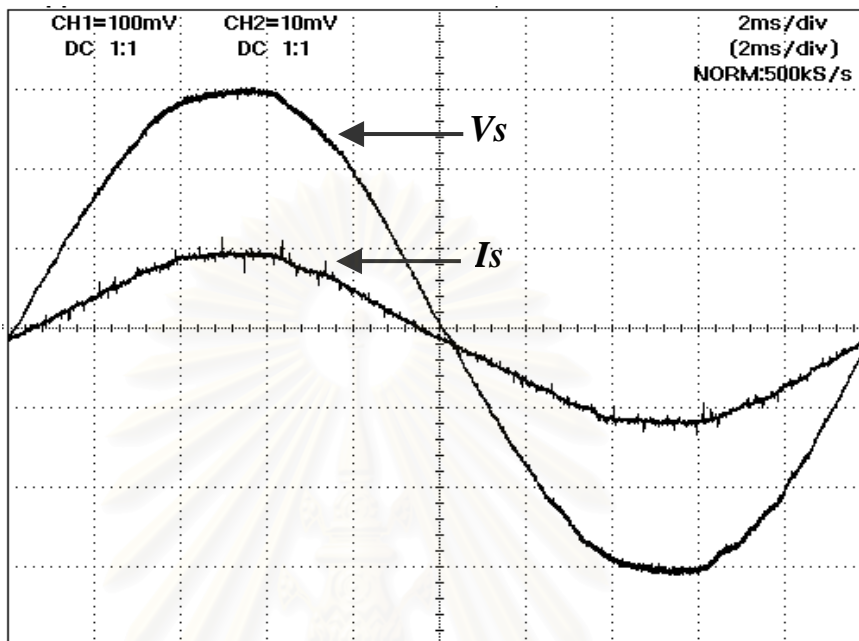
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



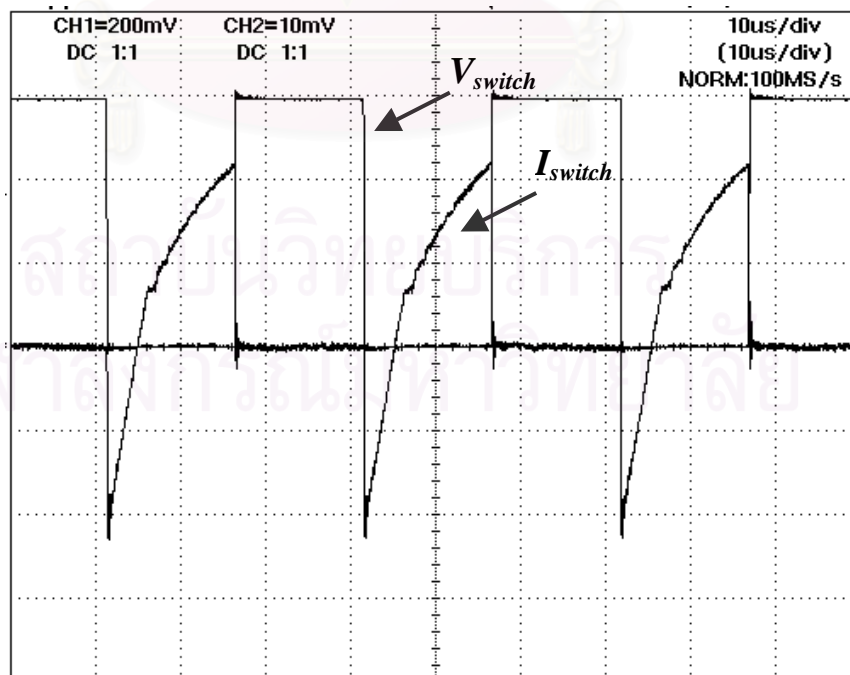
รูปที่4.29 แรงดันและกระแสที่โหลด (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



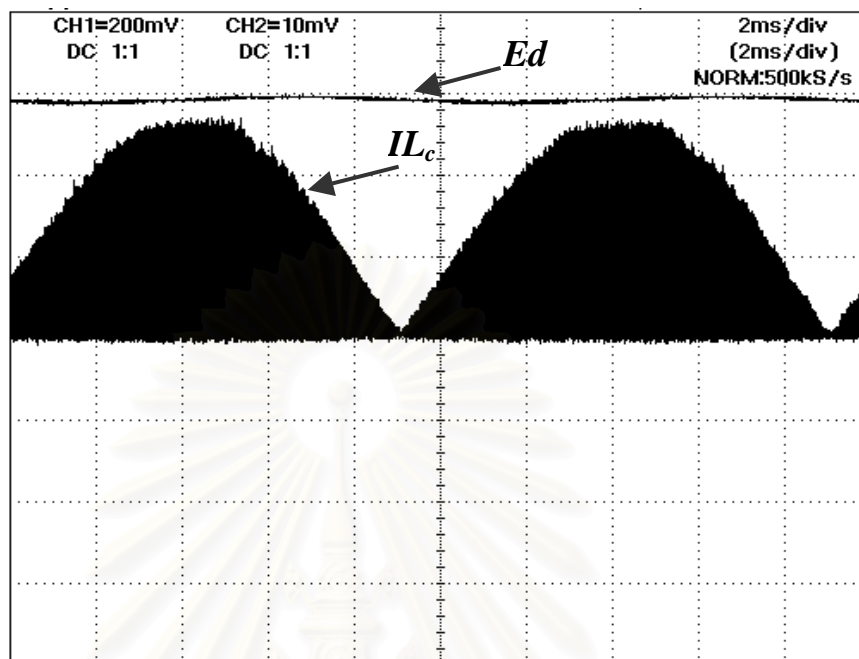
รูปที่4.30 แรงดันและกระแสด้านเข้า (50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



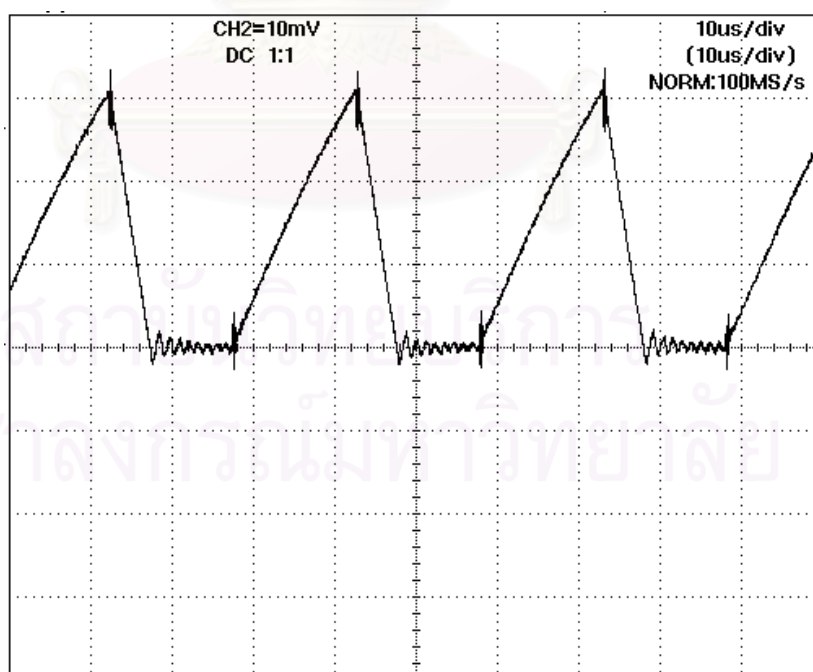
รูปที่4.31 แรงดันและกระแสด้านเข้าภาพขยาย(50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



รูปที่4.32 แรงดันและกระแสที่สวิตช์ (100 V/DIV 1A/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



รูปที่4.33 แรงดันไฟตรงและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (100 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC

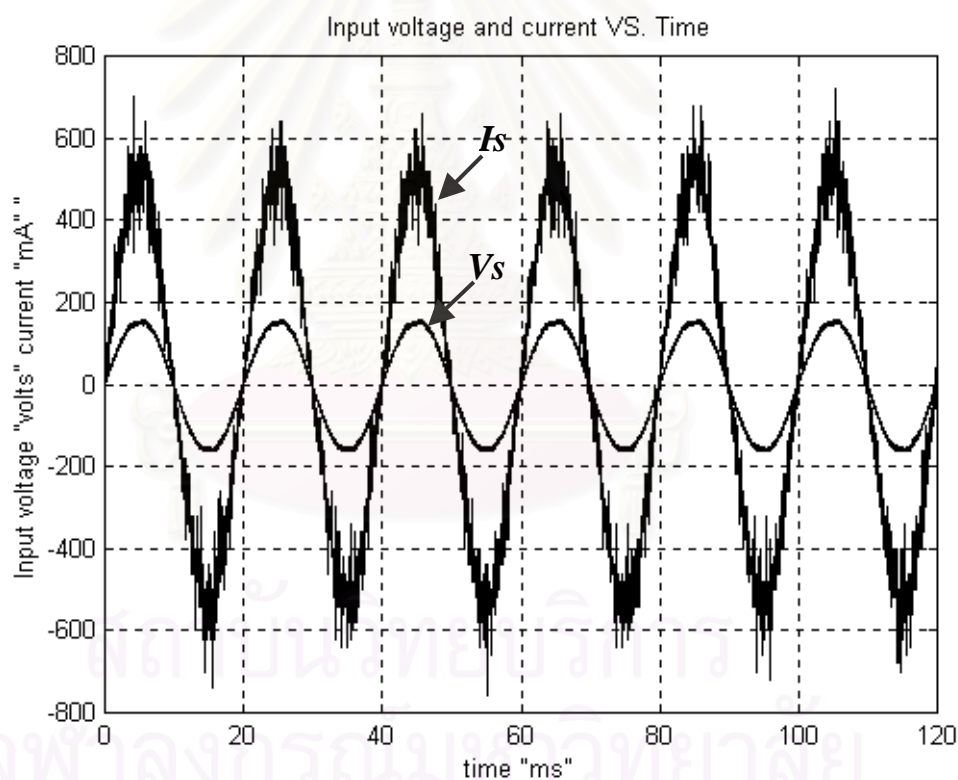


รูปที่4.34 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC

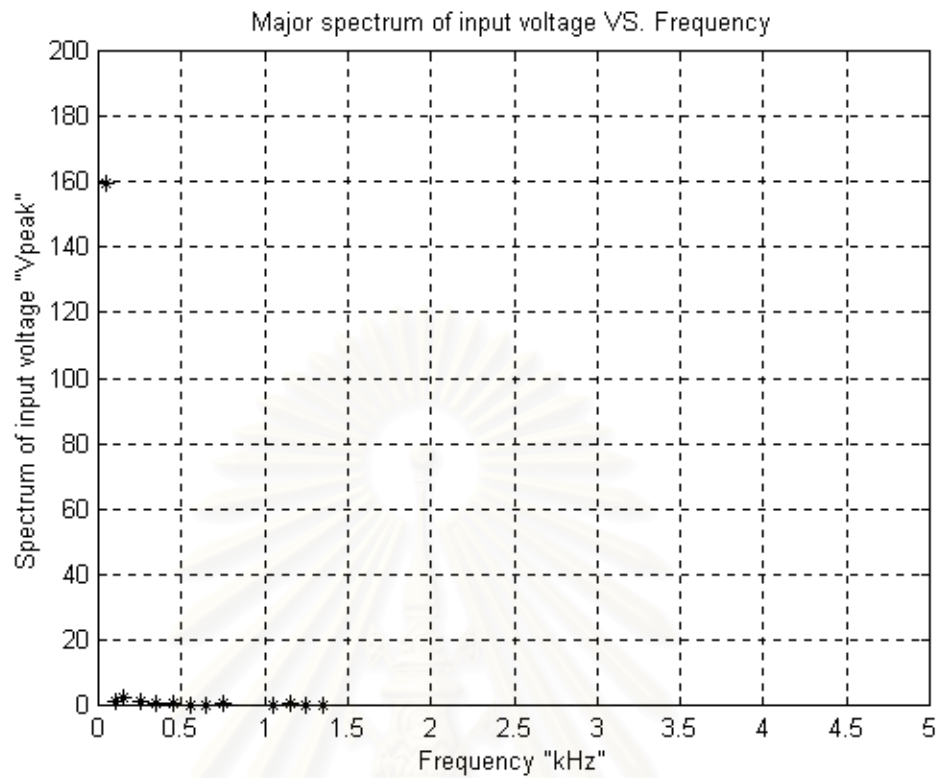
การทดลองวัดค่าความเพี้ยนกระแสด้านเข้าและค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ให้ค่าคือ THD เท่ากับ 5.25 % และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.997

4.4.2.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันด้านเข้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC

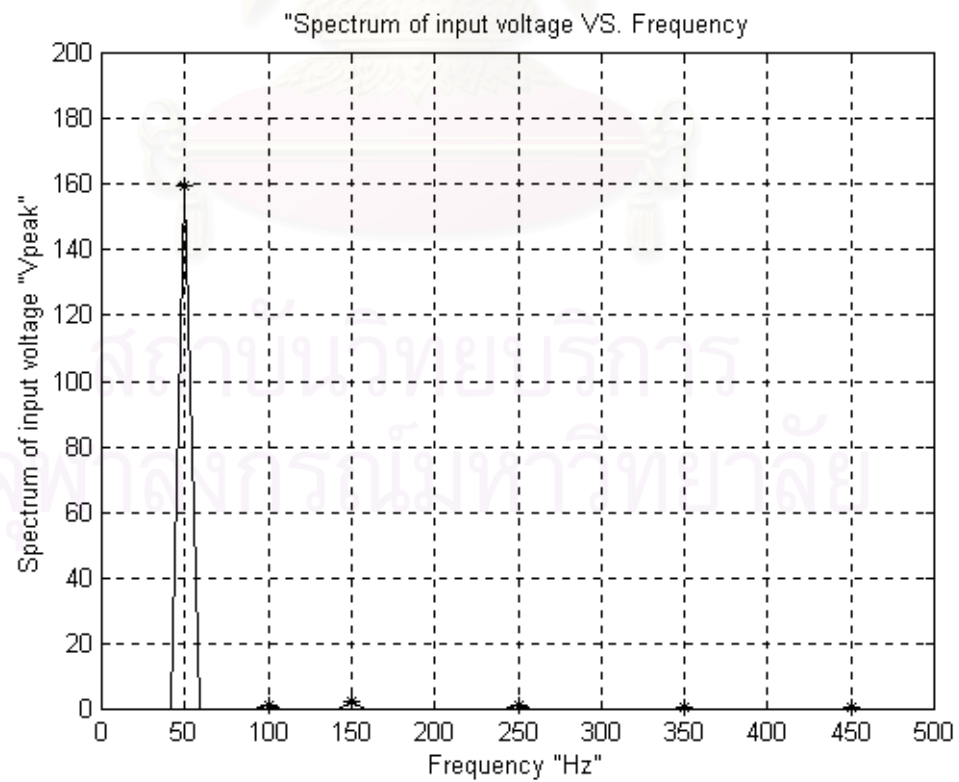
ทำการเก็บข้อมูลจากมิเตอร์ในรูปของ binary file แล้วทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงดันและกระแสด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ดังนี้



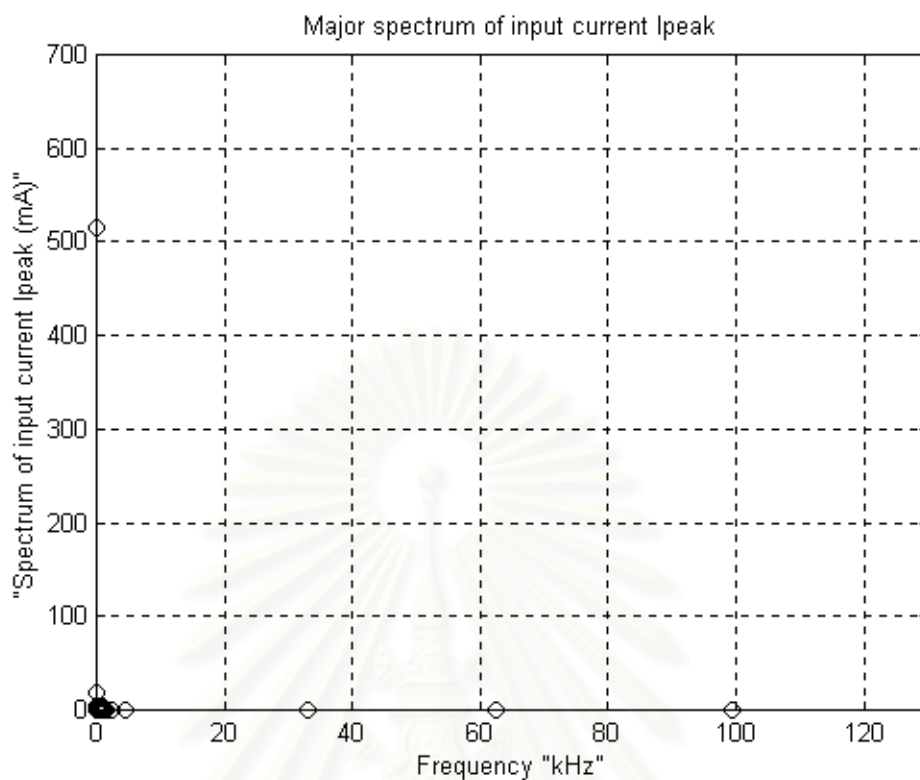
รูปที่ 4.35 แรงดันและกระแสด้านเข้าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



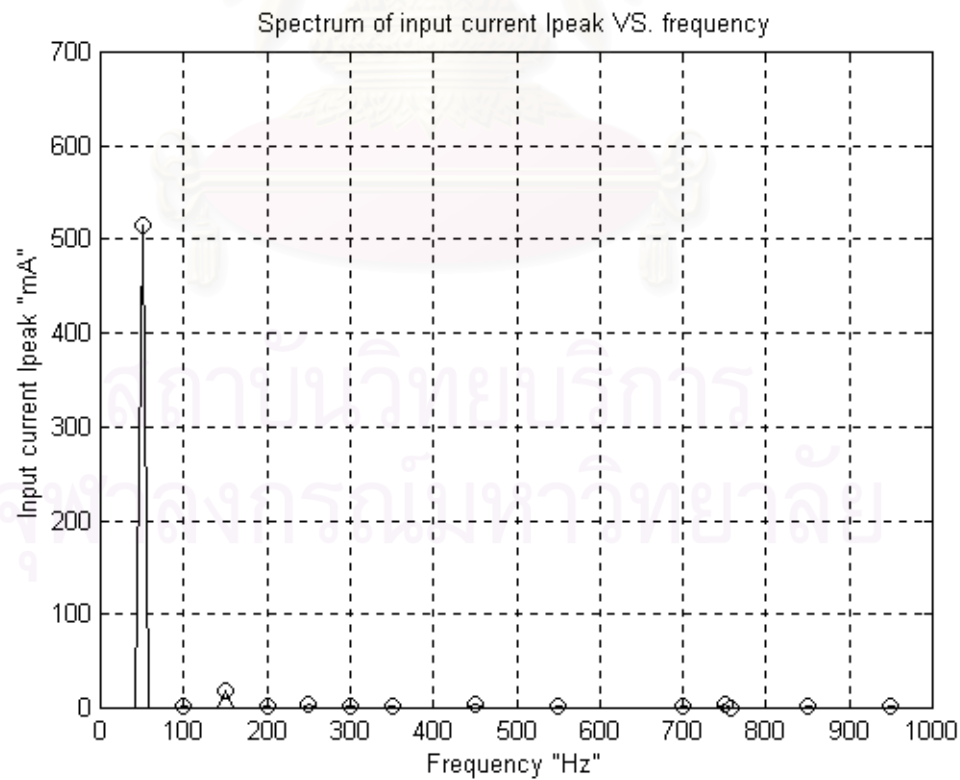
รูปที่4.36 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



รูปที่4.37 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC



รูปที่ 4.38 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC

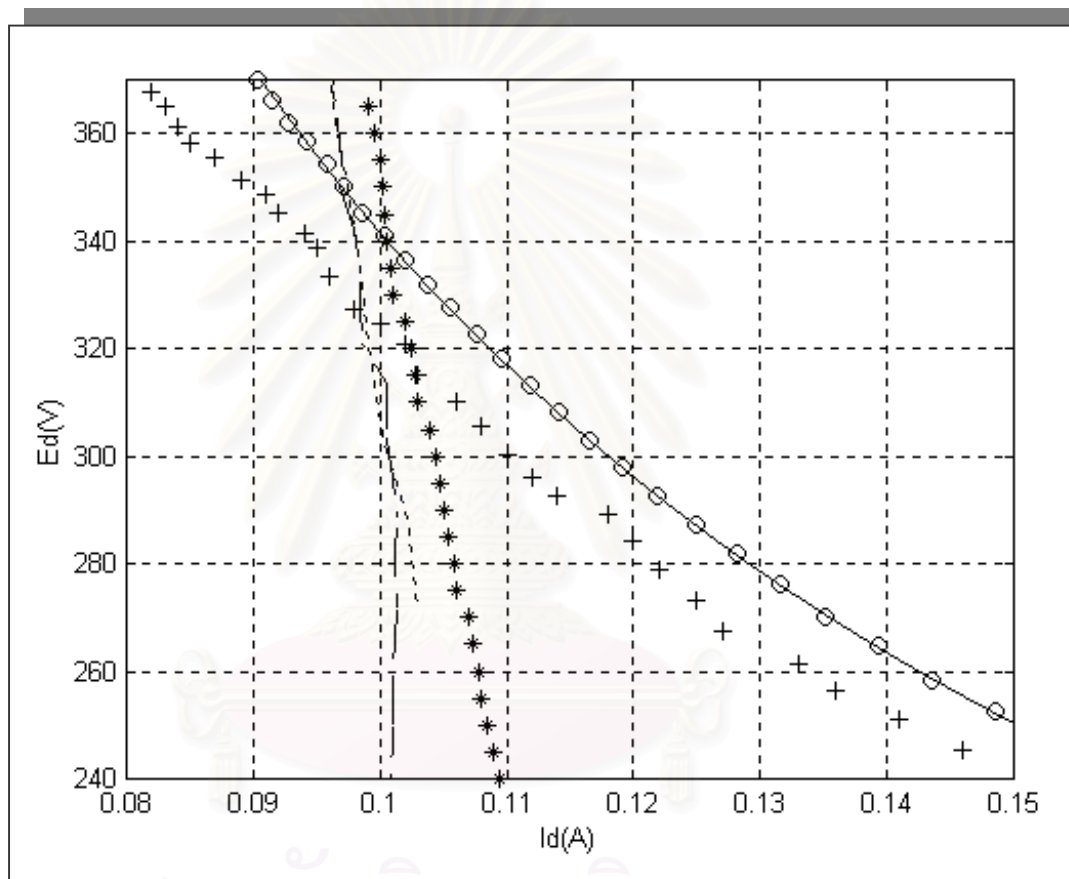


รูปที่ 4.39 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 300 VDC

คำนวณค่าตัวประกอบกำลังได้ 0.9973 และค่า THD ของกระแสได้เท่ากับ 5.17 % จะได้ว่าค่าที่คำนวณได้และค่าที่วัดได้ต่างกันอยู่บ้าง แต่ไม่มาก

4.4.3 การทำงานที่แรงดันไฟตรงพิกัด 350 VDC

4.4.3.1 การหาจุดทำงานที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



- | | |
|-----|----------------------------------|
| O | การจำลองการทำงานของคอนเวอเตอร์ |
| — | การคำนวณของคอนเวอเตอร์ |
| + | การทดลองของคอนเวอเตอร์ |
| --- | การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ |
| --- | การคำนวณของอินเวอร์เตอร์ |
| * | การทดลองของอินเวอร์เตอร์ |

รูปที่ 4.40 กราฟคุณสมบัติของวงจรคอนเวอเตอร์และอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี การจำลองการทำงานของวงจร และการทดลองที่แรงดันไฟตรง (E_d) 350 VDC

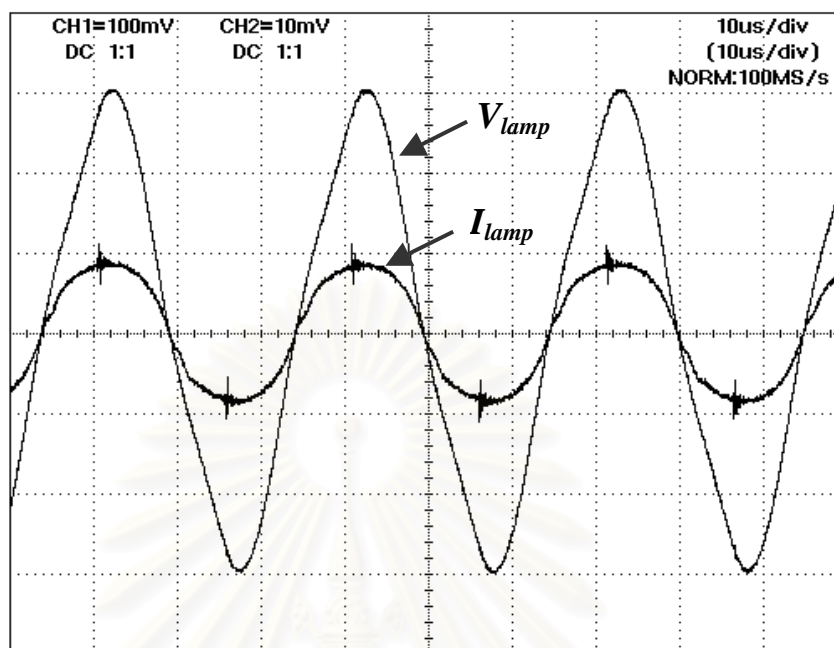
จากรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าจุดตัดของกราฟที่ได้จากการทดลอง อยู่ต่ำกว่าจุดตัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยการคำนวณทางทฤษฎีจะให้จุดตัดที่ 350 V แต่จากการทดลองจะให้จุดตัดที่ 317.08 V ซึ่งน่าจะเป็นผลจากกำลังสูญเสียของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ เมื่อต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์เข้าด้วยกัน พบว่าจุดทำงานมีแรงดันไฟตรง (Ed) 315.98 V กำลังออกที่โหลด 29.4 W แรงดันและกระแสที่โหลดเท่ากับ 103.39 V และ 0.288 A ตามลำดับ

ดังนั้นในการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงควรจะต้องมีการชดเชยค่ากำลังสูญเสียนี้ เพื่อจะได้จุดตัดของกราฟคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ตามที่ต้องการได้ ทำการชดเชยในรูปของประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ กับค่า L ที่ออกแบบไว้ ก็จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L ใหม่ที่มีการชดเชยประมาณเท่ากับ 0.75 mH ใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำมาสร้างเป็นวงจรบัลลาสต์ ทำการทดลองได้ค่าพิกัดแรงดันไฟตรงเท่ากับ 348.60 V ให้กำลังออกที่โหลด 32.2 W แรงดันและกระแสที่โหลดเป็น 98.53 V และ 0.330 A ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ต้องการออกแบบ

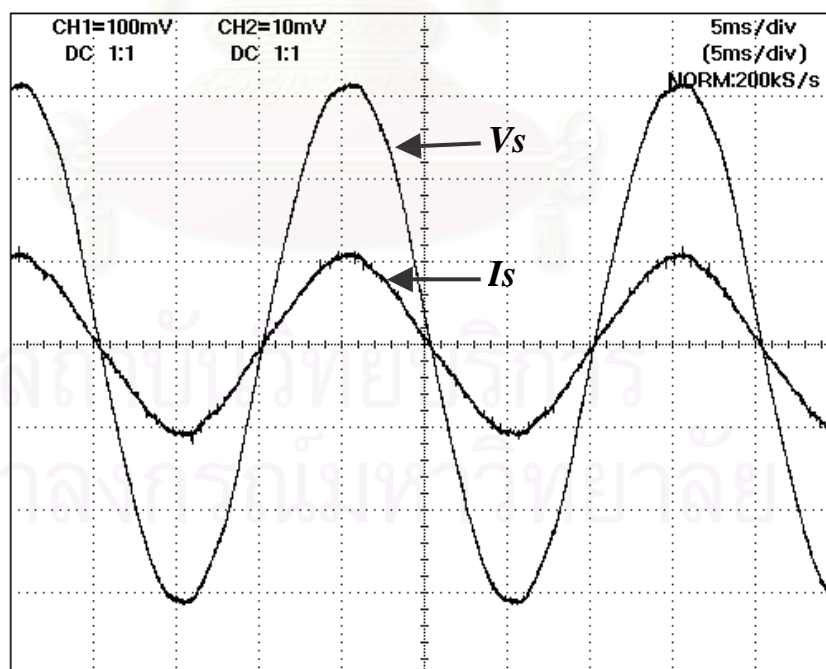
4.4.3.2 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบระดับแบบคู่ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC

รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ยื่นขึ้นถึงคุณสมบัติอันดีของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ แสดงในรูปที่ 4.42 รูปที่ 4.43 แสดงกระแสด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.44 แสดงการทำงานของสวิทช์ ที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบสวิทช์แรงดันศูนย์ และรูปที่ 4.41 แสดงกระแสและแรงดันที่โหลด

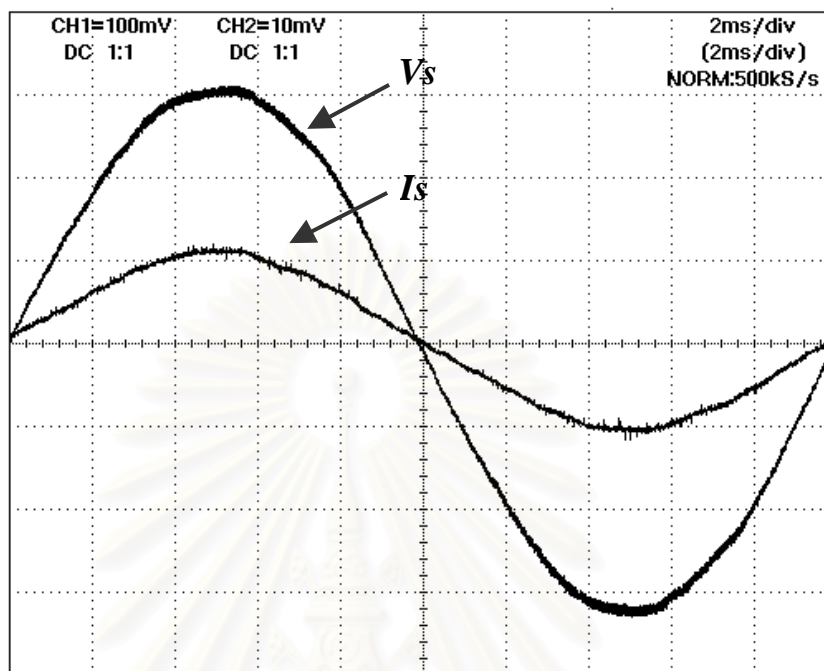
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่4.41 แรงดันและกระแสที่หลอด (50 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



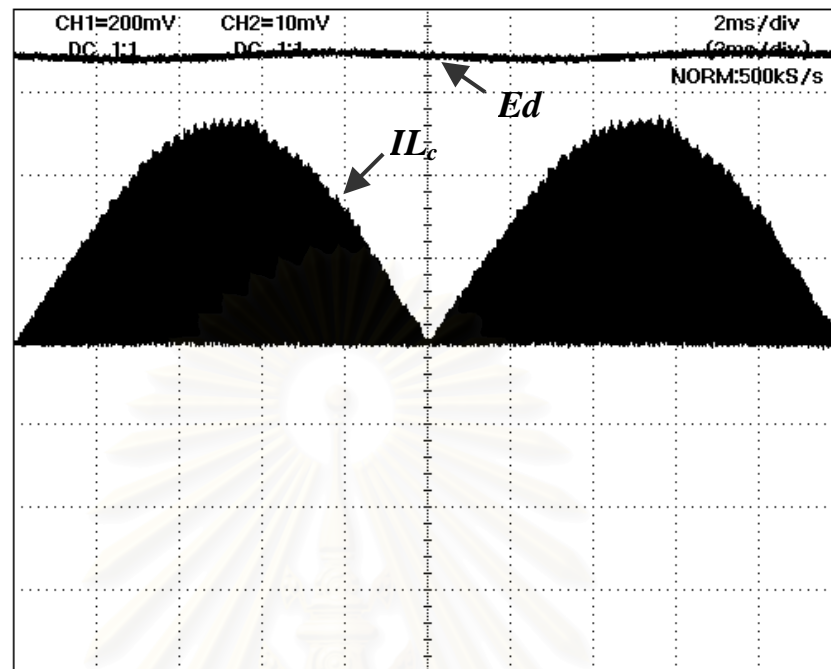
รูปที่4.42 แรงดันและกระแสด้านเข้า (50 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



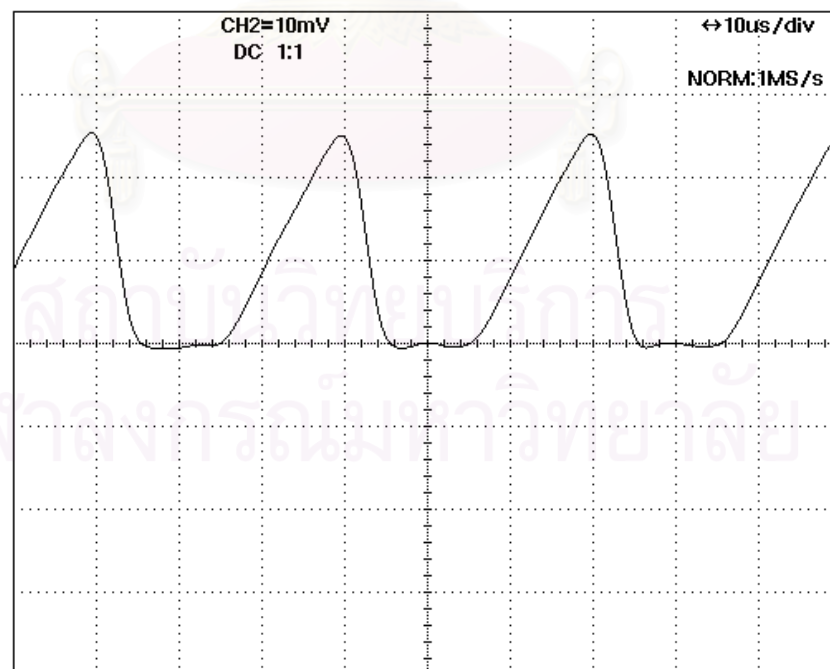
รูปที่4.43 แรงดันและกระแสด้านเข้าภาพขยาย(50 V/DIV 500 mA/DIV)ที่แรงดันไฟตรง 350VDC



รูปที่4.44 แรงดันและกระแสที่สวิตช์ (100 V/DIV 1A/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



รูปที่ 4.45 แรงดันไฟตรงและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (100 V/DIV 500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC

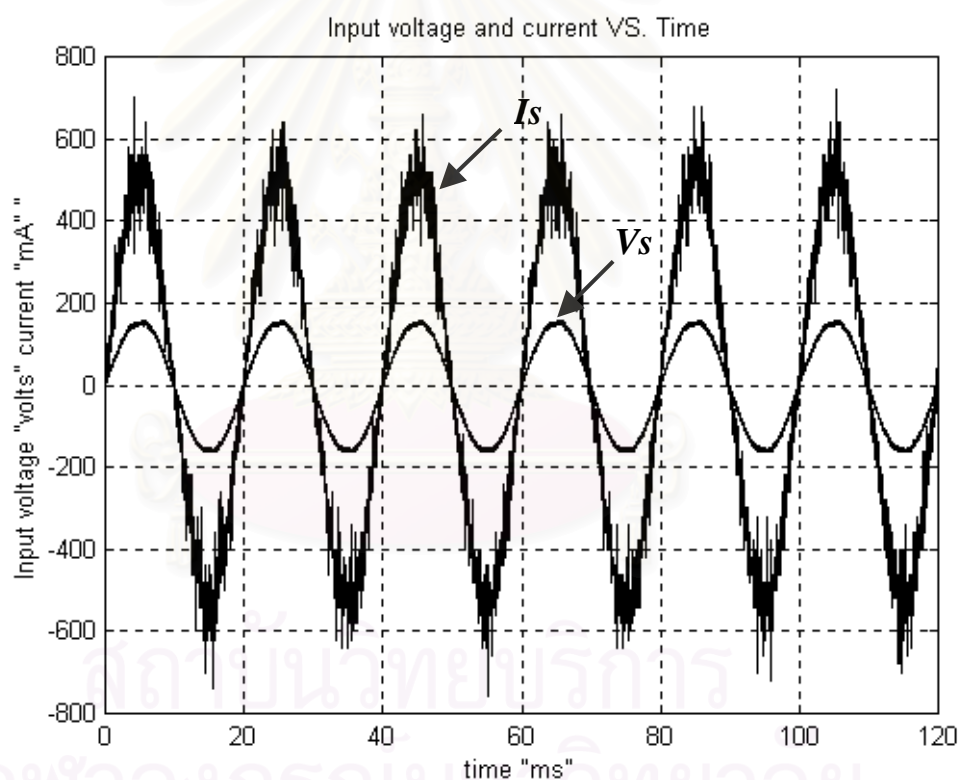


รูปที่ 4.46 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์ (500 mA/DIV) ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC

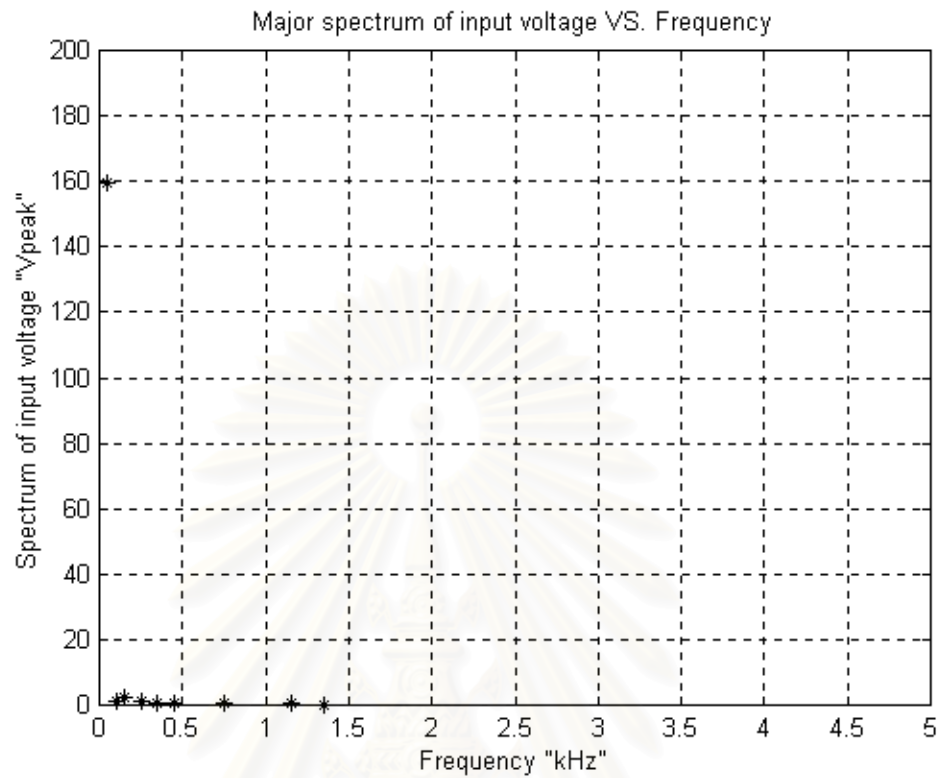
การทดลองวัดค่าความเพี้ยนกระแสด้านเข้าและค่าตัวประกอบกำลังของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ให้ค่า THD เท่ากับ 4.58 % และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.998

4.4.3.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันด้านเข้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC

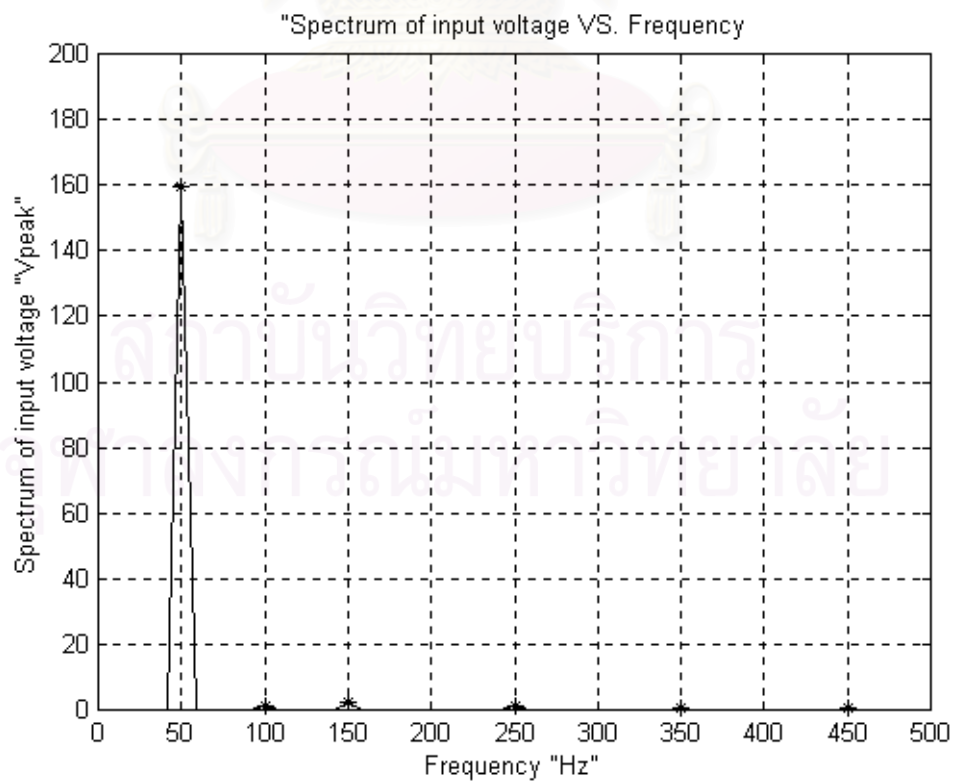
ทำการเก็บข้อมูลจากมิเตอร์ในรูปของ binary file แล้วทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงดันและกระแสด้านเข้าของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ดังนี้



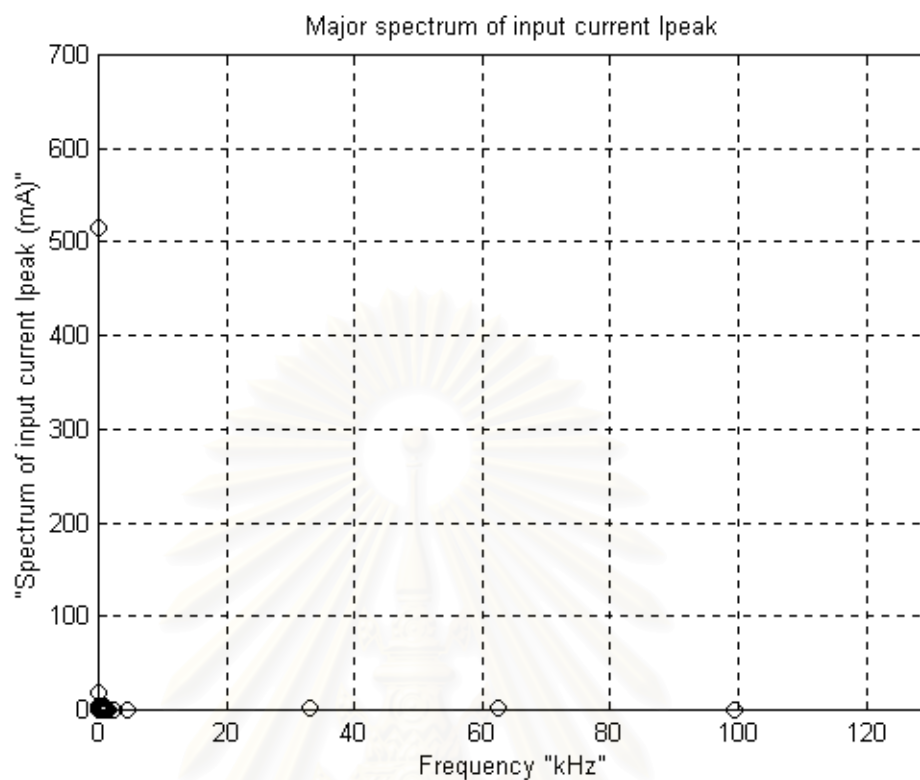
รูปที่4.47 แรงดันและกระแสด้านเข้าจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดัน ไฟตรง 350VDC



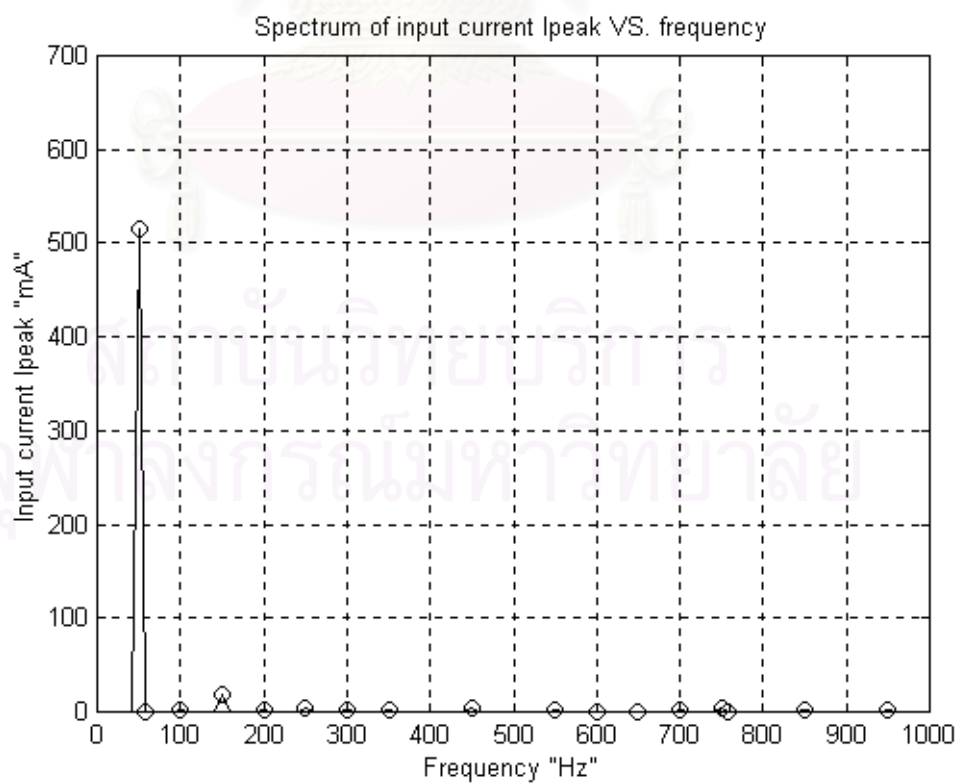
รูปที่4.48 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



รูปที่4.49 สเปกตรัมของแรงดันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



รูปที่ 4.50 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



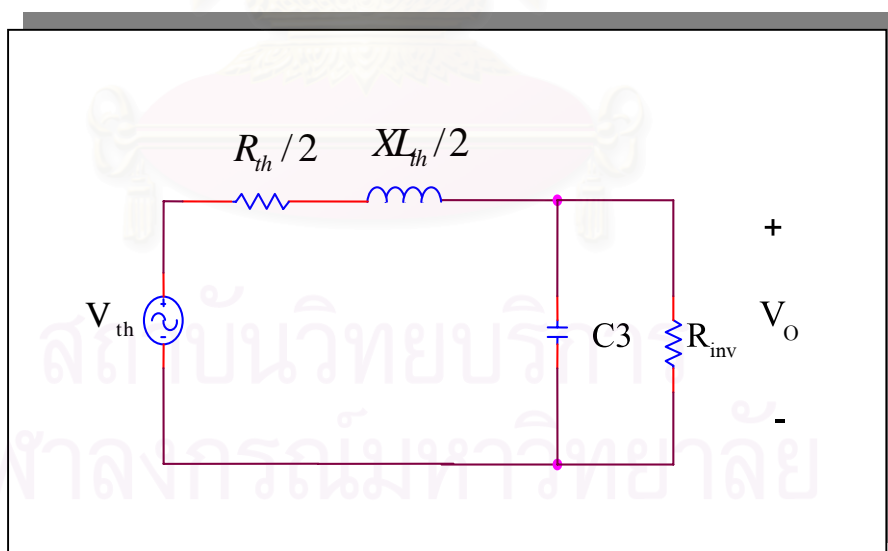
รูปที่ 4.51 สเปกตรัมของกระแสจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์(ภาพขยาย)ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC

คำนวณค่าตัวประกอบกำลังได้ 0.9973 และค่า THD ได้เท่ากับ 4.36 % จะได้ว่าค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้มีค่าต่างกันบ้าง แต่ไม่มาก

จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ายิ่งแรงดัน ไฟตรง (E_d) มีค่าสูงเท่าไร ค่าความเพี้ยนของกระแสหรือค่ากระแสรวมฮาร์มอนิกทางด้านเข้า และค่าตัวประกอบกำลังก็ยิ่งมีค่าดีขึ้นเท่านั้น สอดคล้องกับสมการที่ 2.34 ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นกระแสด้านเข้าเฉลี่ยในหนึ่งคาบ คือถ้าต้องการทำให้ความเพี้ยนของกระแสด้านเข้ามีค่าน้อย หรือให้กระแสฮาร์มอนิกมีค่าน้อยควรออกแบบให้ v_S / E_d มีค่าน้อย ก็คือให้ E_d มีค่ามาก เมื่อ v_S คงที่

4.5 การทดสอบความมีเสถียรภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่

จากการศึกษาเสถียรภาพของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และจากแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่ ที่หาได้ แสดงดังรูป 4.52



รูปที่ 4.52 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทบทระดับแบบคู่

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้เพื่อการคำนวณ

$$R_{th} = \frac{r_2 [r_1^2 + (1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L^2]}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2}$$

$$XL_{th} = \frac{r_1^2 r_2^2 g_1 g_2 X_L}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2}$$

ทดสอบที่แรงดัน 280 VDC

$$D = 0.5 \quad L = 0.80 \text{ mH} \quad C3 = 69 \text{ uF}$$

$$Ed = 280 \text{ V} \quad V_s \sin \omega t = 156 \sin \omega t \quad (50 \text{ Hz})$$

$$D'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\left(\frac{2Ed}{V_s \sin \omega t} \right) - 1} d\omega t$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{4Ed \left[-2 \tan^{-1} \left[\frac{2Ed - V_s}{\sqrt{(4Ed^2 - V_s^2)}} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{V_s}{\sqrt{(4Ed^2 - V_s^2)}} \right] \right]}{\sqrt{(4Ed^2 - V_s^2)}} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{4Ed \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{(2Ed - V_s)}}{\sqrt{(2Ed + V_s)}} \right]}{\sqrt{(4Ed^2 - V_s^2)}} \right]$$

$$D'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\left(\frac{2 \cdot 280}{156 \sin \omega t} \right) - 1} d\omega t$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1120 \left[-2 \tan^{-1} \left[\frac{560 - 156}{\sqrt{(4(280)^2 - (156)^2)}} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{156}{\sqrt{(4(280)^2 - (156)^2)}} \right] \right]}{\sqrt{(4(280)^2 - (156)^2)}} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{1120 \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{(560 - 156)}}{\sqrt{(560 + 156)}} \right]}{\sqrt{(4(280)^2 - (156)^2)}} \right]$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1120 \left[-2 \tan^{-1} [0.7512] - \tan^{-1} [0.2901] \right]}{537.83} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{1120 \tan^{-1} [0.7512]}{537.83} \right]$$

$$D'' = 0.114 \quad M = \frac{D + D''}{D} = 5.386 \quad R_{conv} = 2136.36 \ \Omega$$

$$R_{inv} = -6667 \ \Omega \quad r1 = \frac{(M-1)R_{inv}}{M^3} = -187.15 \quad g1 = \frac{M}{(M-1)R_{inv}} = -1.84 \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{(M-1)R_{inv}}{M} = -5429.16 \quad g_2 = \frac{M(2M-1)}{(M-1)R_{inv}} = -1.79 \times 10^{-3}$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.52 จะได้ว่า

$$R_{th} = \frac{r_2 [r_1^2 + (1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L^2]}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2}$$

$$R_{th} = \frac{-1.90 \times 10^8 - 2.30 \times 10^{-3} \omega^2}{3.50 \times 10^4 + 7.92 \times 10^{-14} \omega^2} \Omega$$

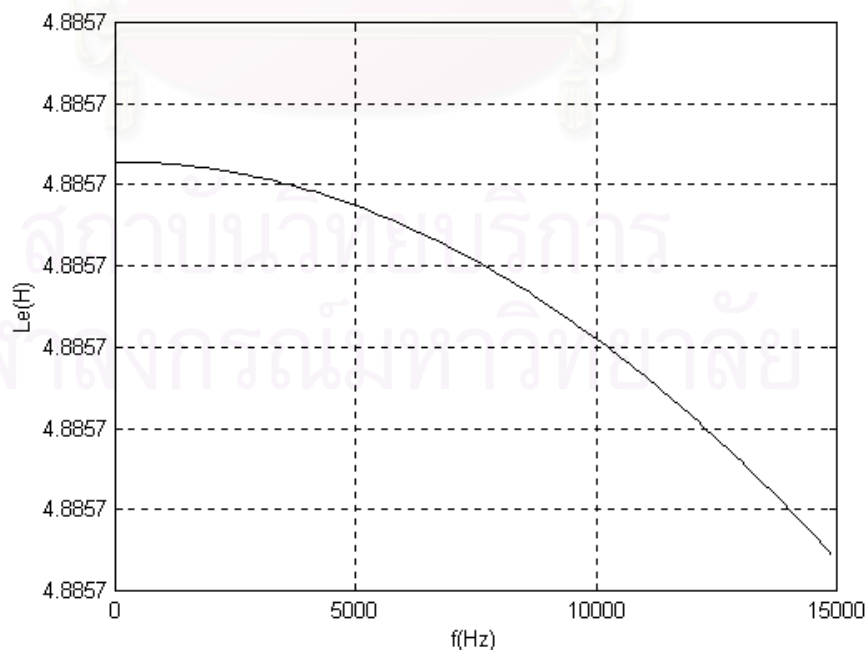
$$R_{th} / 2 = \frac{-9.50 \times 10^7 - 1.15 \times 10^{-3} \omega^2}{3.50 \times 10^4 + 7.92 \times 10^{-14} \omega^2} \Omega$$

$$X_{L_{th}} = \frac{r_1^2 r_2^2 g_1 g_2 X_L}{r_1^2 + [(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L]^2}$$

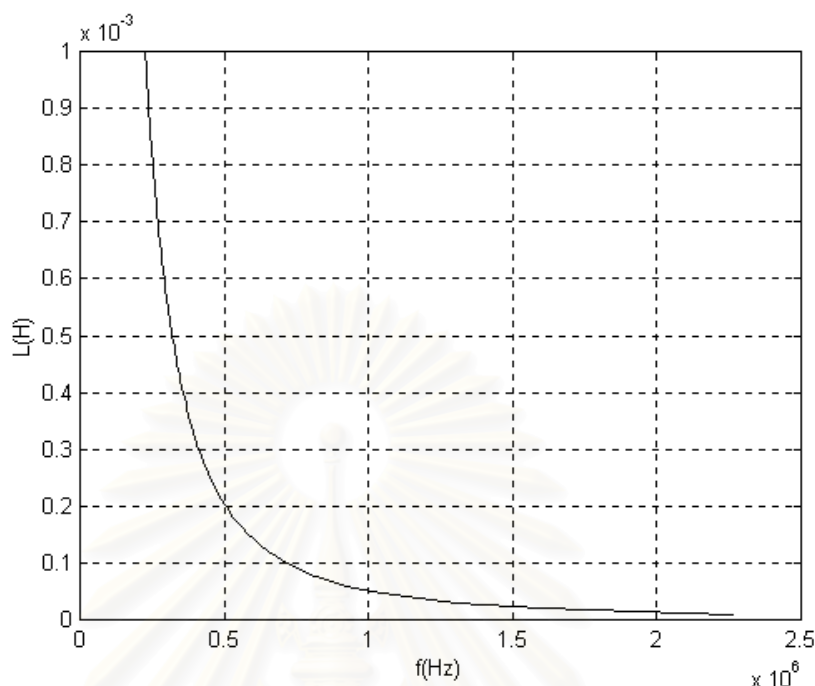
$$X_{L_{th}} = \frac{3.42 \times 10^5 \omega}{3.50 \times 10^4 + 7.92 \times 10^{-14} \omega^2} \Omega$$

$$X_{L_{th}} / 2 = \frac{1.71 \times 10^5 \omega}{3.50 \times 10^4 + 7.92 \times 10^{-14} \omega^2} \Omega$$

นำ $X_{L_{th}} / 2$ ที่คำนวณได้มาหาตัวเหนี่ยวนำเสมือน (L_e) ที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรสมมูลที่ความถี่ค่าต่างๆ โดยพล็อตเป็นกราฟ เปรียบเทียบกับกราฟของตัวเหนี่ยวนำจริง (L) ที่จะทำให้เกิดแกว่งที่ความถี่ค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.53 ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC



รูปที่ 4.54 ตัวเหนี่ยวนำจริงที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 280 VDC

จากรูปที่ 4.53 และรูปที่ 4.54 พบว่าไม่มีความถี่ใดของการแกว่งที่ทำให้ตัวเหนี่ยวนำจริงและตัวเหนี่ยวนำเสมือนเท่ากัน แสดงว่าไม่มีความถี่ที่เป็นจริงที่ทำให้วงจรเกิดการแกว่งที่ความถี่ค่านั้นๆ ขึ้นจริง จะได้ว่าวงจรนี้ไม่มีการแกว่งเกิดขึ้น ดังนั้นวงจรนี้จึงมีเสถียรภาพ

ทดสอบที่แรงดัน 300 VDC

$$D = 0.5 \quad L = 0.78 \text{ mH} \quad C3 = 69 \text{ uF}$$

$$E_d = 300 \text{ V} \quad V_s \sin \omega t = 156 \sin \omega t \text{ (50 Hz) V}$$

$$D'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\left(\frac{2E_d}{V_s \sin \omega t} \right) - 1} d\omega t$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1200 \left[-2 \tan^{-1} \left[\frac{600-156}{\sqrt{(4(300)^2 - (156)^2)}} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{156}{\sqrt{(4(300)^2 - (156)^2)}} \right] \right]}{\sqrt{(4(300)^2 - (156)^2)}} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{1200 \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{(600-156)}}{\sqrt{(600+156)}} \right]}{\sqrt{(4(300)^2 - (156)^2)}} \right]$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1200 \left[-2 \tan^{-1} [0.766] - \tan^{-1} [0.269] \right]}{579.36} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{1200 \tan^{-1} [0.766]}{579.36} \right]$$

$$D'' = 0.091 \quad M = \frac{D + D''}{D} = 6.49 \quad R_{\text{conv}} = 2857.14 \, \Omega$$

$$R_{\text{inv}} = -10000 \, \Omega \quad r_1 = \frac{(M-1)R_{\text{inv}}}{M^3} = -200.83 \quad g_1 = \frac{M}{(M-1)R_{\text{inv}}} = -1.18 \times 10^{-4}$$

$$r_2 = \frac{(M-1)R_{\text{inv}}}{M} = -8459.16 \quad g_2 = \frac{M(2M-1)}{(M-1)R_{\text{inv}}} = -1.42 \times 10^{-3}$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.52 จะได้ว่า

$$R_{\text{th}} = \frac{r_2 \left[r_1^2 + (1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L^2 \right]}{r_1^2 + \left[(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L \right]^2}$$

$$R_{\text{th}} = \frac{-3.41 \times 10^8 - 3.68 \times 10^{-3} \omega^2}{4.03 \times 10^4 + 9.71 \times 10^{-14} \omega^2} \, \Omega$$

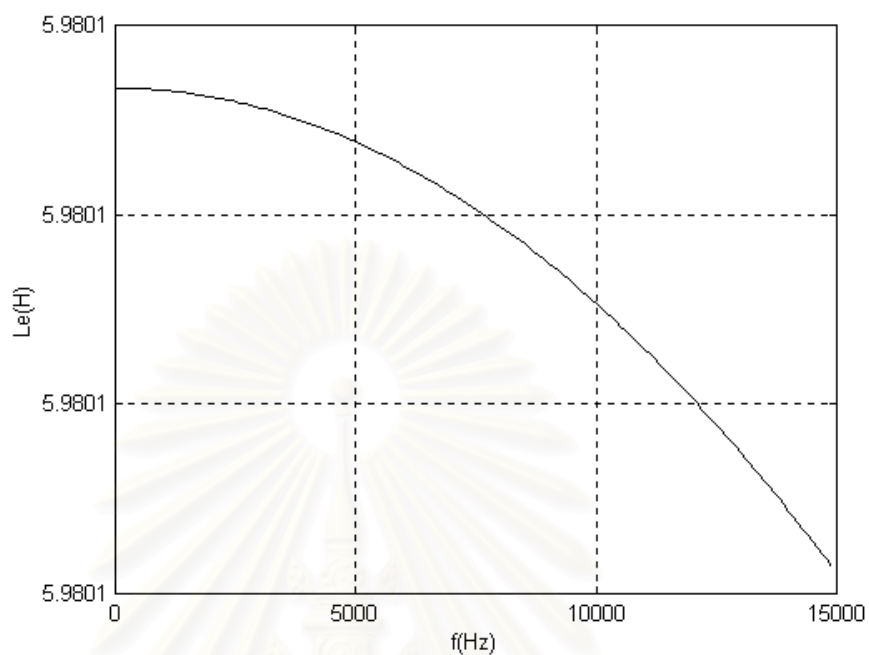
$$R_{\text{th}} / 2 = \frac{-1.71 \times 10^8 - 1.84 \times 10^{-3} \omega^2}{4.03 \times 10^4 + 9.71 \times 10^{-14} \omega^2} \, \Omega$$

$$XL_{\text{th}} = \frac{r_1^2 r_2^2 g_1 g_2 X_L}{r_1^2 + \left[(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L \right]^2}$$

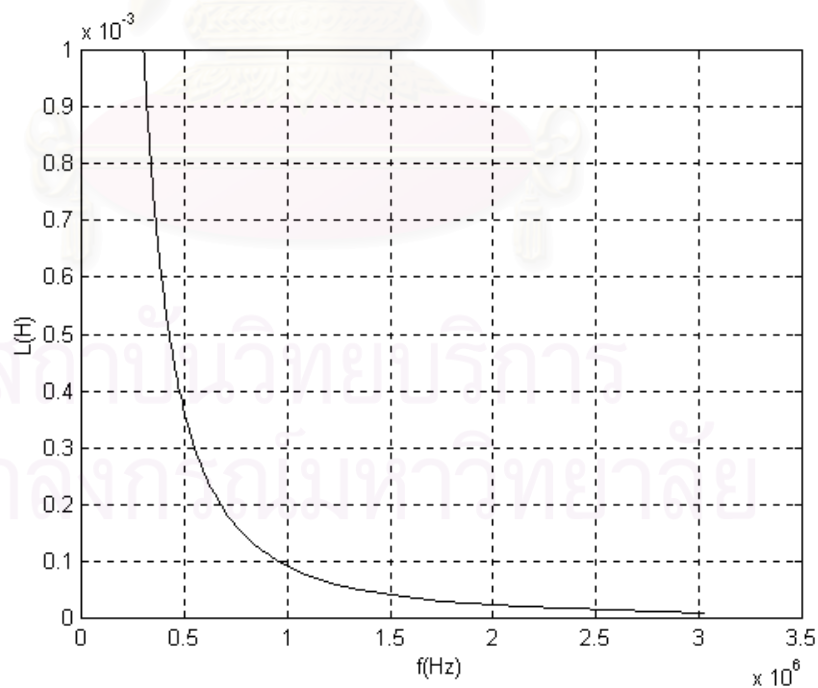
$$XL_{\text{th}} = \frac{4.83 \times 10^5 \omega}{4.03 \times 10^4 + 9.71 \times 10^{-14} \omega^2}$$

$$XL_{\text{th}} / 2 = \frac{2.41 \times 10^5 \omega}{4.03 \times 10^4 + 9.71 \times 10^{-14} \omega^2} \, \Omega$$

นำ $XL_{\text{th}} / 2$ ที่คำนวณได้มาหาตัวเหนี่ยวนำเสมือน (L_e) ที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรสมมูลที่ความถี่ค่าต่างๆ โดยพล็อตเป็นกราฟ เปรียบเทียบกับกราฟของตัวเหนี่ยวนำจริง (L) ที่จะทำให้เกิดแกว่งที่ความถี่ค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.55 ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟ
ตรง 300 VDC



รูปที่ 4.56 ตัวเหนี่ยวนำจริงที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟ
ตรง 300 VDC

จากรูปที่ 4.55 และรูปที่ 4.56 พบว่าไม่มีความถี่ใดของการแกว่งที่ทำให้ตัวเหนี่ยวนำจริง และตัวเหนี่ยวนำเสมือนเท่ากัน แสดงว่าไม่มีความถี่ที่เป็นจริงที่ทำให้วงจรเกิดการแกว่งที่ความถี่ค่านั้นๆขึ้นจริง จะได้ว่าวงจรนี้ไม่มีการแกว่งเกิดขึ้น ดังนั้นวงจรนี้จึงมีเสถียรภาพ

ทดสอบที่แรงดัน 350 VDC

$$D = 0.5 \quad L = 0.75 \text{ mH} \quad C3 = 69 \text{ uF}$$

$$E_d = 300 \text{ V} \quad V_s \sin \omega t = 156 \sin \omega t \quad (50 \text{ Hz}) \text{ V}$$

$$D'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\left(\frac{2E_d}{V_s \sin \omega t}\right) - 1} d\omega t$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1400 \left[-2 \tan^{-1} \left[\frac{700-156}{\sqrt{4(350)^2 - (156)^2}} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{156}{\sqrt{4(350)^2 - (156)^2}} \right] \right]}{\sqrt{4(350)^2 - (156)^2}} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{1400 \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{700-156}}{\sqrt{700+156}} \right]}{\sqrt{4(350)^2 - (156)^2}} \right]$$

$$D'' = -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1400 \left[-2 \tan^{-1} [0.797] - \tan^{-1} [0.229] \right]}{682.39} \right] + \frac{\pi}{2} + \left[\frac{1400 \tan^{-1} [0.797]}{682.39} \right]$$

$$D'' = 0.086 \quad M = \frac{D + D''}{D} = 6.81 \quad R_{\text{conv}} = 2250 \ \Omega$$

$$R_{\text{inv}} = -50000 \ \Omega \quad r_1 = \frac{(M-1)R_{\text{inv}}}{M^3} = -919.82 \quad g_1 = \frac{M}{(M-1)R_{\text{inv}}} = -2.34 \times 10^{-5}$$

$$r_2 = \frac{(M-1)R_{\text{inv}}}{M} = -42657.85 \quad g_2 = \frac{M(2M-1)}{(M-1)R_{\text{inv}}} = -2.96 \times 10^{-4}$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.52 จะได้ว่า

$$R_{\text{th}} = \frac{r_2 \left[r_1^2 + (1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L^2 \right]}{r_1^2 + \left[(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L \right]^2}$$

$$R_{\text{th}} = \frac{-3.61 \times 10^{10} - 1.75 \times 10^{-2} \omega^2}{8.46 \times 10^5 + 8.88 \times 10^{-14} \omega^2}$$

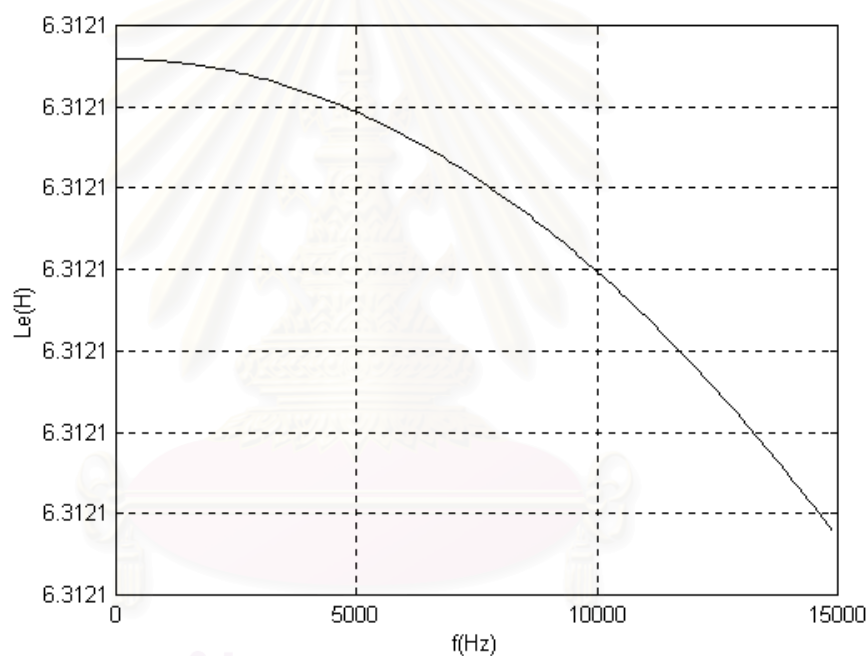
$$R_{\text{th}} / 2 = \frac{-1.80 \times 10^{10} - 8.73 \times 10^{-3} \omega^2}{8.46 \times 10^5 + 8.88 \times 10^{-14} \omega^2} \ \Omega$$

$$X_{L_{\text{th}}} = \frac{r_1^2 r_2^2 g_1 g_2 X_L}{r_1^2 + \left[(1 - r_1 r_2 g_1 g_2) X_L \right]^2}$$

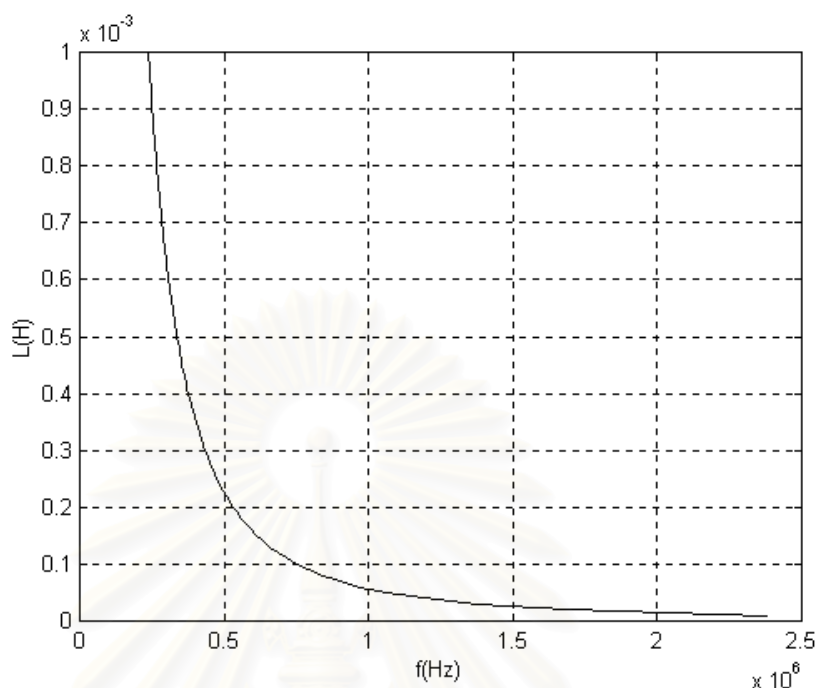
$$X_{L_{th}} = \frac{1.07 \times 10^7 \omega}{8.46 \times 10^5 + 8.88 \times 10^{-14} \omega^2} \Omega$$

$$X_{L_{th}} / 2 = \frac{5.34 \times 10^6 \omega}{8.46 \times 10^5 + 8.88 \times 10^{-14} \omega^2} \Omega$$

นำ $X_{L_{th}} / 2$ ที่คำนวณได้มาหาตัวเหนี่ยวนำเสมือน (L_e) ที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรสมมูลที่ความถี่ค่าต่างๆ โดยพล็อตเป็นกราฟ เปรียบเทียบกับกราฟของตัวเหนี่ยวนำจริง (L) ที่จะทำให้เกิดแกว่งที่ความถี่ค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.57 ตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC



รูปที่ 4.58 ตัวเหนี่ยวนำจริงที่ทำให้เกิดการแกว่งของวงจรที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่แรงดันไฟตรง 350 VDC

จากรูปที่ 4.57 และรูปที่ 4.58 พบว่าไม่มีความถี่ใดของการแกว่งที่ทำให้ตัวเหนี่ยวนำจริง และตัวเหนี่ยวนำเสมือนเท่ากัน แสดงว่าไม่มีความถี่ที่เป็นจริงที่ทำให้วงจรเกิดการแกว่งที่ความถี่ค่านั้นๆ ขึ้นจริง จะได้ว่าวงจรนี้ไม่มีการแกว่งเกิดขึ้น ดังนั้นวงจรนี้จึงมีเสถียรภาพ

จากการทดสอบดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่าวงจรที่ออกแบบ ที่แรงดันไฟตรง 3 ค่า คือที่แรงดัน 280 VDC 300 VDC และ 350 VDC มีเสถียรภาพทั้ง 3 ค่าที่ออกแบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการทำงานและวิธีการออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ ที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังตั้งแต่ 0.99 ขึ้นไป มีกระแสฮาร์มอนิกน้อย คือมีกระแสด้านเข้าใกล้เคียงไซน์ การทำงานของสวิตช์เป็นแบบสวิตช์แรงดันศูนย์ โดยต้องการให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการออกแบบสร้างขึ้น มีค่าตามพิกัดที่ต้องการออกแบบ และมีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีแล้ว ก็พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงสอดคล้องกัน นอกจากนี้แล้วยังมีการพิสูจน์ให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของวงจร โดยทำการหาแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก แล้วใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่หาได้ อธิบายถึงความมีเสถียรภาพของวงจร

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ จะแบ่งขั้นตอนการออกแบบออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ

1. การออกแบบอินเวอร์เตอร์
2. การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่

การออกแบบบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรทระดับแบบคู่ นั้น จำเป็นที่จะต้องรู้คุณสมบัติด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เสียก่อน จึงจะสามารถทำการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ได้ ซึ่งจากการทดลองและการคำนวณแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ มีลักษณะของกระแสด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์แปรตามแรงดันเข้าเพียงเล็กน้อย จึงมีคุณสมบัติเป็นโหลดกระแส เมื่อทราบคุณสมบัติของด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์แล้ว ก็จะสามารถทำการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรทระดับแบบคู่ ให้มีคุณสมบัติด้านออกที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำการจ่ายโหลดให้กับโหลดที่เป็นอินเวอร์เตอร์ได้ เพื่อให้วงจรทำงานอย่างมีเสถียรภาพ และมีกำลังออกที่โหลดฟลูออเซเซนต์เท่ากับพิกัดที่ต้องการ

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย

1. การออกแบบในส่วนที่เป็นโหนดของอินเวอร์เตอร์จะใช้ความต้านทานเชิงเส้นแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการออกแบบ เพราะจากการทดสอบคุณสมบัติของหลอดทำงานที่ความถี่สูง จะมีลักษณะใกล้เคียงความต้านทานมาก เพื่อจะได้ผลที่ถูกต้อง จึงควรพัฒนาแบบจำลองของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อใช้ในการออกแบบเพิ่มขึ้นด้วย

2. การออกแบบทางด้านอินเวอร์เตอร์จะใช้การคำนวณที่พิจารณาองค์ประกอบหลักมูลของรูปคลื่นแรงดันและกระแส เพื่อที่จะให้ผลการคำนวณถูกต้องควรพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

3. ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรระดับแบบคู่ในทางทฤษฎีกับวงจรที่สร้างขึ้นจริงจะให้คุณสมบัติด้านออกที่แตกต่างกัน โดยคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรระดับแบบคู่ที่สร้างขึ้นจริงจะให้ผลออกที่น้อยกว่า ผลออกที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ผลอันนี้เนื่องมาจากการเกิดความสูญเสียขึ้นในอุปกรณ์ของคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการออกแบบจริง จึงควรคำนึงถึงความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ และทำการชดเชยความสูญเสียนั้นให้เหมาะสม เพื่อให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ค่าตัวประกอบกำลังสูงที่ใช้วงจรระดับแบบคู่มีจุดทำงานตามพิกัดที่ต้องการออกแบบ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- คณิต ชัยวัฒนา. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- โคทม อาริยา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น 2544 , 672 หน้า
- จิโรจน์ พรวัฒนา ยุทธนา กุลวิทิต. "การวิเคราะห์การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์แรงดันศูนย์ที่ใช้หม้อแปลงอิมิตัว". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22(EECON22) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ธันวาคม 2542, หน้า 264-267
- เพิ่มศักดิ์ สุขศิริ. วงจรถูกอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเสมือนต่อแบบวีทีที่มีค่าความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
- ไพศาล บุญเยี่ยม ยุทธนา กุลวิทิต. "ผลของอิมพีแดนซ์โหลดในอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อโหลดขนาน". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22(EECON22) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ธันวาคม 2542, หน้า 717-720
- ไพศาล บุญเยี่ยม. การออกแบบวงจรจุดหลอดสำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- ยุทธนา กุลวิทิต, เจตกุล โสภานิตย์. บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กองเศรษฐกิจการพลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 2535.
- ยุทธนา กุลวิทิต ไพศาล บุญเยี่ยม . "วิธีเลือกค่าอุปกรณ์ในวงจรโหลดของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23(EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543
- ไพศาล บุญเยี่ยม ยุทธนา กุลวิทิต. "บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการอุ่นไส้ก่อนจุดหลอดควบคุมด้วยวงจรโหลด". เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23(EECON23), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พฤศจิกายน 2543
- สมชาย เปรมรุ่งพันธ์. ผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอุปกรณ์และปัจจัยภายนอกต่อพฤติกรรมของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

ภาษาอังกฤษ

- Nabae, A.; Nakano, H.; Arai, S. "Novel sinusoidal converters with high power factor", IAS 1994, Conference Record of the 1994 IEEE, pp.775-780, 1994
- Nakano, H.; Murakami, S.; Kosuge, M. "Discussion of Design for Twin Converter", IPEC-Tokyo, pp.846-851, 2000
- Marian K. Kazimierczuk, Dariusz Czarkowski. Resonant Power Converters.(n.p.): John Wiley and sons,Inc. , 1995.
- J.R. Coaton, A.M. Marsden. Lamp and Lighting .(n.p.): John Wiley and sons,Inc. , 1990.
- 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.
- Hesterman B.L., Poehlman T.M. "A novel parallel-resonant programmed start electronic ballast". Conf. Record of IEEE/IAS Annual Meeting 1999, pp 249-255.
- Thomas Ribarich. "A System Approach to Ballast IC Design". PCIM Europe Nuremburg, Germany June 22-24, 1999.
- 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.
- 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.
- Hammer, E.E. "Compact light source performance in recess type luminaires". Industry Applications, Thirty-Third IAS Annual Meeting., 1988 , pp 2145-2150
- 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
- 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.

- Thomas J. Ribarich, John J. Ribarich. "A new high-frequency fluorescent lamp model". IEEE IAS Annual meeting ,1998, pp 2094-2098.
- T. Liu, K.J. Tseng and D.M. Vilathgamuwa. "A Pspice model for the electrical characteristics of fluorescent lamp". IEEE/IAS conference record ,1998, pp
- Mark Sun, Bryce L. Hesterman. "Pspice high-frequency dynamic fluorescent lamp model". IEEE transaction on power electronics, Vol.13 No.2, 1998.
- Zhu P., Hui S.Y.R. "Modelling of a High-frequency operated fluorescent lamp in an electronic ballast environment". IEEE ISMTEV,1998, pp 111-116.
- Urs Mader. "Steady-state analysis of a voltage-fed inverter with second-order network and fluorescent lamp load". IEEE ISMTEV,1998, pp 110-116.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\langle Id \rangle$ และ Ed

การคำนวณกระแสเฉลี่ยด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ คำนวณจากกระแสเฉลี่ย $\bar{i}_s(t)$ ของสมการที่ (17) ในบทที่ 2 ในครึ่งคาบของความถี่สายกำลัง สมการสามารถแสดงได้ดังนี้

เฉลี่ยใน 50 Hz

$$\begin{aligned} \langle Id \rangle &= \frac{2 T_{sw}}{T} \frac{1}{8L} \int_0^{T/2} \frac{V_s^2 \sin^2 \omega t}{2Ed - V_s \sin \omega t} dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} V_s}{4LT} \int_0^{T/2} \frac{\sin^2 \omega t}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \int_0^{T/2} \frac{V_s \sin^2 \omega t}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \int_0^{T/2} \left(\frac{V_s \sin^2 \omega t + \frac{4Ed^2}{V_s} - \frac{4Ed^2}{V_s} + 2Ed \sin \omega t - 2Ed \sin \omega t}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} \right) dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \int_0^{T/2} \left(\frac{\frac{4Ed^2}{V_s} - 2Ed \sin \omega t + V_s \sin^2 \omega t - \frac{4Ed^2}{V_s} + 2Ed \sin \omega t}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} \right) dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \int_0^{T/2} \left(\frac{\frac{4Ed^2}{V_s} - (2Ed \sin \omega t - V_s \sin^2 \omega t) - \left(\frac{4Ed^2}{V_s} - 2Ed \sin \omega t \right)}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} \right) dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \int_0^{T/2} \left(\frac{\frac{4Ed^2}{V_s} - V_s \sin \omega t \left(\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t \right) - 2Ed \left(\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t \right)}{\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t} \right) dt \\ \langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\int_0^{T/2} \frac{4Ed^2}{V_s} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\int_0^{T/2} \frac{\frac{4Ed^2}{V_s} (2 - 2 \sin \omega t)}{\left(\frac{2Ed}{V_s} - \sin \omega t \right) (2 - 2 \sin \omega t)} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(1 - \sin \omega t)}{\left(\frac{4Ed}{V_s} - 2 \sin \omega t \right) (1 - \sin \omega t)} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\frac{4Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t - 2 \sin \omega t + 2 \sin^2 \omega t} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\frac{2Ed}{V_s} + \frac{2Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t - 2 \sin \omega t + \sin^2 \omega t + \sin^2 \omega t + 1 - 1} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\frac{2Ed}{V_s} (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) + \frac{2Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t - 2 \sin \omega t + \sin^2 \omega t + \sin^2 \omega t + 1 - 1} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\frac{2Ed}{V_s} \sin^2 \omega t + \frac{2Ed}{V_s} \cos^2 \omega t + \frac{2Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t - 2 \sin \omega t + \sin^2 \omega t + \sin^2 \omega t + 1 - 1} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\left(\frac{2Ed}{V_s} \sin^2 \omega t + \frac{2Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t + \sin^2 \omega t - 2 \sin \omega t + 1 \right) + \frac{2Ed}{V_s} \cos^2 \omega t - 1 + \sin^2 \omega t} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\left(\frac{2Ed}{V_s} \sin^2 \omega t + \frac{2Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t + \sin^2 \omega t - 2 \sin \omega t + 1 \right) + \frac{2Ed}{V_s} \cos^2 \omega t - \cos^2 \omega t} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{\left(\frac{2Ed}{V_s} \sin^2 \omega t + \frac{2Ed}{V_s} - \frac{4Ed}{V_s} \sin \omega t + \sin^2 \omega t - 2 \sin \omega t + 1 \right) + \left(\frac{2Ed}{V_s} \cos^2 \omega t - \cos^2 \omega t \right)} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{(\sin^2 \omega t - 2 \sin \omega t + 1) \left(\frac{2Ed}{V_s} + 1 \right) + \left(\frac{2Ed}{V_s} - 1 \right) \cos^2 \omega t} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t - \sin \omega t)}{(\sin \omega t - 1)^2 \left(\frac{2Ed}{V_s} + 1 \right) + \left(\frac{2Ed}{V_s} - 1 \right) \cos^2 \omega t} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{(\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t)}{(\sin \omega t - 1)^2 \left(\frac{2Ed}{V_s} + 1 \right) + \left(\frac{2Ed}{V_s} - 1 \right) \cos^2 \omega t} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{V_s} \int_0^{T/2} \frac{\left(\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s} \right)^2 - 1} (\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t) \right)}{\left(\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \left[(\sin \omega t - 1) \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \right) \cos \omega t \right]^2 \right)} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{8Ed^2}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \int_0^{T/2} \frac{\left(\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s} \right)^2 - 1} (\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t) \right)}{\left[(\sin \omega t - 1) \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \right) \cos \omega t \right]^2} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{\left(\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s} \right)^2 - 1} (\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t) \right)}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2} \int_0^{T/2} \frac{1}{\left[(\sin \omega t - 1) \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \right) \cos \omega t \right]^2} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{\left(\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s} \right)^2 - 1} (\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t) \right)}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2} \int_0^{T/2} \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Ed dt \right]
\end{aligned}$$

$$\langle Id \rangle = \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{-8Ed^2}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \int_0^{T/2} \frac{\left(\frac{\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1} (\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t)}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2} \right)^2 dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Edt}{1 + \frac{\left(\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \cos \omega t \right)^2 \right)^2}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2}} \right]$$

$$\langle Id \rangle = \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{-8Ed^2}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \int_0^{T/2} \frac{\left(\frac{\omega \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1} (\sin \omega t (\sin \omega t - 1) + \cos^2 \omega t)}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2} \right)^2 dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Edt}{1 + \frac{\left(\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \cos \omega t \right)^2 \right)^2}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1) \right)^2}} \right]$$

$$\langle Id \rangle = \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{-8Ed^2}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \int_0^{T/2} \frac{d \left(\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \cos \omega t \right)^2}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right)}{\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \cos \omega t \right)^2}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right)^2} dt - \int_0^{T/2} V_s \sin \omega t dt - \int_0^{T/2} 2Edt \right]$$

$$\langle Id \rangle = \frac{T_{sw}}{4LT} \left[\frac{-8Ed^2}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1} \cos \omega t \right)^2}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] + \frac{V_s}{\omega} \cos \omega t - 2Edt \right]_0^{T/2}$$

หมายเหตุ $\int \frac{1}{1+U^2} dU = \tan^{-1} U$

$$\begin{aligned}
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4LT} \left[\frac{-16Ed}{\omega V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] \right)_{0}^{T/4} - \frac{2V_s}{Ed\omega} - T \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4LT} \left[\frac{-16Ed}{\left(\frac{2\pi}{T}\right) V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] \right)_{0}^{T/4} - \frac{2V_s}{Ed} \left(\frac{2\pi}{T}\right) - T \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4LT} \left[\frac{-8EdT}{\pi V_s \sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] \right)_{0}^{T/4} - \frac{V_s T}{Ed\pi} - T \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} EdT}{4LT\pi} \left[\frac{-\frac{8Ed}{V_s}}{\sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] \right)_{0}^{T/4} - \frac{V_s}{Ed} - \pi \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{-\frac{8Ed}{V_s}}{\sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] \right)_{0}^{T/4} \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{-\frac{8Ed}{V_s}}{\sqrt{\left(\frac{2Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} \right] \right)_{0}^{\pi/2} \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw} Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) - \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \lim_{\omega \rightarrow \frac{\pi^+}{2}} \frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1} (\sin \omega t - 1)} - \tan^{-1} \frac{-\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1}} \right] \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) - \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \lim_{\omega t \rightarrow \frac{\pi^+}{2}} \frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1}(\sin \omega t - 1)} - \tan^{-1} \frac{-\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) - \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \lim_{\omega t \rightarrow \frac{\pi^+}{2}} \frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1}(\sin \omega t - 1)} + \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) - \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \lim_{\omega t \rightarrow \frac{\pi^+}{2}} \frac{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) \cos \omega t}{\left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} + 1}\right) \left(\sqrt{\frac{2Ed}{V_s} - 1}\right) (\sin \omega t - 1)} + \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) - \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \lim_{\omega t \rightarrow \frac{\pi^+}{2}} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right) \cos \omega t}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 + 1}(\sin \omega t - 1)} + \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right]
\end{aligned}$$

โดยที่ $\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi^+}{2}} \frac{\cos \theta}{\sin \theta - 1} = -\infty$

$$\begin{aligned}
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) - \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right) (-\infty)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 + 1}} + \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\
\langle Id \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right) (\infty)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 + 1}} - \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 (\infty)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 + 1}} - \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\ \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1} \right) + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} - \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\ \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[2 \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} - \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \\ \langle I_d \rangle &= \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{8\left(\frac{Ed}{V_s}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\left(\frac{2Ed}{V_s} - 1\right)}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right] \end{aligned}$$

$$\langle I_d \rangle = \frac{T_{sw}Ed}{4\pi L} \left[-\left(\pi + \frac{V_s}{Ed}\right) + \frac{8Ed}{V_s \sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \left[\tan^{-1} \frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{Ed}{V_s}\right)^2 - 1}} \right] \right]$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณทางคณิตศาสตร์

สูตรที่ใช้

$$\tan 2A = \frac{2 \tan A}{1 - \tan^2 A}$$

$$2A = \tan^{-1} \left(\frac{2 \tan A}{1 - \tan^2 A} \right)$$

$$\tan (A + B) = \frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B}$$

$$A + B = \tan^{-1} \left(\frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B} \right)$$

$$2 \tan^{-1} \left[\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{2 \left(\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right)}{1 - \left(\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right)^2} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{2 \left(\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right)}{\left(4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1 \right) - \left(4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - \frac{4Ed}{V_s} + 1 \right)} \right]$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$2 \tan^{-1} \left[\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{2 \left(\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right)}{\frac{\frac{4Ed}{V_s} - 2}{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\frac{4Ed}{V_s} - 2}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}}}{\frac{\frac{4Ed}{V_s} - 2}{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right]$$

$$2 \tan^{-1} \left[\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\frac{4Ed}{V_s} - 2}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}}}{\frac{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}{\frac{4Ed}{V_s} - 2}} \right] = \tan^{-1} \left[\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \right]$$

$$2 \tan^{-1} \left[\frac{\frac{2Ed}{V_s} - 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] = \tan^{-1} \left[\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \right]$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] + \tan^{-1} \left[\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} + \sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}}{1 - \sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}}} \right]$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] + \tan^{-1} \left[\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} + \sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}}{1-1} \right]$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] + \tan^{-1} \left[\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1 + 1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] \infty$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] + \tan^{-1} \left[\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2}{\sqrt{4 \left(\frac{Ed}{V_s} \right)^2 - 1}} \right] \infty$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคัมภีร์ ธีราวิทย์ เกิดวันที่ 27 กันยายน 2516 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2537 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย