

การวิเคราะห์และออกแบบเอซี-ชอปเปอร์ความถี่สูง
สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันเอซี 50-Hz ปรับค่าได้

ANALYSIS AND DESIGN OF HIGH-FREQUENCY AC CHOPPER
FOR VARIABLE 50-Hz SINUSOIDAL VOLTAGE SOURCE

ณัฐวุฒิ พลชะตัม
NATAVUT POLCHATIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การวิเคราะห์และออกแบบเอซี-ชอปเปอร์ความถี่สูง
สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันเอซี 50-Hz ปรับค่าได้**

**ANALYSIS AND DESIGN OF HIGH – FREQUENCY AC CHOPPER
FOR VARIABLE 50-Hz SINUSOIDAL VOLTAGE SOURCE**

ณัฐวุฒิ พลชะติน

NATAVUT POLCHATIN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **74628**
วัน,เดือน,ปี..... **- 8 ต.ค. 2550**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**ANALYSIS AND DESIGN OF HIGH – FREQUENCY AC CHOPPER
FOR VARIABLE 50-Hz SINUSOIDAL VOLTAGE SOURCE**

NATAVUT POLCHATIN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และออกแบบเอซี-ชอปเปอร์ความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันเอซี 50 Hz ปรับค่าได้
นักศึกษา	ว่าที่ รต. ณัฐภูมิ พลชะติน
รหัสประจำตัว	48060219
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอหลักการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ความถี่สูงซึ่งมีความถี่ในการชอปหรือในการสับเท่ากับ 20 kHz เอซีชอปเปอร์ดังกล่าวจะใช้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนหรือสับคลื่นไซน์ของแรงดันแหล่งจ่ายไฟการไฟฟ้า 50 Hz เป็นคลื่นตัวใหม่ในลักษณะของแรงดันเอซีที่ถูกสับเป็นส่วนย่อยๆหรือเป็นแท่งๆที่มีพัลส์แต่ละแท่งกว้างเท่ากัน และสามารถปรับความกว้างพัลส์ได้โดยการปรับควบคุมค่าตัวดีไซเคิล แรงดันเอซีที่ถูกสับเป็นส่วนย่อยๆ และสามารถปรับความกว้างพัลส์ได้นี้ยังได้นำไปวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาองค์ประกอบพินดามเมนทอลและฮาร์โมนิกส์ต่างๆซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการออกแบบวงจรฟิลเตอร์เพื่อกรองให้ได้ความถี่ 50 Hz ออกมาทางด้านเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอ ในส่วนของวงจรฟิลเตอร์ก็ได้ทำการออกแบบเพื่อให้มีผลในการกำจัดองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดโดยเริ่มตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ต่ำสุดตัวแรกในลำดับที่ 399 นอกจากนั้นยังได้ทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดเกี่ยวกับการทำงานของวงจร RC สนับเบอร์ซึ่งได้ต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรเอซีชอปเปอร์เพื่อช่วยในการจำกัดแรงดันสไปค์ไม่ให้มีระดับเกินค่าพิกัดของแรงดันระหว่างแคเรน-เซอร์สของอุปกรณ์สวิตซ์แต่ละตัวซึ่งผลปรากฏว่าวงจรสับเบอร์สามารถทำงานร่วมกับวงจรเอซีชอปเปอร์ได้เป็นอย่างดี และวงจรรวมทั้งหมดก็ยังสามารถทำงานได้ดีเช่นกัน โดยสามารถสร้างแรงดันคลื่นไซน์ 50 Hz ทางด้านเอาต์พุตที่สามารถปรับระดับแรงดันได้ตั้งแต่ 0-200 V ภายได้พิกัดโวลตสูงสุดเท่ากับ 500 วัตต์

Thesis Title	Analysis and Design of High-Frequency AC Chopper for Variable 50-Hz Sinusoidal Voltage source
Student	Mr. Natavut Polchatin
Student ID.	48060219
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc .Prof . Dr . Viriya Phichetjamroen

ABSTRACT

This thesis presents an operating principle of a high-frequency ac chopper circuit with the chopping frequency of 20 kHz. The chopper is used to change or chop the sinusoidal waveform of 50 Hz utility supply voltage into another waveform of ac chopped voltage with each pulse width being equal and variable by duty cycle control. The ac chopped voltage with variable pulse width will be analyzed in the next step for its fundamental and harmonic content which is again necessary for use in LC-filter circuit design for 50 Hz sinusoidal filtering on the output side of the proposed circuit. The filter circuit is designed to be effective for eliminating all the harmonics content starting from the first lowest harmonic of the order of 399. In addition, the circuit operation of the RC-Snubber circuit, which is added in the ac chopper circuit to help limiting the voltage spike not to exceed the rated value of voltage across the drain-source of each switching device, will be also analyzed in details. As a result, the snubber circuit can co-operate very well with the ac chopper circuit and the whole circuit can operate successfully with a 50 Hz sinusoidal voltage obtained on the output side. The voltage is variable from 0-200 V under a maximum load of 500 watts.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาและวิจัยจาก รศ.ดร. วิริยะ พิเศษจำเริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณยงยุทธ นารายณ์ คุณศักดิ์ พรหมเหมือน ที่ให้ความช่วยเหลือและปลอบใจในยามที่ผู้เขียนหมดกำลังใจที่จะทำงานต่อ ตลอดจนเพื่อนเอก น้องโจ น้องหนึ่ง น้องสร้อยและทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกายแรงใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ จำยสิบเอก สมศักดิ์ และนาง ชัยลั่น พลชะดิน ผู้ที่ได้ให้ชีวิตและทุกสิ่งทุกอย่างให้ผู้เขียนได้ยืนอยู่ทุกวันนี้ ผู้ที่ไม่เคยหวังให้ลูกได้เป็นใหญ่เป็นโตหวังแค่ให้ลูกเป็นคนดี ให้กำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจ กราบขอบพระคุณ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐวุฒิ พลชะดิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรเอซีชอปเปอร์.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 หลักการสร้างคลื่น ไซน์ 50 Hz เอคต์พุดที่สามารถปรับค่า rms ของแรงดันได้.....	6
2.3 หลักการทำงาน.....	7
2.4 สัญญาณขับ.....	8
2.5 เดดไทม์ (Dead time).....	12
2.5.1 หลักการทำงานของวงจรสร้างเดดไทม์	13
2.6 สรุปรูป.....	14
บทที่ 3 การทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ความถี่สูง.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 โหมดการทำงานของวงจรเอซี-ชอปเปอร์.....	16
3.2.1 โหมดจ่ายกำลัง (Powering Mode).....	17
3.2.2 โหมดฟรีวีล (Freewheeling Mode).....	19
3.2.3 โหมดรีเจนเนอเรทีฟ(Regenerative Mode).....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ลักษณะคลื่นของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ได้จากการทำงานเป็นโหมด.....	21
3.4 สนับเบอร์.....	26
3.4.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจร RC สนับเบอร์ในวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ ความถี่สูง.....	27
3.4.2 หลักการทำงานของวงจร R-C สนับเบอร์.....	29
3.4.3 การคำนวณหาค่า RC สนับเบอร์ที่ใช้ในวงจร.....	40
3.4.4 ผลการทดลองและผลจากการซิมูเลตที่ได้จากวงจรสับเบอร์.....	41
3.5 สรุป.....	49
บทที่ 4 การวิเคราะห์คลื่นเอาต์พุตและสมการของวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ ความถี่สูงที่ 20 kHz.....	51
4.2 การวิเคราะห์หาสมการและคลื่นแรงดันเอาต์พุต.....	51
4.3 การวิเคราะห์โดยให้สวิตซ์ฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันคู่ (Even Function).....	53
4.3.1 การคุณสมบัติของสวิตซ์ฟังก์ชันกับสมการของแรงดันอินพุต.....	57
4.3.2 การวิเคราะห์หาคลื่นแรงดันเอาต์พุต.....	58
4.3.3 การคำนวณหาค่า LC ฟิลเตอร์ที่ใช้ในวงจร.....	81
4.4 สรุป	86
บทที่ 5 ผลการทดลองและผลการซิมูเลต.....	88
5.1 บทนำ.....	88
5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางทฤษฎี และผลการทดลองคลื่นแรงดันและกระแส พร้อมแถบสเปกตรัมตามจุดต่าง ๆ ในวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ความถี่สูง 20 kHz กรณีป้อนแรงดันไฟทางด้านอินพุตเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 V (rms) 50 Hz.....	88
5.2.1 ขั้นตอนในการทำการทดลอง.....	88
5.2.2 ขั้นตอนการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice.....	89
5.2.3 ผลการทดลองและผลจากการซิมูเลต.....	89
5.3 การหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุต P_m เอาต์พุต P_o และประสิทธิภาพ η ของ เอซีชอปเปอร์.....	153
5.3.1 กำลังไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายไซน์การไฟฟ้า 50 Hz : P_m	153

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 กำลังไฟฟ้าที่โหลดของวงจรเอชไอชอปเปอร์ : P_o	153
5.3.3 ประสิทธิภาพระหว่างโหลดของวงจรเอชไอชอปเปอร์กับทางด้านแหล่งจ่ายไซน์การ ไฟฟ้า 50 Hz : η	154
5.4 สรุป.....	156
บทที่ 6 สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	157
เอกสารอ้างอิง.....	159
ภาคผนวก.....	160
ภาคผนวก ก.....	161
ภาคผนวก ข.....	169
ภาคผนวก ค.....	174
ภาคผนวก ง.....	186
ประวัติผู้เขียน.....	206

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50 Hz.....	83
4.2 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20kHz กับ 50 Hz ที่มีโหลด เป็น R	84
4.3 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 60 kHz กับ 50Hz มี โหลดเป็น R-L ขนาน.....	85
5.1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่าง ๆ ของวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ป้อนแรงดันเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 V(rms) 50 Hz ให้ทางด้านอินพุตของวงจร ที่ใช้ในการทดลองจริง.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 แนวความคิดที่ใช้สร้างคลื่นไซน์สับทางคณิตศาสตร์.....	3
รูปที่ 1.2 แนวความคิดของการคูณกันของคลื่น 50 Hz กับคลื่นสแคววส์.....	4
รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเอชไอซีของสวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHzเพอร์ที่มี LC ฟิลเตอร์แล้ว..	7
รูปที่ 2.2 วงจรกำลังของ AC Chopper.....	7
รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับของวงจรเอชไอซีเพอร์.....	8
รูปที่ 2.4 แสดงการรวมสัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz ในช่วง แรงดัน ไซน์จากบวกไปลบที่ค่าดีวตี้ไซเคิล (D= 80%).....	9
รูปที่ 2.5 แสดงการรวมสัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz ในช่วง แรงดัน ไซน์จากลบไปบวกที่ค่าดีวตี้ไซเคิล (D= 80%).....	10
รูปที่ 2.6 สัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz ในช่วงแรงดัน ไซน์ จากบวกไปลบที่ค่าดีวตี้ไซเคิล(D= 20%)	11
รูปที่ 2.7 แสดงการรวมสัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHzในช่วง แรงดัน ไซน์จากลบไปบวกที่ค่าดีวตี้ไซเคิล (D= 20%).....	11
รูปที่ 2.8 วงจรสร้างเคดไทม์.....	12
รูปที่ 2.9สัญญาณที่จะสร้างเคดไทม์.....	13
รูปที่ 2.10 สัญญาณที่สร้างให้กลับกัน.....	13
รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ถูกหน่วงการลออกไป.....	13
รูปที่ 2.12 สัญญาณที่มีจุดทับกัน.....	14
รูปที่ 2.13 สัญญาณที่มีเคดไทม์ที่สามารถนำไปใช้งานได้แล้ว.....	14
รูปที่ 3.1 วงจรเอชไอซีเพอร์และบล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับเกท.....	15
รูปที่ 3.2 ลักษณะสัญญาณขับเกทและคลื่นอินพุตเอาต์พุต.....	16
รูปที่ 3.3 ลักษณะของคลื่นก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรเอชไอซีเพอร์.....	17
รูปที่ 3.4 ลักษณะคลื่นก่อนผ่านและหลังผ่าน LC ฟิลเตอร์.....	17
รูปที่ 3.5 ลักษณะวงจรของ โหมคจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวก.....	18
รูปที่ 3.6 ลักษณะวงจรของ โหมคจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลลบ.....	18
รูปที่ 3.7 โหมคฟรีวีลในครึ่งไซเคิลบวก.....	19
รูปที่ 3.8 โหมคฟรีวีลในครึ่งไซเคิลลบ.....	20
รูปที่ 3.9 โหมครีเจนเนอเรทิฟในครึ่งไซเคิลลบ.....	20
รูปที่ 3.10 โหมครีเจนเนอเรทิฟในครึ่งไซเคิลบวก.....	21

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นไซน์อินพุต 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 20 kHz.....	22
รูปที่ 3.12 รูปคลื่นไซน์อินพุต 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 2 kHz.....	22
รูปที่ 3.13 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 10 %....	23
รูปที่ 3.14 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของ วงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 10 %.....	23
รูปที่ 3.15 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของ วงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 10 %.....	23
รูปที่ 3.16 คลื่นแรงและกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 50 %...24	24
รูปที่ 3.17 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของ วงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 50 %.....	24
รูปที่ 3.18 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของ วงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 50 %.....	24
รูปที่ 3.19 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 90 %.....	25
รูปที่ 3.20 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของ วงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 90 %.....	25
รูปที่ 3.21 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของ วงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าคิวดีไซเคิล D เท่ากับ 90 %	25
รูปที่ 3.22 ลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, chop}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่าน วงจร LC ฟิลเตอร์และยังไม่ได้ใส่สแน็บเบอร์.....	27
รูปที่ 3.23 วงจรเอชชอปเปอร์ที่มีวงจรสแน็บเบอร์ต่ออยู่.....	28
รูปที่ 3.24 ลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, snub}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่าน วงจร LC ฟิลเตอร์ที่ใส่สแน็บเบอร์แล้ว.....	28
รูปที่ 3.25 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสแน็บเบอร์ในครึ่งไซเคิลบวก.....	29
รูปที่ 3.26 ลักษณะการทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์ในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Mode) ในครึ่ง ไซเคิลบวก.....	30
รูปที่ 3.27 ลักษณะการไหลของกระแสที่ซาร์ตเข้า C_{S1} และดิซซาร์ตประจุของ C_{S2} ในโหมดฟรีวีลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวก.....	30
รูปที่ 3.28 แรงดันที่ตกคร่อม C_{S1} และแรงดันที่ตกคร่อม R_{S1} ในครึ่งไซเคิลบวก.....	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.29 คลื่นแรงดัน V_{S1} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{CS1} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	32
รูปที่ 3.30 ลื่นแรงดัน V_{S1} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ I_{CS1} ที่ ($y=5V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	32
รูปที่ 3.31 ลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{RS1} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	32
รูปที่ 3.32 ลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขาลงที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	33
รูปที่ 3.33 คลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขาขึ้นที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	33
รูปที่ 3.34 วงจรเอชชีฮอปเปอร์ในขณะที่สวิตช์ S_4 นำกระแสและ C_{S1} ถูกชาร์จประจุเต็มแล้วเป็นทำงานในโหมดฟรีวีลิ่ง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวก.....	33
รูปที่ 3.35 การทำงานของวงจรถูกเอชชีฮอปเปอร์ขณะสวิตช์ S_1 เริ่มนำกระแสโดยที่ C_{S1} คิสชาร์จประจุผ่าน R_{S1} ผ่านไปยังสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_4 หยุดนำกระแสทำให้ C_{S1} ชาร์ตประจุ.....	34
รูปที่ 3.36 กษณะการทำงานของวงจรถูกเอชชีฮอปเปอร์ในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Mode) ในครึ่งไซเคิลลบ.....	35
รูปที่ 3.37 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ในครึ่งไซเคิลลบ.....	35
รูปที่ 3.38 ลักษณะการไหลของกระแสที่ชาร์ตเข้า C_{S2} และคิสชาร์จประจุของ C_{S3} ในโหมดฟรีวีลิ่ง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบ.....	36
รูปที่ 3.39 แรงดันที่ตกคร่อม C_{S2} และแรงดันที่ตกคร่อม R_{S2} ในครึ่งไซเคิลบวก.....	37
รูปที่ 3.40 คลื่นแรงดัน V_{S2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	37
รูปที่ 3.41 คลื่นแรงดัน V_{S2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ I_{CS2} ที่ ($y=5V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	38
รูปที่ 3.42 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	38
รูปที่ 3.43 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขาลงที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.44 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=2\mu s/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=2\mu s/div$) ในช่วง ขึ้นลงที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง.....	39
รูปที่ 3.45 วงจรเอชชอปเปอร์ในขณะสวิตช์ S_3 นำกระแสและ C_{S2} ถูกชาร์จประจุเต็มแล้ว เป็นทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบ.....	39
รูปที่ 3.46 การทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์ขณะสวิตช์ S_2 เริ่มนำกระแสโดยที่ C_{S2} คิสชาร์จประจุ ผ่าน R_{S2} ผ่านไปยังสวิตช์ S_2 และสวิตช์ S_3 หยุดนำกระแสทำให้ C_{S3} ชาร์ตประจุ.....	40
รูปที่ 3.47 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอ์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 10% และความถี่สวิตซิ่งเท่ากับ 20kHz.....	42
รูปที่ 3.48 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอ์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 50% และความถี่สวิตซิ่งเท่ากับ 20kHz.....	44
รูปที่ 3.49 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอ์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 90% และความถี่สวิตซิ่งเท่ากับ 20kHz.....	47
รูปที่ 4.1 แนวคิดในการวิเคราะห์คลื่นแรงดันเอาต์พุตของเอชชอปเปอร์ที่นำเสนอ.....	52
รูปที่ 4.2 สัญญาณของสวิตซิ่งฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันแบบคู่ (Even Function).....	53
รูปที่ 4.3 การกระจายฮาโมนิกส์ของสวิตซิ่งฟังก์ชัน.....	56
รูปที่ 4.4 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 10%	59
รูปที่ 4.5 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 20%	60
รูปที่ 4.6 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.switc}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 30%.....	61
รูปที่ 4.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 40%.....	63
รูปที่ 4.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 50%	64
รูปที่ 4.9 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 60%.....	65
รูปที่ 4.10 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.switc}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองที่ควิตีไซเคิล 70%.....	67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 80%.....	68
รูปที่ 4.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 90%.....	69
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่ได้กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออก ($v_{o.chop}$) กับค่าควิตซ์ไซเคลิลต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 1.....	71
รูปที่ 4.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 10%.....	72
รูปที่ 4.15 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 20%.....	73
รูปที่ 4.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 30%.....	74
รูปที่ 4.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 40%.....	75
รูปที่ 4.18 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 50%.....	76
รูปที่ 4.19 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 60%.....	77
รูปที่ 4.20 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 70%	78
รูปที่ 4.21 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 80%.....	79
รูปที่ 4.22 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคลิล 90%.....	80
รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออก($v_{o.50Hz}$)กับค่าควิตซ์ไซเคลิลต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 1.....	81
รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ฟิลเตอร์.....	82
รูปที่ 5.1 วงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ป้อนแรงดันเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 v(rms) 50 Hz ให้ทางด้านอินพุตของวงจรที่ใช้ในการทดลองจริง.....	88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.20 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 70 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	132
รูปที่ 5.21 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ และกระแส $i_{o.chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 70 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	134
รูปที่ 5.22 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ และกระแส $i_{o.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 70 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	137
รูปที่ 5.23 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 80 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	139
รูปที่ 5.24 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ และกระแส $i_{o.chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 80 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	141
รูปที่ 5.25 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ และกระแส $i_{o.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 80 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	144
รูปที่ 5.26 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 90 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	146
รูปที่ 5.27 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ และกระแส $i_{o.chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 90 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	148
รูปที่ 5.28 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.50Hz}$ และกระแส $i_{o.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรมอดูเลเตอร์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 90 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz.....	151
รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้านินพุตกับค่าควิตซ์ไซเคิล.....	154
รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับค่าควิตซ์ไซเคิล.....	155

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับค่า คิวดีไอเซลที่กระแสเอาต์พุตคงที่.....	155
รูปที่ 6.1 ชุดทดลองของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่จ่ายโหลดไฟ.....	158
รูปที่ 6.2 ชุดทดลองของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่จ่ายโหลดมอเตอร์พัดลม.....	158

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาในรูปแบบของการควบคุมแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50Hz ที่สามารถปรับค่า rms ของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50Hz โดยการปรับควบคุมค่าความถี่ไซเคิลที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงจาก 0-1 โดยในปัจจุบันนี้ก็มีวิธีการควบคุมอยู่หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการควบคุมโดยการปรับเฟสหรือใช้หม้อแปลงแบบปรับเลื่อนจุดแท็ปของขดลวด (variac) การใช้วิธีที่กล่าวมาทั้งสองนั้นก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยการควบคุมแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50Hz โดยใช้วิธีเลื่อนเฟสนั้นจะง่ายต่อการควบคุมทางไฟฟ้าแต่ก็ให้แรงดันเอาต์พุตออกมาไม่เป็นคลื่นไซน์ที่สวยงาม ในส่วนของหม้อแปลงแบบปรับเลื่อนจุดแท็ปของขดลวด (variac) นั้นสามารถให้เอาต์พุตออกมาเป็นคลื่นไซน์ที่ปรับค่า rms ของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50Hz ได้แต่ถ้าจะนำมาควบคุมทางไฟฟ้าจะมีความยากลำบากเพราะใช้การหมุนหรือการทำงานของระบบเม็กลานิกส์มาทำการช่วยเพื่อปรับระดับแรงดัน rms จึงไม่สะดวกที่จะนำไปใช้แบบการควบคุมด้วยระบบไฟฟ้านั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วงจรเอซีชอปเปอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมการทำงานโดยใช้การควบคุมทางไฟฟ้าทำให้ง่ายต่อการควบคุมการปรับแรงดัน rms ของไซน์การไฟฟ้า 50 Hz และต้องการ การดูแลรักษาน้อยอีกทั้งวงจรเอซีชอปเปอร์สามารถควบคุมได้ง่ายและยังให้แรงดันเอาต์พุตออกมาเป็นคลื่นไซน์ 50Hz ที่สวยงามเหมือนกับหม้อแปลง แต่มีน้ำหนักที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ โดยในงานที่ต้องการแรงดันที่มีลักษณะคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz ที่สามารถปรับขนาดแรงดันได้อย่างต่อเนื่องในย่านกว้าง ตั้งแต่ระดับแรงดันศูนย์จนถึงระดับสูงสุด 200V สามารถทำได้โดยการนำเอาแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 Hz มาผ่านวงจรเอซีชอปเปอร์ ซึ่งทำงานที่ความถี่สวิตชิงในระดับ 20 kHz พร้อมกับผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ห้วงจรเอซีชอปเปอร์อย่างเป็นขั้นตอน ตั้งแต่การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรในแต่ละโหมดการทำงาน จากนั้นได้นำคลื่นไซน์ที่ถูกชอปด้วยความถี่สูง 20 kHz มาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่มีปะปนในตัวคลื่นเอซีชอป องค์ประกอบที่ได้นี้สามารถนำข้อมูลไปออกแบบเพื่อกำหนดค่า LC ในวงจรฟิลเตอร์ได้ ผลปรากฏว่า LC ที่ใช้ในการออกแบบมีขนาดเล็ก และสามารถปล่อยผ่านคลื่น 50 Hz ออกไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงในลำดับค่าสูงสุดลำดับที่ 400 จะถูกรองทิ้งได้เกือบทั้งหมดผลปรากฏว่าแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะคลื่น 50 Hz ใกล้เคียงคลื่นไซน์มาก พร้อมทั้งสามารถปรับขนาดของแรงดัน rms นี้ได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 200 V

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

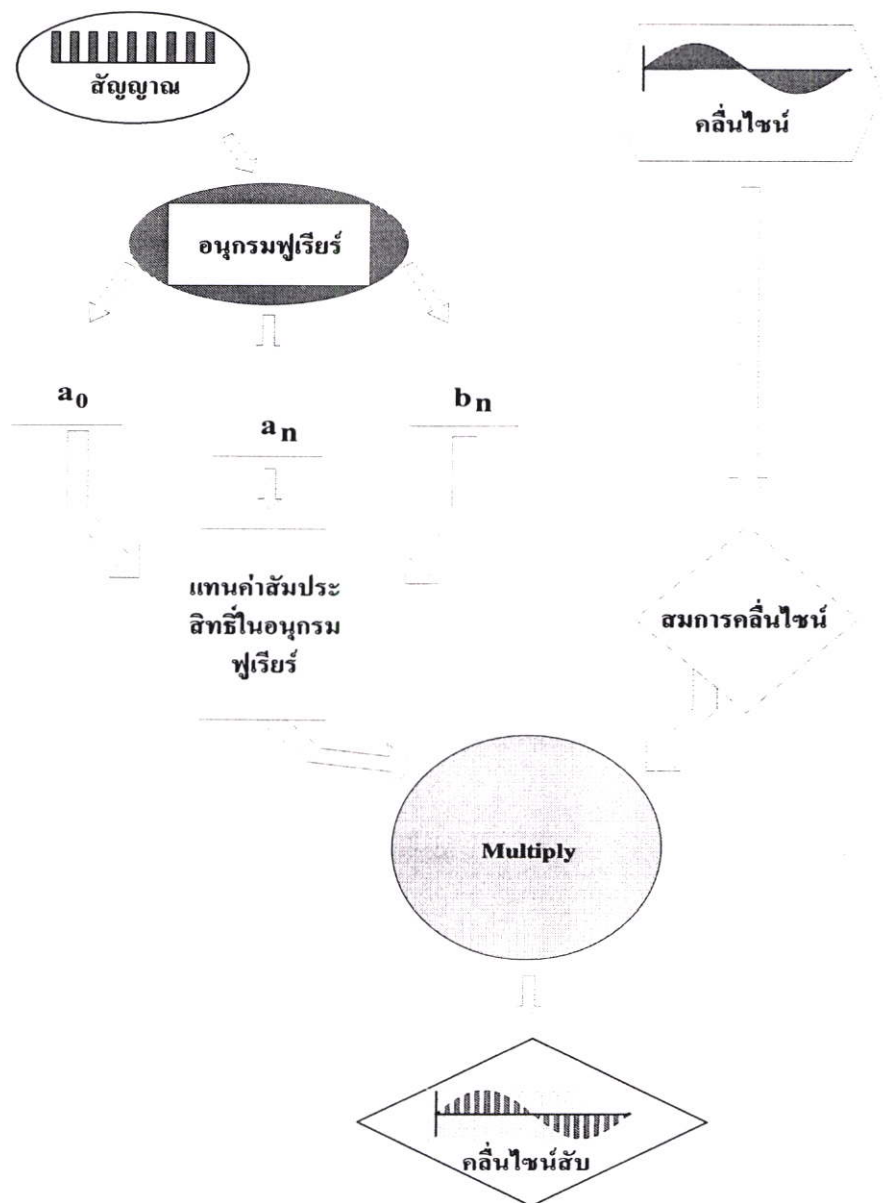
- 1 เพื่อศึกษาวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้เป็นวงจรสร้างคลื่นไซน์สววย 50Hz ที่สามารถปรับระดับ แรงดันไซน์ 50Hz ได้ละเอียดทีละน้อยกว่า 1 V
- 2 เพื่อวิเคราะห์และศึกษาหลักการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์
- 3 เพื่อศึกษาคัลลันและองค์ประกอบฮาโมนิกส์พร้อมทั้งการคำนวณทางคณิตศาสตร์
- 4 เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน rms เอาต์พุตเมื่อปรับค่าความถี่ไซเคิลต่างๆ
- 5 เพื่อศึกษาการทำงานและออกแบบวงจร LC ฟิเตอร์ทางด้านเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์
- 6 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและออกแบบของวงจรสับเบอร์

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีแนวความคิดมาจากการที่ต้องการควบคุมแรงดัน rms ของไซน์การไฟฟ้า 50Hz เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยสามารถควบคุมทั้งระบบด้วยไฟฟ้า เพราะที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเราใช้การปรับระดับแรงดันโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีน้ำหนักและขนาดที่มากอีกทั้งยังควบคุมการทำงานด้วยระบบไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่ได้ต้องให้ระบบเม็กลานิกส์มาช่วยในการควบคุมทำให้มีโอกาสที่จะทำงานผิดพลาดสูง และมีความละเอียดในการควบคุมต่ำเมื่อต้องการปรับระดับแรงดันทีละน้อยๆ และต้องมีการดูแลรักษาสูงจากข้อด้อยที่ได้กล่าวมานี้จึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานทดแทนอุปกรณ์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ถึงจะไม่สามารถทำงานทดแทนกันได้ทั้งหมด แต่ในงานบางชนิดก็ทำให้งานดำเนินไปได้โดยง่ายอีกทั้งยังเป็นการจุดฉนวนให้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ดีกว่ามาใช้ทดแทน ซึ่งนับว่าเป็นส่วนหนึ่งของการช่วยกันพัฒนาเทคโนโลยีให้ก้าวไปอีกขั้นหนึ่งได้ จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในจุดนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์เพราะเห็นว่าเป็นวงจรที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาใช้แทนกันกับหม้อแปลงถึงจะไม่สามารถใช้แทนกันได้เลยทีเดียวก็ตาม

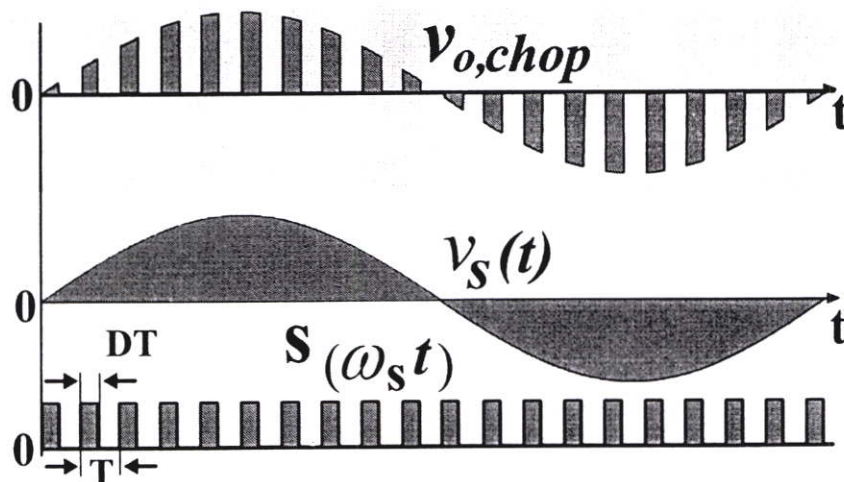
ในทางด้านการวิเคราะห์นั้นก็ต้องมีการทดลองและการยืนยันผลที่ได้จากการทดลองโดยผลทางคณิตศาสตร์จึงได้นำสมการของสวิตชิงฟังก์ชันมาคูณกับสมการของอินพุต ซึ่งในที่นี้ใช้แหล่งจ่ายไซน์การไฟฟ้า 50Hz ก็จะทำให้ได้รูปคลื่นไซน์ที่ถูกชอปแบ่งเป็นช่องเท่าๆ กับช่วงของสวิตชิงฟังก์ชันในวิทยานิพนธ์นี้ก็คือนคลื่นแรงดันของวงจรเอซีชอปเปอร์ และคลื่นที่ได้จากวิธีดังกล่าวได้ยืนยันความถูกต้องโดยการนำคลื่นที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับคลื่นที่ได้จากการทดลองจากวงจรจริงซึ่งได้ผลลัพธ์ออกมาใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งคลื่นที่ได้จากการคำนวณสามารถปรับค่า rms ได้เหมือนคลื่นจริงที่ได้จากการทดลองทุกอย่าง เมื่อได้คลื่นไซน์ที่ถูกชอปซึ่ง

เป็นเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์แล้ว คลื่นตัวนี้ยังไม่สามารถที่จะนำไปใช้งานได้ตามที่เราต้องการแต่ก็เป็นคลื่นที่สามารถปรับค่า rms ได้แล้ว จากนั้นเราได้ทำการนำคลื่นไซน์ที่ถูกชอปไปทำให้กลับเป็นคลื่นไซน์ที่สววยงามเหมือนคลื่นอินพุต โดยการนำคลื่นไซน์ที่มีฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงปะปนอยู่ไปทำการกรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกไปโดยใช้วงจร LC ฟิลเตอร์ ในการกรองซึ่ง LC ฟิลเตอร์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ต้องนำคลื่นไซน์การไฟฟ้าที่สววยงามมาทำการชอปที่ความถี่สูง เพราะที่ความถี่สูงเราสามารถใช่ LC ฟิลเตอร์ขนาดเล็กเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกจากความถี่ต่ำ (50Hz) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ได้แสดงวิธีการทำงานของ LC ฟิลเตอร์ไว้อย่างละเอียด



รูปที่ 1.1 แนวความคิดที่ใช้สร้างคลื่นไซน์สับทางคณิตศาสตร์

จากแนวความคิดที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการคลื่นเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์ดังในรูปที่ 1.1 สามารถนำมาแยกแยะแสดงเป็นเฉพาะลักษณะการคูณกันของคลื่น ได้ดังในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แนวความคิดของการคูณกันของคลื่น ไซน์ 50 Hz กับคลื่นสแควร์

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งรายละเอียดการศึกษาและค้นคว้าออกเป็นบทต่างๆ ทั้งหมด 6 บท โดยเริ่มจากหลักการพื้นฐานของวงจรเอชซีชอปเปอร์ ต่อจากนั้นทำการวิเคราะห์หลักการทางาน และลักษณะของคลื่นของวงจรเอชซีชอปเปอร์ โดยมีแรงดันอินพุตเป็นไซน์การไฟฟ้า 50 Hz และทำการศึกษาดังการปรับควบคุมค่า rms ของแรงดันเอาต์พุตโดยการปรับค่าดิวิตีไซเคิลของสัญญาณที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ เพื่อศึกษาลักษณะของคลื่น ไซน์ที่ถูกชอปด้วยความถี่ 20 kHz เมื่อค่าดิวิตีไซเคิลเปลี่ยนแปลงไป และได้วิเคราะห์ถึงองค์ประกอบฮาโมนิกส์ทางด้านเอาต์พุตก่อนที่จะกรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกไป หลังจากที่ได้กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกไปโดยวงจร LC ฟิลเตอร์ เพื่อให้ได้เอาต์พุตเป็น ไซน์ 50 Hz ที่สามารถปรับค่า rms ได้จาก 0-200 โวลต์ จากนั้นจึงพิจารณาแรงดันเอาต์พุตว่ามีฮาโมนิกส์ความถี่สูงปะปนออกมามากน้อยเพียงใดและได้นำผลที่ได้จากการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Matlab และผลที่ได้จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม Pspice เมื่อได้แรงดันเอาต์พุตที่สวยงามแล้วจากนั้นก็มาศึกษาผลการทำงานของวงจรเอชซีชอปเปอร์ที่มีต่อระบบของไซน์การไฟฟ้าว่ามีผลกระทบต่อแรงดันและกระแสที่ออกมาจากการทำงานของวงจรเอชซีชอปเปอร์อย่างไรบ้างแล้วได้ทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มวงจร LC ฟิลเตอร์เข้าไปทางด้านอินพุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์เพื่อลดผลจากฮาโมนิกส์ของกระแสที่มีผลต่อแหล่งจ่าย และได้ทำการทดลองเก็บผลและสรุปผลการวิจัย ได้แบ่งเป็นบทดังนี้

- บทที่ 1 อธิบายถึงปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัยความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์แนวความคิด
ที่ใช้ในงานวิจัย ของเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรเอซีชอปเปอร์
- บทที่ 3 การทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ความถี่สูง
- บทที่ 4 การวิเคราะห์คลื่นและสมการเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ความถี่สูงที่
20 kHz
- บทที่ 5 ผลการทดลองและการซิมูเลต
- บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ความถี่สูง
- 1.5.2 พิจารณาวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้ ศึกษาการทำงานและวิเคราะห์การทำงานโดย
คณิตศาสตร์
- 1.5.3 ศึกษาวงจร LC ฟิเตอร์ที่ใช้เป็นวงจรกรองความถี่สูงออกจากความถี่ต่ำ ถึงลักษณะ
การกรองความถี่ในระดับต่างๆ ของวงจรทางด้านเอาต์พุต
- 1.5.4 ทำการสร้างชุดทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์
- 1.5.5 ทดสอบและเก็บข้อมูล ของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ได้จากชุดทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับ
ทฤษฎี ให้ได้ตามวัตถุประสงค์
- 1.5.6 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลให้สอดคล้องกับทฤษฎี
- 1.5.7 พิมพ์วิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเข้าใจและวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์รวมถึงลักษณะของคลื่น
และองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ต่างๆของวงจร ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอินพุตหรือเอาต์พุตพร้อมทั้งสร้าง
วงจรเอซี-ชอปเปอร์เพื่อนำไปใช้งานทางด้านการปรับระดับแรงดัน 50 Hz ที่สามารถปรับ
แรงดัน 50 Hz ได้อย่างละเอียดรวมไปถึงการนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆไม่ว่าจะเป็นการใช้
ในการรักษาระดับแรงดัน การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ นำไปใช้กับเตาหุงต้มเหนียวน้ำหรือ
การควบคุมความร้อน อีกทั้งสามารถนำเครื่องต้นแบบที่ได้จากการวิจัย นำไปพัฒนาผลิตเพื่อใช้ใน
โรงงานอุตสาหกรรม และลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

บทที่ 2

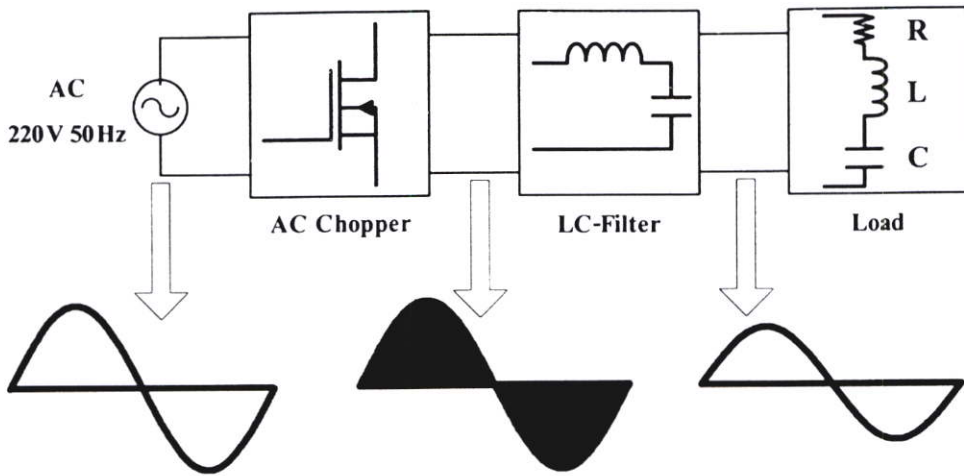
ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรเอชซีชอปเปอร์

2.1 บทนำ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้า แบบสแตติกจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50 Hz โดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือโดยวิธีการควบคุมเฟสและวิธีการควบคุมจำนวนไซเคิลของคลื่นแรงดัน 50 Hz เพื่อช่วยให้โหลดซึ่งทั้งสองวิธีการนี้ ไม่สามารถให้คลื่นแรงดันที่เอาต์พุต ที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ 50 Hz ได้ด้วยฟิลเตอร์ขนาดเล็ก ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีขนาดน้ำหนักมาก ดังนั้นบทความวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ในรูปแบบใหม่ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.1 และวงจรในรูปที่ 2.2 ที่สามารถให้คลื่นไซน์ 50 Hz เอาต์พุตได้ด้วยวงจรฟิลเตอร์ขนาดเล็กโดยการนำคลื่นไซน์ 50 Hz มาสับที่ความถี่สูงในระดับ 20 kHz จากนั้นก็นำไปกรองด้วย LC ฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกไปให้ได้คลื่นความถี่ต่ำ 50 Hz ที่สามารถปรับแรงดัน rms ให้มากหรือน้อยได้ตามต้องการ โดยที่แรงดันที่ปรับนี้ยังคงเป็นไซน์ 50 Hz และได้อธิบายการทำงานในโหมดต่างๆ ในแต่ละช่วงการสับสวิทช์ โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานในแต่ละโหมด เพื่อให้เข้าใจการทำงานของวงจรที่นำเสนอ และได้กล่าวถึงการสร้างสัญญาณที่นำมาควบคุมร่วมไปถึงอุปกรณ์ที่สนับสนุนการทำงานของวงจรเอชซีชอปเปอร์ให้สามารถทำงานได้ดังที่เราต้องการเช่น สนับเบอร์ วงจรเดดไทม์ (Dead Time) เป็นต้น

2.2 หลักการสร้างคลื่นไซน์ 50 Hz เอาต์พุตที่สามารถปรับค่า rms ของแรงดันได้

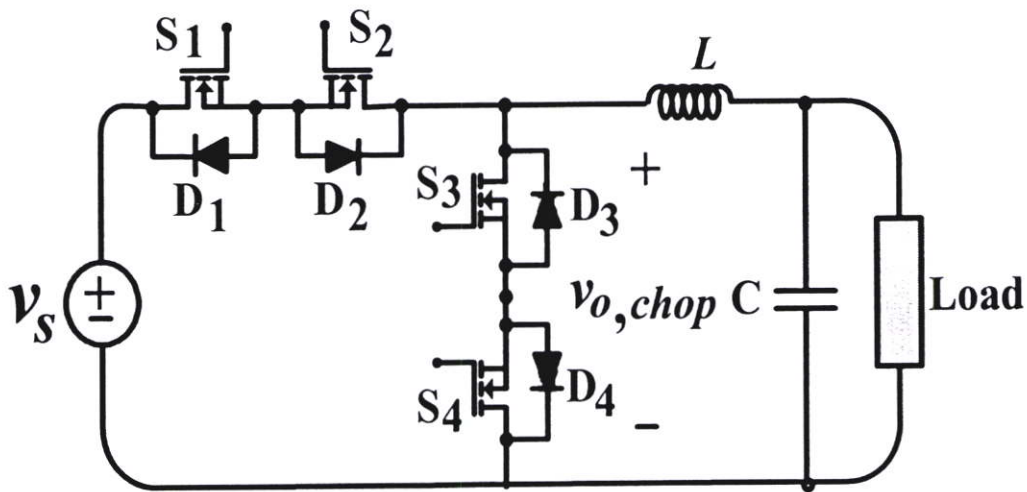
สำหรับโครงสร้างของวงจรเอชซีชอปเปอร์สวิทช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ที่มีอินพุตเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 V (rms) 50 Hz และได้คลื่นไซน์ 50 Hz ทางด้านเอาต์พุตที่สามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 0-200V โดยการปรับค่าคิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ 0-1 สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.1 รายละเอียดประกอบด้วย แหล่งจ่ายไซน์การไฟฟ้า 1 เฟส 220 V (rms) 50 Hz ป้อนให้กับวงจรเอชซีชอปเปอร์ซึ่งทำหน้าที่สับไซน์ 220 V (rms) 50 Hz ให้เป็นโครงไซน์ 50 Hz ที่ถูกแบ่งเป็นช่องเท่าๆกันที่ความถี่ 20 kHz โดยจะได้จำนวนช่องเท่ากับ 400 ช่องในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz โดยใช้อุปกรณ์มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิทช์ จากนั้นไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับจะไปเป็นอินพุตให้วงจร LC ฟิลเตอร์ โดยวงจร LC ฟิลเตอร์จะมีส่วนประกอบคือ L และ C ที่มีขนาดเล็กต่ออนุกรมกันแล้วนำมาต่อขนานกับวงจรเอชซีชอปเปอร์ทางด้านเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์ โดยวงจร LC ฟิลเตอร์จะทำหน้าที่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกจากไซน์ 50 Hz ทำให้เหลือแต่ไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz ที่สามารถปรับค่า (rms) ได้โดยปรับค่าคิวตี้ไซเคิลของการสวิทช์เพื่อจ่ายให้กับโหลด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเอชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ที่มี LC ฟิลเตอร์แล้ว

2.3 หลักการทำงาน

วงจรเอชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ที่มี LC ฟิลเตอร์[2]



รูปที่ 2.2 วงจรกำลังของ AC Chopper

จากรูปที่ 2.2 เป็นการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาต่อกันขึ้นเป็นวงจรที่สามารถนำไปใช้งานได้ ในทางด้านควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการนำไซน์ที่ได้จากแหล่งจ่ายมาทำการสับโดยสวิตช์ทั้งสี่ตัวที่เห็นในวงจรดังรูปที่ 2.2 จากนั้นนำไซน์ที่ถูกสับที่สามารถปรับค่าความถี่ได้นี้ไปผ่านวงจร LC เพื่อทำการกรองแยกฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก ให้ผ่านได้เฉพาะความถี่ต่ำที่เป็นไซน์ 50 Hz เพื่อให้วงจรทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวเราจำเป็นต้องสร้างสัญญาณมาควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 4 ตัว หลังจากที่ได้เฉพาะคลื่นไซน์ 50 Hz ที่สามารถปรับความถี่ได้

ปรับค่า rms ของแรงดันเอาต์พุตได้ตามความต้องการแล้ว เราสามารถแบ่งการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวที่ทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป ได้โดยสังเกตดูจากวงจรจะมีทั้งหมดสี่ส่วนคือ

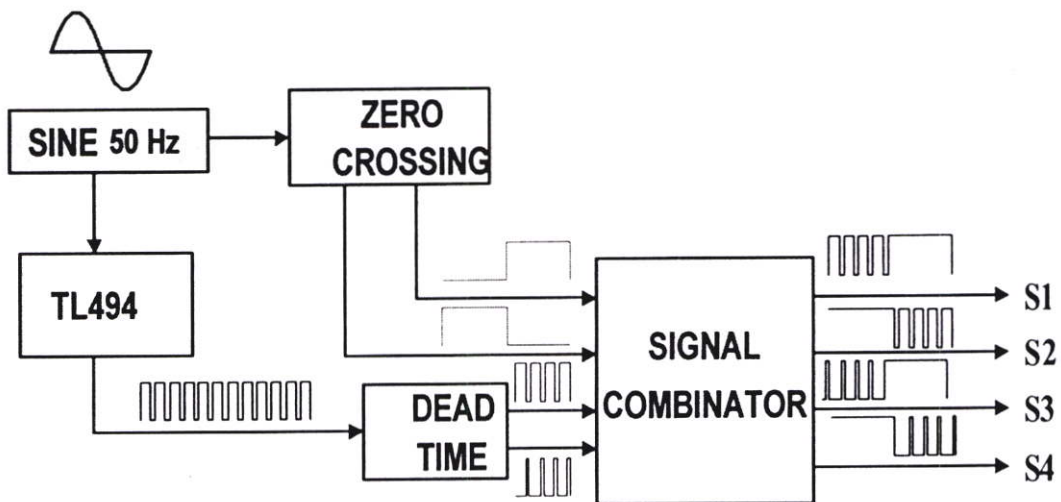
1.แหล่งจ่ายทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าความถี่ 50 Hz สำหรับในงานนี้ได้ใช้แหล่งจ่ายจากการไฟฟ้า

2.ชุดสวิตซ์ทำหน้าที่เป็นตัวสับคลื่นไซน์ควาถี่ 50 Hz ที่ได้รับมาจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า โดยในที่นี้ให้เป็น v_s โดยไซน์ที่ถูกสับที่สามารถปรับควิตีไซเคิล เพื่อปรับค่า rms ของคลื่นแรงดันจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งสำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้มอสเฟต 4 ตัวนำมาต่อตามรูปที่ 2.2 เข้าเป็นชุดสวิตซ์

3.ชุดกรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงจากรูปวงจรที่ 2.2 ก็จะประกอบไปด้วย L และ C หรือที่เรียกว่า LC ฟิวเตอร์ ทำหน้าที่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงที่เกิดจากการทำงานของสวิตซ์ไม่ให้ผ่านไปยังชุดโหลดได้

4.ชุดโหลดในการทำงานของวงจรเอชไอเอ็พเปอร์จะต้องจ่ายโหลดได้ทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นโหลด R ,L หรือ C ในงานวิจัยชิ้นนี้ก็เช่นกันเพราะในขณะที่ใช้กับงานจริงเราไม่สามารถกำหนดชนิดของโหลดได้

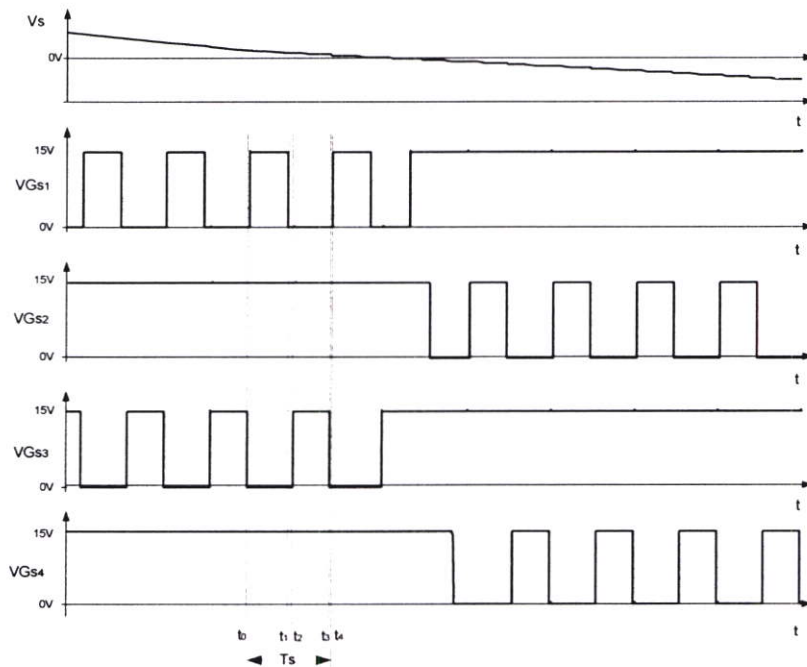
2.4 สัญญาณขับ



รูปที่ 2.3บล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับของวงจรเอชไอเอ็พเปอร์

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.3 เป็นลักษณะการสร้างสัญญาณ โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นมานี้เพื่อนำไปใช้สั่งให้สวิตซ์แต่ละตัวทำงาน ซึ่งการทำงานของสวิตซ์จะแตกต่างกันตามหน้าที่ของตัวมัน โดยสวิตซ์บางตัวอาจจะทำงานพร้อมกันเพื่อให้ได้คลื่นที่ต้องการ แต่บางตัวถ้าทำงานพร้อมกัน

ก็จะทำให้เกิดการลัดวงจรทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในวงจร จึงต้องให้ความสำคัญกับสัญญาณที่จะนำมาขับอุปกรณ์สวิตช์เป็นที่สุด ในการสร้างสัญญาณขับสวิตช์ของบทความวิจัยนี้ได้ใช้ ไอซีที่ทำได้โดยทั่วไปตามท้องตลาดมาประกอบกันเข้ากับเกตุต่างๆ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการและทำการปรับแต่งสัญญาณเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้การปรับแต่งสัญญาณก็เพื่อให้สัญญาณความคมทั้งในขาขึ้นและขาลงเพราะจะทำให้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งทำงานได้ดีที่สุด โดยในช่วงขาขึ้น(สวิตช์ ON) ต้องมีแรงดันไม่น้อยกว่า 8 V ที่ไปสั่งให้สวิตช์ทำงานและสัญญาณในช่วงขาลง(สวิตช์ OFF) ต้องมีแรงดันเป็นลบประมาณ -5 V เพื่อช่วยให้สวิตช์ทำการหยุดการทำงานได้เร็วขึ้น และยังคงมีการปรับแต่งสัญญาณอีกหลายอย่างเช่น ความถี่ (Frequency) ค่าเวลาเมื่อ (Dead Time) ค่าดิวิตีไซเคิล (D) [2] ดังนั้นในบทความฉบับนี้จึงได้นำสัญญาณขับที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองมาประกอบกรออธิบายได้ดังรูปที่ 2.4



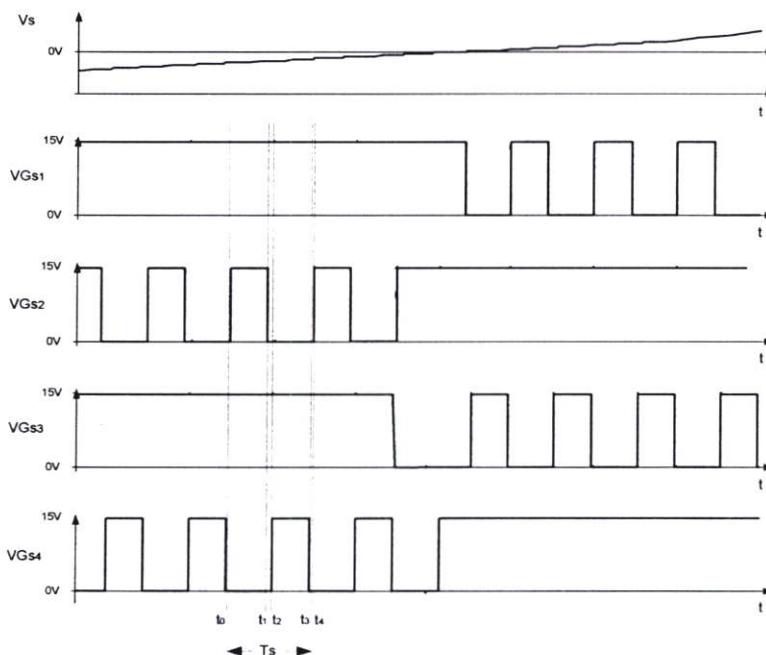
รูปที่ 2.4 แสดงการรวมสัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz

ในช่วง แรงดันไซน์จากบวกไปลบที่ค่าดิวิตีไซเคิล (D= 80%)

เมื่อสังเกตจากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่ามีสัญญาณอยู่สองลักษณะคือสัญญาณความถี่ 50 Hz กับสัญญาณความถี่ 20 kHz เมื่อดูทำงานจากรูปที่ 2.4 สัญญาณ S_1 กับ S_3 ON ขาวพร้อมกันในช่วงความถี่ที่ 50 Hz และจะทำงานสลับกันในช่วงความถี่ 20 kHz โดยการทำงานในช่วงความถี่ 20 kHz นี้จะมี (Dead Time) หรือ ค่าเวลาเมื่อเพื่อป้องกันไม่ให้สวิตช์ทั้งสองทำงานพร้อมกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นทำให้วงจรเกิดความเสียหาย และเช่นเดียวกันสวิตช์ S_2 กับ S_4 ก็จะ ON ขาวพร้อมกันในช่วงความถี่ 50Hz และจะสลับกันทำงานโดยที่มี (Dead Time) หรือค่าเวลาเมื่อ

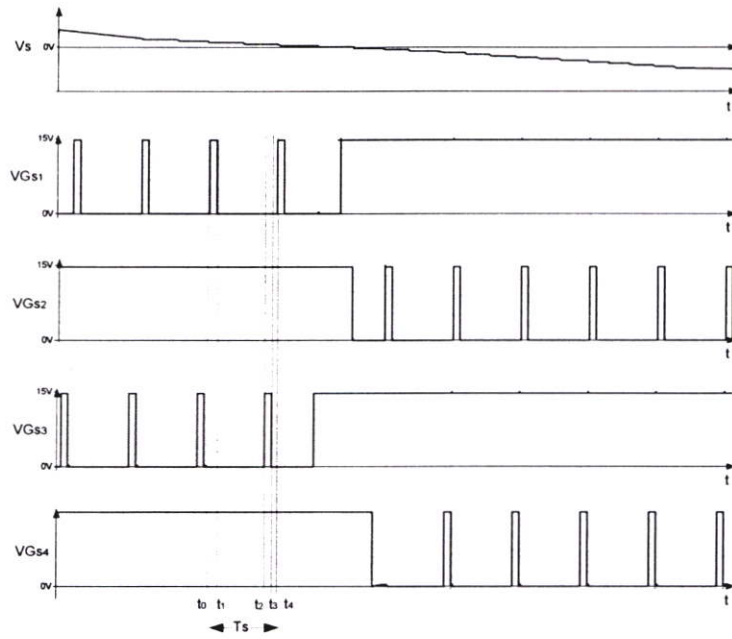
เช่นเดียวกับสวิตช์ S_1 กับ S_2 ลักษณะของสัญญาณดังในรูปที่ 2.4 นี้เป็นสัญญาณในขณะที่เริ่มการทำงานในจังหวะที่หนึ่ง คือในช่วงครึ่งคลื่นไซน์อินพุตในช่วงแรก

เมื่อสังเกตจากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า มีสัญญาณอยู่สองลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 2.4 คือมีสัญญาณความถี่ 50 Hz และ สัญญาณความถี่ 20 kHz S_1 กับ S_3 ก็จะ ON ยาวพร้อมกันในช่วงความถี่ที่ 50 Hz และจะทำงานสลับกันในช่วงความถี่ 20 kHz โดยการทำงานในช่วงความถี่ 20 kHz นี้จะมี (Dead Time) หรือ และเช่นเดียวกับสวิตช์ S_2 กับ S_4 ก็จะ ON ยาวพร้อมกันในช่วงความถี่ 50Hz และจะสลับกันทำงานโดยมี (Dead Time) หรือค่าเวลาเพื่อซึ่งกันและกันเช่นเดียวกับสวิตช์ S_1 กับ S_2 แต่การทำงานในรูปที่ 2.4 นี้เป็นการทำงานในตอนปลายของคลื่นไซน์อินพุตในช่วงครึ่งไซเคลลบวก



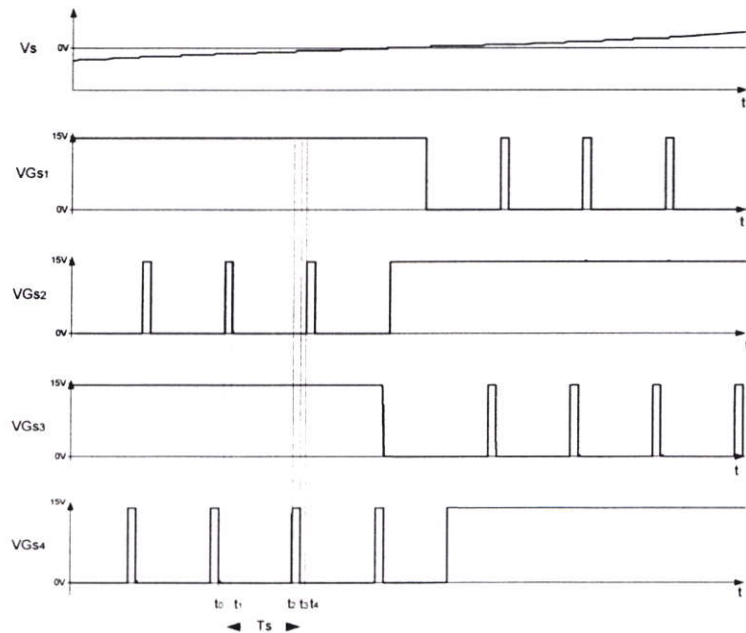
รูปที่ 2.5 แสดงการรวมสัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz ในช่วง แรงดัน ไซน์จากกลับไปบวกที่ค่าควดีไซเคลล (D= 80%)

แต่ถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.5 จากสัญญาณทั้งสองนั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ไซน์อินพุตเป็นช่วงบวกสวิตช์ S_1 กับ S_3 จะทำงานสลับกันที่ความถี่ 20kHz โดยมี (Dead Time) ซึ่งกันและกันและสวิตช์ S_2 กับ S_4 ก็จะ ON ยาวพร้อมกันในช่วงที่ไซน์เป็นลบ ส่วนในช่วงที่ไซน์เป็นลบก็จะเป็นสวิตช์ S_2 กับ S_4 ที่ทำงานสลับกันในช่วงความถี่ 20 kHz ส่วน S_1 กับ S_3 ก็จะ ON ยาวพร้อมกันในช่วงนี้



รูปที่ 2.6 สัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz ในช่วงแรงดันไซน์ จากบวกไปลบที่ค่าดีวีไอเซิล(D= 20%)

จากรูปที่ 2.6 การทำงานก็จะเหมือนกับในรูปที่ 2.4 แต่ถ้าสังเกตดูจะเห็นว่าสัญญาณที่ใช้ขับเกทที่สับในช่วงความถี่ 20 kHz จะมีความกว้างน้อยกว่าในรูปที่ 2.4 เพราะมีค่าดีวีไอเซิลเกิดน้อยลงเหลือ 20% จาก 80% ในรูปที่ 2.4

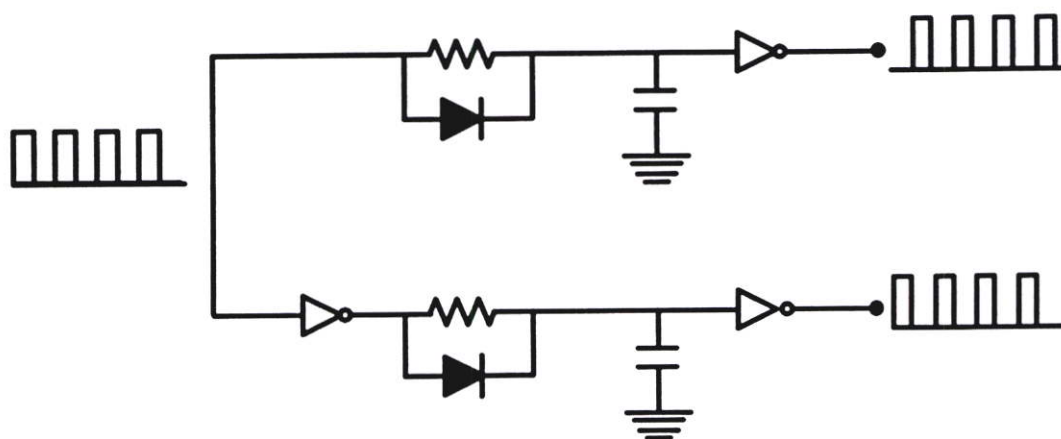


รูปที่ 2.7 แสดงการรวมสัญญาณของสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz และสัญญาณ PWM 20 kHz ในช่วงแรงดันไซน์จากลบไปบวกที่ค่าดีวีไอเซิล (D= 20%)

จากรูปที่ 2.7 การทำงานก็จะเหมือนกับในรูปที่ 2.5 แต่ถ้าสังเกตดูจะเห็นว่าสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนที่สับในช่วงความถี่ 20 kHz จะมีความกว้างน้อยกว่าในรูปที่ 2.5 เพราะมีค่าดีวีไซน์ที่ลดลงเหลือ 20% จาก 80% ในรูปที่ 2.5 ซึ่งจากการสร้างสัญญาณนี้เราก็ได้นำสัญญาณที่ได้ไปขับอุปกรณ์สวิตช์และได้เกิดการทำงานของวงจรทำให้เกิดโหมคการทำงานต่าง ๆ ขึ้นดังต่อไปนี้

2.5 เดดไทม์ (Dead time)

จากรูปที่ 2.4 , 2.5 , 2.6 และ 2.7 จะพบว่าคู่ของ S_1 และ S_3 มีการทำงานที่ตรงกันข้ามในช่วงบวกของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย เช่นเดียวกับคู่ของ S_2 และ S_4 ในช่วงลบของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายอินเวอร์ชันการไฟฟ้า แต่มีสัญญาณที่กลับกันนั้นยังไม่พอที่จะทำให้วงจรเอช็ชอปเปอร์ทำงานได้อย่างปลอดภัย และเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้ว การทำให้สวิตช์นำกระแส (ON) หรือหยุดนำกระแส (OFF) นั้นจำเป็นต้องใช้เวลาช่วงสั้น ๆ ช่วงหนึ่ง อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของเซมิคอนดักเตอร์สวิตช์ ก่อนที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแส (ON) ขึ้นมา ต้องแน่ใจว่าสวิตช์ในคู่เดียวกันนั้นได้หยุดนำกระแสไปแล้ว เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยสวิตช์ทั้งสองซึ่งจะทำให้สวิตช์ทั้งคู่เกิดความเสียหายได้ โดยเหตุนี้สัญญาณเกทของแต่ละสวิตช์จะถูกหน่วงเวลาในช่วงขาขึ้นของสัญญาณไปช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อให้คู่สวิตช์ที่กำลังหยุดนำกระแส ได้หยุดนำกระแสโดยสมบูรณ์เสียก่อนซึ่งจะทำให้เกิดช่วงเวลาที่ยัง S_1 และ S_3 หรือ S_2 และ S_4 หยุดนำกระแสทั้งคู่ช่วงเวลานี้เรียกว่าช่วงเดดไทม์ (Dead time) มีลักษณะของวงจรที่ทำให้เกิดช่วงเดดไทม์ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสร้างเดดไทม์

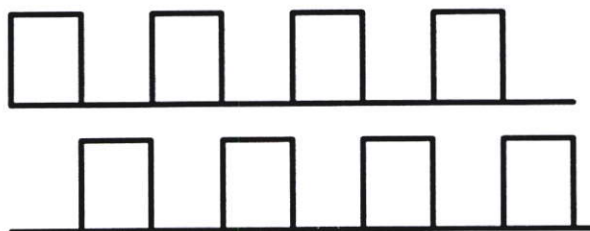
2.5.1 หลักการทำงานของวงจรสร้างเคดไทม์

จากวงจรดังรูปที่ 2.8 ได้มีลักษณะการทำงานคือเมื่อ ได้สัญญาณมาจากวงจรสร้างสัญญาณก็จะนำไปเข้าสู่วงจรสร้างสัญญาณเคดไทม์โดยสัญญาณที่จะนำมาสร้างมีลักษณะดังในรูปที่ 2.8



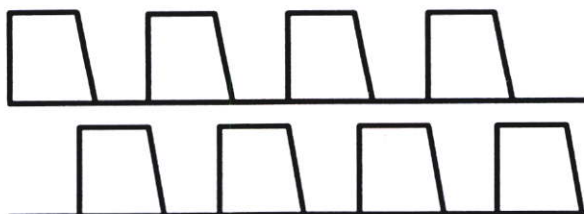
รูปที่ 2.9 สัญญาณที่จะสร้างเคดไทม์

เมื่อสัญญาณอินพุตผ่านเข้ามาในวงจรสร้างสัญญาณเคดไทม์ในจังหวะแรงจะทำให้สัญญาณกลับกัน โดยใช้ชุดอินเวอร์ตติ้งแอมป์ใส่ให้กับวงจรสร้างสัญญาณขาใดขาหนึ่งโดยวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.8 ใส่ชุดอินเวอร์ตติ้งแอมป์ให้กับขาล่าง



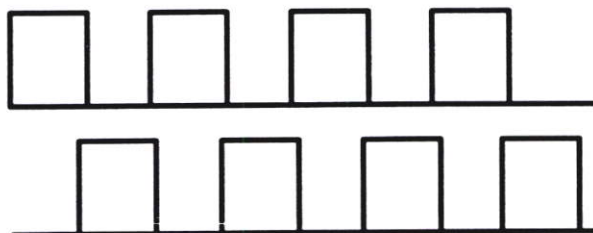
รูปที่ 2.10 สัญญาณที่สร้างให้กลับกัน

ผลที่ได้คือจะทำให้ได้สัญญาณสองสัญญาณที่มีลักษณะกลับกันแต่สัญญาณที่ได้นี้ยังไม่สามารถนำไปขับสวิตช์ได้เพราะยังไม่มีช่วงเคดไทม์ระหว่างกันคือในช่วงที่สัญญาณที่หนึ่งลงก็จะ เป็นจังหวะเดียวกับช่วงที่สัญญาณที่สองขึ้น เราจึงทำการหน่วงเวลาในช่วงขาลงของสัญญาณทั้งสองออกไปจะทำให้ได้สัญญาณทั้งสองดังรูปที่ 2.11



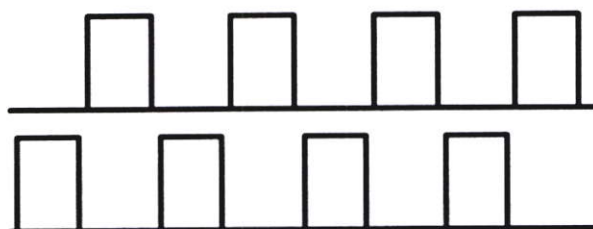
รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ถูกหน่วงการลงออกไป

จากรูปสัญญาณในรูปที่ 2.11 ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกหน่วงออกไปในช่วงขาลงลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการคายประจุของ C ผ่าน R เมื่อสัญญาณมาตัดโดยถ้าต่ำกว่า 5 V. ให้เป็น 0 ก็จะได้สัญญาณที่มีจุดทับซ้อนกันดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สัญญาณที่มีจุดทับกัน

จากในรูปที่ 2.12 สัญญาณทั้งสองจะมีจุดที่ทับกันเราจึงนำสัญญาณทั้งสองนี้มาทำการอินเวอร์ทกลับก็จะได้สัญญาณที่มีเคดไทม์ระหว่างกันสามารถนำไปใช้งานได้ดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สัญญาณที่มีเคดไทม์ที่สามารถนำไปใช้งานได้แล้ว

2.6 สรุป

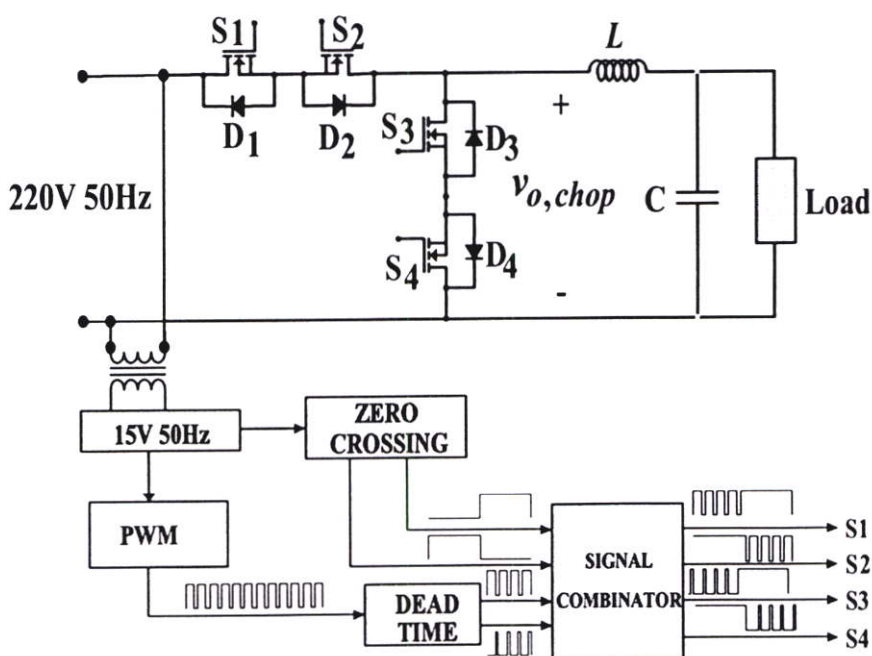
จากทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรถ่ายเอชไอโอสามารถทำให้ทราบถึงการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรถ่ายเอชไอโอ จะทำให้เข้าใจขั้นตอนการที่จะศึกษาถึงการทำงานของวงจรถ่ายเอชไอโอ และสามารถเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์วงจรถ่ายเอชไอโอในส่วนต่าง ๆ อีกทั้งยังทำให้สามารถสร้างสัญญาณที่จะใช้ควบคุมการทำงานของวงจรถ่ายเอชไอโอและสร้างเครื่องต้นแบบไว้ใช้ทดลองเพื่อเก็บผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ

บทที่ 3

การทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง

3.1 บทนำ

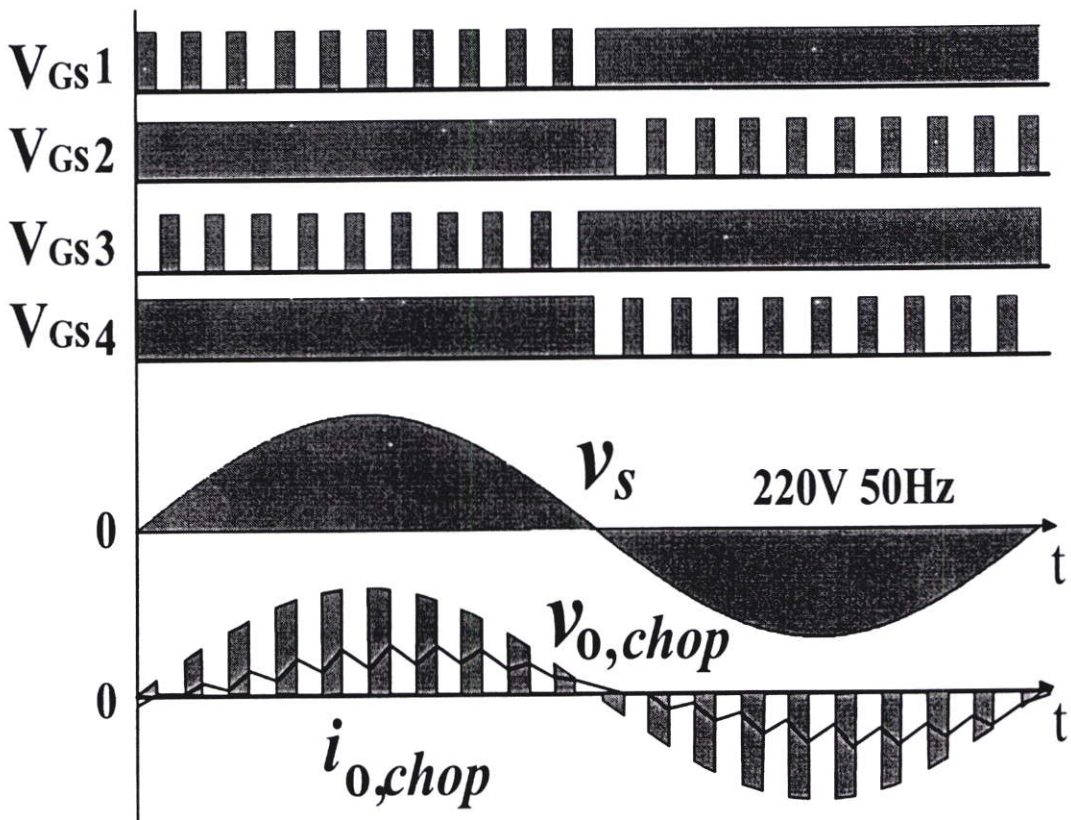
ในงานที่ต้องการแรงดันที่มีลักษณะคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz ที่สามารถปรับขนาดแรงดันได้อย่างต่อเนื่องในย่านกว้าง ตั้งแต่ระดับแรงดันศูนย์จนถึงระดับสูงสุด 200V สามารถทำได้โดยการนำเอาแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 Hz มาผ่านวงจรเอชชอปเปอร์ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งทำงานที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งในระดับ 20 kHz พร้อมกับผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์วงจรเอชชอปเปอร์อย่างเป็นขั้นตอน ตั้งแต่การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรในแต่ละโหมดการทำงาน จากนั้นได้นำคลื่นไซน์ที่ถูกชอปด้วยความถี่สูง 20 kHz มาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่มีปะปนในตัวคลื่นเอชชอป องค์ประกอบที่ได้นี้สามารถนำข้อมูลไปออกแบบเพื่อกำหนดค่า LC ในวงจรฟิลเตอร์ได้ ผลปรากฏว่า LC ที่ใช้ในการออกแบบมีขนาดเล็กและสามารถปล่อยผ่านคลื่นไซน์ 50 Hz ออกไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงในลำดับต่ำสุดลำดับที่ 400 จะถูกกรองทิ้งได้เกือบทั้งหมดผลปรากฏว่าแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะคลื่น 50 Hz ใกล้เคียงคลื่นไซน์มาก พร้อมทั้งสามารถปรับขนาดของแรงดัน rms นี้ได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 200 V



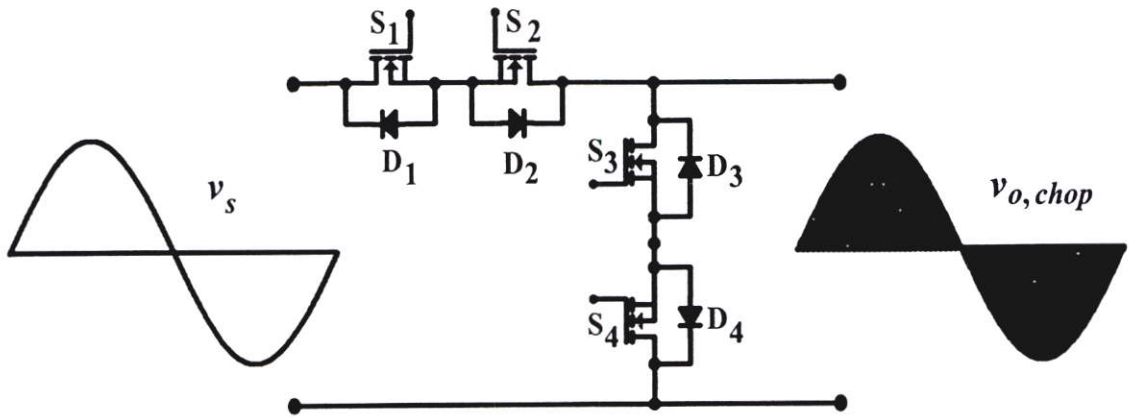
รูปที่ 3.1 วงจรเอชชอปเปอร์และบล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับเกท

3.2 โหมดการทำงานของวงจรเอซี-ชอปเปอร์

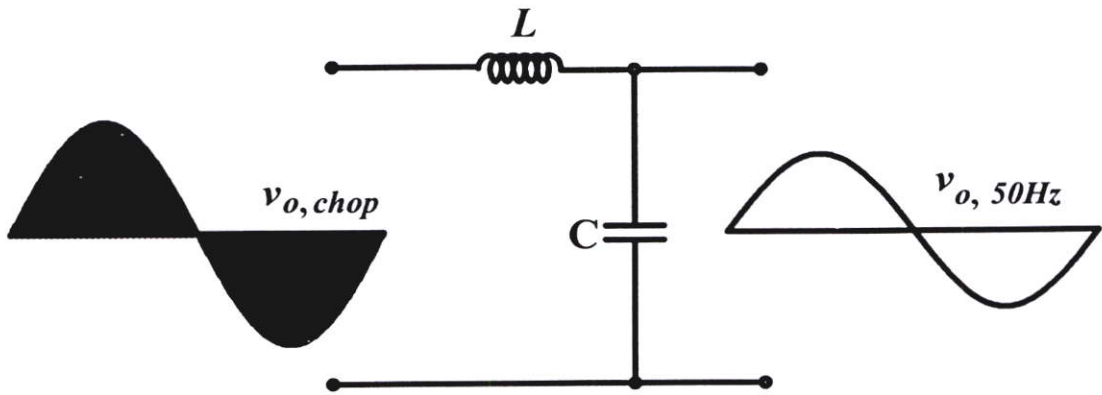
เมื่อป้อนสัญญาณกระตุ้นเกทลักษณะดังรูปที่ 3.2 ให้กับสวิทช์ของวงจรในรูปที่ 3.3 จะเกิดเป็นการทำงานของวงจรเป็นจังหวะตามที่เรากำลังต้องการ ซึ่งการทำงานที่เกิดขึ้นนี้จะสร้างให้เกิดโหมดการทำงานของวงจรในรูปแบบต่างๆขึ้นมา โดยอินพุตของวงจรเอซีชอปเปอร์ คืออินพุตไฟฟ้า 50 Hz และจะได้ลักษณะของคลื่นแรงดันที่ออกจากวงจรเอซีชอปเปอร์เป็น $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ซึ่งมีลักษณะเป็นแรงดันไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 20 kHz ที่เกิดจากการทำงานของสวิทช์ในวงจรเอซีชอปเปอร์ ทำงานตามสัญญาณยับเกทที่สร้างขึ้นที่แสดงดังในรูปที่ 3.2 โดยอินพุตไฟฟ้า 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่สูง 20 kHz นี้จะเกิดเป็นโหมดการทำงานต่างๆ และเมื่อนำไซน์ 50 Hz ที่มีฮาร์มอนิกส์ความถี่สูง 20 kHz ป้อนเข้ามาผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ ดังในรูปที่ 3.4 วงจร LC ฟิลเตอร์ก็จะทำหน้าที่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกจากไซน์ 50 Hz ทำให้ได้เอาต์พุตของวงจร LC ฟิลเตอร์ออกมาเป็นไซน์ 50 Hz ที่สามารถปรับค่า rms ได้และมีฮาร์มอนิกส์ความสูงปะปนออกมาน้อยมาก



รูปที่ 3.2 ลักษณะสัญญาณยับเกทและคลื่นอินพุตเอาต์พุต



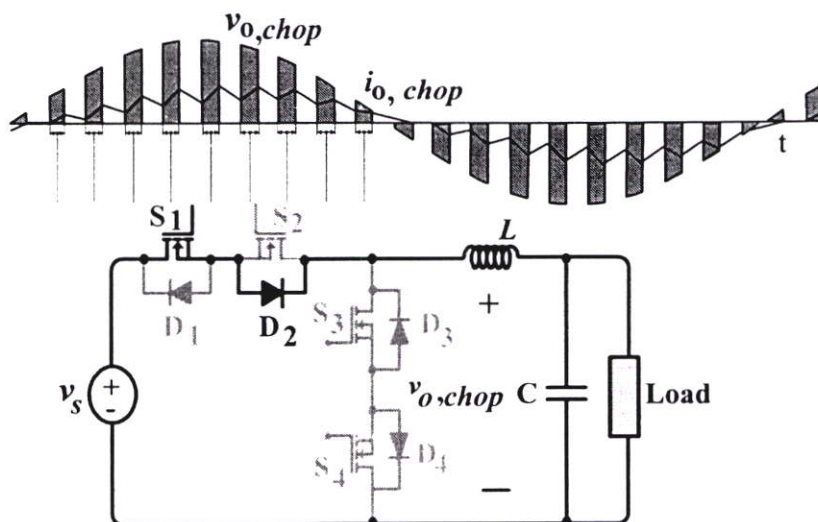
รูปที่ 3.3 ลักษณะของคลื่นก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรเอชชีชอปเปอร์



รูปที่ 3.4 ลักษณะคลื่นก่อนผ่านและหลังผ่าน LC ฟิวเตอร์

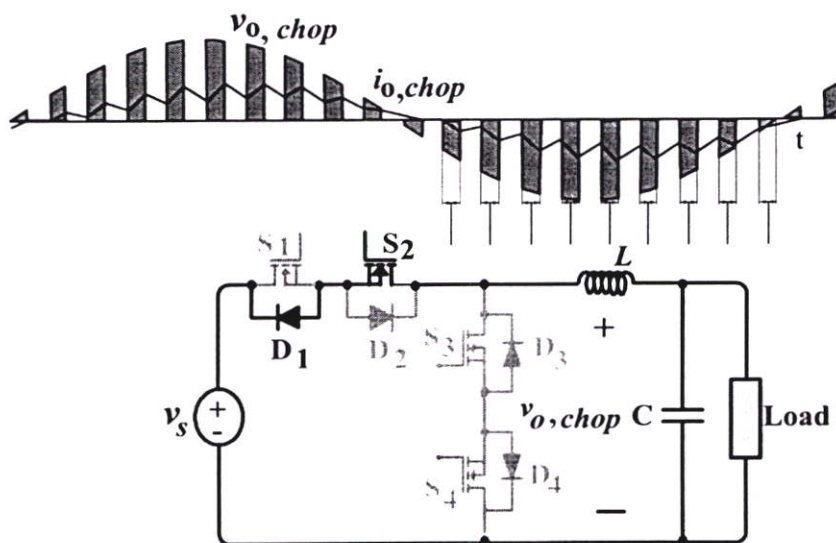
3.2.1 โหมดจ่ายกำลัง (Powering Mode)

โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวก โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมดที่โหลดได้รับกำลังจากแหล่งจ่ายไซนัสการไฟฟ้า 50 Hz ในครึ่งไซเคิลบวก โดยมีแรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นบวก ซึ่งจะมีลักษณะรูปคลื่นและการทำงานของวงจรดังรูปที่ 3.5 จากวงจรเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกทของสวิตช์ S_1 สวิตช์ S_1 ก็จะทำการ ON เพื่อต่อวงจรทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ S_1 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_2 ผ่าน LC ฟิวเตอร์ไปยังโหลดและครบวงจร



รูปที่ 3.5 ลักษณะวงจรของโหมคจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวก

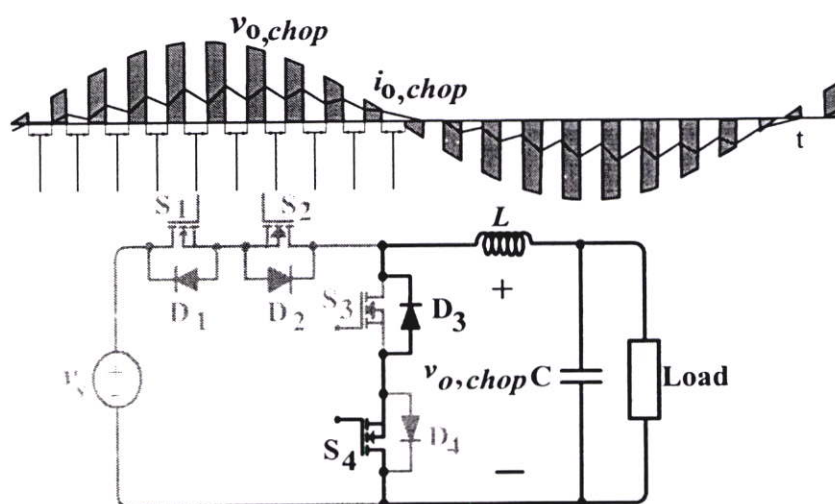
โหมคจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลลบเป็นโหมคที่โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไซน์การไฟฟ้า 50 Hz ในครึ่งไซเคิลลบ โดยที่มีแรงดันเป็นลบกระแสเป็นลบ ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.6 จากวงจรเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ S_2 สวิตช์ S_2 ก็จะทำการ ON เพื่อต่อวงจรทำให้พลังงานไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน LC ฟิลเตอร์ผ่านโหลด ผ่านสวิตช์ S_2 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_1 ครบวงจร



รูปที่ 3.6 ลักษณะวงจรของโหมคจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลลบ

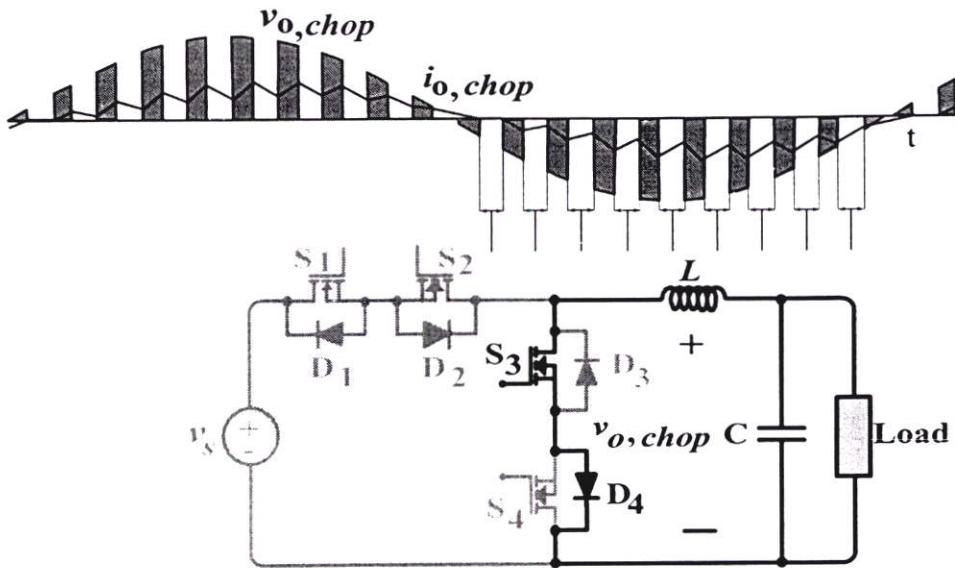
3.2.2 โหมดฟรีวีล (Freewheeling Mode)

โหมดฟรีวีลในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมดที่วงจรไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50 Hz แต่ให้กำลังไฟฟ้าที่อยู่ใน L_{filter} จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด โดยจะเกิดในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์และกระแสเอาต์พุตเป็นบวกซึ่งเกิดในช่วงไซเคิลบวกของ แรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 Hz ดังรูปที่ 3.7 จากวงจรเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ S_3 สวิตช์ S_4 ก็จะทำการ ON เพื่อต่อวงจรทำให้พลังงานที่อยู่ใน L_{filter} สามารถไหลไปในทิศทางเดิม (ทิศทางเดียวกันโหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวก) กำลังไฟฟ้าจะไหลจาก L_{filter} ผ่านโหลดผ่านไปสวิตช์ S_4 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_3 ผ่านโหลดกลับไป L_{filter} ครบวงจร



รูปที่ 3.7 โหมดฟรีวีลในครึ่งไซเคิลบวก

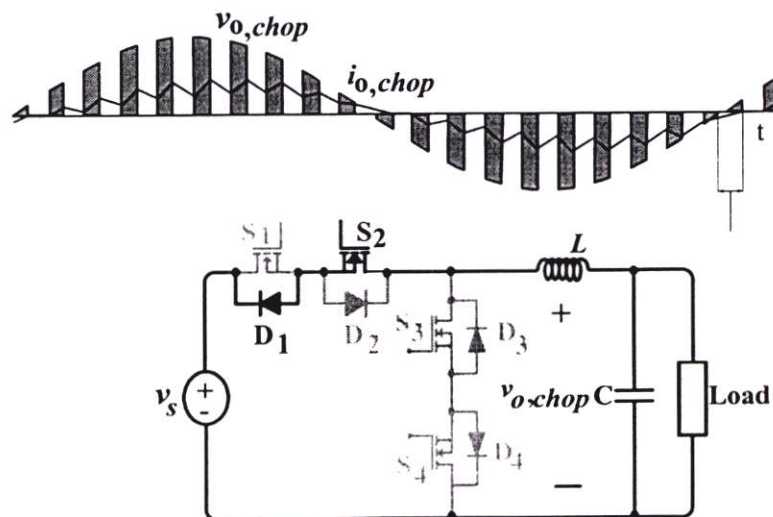
โหมดฟรีวีลในครึ่งไซเคิลลบ เป็นโหมดที่วงจรไม่ได้รับกำลังจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50Hz แต่จะให้กำลังไฟฟ้าที่อยู่ใน L_{filter} จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด โดยจะเกิดในขณะที่แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์และเอาต์พุตเป็นลบซึ่งเกิดในช่วงครึ่งไซเคิลลบของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50-Hz ดังรูปที่ 3.8 จากวงจรเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ S_3 สวิตช์ S_3 ก็จะทำการ ON เพื่อต่อวงจรทำให้พลังงานที่อยู่ใน L_{filter} สามารถไหลไปในทิศทางเดิม (ทางเดียวกับโหลดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลลบ) กำลังไฟฟ้าจะไหลจาก L_{filter} สวิตช์ S_3 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_4 ผ่านโหลด L_{filter} ครบวงจร



รูปที่ 3.8 โหมดฟรีวีลในครึ่งไซเคิลลบ

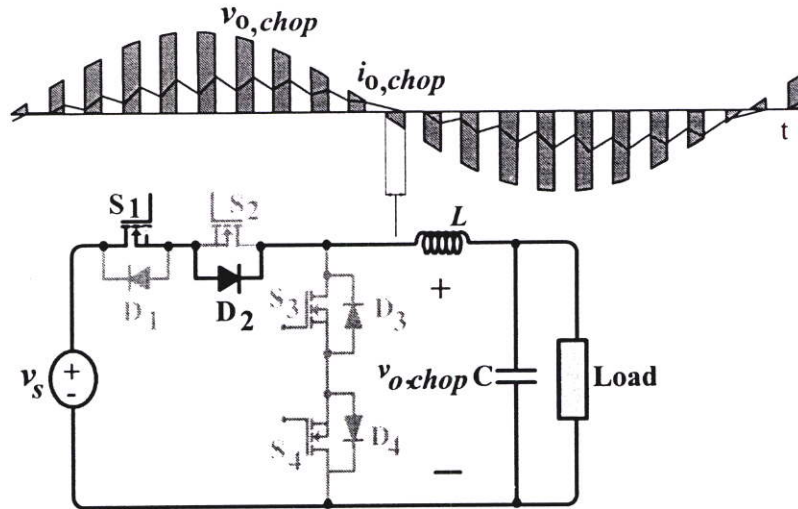
3.2.3 โหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Mode)

โหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลลบเป็นโหมดที่แหล่งจ่ายไซน์การไฟฟ้า 50 Hz รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลด เกิดขึ้นในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเป็นลบและกระแสเอาต์พุตเป็นบวก ในบริเวณครึ่งไซเคิลลบของ แรงดันไซน์การไฟฟ้า 50-Hz ดังวงจรรูปที่ 3.9 การทำงานของวงจรเอชชีชอปเปอร์ในโหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลลบนั้นจะทำงานเหมือนกับโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลลบ แต่มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากลับกันโดยกำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโหลดผ่าน LC ฟิลเตอร์ผ่านสวิตช์ S_2 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_1 ไปยังแหล่งจ่ายครบวงจร



รูปที่ 3.9 โหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลลบ

โหมครีเจนเนอร์เรทีฟในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมคที่แหล่งจ่ายไฟ 50Hz รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลด เกิดขึ้นในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเป็นบวกและกระแสเอาต์พุตเป็นลบ ในบริเวณครึ่งไซเคิลบวกของ แรงดันไซน์การไฟฟ้า 50-Hz ดังวงจรรูปที่ 3.10 การทำงานของวงจรเอชี่ชอปเปอร์ในโหมครีเจนเนอร์เรทีฟในครึ่งไซเคิลบวกนั้นจะทำงานเหมือนกับโหมคจ่ายกำลังไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลลบ แต่มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากลับกัน โดยกำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโหลดผ่าน LC ฟิวเตอร์ไปยังแหล่งจ่าย ผ่านสวิตช์ S_1 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_2 ครอบคลุม



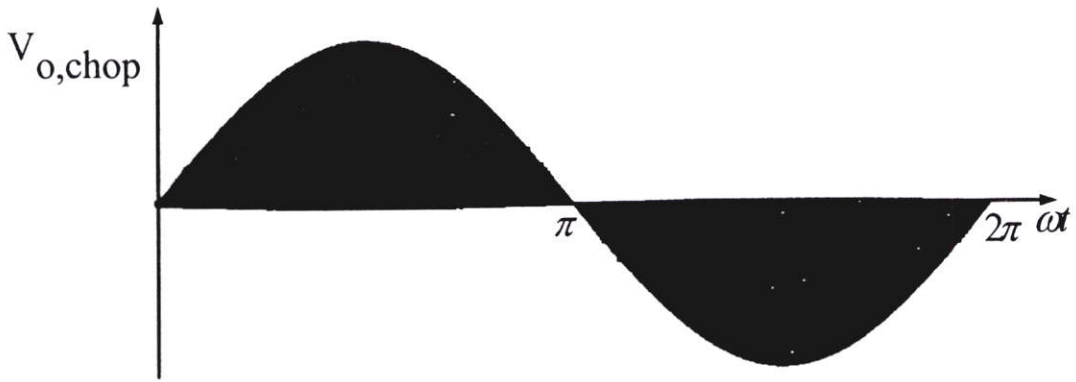
รูปที่ 3.10 โหมครีเจนเนอร์เรทีฟในครึ่งไซเคิลบวก

3.3 ลักษณะคลื่นของวงจรเอชี่ชอปเปอร์ที่ได้จากการทำงานเป็นโหมค

จากการร่วมกันทำงานของสวิตช์และอุปกรณ์ที่ต่อกันเป็นวงจรเอชี่ชอปเปอร์ซึ่งทำให้เกิดโหมคการทำงานดังที่ได้อธิบายการทำงานของแต่ละโหมคไปแล้วนั้น จากการทำงานในลักษณะดังกล่าวในหนึ่งไซเคิลไซน์อินพุตซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไซน์การไฟฟ้า 220 V /50 Hz เมื่อทำงานครบหนึ่งไซเคิลจะได้คลื่นไซน์ 50Hz ที่ถูกสับให้เป็นช่องเล็กๆ ตามจังหวะการสวิตชิงของวงจร โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความถี่ในการสวิตชิงเท่ากับ 20 kHz ทำให้ในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz แบบเป็นช่องได้เท่ากับ 400 ช่องดังสมการที่ (3.1) [2]

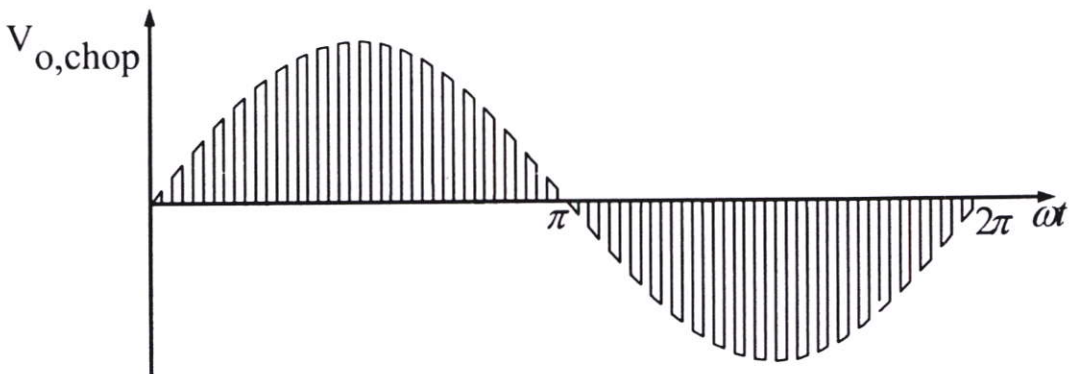
$$m_f = \frac{f_{sw}}{f} = \frac{20\text{kHz}}{50\text{Hz}} = 400 \quad (3.1)$$

ซึ่งในจำนวน 400 ช่องนี้จะอยู่ในครึ่งไซเคิลบวกของไซน์ 50 Hz จำนวน 200 ช่องและอยู่ในครึ่งไซเคิลลบของไซน์ 50 Hz อีก 200ช่องโดยได้แสดงลักษณะของช่องไว้ดังในรูปที่ 3.11 และรูปที่



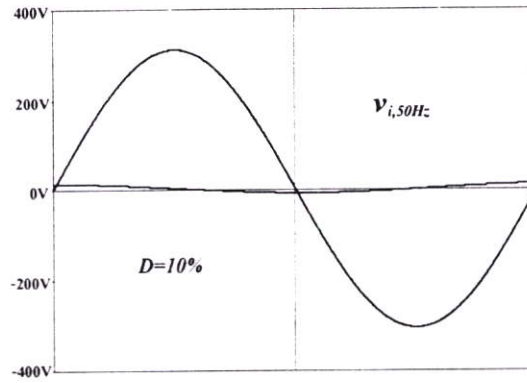
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นไซน์อินพุต 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 20 kHz

จากรูปที่ 3.11 ภายในคลื่นไซน์ 50Hz จะมีช่องจำนวน 400 ช่องโดยความสูงของแต่ละช่องจะเกาะไปตามความสูงของคลื่นไซน์ แต่เนื่องจากในรูปที่ 3.11 ใช้ความถี่สวิตช์สูงเท่ากับ 20 kHz ทำให้ไม่สามารถดูลักษณะของคลื่นไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับเป็นช่องได้ จึงได้ทำการลดความถี่ในการสวิตช์ลงมาที่ 2 kHz เพื่อให้สามารถมองเห็นลักษณะของคลื่นที่ถูกสับแบ่งเป็นช่องๆ ได้อย่างชัดเจนดังในรูปที่ 3.12

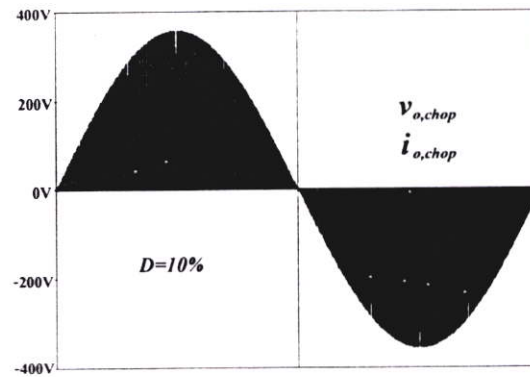


รูปที่ 3.12 รูปคลื่นไซน์อินพุต 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 2 kHz

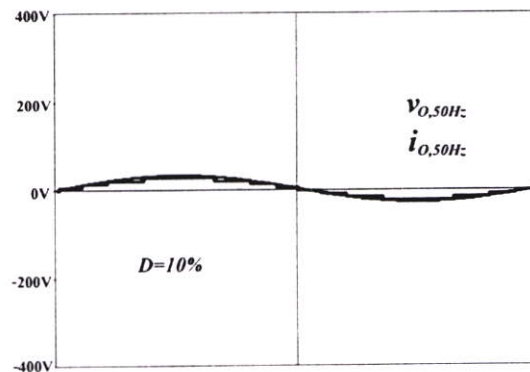
จากรูปที่ 3.13 ถึง รูปที่ 3.21 จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปสัญญาณที่ยังไม่ได้ผ่าน LC ฟิลเตอร์ทั้งในส่วนขงที่มีค่าคิวดีไซเคิล D (Duty cycle) เท่ากับ 10% 50% และ 90% จะไม่แตกต่างกัน เพราะใน 1 ไซเคิลที่มีค่าแรงดันเท่ากันจะถูกสับแบ่งเป็น 400 ช่องแล้วจึงไปปรับความกว้างของช่องเล็ก 400 นั้นช่องให้กว้างมากขึ้นตามต้องการจึงทำให้มองเห็นเป็นไซน์ที่บิด ต่างกับรูปที่ไซน์ที่บผ่าน LC ฟิลเตอร์แล้วจะเป็นไซน์สวย 50 Hz ที่สามารถปรับระดับแรงดันได้ในรูปที่ไซน์ที่บผ่าน LC ฟิลเตอร์แล้วจะมีความแตกต่างกัน เพราะในรูปที่มีค่าคิวดีไซเคิล (D) มากกว่าจะให้ไซน์ที่มีความสูงมากกว่าคือมีแรงดันมากกว่านั่นเอง ซึ่งเป็นผลมาจากการสับไซน์ 1 ไซเคิลให้เป็นช่องเล็ก 400 จำนวนช่อง



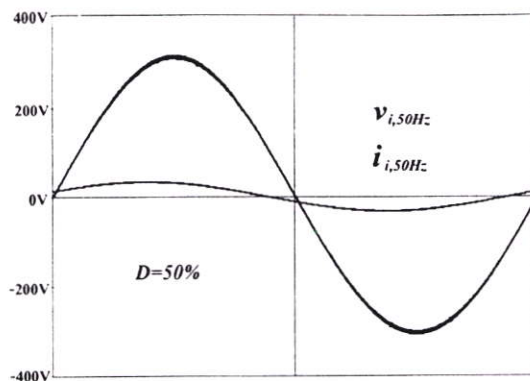
รูปที่ 3.13 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวีไอเซลล์ D เท่ากับ 10 %



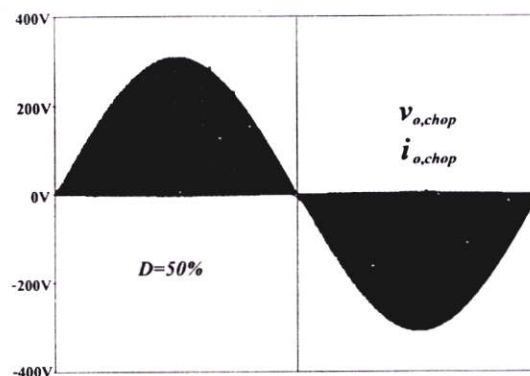
รูปที่ 3.14 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวีไอเซลล์ D เท่ากับ 10 %



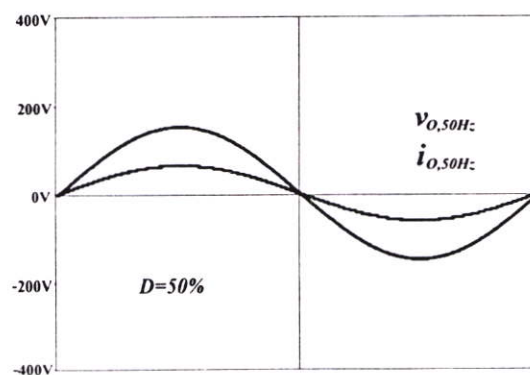
รูปที่ 3.15 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวีไอเซลล์ D เท่ากับ 10 %



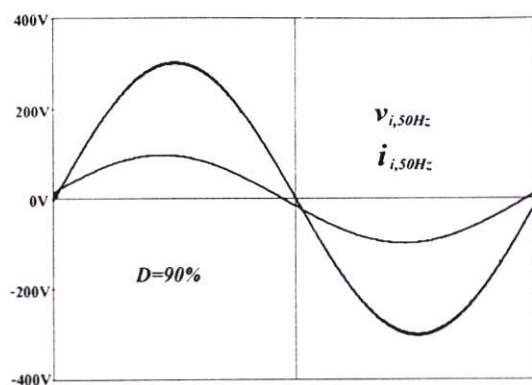
รูปที่ 3.16 คลื่นแรงและกระแสต้นอินพุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 50 %



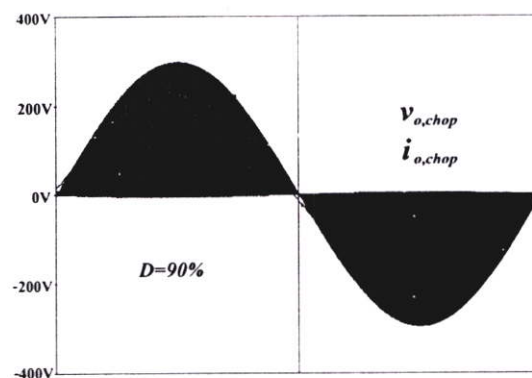
รูปที่ 3.17 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชซีชอปเปอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 50 %



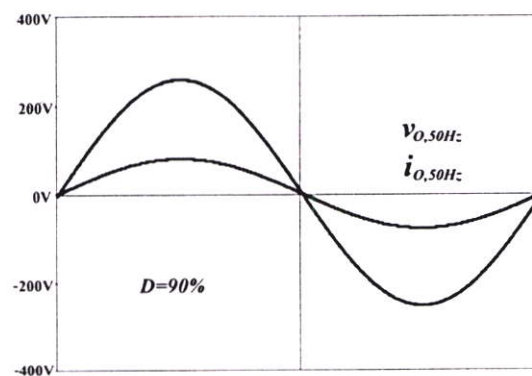
รูปที่ 3.18 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชซีชอปเปอร์ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 50 %



รูปที่ 3.19 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 90 %



รูปที่ 3.20 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 90 %



รูปที่ 3.21 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 90 %

จากรูปคลื่นที่ได้แสดงมาตั้งแต่ค่าควิตซ์ไซเคิลที่ 10% 50% และ 90% จะสังเกตได้ว่าแรงดันทางด้านอินพุตจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแสที่มากขึ้นตามค่าควิตซ์ไซเคิล ส่วนแรงดันและกระแสที่ถูกชอปจะมีรูปร่างลักษณะ โครงสร้างที่ดูจากภายนอกแล้วเหมือนกันแต่ อันที่จริงถ้าขยายดูจะเห็นว่าที่ค่าควิตซ์ไซเคิลต่างๆกันจะทำให้แรงดันที่ถูกชอปเป็นช่องมีค่าความ กว้างของช่องที่เปลี่ยนไปตามค่าควิตซ์ไซเคิล โดยเมื่อนำแรงดันที่ถูกชอป ($v_{o, chop}$) มาผ่าน LC ฟิเตอร์ ก็จะได้แรงดันไซน์สวที่มีความถี่ 50Hz เท่ากับความถี่อินพุตและสามารถปรับค่า rms ได้โดยการ ปรับค่าควิตซ์ไซเคิลที่สวิทช์ แต่ในการทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์ในแบบการชอปแรงดันใน ขณะที่สวิทช์เริ่มนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันสไปค์ ขึ้นมาซึ่งแรงดันสไปค์นี้จะทำให้การทำงานของ วงจรทำได้ไม่เต็มที่ หรืออาจจะทำให้อุปกรณ์สวิทช์เกิดความเสียหายได้ในหัวข้อต่อไปจึงเป็น การกล่าวถึงการทำงานและการวิเคราะห์ห้วงจรสับเบอร์

3.4 สับเบอร์

โดยทั่วไปการทำงานของอุปกรณ์สวิทช์ [1] จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิทช์นำกระแส ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันตก คร่อมสวิทช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และอีกกรณีหนึ่งคือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะของ สวิทช์ (หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิทช์) ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเริ่มทำงานของสวิทช์จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิทช์ นำกระแสมาก ซึ่งการทำงานของวงจรมองจากจะมีอุปกรณ์สวิทช์แล้วจะต้องมีอุปกรณ์อีกส่วนหนึ่ง ที่จะมาช่วยในการทำงานของอุปกรณ์ให้สวิทช์สามารถทำงานได้ดีขึ้น และเป็นตัวช่วยลดความ สูญเสียให้กับวงจรไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียในรูปของพลังงานหรือการเสียหายของอุปกรณ์ อัน เนื่องมาจากการทำงานในสภาวะเกินพิกัด วงจรที่จะกล่าวถึงนี้ก็คือวงจรสับเบอร์ โดยการทำงานของ วงจรสับเบอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนแรงดันในขณะที่อุปกรณ์สวิทช์เริ่มนำหรือหยุด นำกระแส เพราะการที่สวิทช์เริ่มนำหรือหยุดนำกระแสจะทำให้เกิดสไปค์(แรงดันหรือกระแส ชั่วขณะ) เกิดขึ้นมาซึ่งการที่จะเกิดสไปค์(แรงดันหรือกระแสชั่วขณะ) นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการ ต่อวงจรที่จะใช้งานและค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบอยู่ในวงจรด้วย ในทางการทำงานเราสามารถ เลือกใช้อุปกรณ์สวิทช์ที่มีพิกัดที่สูงกว่าแรงดันสไปค์ได้แต่ไม่นิยมทำกันเพราะจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ มีราคาสูงมากและเป็นการใช้งานที่ไม่คุ้มค่า ดังนั้นเราจึงมาใช้สับเบอร์เป็นอุปกรณ์ช่วยในการ ทำงานของสวิทช์ โดยที่วงจรสับเบอร์จะเข้าไปทำให้ค่าต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา $\frac{di}{dt}$, อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับ เวลา $\frac{dv}{dt}$, แรงดันสไปค์ (spike voltage) และค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงนำกระแส (turn-on)

และช่วงหยุดนำกระแส (turn-off) ให้มีค่าลดลงจนไม่สามารถที่จะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ โดยทั่วไปสแนบเบอร์มีอยู่ 3 แบบ คือ

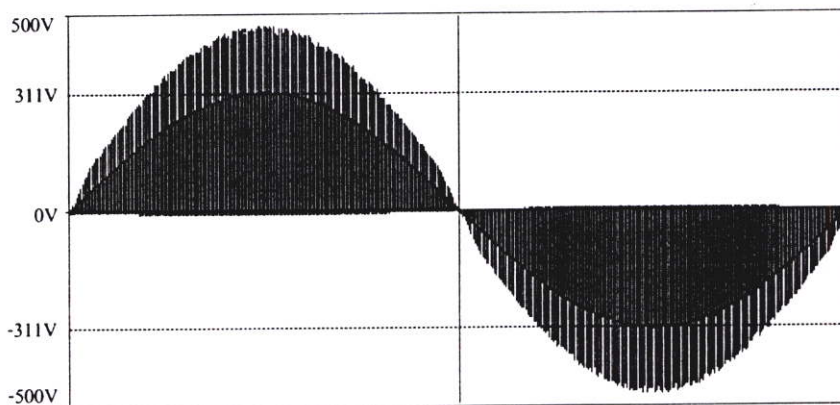
1. Unpolarized Serise $R-C$ Snuber ซึ่งวงจรแบบนี้ทำหน้าที่ใช้ในการป้องกันไดโอด และไทรสเตอร์ โดยทำหน้าที่จำกัดค่าแรงดันเกิน และค่า $\frac{dv}{dt}$ ในช่วงเวลาย้อนกลับ

2. Polarized Serise $R-C$ Snuber วงจรแบบนี้ใช้ในการป้องกันอุปกรณ์จำพวก ทรานซิสเตอร์ (transistor) เช่น BJT, Power MOSFET และ IGBT เป็นต้น โดยจะทำหน้าที่จำกัด แรงดันสไปค์ (spike voltage) และค่า $\frac{dv}{dt}$ ในช่วงหยุดนำกระแส (turn-off)

3. Polarized $R-L$ Snuber วงจรแบบนี้ใช้ในการจำกัดค่าของ $\frac{di}{dt}$ และกระแสเกินในช่วง นำกระแส (turn-on)

3.4.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจร RC สแนบเบอร์ในวงจรเอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ ความถี่สูง

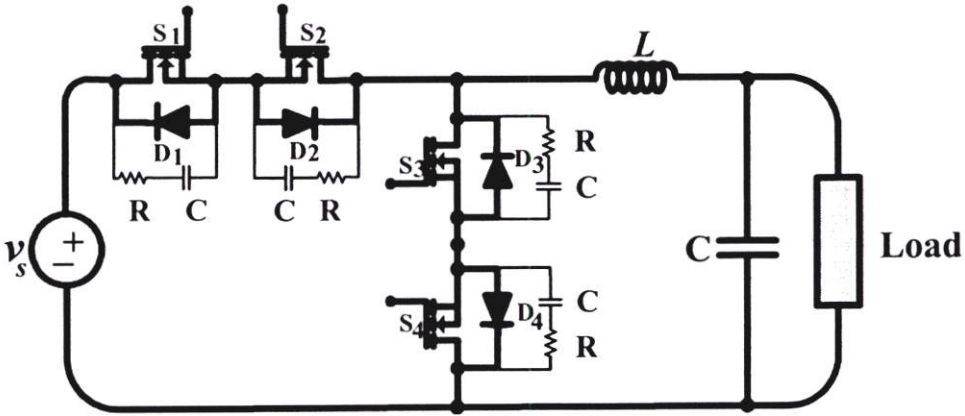
ในการทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งแรงดันไซน์ความถี่ต่ำที่ถูกสับเป็น ช่วงๆ เท่าจำนวนเท่ากับความถี่สวิตซ์ซึ่งเป็นความถี่สูงที่เราใช้จะทำให้เกิดแรงดันสไปค์ (spike voltage) ในช่วงเริ่มนำกระแส ดังรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 3.22 โดยได้ใช้วงจรเอชชอปเปอร์ที่ยัง ไม่ได้ต่อสแนบเบอร์



รูปที่ 3.22 ลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, chop}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่าน วงจร LC ฟิลเตอร์และยังไม่ได้ใส่สแนบเบอร์

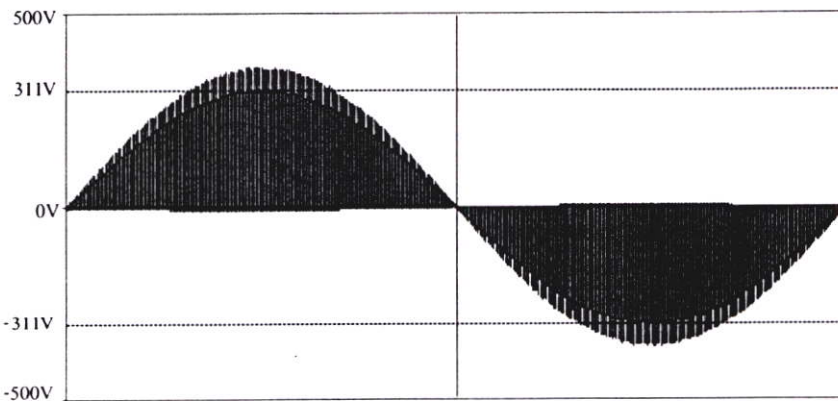
จากรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าแรงดันจะมีอยู่สองส่วนคือส่วนที่เป็นไซน์ที่มีจุดสูงสุดไม่เกิน 311V อีกส่วนคือแรงดันสไปค์ (spike voltage) ซึ่งมีค่าสูงสุดเกือบ 500V โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้

อุปกรณ์สวิตช์ที่ทนพิกัดแรงดันได้ไม่เกิน 500V จึงเป็นการอันตรายมากสำหรับการใช้งานอุปกรณ์สวิตช์ที่ว่า จึงต้องมาการใช้อุปกรณ์ช่วยเพื่อที่จะลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) ให้น้อยลงเราจึงทำการต่อวงจร snubber ให้กับอุปกรณ์สวิตช์เพื่อลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) โดยมีการต่อวงจร snubber ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรเอชชอปเปอร์ที่มีวงจร snubber ต่ออยู่

จากรูปวงจรในรูปที่ 3.23 จะเห็นได้ว่าวงจร snubber ที่ใช้คือวงจร RC snubber โดยใช้ R ต่ออนุกรมอยู่กับ C จากนั้นนำ R-C ที่ต่ออนุกรมกันมาต่อขนานให้กับสวิตช์แต่ละตัวของวงจรเอชชอปเปอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.23 โดยเมื่อต่อวงจร snubber แล้วก็จะทำให้สามารถลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) ได้จริงดังที่จะแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งเป็นลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, chop}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์แต่ต่อวงจร snubber แล้ว

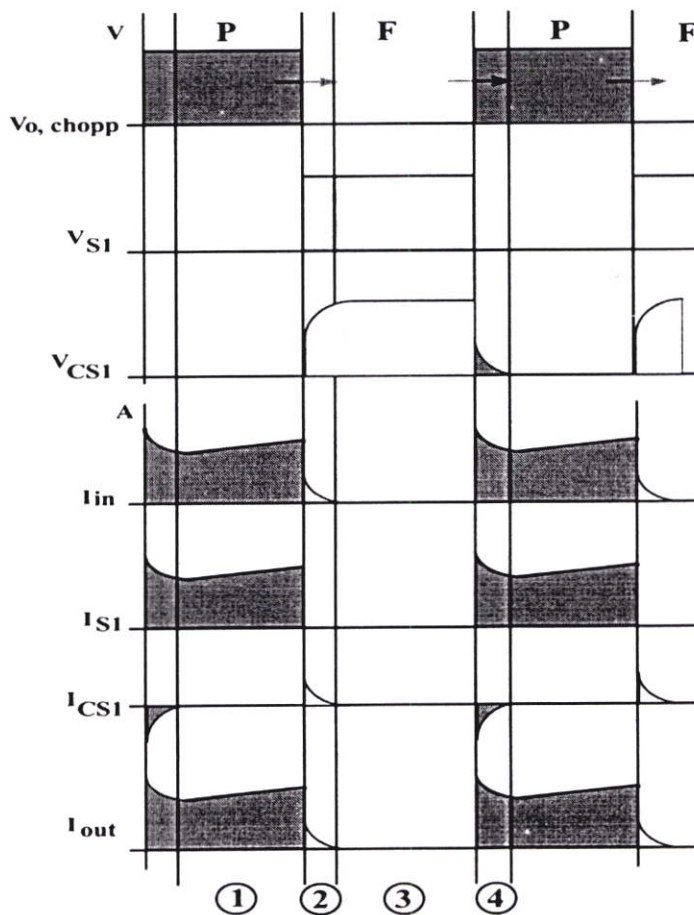


รูปที่ 3.24 ลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, chop}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์ที่ใส่ snubber แล้ว

จากรูปคลื่นในรูปที่ 3.24 ได้แสดงให้เห็นคลื่นที่มีลักษณะเป็น 2 ส่วนเหมือนกับรูปคลื่นที่ได้แสดงดังในรูปที่ 3.22 แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่ในรูปที่ 3.24 นี้คลื่นแรงดันที่ได้จะมีส่วนที่เป็นแรงดันสไปค์น้อยกว่าแรงดันสไปค์ของคลื่นในรูปที่ 3.22 อย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อสังเกตดูจากเส้นประแรงดันที่ 311 โวลต์ โดยได้แสดงให้เห็นแล้วว่า R-C สนับเบอร์ที่ใส่เข้าไปในวงจรสามารถทำให้แรงดันสไปค์ลดลงได้จริง ต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงการทำงานของวงจรสับเบอร์

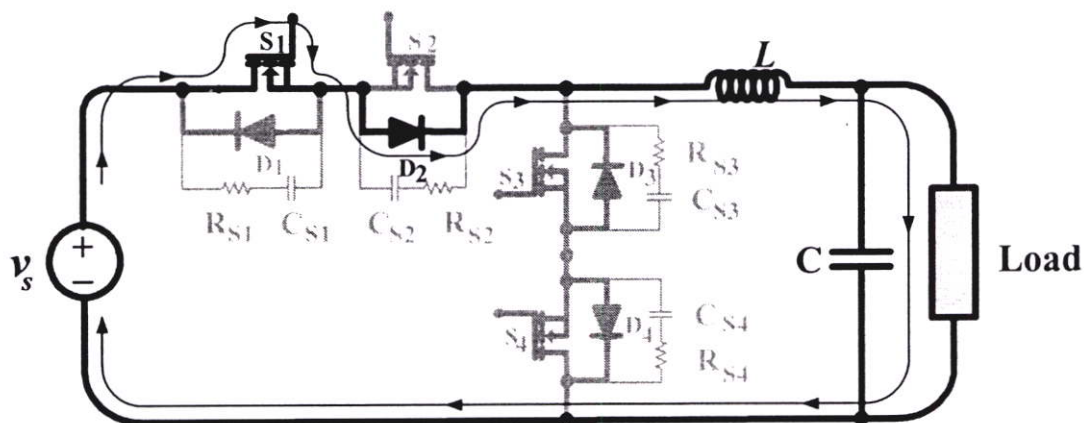
3.4.2 หลักการทำงานของวงจร R-C สับเบอร์

โดยทั่วไปการทำงานของวงจรสับเบอร์จะทำให้ได้คลื่นตามจุดต่างๆของวงจร โดยคลื่นที่ได้จากการทำงาานั้นเราสามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นเพื่อศึกษาถึงการทำงานของวงจรเพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานของวงจรและทิศทางกรไหลของกระแสได้อย่างแท้จริง ในการวิเคราะห์การทำงานของสับเบอร์ในวงจรเอชชอปเปอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ก็เช่นกัน เพื่อให้สามารถอธิบายการทำงานและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ จึงได้ทำการขิมมูลคพร้อมทั้งนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจึงและได้อธิบายการทำงานไว้ดังนี้



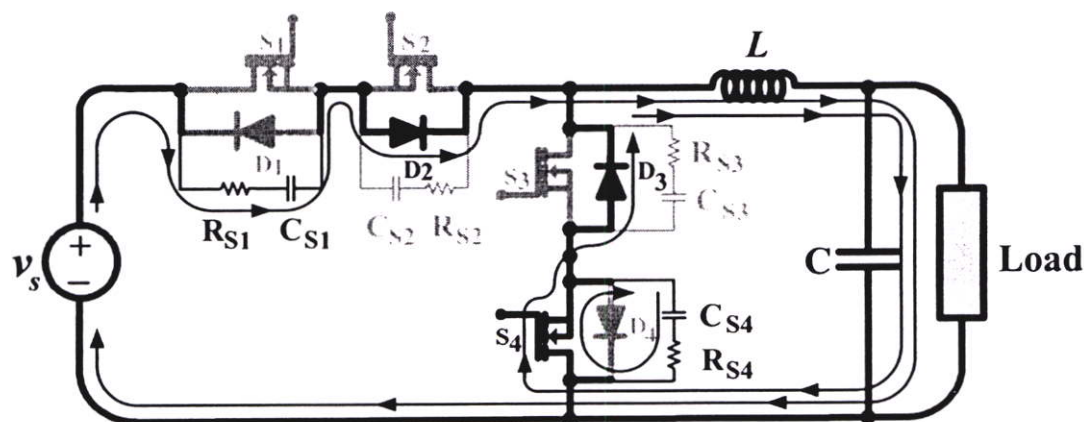
รูปที่ 3.25 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ในครึ่งไซเคลิบวก

จากคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 3.25 สามารถนำมาอธิบายการทำงานของ วงจรสับเบอร์ที่ต่ออยู่ในวงจรเอชซอปเปอร์ ได้ดังนี้



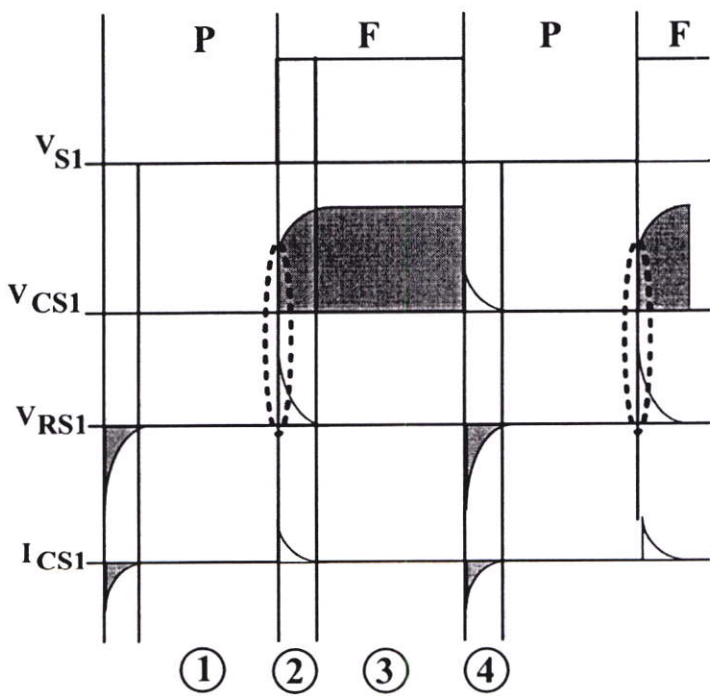
รูปที่ 3.26 ลักษณะการทำงานของวงจรเอชซอปเปอร์ในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Mode) ในครึ่ง ไซเคิลบวก

จากวงจรในรูปที่ 3.26 เป็นช่วงที่สวิตช์ S_1 นำกระแสซึ่งเป็นการทำงานในโหมดจ่าย กำลังไฟฟ้า (Powering Mode) ของวงจรเอชซอปเปอร์ ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านสวิตช์ไปยัง โหลดได้ ในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_1 (V_{S1}) มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถดูจากรูปคลื่นในรูป ที่ 3.25 ในช่วงที่ (1) การทำงานจะคงอยู่ในลักษณะนี้ไปจนถึงในช่วงที่สวิตช์เปลี่ยนการทำงานมา เป็นหยุดนำกระแส ทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านสวิตช์ไปยังโหลดได้และในขณะเดียวกันก็จะ มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 (V_{S1}) ทันทีทันใดดังในรูปที่ 3.25 ในช่วงที่ (2) และได้แสดงทิศทางการ ไหลทางใหม่ของกระแสดังในรูปที่ 3.27



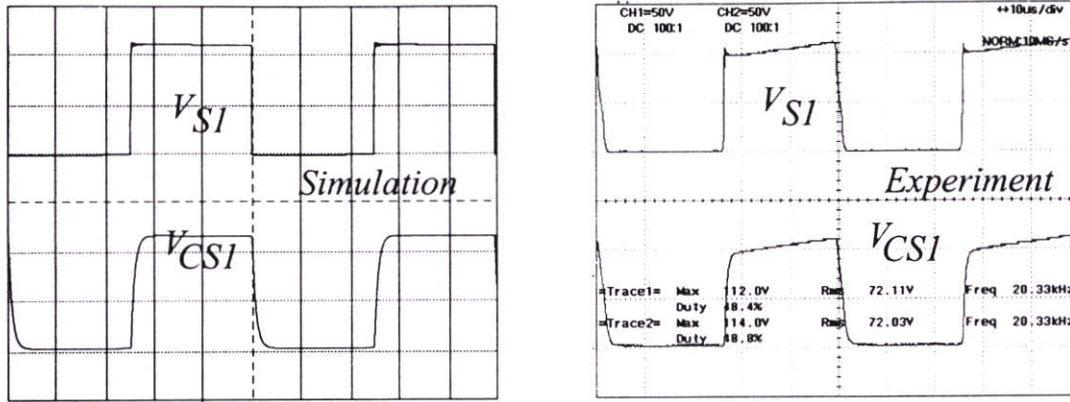
รูปที่ 3.27 ลักษณะการไหลของกระแสที่ซาร์ตเข้า C_{S1} และดิสซาร์ตประจุของ C_{S4} ในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Mode) ในครึ่ง ไซเคิลบวก

ในรูปที่ 3.27 เป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในขณะสวิตช์ S_1 ไม่นำกระแสทำให้แรงดันมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 (V_{S1}) มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกของวงจรเอชชอปเปอร์ ทำให้กระแสซาร์ตไหลผ่าน R_{S1} เข้าไปเก็บสะสมใน C_{S1} เพราะในขณะนี้ C_{S1} ไม่มีแรงดันหรือว่างอยู่ โดยอัตราการไหลของกระแสจะถูกจำกัดความเร็วโดย R_{S1} และค่าแตกต่างระหว่างแรงดันใน C_{S1} โดยกระแสจะไหลน้อยลงเมื่อแรงดันใน C_{S1} มากขึ้นและจะหยุดไหลเมื่อแรงดันใน C_{S1} มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_1 (V_{S1}) ในขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_4 (V_{S4}) ก็มีค่าเท่ากับศูนย์เพราะสวิตช์ S_4 นำกระแสเพื่อให้กระแสในวงจรไหลไปในทิศทางเดิมทำให้ C_{S4} ดิสชาร์จกระแสผ่านสวิตช์ S_4 ไปรวมกับกระแสในโหมดฟรีวิลริง(Freewheeling Moad)ในครึ่งไซเคิลบวกแต่ในการทำงานของสับเบอร์จะมีช่วงที่สำคัญคือ ในจังหวะแรกที่สวิตช์หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใด โดยแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ก็คือแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์นั่นเอง ในจังหวะแรกแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์แรงดันจะไปตกคร่อมที่ R สับเบอร์ทั้งหมด โดยมีสาเหตุมาจากการที่สวิตช์หยุดนำกระแสทันทีทันใดนั้นทำให้เกิดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใดซึ่งก็เป็นที่น่าทึ่งกันแล้วว่าเป็นแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์ด้วยนั้นเหมือนเป็นแรงดันที่มีความถี่สูงเพราะมีช่วงเวลาในการเปลี่ยนระดับแรงดันน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานใน C สับเบอร์มีค่าน้อยมากถือว่าเป็นศูนย์จึงมีค่าความต้านเฉพาะที่ R สับเบอร์ ดังในรูปที่ 3.28

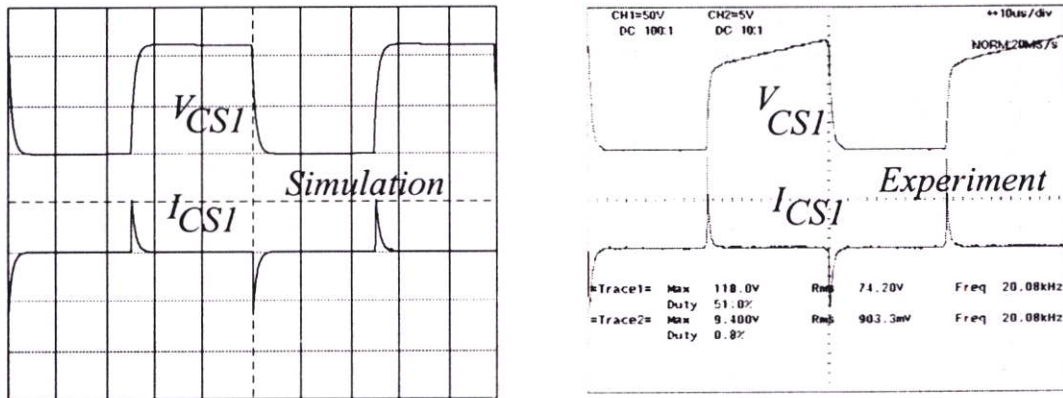


รูปที่ 3.28 แรงดันที่ตกคร่อม C_{S1} และแรงดันที่ตกคร่อม R_{S1} ในครึ่งไซเคิลบวก

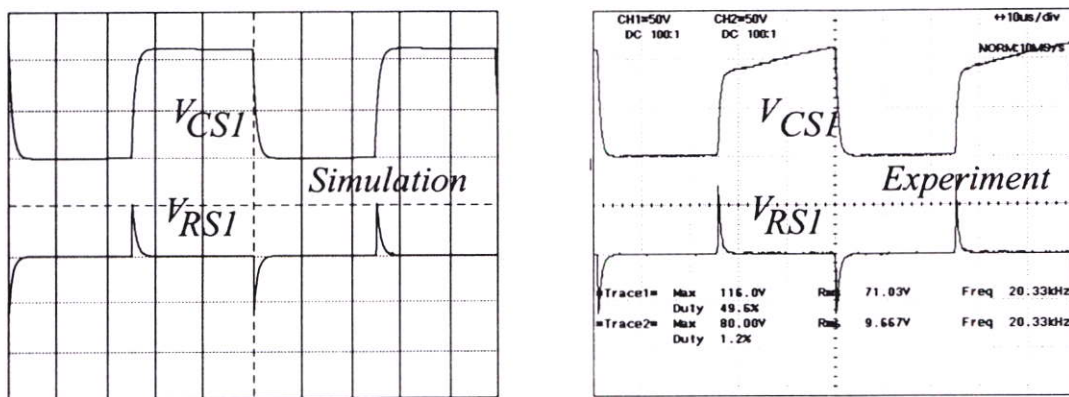
โดยได้ยืนยันความถูกต้อง โดยได้แสดงผลที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองดังนี้



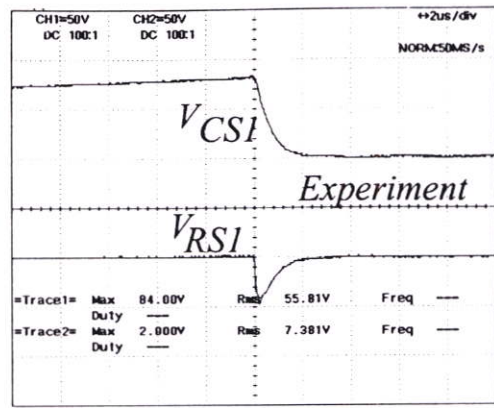
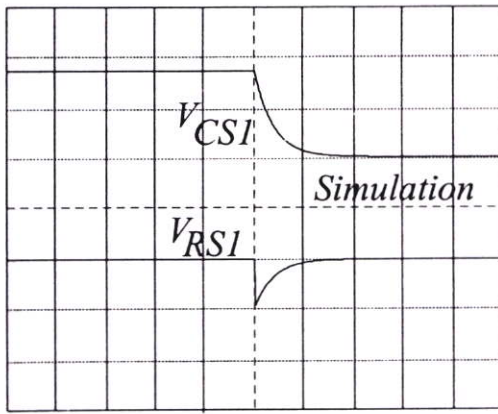
รูปที่ 3.29 คลื่นแรงดัน V_{SI} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{CSI} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



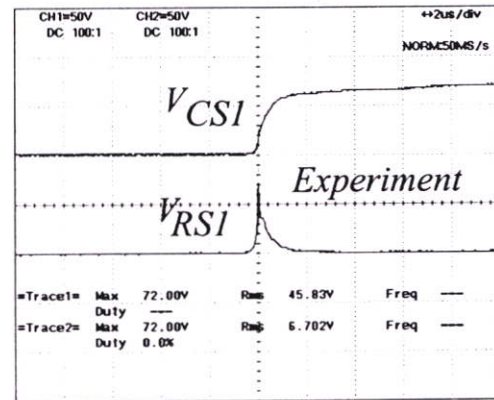
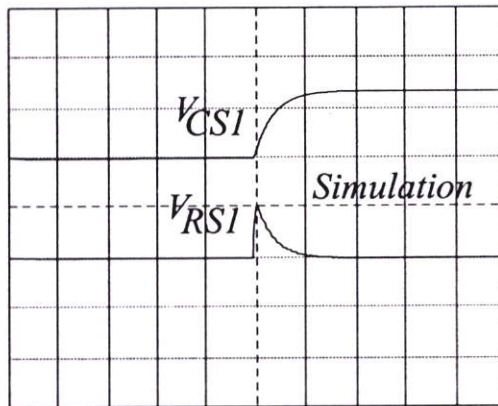
รูปที่ 3.30 คลื่นแรงดัน V_{CSI} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ I_{CSI} ที่ ($y=5V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



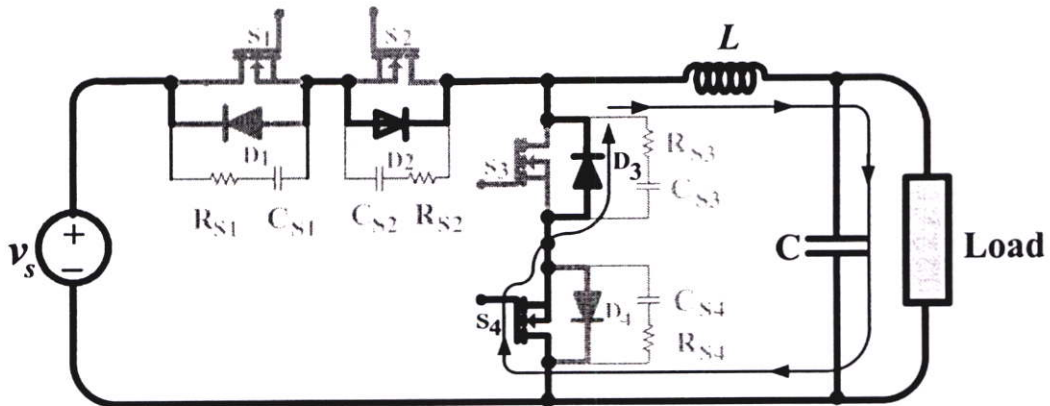
รูปที่ 3.31 คลื่นแรงดัน V_{CSI} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{RSI} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



รูปที่ 3.32 คลื่นแรงดัน V_{CSI} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RSI} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงเวลาที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

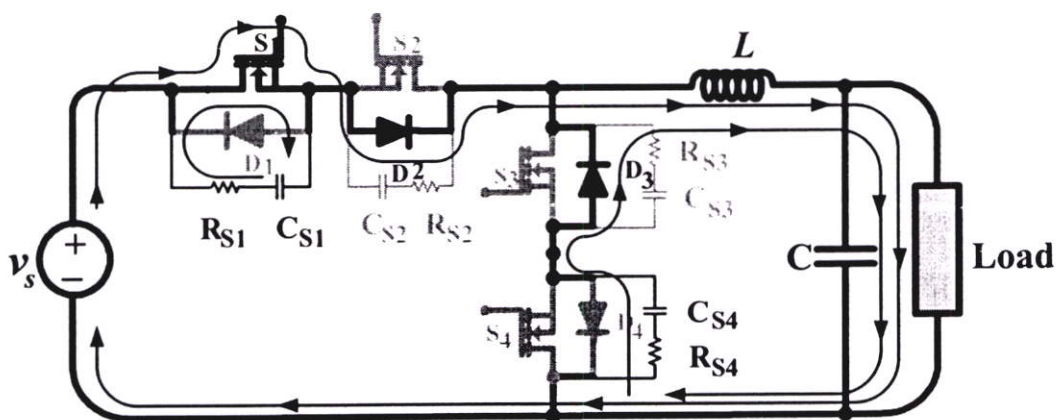


รูปที่ 3.33 คลื่นแรงดัน V_{CSI} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RSI} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขาขึ้นที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



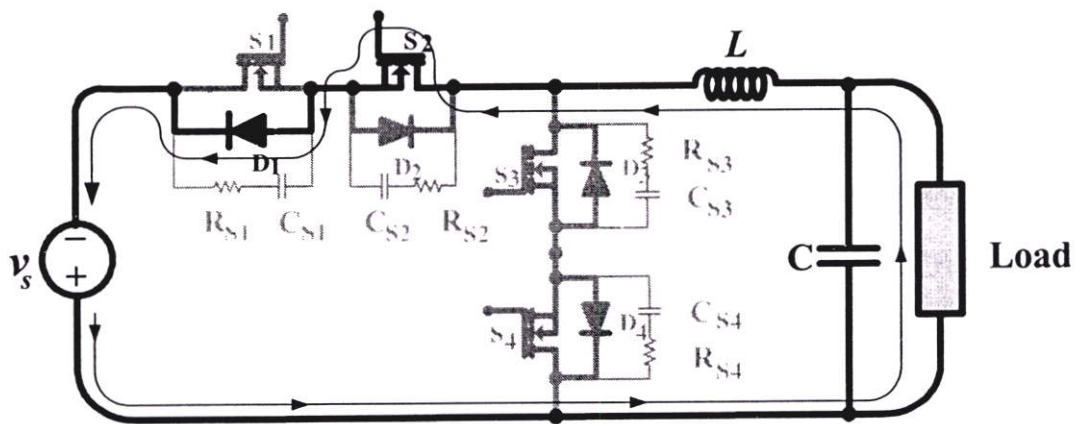
รูปที่ 3.34 วงจรเอชี่ซอปเปอร์ในขณะที่สวิตช์ S_4 นำกระแสและ C_{S1} ถูกชาร์จประจุเต็มแล้ว เป็นทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวก

จากรูปที่ 3.34 เมื่อ C_{S1} ชาร์ตประจุเต็มแล้วกระแสจะไม่สามารถไหลผ่านไปได้อีกจึงทำให้วงจรถูกเปิดออกในขณะเดียวกัน C_{S4} ก็ทำการดิสชาร์จประจุหมดเช่นกันเพราะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_4 เป็นศูนย์เพราะอยู่ในช่วงโหมคฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกเป็นช่วงที่สวิตช์นำกระแสและจะคงอยู่ในสภาวะนี้ไปจนถึงช่วงที่วงจรถูกเอชี่ชอปเปอร์เปลี่ยนการทำงานไปเป็นโหมคจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกในจังหวะต่อมาสวิตช์ S_1 เริ่มนำกระแสและสวิตช์ S_4 จะหยุดนำกระแสเป็นการเปลี่ยนจากการทำงานในโหมคฟรีวิลริง (Free wheeling Moad)ในครึ่งไซเคิลบวก ไปเป็นโหมคจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad)ในครึ่งไซเคิลบวกเมื่อสวิตช์ S_1 นำกระแสจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_1 มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ C_{S1} ดิสชาร์จประจุผ่าน R_{S1} ผ่านไปยังสวิตช์ S_1 ไปรวมกับกระแสอินพุตต่อไป และจะเป็นเวลาเดียวกับที่สวิตช์ S_4 หยุดนำกระแสในจังหวะนี้จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_4 มีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายทำให้มีการชาร์ตประจุผ่าน R_{S4} ไปเก็บใน C_{S4} จึงทำให้มีกระแสไหลผ่าน R_{S4} และ C_{S4} เหมือนกับการที่สวิตช์ S_1 หยุดนำกระแสลักษณะแรงดันที่ R_{S4} และ C_{S4} ก็จะเหมือนกับของ R_{S1} และ C_{S1} เพราะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เดียวกันแต่ทำงานคนละช่วงเวลาการทำงานของวงจรถจะเป็นดังวงจรในรูปที่ 3.35

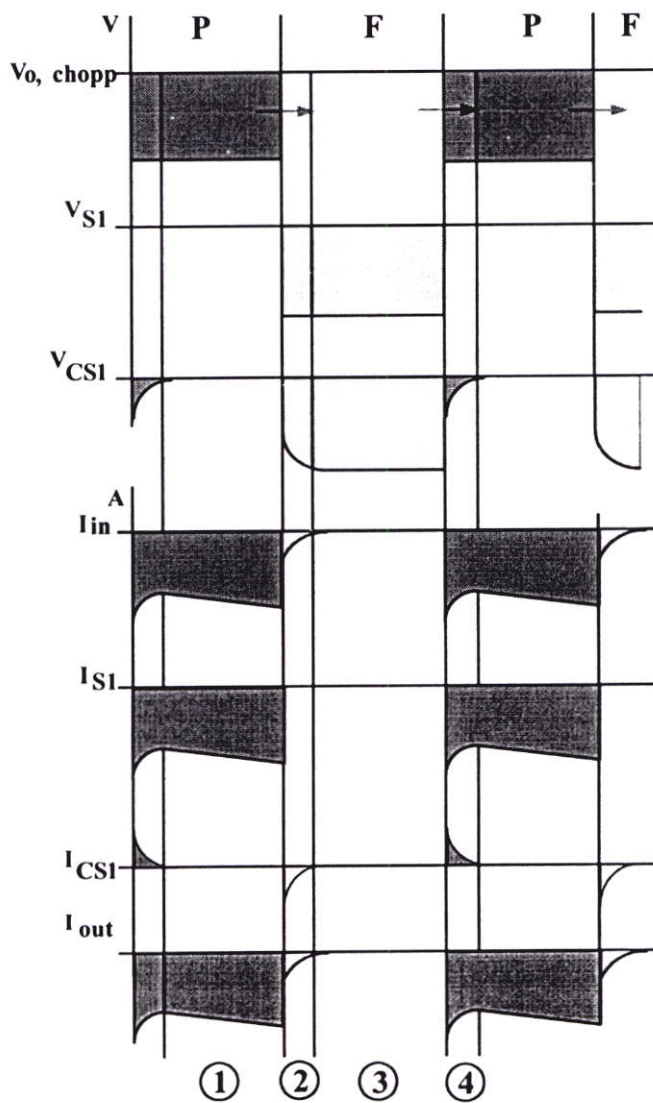


รูปที่ 3.35 การทำงานของวงจรถูกเอชี่ชอปเปอร์ขณะสวิตช์ S_1 เริ่มนำกระแสโดยที่ C_{S1} ดิสชาร์จประจุผ่าน R_{S1} ผ่านไปยังสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_4 หยุดนำกระแสทำให้ C_{S4} ชาร์ตประจุ

และเมื่อ C_{S1} ดิสชาร์จประจุหมด C_{S4} ชาร์ตประจุเต็มการทำงานก็จะกลับไปเป็นในจังหวะแรกดังที่แสดงในรูปที่ 3.26 โดยการทำงานที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นการทำงานในครึ่งไซเคิลบวกของไซน์อินพุต ส่วนการทำงานในครึ่งไซเคิลลบก็จะเป็นหน้าที่ของสวิตช์ S_2 และสวิตช์ S_3 โดยที่สวิตช์ S_2 จะทำงานในโหมคจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลลบ คือทำงานแบบเดียวกับสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_3 จะทำงานในโหมคฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบการทำงานก็จะเป็นแบบเดียวกันกับสวิตช์ S_4 โดยการทำงานในครึ่งไซเคิลลบจะเป็นดังที่จะแสดงต่อไปนี้โดยจะเริ่มวงจรในรูปที่ 3.36

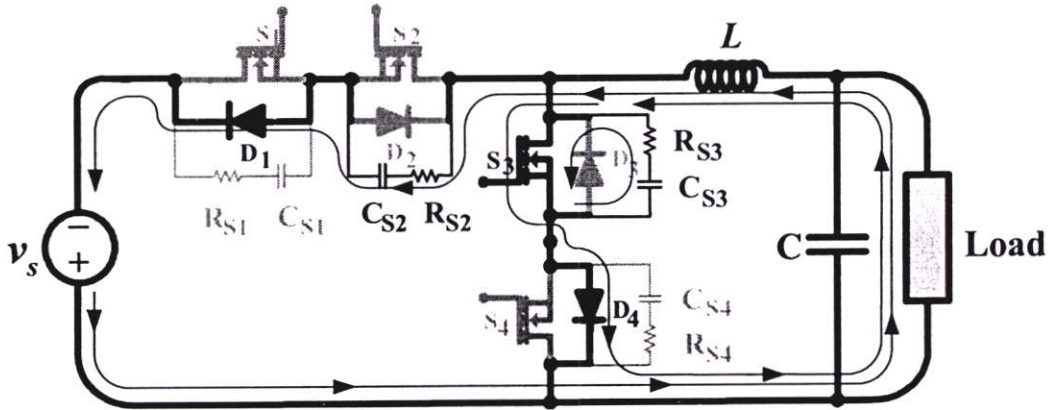


รูปที่ 3.36 ลักษณะการทำงานของวงจรเอชซีชอปเปอร์ในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Mode) ในครึ่งไซเคิลลบ



รูปที่ 3.37 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบรในครึ่งไซเคิลลบ

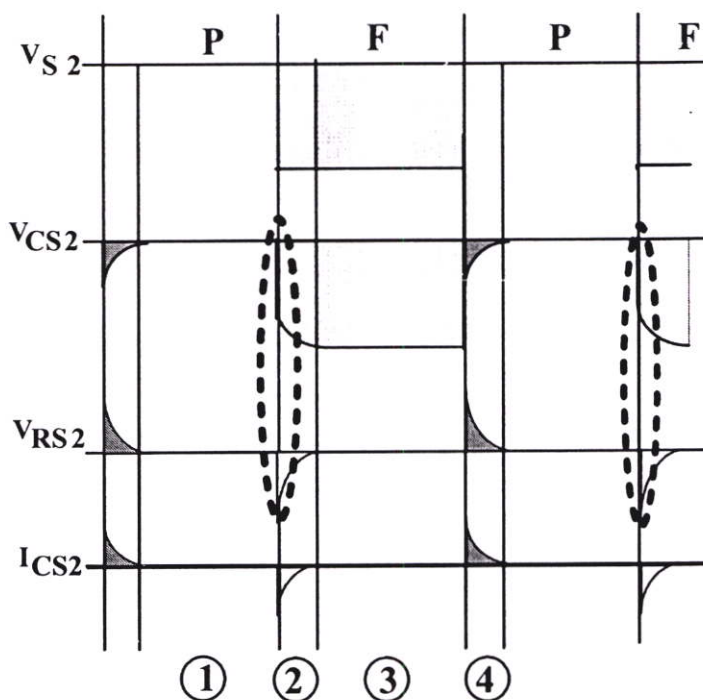
จากวงจรในรูปที่ 3.36 จะเป็นช่วงที่สวิตช์ S_2 นำกระแสโดยจากการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.36 นี้จะเป็นการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลลบของไซน์การไฟฟ้าที่เป็นแหล่งและจะทำให้ได้คลื่นการแสดและแรงดันตามจุดต่างดังในรูปที่ 3.37 โดยการทำงานจะคงอยู่เช่นนี้ไปจนกว่าสวิตช์ S_2 จนหยุดนำกระแสและในขณะที่เดียวกันสวิตช์ S_3 ก็จะนำกระแสทำให้เกิดโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ทำให้ลักษณะการไหลของกระแสเปลี่ยนไปดังวงจรในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 ลักษณะการไหลของกระแสที่ซาร์ตเข้า C_{S2} และดิซซาร์ตประจุของ C_{S3} ในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบ

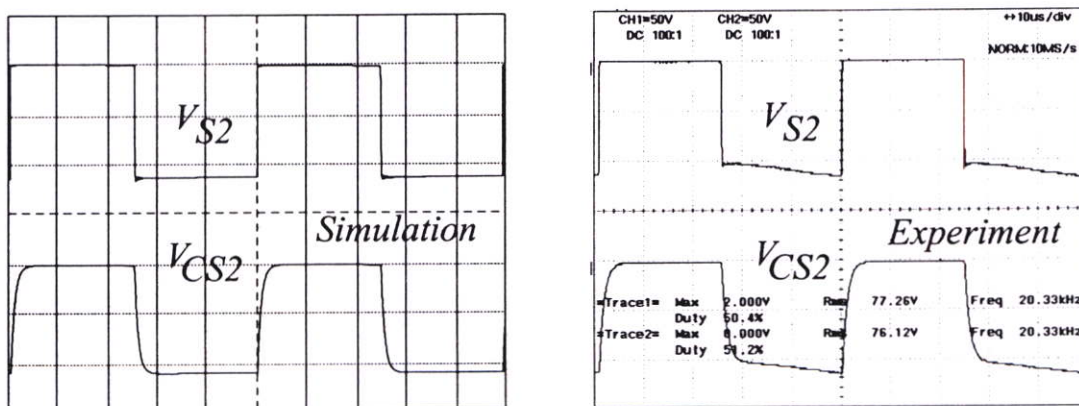
จากวงจรในรูปที่ 3.38 เมื่อสวิตช์ S_2 หยุดนำกระแสทำให้แรงดันไปตกคร่อมที่สวิตช์ S_2 ให้ (V_{S2}) มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบของวงจรเอชไอเอ็บเปอร์ ทำให้กระแสซาร์ตไหลผ่าน R_{S2} เข้าไปเก็บสะสมใน C_{S2} เพราะในขณะที่ C_{S2} ไม่มีแรงดันหรือว่างอยู่ โดยอัตราการไหลของกระแสจะถูกจำกัดความเร็วโดย R_{S2} และค่าแตกต่างระหว่างแรงดันใน C_{S2} โดยกระแสจะไหลน้อยลงเมื่อแรงดันใน C_{S2} มากขึ้นและจะหยุดไหลเมื่อแรงดันใน C_{S2} มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_2 (V_{S2}) ในขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 (V_{S3}) ก็มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากสวิตช์ S_3 นำการแสดทำให้ C_{S3} ดิซซาร์ตกระแสผ่านสวิตช์ S_3 ไปรวมกับกระแสในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าในการทำงานของสับเบอ์จะมีช่วงที่สำคัญคือ ในจังหวะแรกที่สวิตช์หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใดในการทำงานของสวิตช์ในครึ่งไซเคิลลบก็เช่นกัน โดยแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ก็คือแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอ์นั่นเอง ในจังหวะแรกแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอ์แรงดันจะไปตกคร่อมที่ R สับเบอ์ทั้งหมด โดยมีสาเหตุมาจากการที่สวิตช์หยุดนำกระแสทันทีทันใดนั้นทำให้เกิดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใดซึ่งก็เป็นที่น่าทึ่งกันว่านี่เป็นแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอ์ด้วยนั้นเหมือนเป็นแรงดันที่มีความถี่สูง

เพราะมีช่วงเวลาในการเปลี่ยนระดับแรงดันค่อนข้างน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานใน C สลับเบอร์มีค่าน้อยมากถือว่าเป็นศูนย์จึงมีค่าความต้านเฉพาะที่ R สลับเบอร์ ดังคลื่นในรูปที่ 3.39



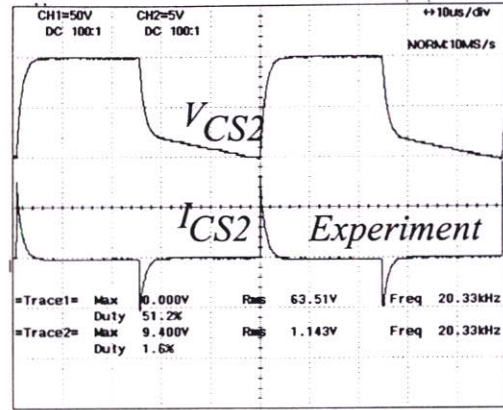
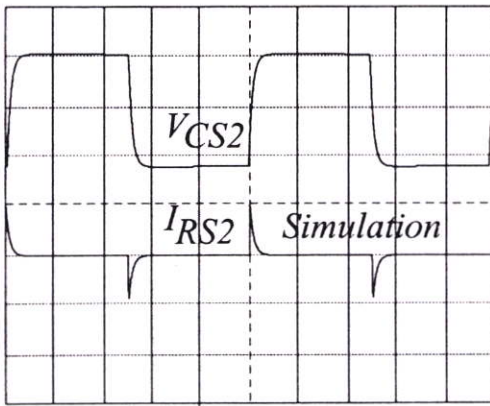
รูปที่ 3.39 แรงดันที่ตกคร่อม C_{S2} และแรงดันที่ตกคร่อม R_{S2} ในครึ่งไซเคิลบวก

โดยได้ยืนยันความถูกต้องโดยได้แสดงผลที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองดังนี้

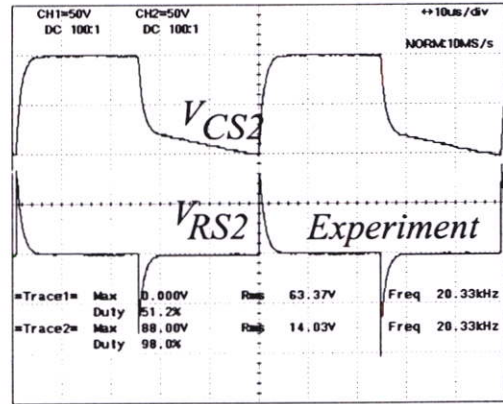
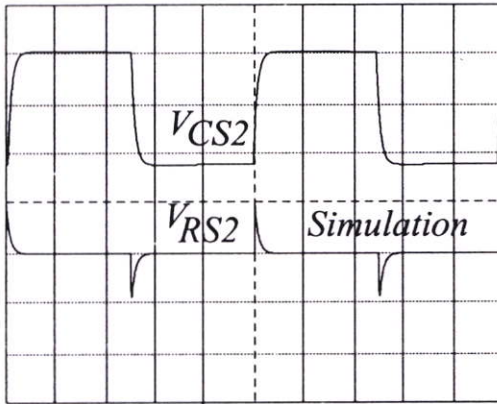


รูปที่ 3.40 คลื่นแรงดัน V_{S2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้

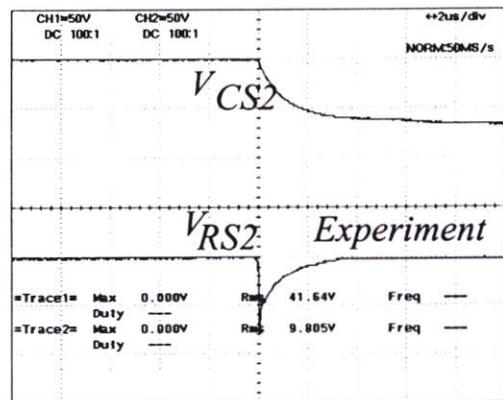
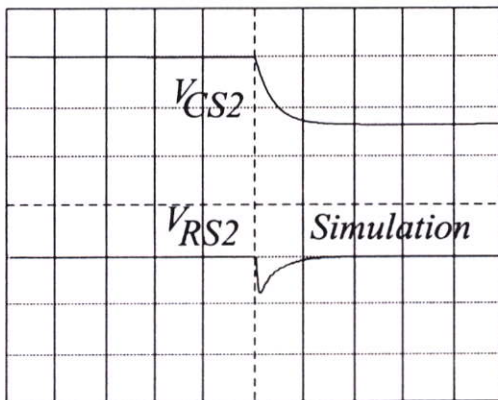
จากการซิมูเลตและการทดลอง



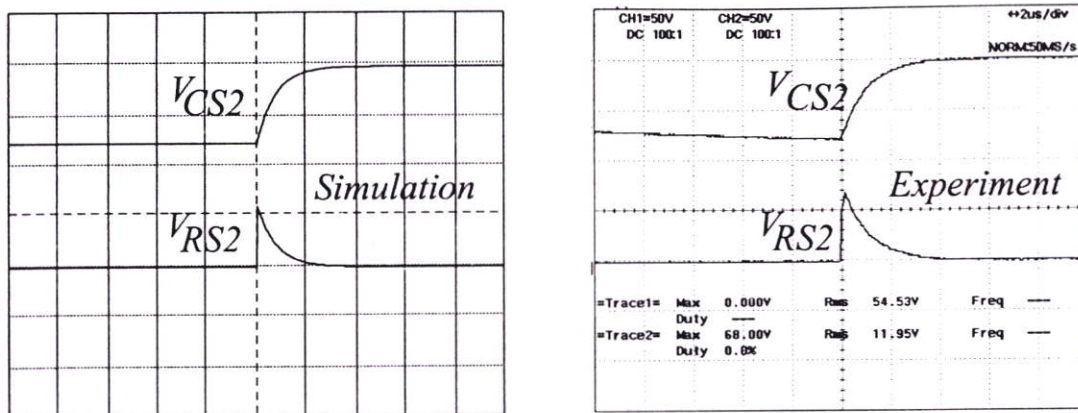
รูปที่ 3.41 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ I_{CS2} ที่ ($y=5V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



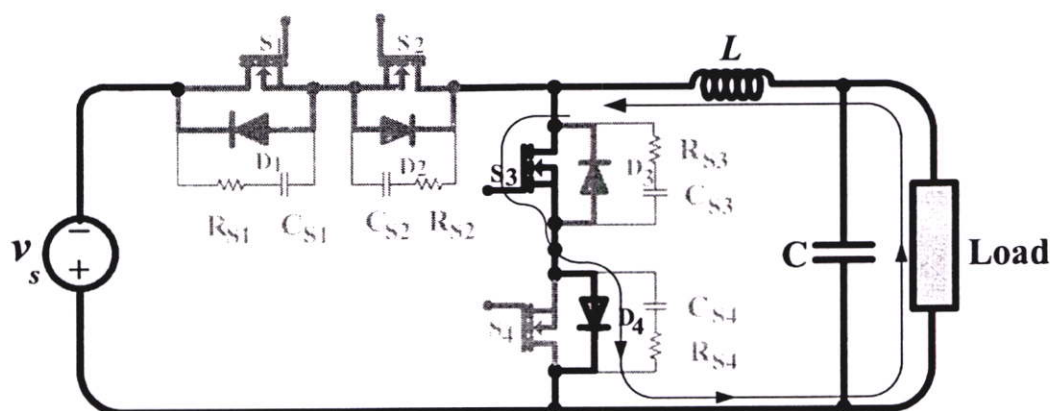
รูปที่ 3.42 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



รูปที่ 3.43 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงเวลาที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



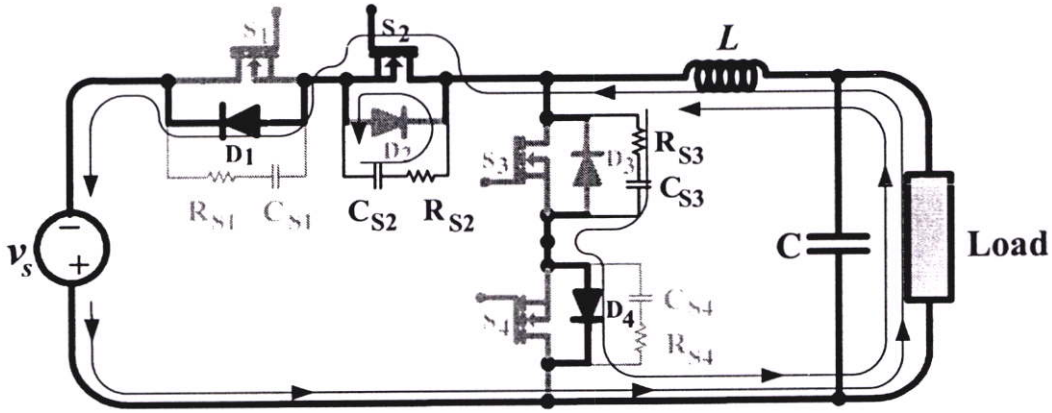
รูปที่ 3.44 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=2\mu s/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=2\mu s/div$) ในช่วงขึ้นลงที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



รูปที่ 3.45 วงจรเอชชอปเปอร์ในขณะที่สวิตช์ S_3 นำกระแสและ C_{S2} ถูกชาร์จประจุเต็มแล้ว เป็นทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบ

จากรูปที่ 3.45 เมื่อ C_{S2} ชาร์จประจุเต็มแล้วกระแสจะไม่สามารถไหลผ่านไปได้อีกจึงทำให้วงจรถูกเปิดออกในขณะเดียวกัน C_{S3} ก็ทำการดิสชาร์จประจุหมดเช่นกันเพราะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_3 เป็นศูนย์เพราะอยู่ในช่วงโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบเป็นช่วงที่สวิตช์นำกระแสและจะคงอยู่ในสภาวะนี้ไปจนถึงช่วงที่วงจรเอชชอปเปอร์เปลี่ยนการทำงานไปเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลลบในจังหวะต่อมาสวิตช์ S_2 เริ่มนำกระแสและสวิตช์ S_3 จะหยุดนำกระแสเป็นการเปลี่ยนจากการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบ ไปเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลลบเมื่อสวิตช์ S_2 นำกระแสจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_2 มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ C_{S2} ดิสชาร์จประจุผ่าน R_{S2} ผ่านไปยังสวิตช์ S_2 ไปพร้อมกับกระแสอินพุตต่อไป และจะเป็นเวลาเดียวกับที่สวิตช์

S_3 หยุดนำกระแสในจังหวะนี้จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 มีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายทำให้มีการชาร์ตประจุผ่าน R_{S3} ไปเก็บใน C_{S3} จึงทำให้มีกระแสไหลผ่าน R_{S3} และ C_{S3} เหมือนกับการที่สวิตช์ S_2 หยุดนำกระแสลักษณะแรงดันที่ R_{S3} และ C_{S3} ก็จะเหมือนกับของ R_{S2} และ C_{S2} เพราะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เดียวกันแต่ทำงานคนละช่วงเวลาการทำงานของวงจรจะเป็นดังวงจรในรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 การทำงานของวงจรเอชซีชอปเปอร์ขณะสวิตช์ S_2 เริ่มนำกระแสโดยที่ C_{S2} ดิสชาร์ตประจุผ่าน R_{S2} ผ่านไปยังสวิตช์ S_2 และสวิตช์ S_3 หยุดนำกระแสทำให้ C_{S3} ชาร์ตประจุ

และเมื่อ C_{S2} ดิสชาร์ตประจุหมด C_{S3} ชาร์ตประจุเต็มการทำงานก็จะกลับไปเป็นในจังหวะแรกดังที่แสดงในรูปที่ 3.36

3.4.3 การคำนวณหาค่า RC สนับเบอร์ที่ใช้ในวงจร

กำหนดให้

ความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์

$$f = 20 \text{ kHz}$$

กระแสที่ไหลผ่านสวิตซ์

$$I_o = 15 \text{ A}$$

แรงดันแหล่งจ่าย

$$V_d = 311 \text{ V}$$

เวลาในการหยุดนำกระแสของสวิตซ์

$$t_{fi} = 0.3 \mu\text{s}$$

ทำการหาค่า C_s ได้จากสมการที่ (3.2)

$$C_s = \frac{I_o t_{fi}}{2V_d} \quad (3.2)$$

ทำการแทนค่าของตัวแปรลงในสมการที่ (3.2)

$$C_s = \frac{15A \times 0.3 \times 10^{-6}}{2 \times 311V}$$

$$= 7.2 \text{ nF}$$

ดังนั้นเลือก C_s มีค่าเท่ากับ 7.2 nF

หาค่า R_s ได้จากสมการ (3.3)

$$R_s = \frac{V_d}{0.2 \times I_o} \quad (3.3)$$

ทำการแทนค่าของตัวแปรลงในสมการที่ (3.3)

$$R_s = \frac{311V}{0.2 \times 15A}$$

$$= 103.66 \Omega$$

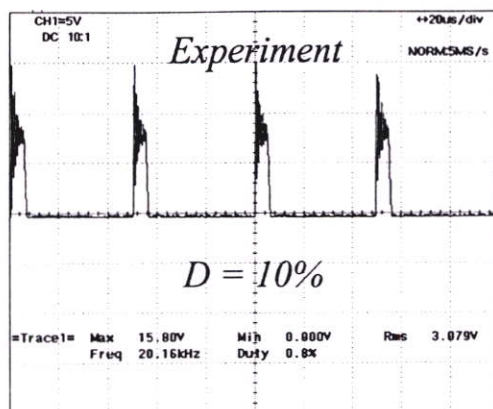
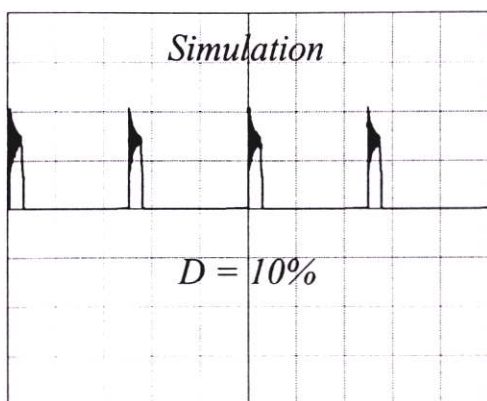
ดังนั้นเลือกค่า R_s เท่ากับ 105Ω

โดยค่าที่ได้นี้จะเป็ค่าโดยประมาณไม่ใช่ค่าที่ตายตัวโดยจะสามารถหาค่าที่ใกล้เคียงค่าที่คำนวณได้มาใช้ก็ได้ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า R-C ได้ตามที่คำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณไม่ได้นำไปใส่ในวงจรเอชซีชอปเปอร์เพื่อให้ง่ายจัดแรงดันสไปค์ทั้งหมดแต่นำไปใส่เพียงเพื่อให้ลดแรงดันสไปค์ให้น้อยลงให้อยู่ขนาดพิกัดของอุปกรณ์สวิทซ์ก็พอ โดยได้แสดงที่มาของสมการ (3.2) และ (3.3) ซึ่งเป็นสมการหาค่า C และ R สนับเบอร์ ไว้ในภาคผนวก .ข

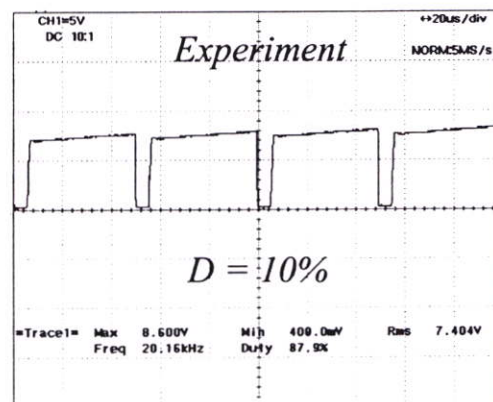
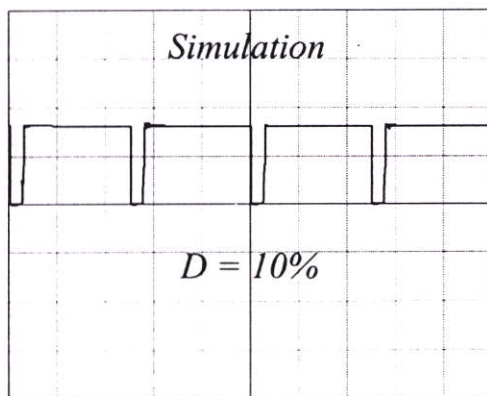
3.4.4 ผลการทดลองและผลจากการซิมูเลตที่ได้จากวงจรสนับเบอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงลักษณะของคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ที่ค่าควิตี้ไซเคิลประมาณ 10% , 50% และ 90% โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการซิมูเลตกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อความถี่สวิทซ์คงที่เท่ากับ 20 kHz ที่ค่าควิตี้ไซเคิลตามลำดับดังนี้

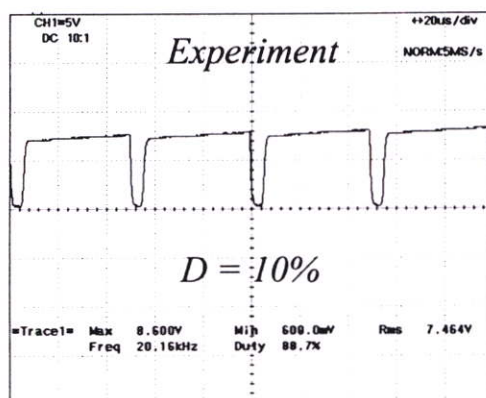
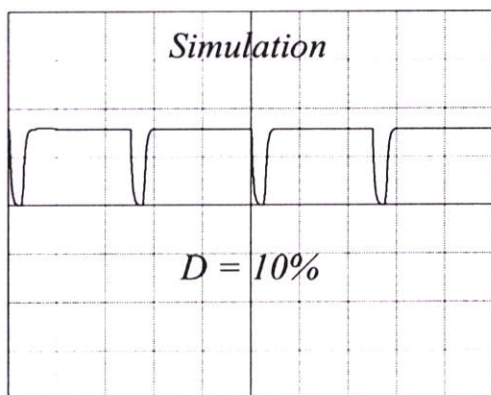
แรงดันและกระแสของวงจรสนับเบอร์ตามจุดต่างๆ โดยวงจรเอชซีชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตี้ไซเคิลเท่ากับ 10 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20kHz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิเตอร์ $v_{o, chop}$ ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

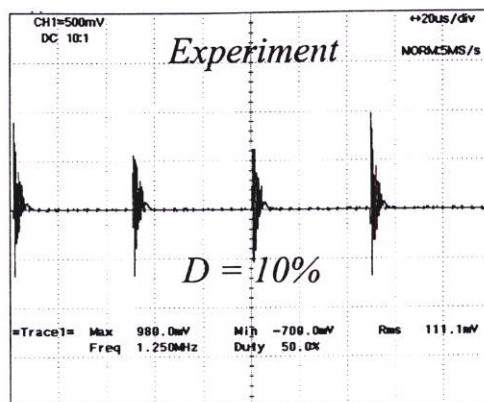
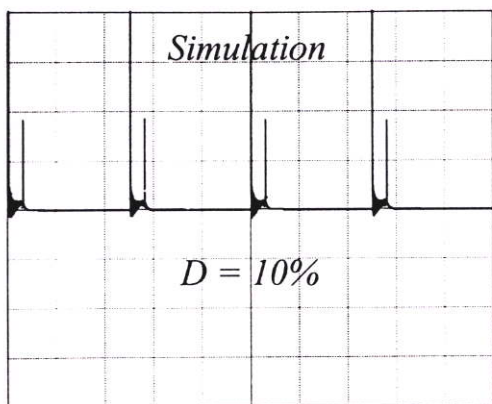


(b) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตซ์ตัวที่หนึ่ง v_{s1} ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

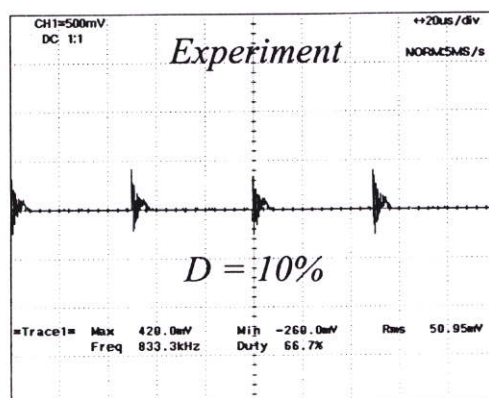
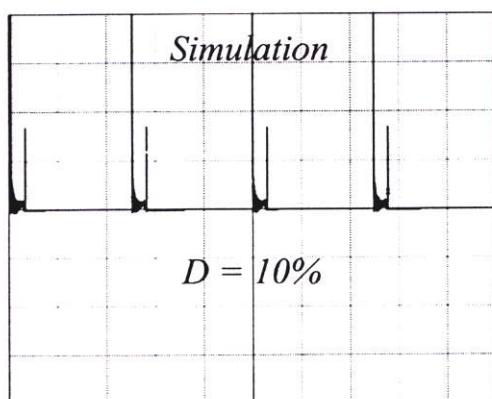


(c) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อม C สนับเบอร์ของสวิตซ์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

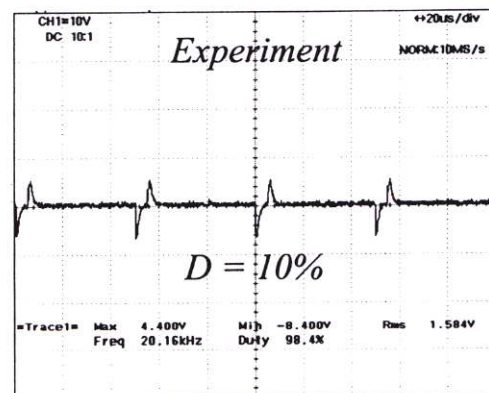
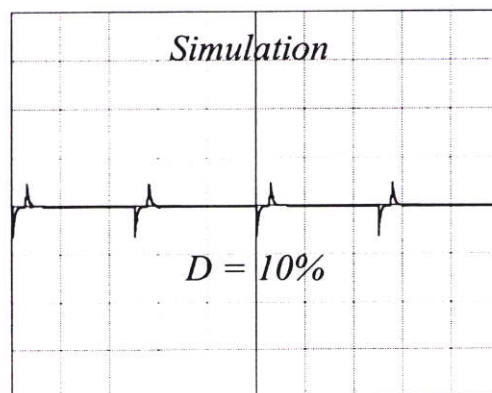
รูปที่ 3.47 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ของสวิตซ์ตัวที่หนึ่งทีค่าควิตซ์ไชเกิดทำกับ 10% และความถี่สวิตซ์เท่ากับ 20kHz



(d) คลื่นกระแสอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ที่ ($y=5V/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

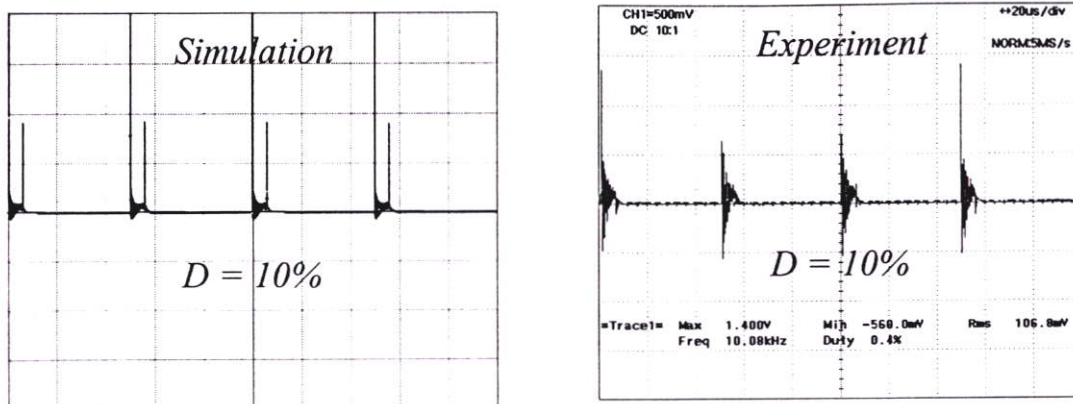


(e) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่ง i_{s1} ที่ ($y=500mV/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(f) คลื่นกระแสที่ไหลผ่าน C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

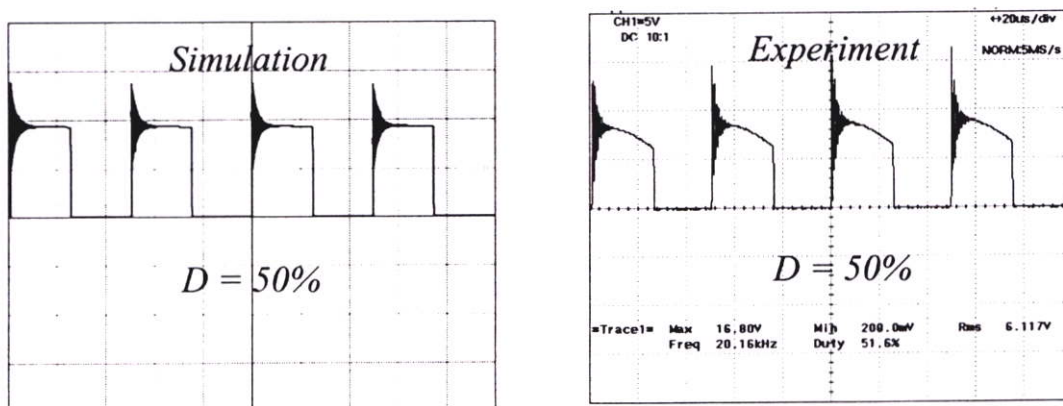
รูปที่ 3.47 ต่อ



(g) คลื่นกระแสที่เอาต์พุตของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

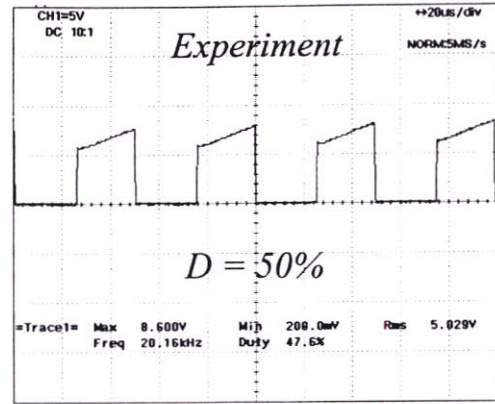
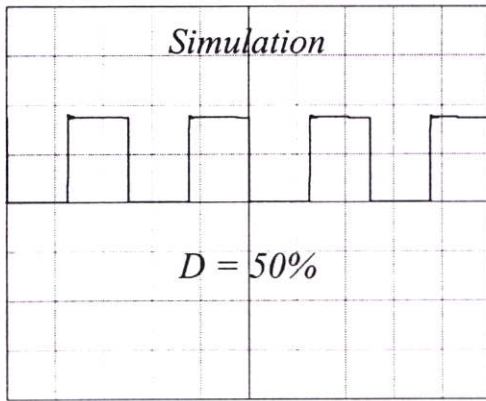
รูปที่ 3.47 ต่อ

แรงดันและกระแสของวงจรสับเบอร์ตามจุดต่างๆ โดยวงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าความถี่เคลเท่ากับ 50 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

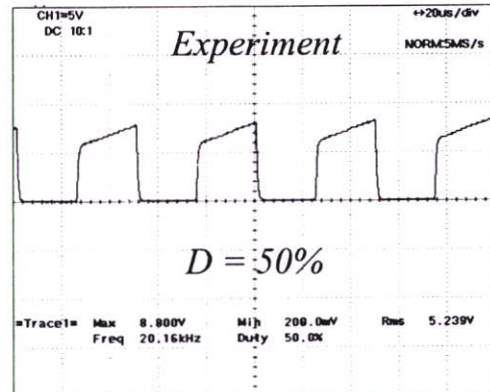
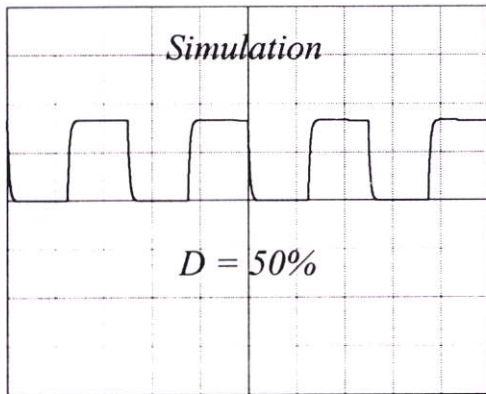


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

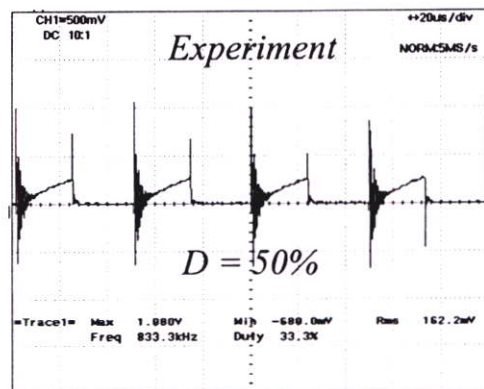
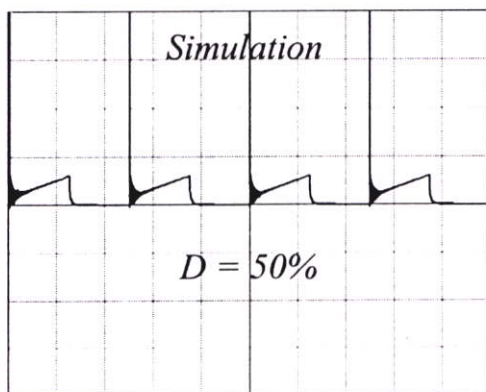
รูปที่ 3.48 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ค่าความถี่เคลเท่ากับ 50% และความถี่สวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(b) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่หนึ่ง v_{s1} ที่ ($y=5V/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

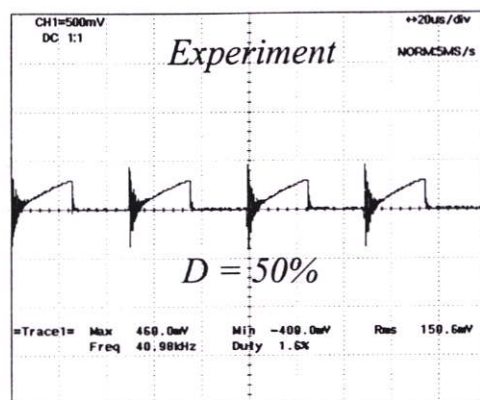
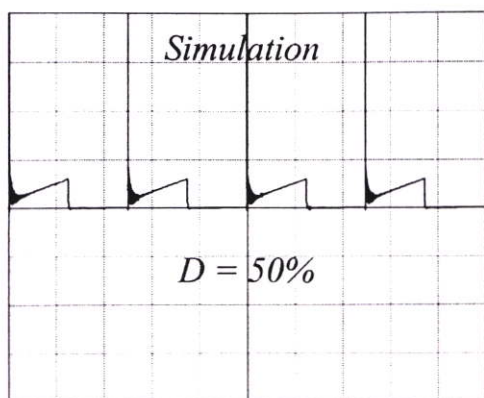


(c) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อม C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่ง ที่ ($y=5V/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

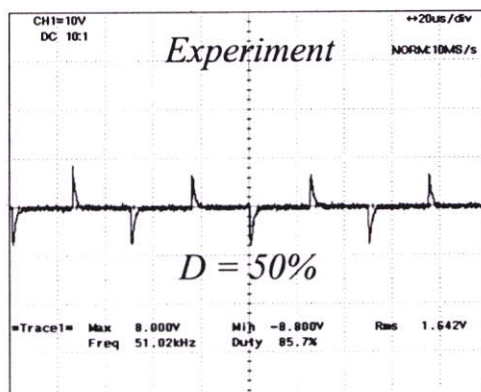
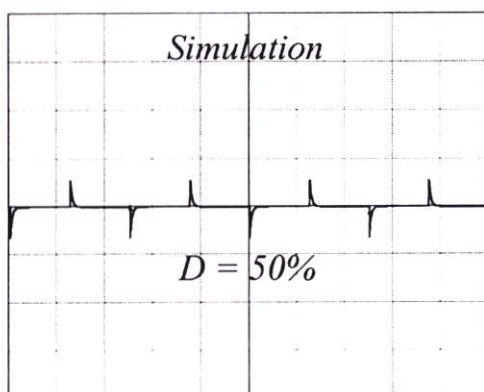


(d) คลื่นกระแสอินพุตของวงจรเอชไอโอเปอร์ที่ ($y=5V/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

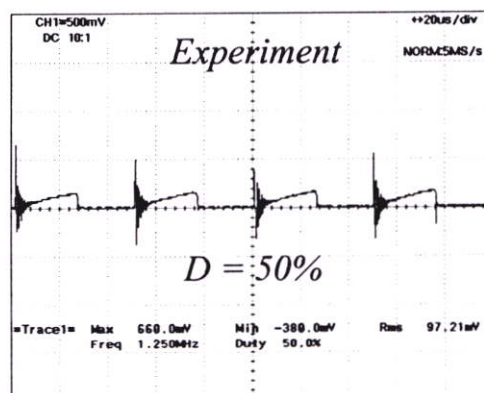
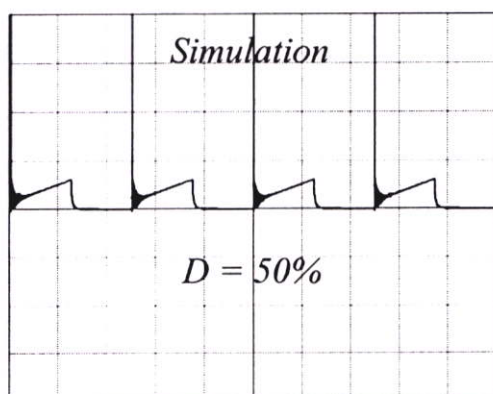
รูปที่ 3.48 ต่อ



(e) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่ง i_s ที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



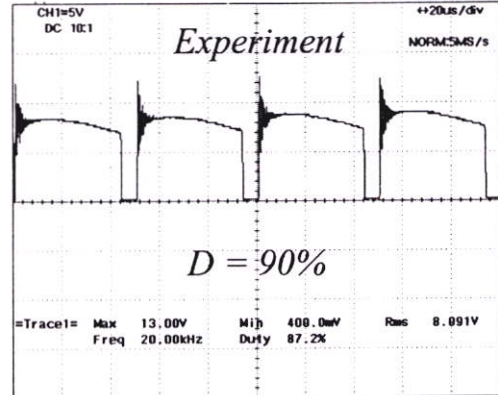
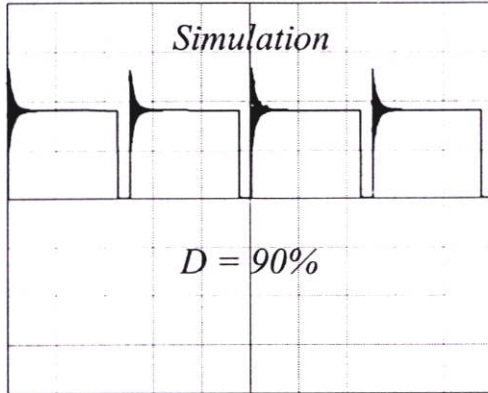
(f) คลื่นกระแสที่ไหลผ่าน C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



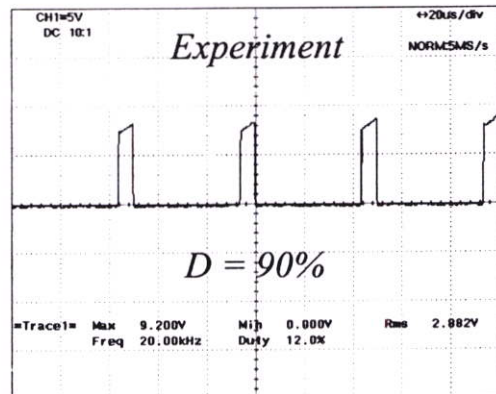
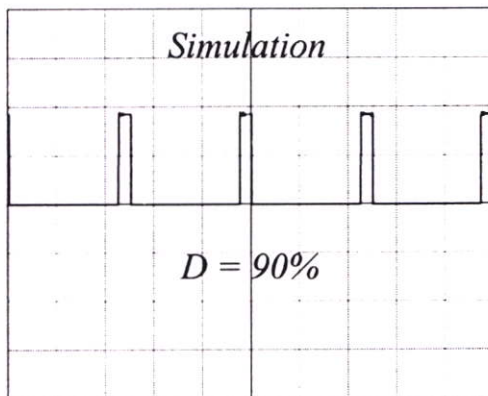
(g) คลื่นกระแสที่เอาต์พุตของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

รูปที่ 3.48 ต่อ

แรงดันและกระแสของวงจรสับเบอร์ดตามจุดต่างๆ โดยวงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตซ์ที่
 ค่าดีวตีไซเคิลเท่ากับ 90 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์
 เท่ากับ 20kHz

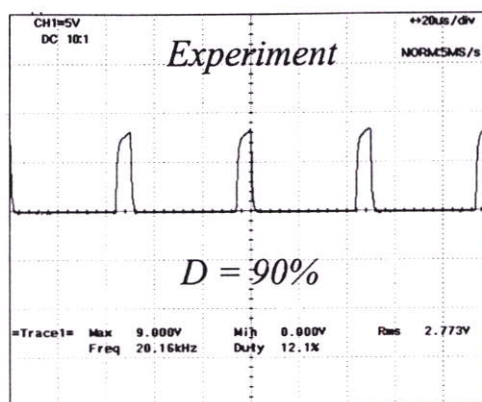
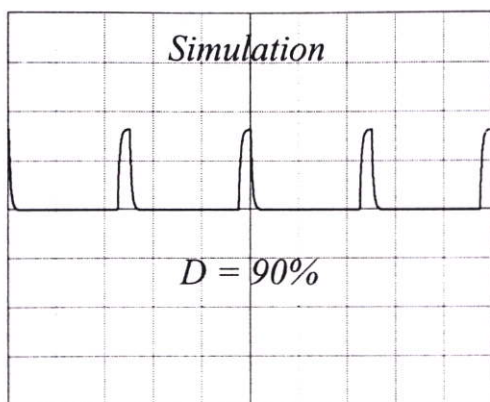


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

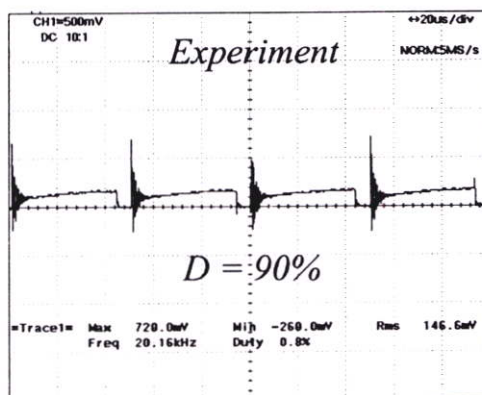
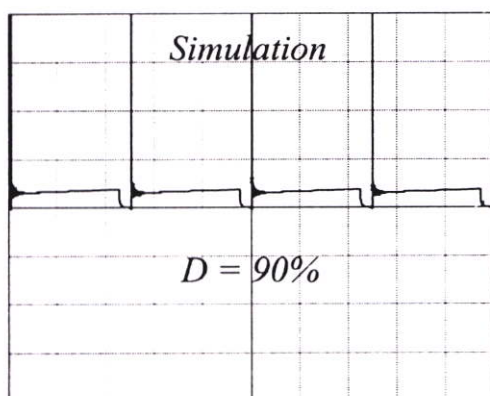


(b) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตซ์ตัวที่หนึ่ง v_{s1} ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

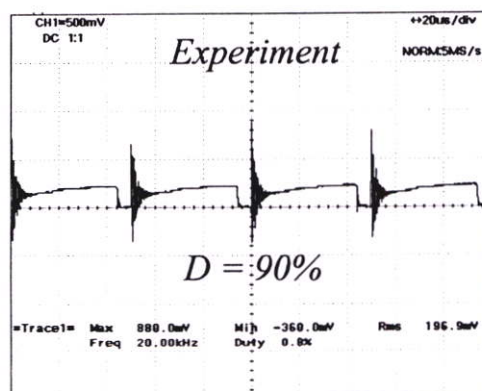
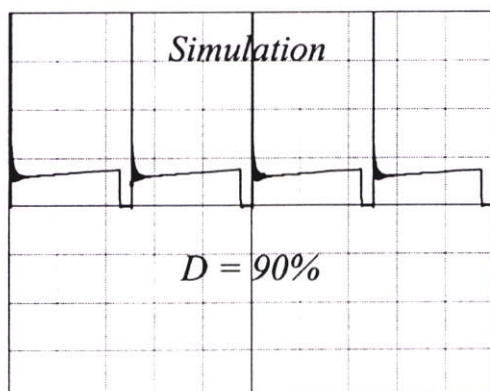
รูปที่ 3.49 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ดของสวิตซ์ตัวที่หนึ่งที่
 ค่าดีวตีไซเคิลเท่ากับ 90% และความถี่สวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



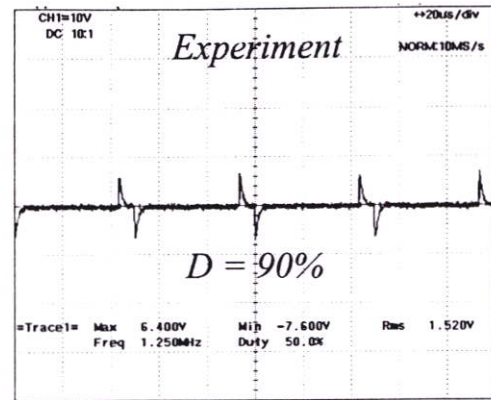
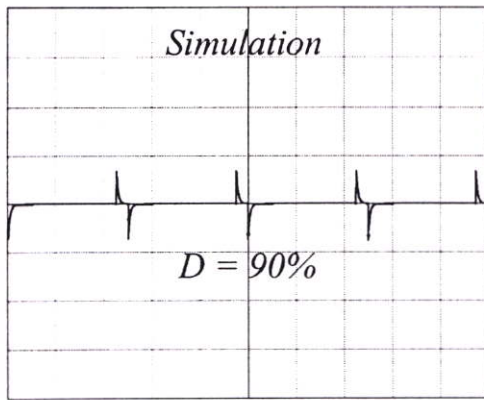
(c) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อม C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่ง ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



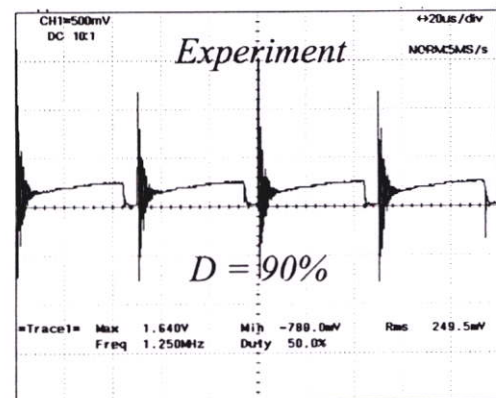
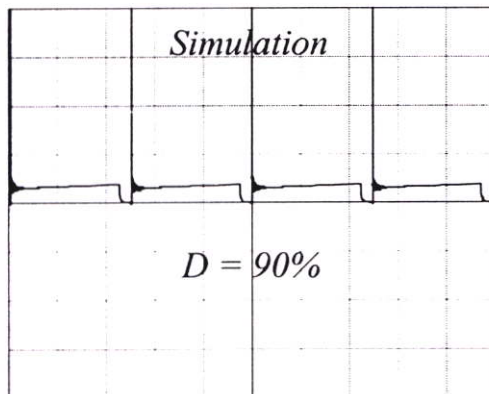
(d) คลื่นกระแสอินพุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



(e) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่ง i_{s1} ที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



(f) คลื่นกระแสที่ไหลผ่าน C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลตและการทดลอง



(g) คลื่นกระแสที่เอาต์พุตของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลตและการทดลอง

รูปที่ 3.49 ต่อ

3.5 สรุป

จากลักษณะการทำงานของวงจรเอชซีชอปเปอร์จะได้ลักษณะของแรงดันแลกระในจังหวะการทำงานสวิตช์ส่งผลให้สามารถแบ่งการทำงานได้เป็นโหมด ๆ ทั้งหมด 3 โหมดคือ

1. โหมดจ่ายกำลัง (Powering Mode)
2. โหมดฟรีวิล (Freewheeling Mode)
3. โหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Mode)

โดยการทำงานของโหมดการทำงานทั้งสามโหมดนี้จะมีผลมาจาก LC ฟิเตอร์ และโหลดที่ใช้ โดย CL ฟิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีขนาดเล็กและสามารถรองรับฮาร์มอนิกส์ความถี่

สูงไม่ให้ผ่านออกไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่เดียวกันก็จะปล่อยให้ความถี่ต่ำผ่านไป
เกือบทั้งหมดเช่นกัน ดังได้แสดงการซิมูเลตโดยโปรแกรม PSpice โดยปรับค่าตัวชี้ไซเคลิตต่าง ๆ
อีกทั้งในบทนี้ยังได้แสดงวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรมัลติเพล็กซ์ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบ
สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้วงจรมัลติเพล็กซ์ทำงานได้โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดอันก่อให้เกิดความ
สูญเสียต่อพลังงานและอุปกรณ์โดยได้อธิบายการทำงานอย่างละเอียด และได้แสดงคลื่นที่ได้จาก
วงจรมัลติเพล็กซ์ตามจุดต่างๆ โดยได้เปรียบเทียบระหว่างผลการซิมูเลตกับผลที่ได้จากการทดลอง
เพื่อยืนยันความถูกต้องโดยผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก

บทที่ 4

การวิเคราะห์คลื่นเอาต์พุตและสมการของวงจรเอซีชอปเปอร์ สวิตซ์ที่ความถี่สูงที่ 20 kHz

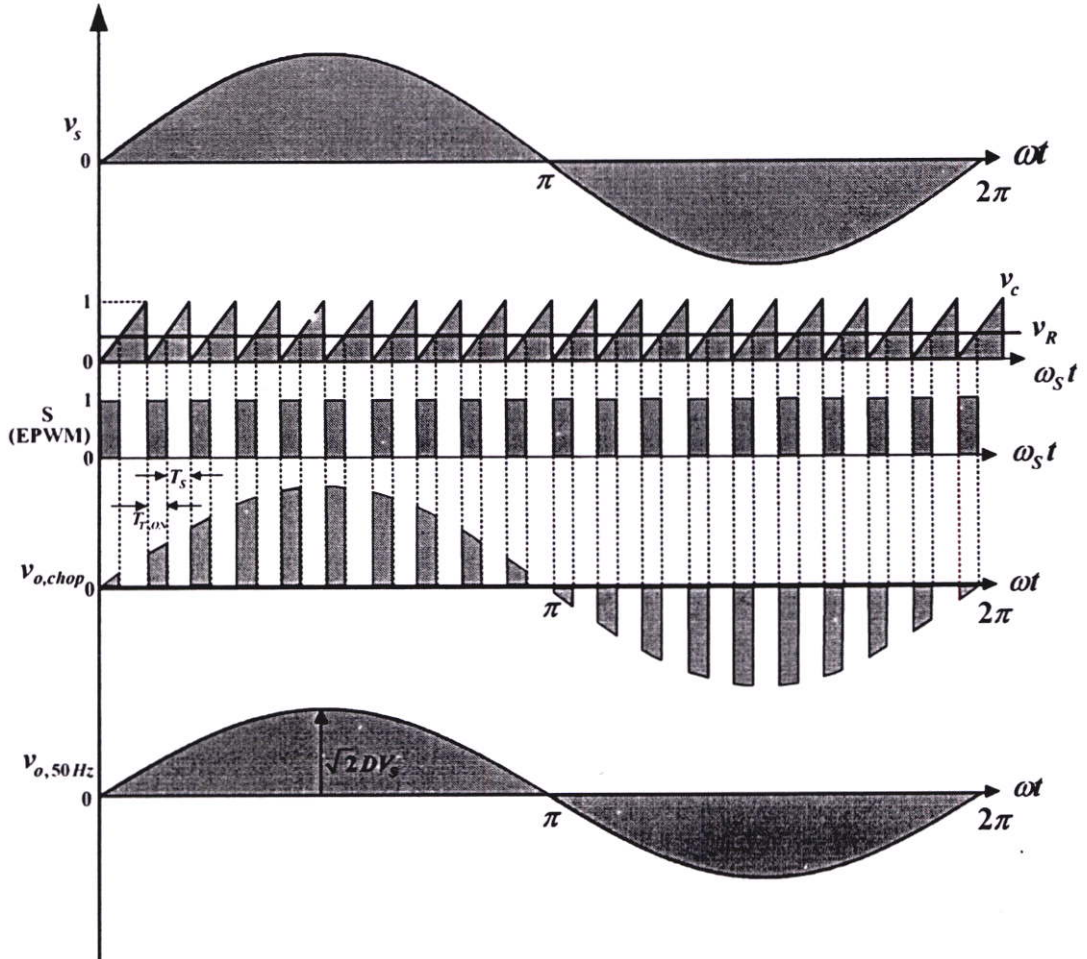
4.1 บทนำ

ในการทำวิจัยงานที่ต้องการความถูกต้องสูงนั้นต้องมีการเปรียบเทียบค่าที่ได้ระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ในงานวิจัยชิ้นนี้ก็เช่นกันที่ได้นำผลจากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยผลการทดลองนั้นได้ทำการเก็บผลจากเครื่องต้นแบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นมาและยังได้ทดลองใช้กับงานหลากหลายรูปแบบจนได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจและดีที่สุด ส่วนในเรื่องการคำนวณนั้นได้ทำการจำลองลักษณะของคลื่นอินพุตเอาต์พุตแล้วทำการคำนวณ โดยใช้วิธีการคำนวณคลื่นแบบอนุกรมฟูเรียร์แบบง่าย ๆ ทำให้สามารถเข้าใจง่ายไม่ยุ่งยาก ซึ่งจะสามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มาความสนใจในรุ่นหลัง โดยเฉพาะนักศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ผู้ที่พอจะมีความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่แล้วจะสามารถนำไปพัฒนาได้ง่ายขึ้น

4.2 การวิเคราะห์หาสมการและคลื่นแรงดันเอาต์พุต

จากการทำงานของสวิตซ์ในวงจรเอซีชอปเปอร์ ในลักษณะการตัดต่อวงจรให้แรงดันอินพุตไหลผ่านไปได้เป็นช่วงๆ โดยมีการทำงานในการตัดต่อเท่ากับ 20 kHz ในหนึ่งไซเคิลไซน์การไฟฟ้า 50 Hz จะทำให้เกิดโหมดการทำงานต่างๆ โหมดการทำงานจะขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกี่ยวข้องกันไปในแต่ละโหมด สามารถดูลักษณะแรงดันในแต่ละโหมดการทำงานได้จากคลื่นที่เอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์ก่อนที่จะนำคลื่นที่ได้ไปผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ โดยลักษณะคลื่นก่อนผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์นั้นจะเป็นโครงคลื่นไซน์การไฟฟ้า 220 v /50 Hz ซึ่งภายในจะถูกสวิตซ์ที่ทำการตัดต่อวงจรเพื่อควบคุมการไหลผ่านของคลื่นไซน์ทำให้ได้ลักษณะของคลื่นไซน์ 220 v/50 Hz เป็นคลื่นที่บ๊อบ ๆ ที่ภายในจะเป็นคลื่นไซน์ที่ถูกแบ่งเป็นแท่งโดยมีความกว้างของแต่ละแท่งเท่าๆกัน แต่ในทางการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการคูณสมการของคลื่นไซน์การไฟฟ้า 220 v /50Hz ด้วยสมการของสวิตซ์ฟังก์ชันทำให้ได้คลื่นไซน์ที่ถูกสับมีลักษณะเหมือนกับค่าที่ได้จากการทดลองและทำให้ได้ค่ากระแสและแรงดันอีกด้วย โดยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ทั้งการคำนวณในแบบฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันคู่ (Even Function)

อีกทั้งยังได้ทำการกระจายสเปกตรัมของสวิตซิ่งฟังก์ชัน โดยการคำนวณด้วยมือเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเกิดแถบสเปกตรัมทั้งตำแหน่งและขนาดเพราะลักษณะการเกิดฮาโมนิกส์ของสวิตซิ่งฟังก์ชันจะมีผลต่อการเกิดฮาโมนิกส์ของคลื่น ไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับคั่นนั้นจึงได้ทำการคำนวณมาไว้อย่างละเอียด



รูปที่ 4.1 แนวคิดในการวิเคราะห์คลื่นแรงดันเอาต์พุตของเอชชีชอปเปอร์ที่นำเสนอ

สัญญาณที่นำมาใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์สร้างขึ้นจากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อย (Saw-tooth signal) กับสัญญาณอ้างอิง DC ทำให้ได้สัญญาณ PWM ที่มีความกว้างพัลส์เท่ากันตลอด (equal PWM, EPWM) มีความถี่เท่ากับสัญญาณฟันเลื่อยและช่วงเวลาการ ON ของสวิตช์แปรผันตามความสูงของสัญญาณอ้างอิงแสดงในรูปที่ 4.1 และสามารถแสดงค่าดีไซเคิล (D) ของสัญญาณ EPWM ได้ดังสมการที่ (4.1)

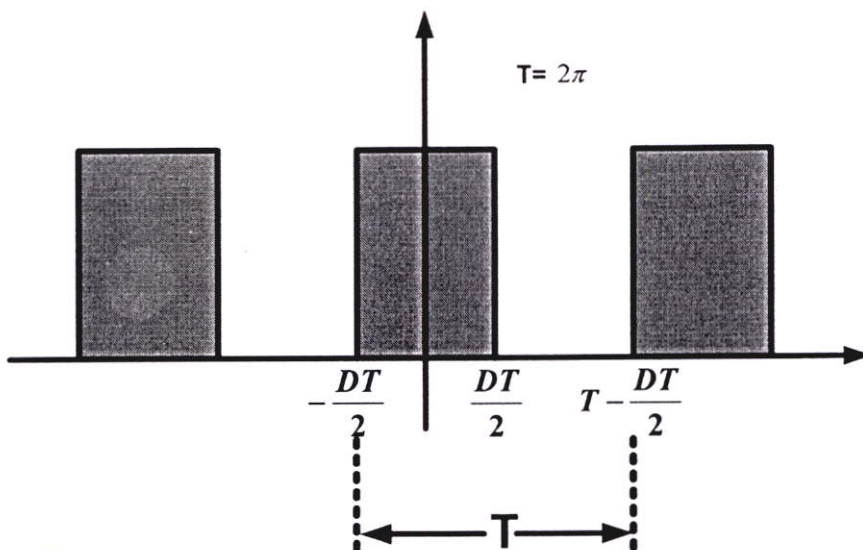
$$D = \frac{T_{S,ON}}{T_S} = \frac{V_R}{V_C} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (4.1)$$

โดยที่

$T_{S,ON}$ คือช่วงเวลาการ ON ของสวิตช์และ T_S คือคาบเวลาในการสวิตช์

V_C คือความสูงของสัญญาณฟันเลื่อย ส่วน V_R คือความสูงของสัญญาณอ้างอิง

4.3 การวิเคราะห์โดยให้สวิตช์ฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันคู่ (Even Function)



รูปที่ 4.2 สัญญาณของสวิตช์ฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันแบบคู่ (Even Function)

แรงดันคลื่น ไซน์ การไฟฟ้า 50 Hz ซึ่งเป็นแรงดันอินพุตมีค่าดังสมการ(4.2)

$$v_s(\omega t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (4.2)$$

โดยที่ V_s คือค่า rms ของแรงดัน ไซน์ 50 Hz

ในการคำนวณหาสมการของแรงดันเอาต์พุต $v_{o, chop}$ ที่เกิดจากผลคูณระหว่างแรงดัน ไซน์ 50-Hz

$v_s(\omega t)$ กับสวิตช์ฟังก์ชันความถี่สูง

$S(\omega_s t)$ ก่อนอื่นจะต้องทำการวิเคราะห์หาสมการของสวิตช์ฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$ ในรูปที่ 4.2 จากนั้นจึงนำไปคูณกับแรงดัน ไซน์ในสมการ (4.2) ซึ่งสามารถทำได้โดยการ [2] วิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์ของ $S(\omega_s t)$ ดังสมการ(4.3)

$$S(\omega_s t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_n \cos k\omega_s t + b_n \sin k\omega_s t] \quad (4.3)$$

ทำการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของ a_0, a_n และ b_n ได้ดังต่อไปนี้
สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_0 ได้ดังสมการที่ (4.4)

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{DT}{2}}^{T-\frac{DT}{2}} v_{PWM}(t) dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{DT}{2}}^{\frac{DT}{2}} 1 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{DT}{2}}^{T-\frac{DT}{2}} 0 dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \left[t \right]_{-\frac{DT}{2}}^{\frac{DT}{2}} \quad (4.4)$$

ทำการแทนค่าที่ได้จากสมการที่ (4.4) จะได้ a_0 ดังสมการที่ (4.5)

$$a_0 = \frac{1}{T} \left(\frac{DT}{2} + \frac{DT}{2} \right)$$

จะได้ $a_0 = D$ (4.5)

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n ได้ดังสมการที่ (4.6)

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{DT}{2}}^{T-\frac{DT}{2}} v_{PWM} \cos(k\omega_s t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{DT}{2}}^{\frac{DT}{2}} (1) \cos(k\omega_s t) d\omega_s t + \frac{2}{T} \int_{\frac{DT}{2}}^{T-\frac{DT}{2}} (0) \sin(k\omega_s t) d\omega_s t$$

$$a_n = \frac{2}{Tk} [\sin kt]_{-DT/2}^{DT/2} \quad (4.6)$$

ทำการแทนค่าที่ได้จากสมการที่ (4.6) จะได้ a_n ดังสมการที่ (4.7)

$$a_n = \frac{1}{\pi k} [\sin kD\pi - (\sin k(-D\pi))] \\ a_n = \frac{2 \sin kD\pi}{\pi k} \quad (4.7)$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของ b_n ได้ดังสมการที่ (4.8)

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{DT}{2}}^{T-\frac{DT}{2}} v_{PWM} \sin(k\omega_s t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{DT}{2}}^{\frac{DT}{2}} (1) \sin(k\omega_s t) d\omega_s t + \frac{2}{T} \int_{\frac{DT}{2}}^{T-\frac{DT}{2}} (0) \cos(k\omega_s t) d\omega_s t \\ b_n = \frac{2}{Tk} [-\cos(kt)]_{-DT/2}^{DT/2} \quad (4.8)$$

ทำการแทนค่าที่ได้จากสมการที่ (4.8) จะได้ b_n ดังสมการที่ (4.9)

$$b_n = \frac{2}{Tk} \left[\left(-\cos\left(k \frac{DT}{2}\right) \right) - \left(-\cos\left(k \left(-\frac{DT}{2}\right)\right) \right) \right] \\ b_n = 0 \quad (4.9)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_n และ b_n ของอนุกรมฟูเรียร์ที่ได้จากการคำนวณแทนลงในสมการที่ (4.3) จะได้สมการของสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันดังสมการที่ (4.10)

$$S(\omega_s t) = D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin(kD\pi)}{k\pi} \cos(k\omega_s t) + \sum_{k=1}^{\infty} (0) \sin k\omega_s t \quad (4.10)$$

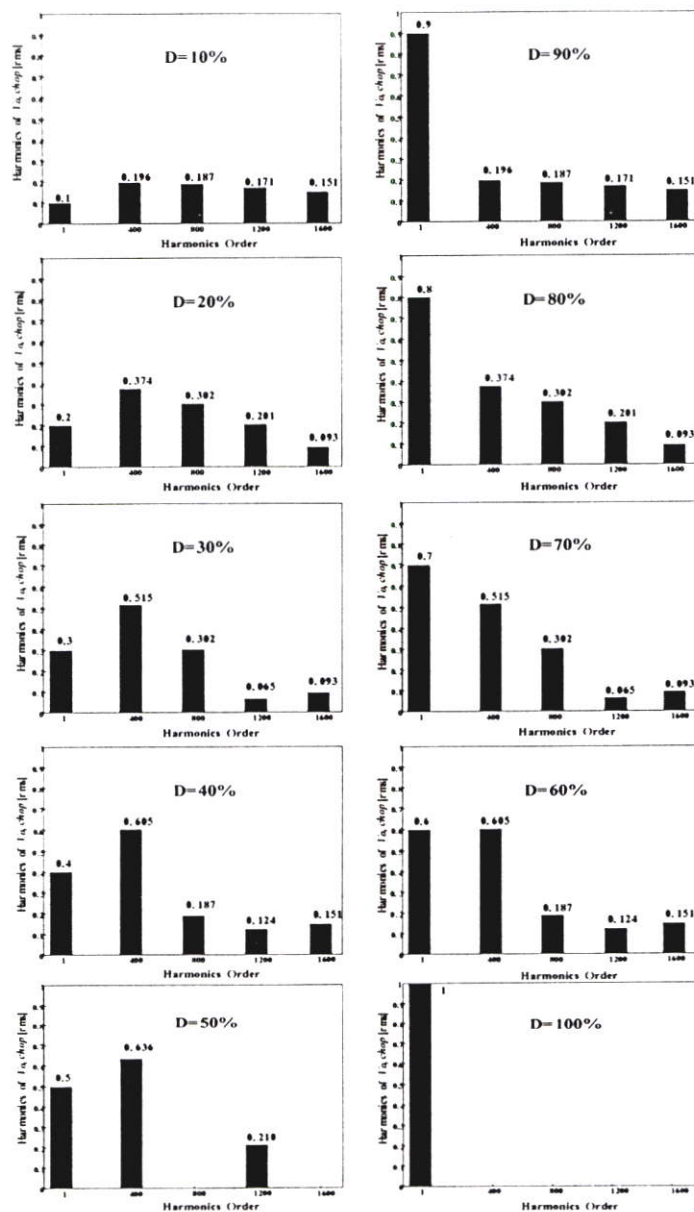
$$S(\omega_s t) = D + \frac{2 \sin(D\pi)}{\pi} \cos(\omega_s t) + \frac{2 \sin(2D\pi)}{2\pi} \cos(2\omega_s t) + \dots \\ + \frac{2 \sin(nD\pi)}{n\pi} \cos(n\omega_s t) : k = 1, 2, 3, \dots n \quad (4.11)$$

$$S(\omega_s t) = D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin(kD\pi)}{k\pi} \cos(k\omega_s t) \quad (4.12)$$

โดยที่ ω_s คือความถี่เชิงมุมของสวิตซ์ฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$

k คือลำดับฮาร์โมนิกของสวิตซ์ฟังก์ชัน $= 1, 2, 3, \dots$

เมื่อนำสมการที่ (4.12) ซึ่งเป็นสมการของสวิตซ์ฟังก์ชันมาคำนวณหาค่าโดยแทนค่าคิวดัตไตซ์เกิดต่างๆ ให้ $D = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.9$ ก็จะได้ค่าของฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ และสามารถดูการเปลี่ยนแปลงของฮาร์โมนิกที่คิวดัตไตซ์เกิดเปลี่ยนไปดังกราฟในรูปที่(4.3) ในที่นี้ได้แสดงให้ดู 6 ลำดับ โดยค่าของแต่ละลำดับจะขึ้นอยู่กับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 4.3 การกระจายฮาร์โมนิกของสวิตซ์ฟังก์ชันเพื่อเปรียบเทียบคิวดัตไตซ์ที่มีฮาร์โมนิกเท่ากัน

4.3.1 การคุณสมบัติของสวิตซ์ฟังก์ชันกับสมการของแรงดันอินพุต

จากการคำนวณหาสมการของสวิตซ์ฟังก์ชันสามารถนำมาคำนวณหาค่าเอาต์พุต $v_{o, chop}$ ของวงจรเอซีชอปเปอร์ได้โดยการนำสมการสวิตซ์ฟังก์ชันในสมการที่ (4.12) มาคูณกับสมการของแรงดันไซน์การไฟฟ้าในสมการที่ (4.2) ซึ่งเป็นแรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรเอซีชอปเปอร์จะได้ค่าของเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์ดังสมการที่ (4.13) [2]

$$v_{o, sw}(t) = v_s(t)S(\omega_s t)$$

$$= \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \left(D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin(kD\pi)}{k\pi} \cos(k\omega_s t) \right) \quad (4.13)$$

จากสมการที่(4.13) สามารถทำการแทนค่า $k = 1, 2, 3, \dots, n$ เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นจะได้ดังสมการที่(4.14)

$$v_{o, chop}(t) = D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(D\pi) \cos(\omega_s t)}{\pi} +$$

$$\frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(2D\pi) \cos(2\omega_s t)}{2\pi} + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(3D\pi) \cos(3\omega_s t)}{3\pi} + \dots$$

$$\frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(nD\pi) \cos(n\omega_s t)}{n\pi} \quad : k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14) ในกรณีกำหนดให้ $D=1$ จะได้ $v_{o, chop}(t)$ ดังสมการที่ (4.15)

$$v_{o, chop}(t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(\pi) \cos(\omega_s t)}{\pi} +$$

$$\frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(2\pi) \cos(2\omega_s t)}{2\pi} + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(3\pi) \cos(3\omega_s t)}{3\pi} + \dots$$

$$\frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(n\pi) \cos(n\omega_s t)}{n\pi} \quad : k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$v_{o, chop}(t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (4.15)$$

นำสมการที่ (4.13) มาเขียนใหม่จะได้ดังสมการ (4.16)

$$\begin{aligned} v_{o, chop}(t) &= D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(kD\pi) \cos(k\omega_s t)}{k\pi} \\ &= D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{2}V_{rk} \cos(k\omega_s t) \cos(\omega t)}{\pi k} \\ &= D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{2}V_{rk} \cos[(k\omega_s \pm \omega)t]}{2} \\ &= D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}V_{o, swk} \cos[(k\omega_s \pm \omega)t] \end{aligned} \quad (4.16)$$

โดยที่ $V_{o, swk}$ คือค่า rms ขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ k ซึ่งมีค่าเป็น

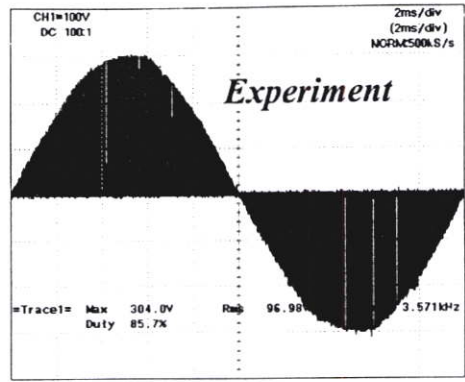
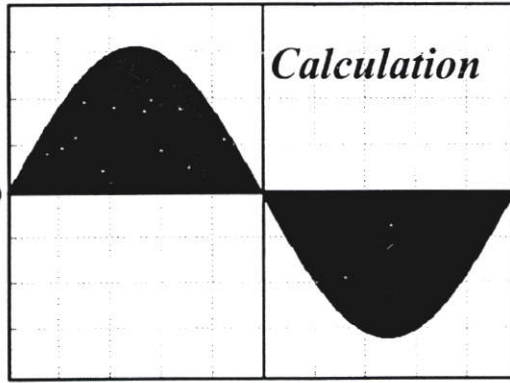
$$V_{o, swk} = V_s \sin(kD\pi) / k\pi \quad (4.17)$$

4.3.2 การวิเคราะห์คลื่นแรงดันเอาต์พุต

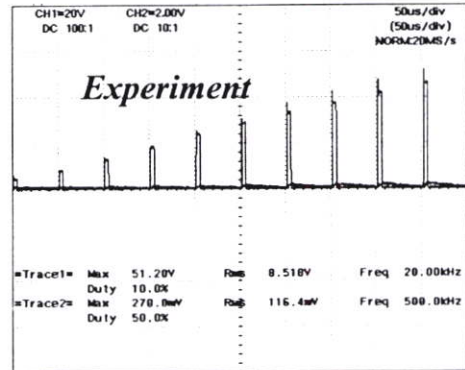
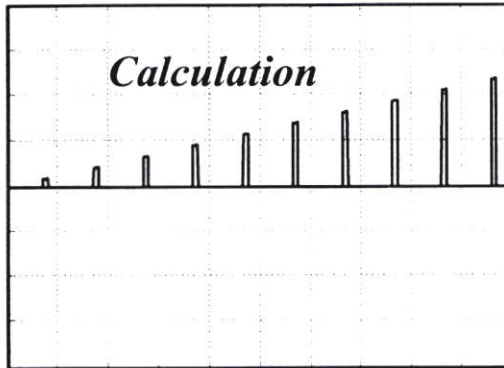
แรงดันไซน์ความถี่ต่ำจากไลน์การไฟฟ้า 50Hz เมื่อป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรเอชไอพีเปอร์จะได้แรงดันเอาต์พุต $v_{o, chop}$ ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (4.16) จะประกอบด้วยความถี่ต่ำ 50-Hz รวมอยู่กับความถี่สูง $k \times (20kHz) \pm 50Hz$ และเมื่อนำคลื่น $v_{o, chop}$ ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์องค์ประกอบความถี่สูงของ $v_{o, chop}$ จะถูกกรองทิ้งเหลือแต่แรงดันเอาต์พุตที่มีองค์ประกอบความถี่ต่ำ 50Hz เท่านั้นซึ่งเป็นคลื่นไซน์ที่สามารถปรับแอมพลิจูดได้โดยการปรับค่าควิตซ์ไซเคิล (D) ที่มีลักษณะคลื่นจากการคำนวณและการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.2.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ พร้อมแถบสเปคตรัมที่ควิตซ์ไซเคิล 10% เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตคร่อมสวิตช์ S_3, S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้อง จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.4 (a-b) ส่วนในรูปที่ 4.4 (c) เป็นการแสดงสเปคตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

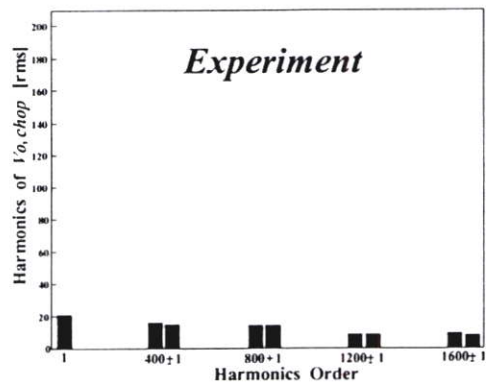
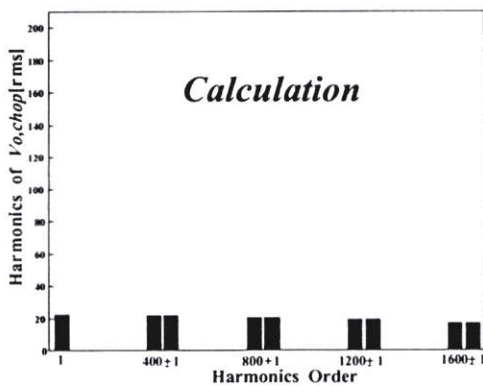
เมื่อแทนค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.1 หรือ 10 % เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอพีเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกความถี่สูงออกจะได้อุปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



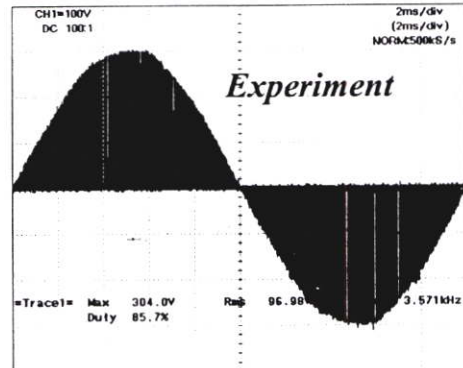
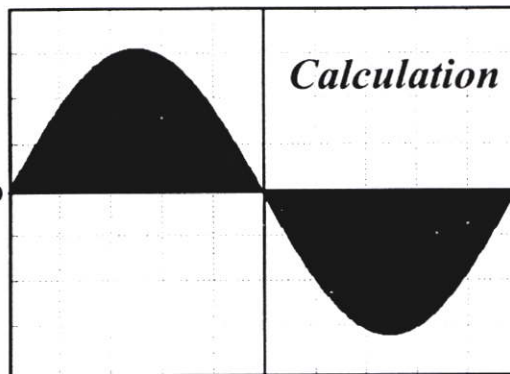
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.4 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์เกิด 10%

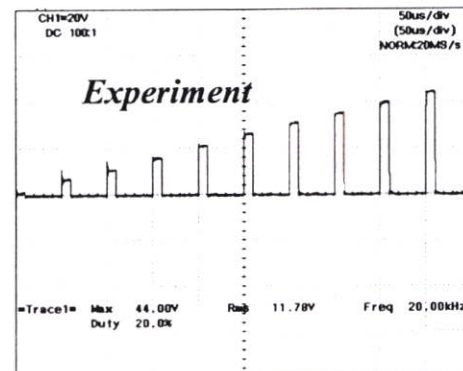
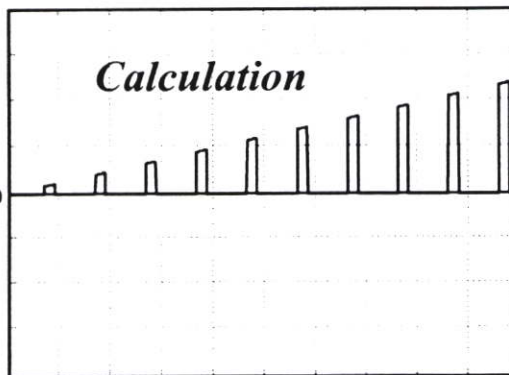
4.3.2.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คัตไจเคิล 20%

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตพร้อมสวิทช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.5 (a-b) ส่วนในรูปที่ 4.5 (c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิทช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคัตไจเคิลเท่ากับ 0.2 หรือ 20 % เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีโอพีโดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้อุปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

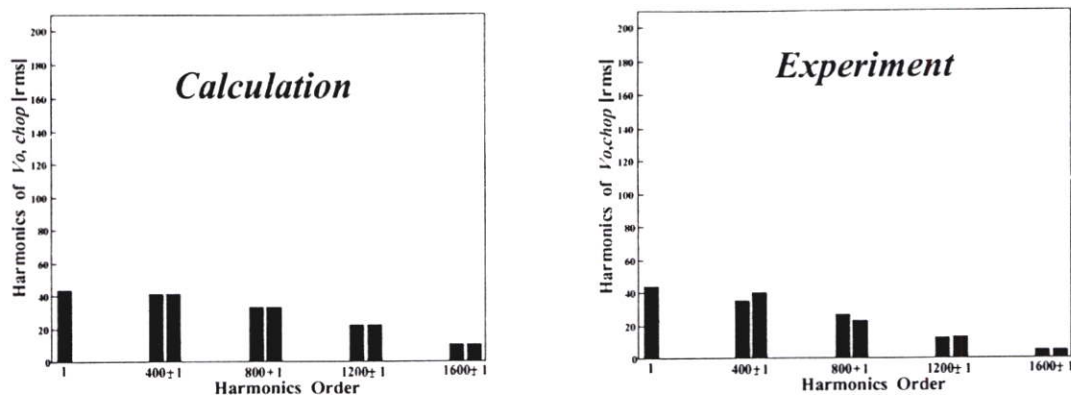


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.5 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คัตไจเคิล 20%



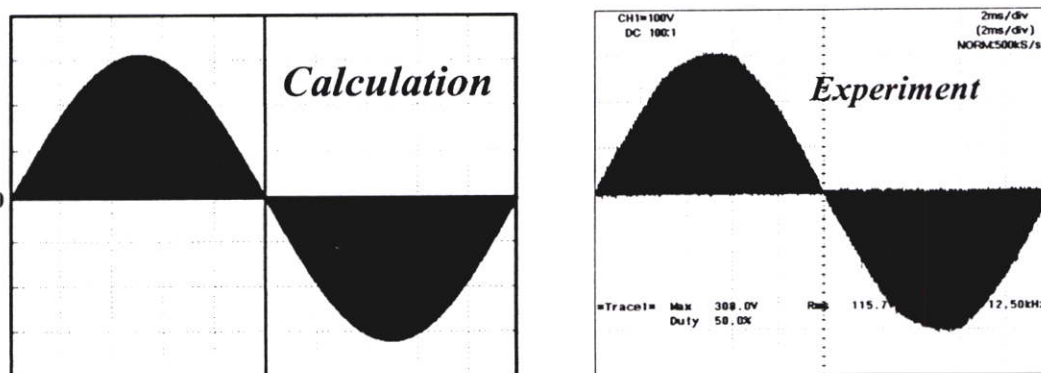
- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.5 ต่อ

4.3.2.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คัตออฟไซเคิล 30%

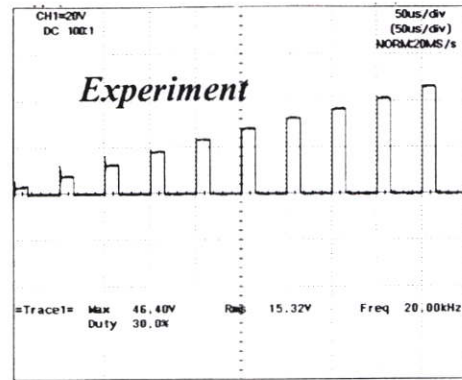
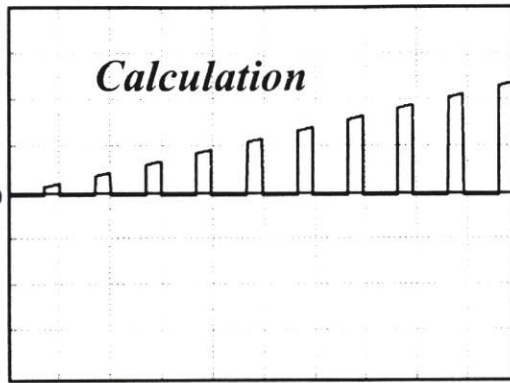
เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตคร่อมสวิตช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.6 (a-b) ส่วนในรูปที่ 4.6 (c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคัตออฟไซเคิลเท่ากับ 0.3 หรือ 30% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกจะ ได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

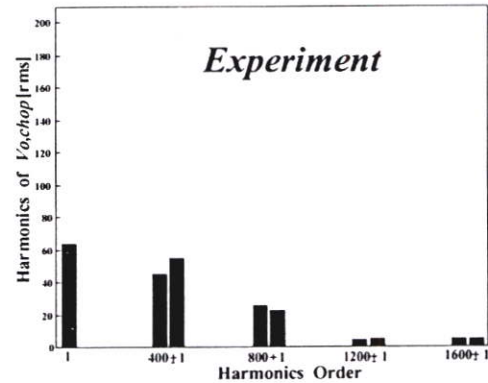
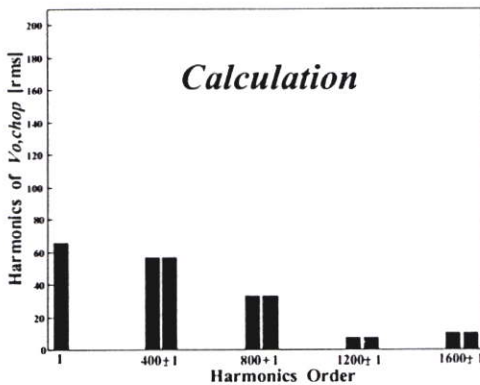


- (a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.6 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, swic}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คัตออฟไซเคิล 30%



- (d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



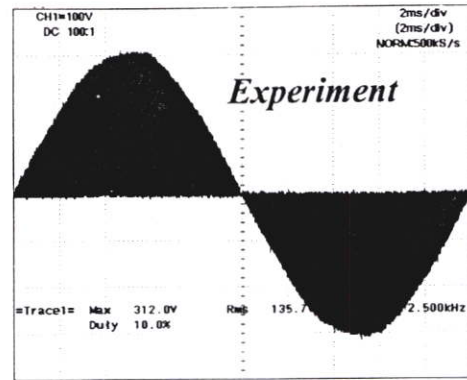
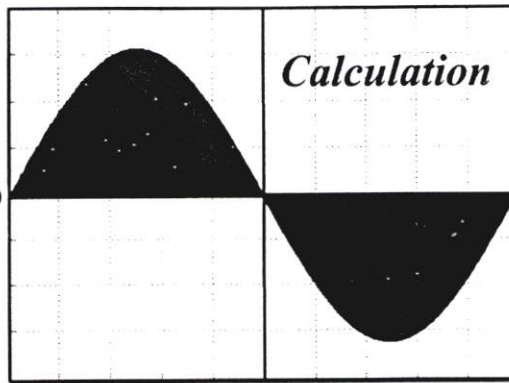
- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.6 ต่อ

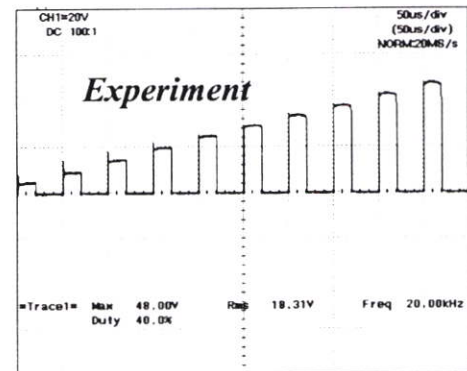
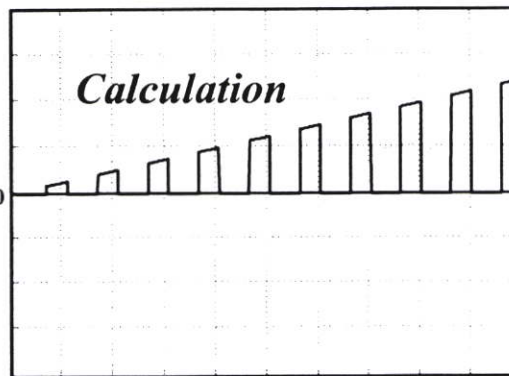
4.3.2.4 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตีไซเคิล 40%

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตรวมสวิทช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.7(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.7(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิทช์เท่ากับ 20kHz

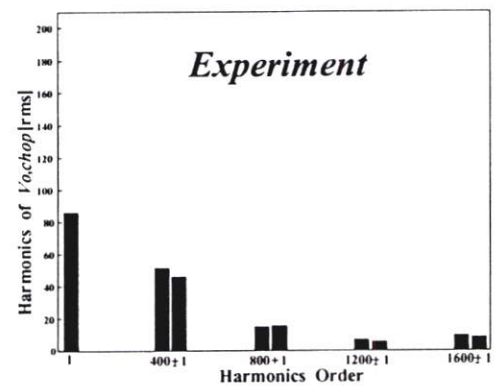
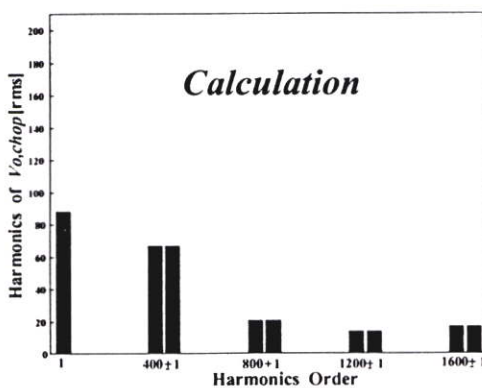
เมื่อแทนค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 0.4 หรือ 40% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชีชอปเปอร์ โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



- (a) คลื่นแรงดันทางคานเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



- (d) คลื่นแรงดันทางคานเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



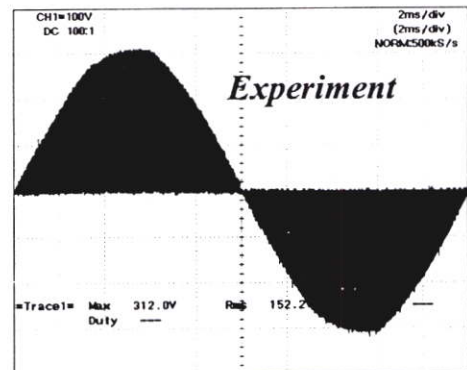
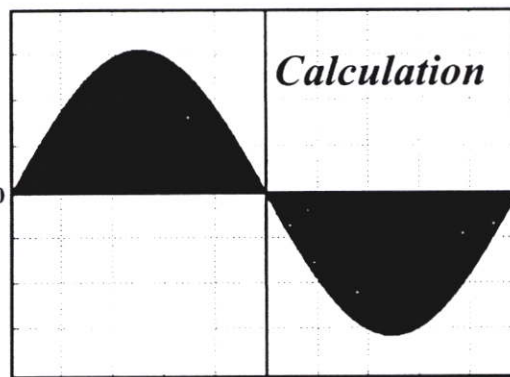
- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชไอซีเอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, swic}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์เกิด 40%

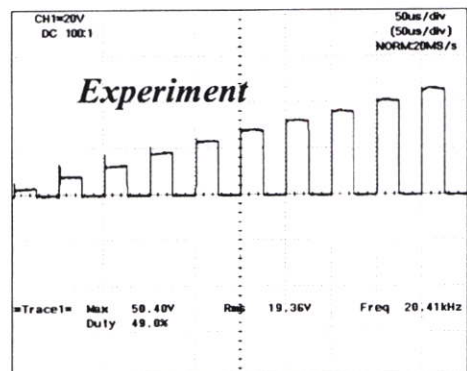
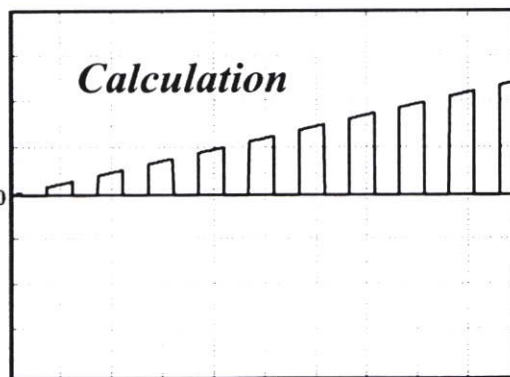
4.3.2.5 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตีไซเคิล 50%

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตพร้อมสวิตช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.8(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.8(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 0.5 หรือ 50% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

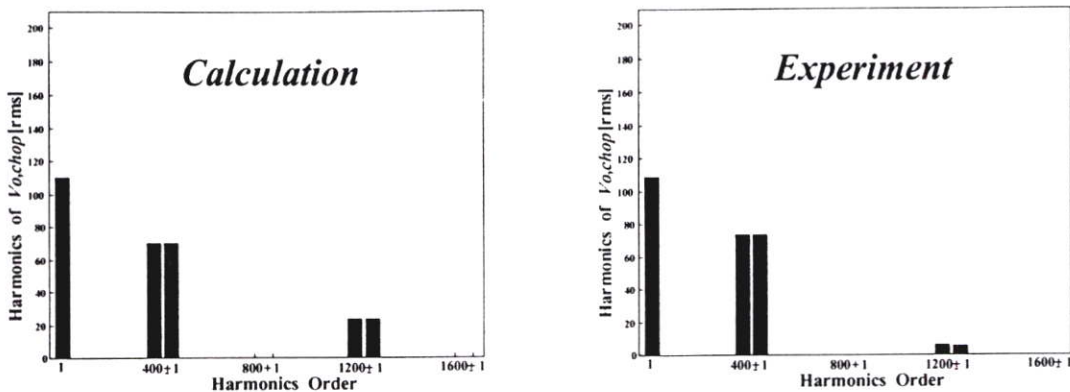


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตีไซเคิล 50%



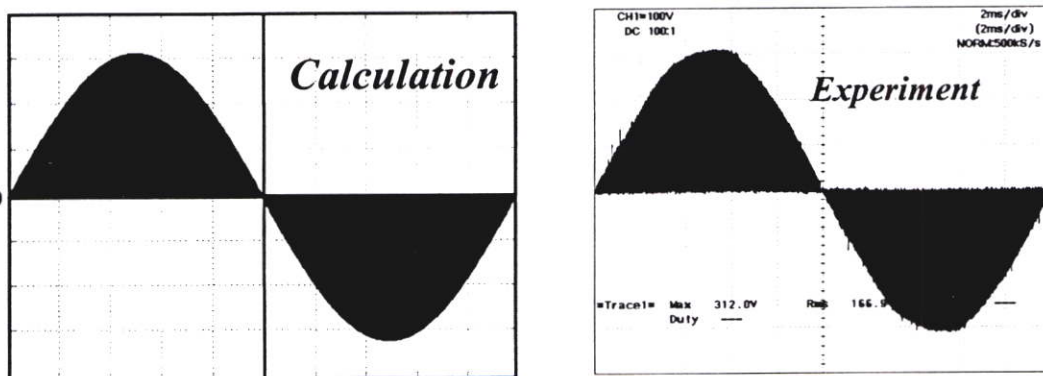
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.8 ต่อ

4.3.2.6 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตซ์ไซเคิล 60%

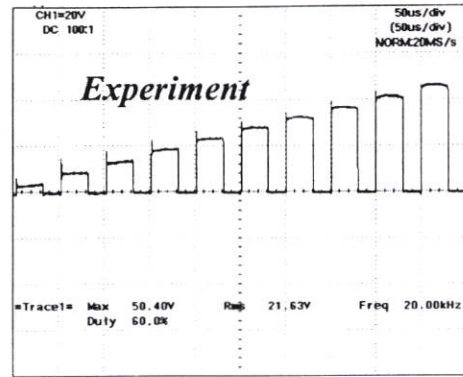
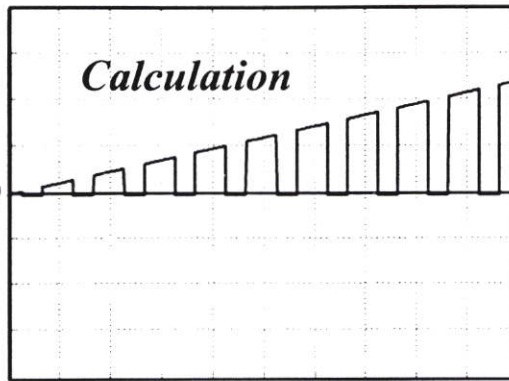
เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตคร่อมสวิตช์ S_3, S_4 มาการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.9(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.9(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.6 หรือ 60% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชอปเปอร์ โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

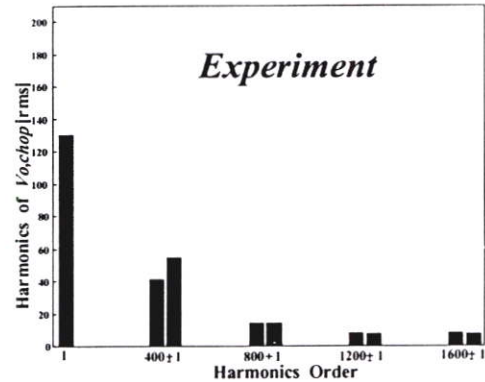
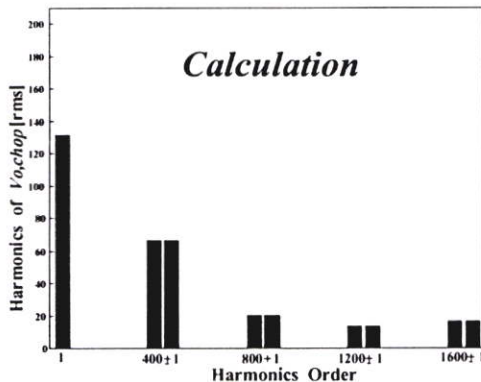


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.9 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคิล 60%



- (d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



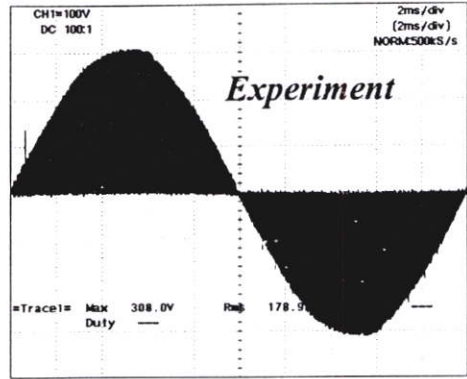
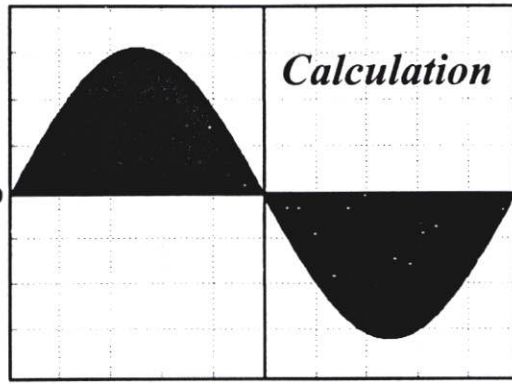
- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.9 ต่อ

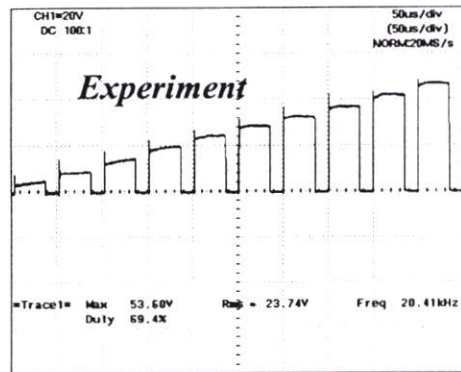
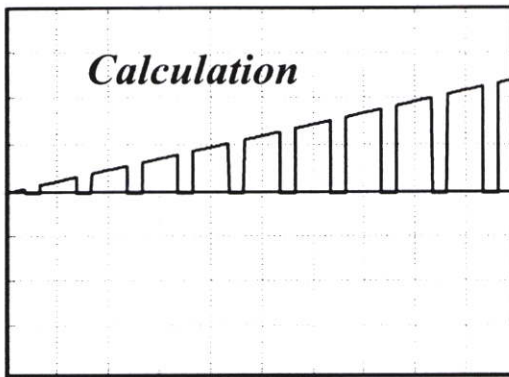
4.3.2.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตซ์ไซเคิล 70%

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตพร้อมสวิตช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.10(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.10(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

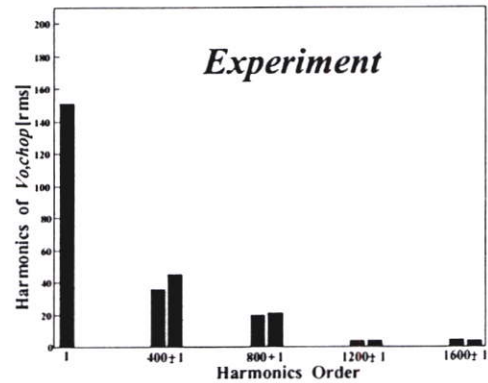
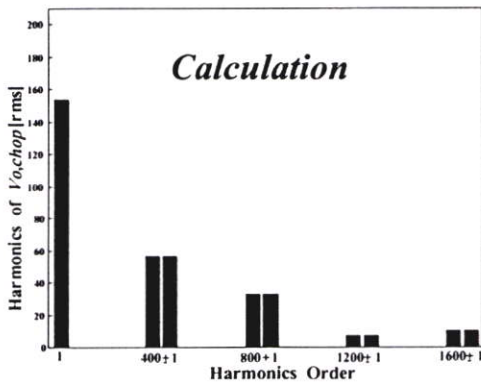
เมื่อแทนค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.7 หรือ 70% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซนัส 50 Hz



(ค) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



(ด) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, sw}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



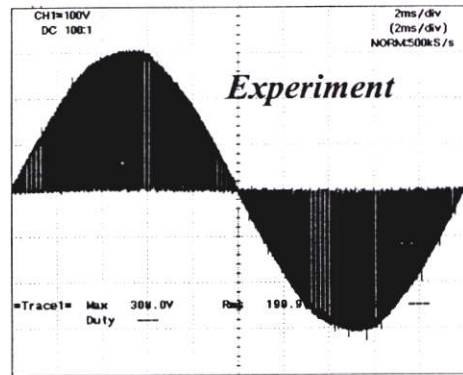
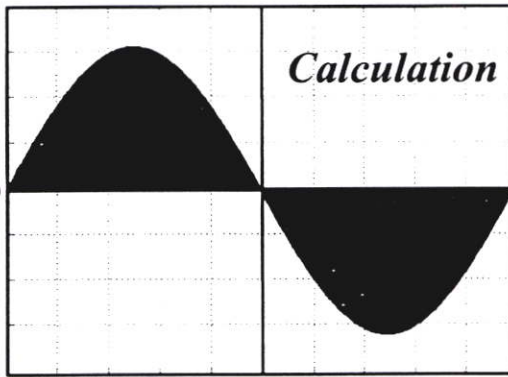
(ค) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชไอซีชอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.10 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, swic}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตซ์ไซเคิล 70%

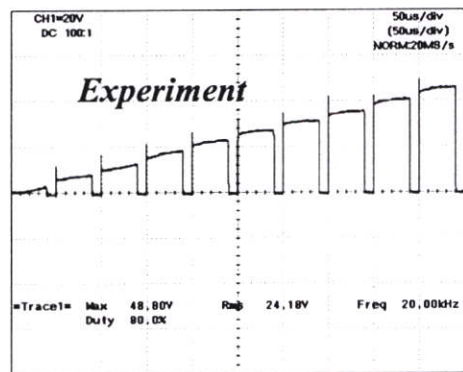
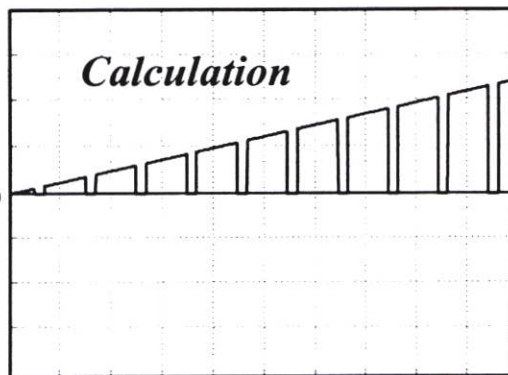
4.3.2.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,swic}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตีไซเคิล 80%

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตรวมสวิตช์ S_3, S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.11(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.11(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง โดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 0.8หรือ80% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชี่ซอปปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้อุปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

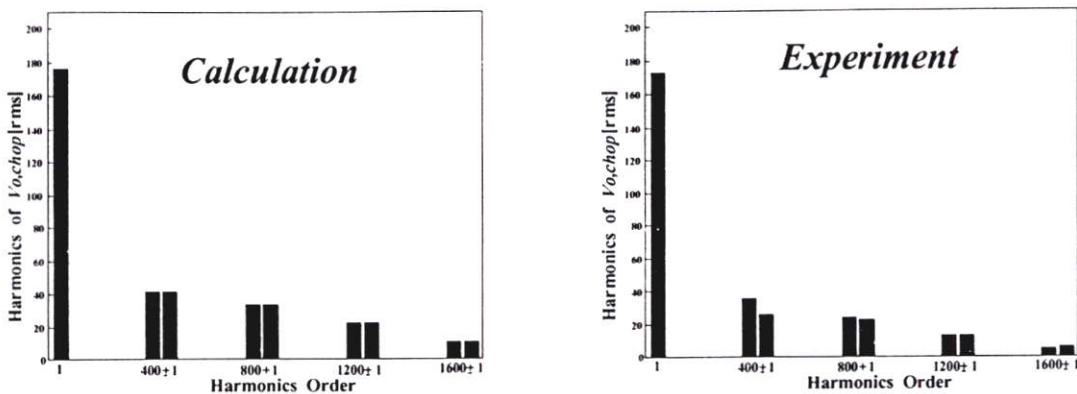


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่4.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตีไซเคิล 80%



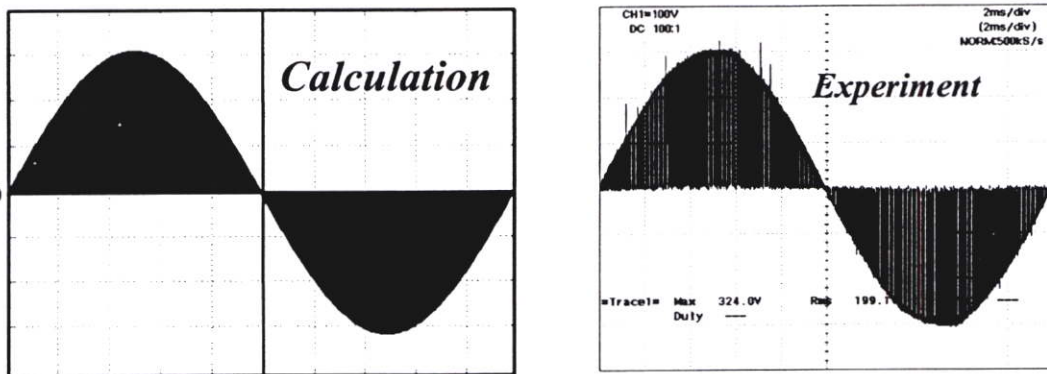
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชี่ชอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.11 ต่อ

4.3.2.9 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,switc}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตีไซเคิล 90%

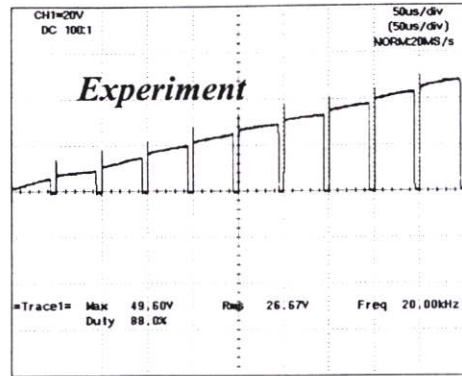
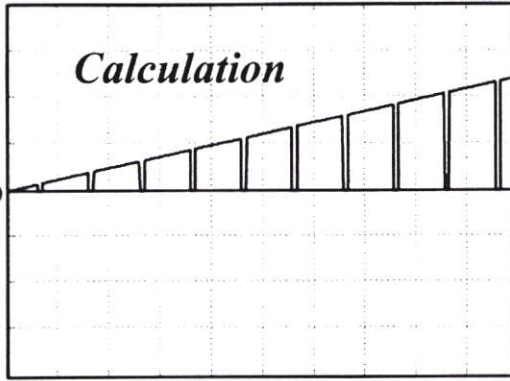
เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตคร่อมสวิตช์ S_3, S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.12(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.12(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 0.9 หรือ 90% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชี่ชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

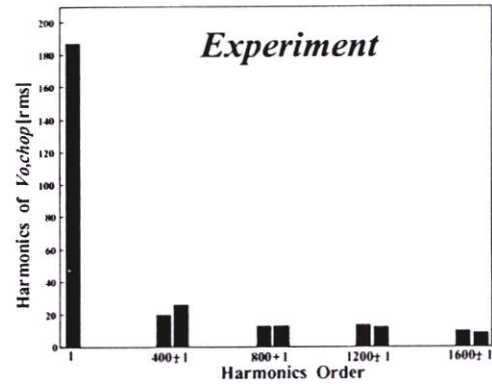
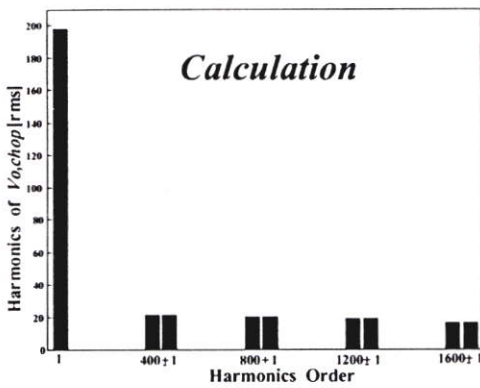


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตีไซเคิล 90%



(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

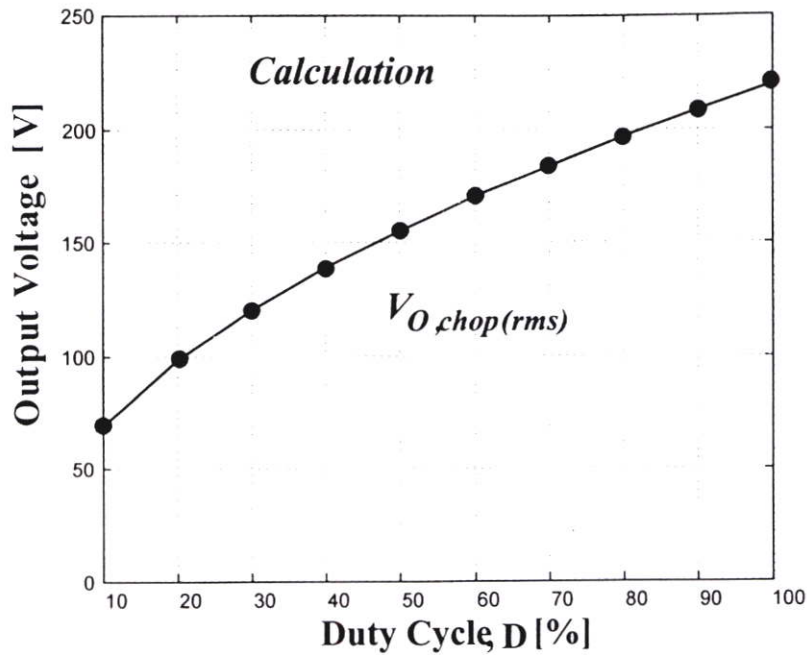


(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอป เปรียบ: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.12 ต่อ

จากสมการที่ (4.16) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปจะทำให้ได้ลักษณะของคลื่นและองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆจากการแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ค่าดิวิตีไซเคิลตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1 สามารถนำค่า rms ของแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์สับ ($v_{o,chop}$) มาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันเทียบกับค่าดิวิตีไซเคิลดังในรูปที่ 4.13 และเมื่อแทนค่าดิวิตีไซเคิลเท่ากับ 1 หรือ 100% จะได้รูปคลื่นเอาต์พุต ($v_{o,chop}$) เท่ากับที่อินพุตและจะไม่มีฮาร์มอนิกส์ โดยค่า rms สามารถหาได้จากสมการที่ (4.18)

$$V_{o,chop} = \sqrt{V_{o,50Hz}^2 + V_{H1}^2 + V_{H2}^2 + V_{H3+...}^2} \tag{4.18}$$



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่ได้กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออก ($v_{o, chop}$) กับค่าคิวดั้ไซเคิลต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 1

จากสมการที่ (4.16) เมื่อทำการจำลองการทำงานของการทำงานของ LC ฟิเตอร์โดยตัดสมการในส่วนที่เป็นกลุ่มฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกจะสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4.18)

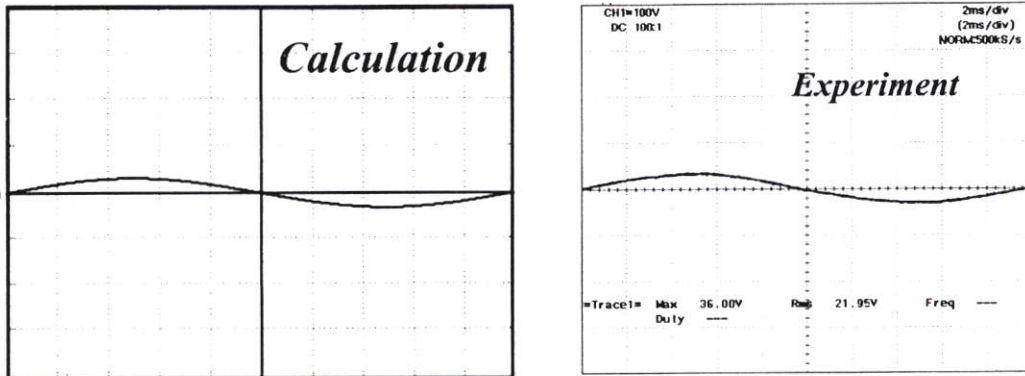
$$v_{o, chop}(t) = D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (4.18)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชอปเปอร์ที่ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์แล้วโดยตัดกลุ่มฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกมาแทนค่าแรงดันอินพุตเข้าไปที่ค่าคิวดั้ไซเคิลปรับเปลี่ยนไปตั้งแต่ 0.1, 0.2, ..., 1 จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าคิวดั้ไซเคิลสามารถนำมาพล็อตคลื่นที่ค่าคิวดั้ไซเคิลต่างๆ จะได้ลักษณะของรูปคลื่นและองค์ประกอบฮาโมนิกส์ออกมาดังรูปที่จะแสดงต่อไป

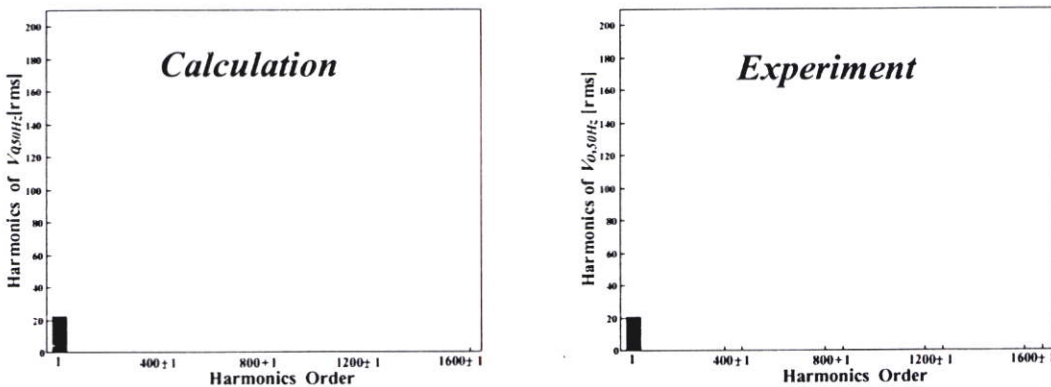
4.3.2.10 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, 50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดั้ไซเคิล 10%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.14(a) ส่วนในรูปที่ 4.14(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อแทนค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 0.1 หรือ 10% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอโอพีโดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



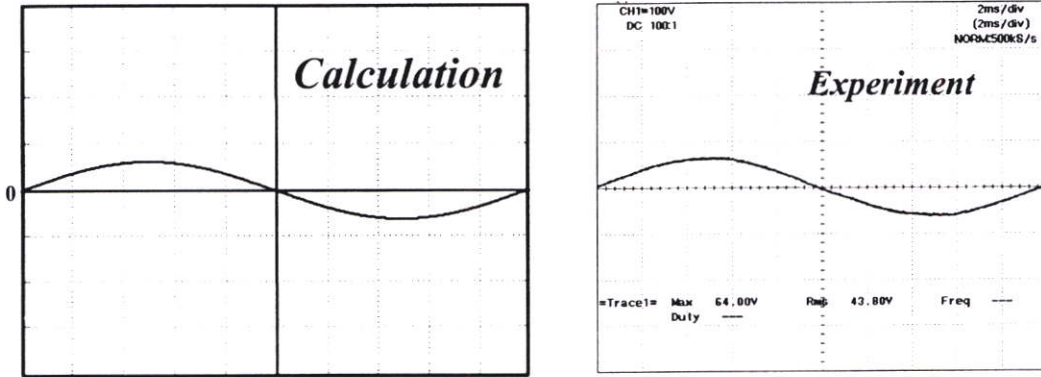
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชไอโอพี: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ไซเคิล 10%

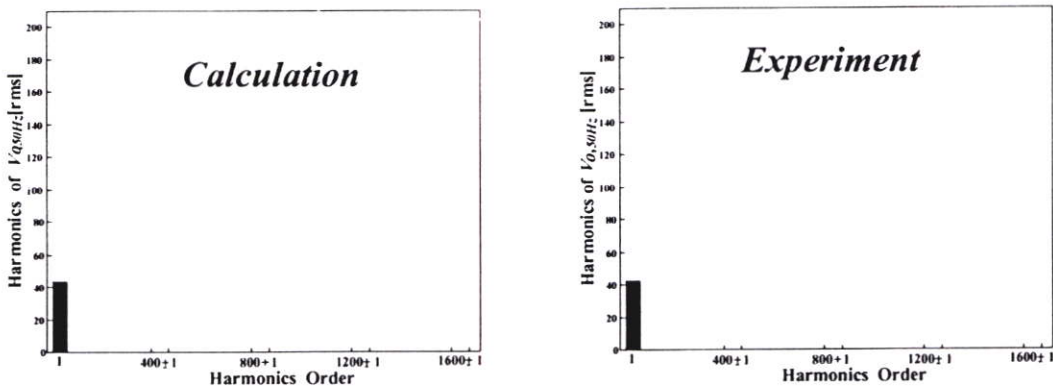
4.3.2.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ มแถบสเปกตรัม ที่ความถี่ไซเคิล 20%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.15(a) ส่วนในรูปที่ 4.15(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อแทนค่าคิวดัชนีไซเคิลเท่ากับ 0.2 หรือ 20% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีโดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50Hz}$ ($100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



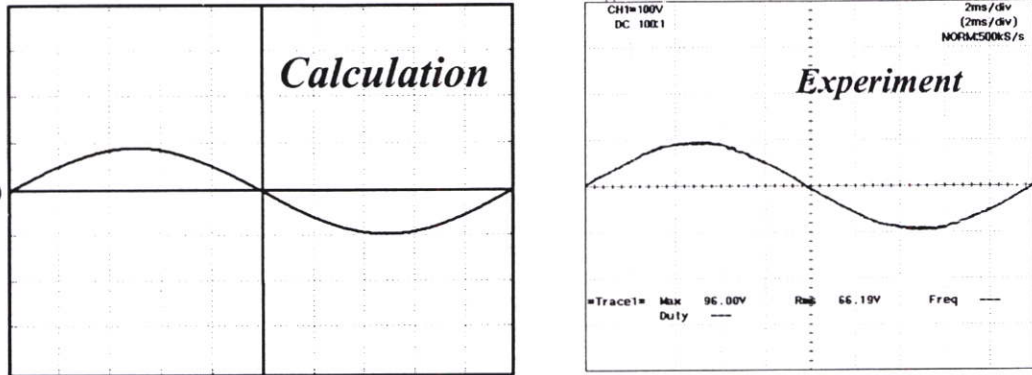
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชไอซี $v_{0.50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.15 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คิวดัชนีไซเคิล 20%

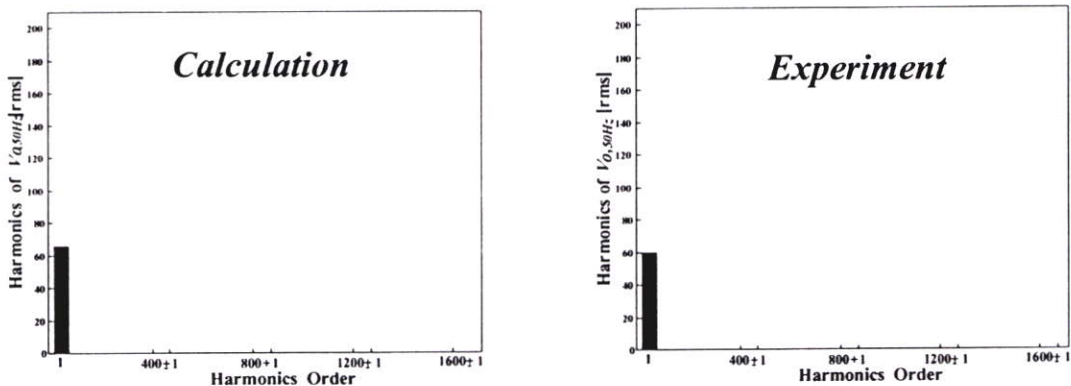
4.3.2.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50Hz}$ มแถบสเปกตรัม ที่คิวดัชนีไซเคิล 30%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.16(a) ส่วนในรูปที่ 4.16(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าความถี่ไซน์เกิดเท่ากับ 0.3 หรือ 30% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ ($v_{0.50\text{Hz}}=100\text{V/div}, x=20\text{ms/div}$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



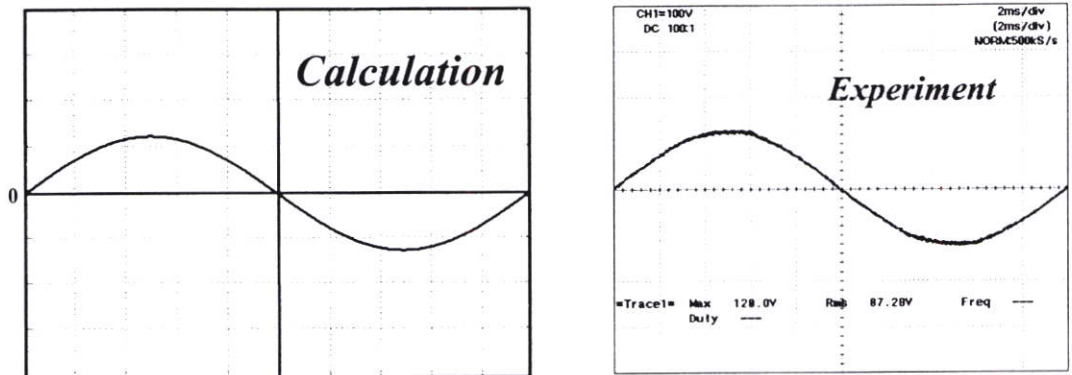
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอซีชอปเปอร์: $v_{0.50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ไซน์เกิด 30%

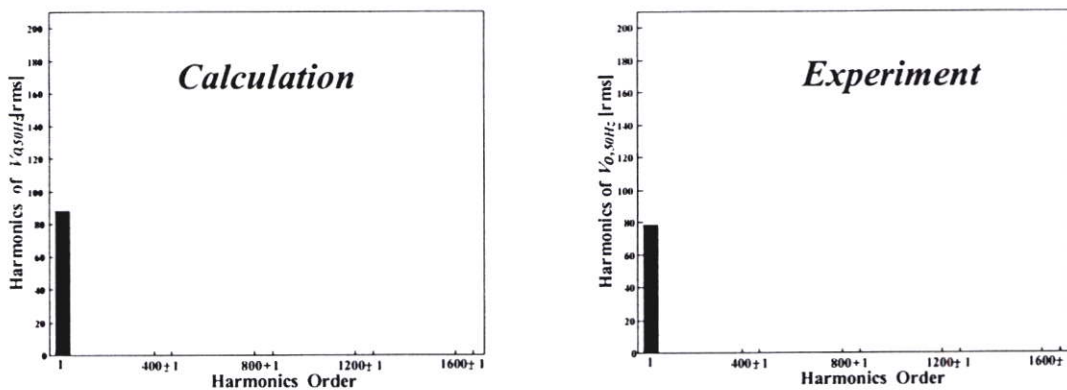
4.3.2.13 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ความถี่ไซน์เกิด 40%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.17(a) ส่วนในรูปที่ 4.17(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อแทนค่าคิวดั้ไซเคลเท่ากับ 0.4 หรือ 40% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุทของวงจรเอซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุทที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



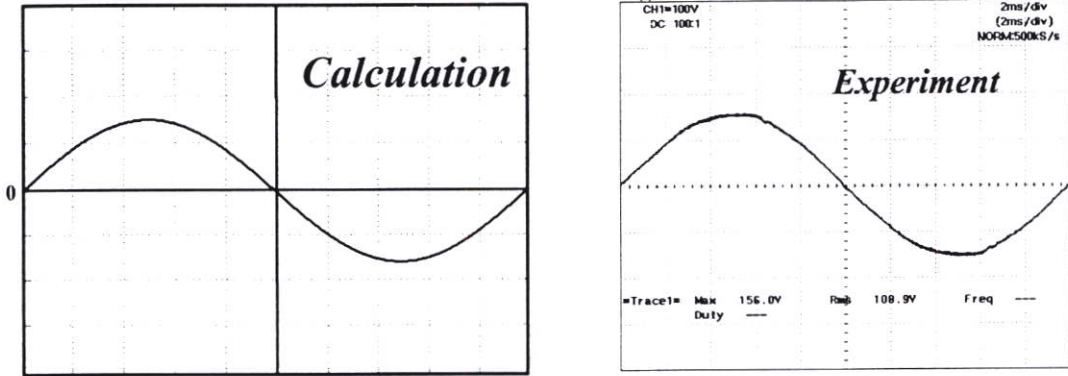
(b) ลักษณะสเปคตรัมแรงดันเอาต์พุท ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คิวดั้ไซเคล 40%

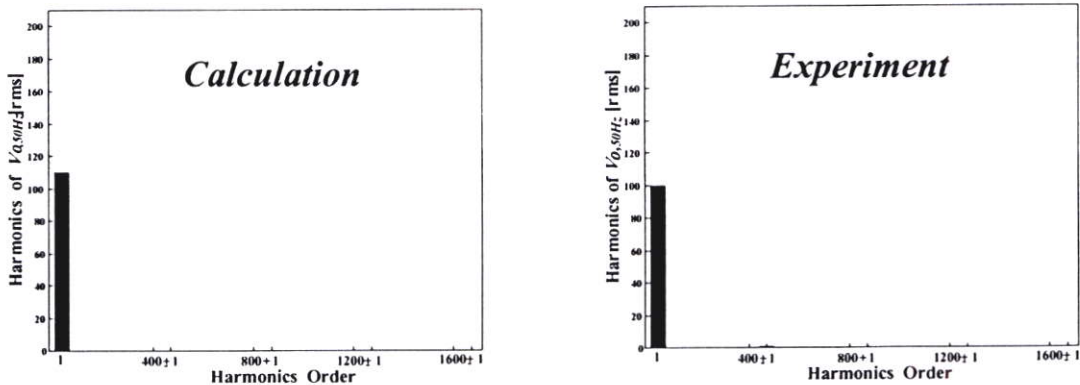
4.3.2.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปคตรัมที่คิวดั้ไซเคล 50%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุทที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.18(a) ส่วนในรูปที่ 4.18(b) เป็นการแสดงสเปคตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อแทนค่าคิวดั้ไซเคิลเท่ากับ 0.5 หรือ 50% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ ($v_{o,50Hz}$ 100V/div, x=20ms/div) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



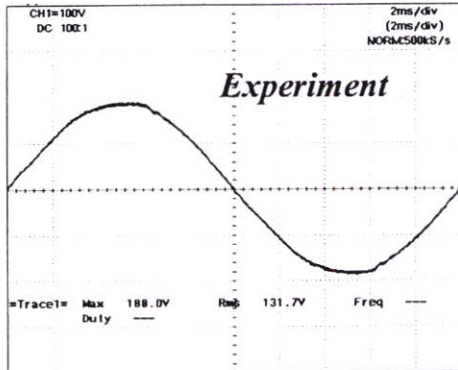
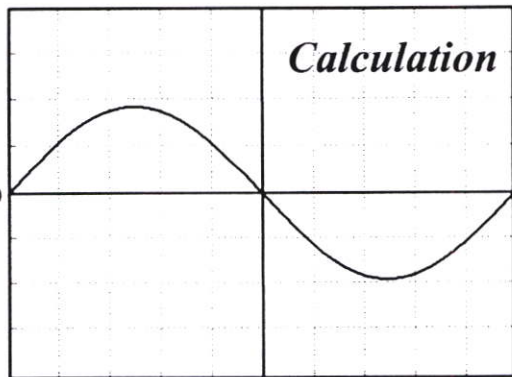
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.18 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คิวดั้ไซเคิล 50%

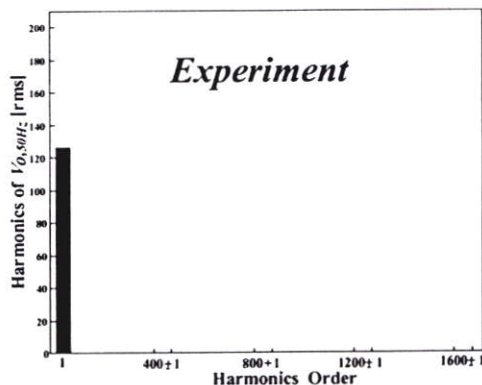
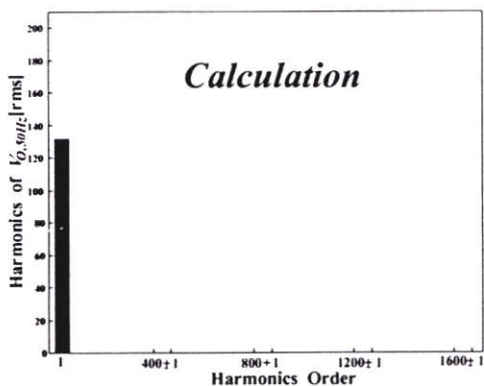
4.3.2.15 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดั้ไซเคิล 60%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.19(a) ส่วนในรูปที่ 4.19(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคิวดีไซเคลเท่ากับ 0.6 หรือ 60% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ $100V/div, x=20ms/div$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



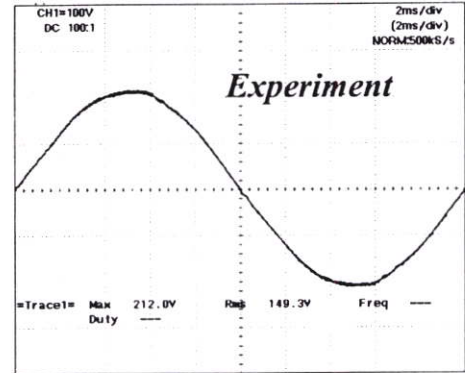
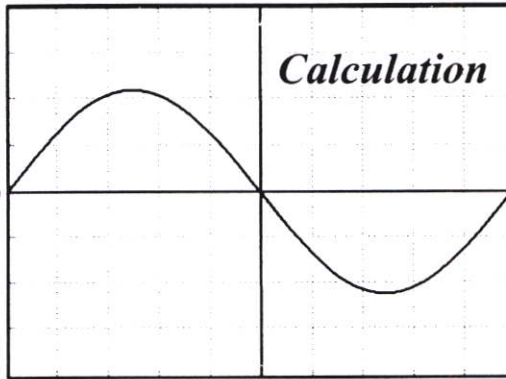
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.19 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คิวดีไซเคล 60%

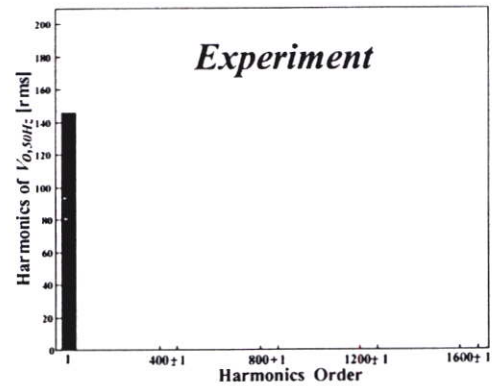
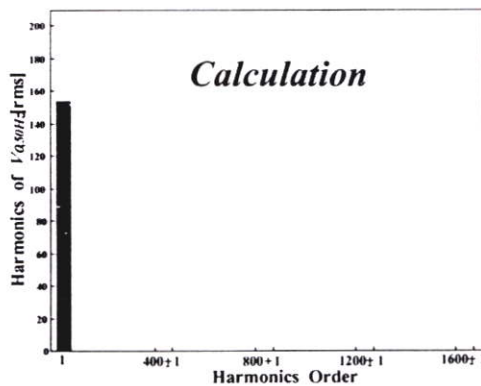
4.3.2.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดีไซเคล 70%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.20(a) ส่วนในรูปที่ 4.20(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 0.7 หรือ 70% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีของปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



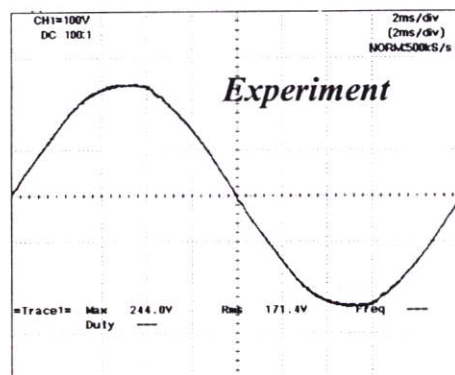
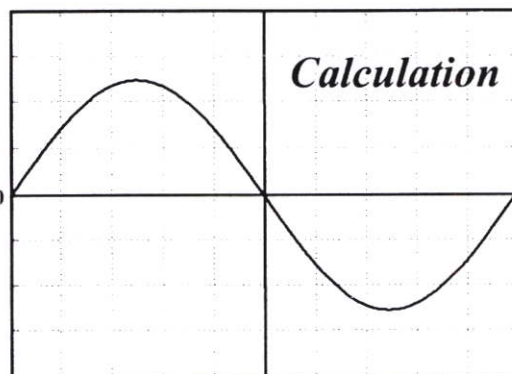
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชไอซีของปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.20 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ไซเคิล 70%

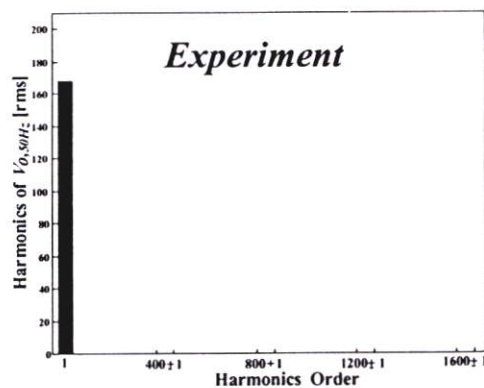
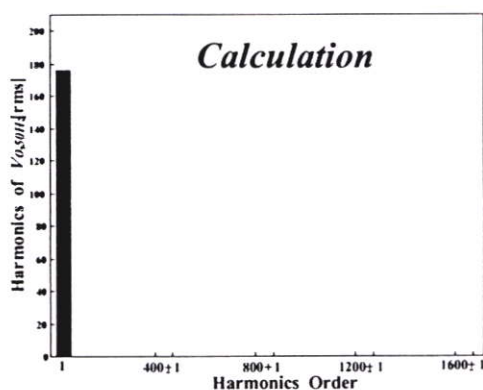
4.3.2.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ความถี่ไซเคิล 80%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.21(a) ส่วนในรูปที่ 4.21(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคิวดั้ไซเคลเท่ากับ 0.8 หรือ 80% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคลไซน์ 50 Hz



- (a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ $100\text{V/div}, x=20\text{ms/div}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



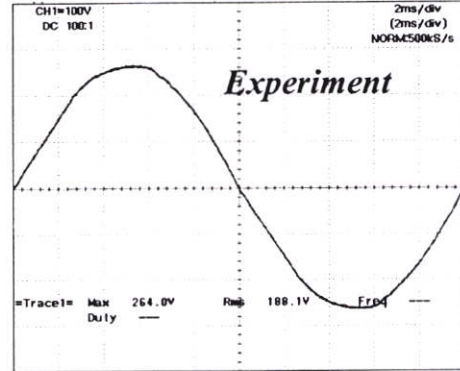
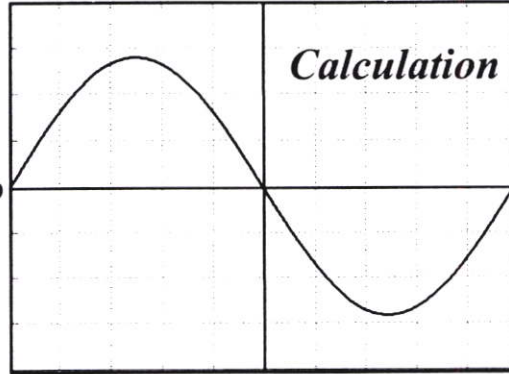
- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอซีชอปเปอร์: $v_{0.50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.21 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คิวดั้ไซเคล 80%

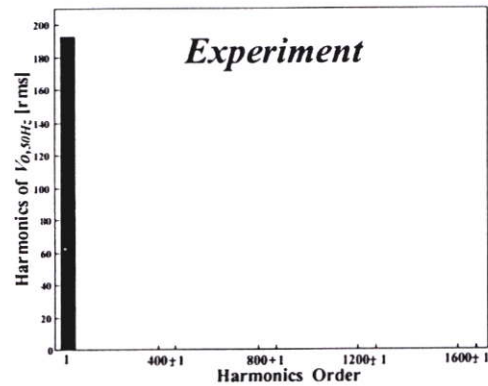
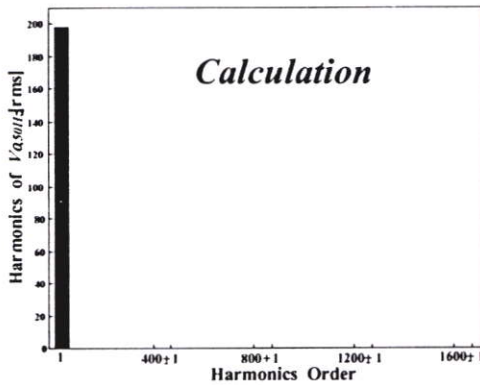
4.3.2.18 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดั้ไซเคล 90%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.22(a) ส่วนในรูปที่ 4.22(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคิวดั้ไซเคิลเท่ากับ 0.9 หรือ 90% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



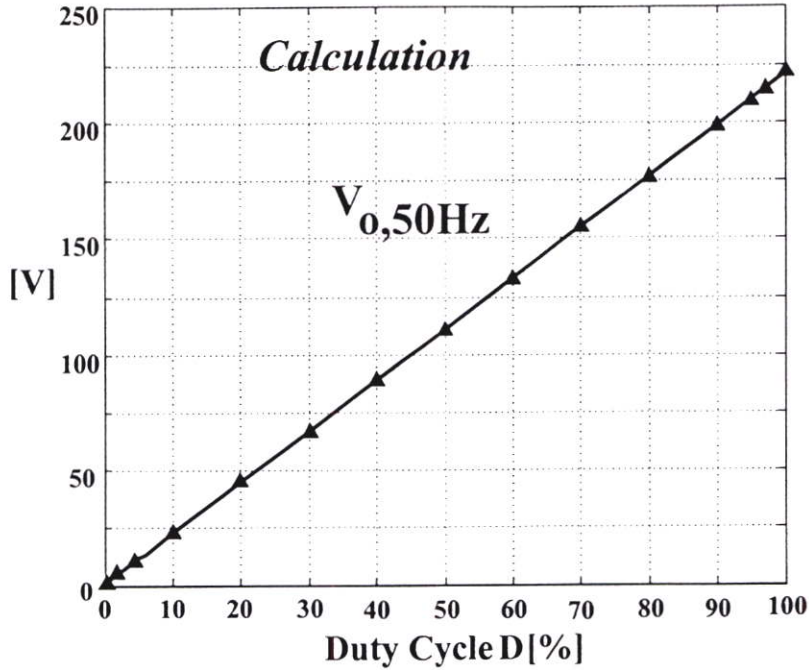
- (a) คลื่นแรงดันทางค่านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.22 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คิวดั้ไซเคิล 90%

จากสมการที่ (4.18) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปจะทำให้ได้ลักษณะของคลื่นและสามารถนำไปหาค่าของแรงดัน rms ที่ค่าคิวดั้ไซเคิลต่างๆ ได้จากนั้นจึงได้นำค่าแรงดัน rms ที่ได้ไปทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่าของคิวดั้ไซเคิลที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ได้กราฟดังในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออก($v_{o,50Hz}$) กับ ค่า duty cycle ต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 1

4.3.3 การคำนวณหาค่า LC ฟิลเตอร์ที่ใช้ในวงจร

จากผลการซิมูเลชันที่ duty cycle 0.5 จะมีองค์ประกอบความถี่ 20 kHz มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 70 V เพื่อลดทอนองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์นี้ออกไปจึงเลือกความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองให้มีค่าประมาณ 20 เท่า ของความถี่มูลฐานและต่ำกว่าความถี่การสวิตช์ 20 เท่าด้วยเช่นกัน เพื่อให้ได้อัตราการขยายเกินของวงจรกรองที่ความถี่ 20 kHz มีค่าต่ำกว่า -40 dB หรือ 0.01

$$f_r = f \times 20 \quad 4.19$$

$$= 50\text{Hz} \times 20$$

$$= 1\text{kHz}$$

เมื่อได้ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาค่า LC ฟิลเตอร์ได้จากสมการที่ 4.20

$$f_r = \frac{2}{2\pi\sqrt{LC}} \quad 4.20$$

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_r)^2}$$

4.21

$$= \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 1 \times 10^{-3})^2}$$

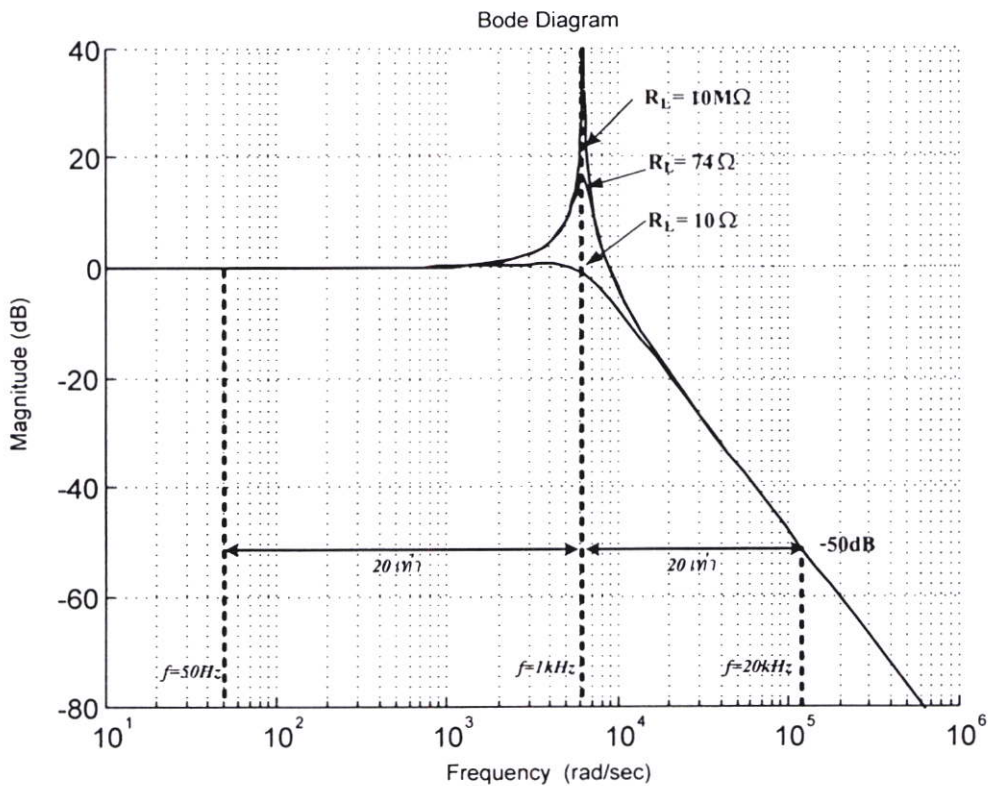
$$= 25.3 \times 10^{-9}$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 4.21 มาหาค่า L โดยการกำหนดค่า C ฟิลเตอร์

$$C = 14 \mu F$$

$$L = \frac{(25.3 \times 10^{-9})}{(14 \times 10^{-6})}$$

$$L = 1.8 \text{ mH}$$



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ฟิลเตอร์

รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ฟิลเตอร์ ที่โหลดความต้านทานค่าต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 20 kHz LC ฟิลเตอร์ มีเกนเท่ากับ -52 dB หรือ 2^{-51} ซึ่งเพียงพอในการลดทอนองค์ประกอบฮาร์โมนิกซ์ของเอชไอพีเออร์ได้ เพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อ

นำ $v_{o,chop}$ ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์แล้วจะได้แรงดันเอาต์พุต เป็นคลื่นไซน์ที่ไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ความถี่สูงปะปนอยู่ด้วย สามารถแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของแรงดันความถี่ต่ำและความถี่สูงที่สามารถผ่านวงจร LC ฟิเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้ โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงดันพิกคาเมนทอล 50Hz และแรงดันฮาร์โมนิกส์ 20kHz ซึ่งใช้ค่าจากรูปคลื่น $v_{o,chop}$ ที่ ค่าควิตี้ไซเกิดต่างที่ได้แสดงไปข้างต้นผลการเปรียบเทียบดังกล่าวได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงดันความถี่ต่ำ จะสามารถผ่านวงจรฟิเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมดในขณะที่แรงดันความถี่สูงจะผ่านวงจรฟิเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้น้อยมากซึ่งได้แสดงดังในสมการ (4.22) และ (4.23) [2]

$$\left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{O,50Hz} \approx 1 \times V_{O,50Hz} \quad \dots \omega L \ll \frac{1}{\omega C} \quad (4.22)$$

$$\left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{O,20kHz} \approx 0 \times V_{O,20kHz} \quad \dots \omega L \gg \frac{1}{\omega C} \quad (4.23)$$

ตารางที่ 4. 1 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50 Hz ไม่มีโหลด

50 Hz					20 kHz				
D	$V_{o,50Hz}$	$V_{L,50Hz}$	$V_{o,50Hz, Filter} = V_{C,50Hz}$	$[\%]V_{o,50Hz}$	$V_{o,20kHz}$	$V_{L,20kHz}$	$V_{o,20kHz, Filter} = V_{C,20kHz}$	$[\%]V_{o,20kHz}$	
10%	22	0.06	21.94	99.72%	21	20.94	0.052	0.24%	
20%	44	0.08	43.89	99.75%	41	40.89	0.102	0.24%	
30%	66	0.11	65.83	99.74%	57	56.85	0.142	0.24%	
40%	88	0.17	87.78	99.75%	66	65.83	0.165	0.25%	
50%	110	0.22	109.72	99.74%	70	69.82	0.175	0.22%	
60%	132	0.33	131.67	99.75%	66	65.83	0.165	0.25%	
70%	154	0.39	153.61	99.74%	57	56.85	0.142	0.24%	
80%	176	0.44	175.56	99.75%	41	40.89	0.102	0.24%	
90%	198	0.5	197.50	99.74%	21	20.94	0.052	0.24%	

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50Hz ที่มีโหลด เป็น R

		50 Hz				20 kHz			
		$L = 0.565 \Omega$ 				$\omega L = 226 \Omega$ 			
D	$V_{o, 50Hz}$	$V_{L, 50Hz}$	$V_{o, 50Hz Filter} = V_{C, 50Hz}$	$[\%] V_{o, 50Hz}$	$V_{o, 20 kHz}$	$V_{L, 20 kHz}$	$V_{o, 20 kHz Filter} = V_{C, 20 kHz}$	$[\%] V_{o, 20 kHz}$	
10%	22	0.06	21.94	99.72%	21	20.947	0.052	0.24%	
20%	44	0.12	43.88	99.72%	41	40.897	0.102	0.24%	
30%	66	0.17	65.83	99.74%	57	56.857	0.142	0.24%	
40%	88	0.23	87.77	99.73%	66	65.834	0.165	0.25%	
50%	110	0.28	109.72	99.74%	70	69.820	0.175	0.25%	
60%	132	0.34	131.66	99.74%	66	65.834	0.165	0.25%	
70%	154	0.39	153.61	99.74%	57	56.857	0.142	0.24%	
80%	176	0.45	175.55	99.74%	41	40.897	0.102	0.24%	
90%	198	0.50	197.50	99.74%	21	20.947	0.052	0.24%	

ผลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 4.2 ได้แสดงเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีที่ค่าตัวชี้ไซเคิล เท่ากับ 50% ที่ความถี่ต่ำเท่ากับ 50 Hz และที่ความถี่สูงเท่ากับ 20 kHz ในภาคผนวกที่ ก-2

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50 Hz ที่มีโหลดเป็น R-L ขนาน

50 Hz					20 kHz			
D	$V_{o,50Hz}$	$V_{L,50Hz}$	$V_{o,50Hz, Filter} = V_{C,50Hz}$	[%] $V_{o,50Hz}$	$V_{o,20kHz}$	$V_{L,20kHz}$	$V_{o,20kHz, Filter} = V_{C,20kHz}$	[%] $V_{o,20kHz}$
10%	22	0.22	21.77	98.95%	21	20.94	0.052	0.24%
20%	44	0.45	43.55	98.97%	41	40.89	0.102	0.24%
30%	66	0.68	65.32	98.96%	57	56.85	0.142	0.24%
40%	88	0.91	87.10	98.97%	66	65.83	0.165	0.25%
50%	110	1.14	108.87	98.97%	70	69.82	0.175	0.25%
60%	132	1.37	130.65	98.97%	66	65.83	0.165	0.25%
70%	154	1.60	152.42	86.79%	57	56.85	0.142	0.24%
80%	176	1.83	174.20	98.97%	41	40.89	0.102	0.24%
90%	198	2.05	195.97	98.97%	21	20.97	0.052	0.24%

ผลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 4.3 ได้แสดงเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีที่ค่าคิวทีไซเคิลเท่ากับ 50% ที่ความถี่ต่ำเท่ากับ 50 Hz และที่ความถี่สูงเท่ากับ 20 kHz ในภาคผนวกที่ ค-3

โดยจะสรุปแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์ที่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกแล้วจะเท่ากับแรงดันอินพุตคูณกับค่าคิวทีไซเคิลดังในสมการที่ (4.21)

$$V_{o,50Hz} = DV_S \quad (4.21)$$

เมื่อ $v_{o,chop}$ ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์จะได้องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ดังรูปที่ 4.24

ค่า rms ของแรงดันเอาต์พุต $v_{o,chop}$ หาได้จากสมการที่ (4.22)

$$V_{o,chop} = \sqrt{V_{0,50Hz}^2 + V_{H1}^2 + V_{H2}^2 + V_{H3}^2 + \dots} \quad (4.22)$$

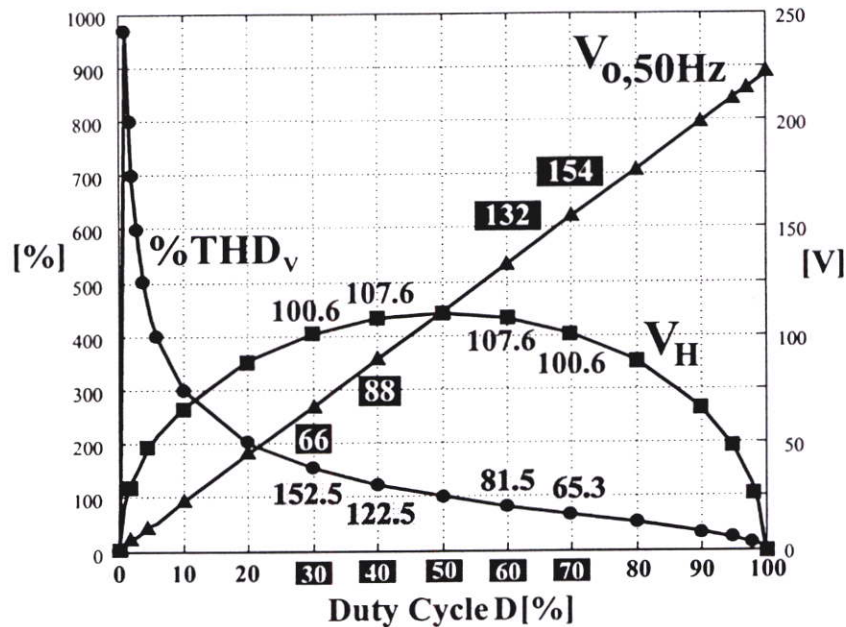
โดยที่ V_{Hk} คือค่า rms ของฮาร์โมนิกส์และสามารถหาค่า rms ของฮาร์โมนิกส์ได้จากสมการ (4.23)

$$V_H = \sqrt{V_{H1}^2 + V_{H2}^2 + V_{H3}^2 + \dots} \quad (4.23)$$

และสามารถคำนวณหาค่า %THD ของคลื่นแรงดันเอาต์พุตได้จากสมการ (4.24)

$$\% THD_V = \frac{V_H}{V_{0,50Hz}} \times 100 \quad (4.24)$$

เมื่อนำสเปคตรัมในรูปที่ 4.23 มาพิจารณารวมกับสมการ (4.21),(4.23)และ(4.24)สามารถนำมาเขียนเส้นกราฟเทียบกับค่าดีวี่ไซเคิลจาก 0-100% สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD ของ $V_{o,chop}$ แรงดันไฟฟ้า เอาต์พุต $V_{o,50Hz}$ กับค่าเปอร์เซ็นต์ดีวี่ไซเคิล (D) ต่างๆ

4.4 สรุป

จากสมการคลื่นแรงดันตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูงที่รับแรงดันแหล่งจ่ายเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 v 50Hz ที่ได้จากการวิเคราะห์ เมื่อนำมาเขียนลักษณะคลื่นโดยใช้โปรแกรม Matlab และเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการคลื่นแรงดันตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูงจึงนำคลื่นแรงดันตามจุดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมาทำการ

เปรียบเทียบกับคลื่นที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะเห็นว่า ลักษณะคลื่นที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก และได้แสดงการทำงานของวงจร LC ฟิลเตอร์ที่ค่าควิตี้ ไซเคิลและที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ ทำให้เห็นการทำงานได้อย่างชัดเจน

บทที่ 5

ผลการทดลองและผลการซิมูเลต

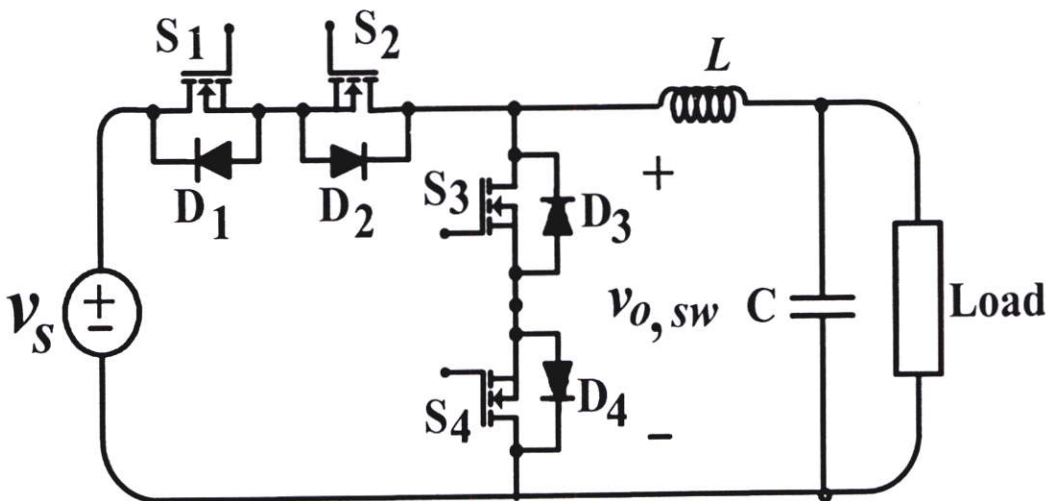
5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นผลที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับผลการซิมูเลตจากโปรแกรม Pspice เพื่อนำผลที่ได้มายืนยัน ความถูกต้องของงานวิจัย โดยขั้นตอนในการทดลองและซิมูเลตในแต่ละกรณีจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

5.2 การเปรียบเทียบผลการซิมูเลตทางทฤษฎี และผลการทดลองคลื่นแรงดันและกระแสพร้อมแถบสเปกตรัมตามจุดต่าง ๆ ในวงจรเอชไอพีเออร์สวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHz กรณีป้อนแรงดันให้ทางด้านอินพุตเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 V(rms) 50 Hz

5.2.1 ขั้นตอนในการทำการทดลอง

ในการทดลองจะใช้วงจรทดลองดังในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีพิกัดของอุปกรณ์ต่างดังตารางที่ 5.1 ซึ่งขั้นตอนในการทดลองจะเป็นดังนี้



รูปที่ 5.1 วงจรเอชไอพีเออร์สวิตช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ป้อนแรงดันเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 v(rms) 50 Hz ให้ทางด้านอินพุตของวงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

ตารางที่ 5.1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่าง ๆ ของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์ที่ความถี่สูง 20 kHz ป้อนแรงดันเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 V(rms) 50 Hz ให้ทางด้านอินพุตของวงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

รายการอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์
อุปกรณ์สวิทช์ของวงจรเอชไอซี	IRFP460 600V 15 A
ตัวเหนี่ยวนำ L_f	1.2 mH
ตัวเก็บประจุ C_f	13.6 μF
โหลด	โหลดไฟฟ้าขนาด 100W 5โหลด

1. ปรับแรงดันที่วาริแอคเพื่อหาตำแหน่งที่สามารถอ่านค่าแรงดัน 220 V (rms) ขณะที่ยังไม่ได้ทำการต่อกับอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์ที่ความถี่สูง 20kHz แล้วทำเครื่องหมายตรงตำแหน่งดังกล่าว

2. ทำการต่อวาริแอคเข้ากับอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์โดยที่ยังไม่ได้ทำการปรับค่าแรงดันที่วาริแอคต่อจากนั้นทำการวัดสัญญาณที่มาจับอุปกรณ์สวิทช์ว่าถูกต้องหรือไม่และทำการปรับค่าความถี่สวิทช์ของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์ประมาณ 20 kHz ที่ค่าควิตี้ไซเคิลตามต้องการ

3. ทำการปรับค่าแรงดันที่วาริแอคไปที่ตำแหน่งดังในข้อที่ 1 วัดคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์ที่ความถี่สูง พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม Bitmap และค่าข้อมูลของรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม ASCII

4. ทำการปรับค่าควิตี้ไซเคิลของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์ที่ค่าประมาณ 90% , 80%,70% ,...10% แล้วทำเช่นเดียวกับข้อที่ (3)

5.2.2 ขั้นตอนการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice

1. ใช้ค่าไฟสลับที่ใช้ในการทดลองที่เป็นค่า rms ซึ่งคูณด้วย $\sqrt{2}$ เพื่อให้ได้ค่าพิก
2. ใช้ค่าความถี่สวิทช์ของวงจรเอชไอซีของเปลือยสวิทช์ที่ทำการทดลอง คือ 20 kHz
3. ใช้ค่าความต้านทานค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการทดลอง
4. ทำการซิมูเลต
5. ใช้ค่าควิตี้ไซเคิลที่ทำการทดลอง คือ ค่าประมาณ 90% ,80%,70% ,...10%

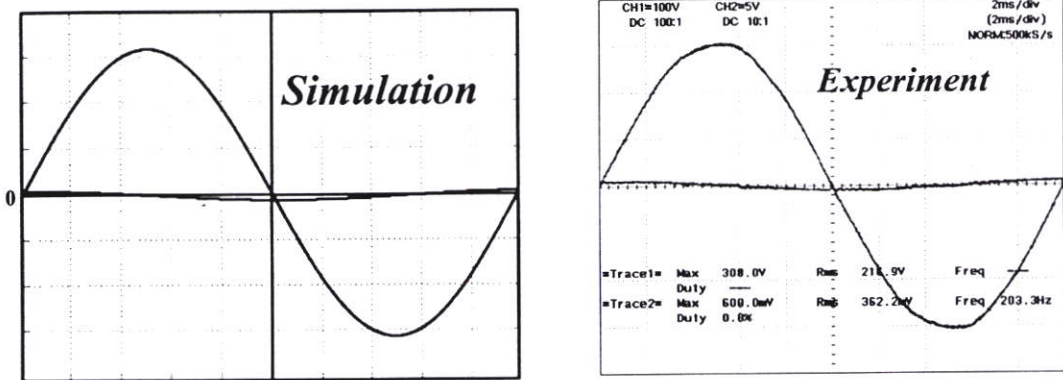
5.2.3 ผลการทดลองและผลจากการซิมูเลต

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงลักษณะของคลื่นแรงดันและกระแสพร้อมแถบสเปกตรัมตามจุดต่าง ๆ ที่ค่าควิตี้ไซเคิลประมาณ 90% ,80%,70% ,...10% และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อความถี่ที่เท่ากับ 20 kHz ที่ค่าควิตี้ไซเคิลตามลำดับดังนี้

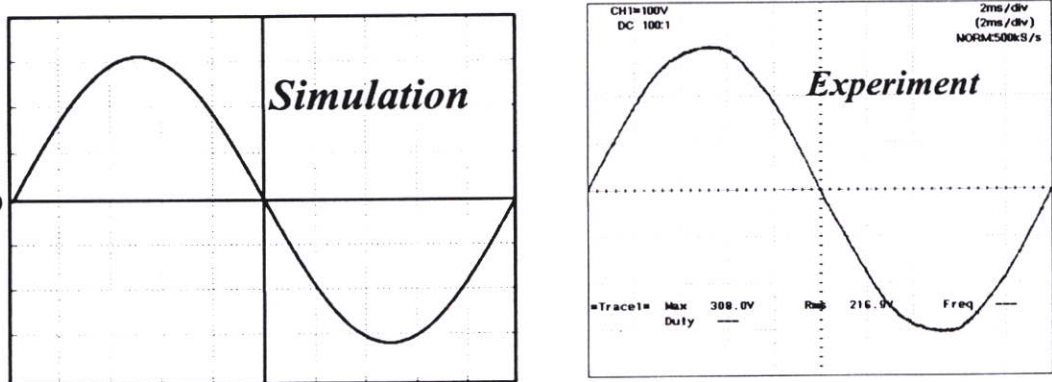
5.2.3.1 ในกรณีที่ค่าควิตซ์ไชเกิด 10 % ความถี่สวิทซ์ 20 kHz

5.2.3.1.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอโอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตซ์ไชเกิดเท่ากับ 10 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอโอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.2

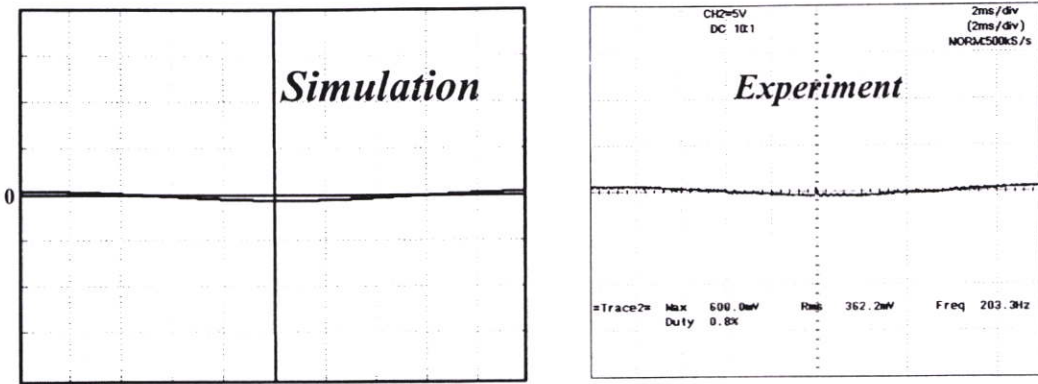


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอโอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

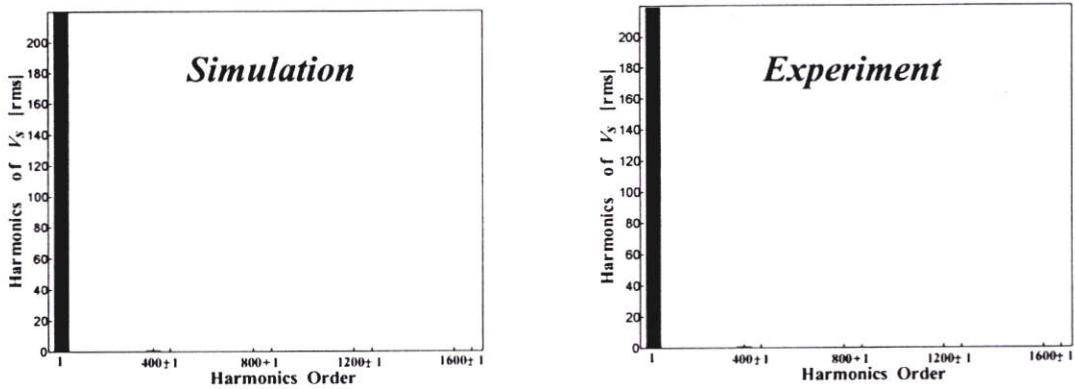


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอโอปเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

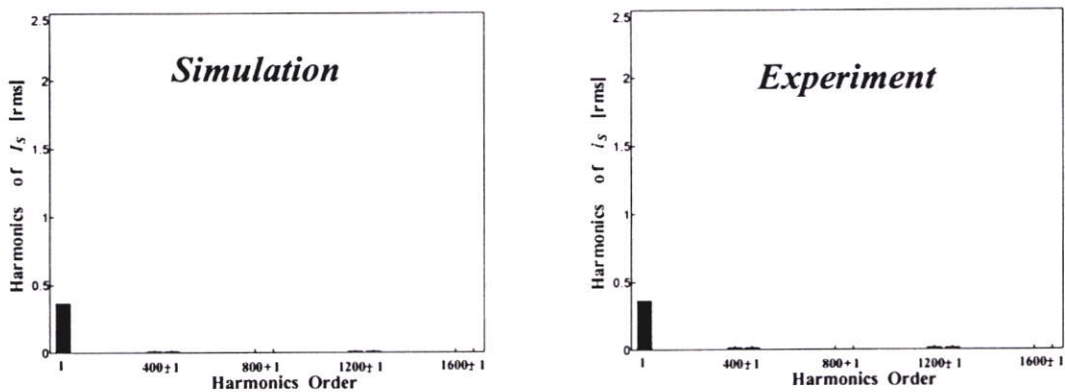
รูปที่ 5.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอโอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตซ์ไชเกิดเท่ากับ 10 % มีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz



- (ค) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



- (ด) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

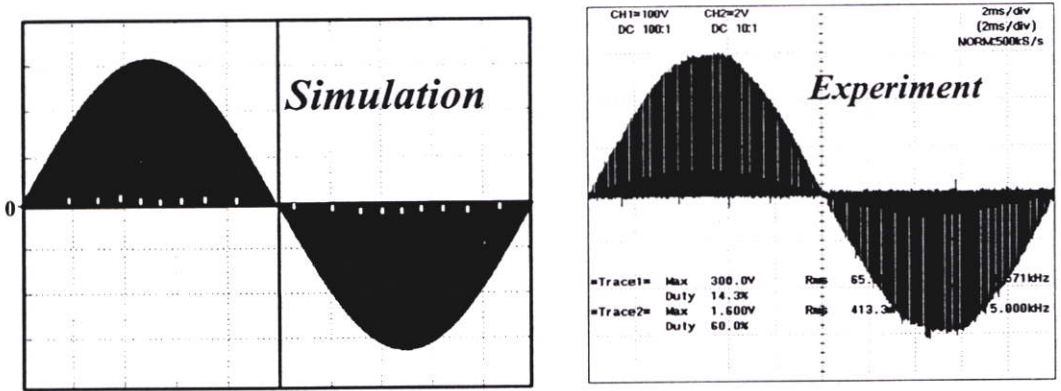


- (e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

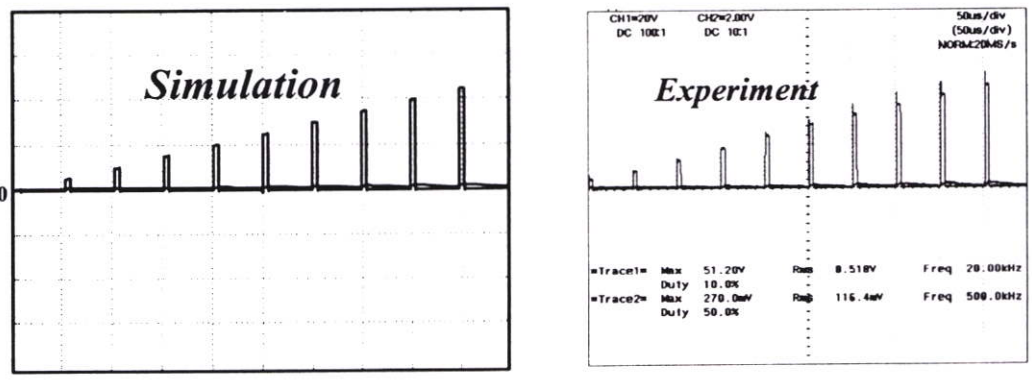
รูปที่ 5.2 ต่อ

5.2.3.1.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 10 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.3

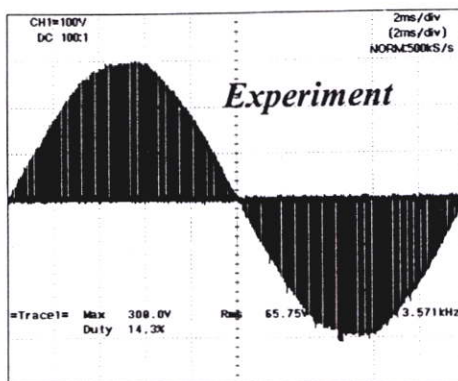
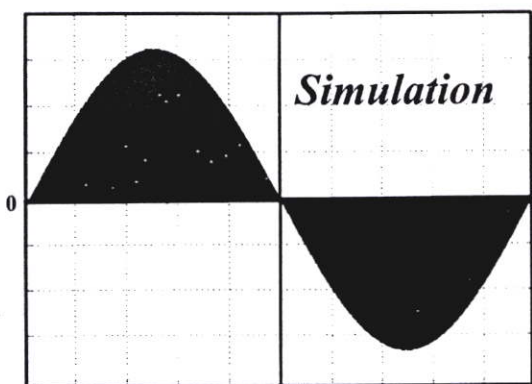


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

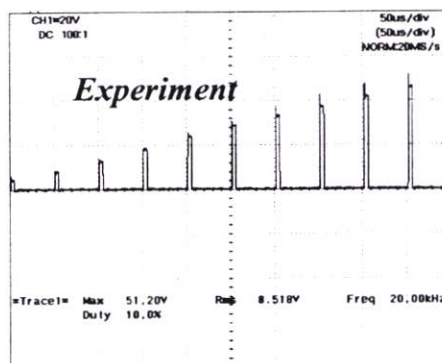
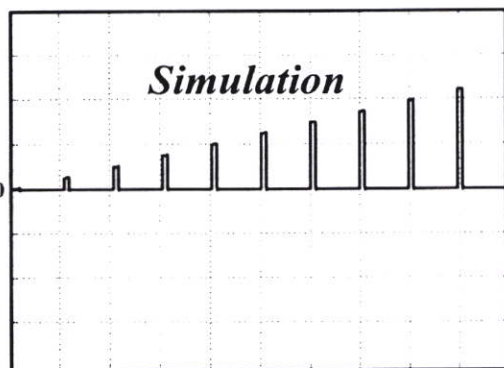


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

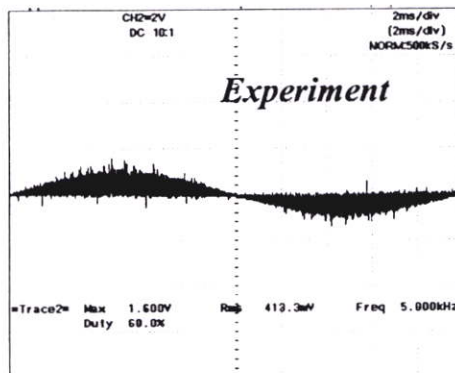
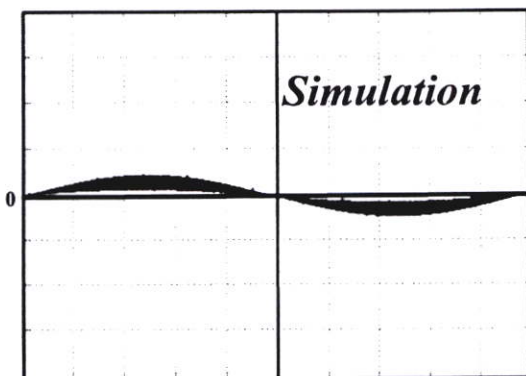
รูปที่ 5.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 10 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

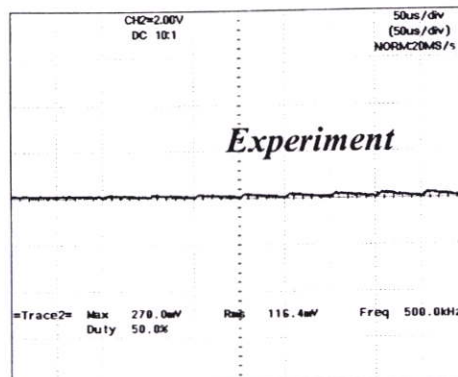
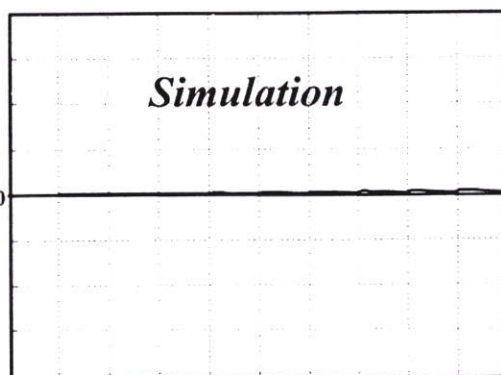


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

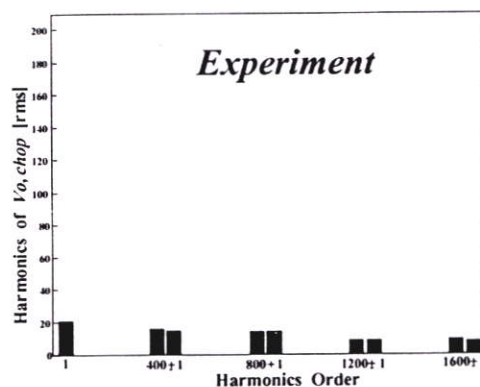
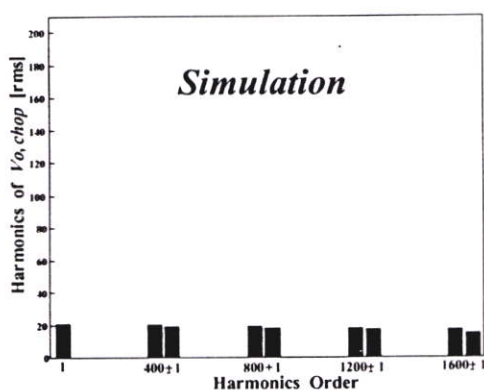


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

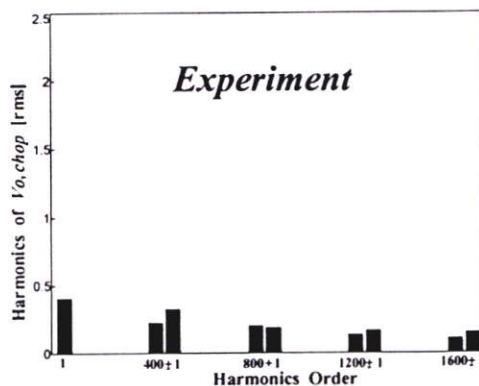
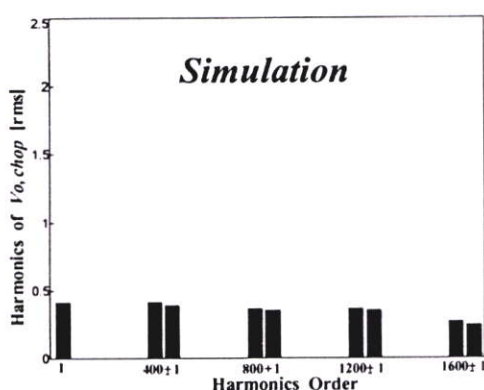
รูปที่ 5.3 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางค่านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o.chop}$ ($y=2A/div$, $x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o.chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

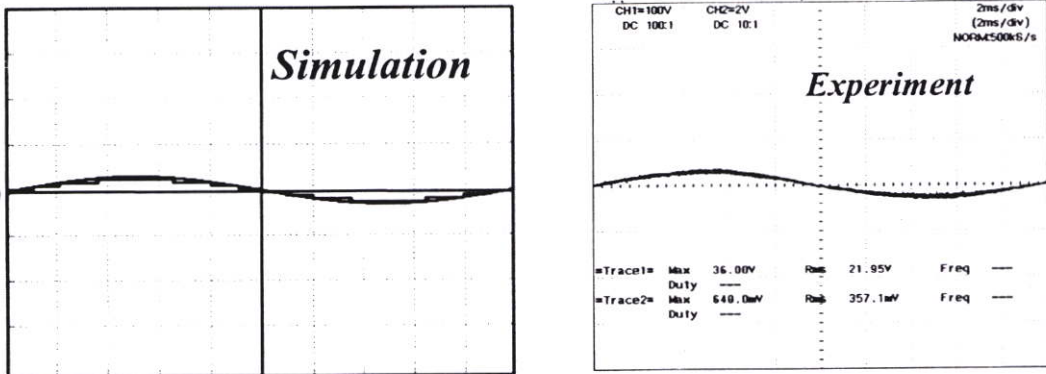


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $i_{o.chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

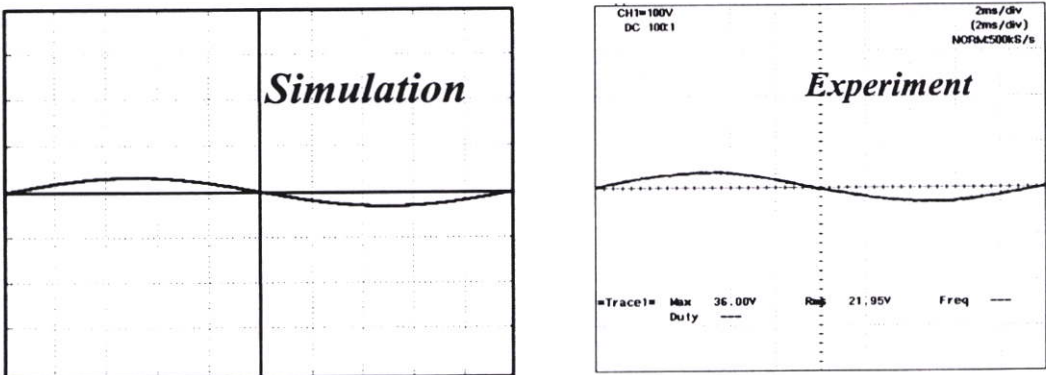
รูปที่ 5.3 ต่อ

5.2.3.1.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปคตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีของเปอร์สวิตซ์ที่ค่าคิวดีไซ์เกิดเท่ากับ 10 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีของเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมมูลेटด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.4

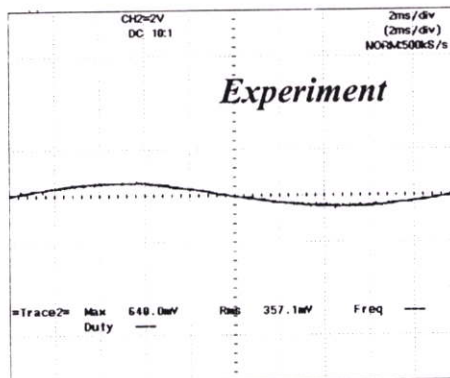
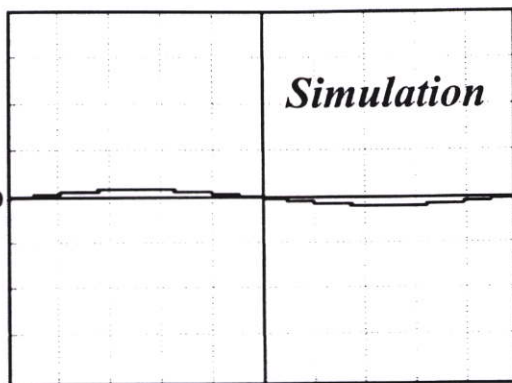


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชไอซีของเปอร์ $i_{0.50\text{Hz}}$ ($y=2\text{A/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการซิมมูลेटและการทดลอง

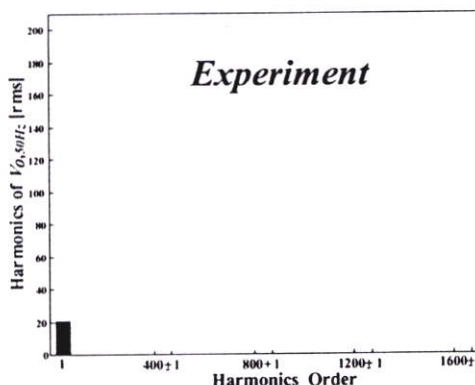
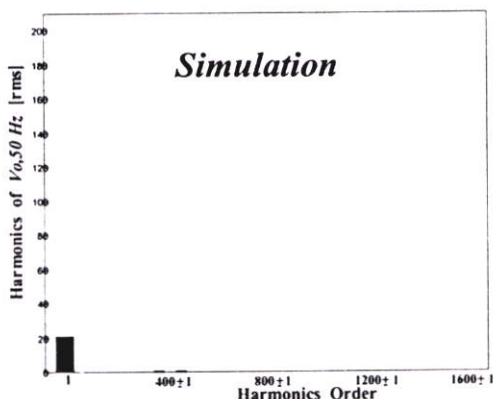


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการซิมมูลेटและการทดลอง

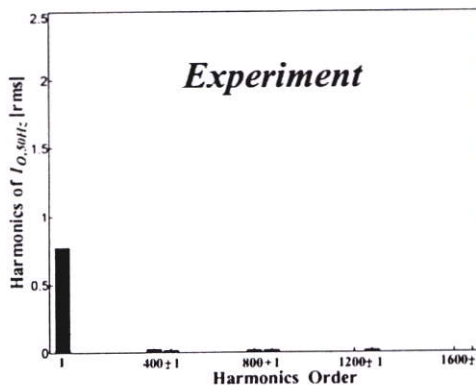
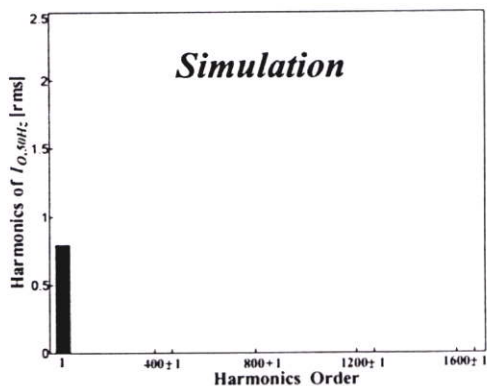
รูปที่ 5.4 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปคตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอซีของเปอร์สวิตซ์ที่ค่าคิวดีไซ์เกิดเท่ากับ 10 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) กรัณการระแสดทางด้านเอาต์พุตเมือผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ไ้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



(d) กรัณการระแสดระดัมแรงดันเอาต์พุตของวงจระเซซซอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ไ้จากการซิมมูลเตและการทดลอง



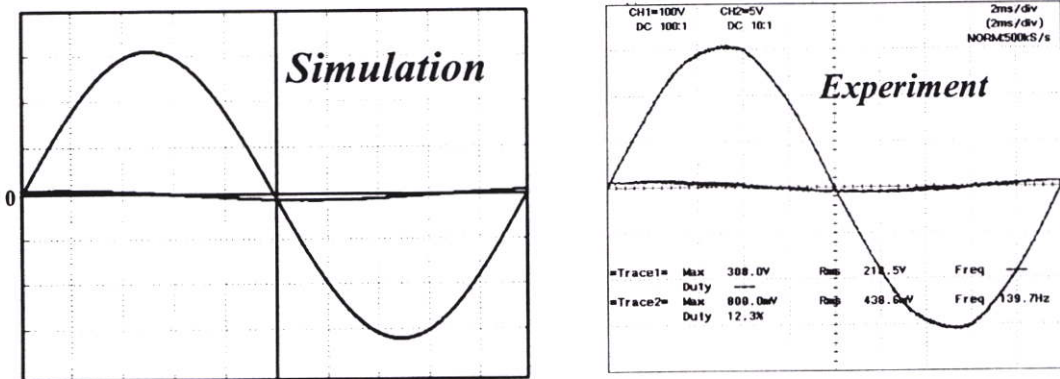
(e) กรัณการระแสดระดัมของแรงดันเอาต์พุตของวงจระเซซซอปเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ที่ไ้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

รูปที่ 5.4 ต่อ

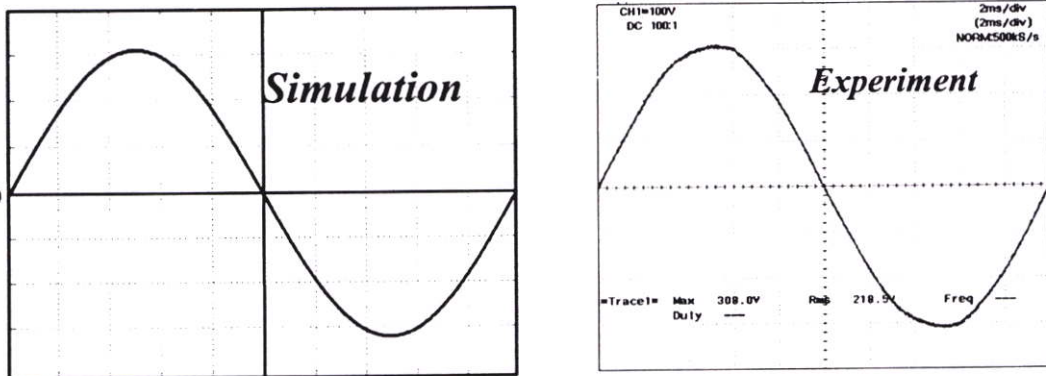
5.2.3.2 ในกรณีที่ค่าควิตซ์ไชเกิด 20 % ความถี่สวิช 20 kHz

5.2.3.2.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีของเปอร์สวิตซ์ที่ค่าควิตซ์ไชเกิดเท่ากับ 20 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิชเท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีของเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.5

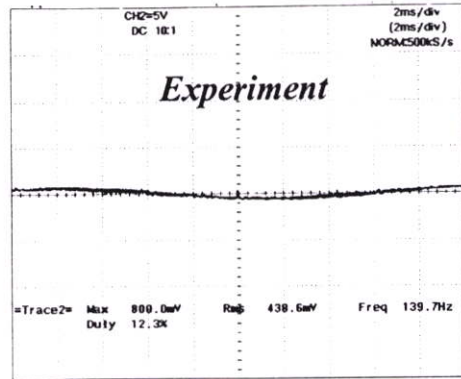
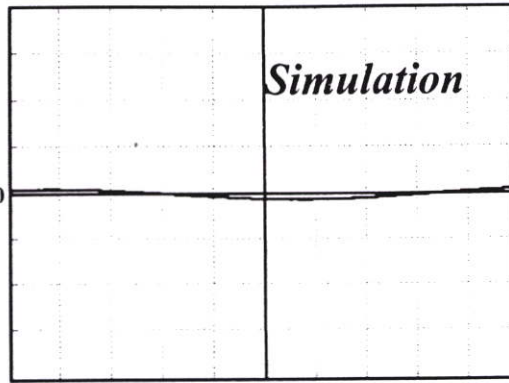


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

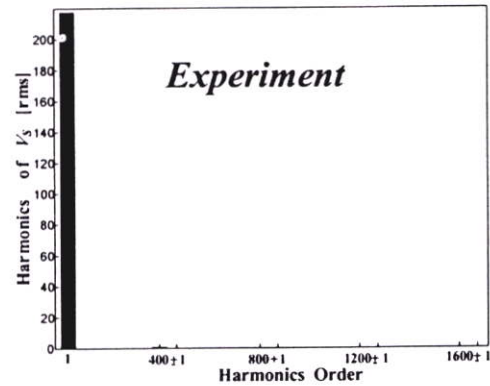
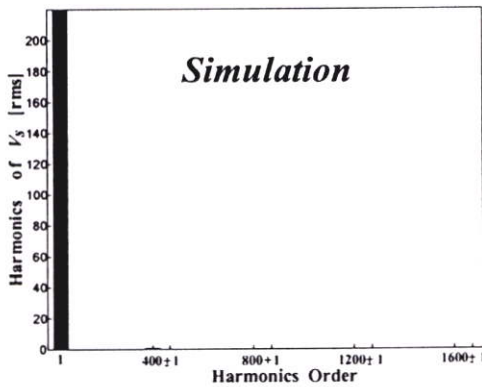


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

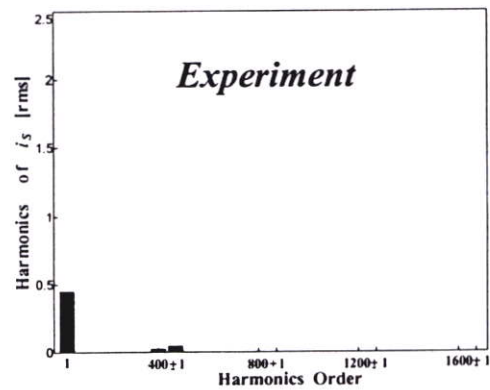
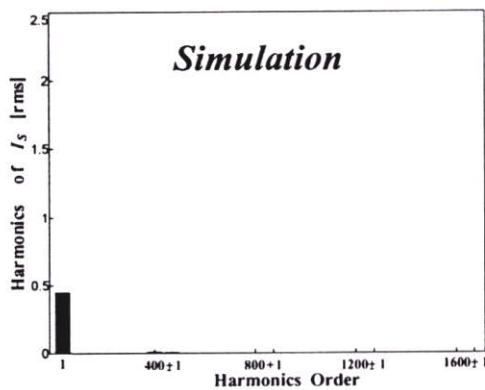
รูปที่ 5.5 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีของเปอร์สวิตซ์ที่ค่าควิตซ์ไชเกิดเท่ากับ 20 % มีความถี่ในการสวิชเท่ากับ 20 kHz



- (c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



- (d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

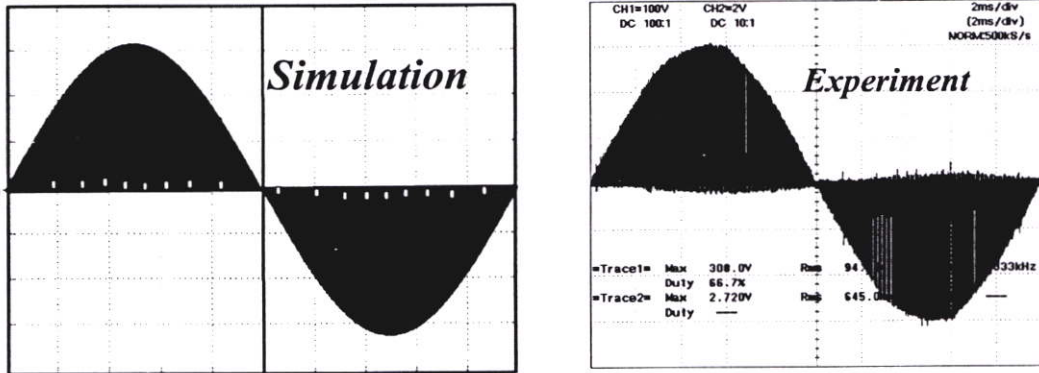


- (e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

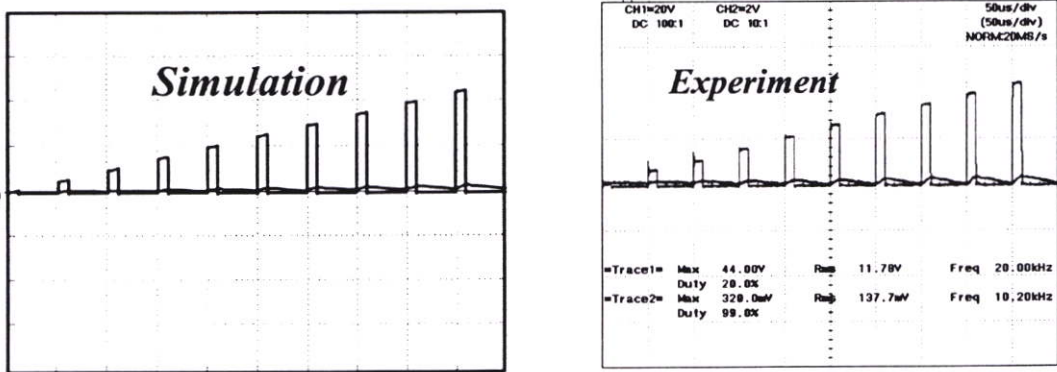
รูปที่ 5.5 ต่อ

5.2.3.2.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าคิวดีไซเคิลเท่ากับ 20 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชีชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.6

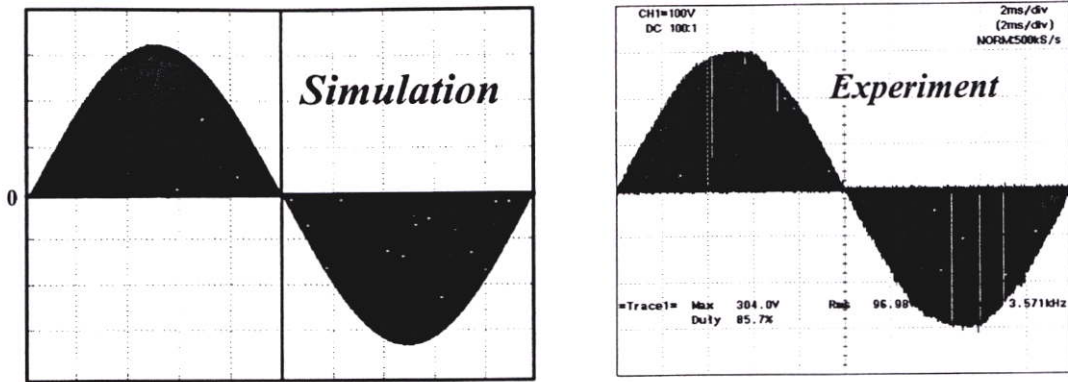


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

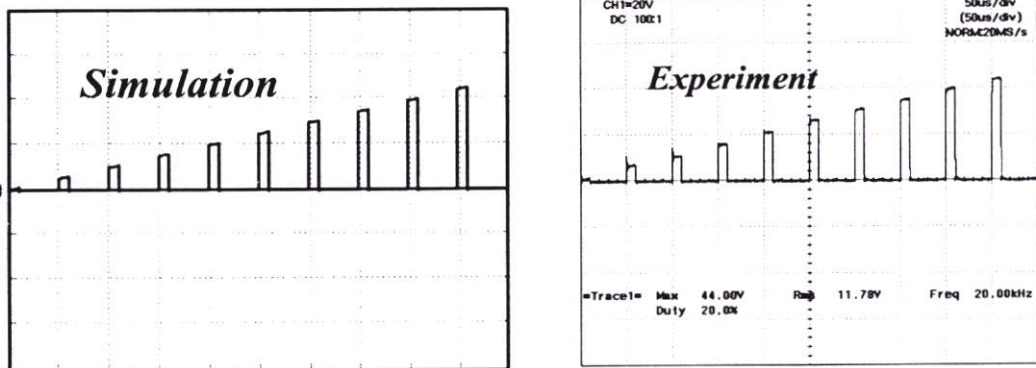


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ i_o ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

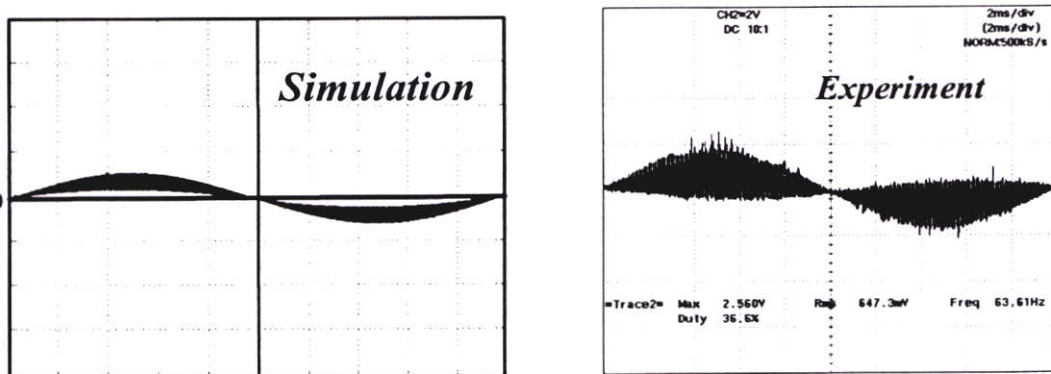
รูปที่ 5.6 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชชีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าคิวดีไซเคิลเท่ากับ 20 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

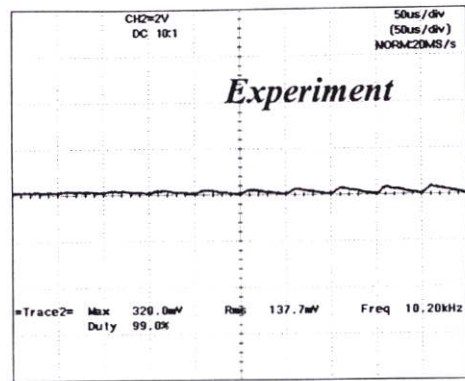
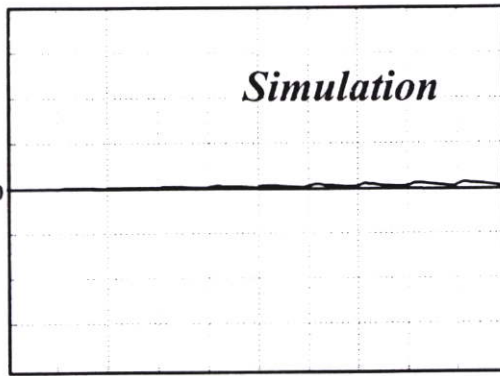


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

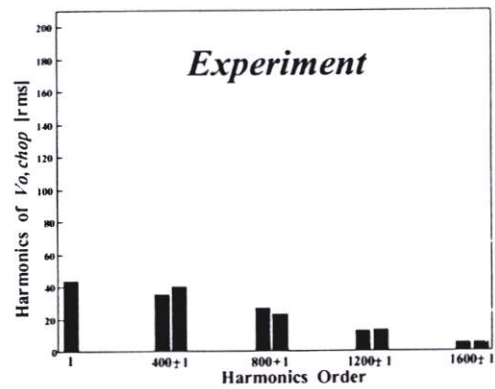
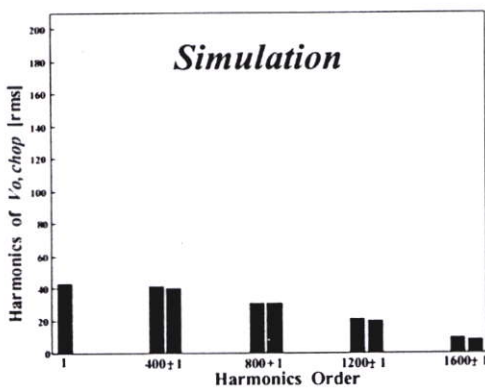


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชซีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

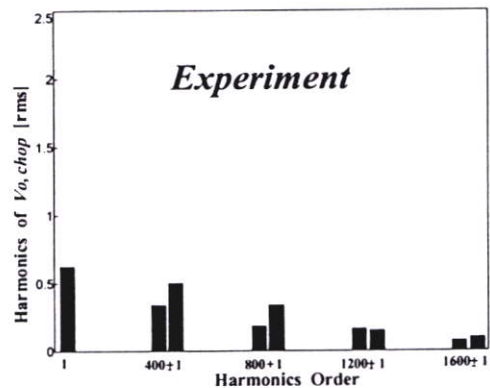
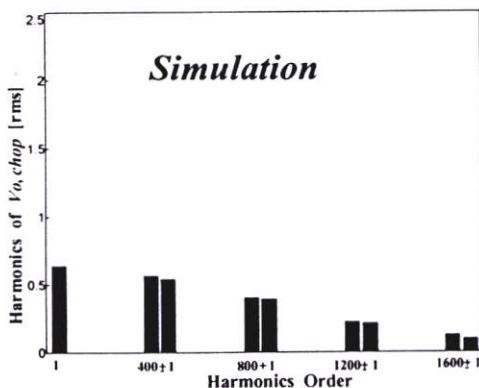
รูปที่ 5.6 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางด้ายเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div$, $x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

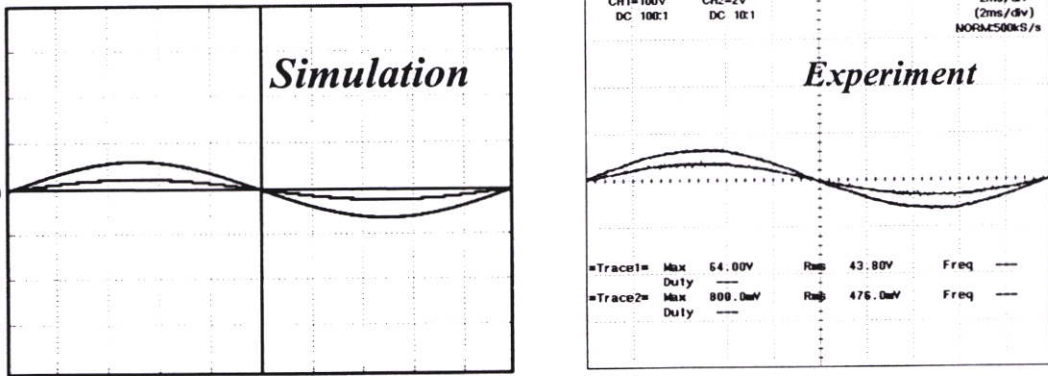


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $i_{o,chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

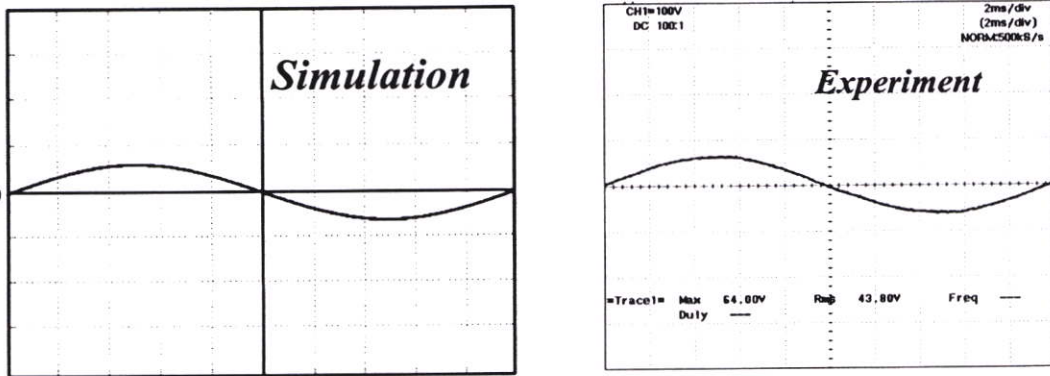
รูปที่ 5.6 ต่อ

5.2.3.2.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50Hz}$ และกระแส $i_{0.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีโอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 20 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีโอปเปอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.7

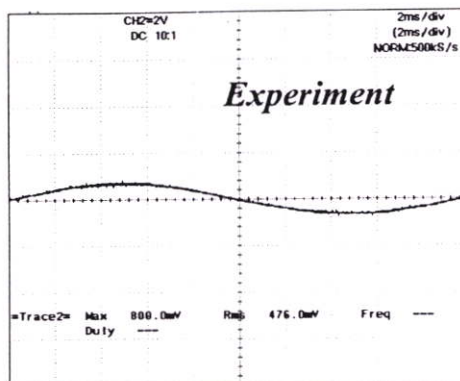
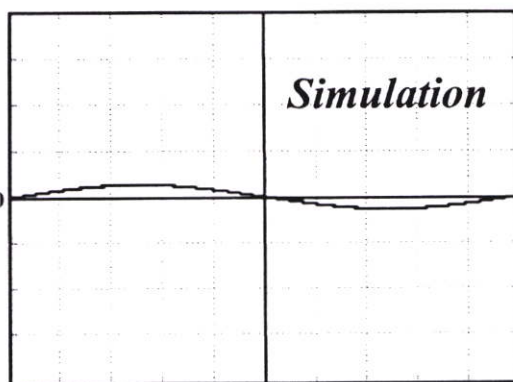


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชไอซีโอปเปอร์ $i_{0.50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

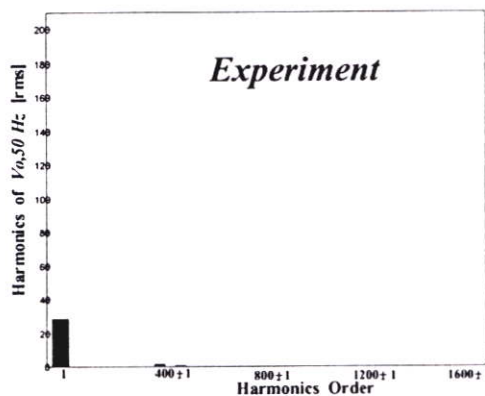
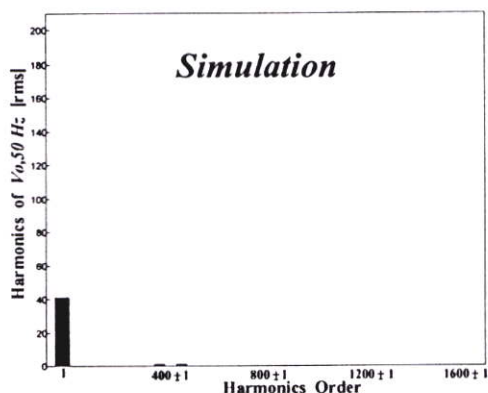


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

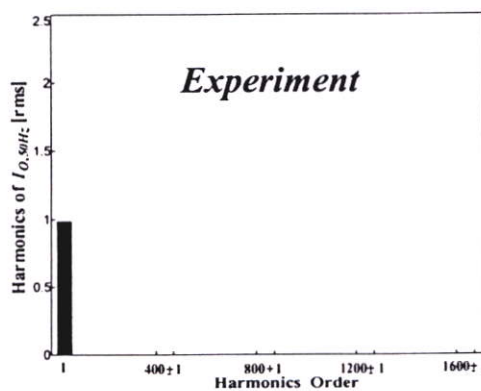
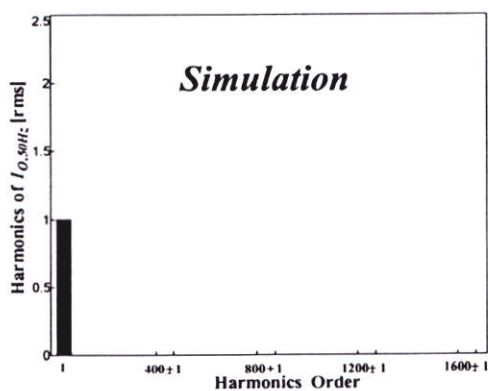
รูปที่ 5.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50Hz}$ และกระแส $i_{0.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอซีโอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 20 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,sw}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชไอเอชพีเออร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



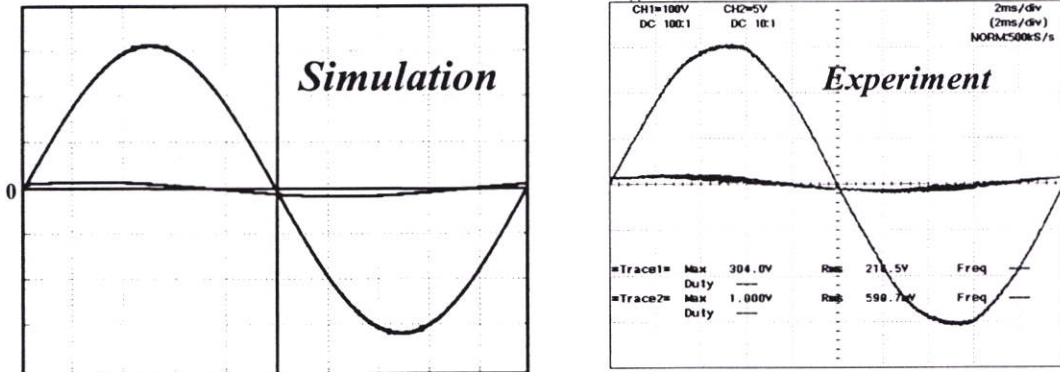
(e) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชไอเอชพีเออร์: $i_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.7 ต่อ

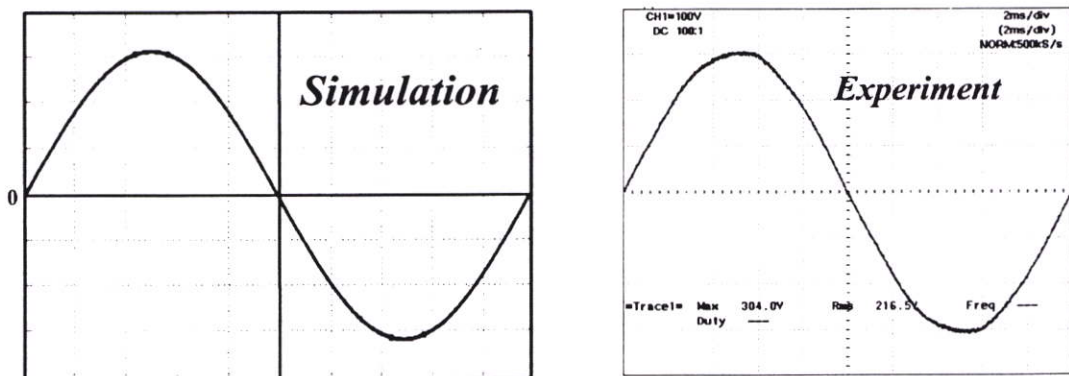
5.2.3.3 ในกรณีที่ค่าควิตีไซเคิล 30 % ความถี่สวิทซ์ 20 kHz

5.2.3.3.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 30 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชอปเปอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.8

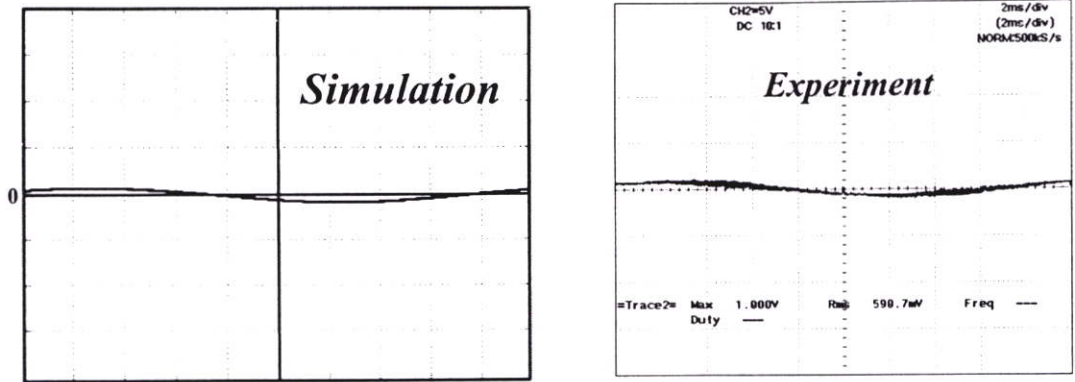


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

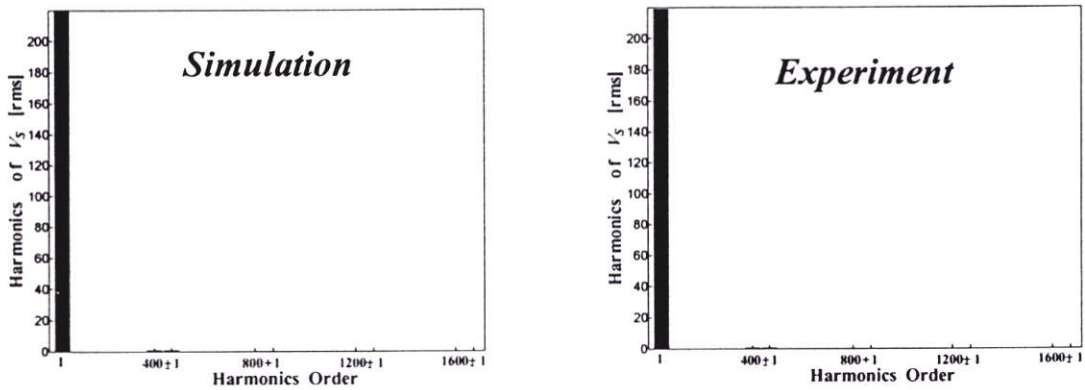


b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

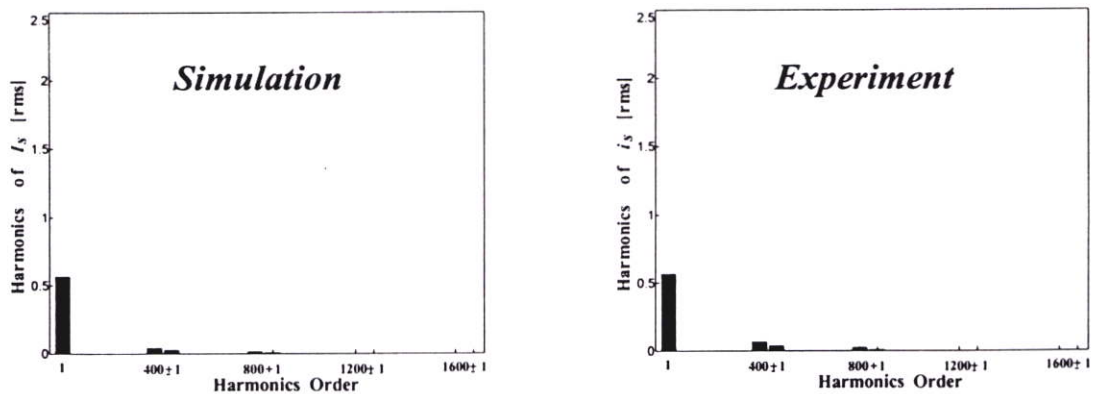
รูปที่ 5.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตีไซเคิลเท่ากับ 30 % มีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์: v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

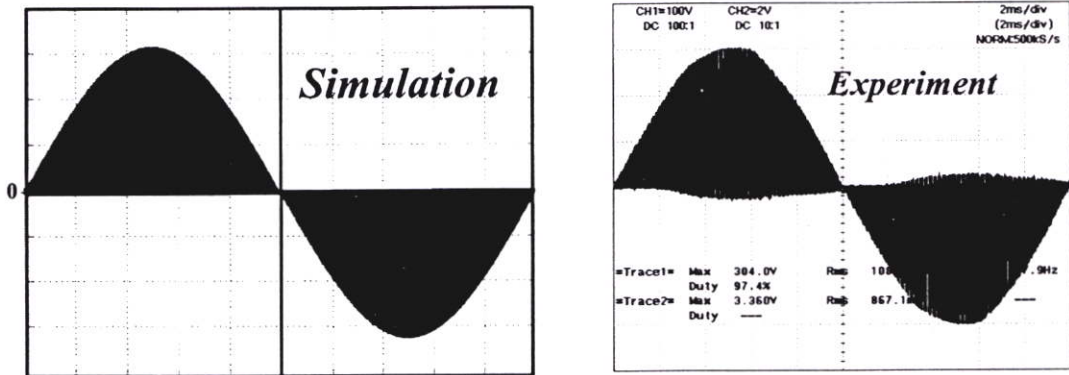


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์: i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

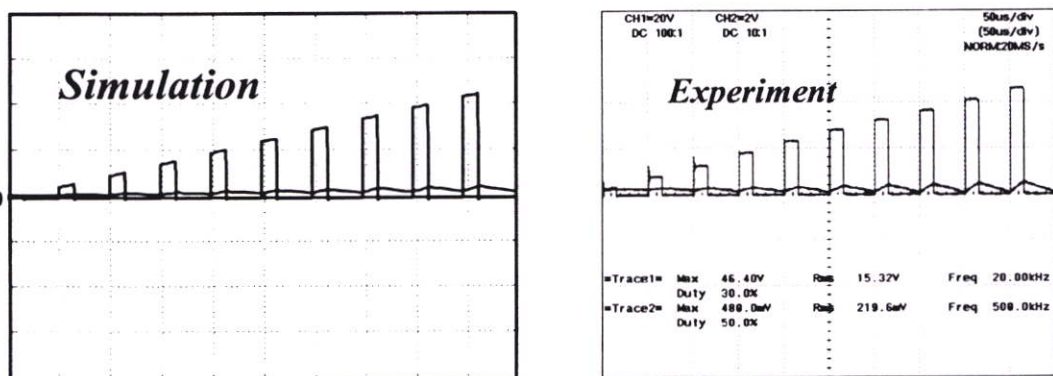
รูปที่ 5.8 ต่อ

5.2.3.3.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ และกระแส $i_{o.chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าดีวีไซเคิลเท่ากับ 30 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.9

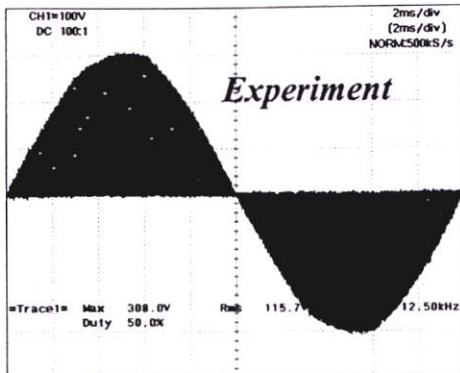
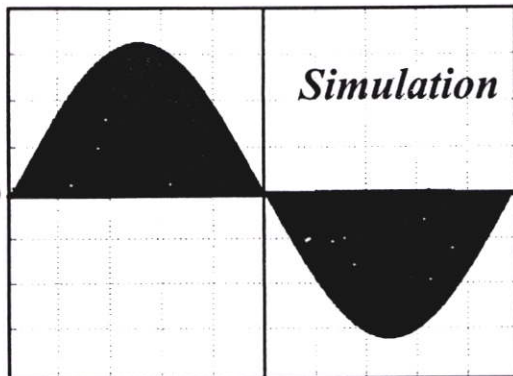


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o.chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o.chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

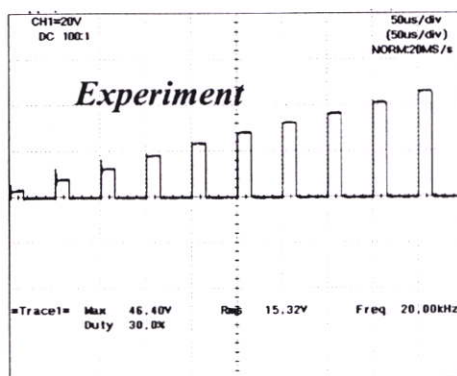
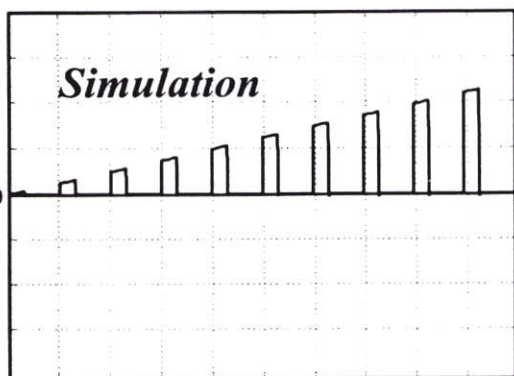


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o.chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o.chop}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

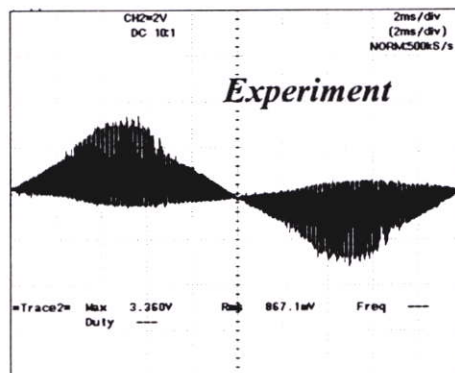
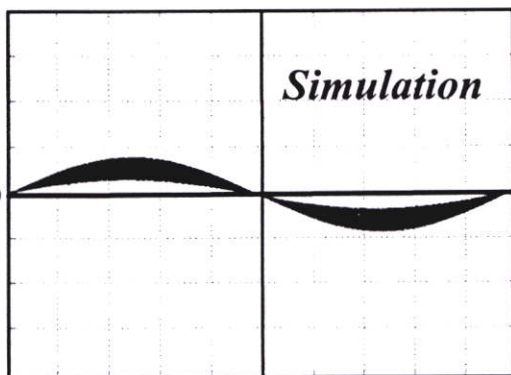
รูปที่ 5.9 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o.chop}$ และกระแส $i_{o.chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าดีวีไซเคิลเท่ากับ 30 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

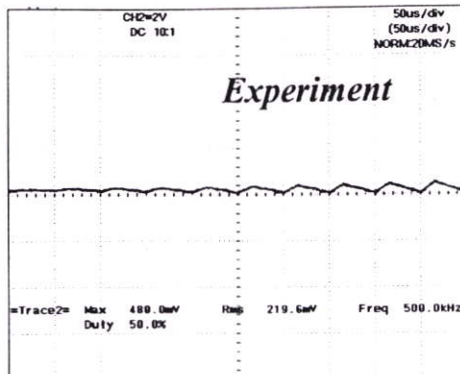
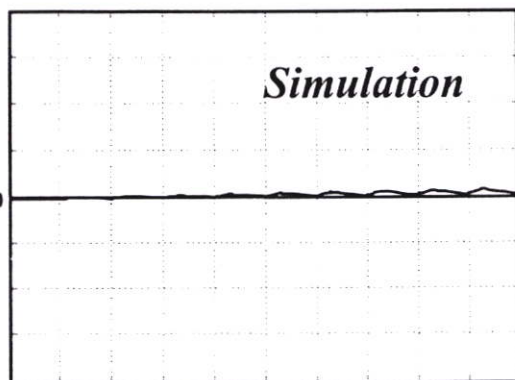


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

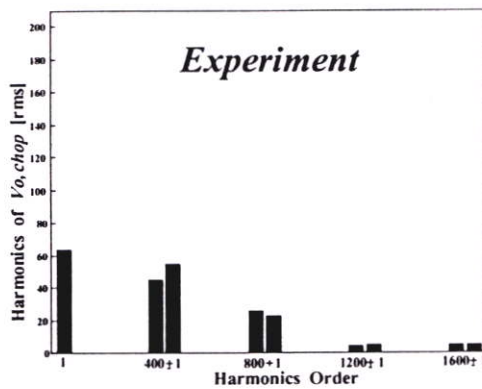
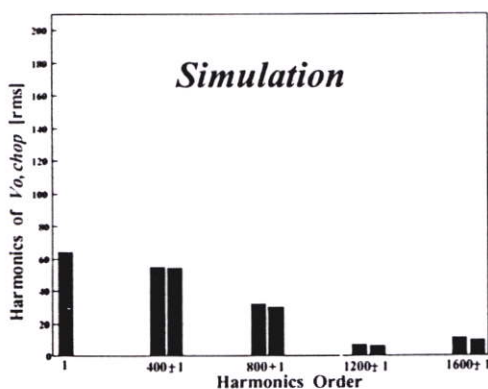


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

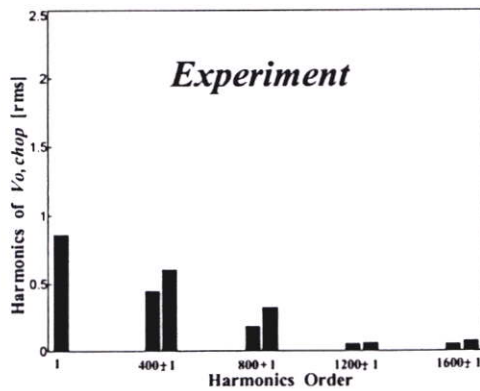
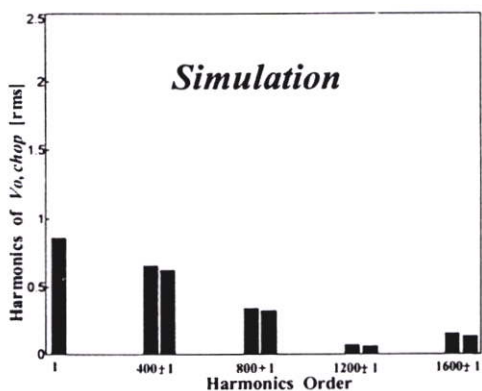
รูปที่ 5.9 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางคานเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div$, $x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

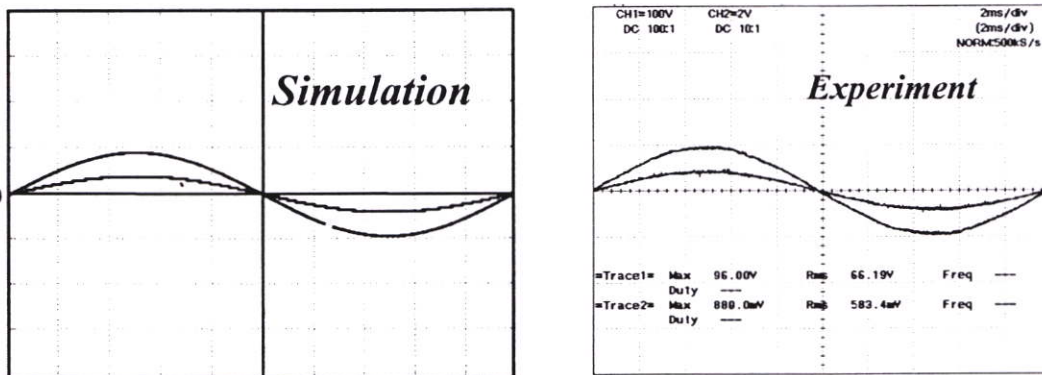


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

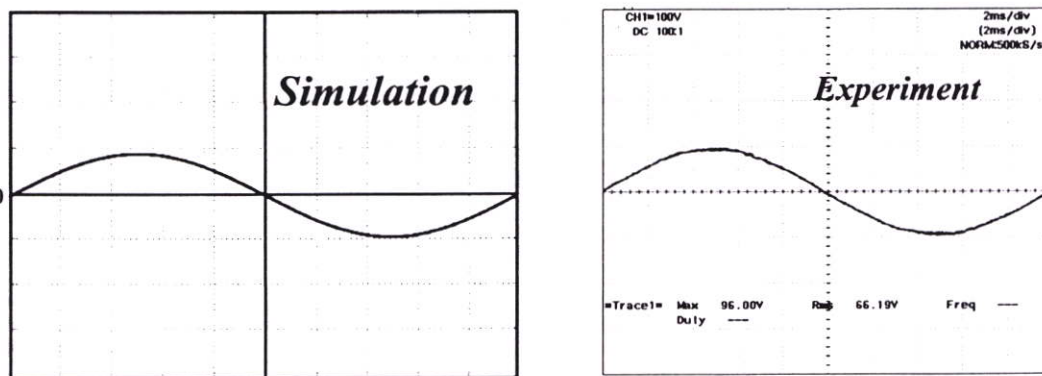
รูปที่ 5.9 ต่อ

5.2.3.3.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ และกระแส $i_{o,50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปคตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีโอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 30 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีโอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.10

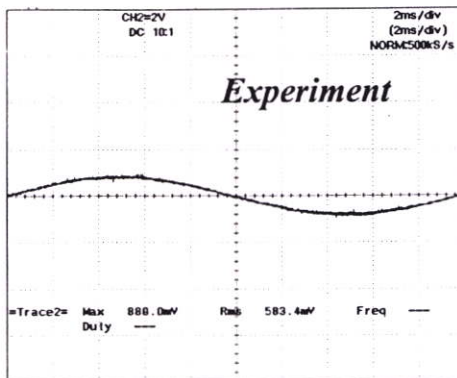
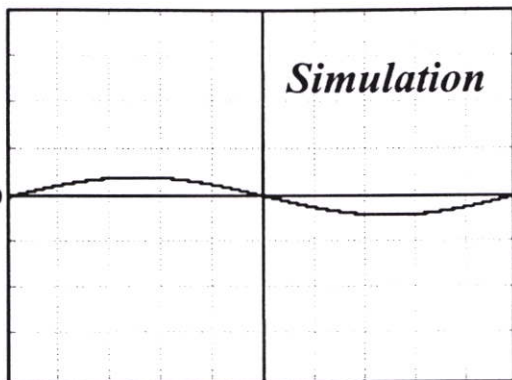


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชไอซีโอปเปอร์ $i_{o,50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

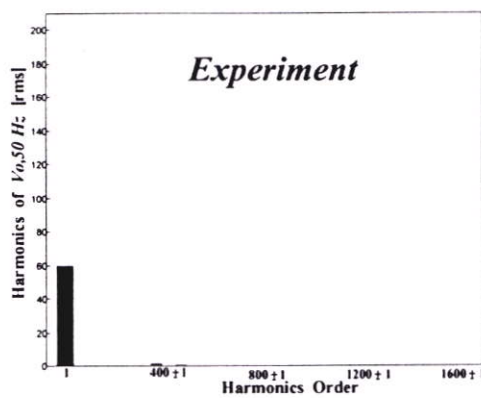
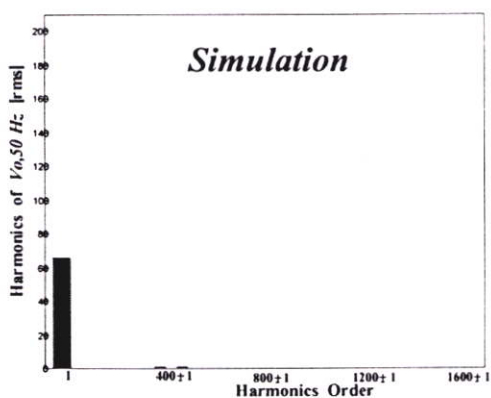


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

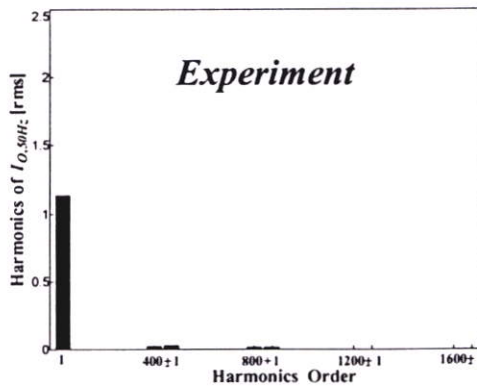
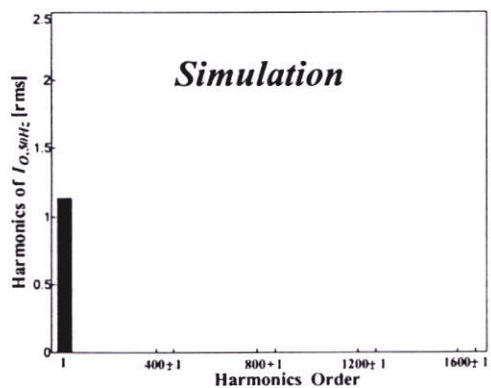
รูปที่ 5.10 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ และกระแส $i_{o,50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปคตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอซีโอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 30 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



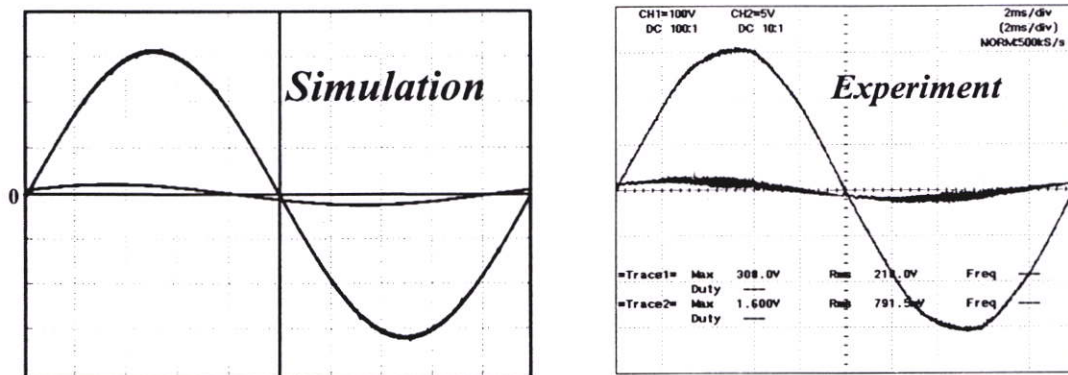
(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.10 ต่อ

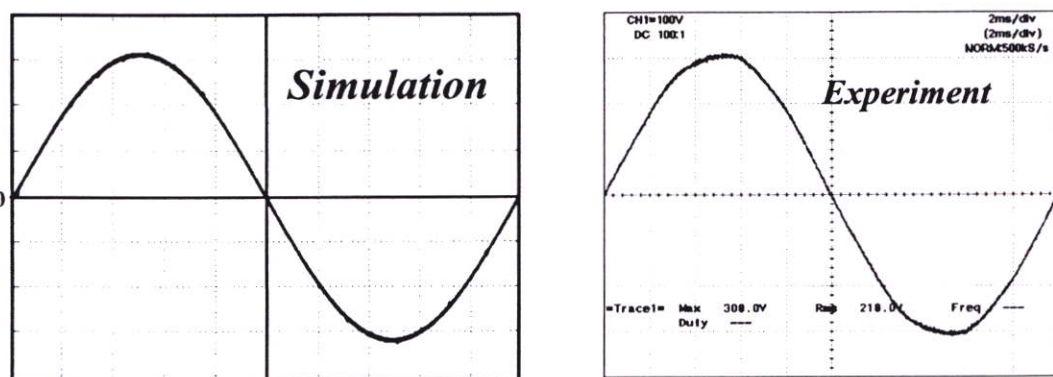
5.2.3.4 ในกรณีที่ค่าความถี่ไซเคิล 40 % ความถี่สวิทซ์ 20 kHz

5.2.3.4.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีของเพอร์สวิตซ์ที่ค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 40 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีของเพอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.11

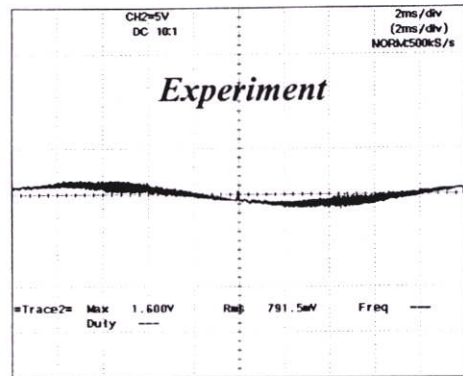
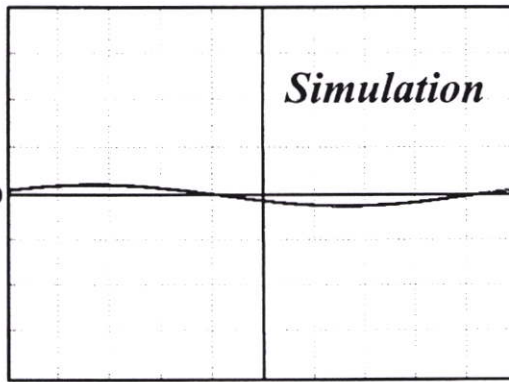


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีของเพอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

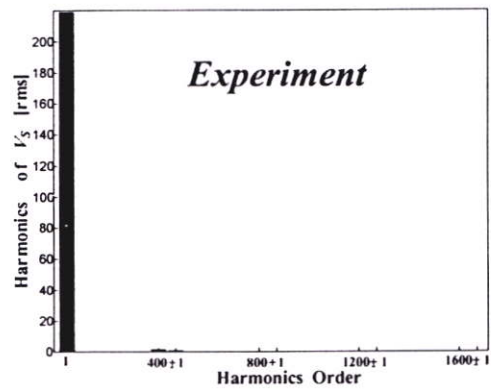
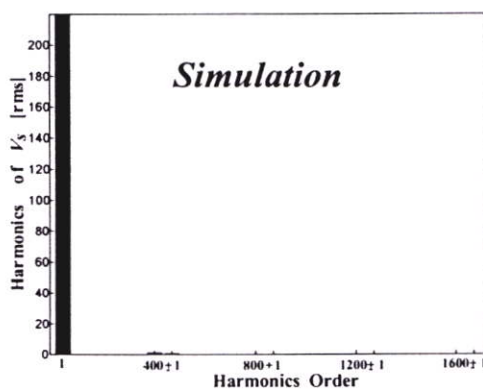


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีของเพอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

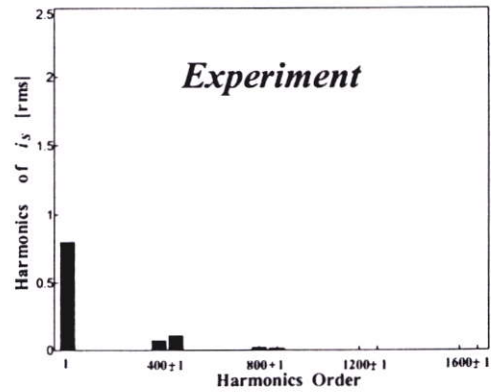
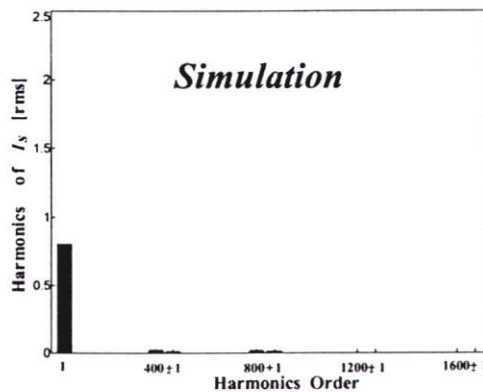
รูปที่ 5.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีของเพอร์สวิตซ์ที่ค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 40 % มีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการ
ซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

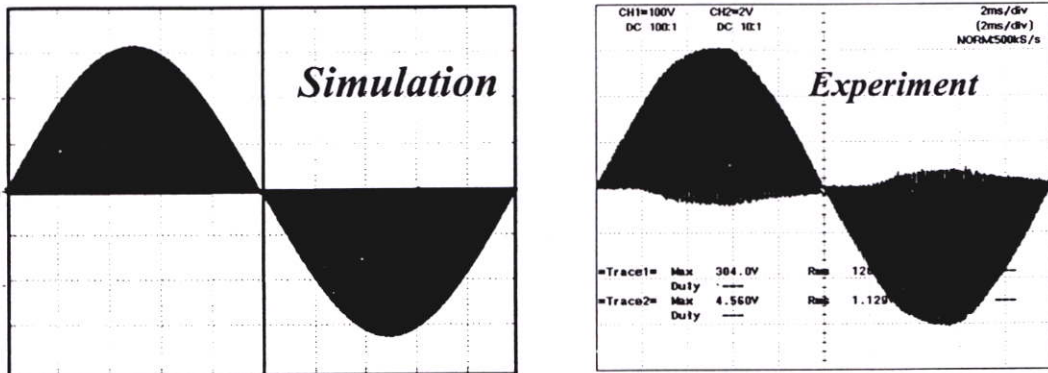


(e) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

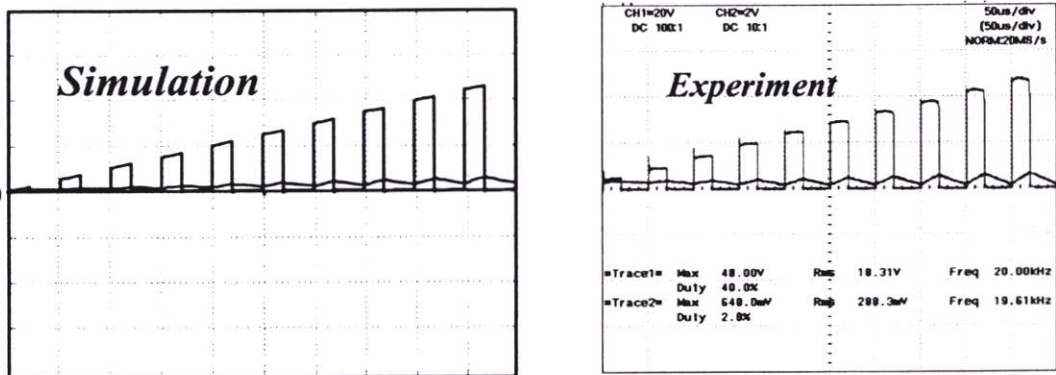
รูปที่ 5.11 ต่อ

5.2.3.4.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 40 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชอปเปอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.12

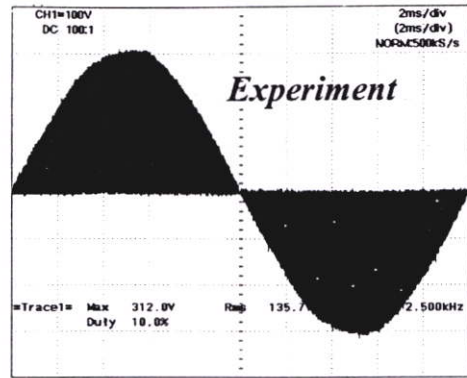
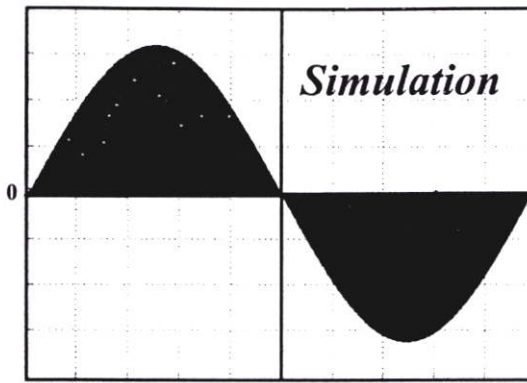


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

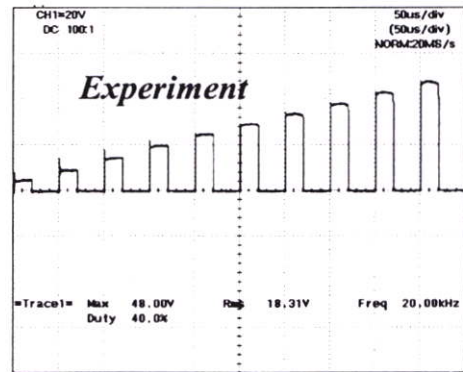
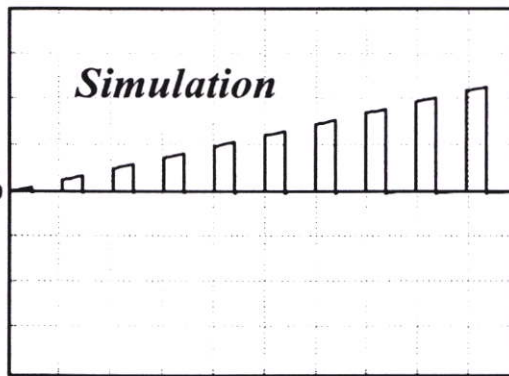


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

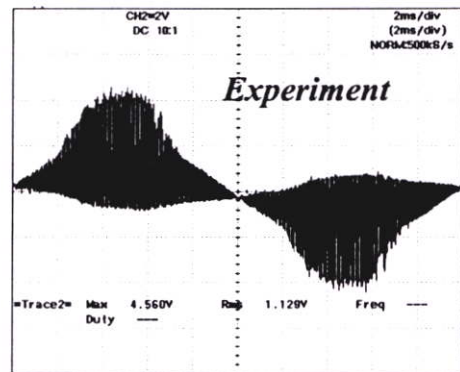
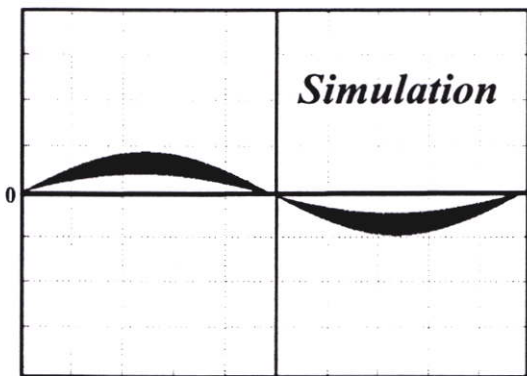
รูปที่ 5.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 40 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

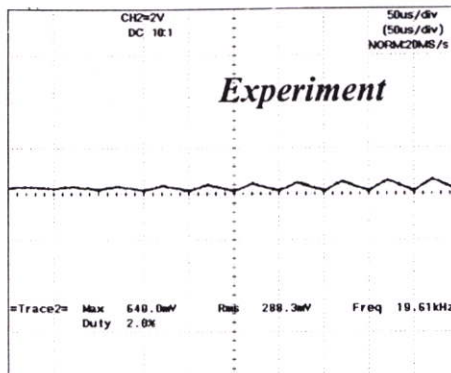
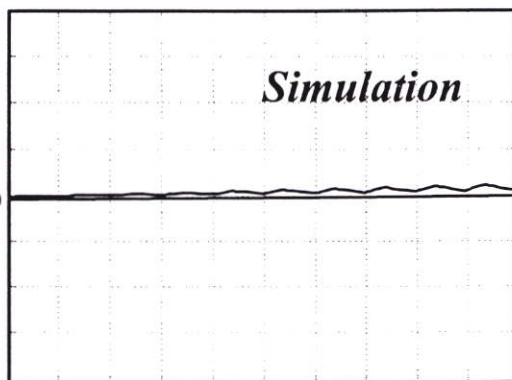


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

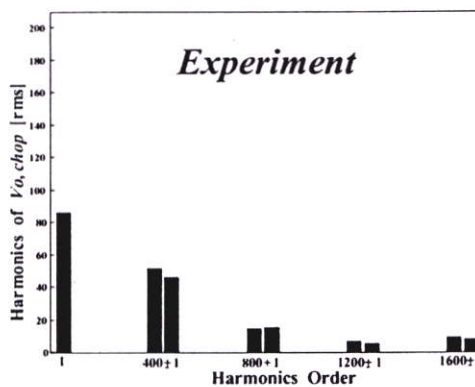
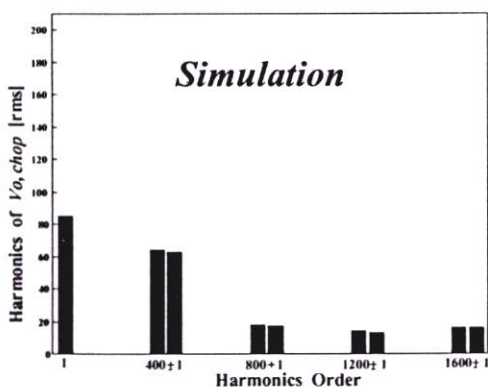


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเฮซิชอปเปอร์ i_s ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

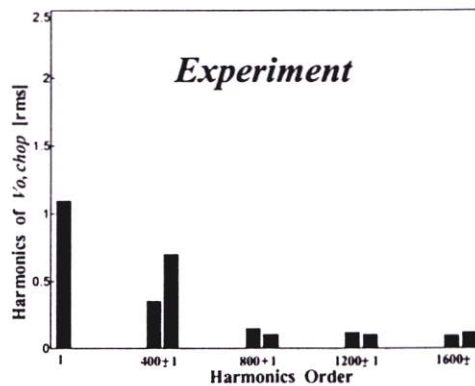
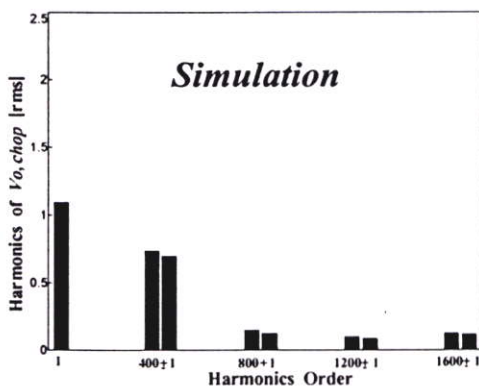
รูปที่ 5.12 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div$, $x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

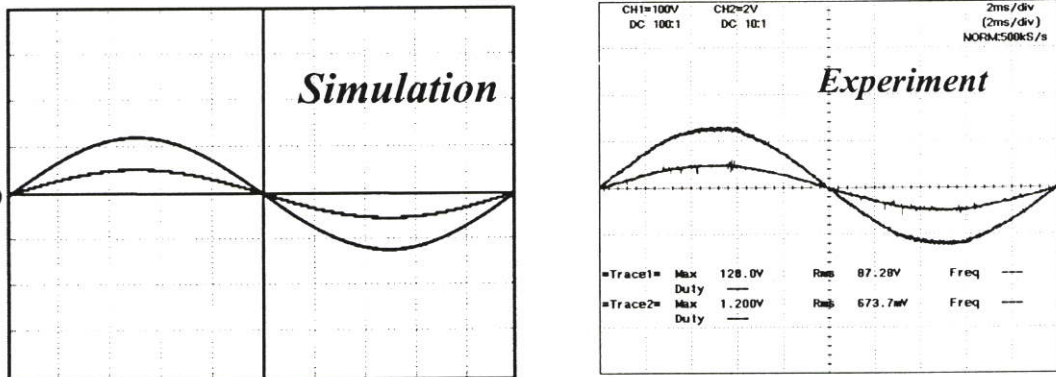


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $i_{o,chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

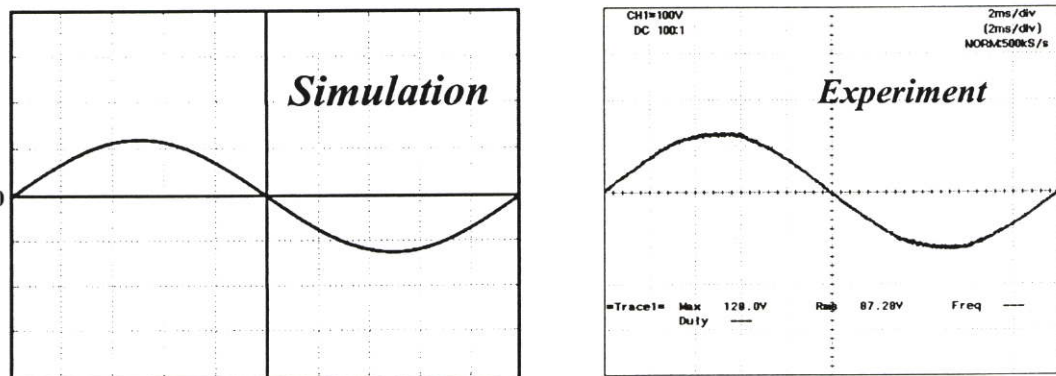
รูปที่ 5.12 ต่อ

5.2.3.4.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีของเพอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 40 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีของเพอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.13

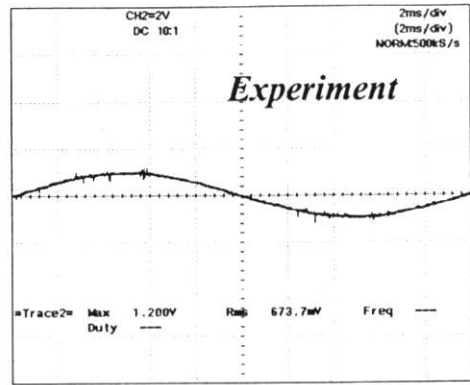
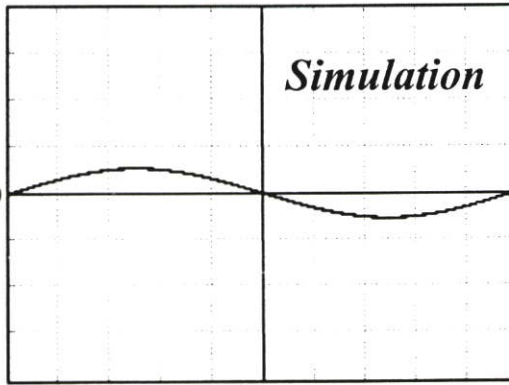


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชไอซีของเพอร์ $i_{0.50\text{Hz}}$ ($y=2\text{A/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

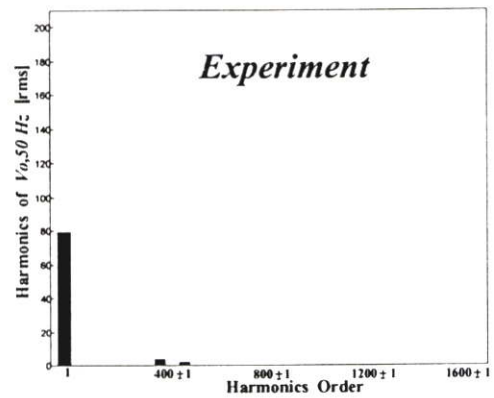
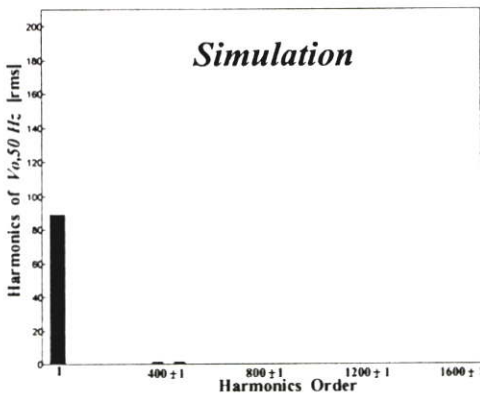


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

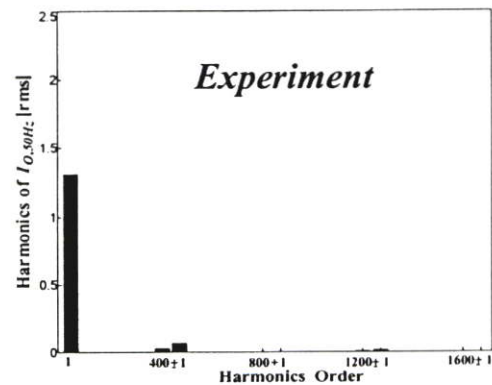
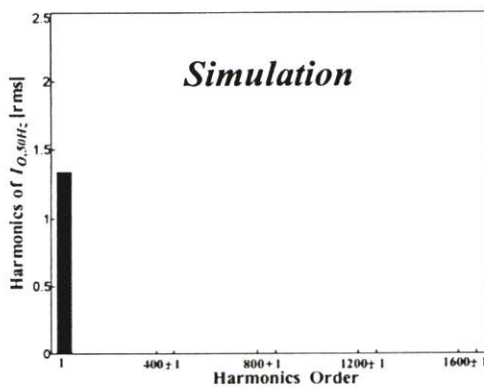
รูปที่ 5.13 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอซีของเพอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 40 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



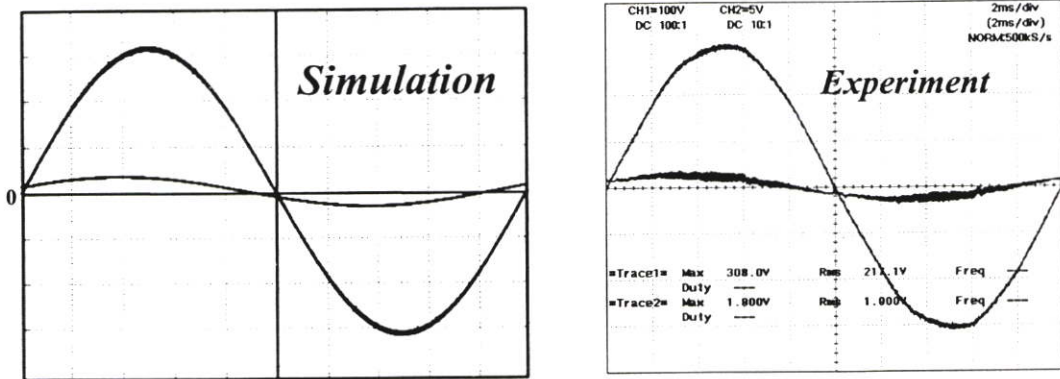
(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเรซีชอปเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.13 ต่อ

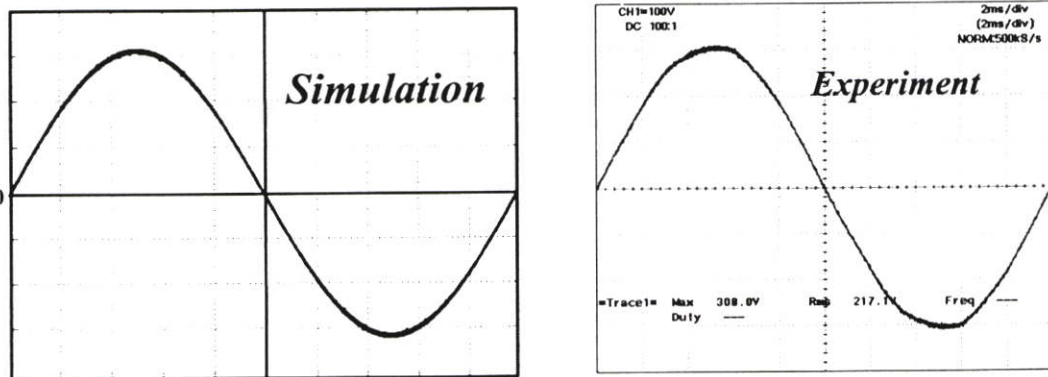
5.2.3.5 ในกรณีที่ค่าควัตซ์ไซเคิล 50 % ความถี่สวิตช์ 20 kHz

5.2.3.5.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอโอพีเออร์สวิตช์ที่ค่าควัตซ์ไซเคิลเท่ากับ 50 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอโอพีเออร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.14

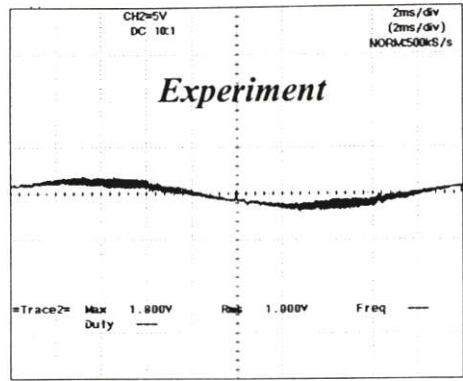
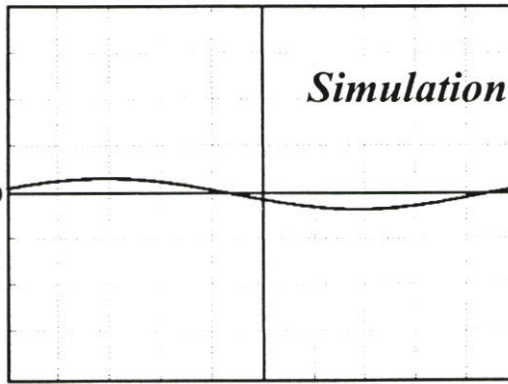


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอโอพีเออร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

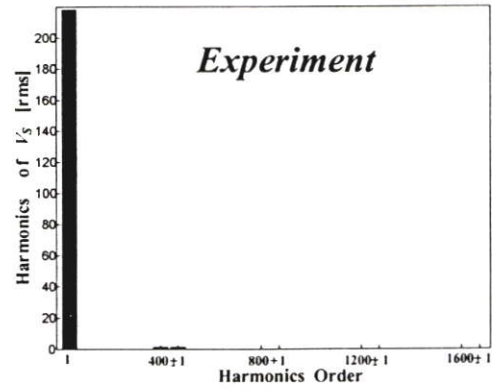
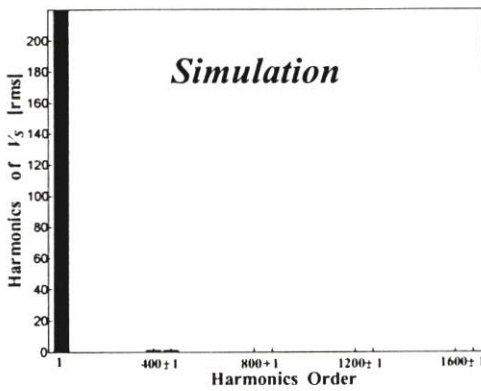


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอโอพีเออร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

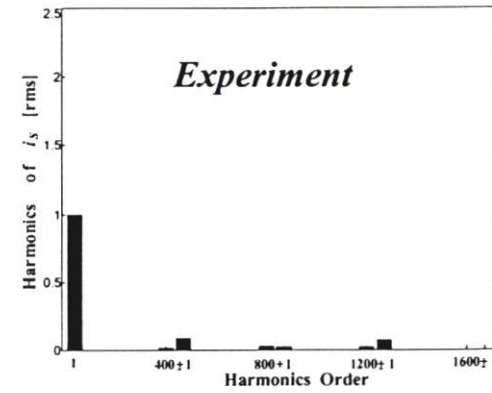
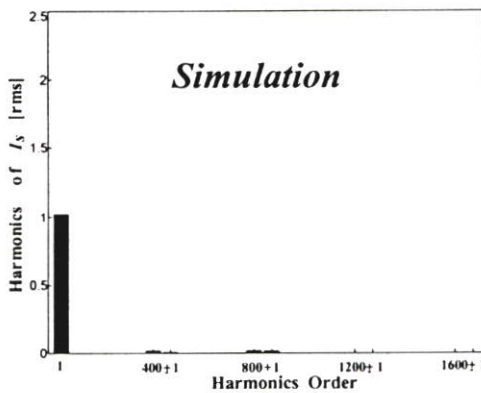
รูปที่ 5.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอโอพีเออร์สวิตช์ที่ค่าควัตซ์ไซเคิลเท่ากับ 50 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

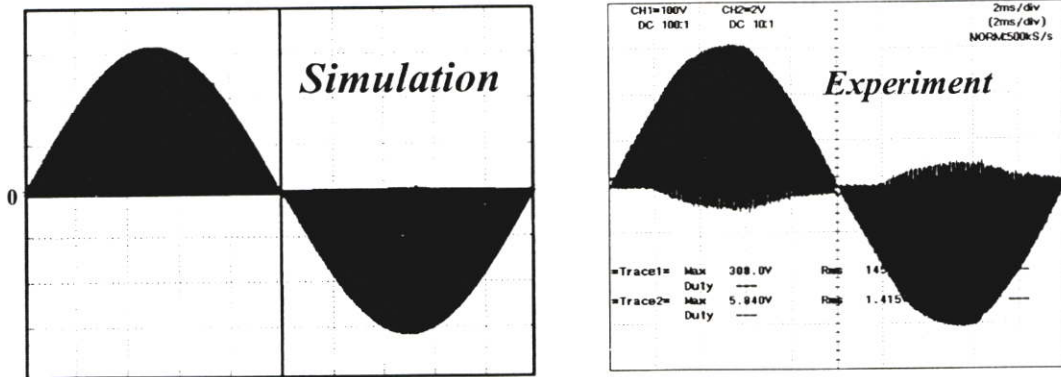


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

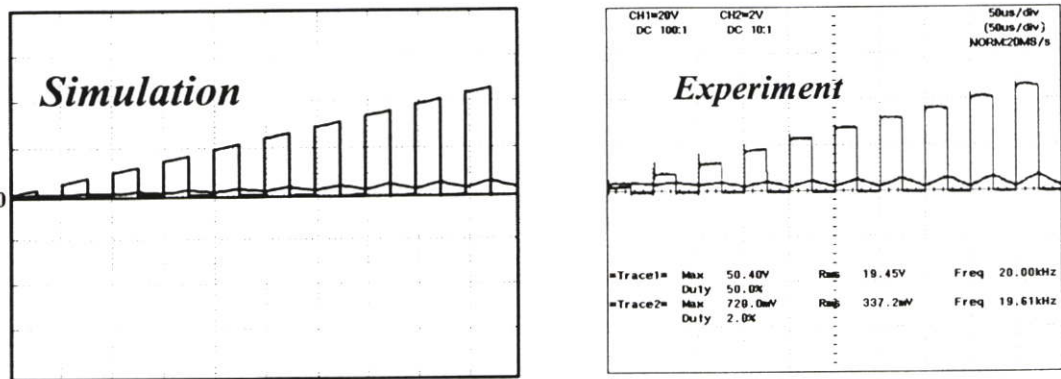
รูปที่ 5.14 ต่อ

5.2.3.5.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ และกระแส $i_{o, chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรถออปเปอร์เอมพลีฟายเออร์ที่ค่าคิวดีไซ์เคลเท่ากับ 50 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรถออปเปอร์เอมพลีฟายเออร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.15

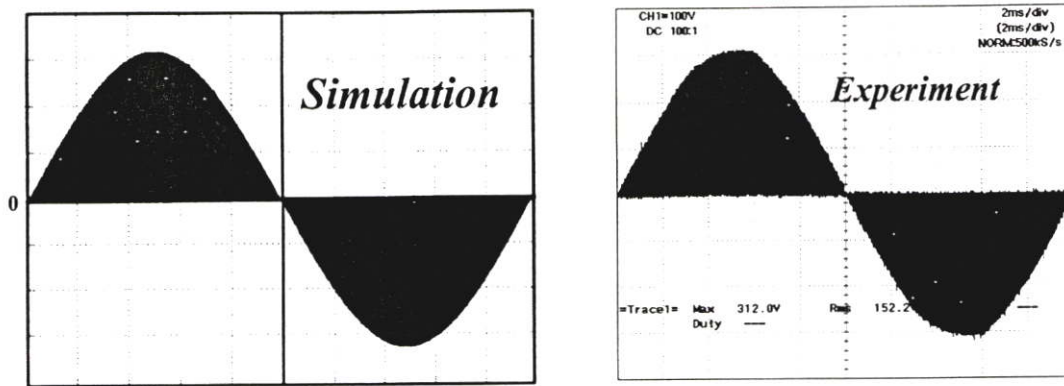


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรถออปเปอร์เอมพลีฟายเออร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

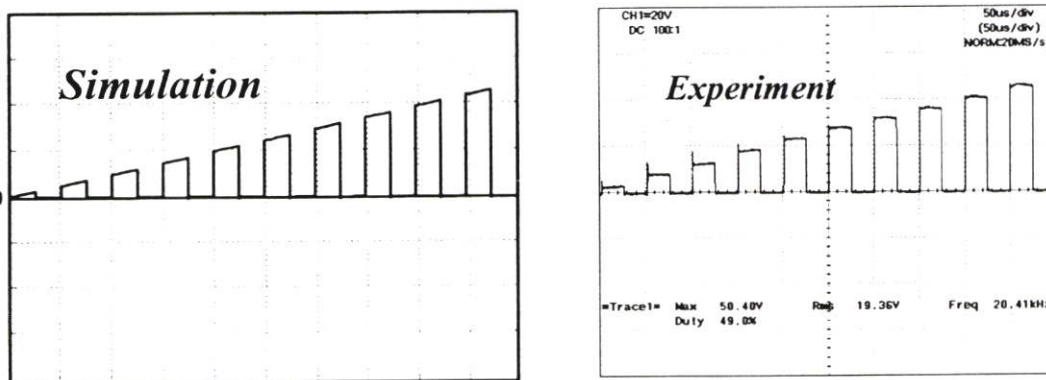


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรถออปเปอร์เอมพลีฟายเออร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

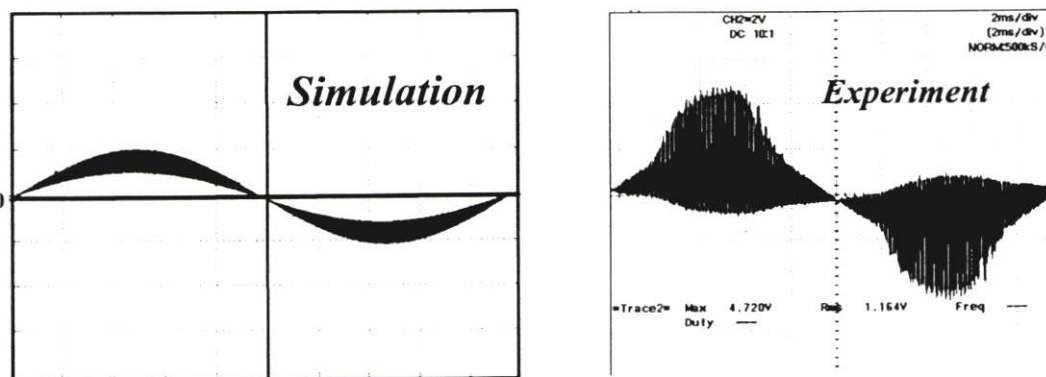
รูปที่ 5.15 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ และกระแส $i_{o, chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรถออปเปอร์เอมพลีฟายเออร์ที่ค่าคิวดีไซ์เคลเท่ากับ 50 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



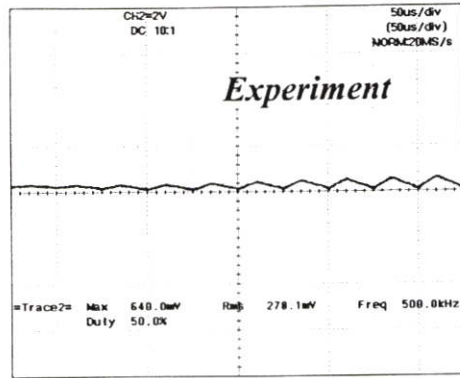
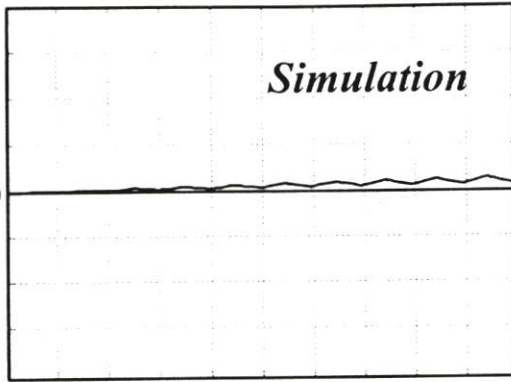
(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



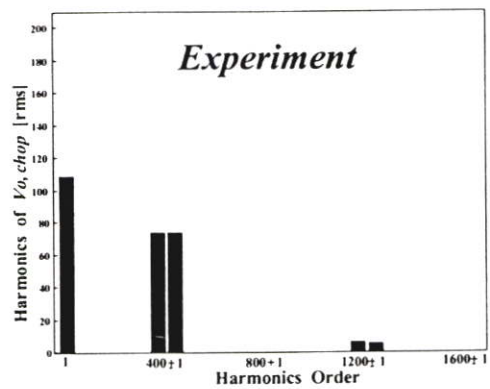
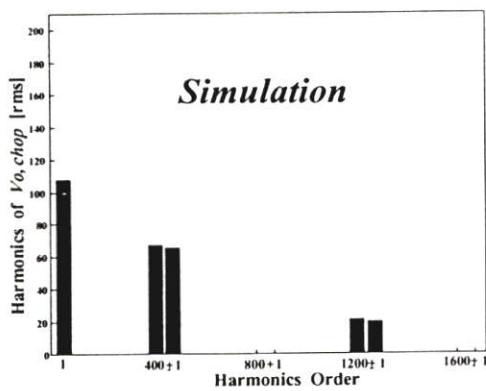
(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



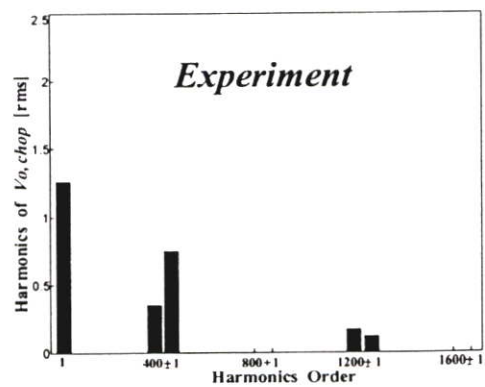
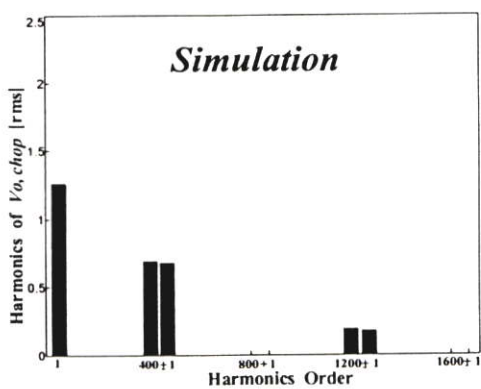
(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(f) ลักษณะทางค่านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div$, $x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



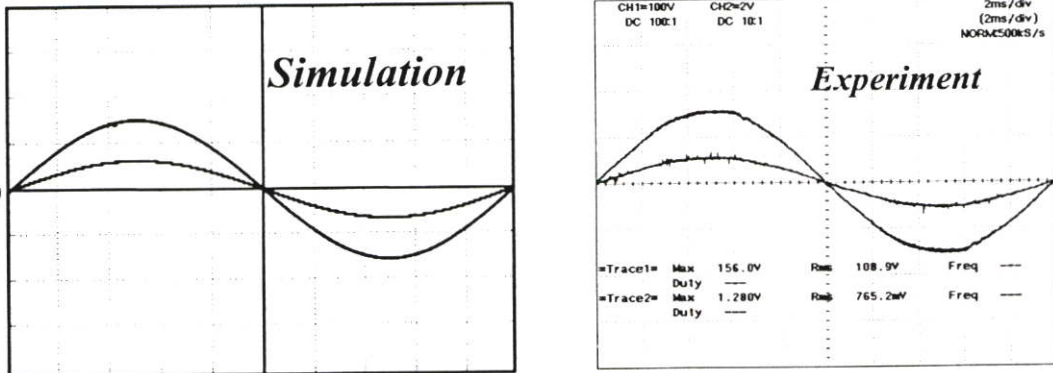
(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



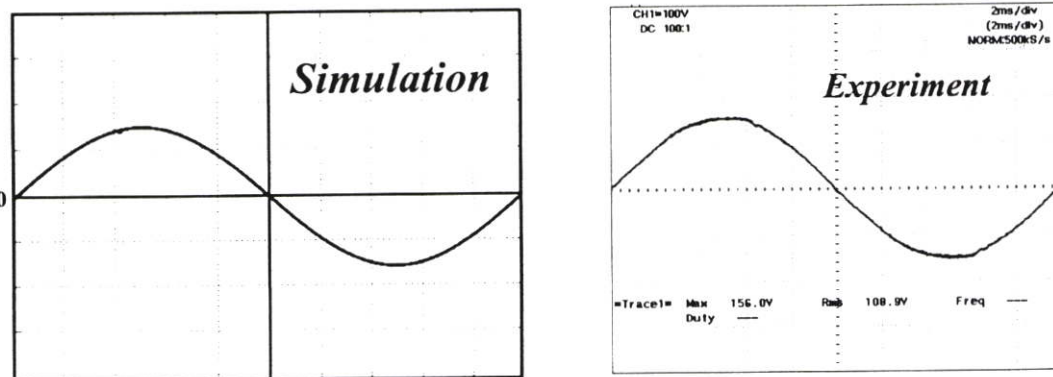
(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

5.2.3.5.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 50 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอซีชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาชมมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.16

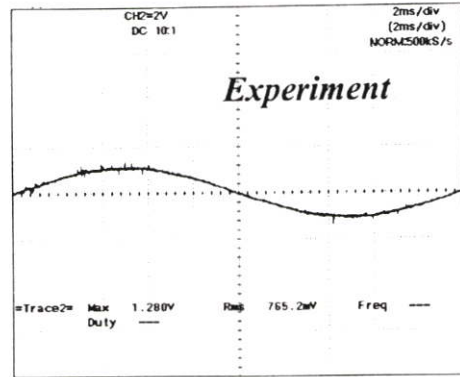
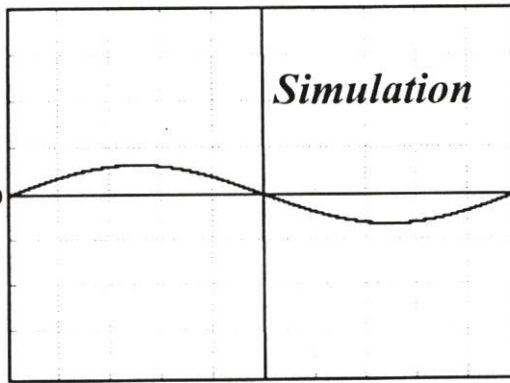


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ $i_{0.50\text{Hz}}$ ($y=2\text{A/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการชมมูเลตและการทดลอง

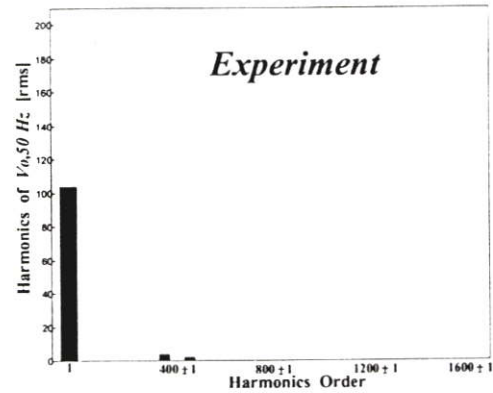
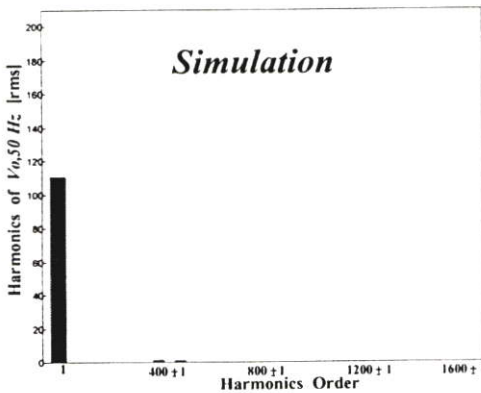


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการชมมูเลตและการทดลอง

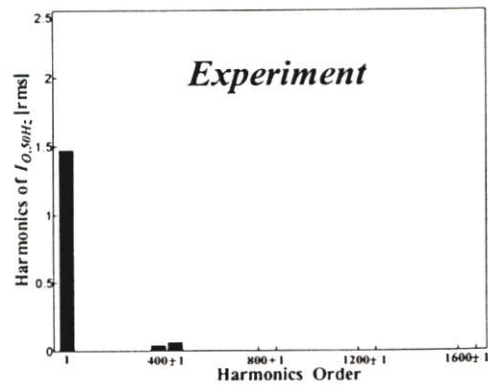
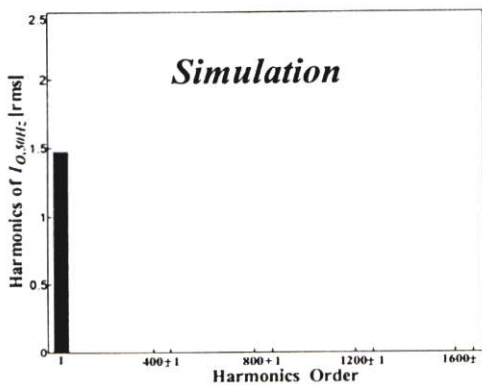
รูปที่ 5.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 50 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางค่านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิวเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากกราดิจิมมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชไอโอเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากกราดิจิมมูเลตและการทดลอง

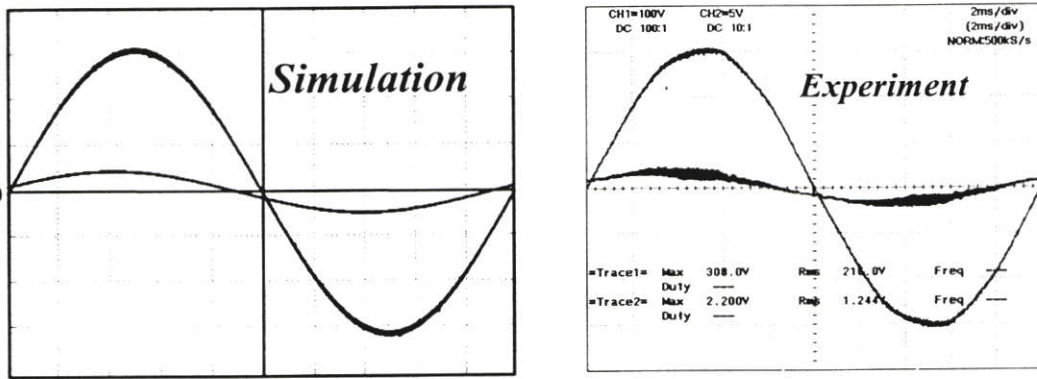


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเอชไอโอเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ที่จากการกราดิจิมมูเลตและการทดลอง

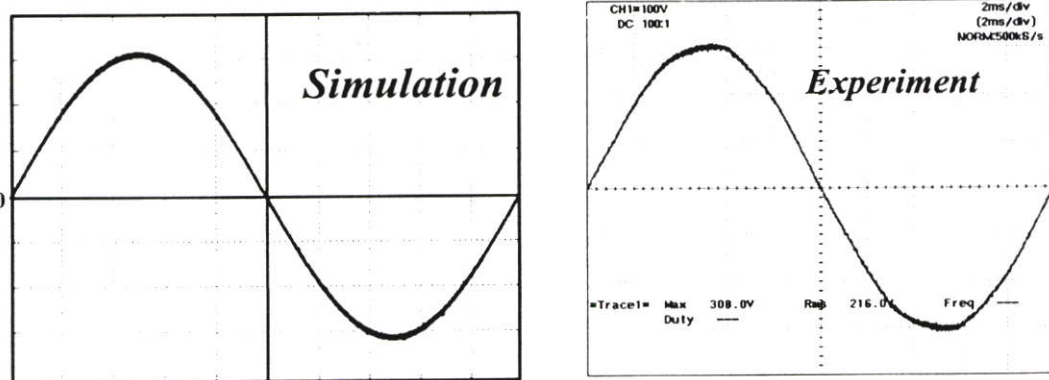
5.2.3.6 ในกรณีที่ค่าควิตซ์ไซเคิล 60 % ความถี่สวิทซ์ 20 kHz

5.2.3.6.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 60 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชอปเปอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.17

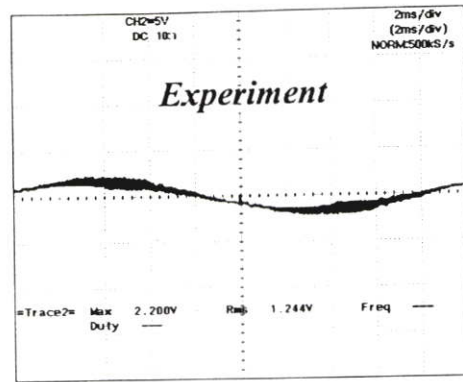
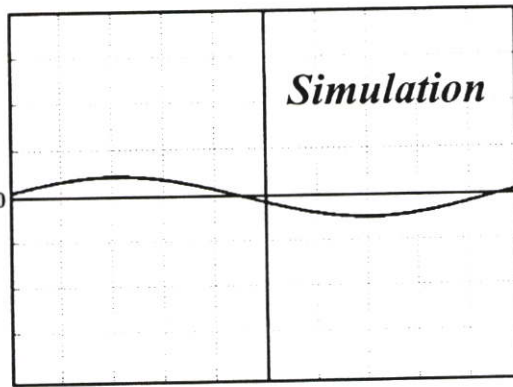


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

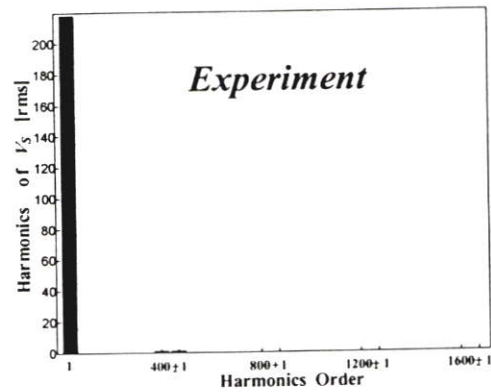
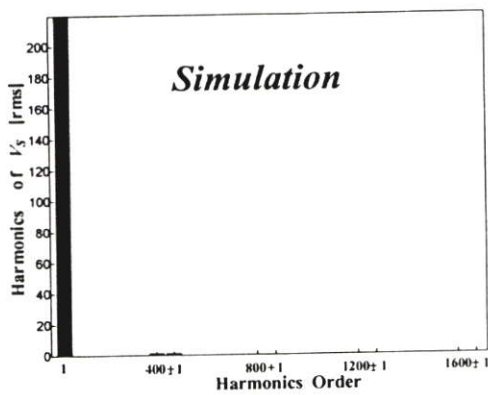


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

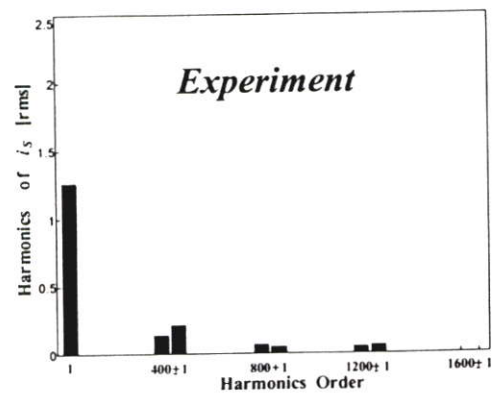
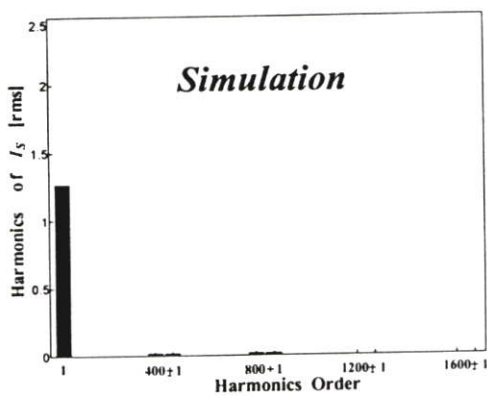
รูปที่ 5.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 60 % มีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางดำนินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการ
 ซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

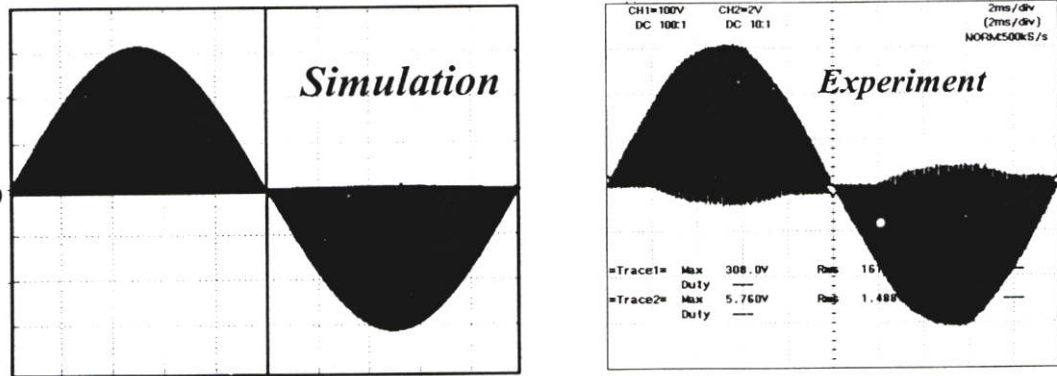


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

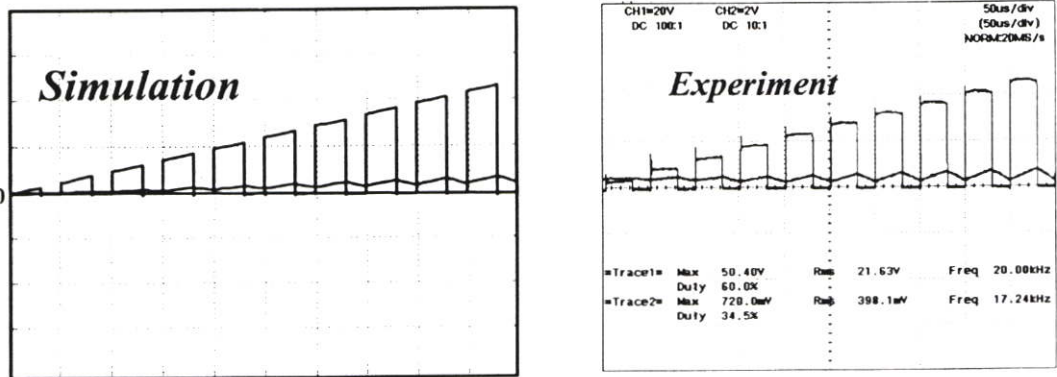
รูปที่ 5.17 ต่อ

5.2.3.6.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าดีวีไซ์เกิดเท่ากับ 60 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอซีชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.18

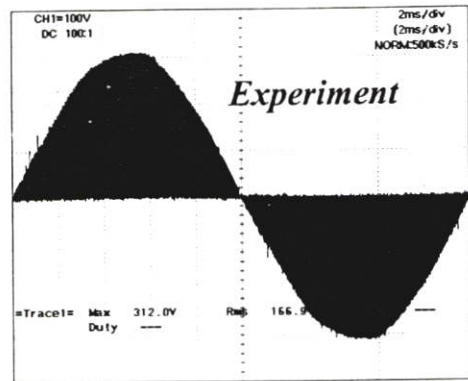
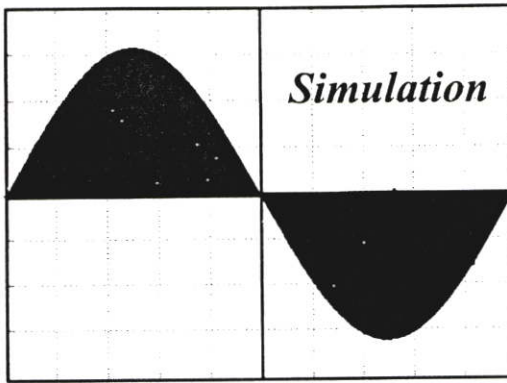


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

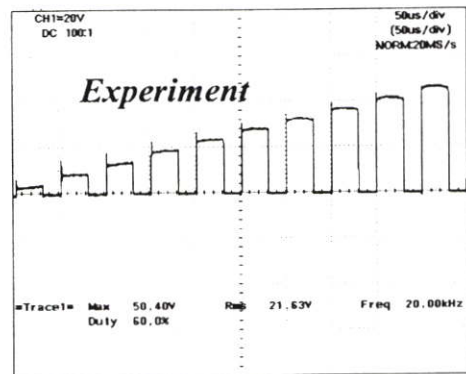
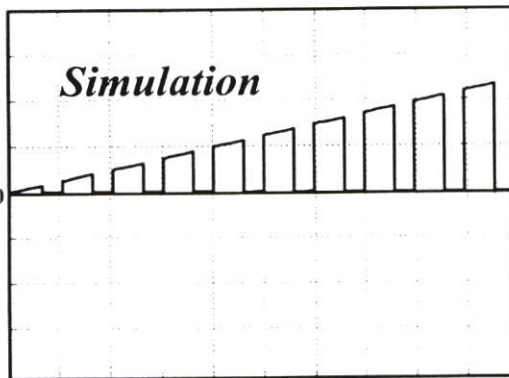


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50\mu s/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

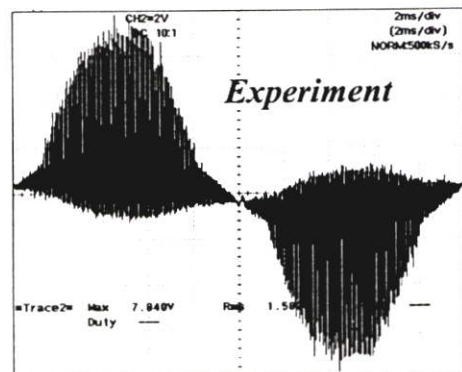
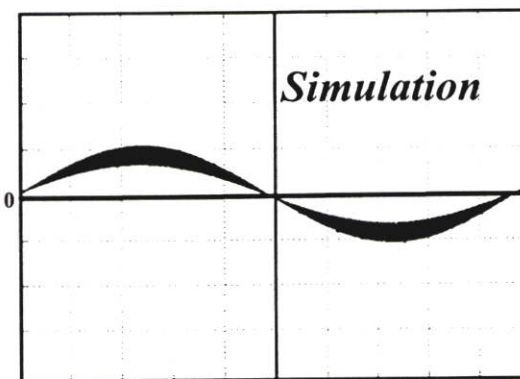
รูปที่ 5.18 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าดีวีไซ์เกิดเท่ากับ 60 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

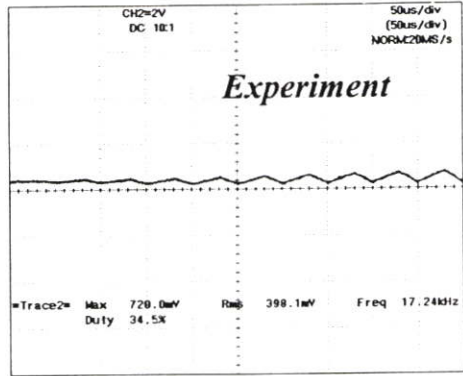
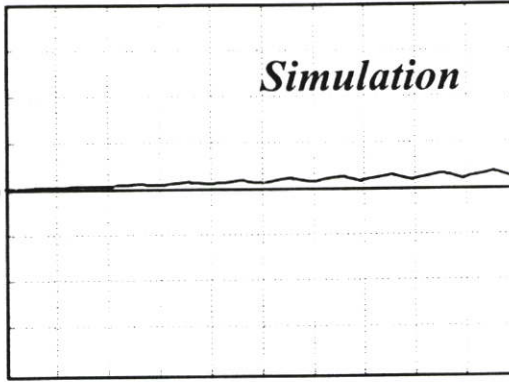


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

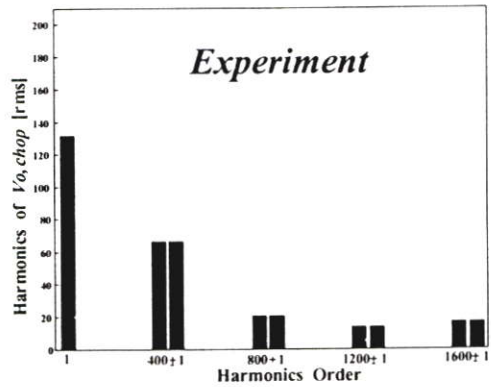
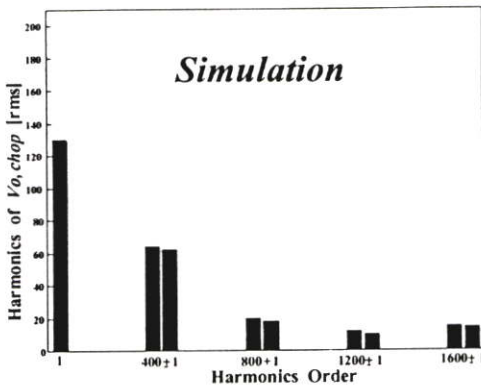


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

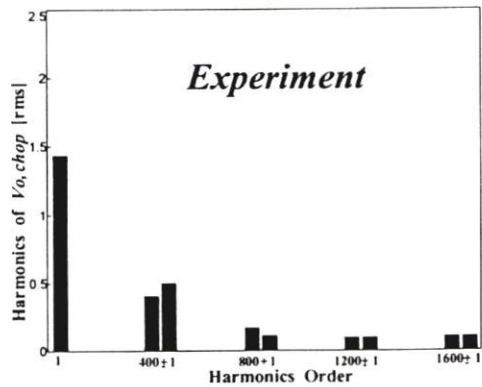
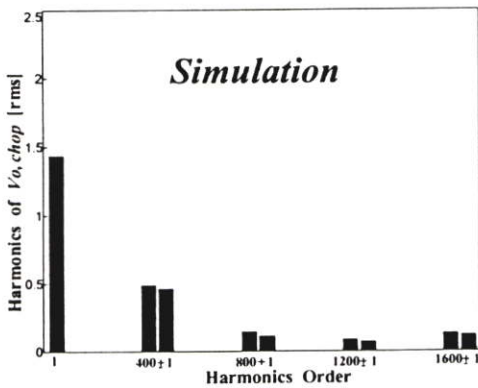
รูปที่ 5.18 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางค่านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div$, $x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

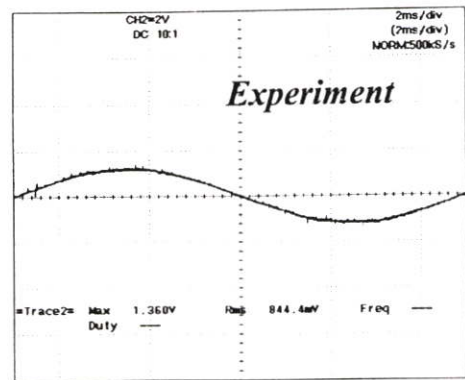
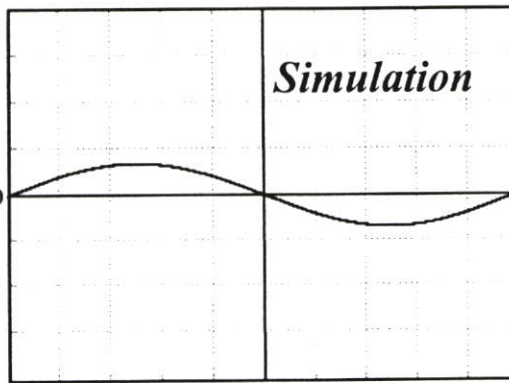


(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

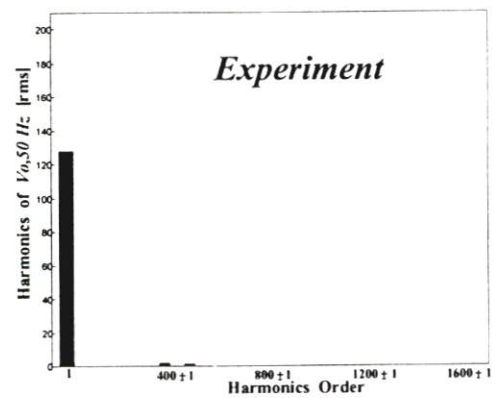
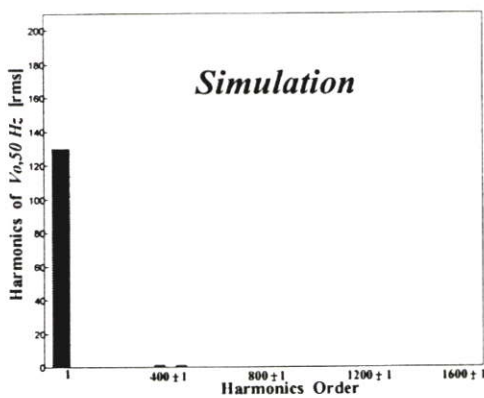


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $i_{o,chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

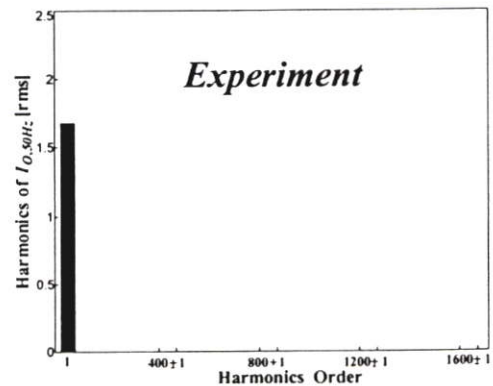
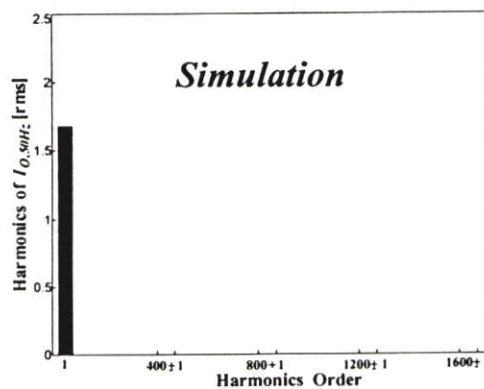
รูปที่ 5.18 ต่อ



(c) ลักษณะแอมพลิจูดทางด้านอินพุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ $i_{o,50\text{Hz}}$ ($y=5\text{A/div}$, $x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการ



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ $v_{o,50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



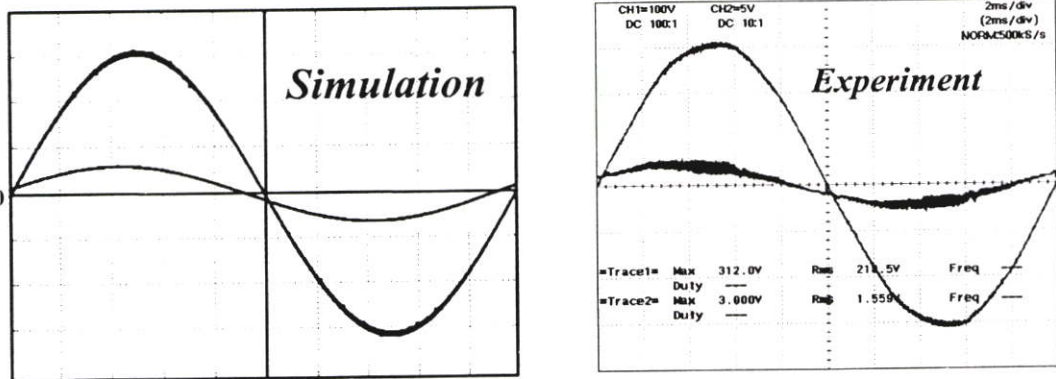
(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเรซีซอปเปอร์ $i_{o,50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.19 ต่อ

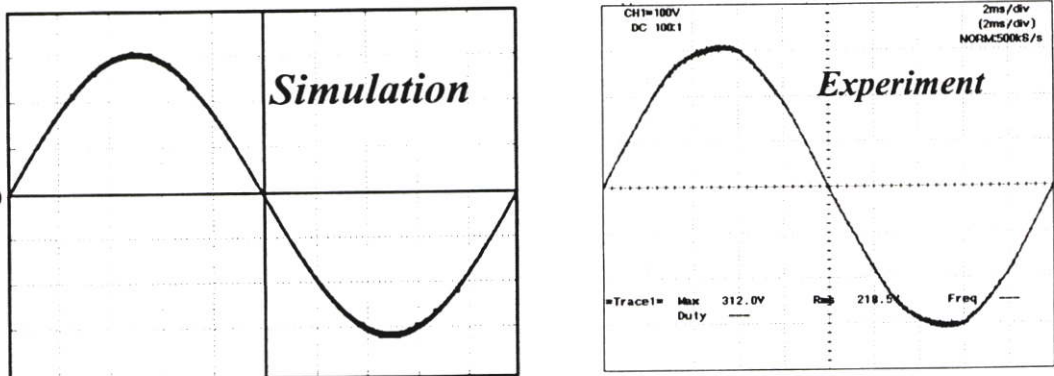
5.2.3.7 ในกรณีที่ค่าควิตซ์ไซเคิล 70 % ความถี่สวิทช์ 20 kHz

5.2.3.7.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 70 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.20

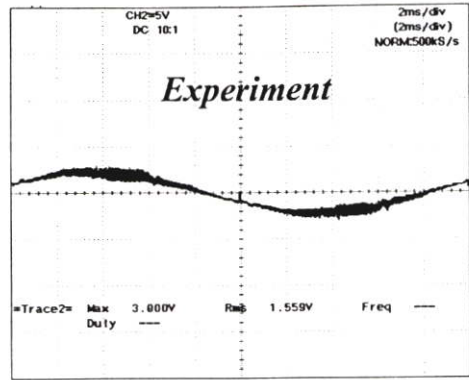
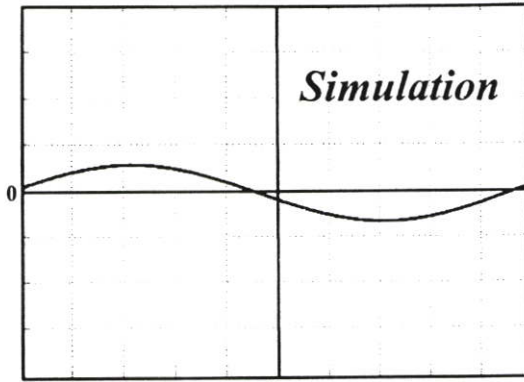


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

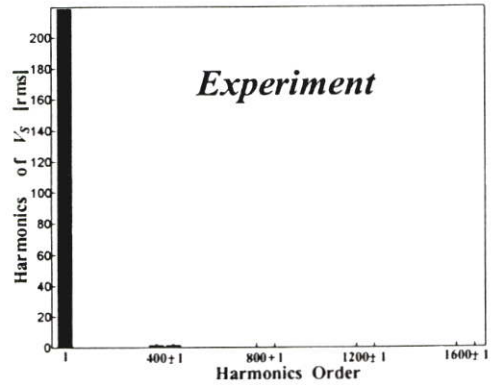
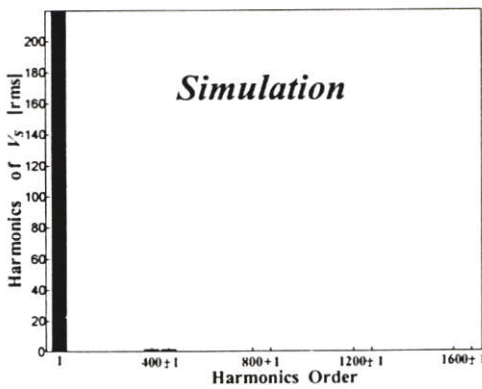


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

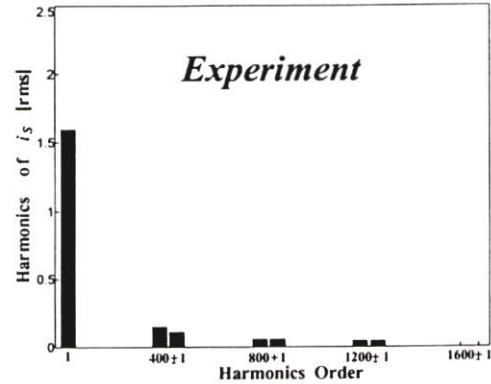
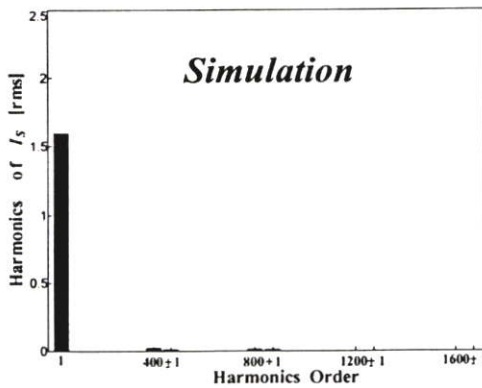
รูปที่ 5.20 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 70 % มีความถี่ในการสวิทช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

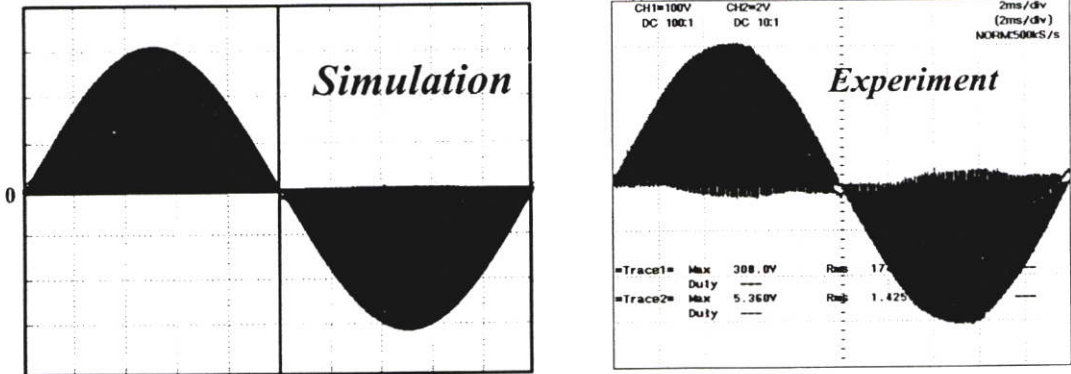


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์ i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

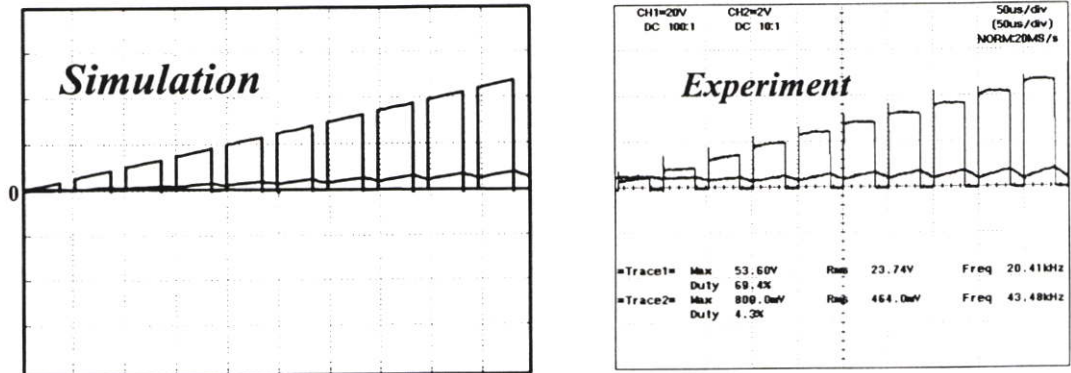
รูปที่ 5.20 ต่อ

5.2.3.7.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 70 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอซีชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.21

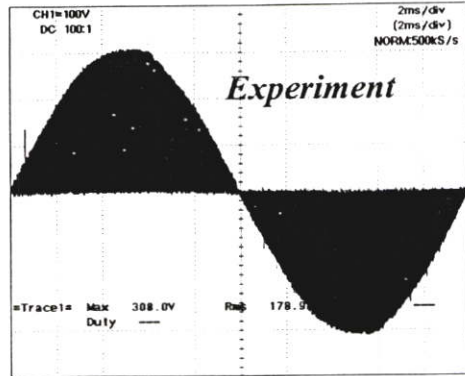
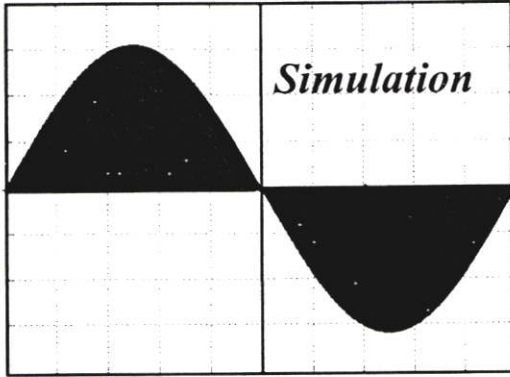


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

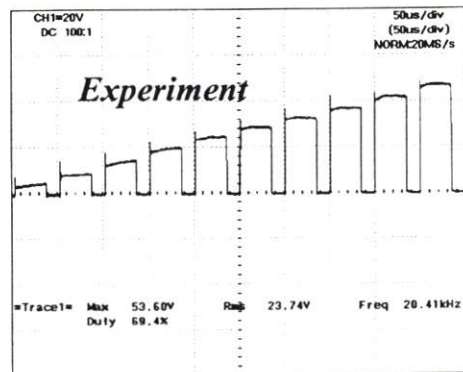
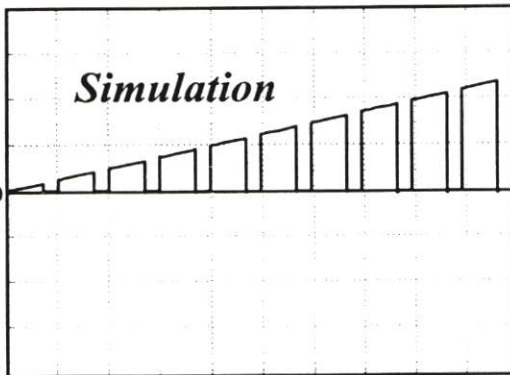


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ $i_{o,cho}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

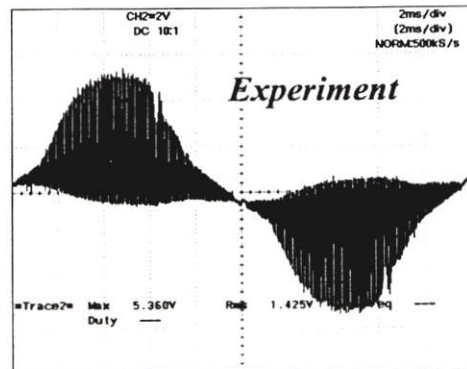
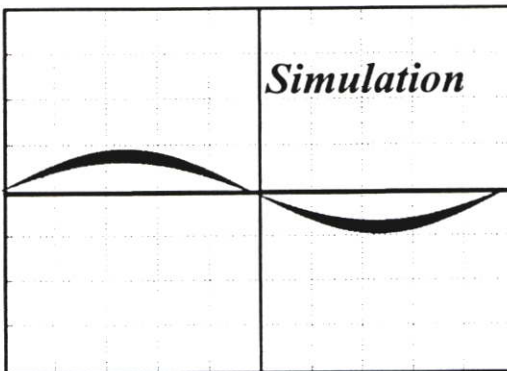
รูปที่ 5.21 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 70 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

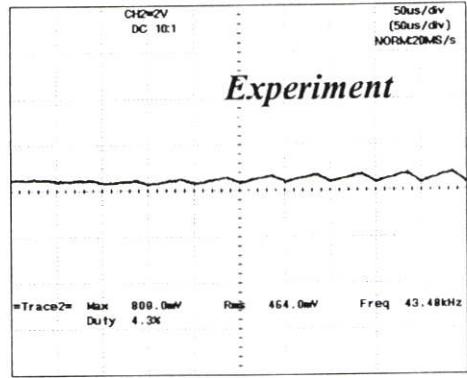
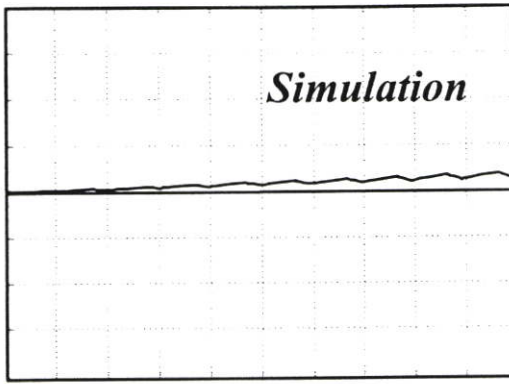


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

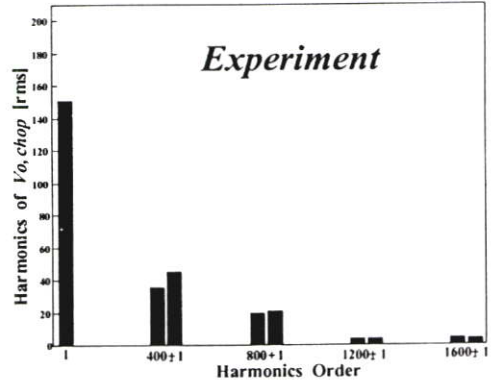
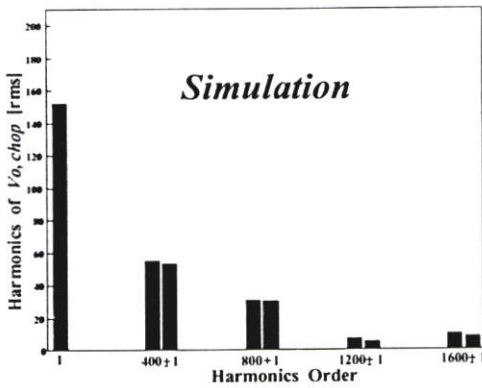


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอซีชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

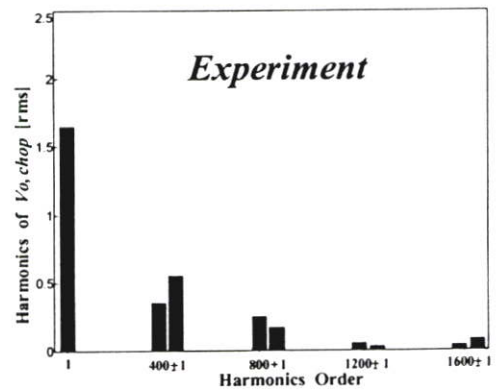
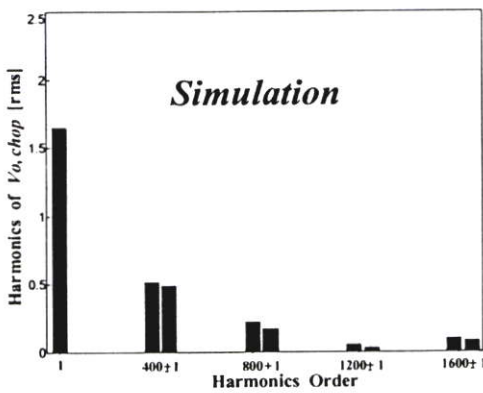
รูปที่ 5.21 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div$, $x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

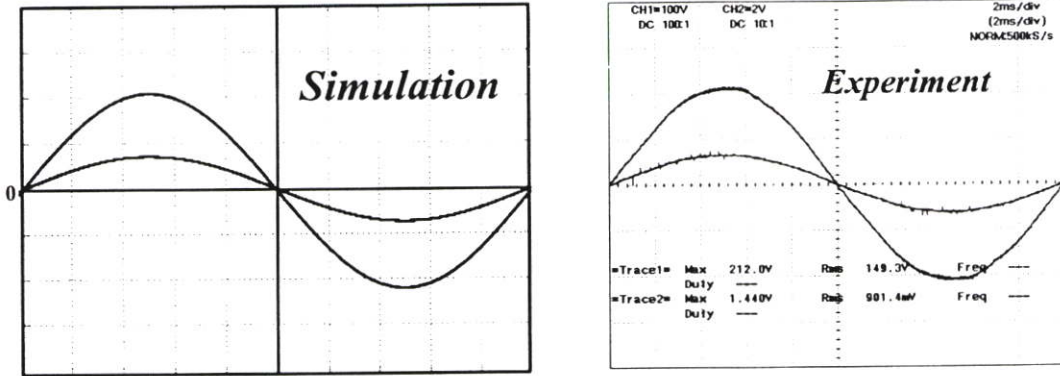


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $i_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

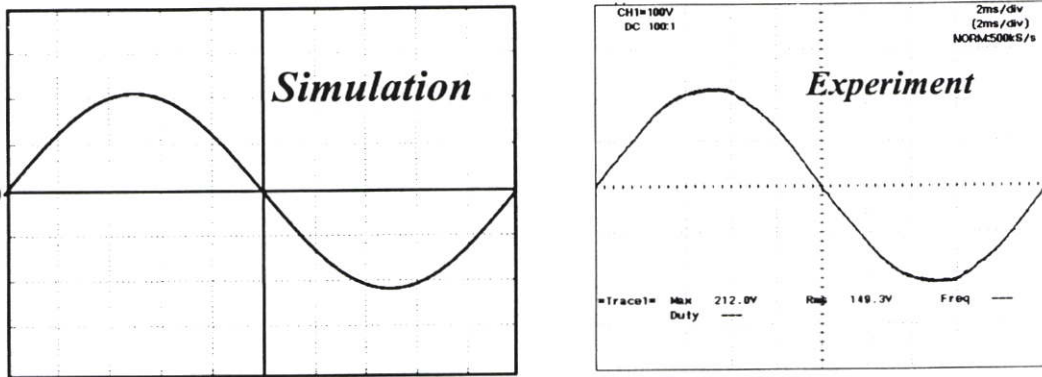
รูปที่ 5.21 ต่อ

5.2.3.7.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวดีไซเคิลเท่ากับ 70 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.22

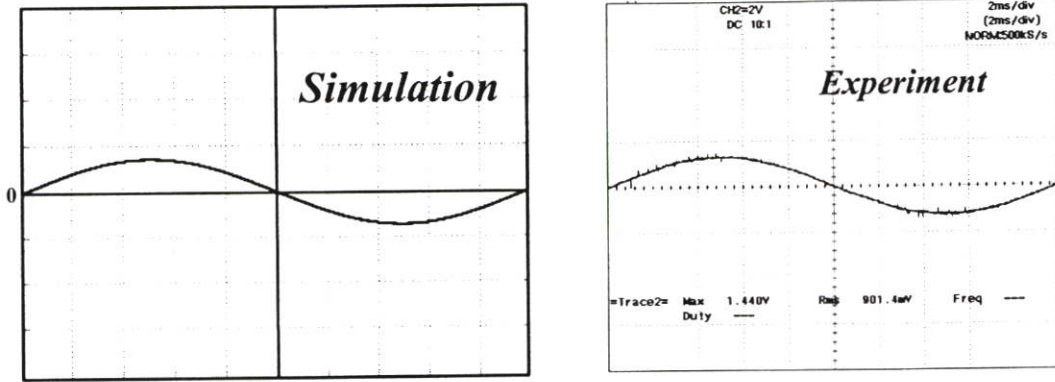


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชไอซีชอปเปอร์ $i_{0.50\text{Hz}}$ ($y=2\text{A/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

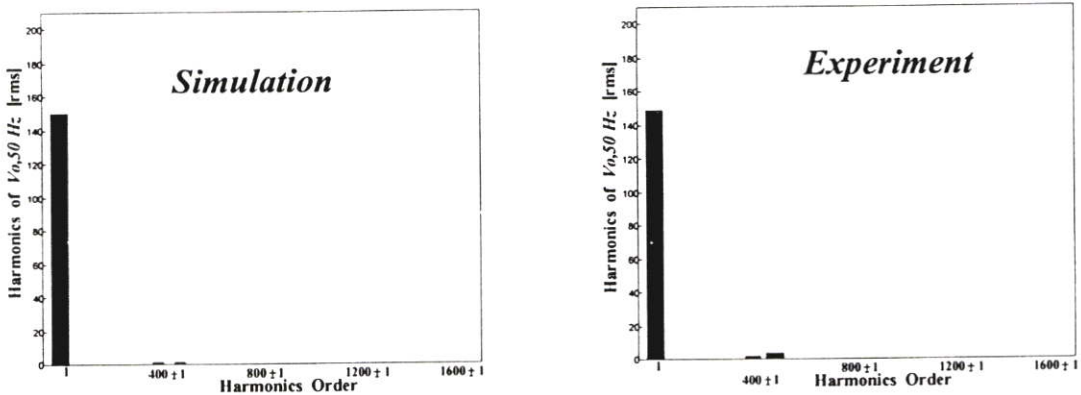


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50\text{Hz}}$ ($y=100\text{V/div}, x=2\text{ms/div}$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

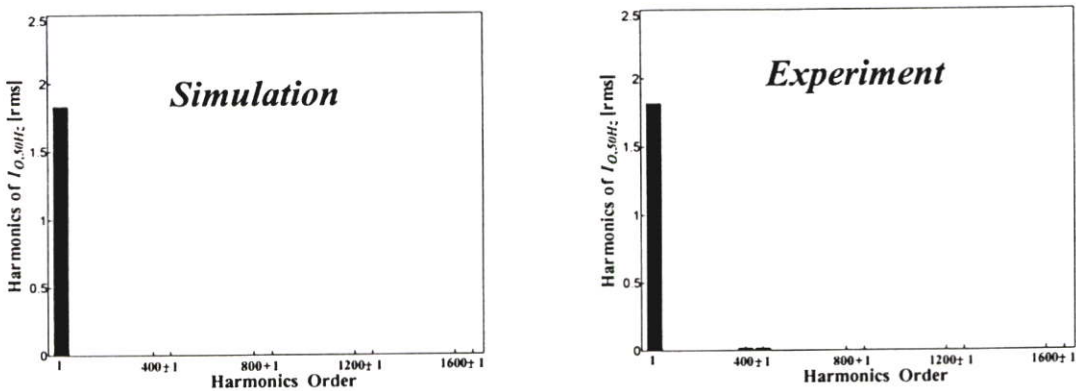
รูปที่ 5.22 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50\text{Hz}}$ และกระแส $i_{0.50\text{Hz}}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวดีไซเคิลเท่ากับ 70 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



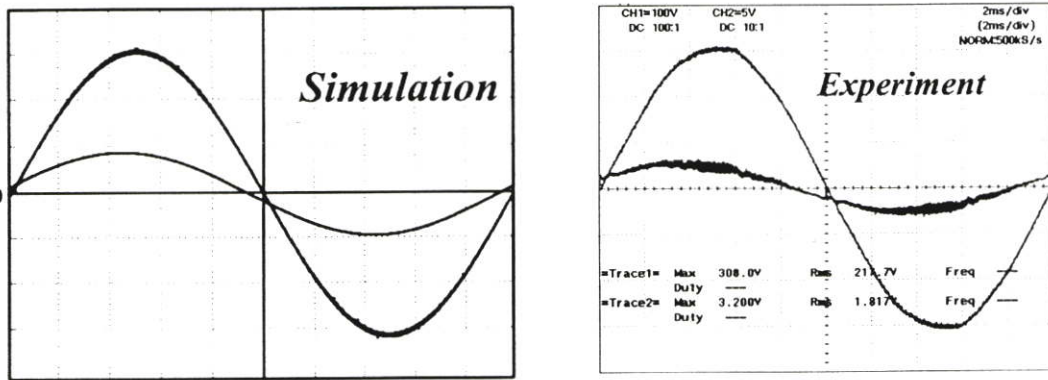
(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีของเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.22 ต่อ

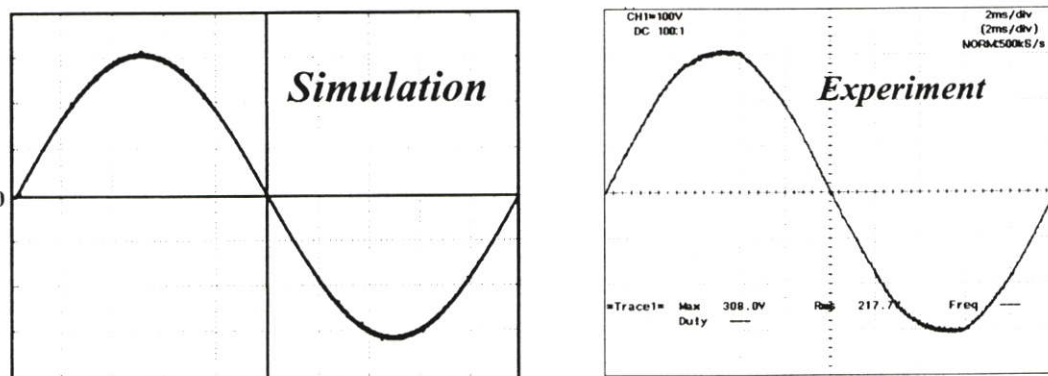
5.2.3.8 ในกรณีที่ค่าควัตซ์ไซเคิล 80 % ความถี่สวิตซ์ 20 kHz

5.2.3.8.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าควัตซ์ไซเคิลเท่ากับ 80 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.23

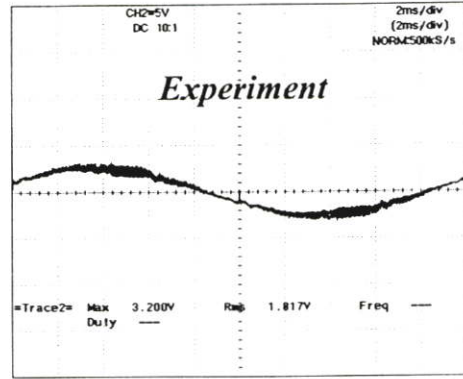
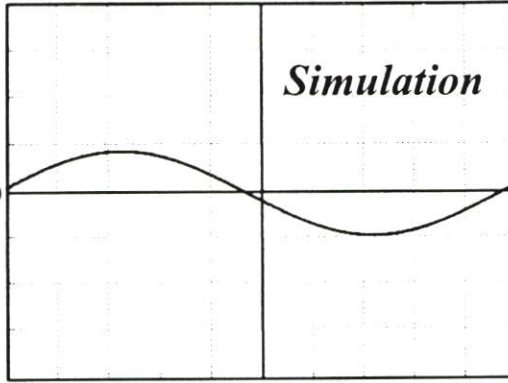


(a) คลื่นแรงดันทางด้านอินพุต v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

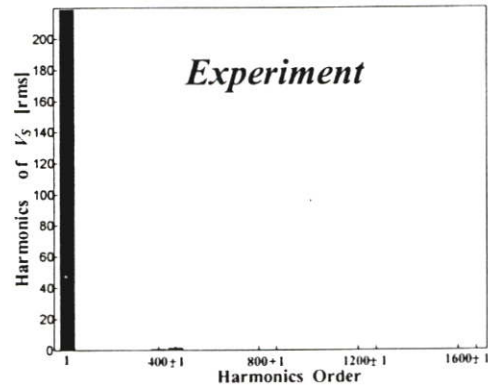
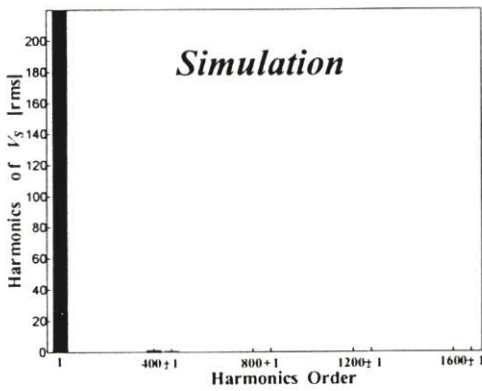


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

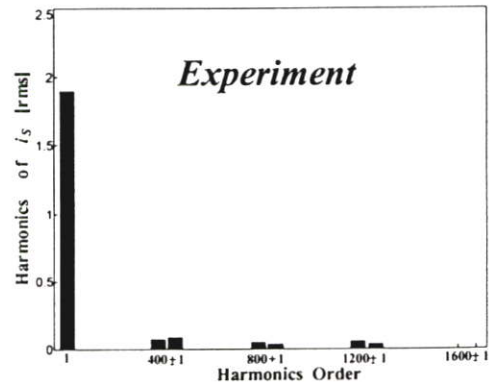
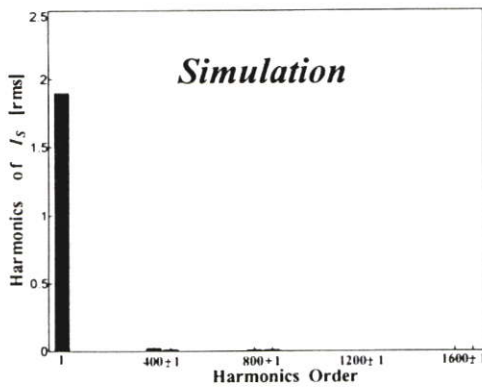
รูปที่ 5.23 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าควัตซ์ไซเคิลเท่ากับ 80 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอโอเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอโอเปอร์: v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

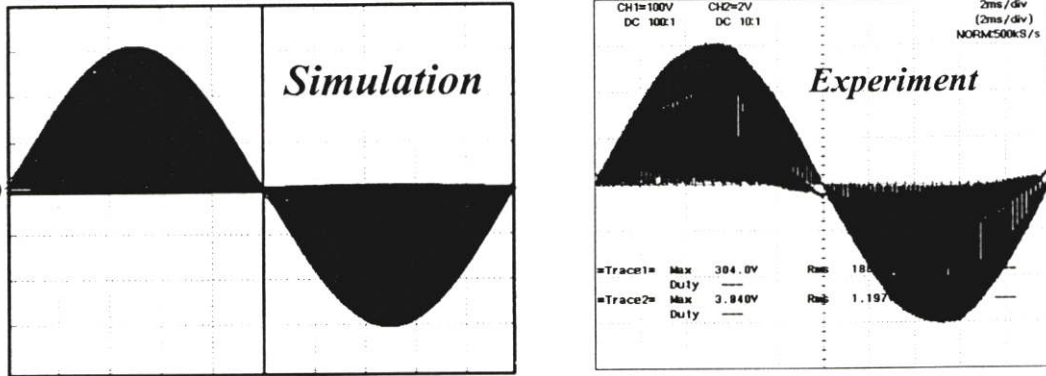


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอชไอโอเปอร์: i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

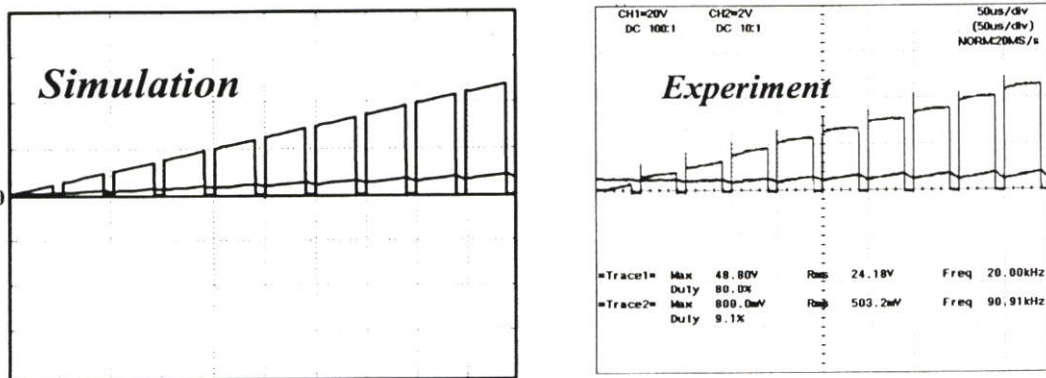
รูปที่ 5.23 ต่อ

5.2.3.8.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรถอเอชชีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวดีไซ์เกิลเท่ากับ 80 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรถอเอชชีชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.24

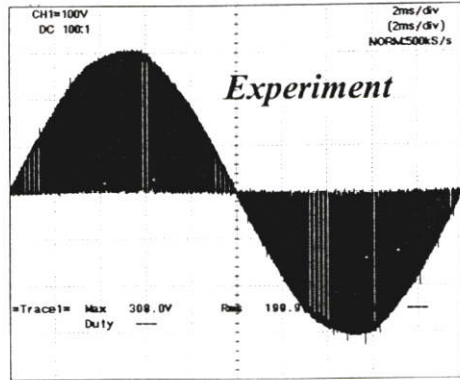
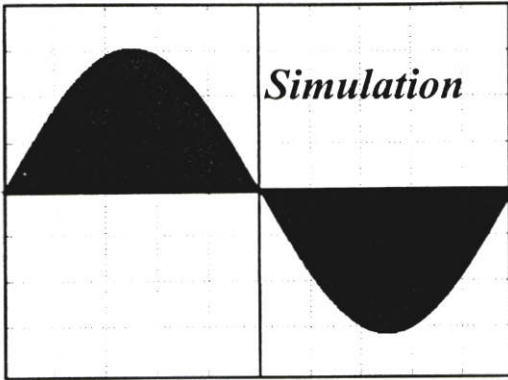


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรถอเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

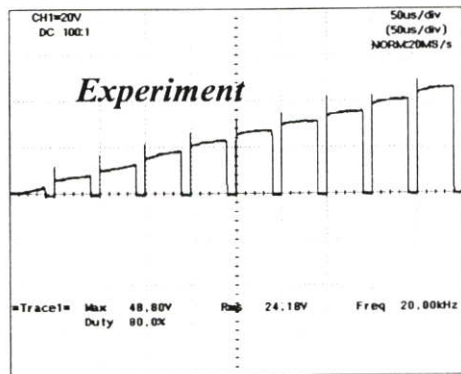
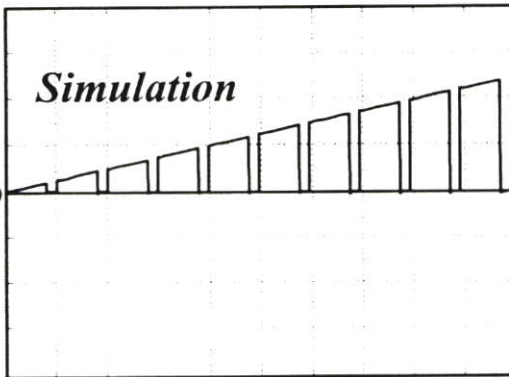


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรถอเอชชีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

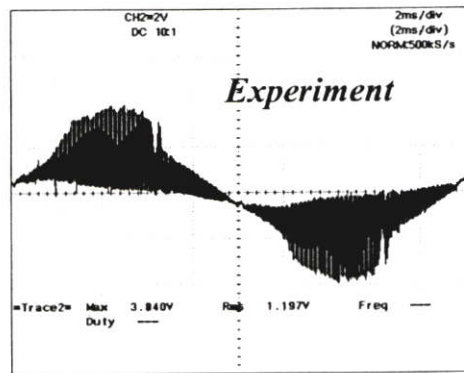
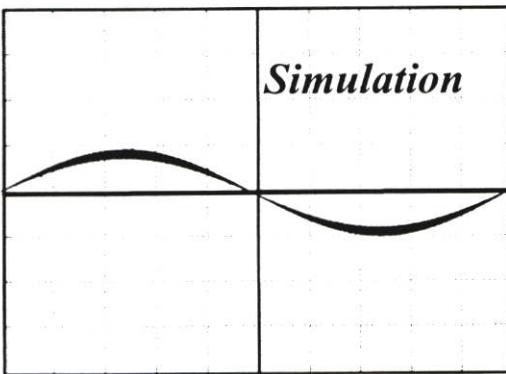
รูปที่ 5.24 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรถอเอชชีชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวดีไซ์เกิลเท่ากับ 80 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

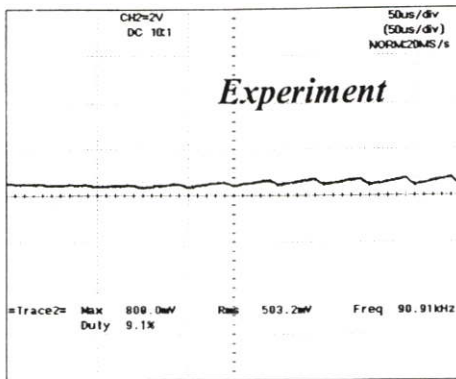
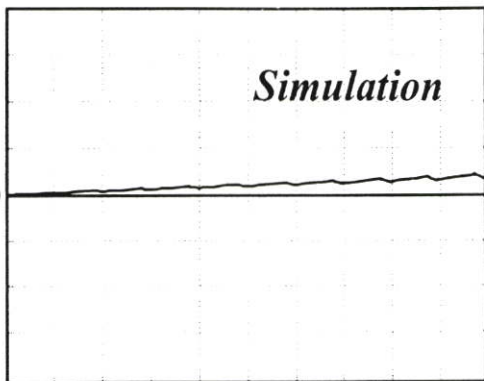


(d) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

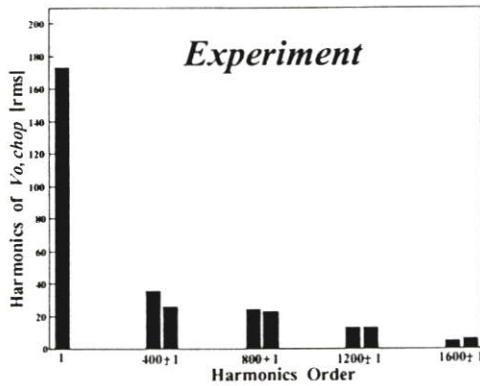
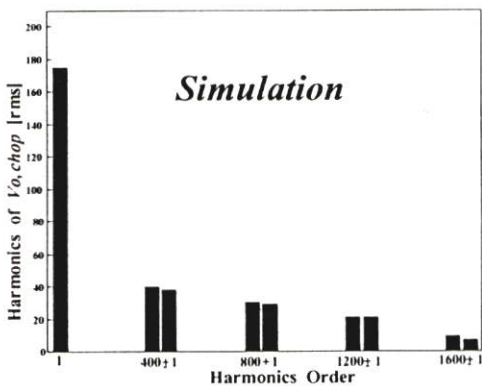


(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชอปเปอร์ $v_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

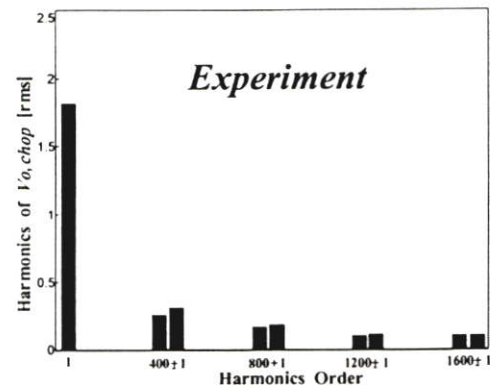
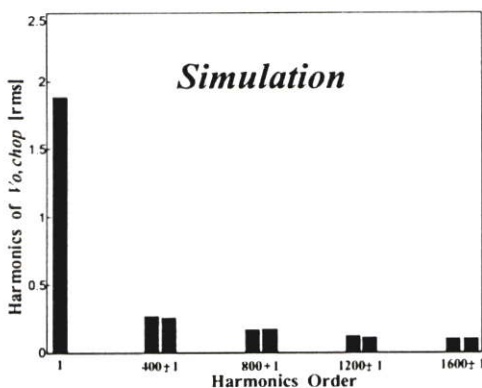
รูปที่ 5.24 ต่อ



(f) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div$, $x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

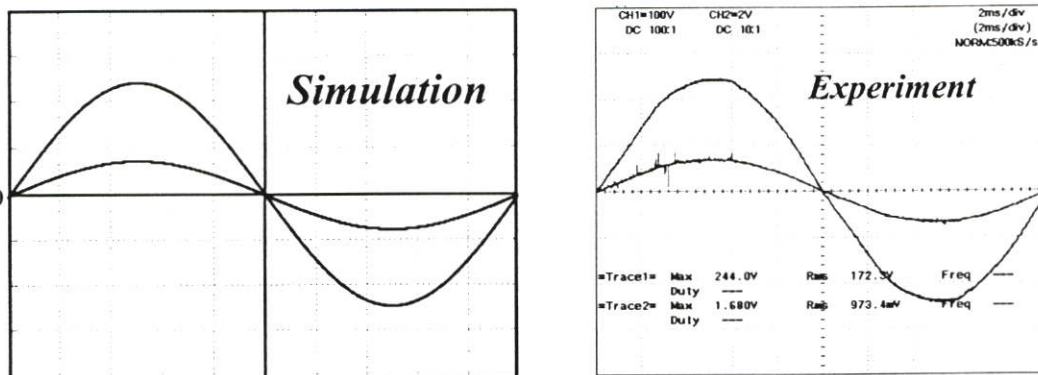


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

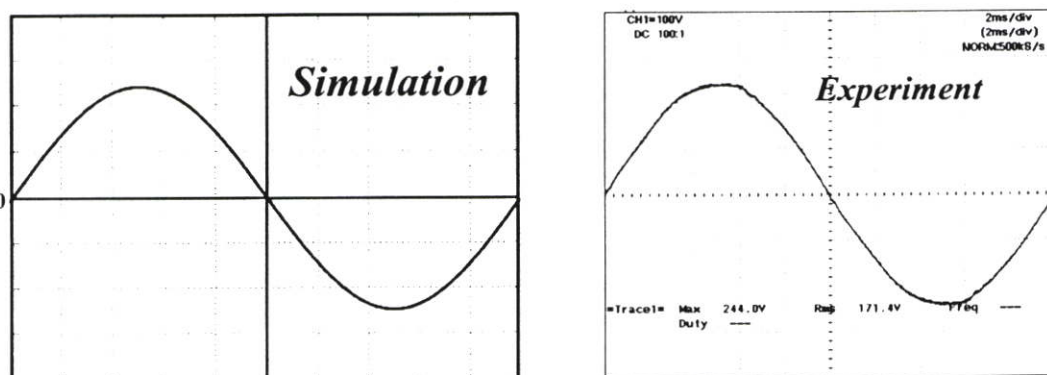
รูปที่ 5.24 ต่อ

5.2.3.8.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50Hz}$ และกระแส $i_{0.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอซีออปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 80 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีออปเปอร์ตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.25

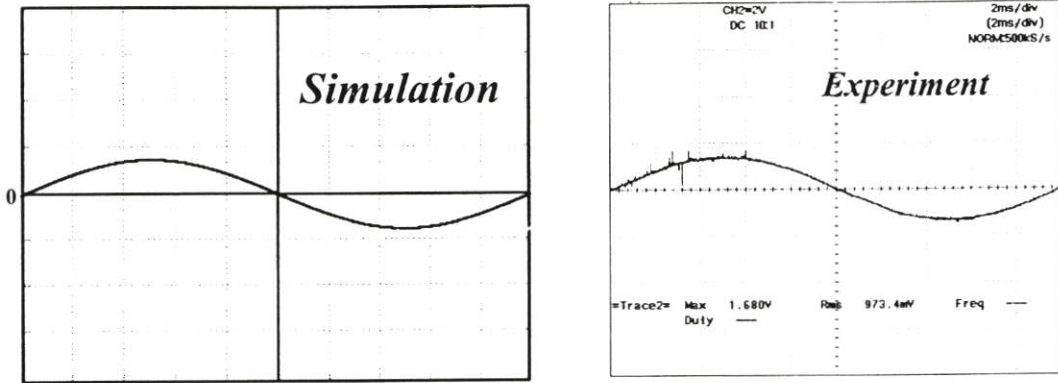


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชไอซีออปเปอร์ $i_{0.50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

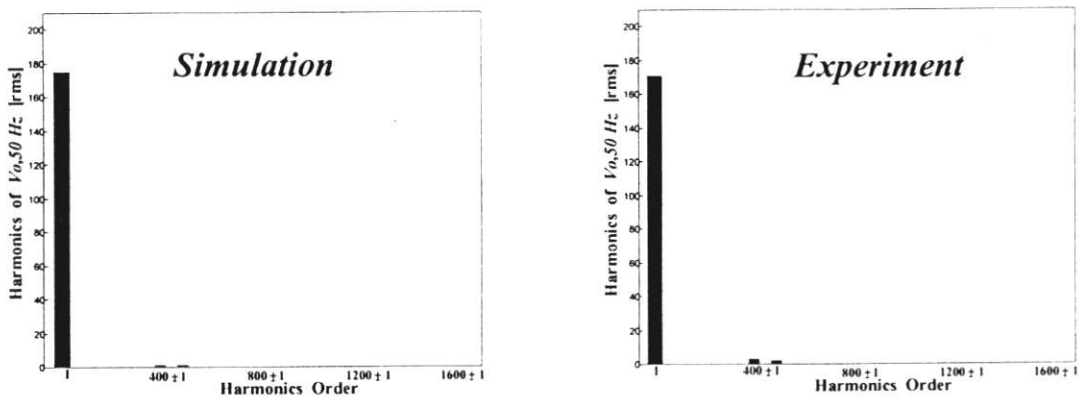


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{0.50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

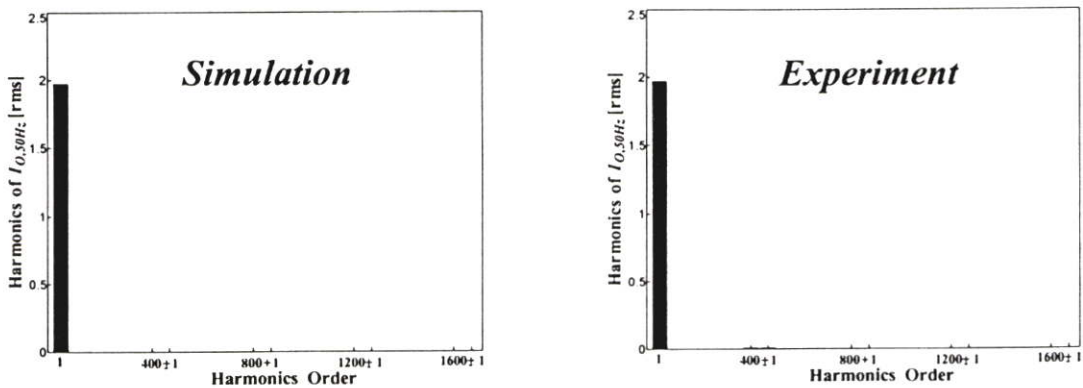
รูปที่ 5.25 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{0.50Hz}$ และกระแส $i_{0.50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอซีออปเปอร์สวิตช์ที่ค่าคิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 80 % มีความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz



รูปที่(c) คลื่นกระแสทางค่านเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ $i_{o,50Hz}$ ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงค่านเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



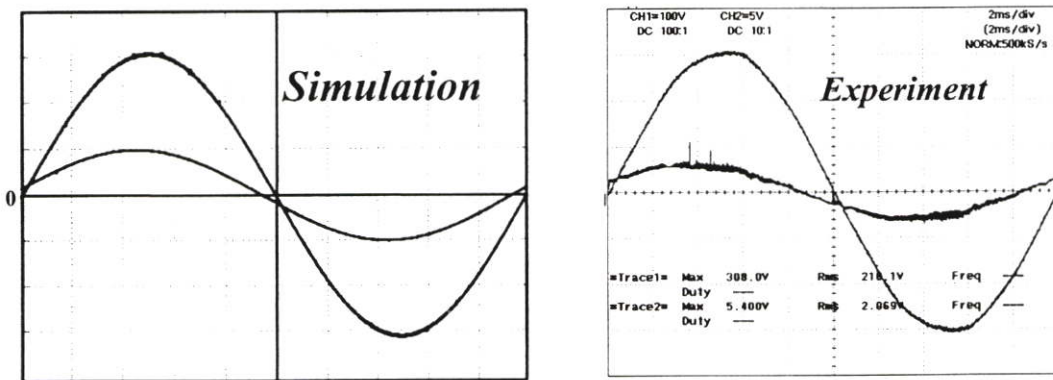
(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีอปเปอร์ $i_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่5.25 ต่อ

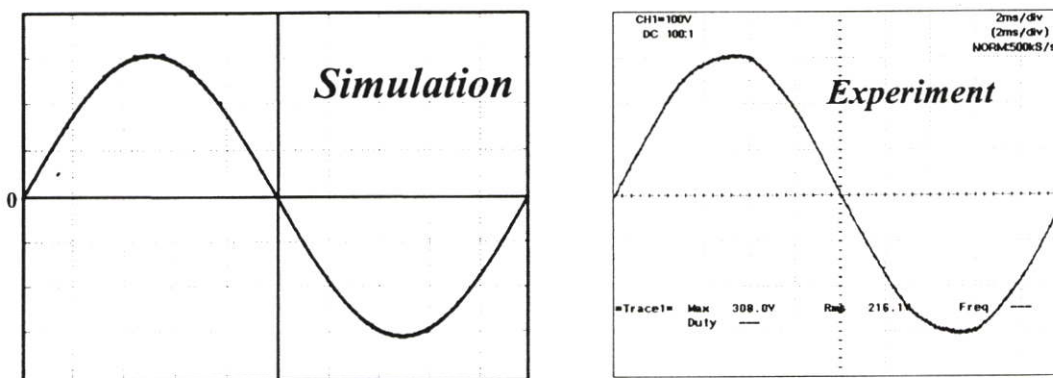
5.2.3.9 ในกรณีที่ค่าคิวดีไซ์เกิล 90 % ความถี่สวิทซ์ 20 kHz

5.2.3.9.1 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชไอชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าคิวดีไซ์เกิลเท่ากับ 90 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.26

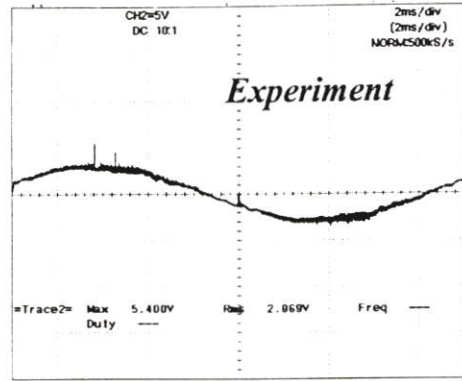
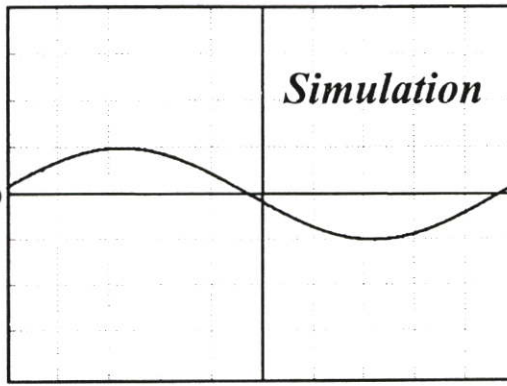


(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ i_s ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

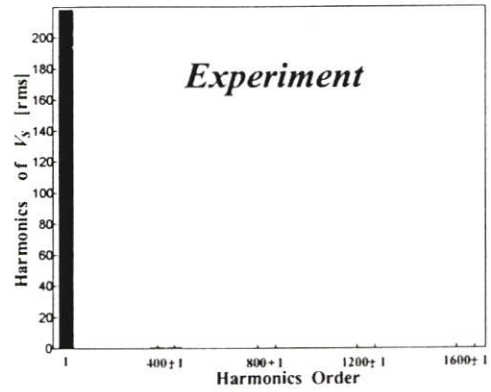
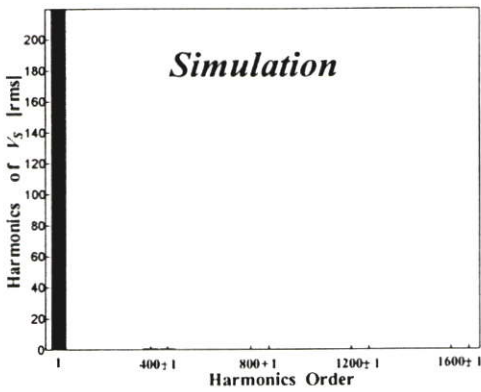


(b) คลื่นแรงดันอินพุตของวงจรเอชไอชอปเปอร์ v_s ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

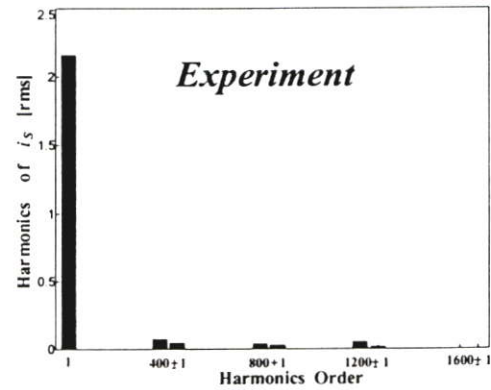
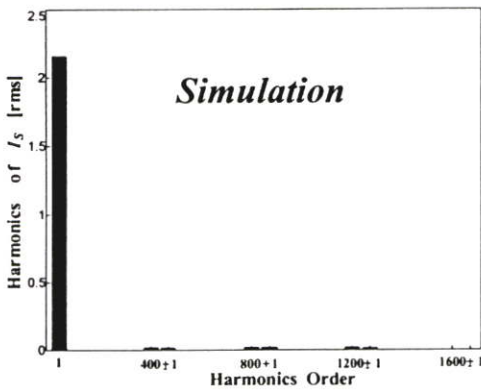
รูปที่ 5.26 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านอินพุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจร เอชไอชอปเปอร์สวิทซ์ที่ค่าคิวดีไซ์เกิลเท่ากับ 90 % มีความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 20 kHz



(c) คลื่นกระแสทางด้านอินพุตของวงจรเอซีชอปเปอร์ i_s ($y=5A/div$, $x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันอินพุตของวงจรเอซีชอปเปอร์: v_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

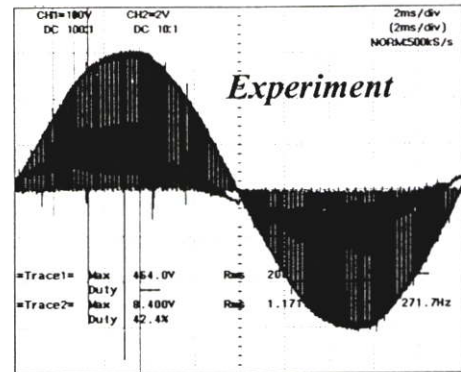
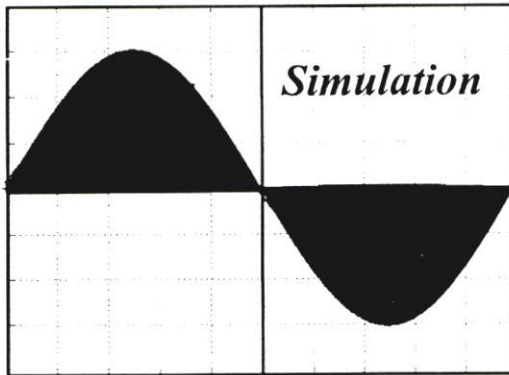


(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสอินพุตของวงจรเอซีชอปเปอร์: i_s ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

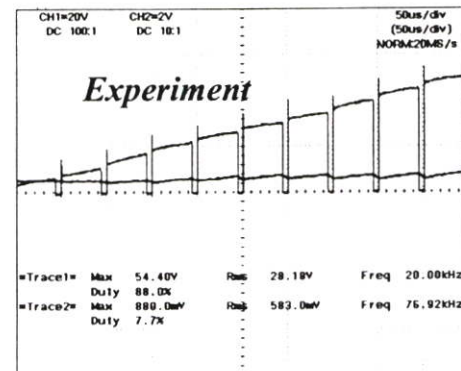
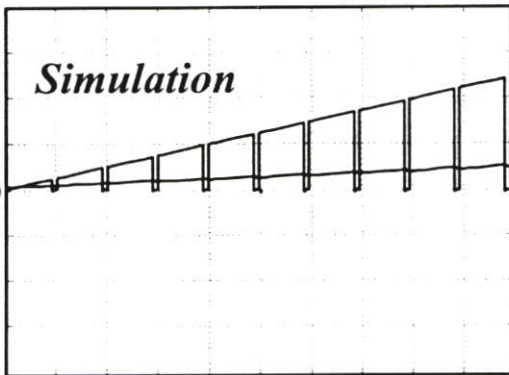
รูปที่ 5.26 ต่อ

5.2.3.9.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ และกระแส $i_{o, chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าดีวีไอซ์เกิดเท่ากับ 90 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชชอปเปอร์ตามจุดต่าง ๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.27

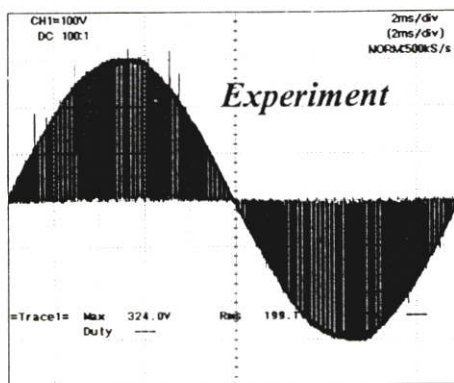
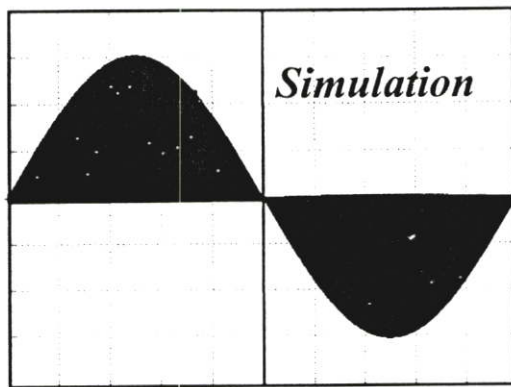


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

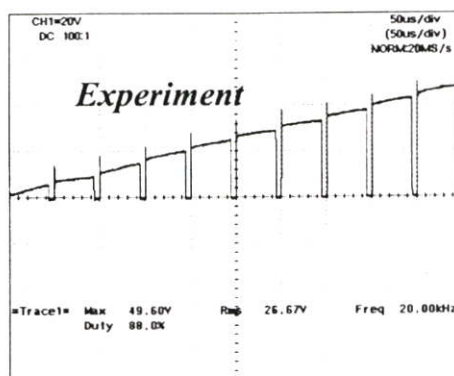
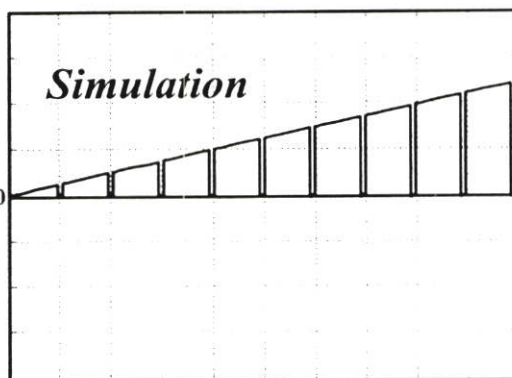


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรเอชชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

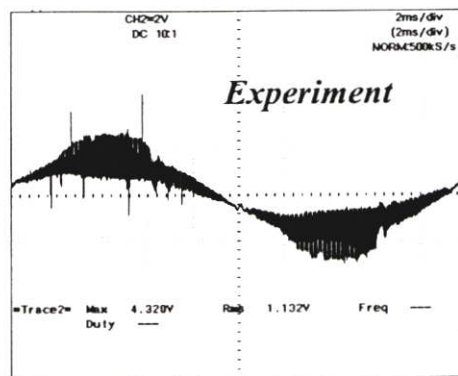
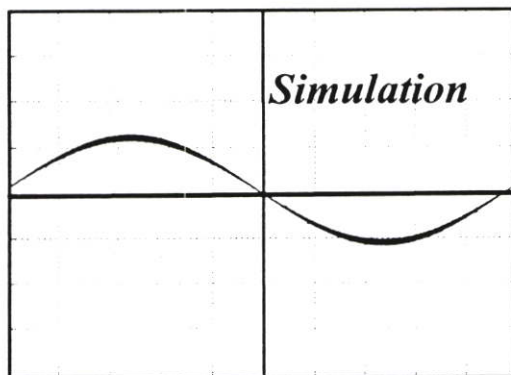
รูปที่ 5.27 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, chop}$ และกระแส $i_{o, chop}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าดีวีไอซ์เกิดเท่ากับ 90 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



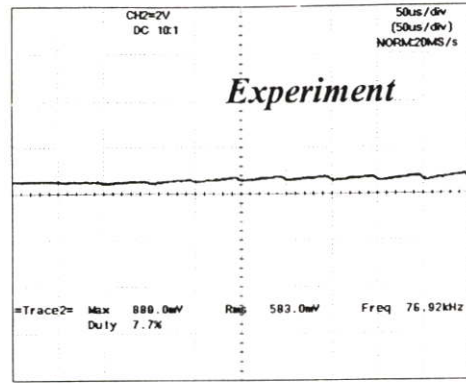
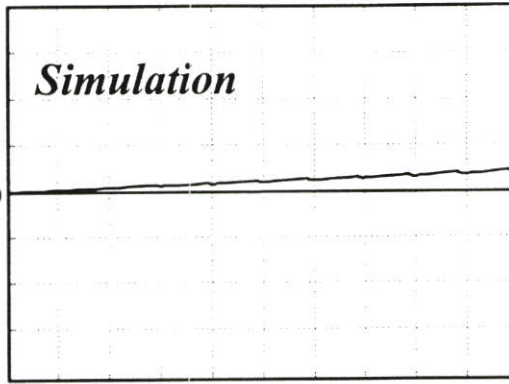
(c) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จาก การซิมูเลตและการทดลอง



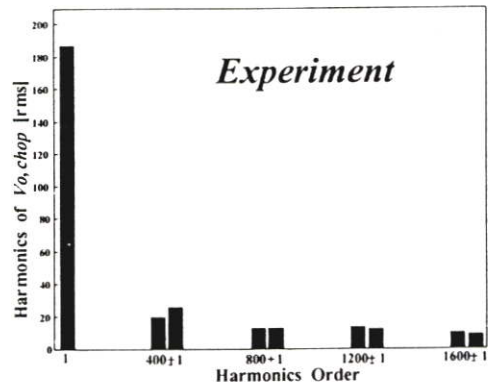
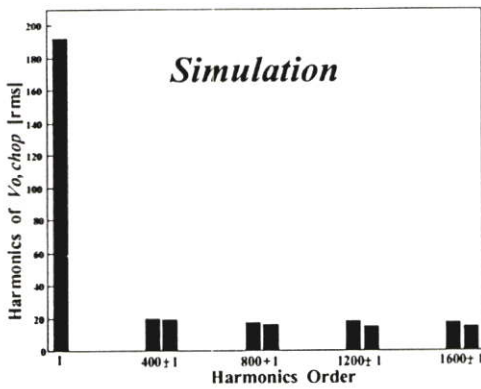
(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชซีชอปเปอร์ $v_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จาก การซิมูเลตและการทดลอง



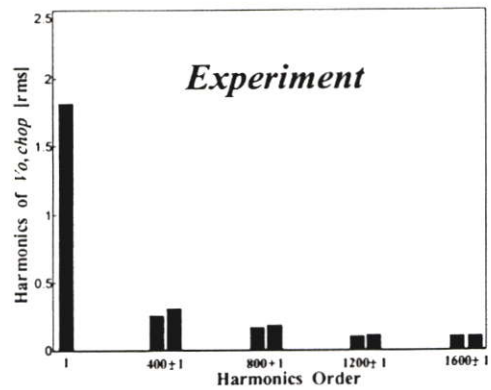
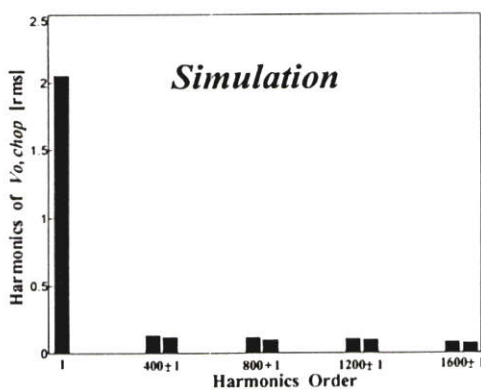
(e) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชซีชอปเปอร์ $i_{o,chop}$ ($y=2A/div, x=20ms/div$) ที่ได้จาก การซิมูเลตและการทดลอง



(f) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ ของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ($y=2A/div$, $x=50\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(g) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

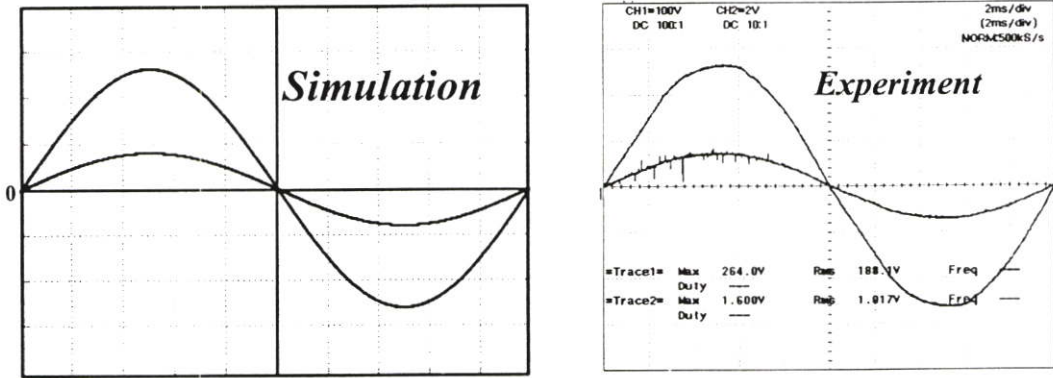


(h) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์ $i_{o, chop}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

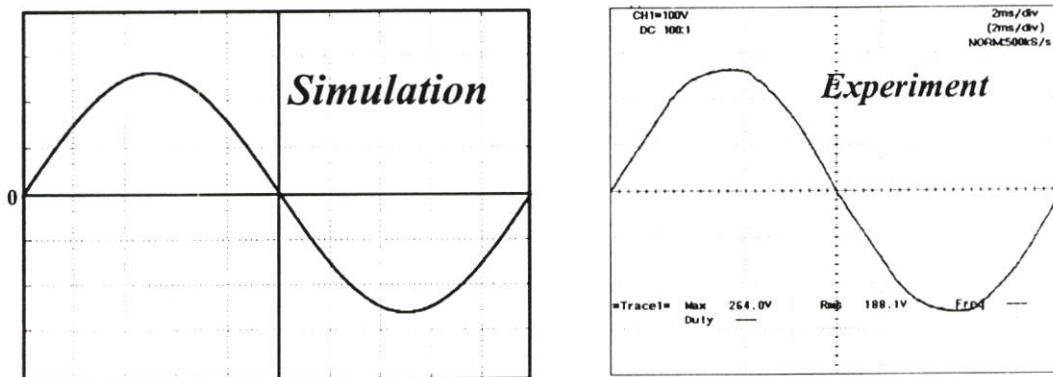
รูปที่ 5.27 ต่อ

5.2.3.9.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ และกระแส $i_{o,50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรถอเอาต์พุตเปอร์เซ็นต์ที่ค่าควิตซ์ไชเกิดเท่ากับ 90 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz

เมื่อนำคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรของเอชไอซีตามจุดต่างๆ มาซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.28

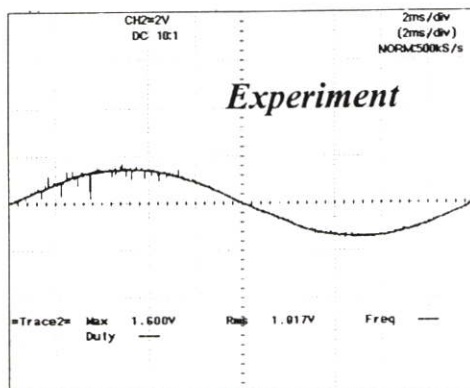
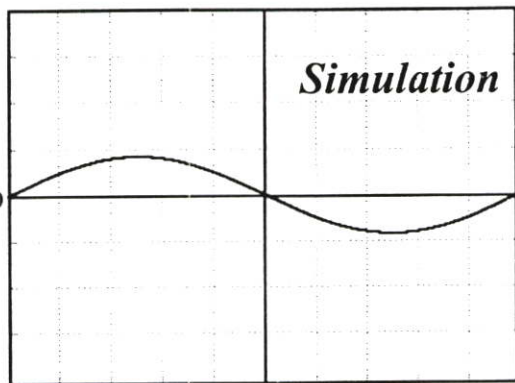


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) และกระแสทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ของวงจรถอเอาต์พุตเปอร์เซ็นต์ $i_{o,50Hz}$ ($y=2A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากซิมูเลตและการทดลอง

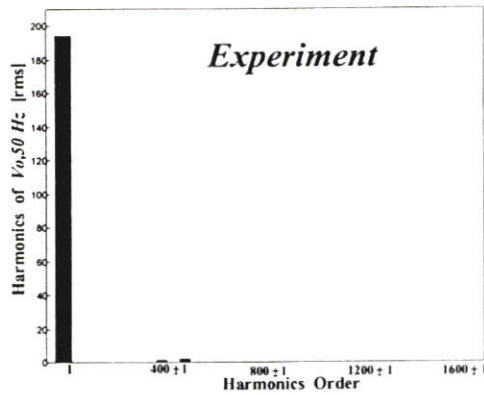
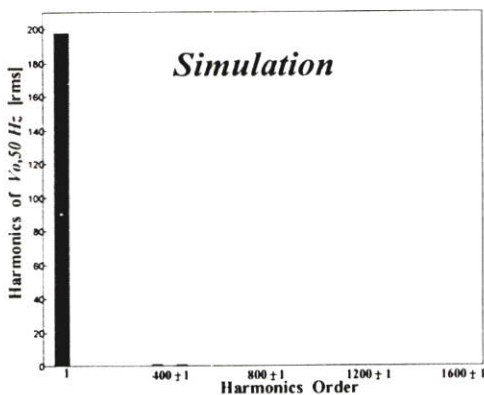


(b) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ ($y=100V/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากซิมูเลตและการทดลอง

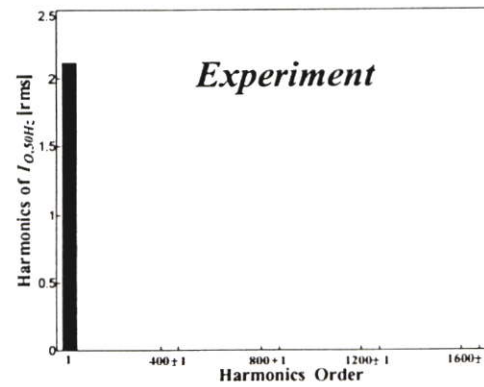
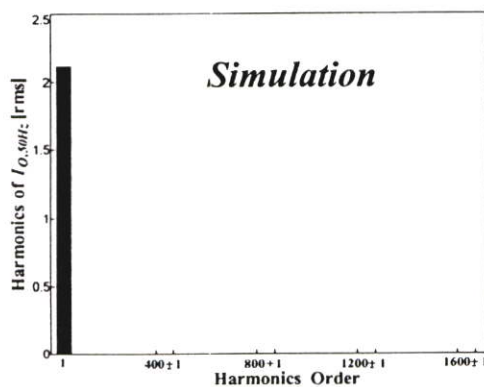
รูปที่ 5.28 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ และกระแส $i_{o,50Hz}$ ทางด้านเอาต์พุตพร้อมแถบสเปกตรัมในกรณีที่วงจรถอเอาต์พุตเปอร์เซ็นต์ที่ค่าควิตซ์ไชเกิดเท่ากับ 90 % มีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



รูปที่(c) คลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรซีชอปเปอร์ $i_{o,50Hz}$ ($y=5A/div, x=2ms/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(d) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรซีชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(e) ลักษณะสเปกตรัมกระแสเอาต์พุตของวงจรเรซีชอปเปอร์: $i_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 5.28 ต่อ

5.3 การหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุต P_{in} เอาต์พุต P_o และประสิทธิภาพ η ของเอชไอซีเอชไอซี

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลด และ กำลังไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz จะเป็นการนำคลื่น v_o , i_o และ v_{in} , i_{in} ตามลำดับมาทำการกระจายอนุกรมฟูเรียร์เพื่อให้ได้ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันและกระแสที่อันดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า และจากอันดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ดังกล่าวยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่ของโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz โดยนำโปรแกรม Matlab เข้ามาช่วยในการคำนวณ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่โหลดและกำลังไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz ค่าประสิทธิภาพ ค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่ของโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz เป็นดังนี้

5.3.1 กำลังไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz : P_{in}

$$P_{in} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{m,n} I_{m,n} \cos \theta_{m,n} \quad (5.1)$$

โดยที่

$V_{m,n}$ คือค่า rms ของแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz อันดับฮาร์โมนิกส์ที่ n ใดๆ

$I_{m,n}$ คือค่า rms ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50 Hz อันดับฮาร์โมนิกส์ที่ n ใดๆ

θ_n คือมุมเฟสของกระแส $I_{m,n}$ ที่ล่าช้าไปจากแรงดัน $V_{m,n}$

5.3.2 กำลังไฟฟ้าที่โหลดของวงจรเอชไอซีเอชไอซี : P_o

$$P_o = \sum_{n=1}^{\infty} V_{o,n} I_{o,n} \cos \varphi_{o,n} \quad (5.2)$$

โดยที่

$V_{o,n}$ คือค่า rms ของแรงดันทางโหลดของวงจรเอชไอซีเอชไอซีโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50Hz อันดับฮาร์โมนิกส์ที่ n ใดๆ

$I_{m,n}$ คือค่า rms ของกระแสทางโหลดของวงจรเอชไอซีเอชไอซีโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า 50Hz อันดับฮาร์โมนิกส์ที่ n ใดๆ

φ_n คือมุมเฟสของกระแส $I_{o,n}$ ที่ล่าช้าไปจากแรงดัน $V_{o,n}$

5.3.3 ประสิทธิภาพระหว่างโหลดของวงจรเอชซีชอปเปอร์กับทางด้านแหล่งจ่ายไชน์การ ไฟฟ้า 50 Hz : η

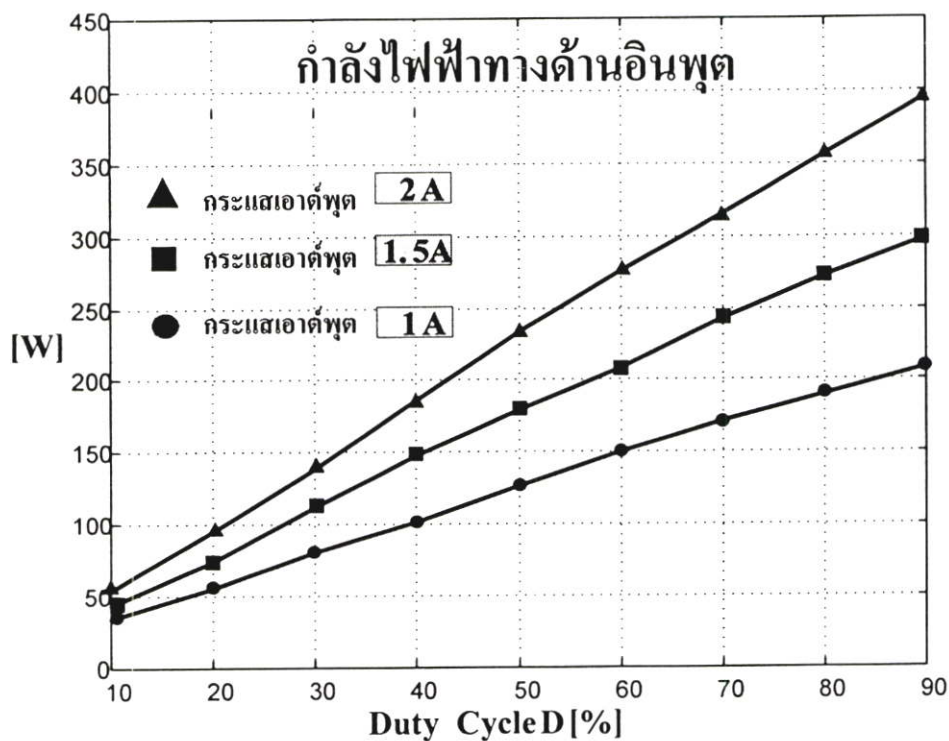
$$\eta = \frac{P_o}{P_m} \quad (5.3)$$

โดยที่

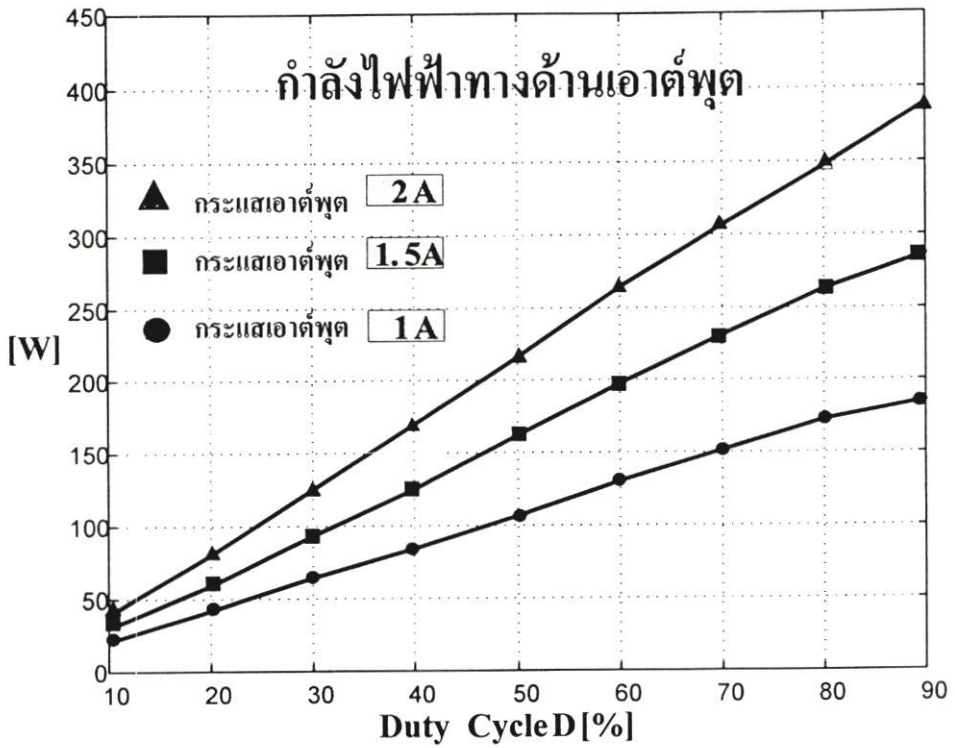
P_m คือค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์

P_o คือค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรเอชซีชอปเปอร์ที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์แล้ว

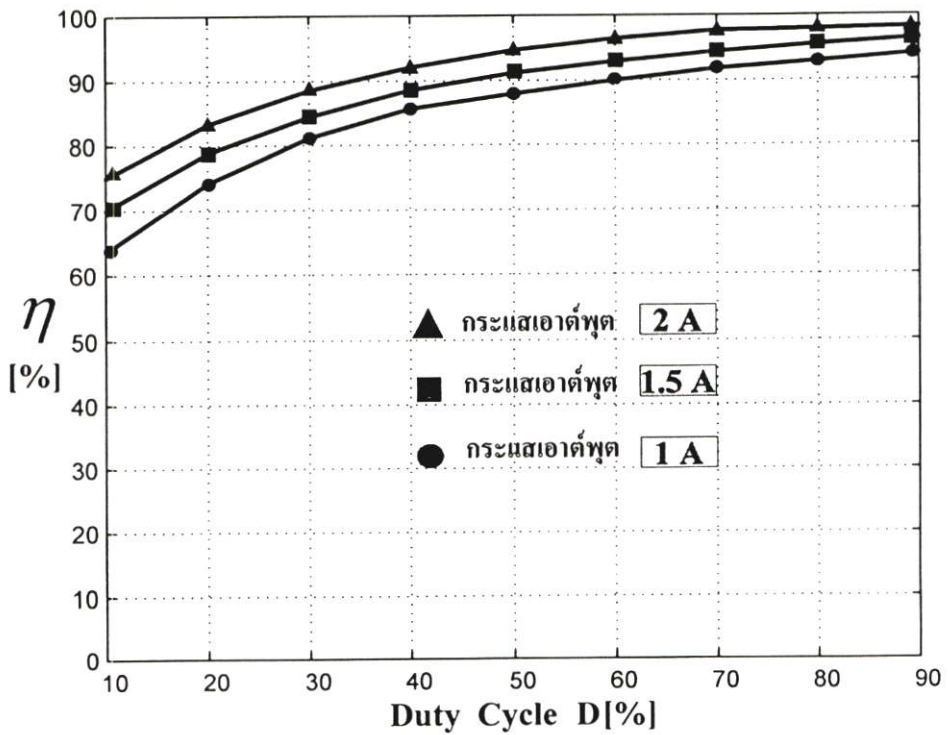
โดยได้แสดงค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับค่าตัวชี้วัดดังกราฟในรูปที่ 5.29 ,5.30 และ 5.31 โดยค่าที่ใช้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองจากชุดทดลองที่สร้างขึ้นจากการออกแบบ



รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินพุตกับค่าตัวชี้วัด



รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับค่าควิตซ์ไซเคิล



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับค่าควิตซ์ไซเคิลที่กระแสเอาต์พุตคงที่

5.4 สรุป

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการซิมูเลตโดยโปรแกรม PSpice กับผลที่ได้จากการทดลองจะเห็นได้ว่าลักษณะคลื่นตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง มีความใกล้เคียงกันพร้อมทั้งค่าที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน จึงสามารถเป็นการยืนยันได้ถึงความถูกต้องของงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และจากการที่ได้เก็บผลการทดลองในส่วนต่างๆ ทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ร่วมไปถึงวงจรที่ใช้สนับสนุนในการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ได้ดียิ่งขึ้นและได้รู้ถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องที่ใช้ในงานวิจัยอีกด้วย

บทที่ 6

สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้คำนวณวิเคราะห์โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์และการทดลองของวงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูงสามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

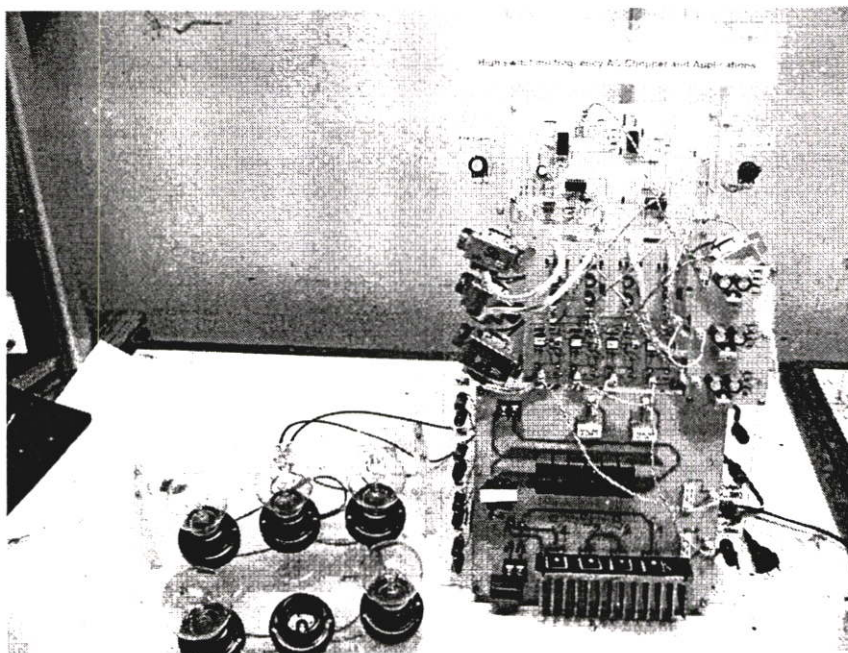
1. ได้ทำการศึกษาและสร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อใช้ผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบในการยืนยันเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการวิเคราะห์จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยในการสร้างเครื่องต้นแบบทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ การทำงานของ IC ชนิดต่างๆ การต่อวงจร IC ใช้งานในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ รวมไปถึงการนำสัญญาณที่ได้จากการต่อ IC ชนิดต่างๆ มาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ ทำให้ได้รู้ถึงหลักการทำงานของวงจรที่นำเสนอได้อย่างแท้จริงและสามารถนำความรู้ที่ได้จากการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้งานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่ออุปกรณ์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ ได้

2. จากการศึกษาถึงการทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ได้นี้ทำให้เข้าใจถึงลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตว่ามีฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงปะปนออกมาด้วยแต่สามารถทำให้คลื่นฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงถูกกำจัดออกไปได้โดยใช้วงจร LC ฟิลเตอร์ ซึ่ง LC ฟิลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดเล็กและสามารถกรองทิ้งฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไปเพื่อไม่ให้ออกมาทางด้านเอาต์พุต ในขณะที่เดียวกันก็จะให้แรงดันความถี่ต่ำ 50Hz ผ่านไปได้เกือบทั้งหมด โดยในงานวิจัยนี้ก็ว่าได้แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของวงจร LC ฟิลเตอร์ไว้อย่างละเอียด

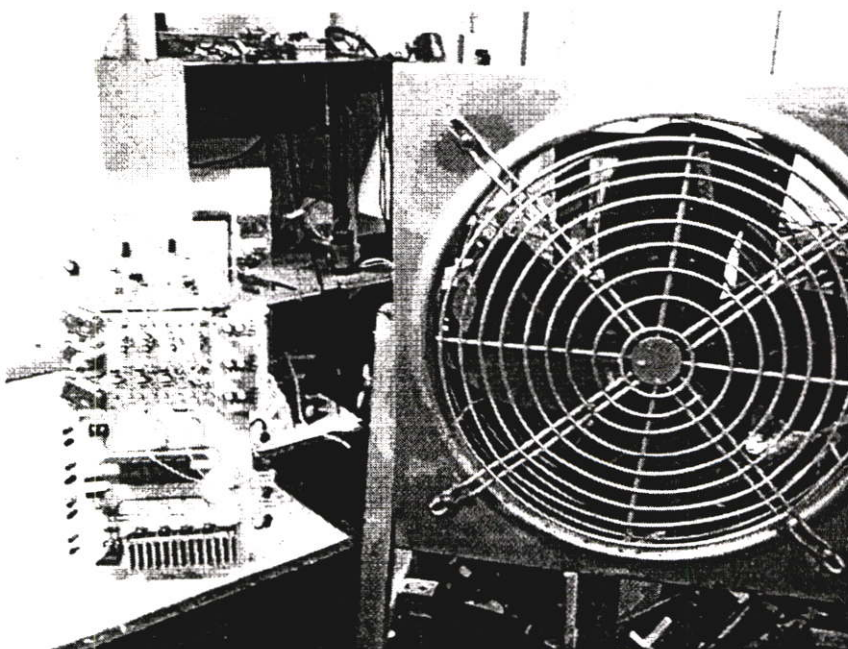
3. จากการทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์ที่นำเสนอนี้ทำให้เข้าใจว่าวงจรเอชชอปเปอร์ไม่สามารถทำงานได้เพียงลำพังแต่จะต้องมีอุปกรณ์ช่วยเสริมเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ โดยต่อเพิ่มวงจร RC สนับเบอร์ เพื่อช่วยลดทอนระดับแรงดันสไปค์ในจังหวะที่มีการ OFF มิฉะนั้นแรงดันสไปค์ดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์สวิตช์เนื่องจากทำงานที่ระดับแรงดันเกินพิกัด ดังนั้นวงจรสับเบอร์จึงเป็นอุปกรณ์ช่วยที่สำคัญที่จะขาดเสียมิได้ในวงจรเอชชอปเปอร์ นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเอชชอปเปอร์ที่มีวงจรสับเบอร์ต่อร่วมด้วยอย่างละเอียดโดยได้แสดงการทำงานในแต่ละช่วงของการสวิตช์ ในขณะที่เก็บประจุและ การคายประจุของ C ทั้งโดยการขมิบเลขขึ้นและการทดลองเปรียบเทียบผลซึ่งกันและกันเพื่อยืนยันความเข้าใจในทางทฤษฎีควบคู่กับทางปฏิบัติ

4. สามารถสร้างแรงดันคลื่นไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับในลักษณะเป็นพัลส์ความถี่สูงในระดับ 20 kHz โดยพัลส์ความถี่สูง 20 kHz ที่ได้นี้สามารถปรับค่าควิตีไซเคิลได้จาก 10%-90% เพื่อปรับค่า (rms) ของแรงดันของเอาต์พุต โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเอชชอปเปอร์นี้จะถูกนำไปผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ เพื่อกรองให้ได้ คลื่น ไซน์ 50 Hz ที่สามารถปรับควบคุมแรงดันได้ในย่าน 0-200V

โดยแรงดันควบคุมที่ได้นี้มีประโยชน์ในการนำไปประกอบเป็นชุดเครื่องรักษาระดับแรงดัน หรือนำไปใช้เป็นชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เฟสเดียวตลอดจนนำไปใช้เป็นชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับโหลดที่เป็นขดลวดความร้อน (Heater)



รูปที่ 6.1 ชุดทดลองของวงจรเอชไอพีเออร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟ 500 วัตต์



รูปที่ 6.2 ชุดทดลองของวงจรเอชไอพีเออร์ที่จ่ายโหลดมอเตอร์พัดลมขนาด 1/4 แรงม้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.-H. Kim and B.-H. Kwon “**Three-phase ideal phifter using AC choppers**” IEE Proc.-
Electr. Power Appl., Vol. 147, No. 4, July 2000, pp. 329-335.
- [2] Yo Hongxiang, Lin Min and Ji Yanchao “**An Advanced Harmonic
Elimination PWM Technique for AC Choppers**” IEEE Power Electronics
Specialists Confererce., Aachen, Germany, Vlo.1, 20-25 June 2004, pp. 161-165.
- [3] N.A. Ahmed, K.Amei, M. Sakui,Membre,IEEE “**A new configuration of single-phase
symmetrical PWM AC chopper voltage controller**” IEEE Transactions on
Industral Electrnics, Vol 46 No. 5, October 1999,pp. 943-952
- [4] N. Abd El-Latif Ahmed, K.Amei, M. Sakui, “**Improved circuit of AC choppers for
single-phase systems**” PCC Nagaoka 1997 , pp. 907-912
- [5] H. Bodur, A.F.Bakan, M.H.Sarul, “**Universal motor Speed control with current
Controlled PWM AC chopper by using a microcontroller** ” IEEE Vol 1, 19-20
Jan 2000 ,pp. 394-398
- [6] M.E. Balci, M.H. Hocaoglu, “ **Effects of Source Voltage Harmonic Distortion on
Power Factor Compensation in Triac Controlled AC Chopper Circuits**”
Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International
Conference on Vol 2, Issue ,28-01 Nov. 2005 ,pp1199 – 1204
- [7] G.-H. Choe , A.K . Wallace , M.-H .Park , “**An Improved PWM technique for AC
choppers** ” Power Electronics, IEEE TransactionsonVol 4, Issue 4, Oct. 1989
,pp496 – 505
- [8] J.-H. Kim , B.-D. Min.And B.-H. Kwon “**Novel topologies of AC choppers**” Eetric
Power Applications, IEE Proceedings. IEE Proceedings Vol.143, Issue 4, July 1996
Page(s) : 323-330
- [9] J.-H. Kim , B.-D. Min., B.-H. Kwon and Won “**A PWM buck-boost AC chopper solving
the commutation problem**” Industrial Electronics, IEEE Transactions on
Volume 45, Issue 5, Oct. 1998 Page(s):832 - 835
- [10] Do-Hyun Jang; Gyu-Ha Choe; Ehsami, “**Asymmetrical PWM technique with harmonic
elimination and power factor control in AC choppers**” Power Electronics, IEEE
Transactions onVolume 10, Issue 2, March 1995 Page(s):175 - 184

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

นายณัฐวุฒิ พลชะติน และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ “การวิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันเอซีปรับค่าได้แบบสแตติก” วิศวกรรมลาดกระบัง Ladkrabang Engineering Journal คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตีพิมพ์ในปีที่ 24 ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2550



วิศวกรรมลาดกระบัง

Ladkrabang Engineering Journal

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

วันที่ 16 พฤษภาคม 2550

เลขที่อ้างอิง 1176

เรื่อง การตอบรับบทความ

เรียน คุณณัฐวุฒิ พลชะดิน วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง การวิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันเอซีปรับค่าได้แบบสแตติก (Analysis and Design of Static Variable AC Voltage Source) มาให้พิจารณาเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง บัดนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการพิจารณาแล้วเห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 24 ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2550

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

การวิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันเอซีปรับค่าได้

แบบสแตติก

Analysis and Design of Static Variable

AC Voltage Source

ณัฐวุฒิ พลชะติน วิริยะ พิเชษฐจำเริญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ. ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 02-7373000 ต่อ 3516 Email : kpviriya@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้ได้กล่าวถึงหลักการนำวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปใช้ในการสร้างคลื่นแรงดันเอซีชอป พร้อมกับการนำคลื่นแรงดันที่ได้ไปคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ รวมทั้งขนาดของคลื่นพินคาเมนทอลที่ค่าควิตซ์ไซเคิลต่างๆ ของพัลส์เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจร LC ฟิลเตอร์ ซึ่งใช้ในการกรองคลื่นฮาร์มอนิกส์เหล่านี้ตั้งแต่ลำดับต่ำสุดเท่ากับ 400 สำหรับกรณีความถี่สวิตซ์ที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งปรากฏว่าได้คลื่นไซน์ 50 เฮิร์ตซ์ ทางด้านเอาต์พุตที่สามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 0-200 โวลต์ โดยการปรับค่าควิตซ์ไซเคิลตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซนต์

Abstract

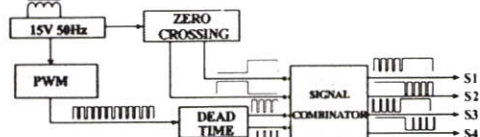
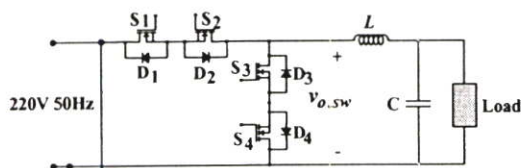
This paper presents a principle of 20-kHz ac chopper used to develop an ac chopped voltage with its fundamental and harmonic amplitude analyzed at various duty-cycle pulsewidth which is necessary for LC-filter circuit parameters design. The filtering is effective from the lowest harmonic order of 400 for the switching frequency of 20-kHz. Consequently, a variable ac voltage of 0-200 volts with 50 Hz sinusoidal waveform by duty-cycle control from 0-1 is obtained at the output of the ac chopper.

1. บทนำ

ในงานที่ต้องการแรงดันที่มีลักษณะคลื่นไซน์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่สามารถปรับขนาดแรงดันได้อย่างต่อเนื่องในช่วงกว้าง ตั้งแต่ระดับแรงดันศูนย์จนถึงระดับสูงสุด 200 โวลต์ สามารถทำได้โดยการนำเอาแรงดัน ไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ มาผ่านวงจรเอซีชอปเปอร์ดังรูปที่ 1 ซึ่งทำงานที่ความถี่สวิตซ์ในระดับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ พร้อมกับผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ห้วงจรเอซีชอปเปอร์อย่าง

เป็นขั้นตอน ตั้งแต่การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรในแต่ละโหมดการทำงาน จากนั้นได้นำคลื่นไซน์ที่ถูกชอปด้วยความถี่สูง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ มาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่มีปะปนในตัวคลื่นเอซีชอป องค์ประกอบที่ได้นี้สามารถนำข้อมูลไปออกแบบเพื่อกำหนดค่า LC ในวงจรฟิลเตอร์ได้ ผลปรากฏว่า LC ที่ใช้ในการออกแบบมีขนาดเล็กและสามารถปล่อยผ่านคลื่นไซน์ 50เฮิร์ตซ์ ออกไปยังเอาต์พุต

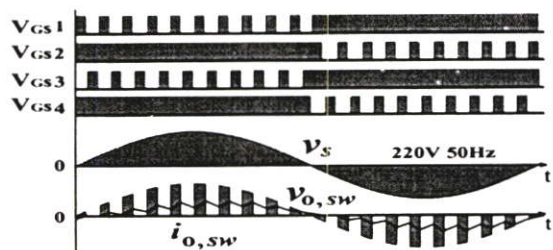
ได้เกือบหมด ในขณะที่องค์ประกอบฮาร์มอนิกเส้น
ลำดับต่ำสุดที่ 400 จะถูกรองทิ้งได้เกือบหมดผลปรากฏ
ว่าแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะคลื่น 50 เฮิร์ตซ์ใกล้เคียงไซน์
มาก พร้อมทั้งสามารถปรับขนาดของแรงดัน RMS นี้ได้
ตั้งแต่ 0 - 200 โวลต์



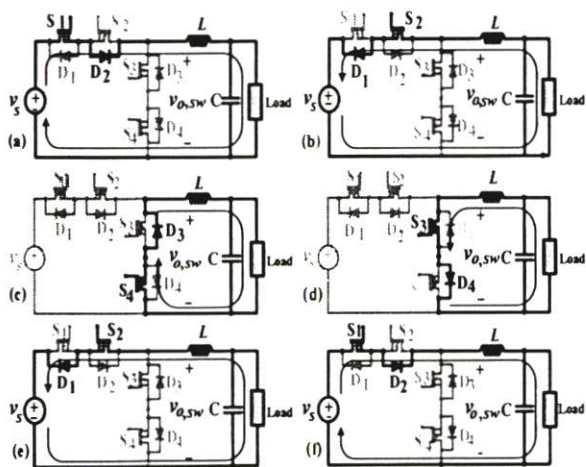
รูปที่ 1 วงจรเอชไอเอชเอช

2. โหมดการทำงานของวงจรเอชไอเอชเอช

เมื่อป้อนสัญญาณกระตุ้นเกทในรูปที่ 2 ให้กับ
สวิตช์ในวงจรรูปที่ 1 ซึ่งมีแรงดันไซน์การไฟฟ้า v_s เป็น
อินพุตก็จะ ได้ลักษณะของคลื่นแรงดัน $v_{o,sw}$ และ
กระแส $i_{o,sw}$ ด้านเอาต์พุตดัง ในรูปที่ 2 ซึ่งรายละเอียด
การทำงานของวงจรสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 ลักษณะสัญญาณขับเคลื่อนและคลื่นอินพุตเอาต์พุต



รูปที่ 3 การทำงานของสวิตช์และไดโอดของแต่ละ
โหมด

2.1 โหมดจ่ายกำลัง (Powering Mode)

เป็นโหมดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากแหล่งจ่าย
ไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ไปยังโหลดในช่วงที่แรงดัน
และกระแสเอาต์พุตเป็นบวกในครึ่ง ไซเคลิบวกของ
แรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ดังวงจรรูปที่ 3 (a)
หรือในช่วงแรงดันและกระแสเอาต์พุตเป็นลบในครึ่ง
ไซเคลิบวกของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ดังวงจร
รูปที่ 3(b)

2.2 โหมดฟรีวีล (Freewheeling Mode)

เป็นโหมดที่วงจรไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าจาก
แหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ แต่ให้กำลังไฟฟ้าที่อยู่ใน
 L_{filter} จ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้โหลดในขณะที่แรงดัน
เอาต์พุตเป็นศูนย์และกระแสเอาต์พุตเป็นบวกซึ่งเกิด
ในช่วงครึ่ง ไซเคลิบวกของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50
เฮิร์ตซ์ ดังวงจรรูปที่ 3(c) หรือในช่วงแรงดันเอาต์พุตเป็น
ศูนย์และกระแสเอาต์พุตเป็นลบซึ่งเกิดในช่วงครึ่ง ไซเคลิ
ลบของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ดังวงจรรูปที่
3(d)

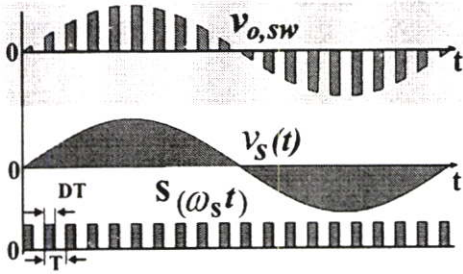
2.3 โหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Mode)

เป็นโหมดที่แหล่งจ่ายไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์
รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลดในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเป็น
ลบและกระแสเอาต์พุตเป็นบวกในบริเวณครึ่ง ไซเคลิบ
วกของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ดังวงจรรูปที่ 3(e)
หรือในช่วงแรงดันเอาต์พุตเป็นบวกและกระแสเอาต์พุต
เป็นลบในบริเวณครึ่ง ไซเคลิบวกของแรงดันไซน์การ
ไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ดังวงจรรูปที่ 3(f)

3. การวิเคราะห์หาสมการและคลื่นแรงดันเอาต์พุต

3.1 การวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต

แรงดันเอาต์พุตของเอชไอเอชเอช $v_{o,sw}$ ที่ยังไม่
ผ่านวงจรฟิลเตอร์ ดังในรูปที่ 2 สามารถแทนด้วยคลื่นที่
เกิดจากการนำเอาคลื่นแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์
ซึ่งเป็นอินพุตของวงจรเอชไอเอชเอชคูณด้วยสวิตซ์
ฟังก์ชันที่มีลักษณะเป็นคลื่น EPWM ที่มีความสูงเท่ากับ 1
และสามารถปรับค่าดีวตีไซเคิล (D) ได้จาก 0 - 1 โดย
กำหนดให้เป็น $s(\omega_s t)$ แนวคิดดังกล่าวนี้สามารถแสดง
ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การได้มาของแรงดันเอาต์พุตจากการนำสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันคูณกับแรงดันอินพุต

แรงดันคลื่นไซน์ การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ มีค่าดังสมการ(1)

$$v_s(t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (1)$$

โดยที่ V_s คือค่า rms ของแรงดันไซน์ 50 เฮิร์ตซ์ ในการคำนวณหาสมการของแรงดันเอาต์พุต $v_{o,sw}$ ที่เกิดจากผลคูณระหว่างแรงดันไซน์ 50 เฮิร์ตซ์ $v_s(\omega t)$ กับสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันความถี่สูง $S(\omega_s t)$ ก่อนอื่นจะต้องทำการวิเคราะห์หาสมการของสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$ ในรูปที่ 4 จากนั้นจึงนำไปคูณกับแรงดันไซน์ในสมการ (1) ซึ่งสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์ของ $S(\omega_s t)$ ดังสมการต่อไปนี้

$$S(\omega_s t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_n \cos k\omega_s t + b_n \sin k\omega_s t] \quad (2)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ a_n, a_n และ b_n มีค่าดังนี้

$$a_0 = 1/T(DT/2 + DT/2) \quad \text{หรือ} \quad a_0 = D$$

$$a_n = 1/\pi k [\sin kt]_{D\pi}^{\pi} \quad \text{หรือ} \quad a_n = 2 \sin(kD\pi) / \pi k$$

$$b_n = 1/\pi k [\cos k(-D\pi) - \cos kD\pi] \quad \text{หรือ} \quad b_n = 0$$

เมื่อแทนสัมประสิทธิ์ a_n, a_n และ b_n ของอนุกรมฟูเรียร์ในสมการ (2) จะได้สมการของ สวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันดังนี้

$$S(\omega_s t) = D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin(kD\pi)}{k\pi} \cos(k\omega_s t) + \sum_{k=1}^{\infty} (0) \sin k\omega_s t \quad (3)$$

$$S(\omega_s t) = D + \frac{2 \sin(D\pi)}{\pi} \cos(\omega_s t) + \frac{2 \sin(2D\pi)}{2\pi} \cos(2\omega_s t) + \dots + \frac{2 \sin(nD\pi)}{n\pi} \cos(n\omega_s t) \quad : k = 1, 2, 3, \dots n \quad (4)$$

โดยที่ ω_s คือความถี่เชิงมุมของสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$

k คือลำดับฮาร์โมนิกของสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชัน = 1, 2, 3, ...

เมื่อนำสมการ (3) ของสวิตซ์ซึ่งฟังก์ชันคูณกับสมการของแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ จะได้สมการของแรงดันเอาต์พุต $V_{o,sw}$ ดังนี้

$$v_{o,sw}(t) = v_s(t)S(\omega_s t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \left(D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin(kD\pi)}{k\pi} \cos(k\omega_s t) \right)$$

$$v_{o,sw}(t) = D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(D\pi) \cos(\omega_s t)}{\pi} + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(2D\pi) \cos(2\omega_s t)}{2\pi} + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(3D\pi) \cos(3\omega_s t)}{3\pi} + \dots$$

$$\frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(nD\pi) \cos(n\omega_s t)}{n\pi} \quad : k = 1, 2, 3, \dots n \quad (5)$$

จากสมการ (5) ในกรณีกำหนดให้ $D=1$ จะได้ $v_{o,sw}(t)$ ดังสมการ

$$v_{o,sw}(t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(\pi) \cos(\omega_s t)}{\pi} + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(2\pi) \cos(2\omega_s t)}{2\pi} + \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(3\pi) \cos(3\omega_s t)}{3\pi} + \dots$$

$$\frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(n\pi) \cos(n\omega_s t)}{n\pi} \quad : k = 1, 2, 3, \dots n$$

$$v_{o,sw}(t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) สามารถคำนวณได้ว่าเมื่อปรับค่า $D = 1$ จะได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันอินพุต

สมการที่(5)เมื่อเขียนใหม่จะได้ดังสมการ (7)

$$v_{o,sw}(t) = D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \sin(kD\pi) \cos(k\omega_s t)}{k\pi}$$

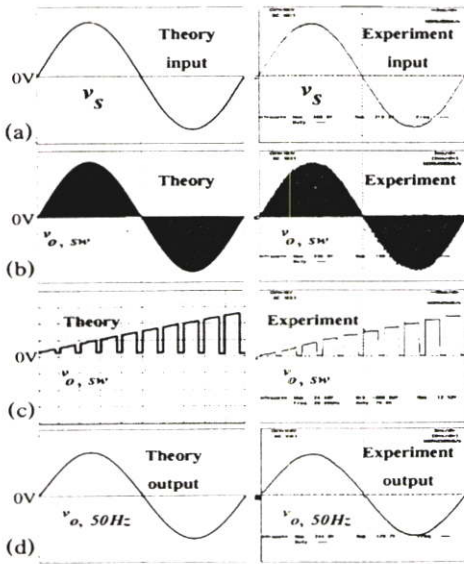
$$= D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}V_{o,swk} \cos[(k\omega_s \pm \omega)t] \quad (7)$$

โดยที่ $V_{o,swk}$ คือค่า rms ขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ k ซึ่งมีค่าเป็น

$$V_{o,swk} = V_s \sin(kD\pi) / k\pi \quad (8)$$

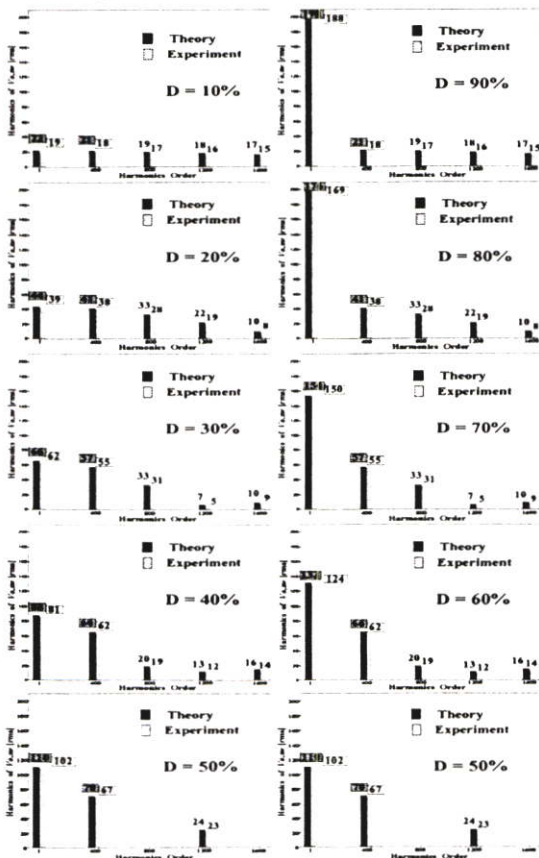
3.2 การวิเคราะห์หาค่าคลื่นแรงดันเอาต์พุต

แรงดันไซน์ความถี่ต่ำจากไลน์การไฟฟ้า 50-Hz ในรูปที่ 5(a) เมื่อป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรเรซีซอปเปอร์จะได้แรงดันเอาต์พุต $V_{o,sw}$ ซึ่งมีค่าดังสมการ (7) จะประกอบด้วยความถี่ต่ำ 50 เฮิร์ตซ์ รวมอยู่กับความถี่สูง $k \times (20kHz) \pm 50Hz$ ซึ่งแสดงลักษณะคลื่นพร้อมรายละเอียดได้ดังรูปที่ 5(b) หรือ 5(c) และเมื่อนำคลื่น $V_{o,sw}$ ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์องค์ประกอบความถี่สูงของ $V_{o,sw}$ จะถูกกรองทิ้งเหลือแค่แรงดันเอาต์พุตที่มีองค์ประกอบความถี่ต่ำ 50 เฮิร์ตซ์ เท่านั้นซึ่งเป็นคลื่นไซน์ที่สามารถปรับแอมปริจูดได้ โดยการปรับค่าควิตีไซเคิล (D) ที่มีลักษณะคลื่นจากการซิมูเลตและการทดลองดังรูปที่ 5(d)



รูปที่ 5 รูปคลื่นการซิมูเลตกับกราฟทดลอง

องค์ประกอบฮาร์มอนิกของคลื่น $V_{o,sw}$ ในรูป 5(b) ในทางทฤษฎีนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) ซึ่งเมื่อป้อนค่าคำนวณและแสดงในรูปสเปกตรัมจะได้องค์ประกอบฮาร์มอนิกของคลื่นที่ค่าคิวตี้ไซเคิล D ต่าง ๆ ดังรูปที่ 6 ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง



รูปที่ 6 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันเอาต์พุต $V_{o,sw}$ ที่ค่าเปอร์เซ็นต์คิวตี้ไซเคิล (D) ต่างๆ

เพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อนำ $V_{o,sw}$ ผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์แล้วจะได้แรงดันเอาต์พุต เป็นคลื่นไซน์ที่ไม่มียอดประกอบฮาร์มอนิกส์ ความถี่สูงปะปนอยู่ด้วย สามารถแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของแรงดันความถี่ต่ำและความถี่สูงที่สามารถผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้ โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงดันพีนคาเมนทอล 50 เฮิรตซ์และแรงดันฮาร์มอนิกส์ 20 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งใช้ข้อมูลจากสเปกตรัมในรูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงดันความถี่ต่ำ จะสามารถผ่านวงจรฟิลเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่แรงดันความถี่สูง จะผ่านวงจรฟิลเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้น้อยมาก ซึ่งได้แสดงคิงในสมการ (9)และ(10)

$$\left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{o,50Hz} = 1 \times V_{o,50Hz} \dots \omega L \ll \left(\frac{1}{\omega C} \right) \quad (9)$$

$$\left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{o,20kHz} = 0 \times V_{o,20kHz} \dots \omega L \gg \left(\frac{1}{\omega C} \right) \quad (10)$$

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กับ 50 เฮิรตซ์

ที่ความถี่ 50 HZ		ที่ความถี่ 20 KHZ			
$\omega L = 0.471 \Omega$ $\frac{1}{\omega C} = 234 \Omega$		$\omega L = 180.4 \Omega$ $\frac{1}{\omega C} = 0.585 \Omega$			
$V_{o,50Hz}$ Filter		$V_{o,20kHz}$ Filter			
D	$V_{L,50Hz}$	$V_{C,50Hz}$	$V_{L,20kHz}$	$V_{C,20kHz}$	$V_{o,20kHz}$
30%	66	0.12	65.87	99.81%	57
40%	88	0.17	87.87	99.80%	66
50%	110	0.21	109.78	99.80%	70
50%	110	0.21	109.78	99.80%	70
60%	132	0.25	131.74	99.81%	66
70%	154	0.30	153.69	99.80%	57
โดยที่ $\frac{1}{\omega C} \gg \omega L$		โดยที่ $\frac{1}{\omega C} \ll \omega L$			

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (7) จะพบว่าเมื่อ $V_{o,sw}$ ผ่านวงจรฟิลเตอร์กรององค์ประกอบความถี่สูงทั้งได้ทั้งหมดแล้วจะได้ค่า rms ของแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าแปรผันตามค่าคิวตี้ไซเคิล D ดังสมการ (11)

$$V_{O,50Hz} = D V_S \quad (11)$$

ค่า rms ของแรงดันเอาต์พุต $V_{o,sw}$ หาได้จากสมการที่ (12)

$$V_{O,SW} = \sqrt{V_{o,50Hz}^2 + V_{H1}^2 + V_{H2}^2 + V_{H3}^2 + \dots} \quad (12)$$

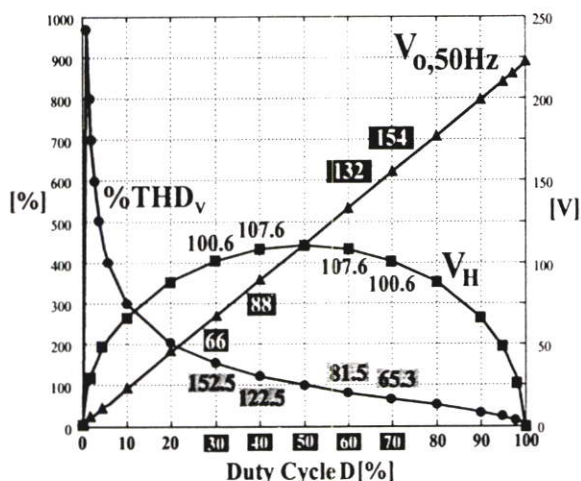
โดยที่ V_{Hk} คือค่า rms ของฮาร์มอนิกส์

$$V_H = \sqrt{V_{H1}^2 + V_{H2}^2 + V_{H3}^2 + \dots} \quad (13)$$

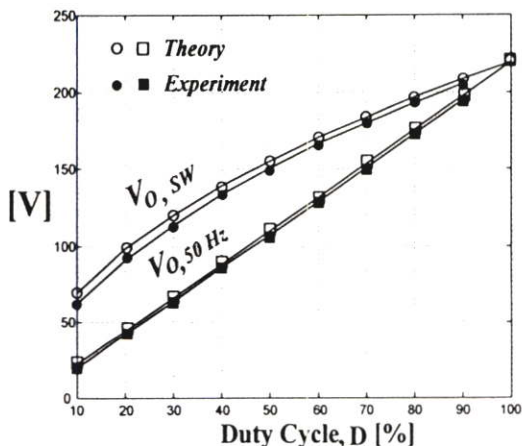
และสามารถคำนวณหาค่า %THD ของคลื่นแรงดันเอาต์พุตได้จากสมการ

$$\%THD_V = \frac{V_H}{V_{0,50Hz}} \times 100 \quad (14)$$

เมื่อนำสเปคตรัมในรูปที่ 6 มาพิจารณาพร้อมกับสมการ (11),(13)และ(14)สามารถนำมาเขียนเส้นกราฟเทียบกับค่าดีไซน์เกิดจาก 0-100เปอร์เซ็นต์ สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 7 และเมื่อพิจารณาจากสมการ (11),(12) พร้อมค่าจากการทดลองสามารถเขียนเส้นกราฟได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD ของ $V_{O,SW}$ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $V_{O,50Hz}$ กับค่าเปอร์เซ็นต์ดีไซน์ (D) ต่างๆ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า rms ของแรงดันเอาต์พุต $V_{O,SW}$, $V_{O,50Hz}$ และค่าเปอร์เซ็นต์ดีไซน์ (D)

4. กำลังไฟฟ้าด้านอินพุต P_n เอาต์พุต P_o และประสิทธิภาพ η

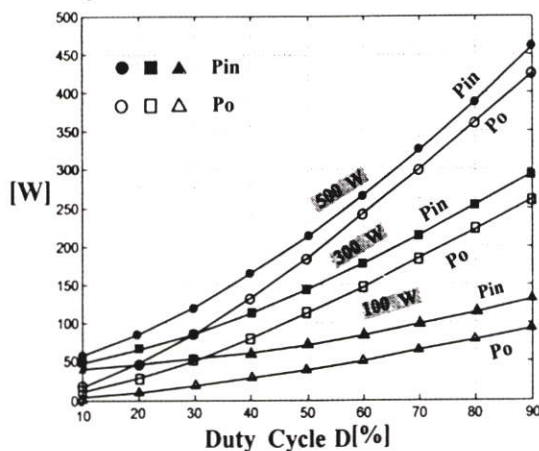
กำลังไฟฟ้าทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \theta_n \quad (15)$$

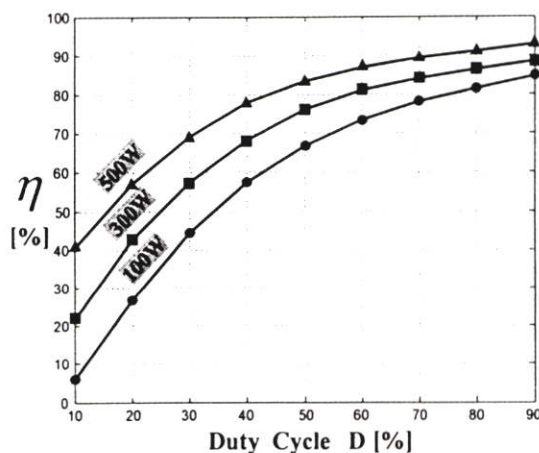
V_n และ I_n คือค่า rms ของแรงดันที่ติดคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านจุดที่ต้องการหากำลังไฟฟ้าอันดับฮาร์โมนิกที่ n ใดๆ

θ_n คือมุมเฟสของกระแส I_n ที่ล่าช้าไปจากแรงดัน V_n

โดยได้แสดงค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตเปรียบเทียบกับค่าดีไซน์เกิดดังกราฟในรูปที่ 9 และสามารถหาประสิทธิภาพของวงจรเรซิชอปเปอร์ได้ดังกราฟในรูปที่ 10



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตเอาต์พุตกับค่าดีไซน์ที่เกิดจากการทดลอง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับค่า ดีไซน์ที่เกิดจากการทดลอง

5.สรุป

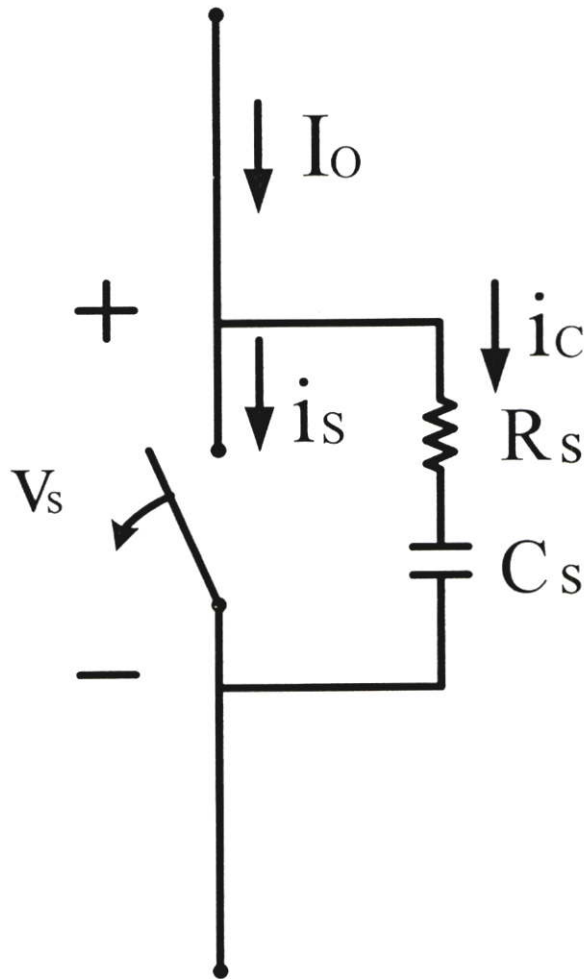
1. สามารถสร้างแรงดันคลื่นไซน์ที่มีลักษณะเป็นพัลส์ ความถี่สูงในระดับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 0-100 เฮอร์เซ็นต์ เพื่อปรับค่าRMSแรงดันของเอาต์พุต ในย่าน 0-200 โวลต์ พร้อมเข้าใจหลักการ ทำงานได้อย่างชัดเจน
2. คลื่นไซน์ที่สร้างขึ้น จะมีฮาร์โมนิกส์ปะปนมากับคลื่นไซน์ 50 เฮิร์ตซ์ ที่ต้องการทางด้านเอาต์พุต โดยจะมีค่า THD_v มากในช่วงความถี่ที่ขึ้นและจะที่มีค่า THD_v ต่ำในช่วงความถี่ที่ลง
3. ในวงจรเอชไอพีเออร์ที่มีการออกแบบ LC ฟิลเตอร์ที่ดีจะต้องสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำสุดได้ถึงลำดับที่ 400 สำหรับระดับความถี่ที่ขึ้นซึ่งเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งในกรณีนี้LCฟิลเตอร์จะมีขนาดเล็กและสามารถปล่อยแรงดันความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ออกเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมดในขณะที่สามารถกรองทั้งแรงดันความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ไม่ให้ออกเอาต์พุตได้เกือบหมด

6.เอกสารอ้างอิง

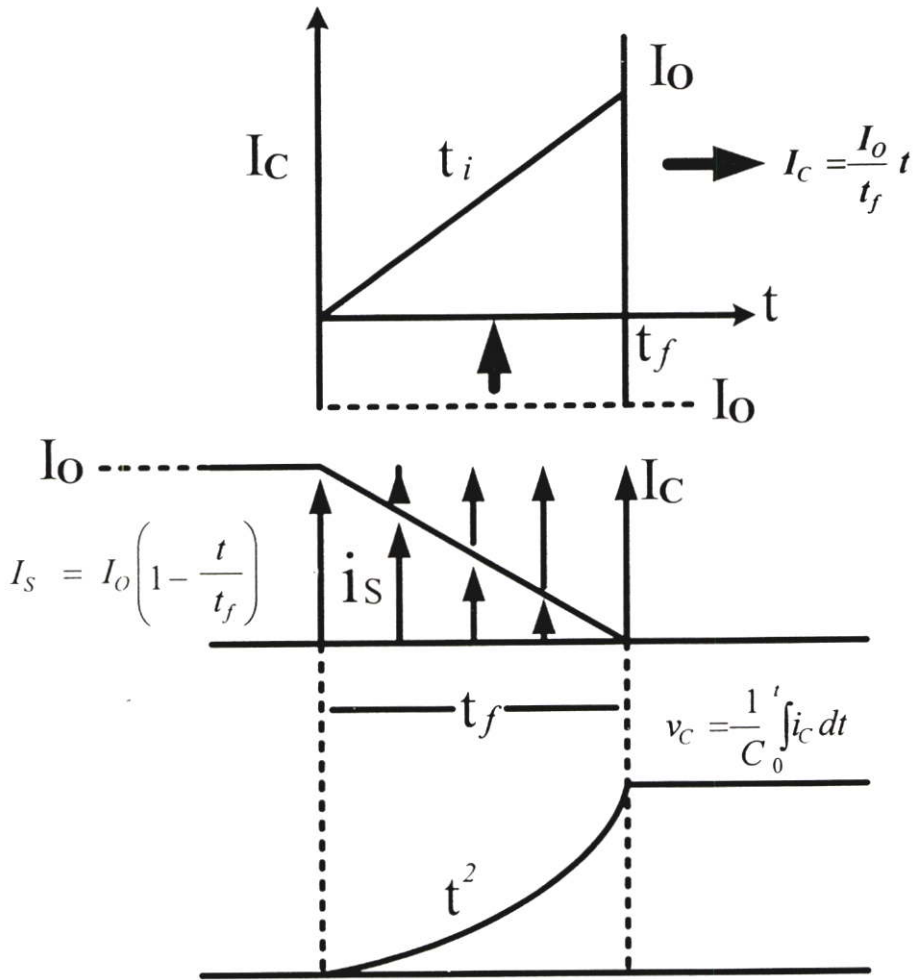
- [1] Yo Hongxiang, Lin Min and Ji Yanchao “An Advanced Harmonic Elimination PWM Technique for AC Choppers” IEEE Power Electronics Specialists Conference., Aachen, Germany, Vlo.1, 20-25 June 2004, pp. 161-165.
- [2] J.-H. Kim and B.-H. Kwon “Three-phase ideal phifter using AC choppers” IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 147, No. 4, July 2000, pp. 329-335.
- [3] B.-H .Kwon, B.-D.Min, J.-H. Kim, “Novel topologies of AC choppers” IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 4, July 1996, pp. 323-330
- [4]. H.J. Ryoo, J.S. Kim, G.H. Rim, D.S. Kim, “A study on the series compensated AC voltage regulator using AC chopper with auxiliary transformer” IEEE Proc.-Electr. Power Appl., 2003, pp. 2628-2633
- [5] N.A. Ahmed, K.Amei, M. Sakui, Membre, IEEE “A new configuration of single-phase symmetrical PWM AC chopper voltage controller” IEEE Transactions on Industrial Electrnics, Vol 46 No. 5, October 1999,pp. 943-952
- [6] N. Abd El-Latif Ahmed, K.Amei, M. Sakui, “Improved circuit of AC choppers for single-phase systems” PCC Nagaoka 1997 , pp. 907-912
- [7] H. Bodur, A.F.Bakan, M.H.Sarul, “Universal motor speed control with current controlled PWM AC chopper by using a microcontroller ”IEEE Vol 1, 19-20 Jan 2000 ,pp. 394-398
- [8] M.E.Balci, M.H. Hocaoglu, “ Effects of Source Voltage Harmonic Distortion on Power Factor Compensation in Triac Controlled AC Chopper Circuits” Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on Vol 2, Issue ,28-01 Nov. 2005 Page(s): 1199 – 1204
- [9] G.-H. Choe, A.K.Wallace, M.-H.Park, “An improved PWM technique for AC choppers ” Power Electronics, IEEE TransactionsonVol 4, Issue 4, Oct. 1989 ,pp496 – 505

ภาคผนวก - ข

ข-1 แสดงการแบ่งกระแสระหว่างสวิตช์ กับคาปาซิเตอร์และขั้นตอนการ
คำนวณหาที่มาของสมการหาค่าคาปาซิเตอร์ของสับเบอร์ด



รูปที่ ข.1 การไหลของการแสดที่สวิตช์



รูปที่ ข.2 การแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_c

ที่มาของ C_s

$$v_c = \frac{1}{C_0} \int_0^{t_f} i_c dt$$

$$v_c = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt$$

$$v_c = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} I_o \frac{t}{t_f} dt$$

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt$$

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt$$

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} I_0 \frac{t}{t_f} dt \quad \text{จาก} \quad I_c = \frac{I_0}{t_f} t$$

ทำการแทนค่าเวลา

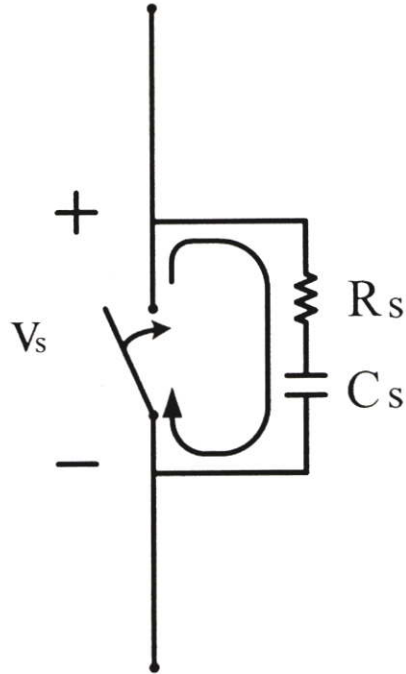
$$v_s = \frac{I_0 t^2}{2C_s t_f} \Big|_0^{t_f}$$

$$v_s = \frac{I_0 t_f^2}{2C_s t_f}$$

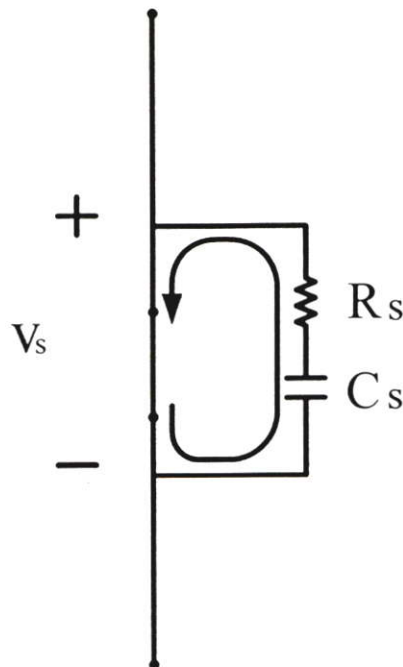
จะได้สมการ C_s ดังนี้

$$C_s = \frac{I_0 t_f}{2v_s}$$

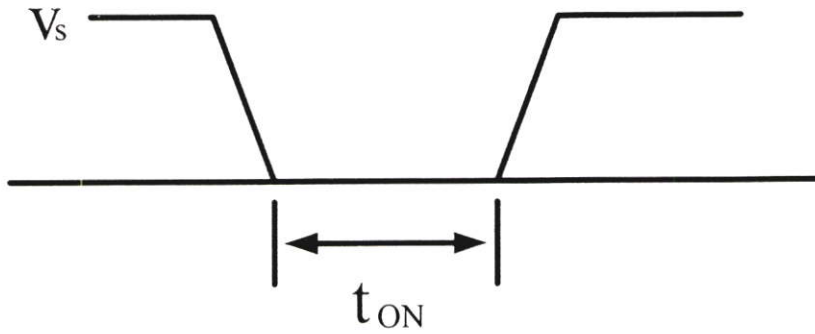
ข-2 แสดงการชาร์จประจุของคาปาซิเตอร์และการคายประจุของคาปาซิเตอร์
ผ่านตัวต้านทานในจังหวะที่สวิตช์ทำการตัดต่อวงจร



รูปที่ ข.3 การชาร์จประจุของ C_s ผ่าน R_s ขณะที่สวิตช์ตัดวงจร



รูปที่ ข.4 การคายประจุของ C_s ผ่าน R_s ขณะที่สวิตช์ต่อวงจร



รูปที่ ข.5 ช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร

รูปแบบความสัมพันธ์ ของ เวลาในการทำงานของสวิตช์กับ RC สนับเบอร์

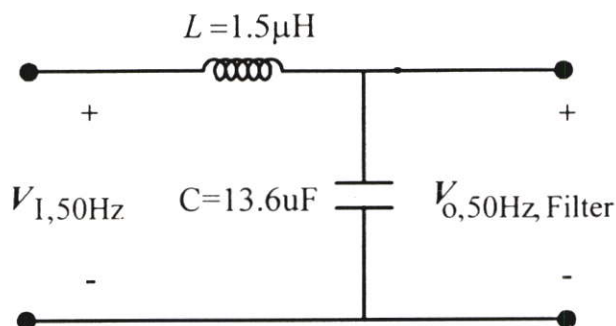
$$t_{ON} > 5R_sC_s$$

$$R_s < \frac{t_{ON}}{5C_s}$$

ภาคผนวก -ค

ค-1 แสดงการคำนวณการแบ่งแรงดันของวงจร LC ฟิเตอร์กรณีนไม่มีโหลด ทางด้านเอาต์พุต

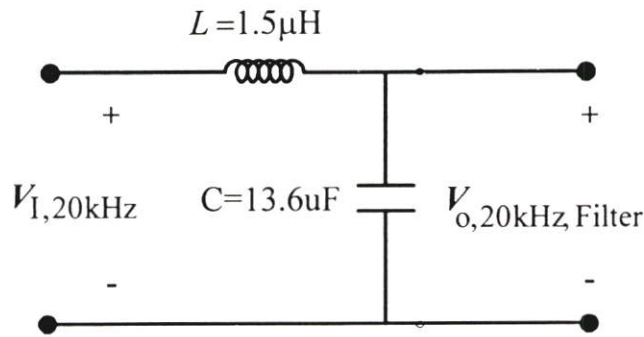
ค-1.1 กรณีนที่ไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50Hz และความถี่สูง 20kHz



รูปที่ ค.1 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีนที่ไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz

จากรูปที่ ค.1 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{O,50Hz, Filter} &= \left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) + (2 \times \pi \times f \times L) \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right) + \left(2 \times 3.14 \times 50 \times 1.8 \times 10^{-3} \right) \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= [(227.47) / (227.47 + 0.56.5)] \times 110 \text{ V} \\
 &= 109.72 \text{ V}
 \end{aligned}$$



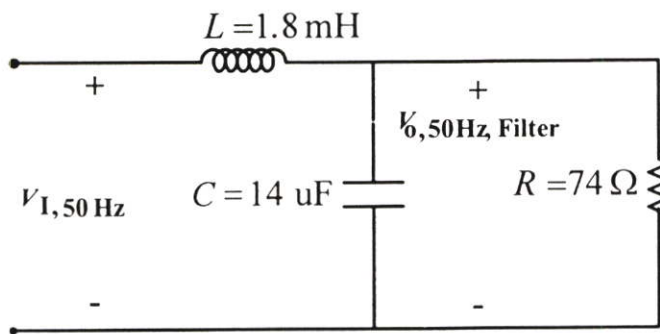
รูปที่ ค.2 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีนที่ไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่สูง 20 kHz

จากรูปที่ ค.1 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่สูง 20 kHz ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{O,20\text{kHz},\text{Filter}} &= \left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{I,20\text{kHz}} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) + (2 \times \pi \times f \times L) \right) \right] V_{I,20\text{kHz}} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right) + \left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 1.8 \times 10^{-3}} \right) \right) \right] V_{I,50\text{Hz}} \\
 &= [(0.568)/(0.568 + 226.08)] \times 70 \text{ V} \\
 &= 0.175 \text{ V}
 \end{aligned}$$

ค-2 แสดงการคำนวณการแบ่งแรงดันของวงจร LC ฟิเตอร์กรณีมีโหลด ทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด R

ค-2.1 กรณีที่มี โหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด R ที่ความถี่ต่ำ 50Hz และความถี่สูง 20kHz



รูปที่ ค.3 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีที่มี โหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด R ที่ความถี่ต่ำ 50 Hz

จากรูปที่ ค.3 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ได้ดังนี้

หาค่า Z_{RC}

$$Z_{RC} = \frac{R \times (-jXC)}{R + (-jXC)}$$

$$= \left[\frac{R \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{R + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)}{74 + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times (-j227.47)}{74 + (-j227.47)} \right]$$

$$= 70.37 \angle -18.03^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 66.91 - j21.78$$

หาค่า Z_{RCL}

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{RCL} + jXL \\
 &= (66.91 - j21.78) + (j2 \times \pi \times f \times L) \\
 &= (66.91 - j21.78) + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 1.8 \times 10^{-3}) \\
 &= 66.91 - j16.128 \quad \text{หรือ} \quad = 68.83 \angle -13.55^\circ
 \end{aligned}$$

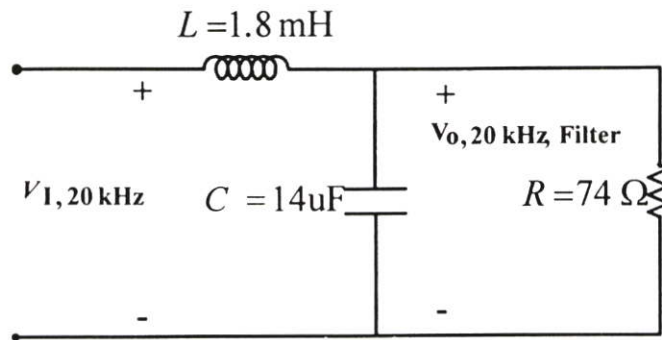
หากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned}
 I_{RCL} &= \frac{V_{1,50Hz}}{Z_{RCL}} \\
 &= \frac{110 \angle 0^\circ}{68.8 \angle -17.16^\circ} \\
 &= 1.55 \angle 13.55^\circ
 \end{aligned}$$

จากกระแส I_{RCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

$$\begin{aligned}
 V_{O,50H} &= I_{RCL} \times Z_{RC} \\
 &= 1.55 \angle 13.55^\circ \times 70.37 \angle -18.03^\circ \\
 &= 109.073 \angle -4.48^\circ
 \end{aligned}$$

แรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ $V_{O,50Hz} = 109.275 \angle -0.38^\circ$



รูปที่ ค.4 วงจร LC ฟิเตอร์กรณที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด R ที่ความถี่สูง 20 kHz

จากรูปที่ ค.4 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่สูง 20 kHz ได้ดังนี้

หาค่า Z_{RC}

$$Z_{RC} = \frac{R \times (-jXC)}{R + (-jXC)}$$

$$= \left[\frac{R \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{R + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 13.6 \times 10^{-6}} \right)}{74 + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 13.6 \times 10^{-6}} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times (-j0.568)}{74 + (-j0.568)} \right]$$

$$= 0.567 \angle -89.57^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 4.2 \times 10^{-3} - j0.566$$

หาค่า Z_{RCL}

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{RCL} + jXL \\
 &= (4.2 \times 10^{-3} - j0.566) + (j2 \times \pi \times f \times L) \\
 &= (4.2 \times 10^{-3} - j0.566) + (j2 \times 3.14 \times 20000 \times 1.8 \times 10^{-3}) \\
 &= 4.25 \times 10^{-3} + j225.514 \quad \text{หรือ} \quad = 225.514 \angle 89.99^\circ
 \end{aligned}$$

หากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned}
 I_{RCL} &= \frac{V_{i,20kHz}}{Z_{RCL}} \\
 &= \frac{70 \angle 0^\circ}{225.514 \angle 89.99^\circ} \\
 &= 0.310 \angle -89.99^\circ
 \end{aligned}$$

จากกระแส I_{RCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

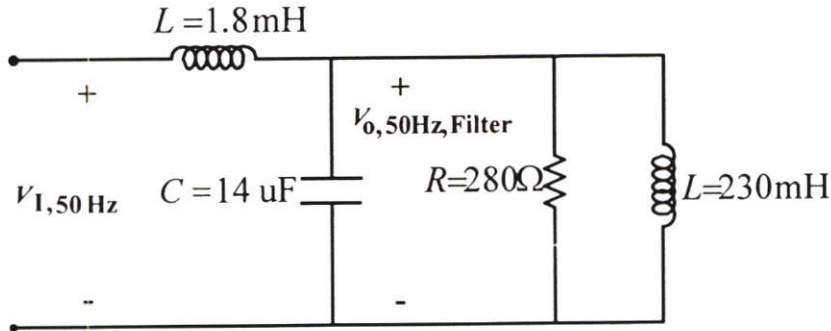
$$\begin{aligned}
 V_{O,20kHz} &= I_{RCL} \times Z_{RC} \\
 &= 0.310 \angle -89.99^\circ \times 0.567 \angle -89.57^\circ \\
 &= 0.175 \angle -179.56^\circ
 \end{aligned}$$

แรงดันความถี่สูง 20 kHz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ $V_{O,20kHz} = 0.175 \angle -179.56^\circ$

ค-3 แสดงการคำนวณการแบ่งแรงดันของวงจร LC ฟิเตอร์กรณีมีโหลด

ทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด RL

ค-2.1กรณีที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด RL ที่ความถี่ต่ำ 50Hz และความถี่สูง 20kHz



รูปที่ ค.5 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด RL ที่ความถี่ต่ำ 50 Hz

จากรูปที่ ค.3 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ได้ดังนี้

หาค่า Z_{LR}

$$\begin{aligned}
 Z_{LR} &= \frac{R \times (jXL_o)}{R + (jXL_o)} \\
 &= \left[\frac{R \times (j2 \times \pi \times f \times L_o)}{R + (j2 \times \pi \times f \times L_o)} \right] \\
 &= \left[\frac{280 \times (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})}{280 + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})} \right] \\
 &= \frac{20221.6 \angle 90^\circ}{289.16 \angle 14.46^\circ} \\
 &= 69.93 \angle 75.54^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 197.46 + j67.714
 \end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRC}

$$\begin{aligned}
 Z_{LRC} &= \frac{(Z_{LR}) \times (-jXC)}{(Z_{LR}) + (-jXC)} \\
 Z_{LRC} &= \frac{(Z_{LR}) \times (-jXC)}{(Z_{LR}) + (-jXC)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{(69.93 \angle 75.57^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \\
&= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)}{(69.93 \angle 75.54^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)} \\
&= \frac{15906.97 \angle -14.46^\circ}{160.707 \angle -83.76^\circ} \\
&= 98.98 \angle 69.3^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 34.48 + j92.59
\end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRCL}

$$\begin{aligned}
Z &= Z_{LRC} + jXL \\
&= (34.98 + j92.59) + (j2 \times \pi \times f \times L) \\
&= (34.98 + j92.59) + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 1.8 \times 10^{-3}) \\
&= 34.98 + j93.15 \quad \text{หรือ} \quad = 99.50 \angle 69.41^\circ
\end{aligned}$$

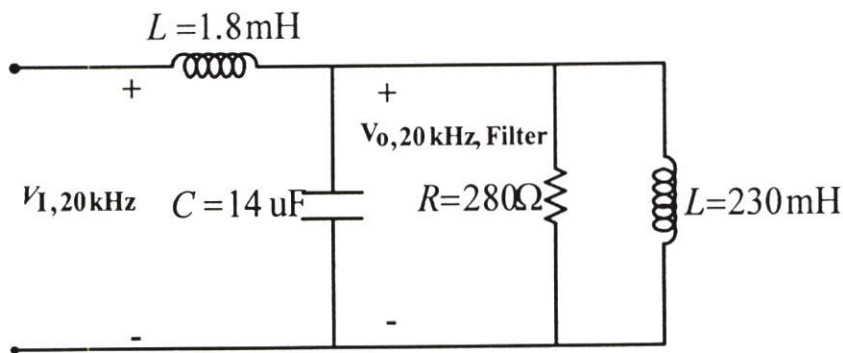
หาค่ากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned}
I_{LRCL} &= \frac{V_{1,50Hz}}{Z_{LRCL}} \\
&= \frac{110 \angle 0^\circ}{99.50 \angle 69.41^\circ} \\
&= 1.105 \angle -69.41^\circ
\end{aligned}$$

จากกระแส I_{LRCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

$$\begin{aligned}
 V_{O,50H} &= I_{LRCL} \times Z_{LRC} \\
 &= 1.105 \angle -69.41^\circ \times 98.98 \angle 69.3^\circ \\
 &= 109.42 \angle -138.7^\circ
 \end{aligned}$$

แรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ $= 109.42 \angle -138.7^\circ$



รูปที่ ค.6 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด RL ที่ความถี่สูง 20 kHz

$$\begin{aligned}
 Z_{LR} &= \frac{R \times (jXL_o)}{R + (jXL_o)} \\
 &= \left[\frac{R \times (j2 \times \pi \times f \times L_o)}{R + (j2 \times \pi \times f \times L_o)} \right] \\
 &= \left[\frac{280 \times (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})}{280 + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})} \right] \\
 &= \frac{20221.6 \angle 90^\circ}{289.16 \angle 14.46^\circ} \\
 &= 64.93 \angle 75.54^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 17.46 - j67.714
 \end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRC}

$$\begin{aligned}
 Z_{LRC} &= \frac{(Z_{LR}) \times (-jXC)}{(Z_{LR}) + (-jXC)} \\
 &= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{(69.93 \angle 75.54^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \\
 &= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right)}{(69.93 \angle 75.54^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right)} \\
 &= \frac{39.16 \angle -14.46^\circ}{69.38 \angle 75.42^\circ} \\
 &= 0.564 \angle -89.88^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 0.00118 + j0.563
 \end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRCL}

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{LRC} + jXL \\
 &= (0.00118 - j0.563) + (j2 \times \pi \times f \times L) \\
 &= (0.00118 - j0.563) + (j2 \times 3.14 \times 20000 \times 1.8 \times 10^{-3}) \\
 &= 0.00118 + j225.517 \quad \text{หรือ} \quad = 225.51 \angle 89.99^\circ
 \end{aligned}$$

หากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned}
 I_{LRCL} &= \frac{V_{1,20kHz}}{Z_{LRCL}} \\
 &= \frac{70 \angle 0^\circ}{225.51 \angle 89.99^\circ}
 \end{aligned}$$

$$= 0.310 \angle -89.99^\circ$$

จากกระแส I_{LRCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

$$V_{O,20kHz} = I_{LRCL} \times Z_{LRC}$$

$$= 0.310 \angle -89.99^\circ \times 0.564 \angle -89.88^\circ$$

$$= 0.174 \angle -179.87^\circ$$

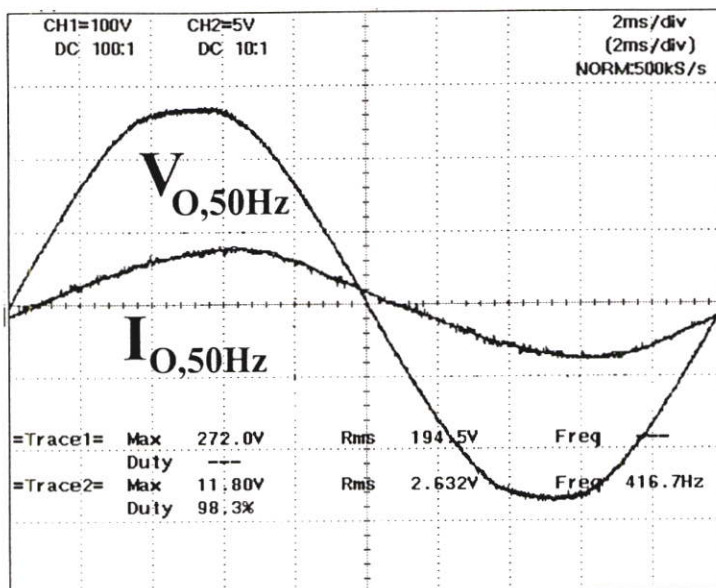
แรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz ที่ผ่าน LC ฟิวเตอร์จะได้เท่ากับ $= 0.177 \angle -179.87^\circ$

จากตัวอย่างการคำนวณหาขนาดแรงดันที่สามารถไหลผ่าน LC ฟิวเตอร์ระหว่างแรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz กับแรงดันความถี่สูง 20 kHz โดยมีคัตออฟเฟรควเ้นซ์เท่ากับ 50 % สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50 Hz

Load	D	$V_{O,50Hz}$	$V_{L,50Hz}$	$V_{O,50Hz, Filter=V_{C,50Hz}}$	$[\%]V_{O,50Hz}$	$V_{O,20kHz}$	$V_{L,20kHz}$	$V_{O,20kHz, Filter=V_{C,20kHz}}$	$[\%]V_{O,20kHz}$
NO Load	50%	110	0.73	109.27	99.33%	70	69.83	0.17	0.24 %
Load R	50%	110	0.73	109.27	99.33%	70	69.83	0.17	0.24 %
Load RL	50%	110	0.58	109.42	99.47%	70	69.83	0.17	0.24%

จากหลักการคำนวณที่ได้แสดงเป็นตัวอย่างนี้ในทางปฏิบัติได้นำชุดทดลองวงจรเอชซีชอปเปอร์ ไปใช้ขับหลอดอินดักทีฟซึ่งประกอบด้วยหลอด Incandescent 100 วัตต์ 4 หลอด ขนานกับอินดักชันมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ซึ่งมีโวลต์เป็นพัลลวมไบพัลลวกเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นิ้ว ผลปรากฏว่าได้คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต $V_{O,50Hz}$ และ $I_{O,50Hz}$ ดังแสดงด้วยรูปคลื่นจากการทดลองในรูปที่ ก.7 ซึ่งเมื่อนำไปแตกสเปกตรัมเพื่อหาคลื่นพินคามาเมนทอล $V_{O,50Hz}$ และ $I_{O,50Hz}$ ปรากฏว่าได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า PF 0.9 และกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 493 วัตต์ หรือประมาณ 500 วัตต์ ที่แรงดัน rms 194.7 V และกระแส rms 2.75 A



รูปที่ ค.7 รูปคลื่นแรงดันและการแสทางด้านเอาต์พุต กรณีโหลดเป็นอินดักชันมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าซึ่งมีโหลดเป็นพัลลมไบพัลลิ่งเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้ว ต่อขนานกับ หลอดไฟ 100 วัตต์จำนวน 4 หลอดที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า PF เท่ากับ 0.9 และ กำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 493 วัตต์ หรือประมาณ 500 วัตต์ ที่แรงดัน rms 194.7 V และ กระแส rms 2.75 A

ภาคผนวก – ง

อุปกรณ์สวิตช์และสร้างสัญญาณที่ใช้ในชุดทดลอง



SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

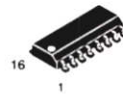
Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42		V
Collector Output Voltage	V_{C1} , V_{C2}	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I_{C1} , I_{C2}	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	-0.3 to +42		V
Power Dissipation @ $T_A \leq 45^\circ\text{C}$	P_D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	80		$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating Junction Temperature	T_J	125		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +125		$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T_A	0 to +70 -25 to +85		$^\circ\text{C}$
Derating Ambient Temperature	T_A	45		$^\circ\text{C}$

NOTE: 1. Maximum thermal limits must be observed.

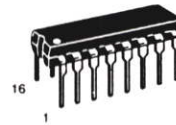
TL494

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUIT

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

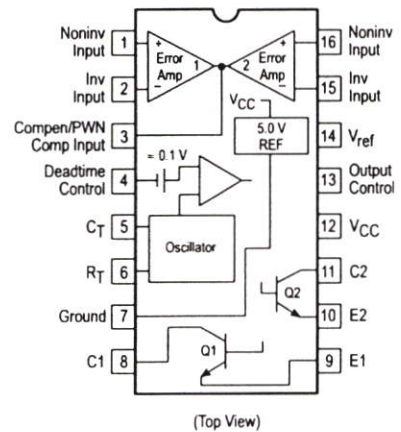


D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751B
(SO-16)



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
TL494CD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	SO-16
TL494CN		Plastic
TL494IN	$T_A = -25^\circ \text{ to } +85^\circ\text{C}$	Plastic

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	–	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	I_{C1}, I_{C2}	–	–	200	mA
Amplified Input Voltage	V_{in}	–0.3	–	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	I_{fb}	–	–	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	–	–	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	k Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μ F
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ V, $C_T = 0.01$ μ F, $R_T = 12$ k Ω , unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ$ C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
-----------------	--------	-----	-----	-----	------

REFERENCE SECTION

Reference Voltage ($I_O = 1.0$ mA)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0$ V to 40 V)	Reg _{line}	–	2.0	25	mV
Load Regulation ($I_O = 1.0$ mA to 10 mA)	Reg _{load}	–	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current ($V_{ref} = 0$ V)	I_{SC}	15	35	75	mA

OUTPUT SECTION

Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40$ V, $V_{CE} = 40$ V)	$I_{C(off)}$	–	2.0	100	μ A
Emitter Off-State Current $V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	–	–	–100	μ A
Collector–Emitter Saturation Voltage (Note 2) Common–Emitter ($V_E = 0$ V, $I_C = 200$ mA) Emitter–Follower ($V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)	$V_{sat(C)}$ $V_{sat(E)}$	– –	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} \leq 0.4$ V) High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCL} I_{OCH}	– –	10 0.2	– 3.5	μ A mA
Output Voltage Rise Time Common–Emitter (See Figure 12) Emitter–Follower (See Figure 13)	t_r	– –	100 100	200 200	ns
Output Voltage Fall Time Common–Emitter (See Figure 12) Emitter–Follower (See Figure 13)	t_f	– –	25 40	100 100	ns

NOTE: 2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
-----------------	--------	-----	-----	-----	------

ERROR AMPLIFIER SECTION

Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	–	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	–	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	–	–0.1	–1.0	μA
Input Common Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	–0.3 to $V_{CC} - 2.0$			V
Open Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\ \text{V}$, $V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	–	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_{C-}	–	350	–	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	–	65	–	deg.
Common Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	CMRR	65	90	–	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\ \text{V}$, $V_O = 2.5\ \text{V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	–	100	–	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_{O-}	0.3	0.7	–	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O+}	2.0	–4.0	–	mA

PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 11)

Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	V_{TH}	–	2.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{Pin\ 3} = 0.7\ \text{V}$)	I_{-}	0.3	0.7	–	mA

DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)

Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$ to $5.25\ \text{V}$)	I_{IB} (DT)	–	–2.0	–10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	DC_{max}	45	48	50	%
		–	45	50	
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{th}	–	2.8	3.3	V
		0	–	–	

OSCILLATOR SECTION

Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	f_{osc}	–	40	–	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	σf_{osc}	–	3.0	–	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc} (\Delta V)$	–	0.1	–	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}$ to T_{high}) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$)	$\Delta f_{osc} (\Delta T)$	–	–	12	%

UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION

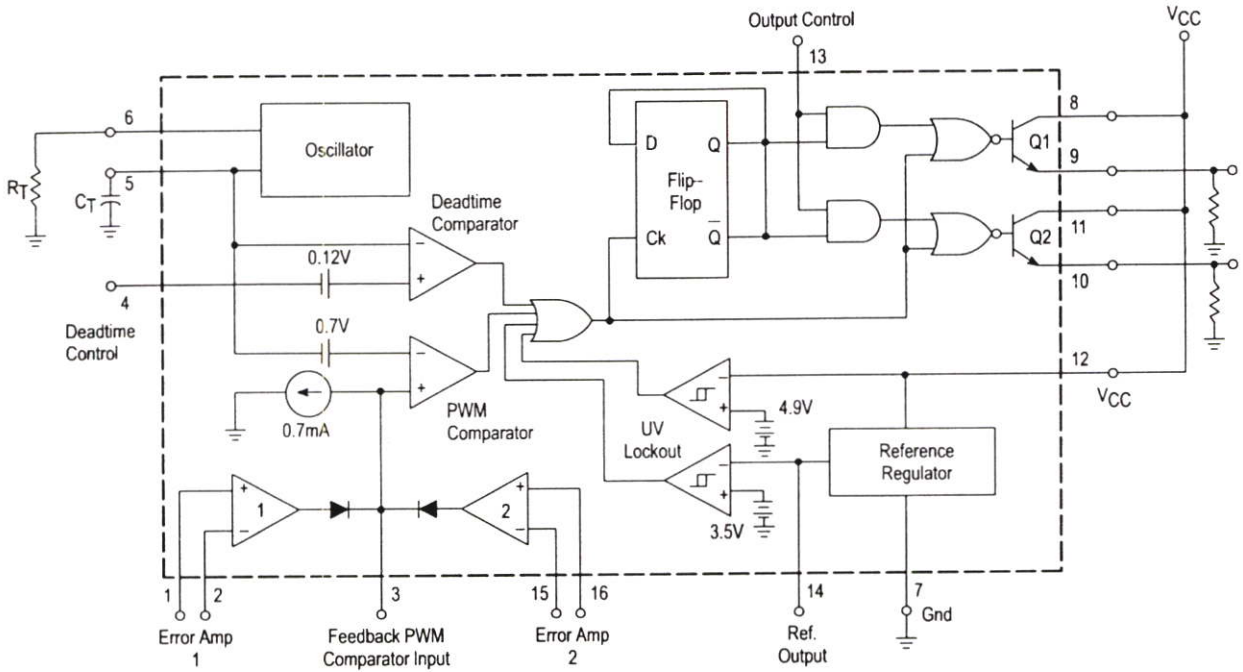
Turn-On Threshold (V_{CC} increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$)	V_{th}	5.5	6.43	7.0	V
---	----------	-----	------	-----	---

TOTAL DEVICE

Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref} , All other inputs and outputs open) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	I_{CC}	–	5.5	10	mA
		–	7.0	15	
Average Supply Current ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, $V_{Pin\ 4} = 2.0\ \text{V}$) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) (See Figure 12)		–	7.0	–	mA

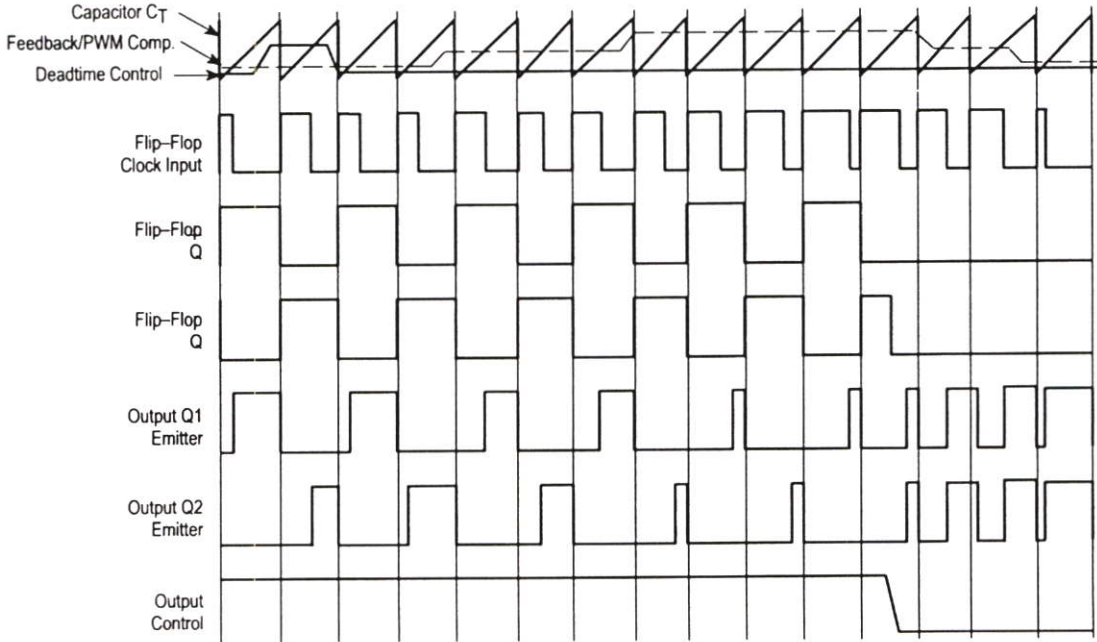
* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$

Figure 1. Representative Block Diagram



This device contains 46 active transistors.

Figure 2. Timing Diagram



APPLICATIONS INFORMATION

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 3.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the Timing Diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the deadtime control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadtime control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadtime to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional deadtime may be imposed on the output by setting the deadtime-control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

Input/Output Controls	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Grounded	Single-ended PWM @ Q1 and Q2	1.0
@ V_{ref}	Push-pull Operation	0.5

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common mode input range from -0.3 V to $(V_{CC} - 2V)$, and

may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the deadtime comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 5.0\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 70°C.

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

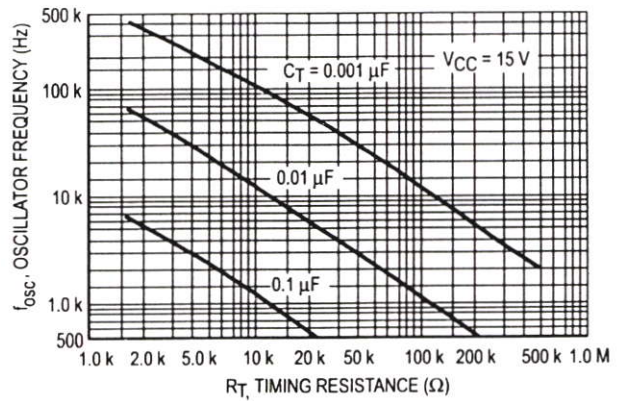


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

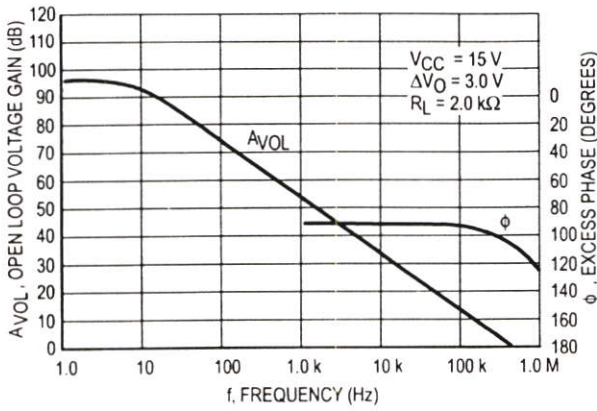


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

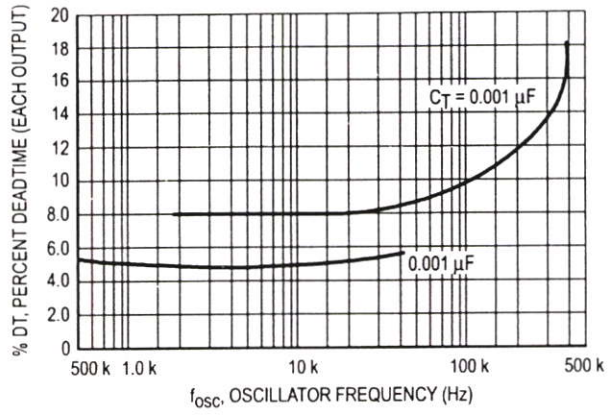


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

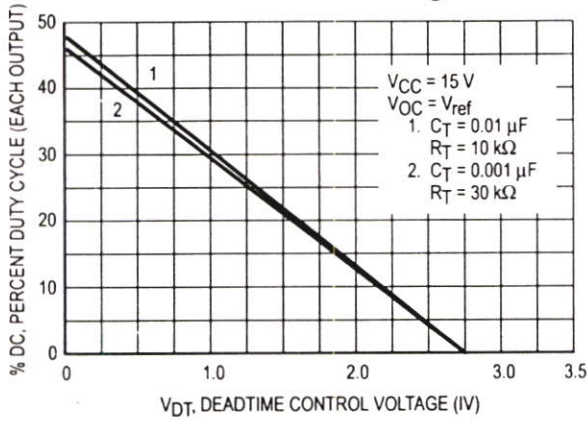


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

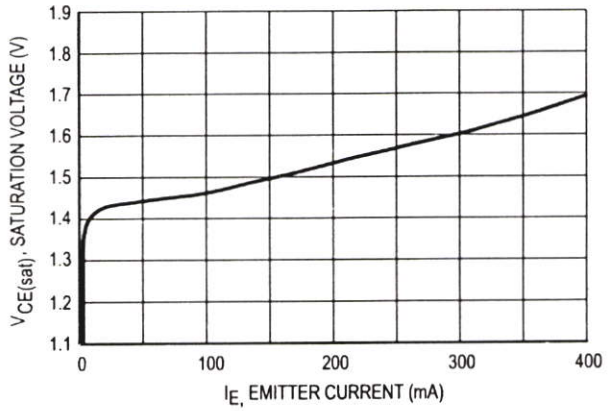


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

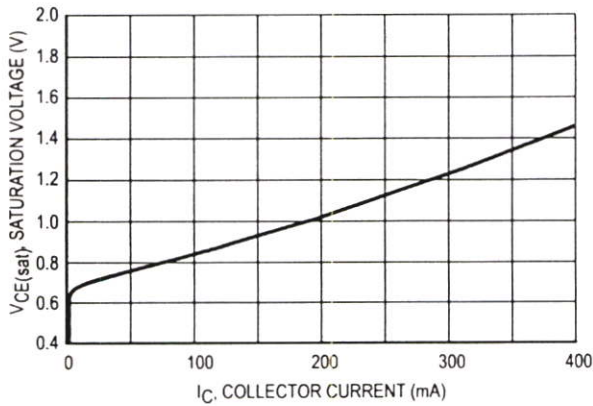


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

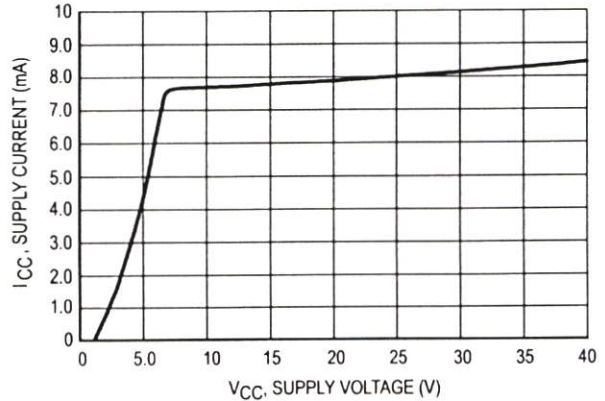


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

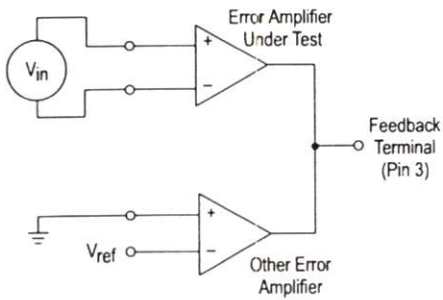


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

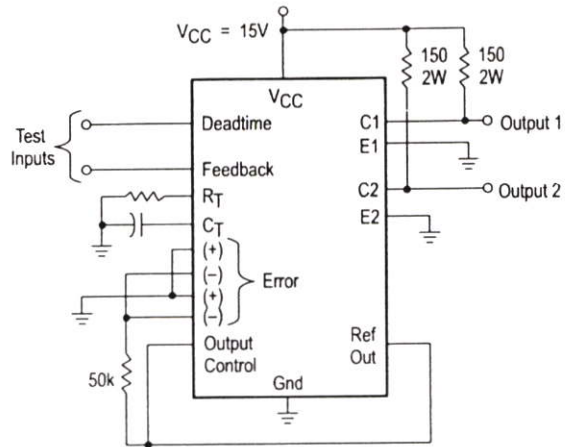


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

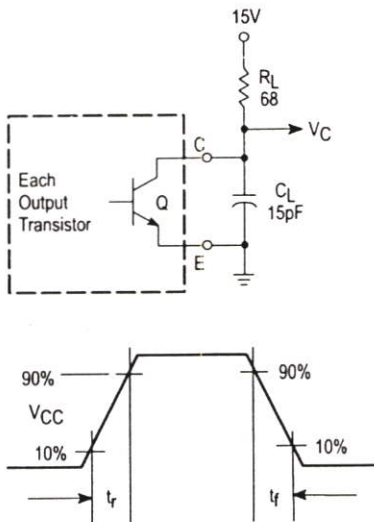


Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform

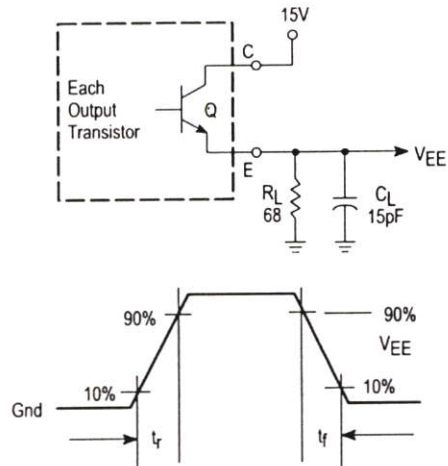


Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

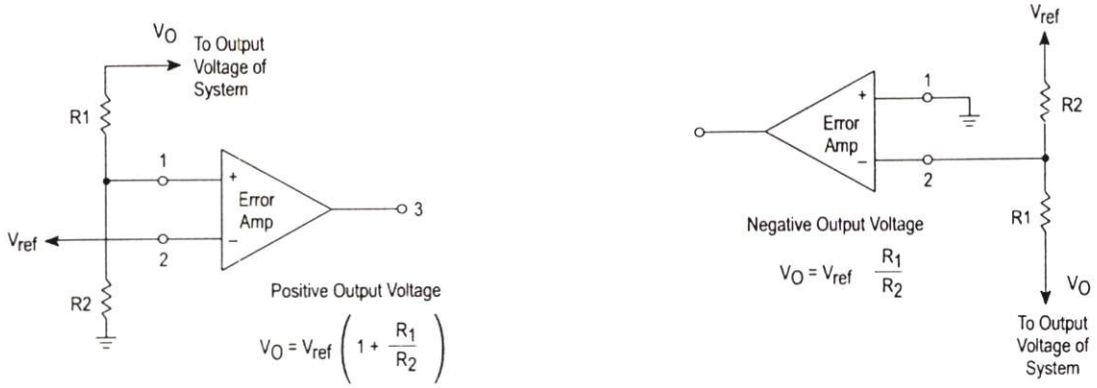
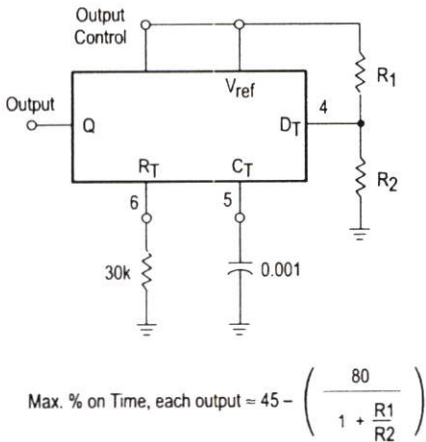


Figure 15. Deadtime Control Circuit



$$\text{Max. \% on Time, each output} = 45 - \left(\frac{80}{1 + \frac{R1}{R2}} \right)$$

Figure 16. Soft-Start Circuit

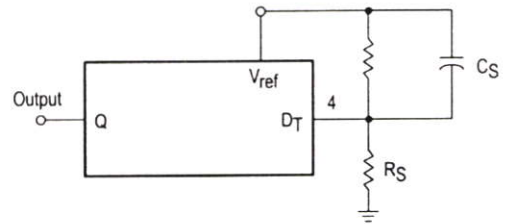


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations

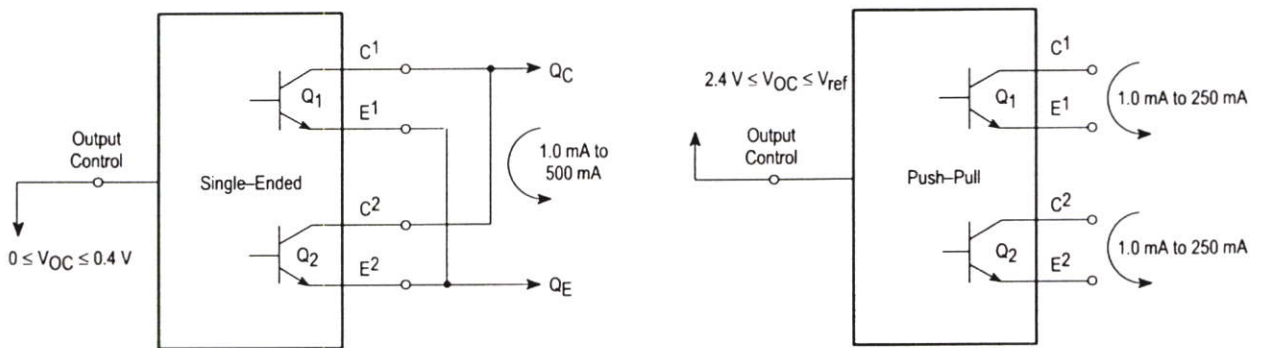


Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

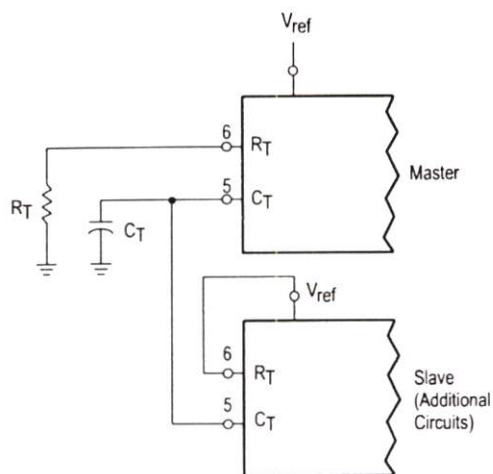


Figure 19. Operation with $V_{in} > 40\text{ V}$ Using External Zener

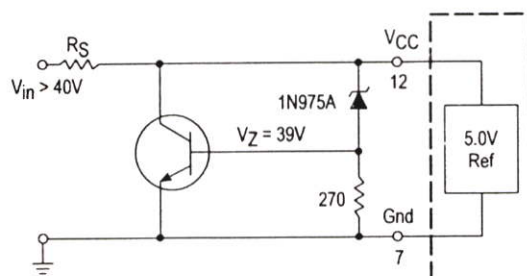
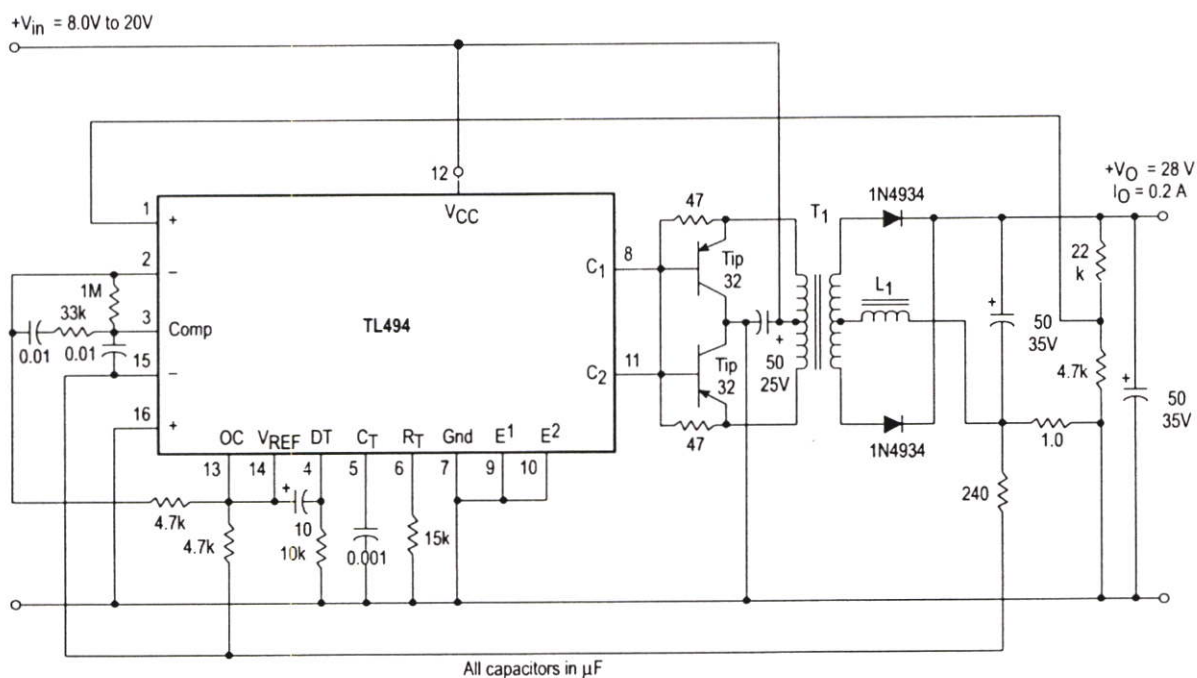


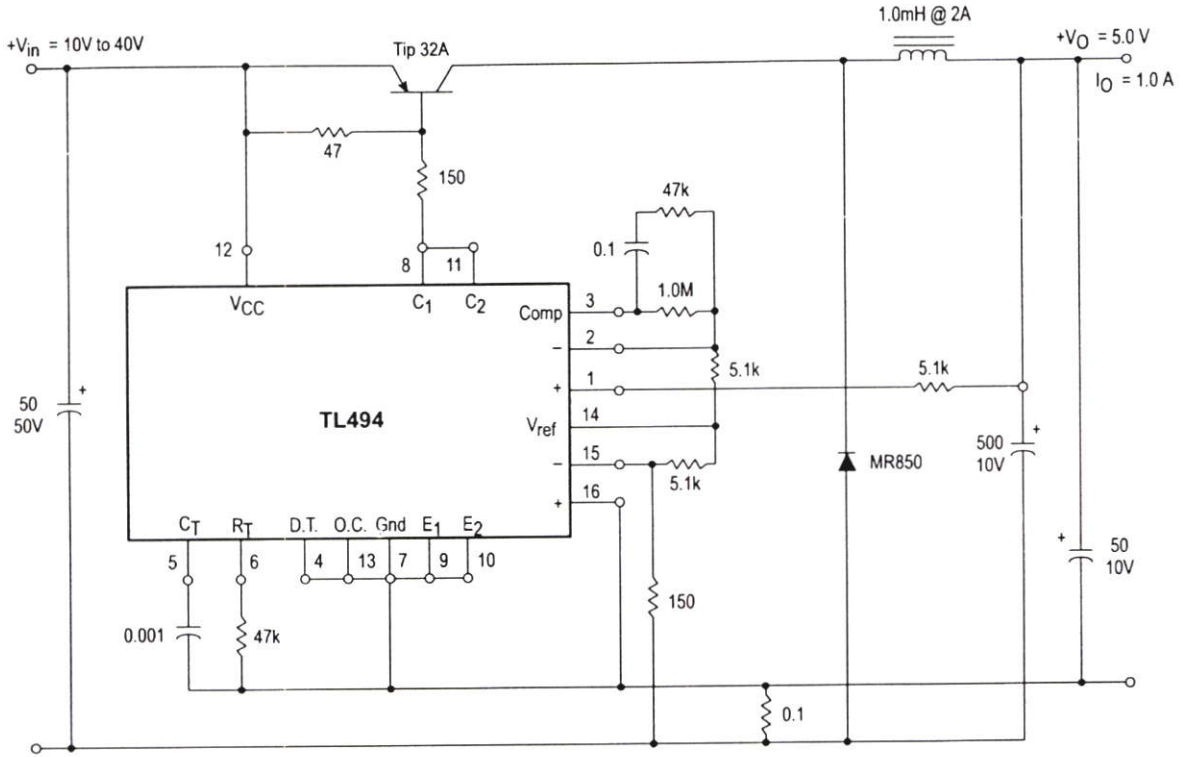
Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter



Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to }40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to }1.0\text{ A}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V}, R_L = 0.1\ \Omega$	1.6 A
Efficiency	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	71%

L1 - 3.5 mH @ 0.3 A
 T1 - Primary: 20T C.T. #28 AWG
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3CB

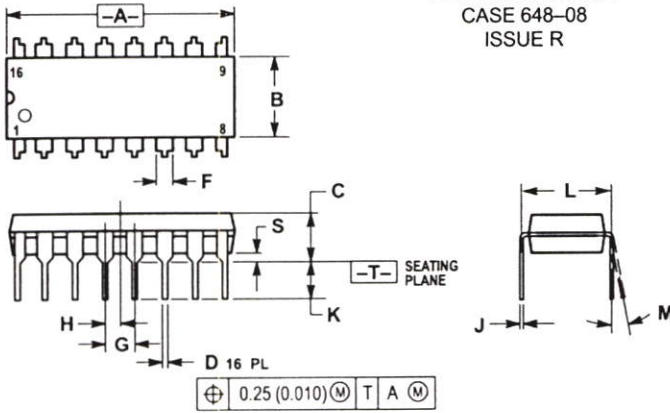
Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter



Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	72%

TL494 OUTLINE DIMENSIONS

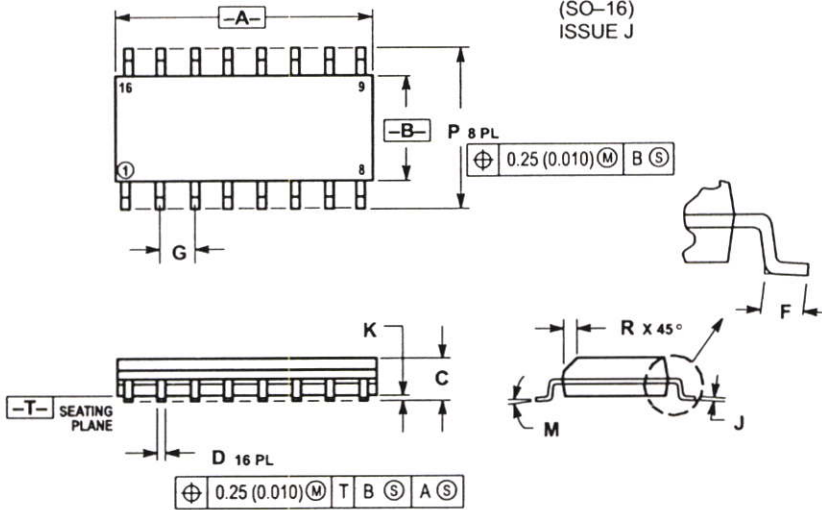
N SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 648-08 ISSUE R



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
 3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
 4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
 5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.


DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.295	0.305	7.50	7.74
M	0° - 10°		0° - 10°	
S	0.020	0.040	0.51	1.01

D SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 751B-05 (SO-16) ISSUE J



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
 3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
 4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
 5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.80	10.00	0.386	0.393
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0° - 7°		0° - 7°	
P	5.80	6.20	0.229	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447 or 602-303-5454

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE 602-244-6609
INTERNET: <http://Design-NET.com>

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Seibu-Butsuryu-Center,
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-81-3521-8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

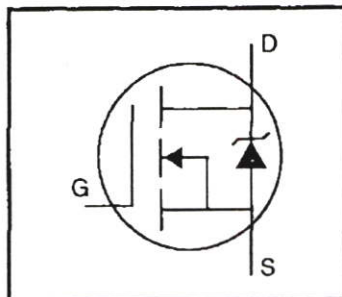

MOTOROLA


TL494/D



HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 500V$$

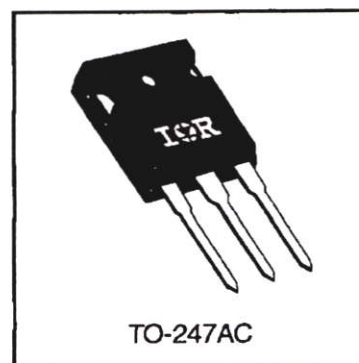
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.


 DATA
SHEETS

Absolute Maximum Ratings

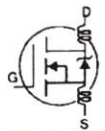
	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	20	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1 N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to 25°C , $I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=12A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=12A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
		—	—	250		$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D=20A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		$V_{DS}=400V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD}=250V$
t_r	Rise Time	—	59	—		$I_D=20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		$R_G=4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	58	—		$R_D=13\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{GS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—		$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5



Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=20A, V_{GS}=0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	$di/dt=100A/\mu\text{s}$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

③ $I_{SD} \leq 20A$, $di/dt \leq 160A/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 150^\circ\text{C}$

② $V_{DD}=50V$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=4.3\text{mH}$, $R_G=25\Omega$, $I_{AS}=20A$ (See Figure 12)

④ Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

I_D, Drain Current (Amps)

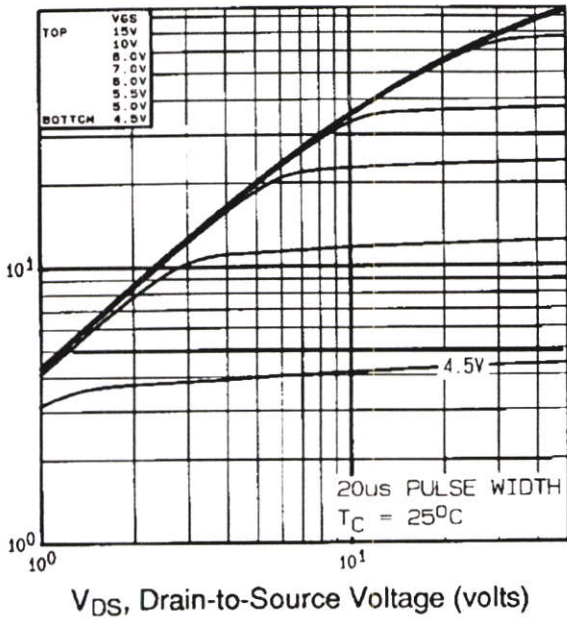


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

I_D, Drain Current (Amps)

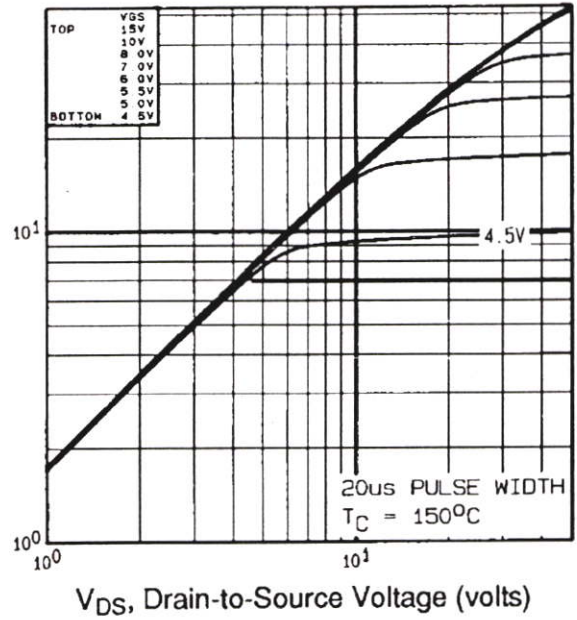


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

DATA SHEETS

I_D, Drain Current (Amps)

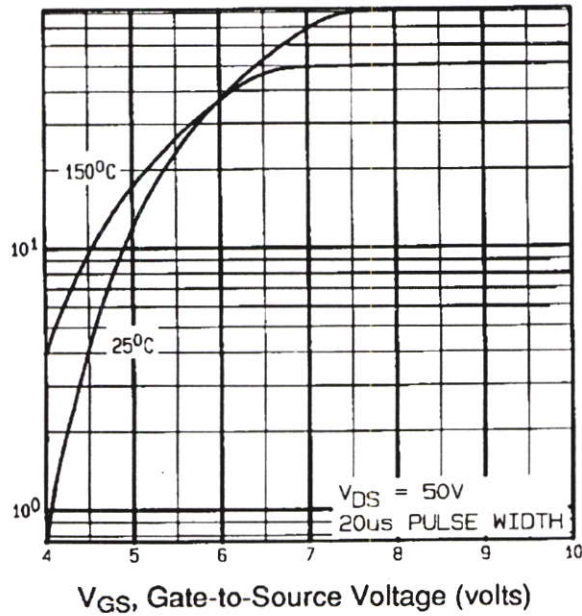


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

R_{DS(ON)}, Drain-to-Source On Resistance (Normalized)

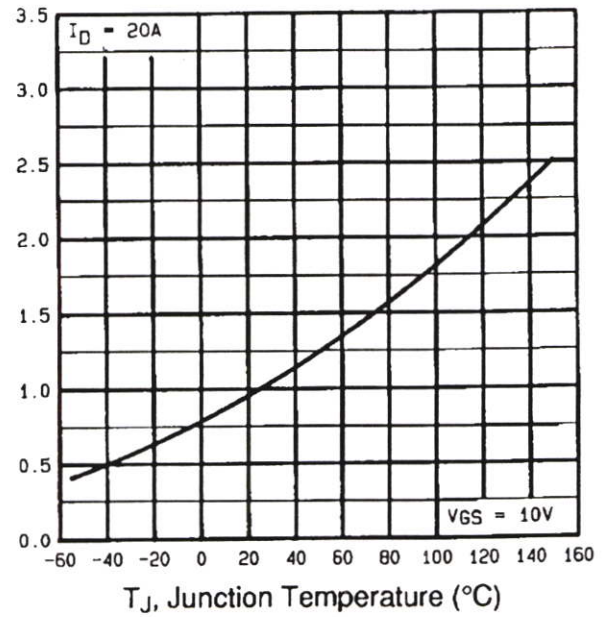


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

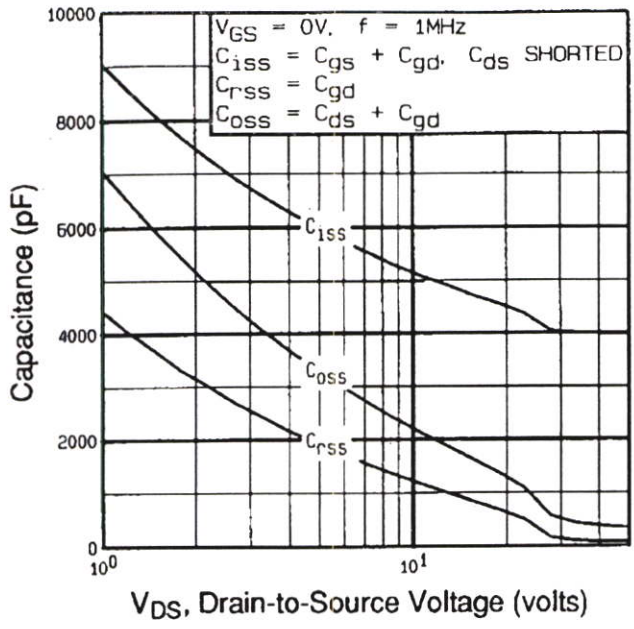


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

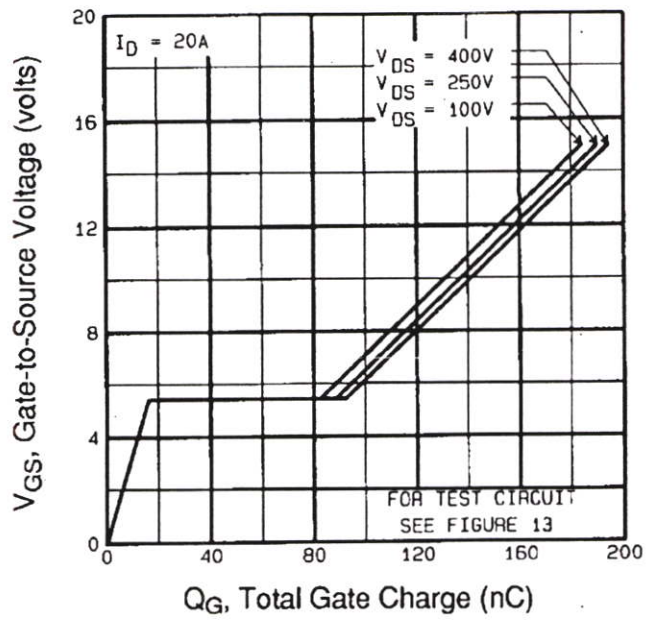


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

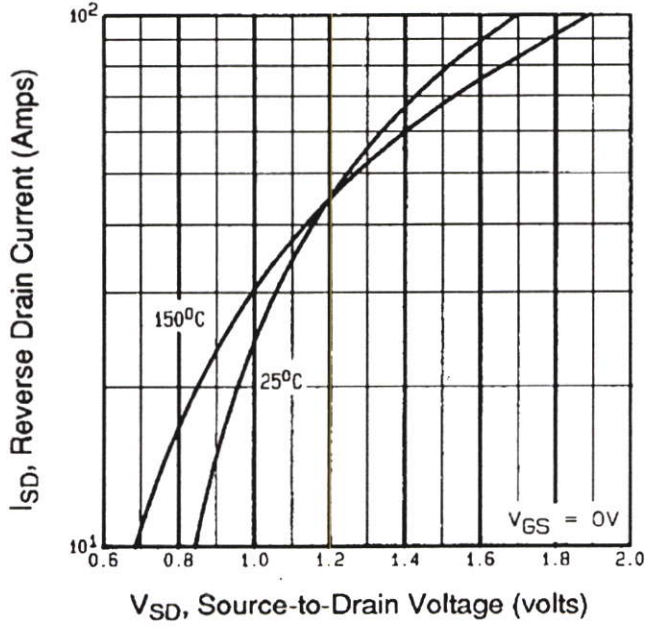


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

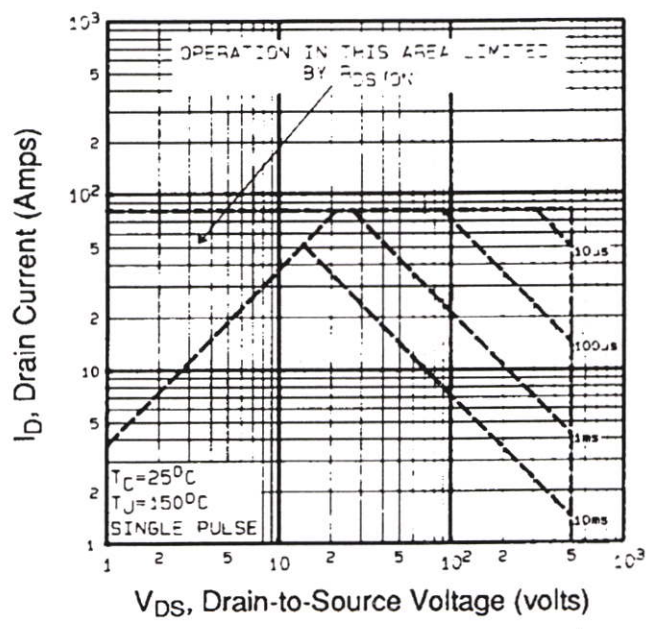


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

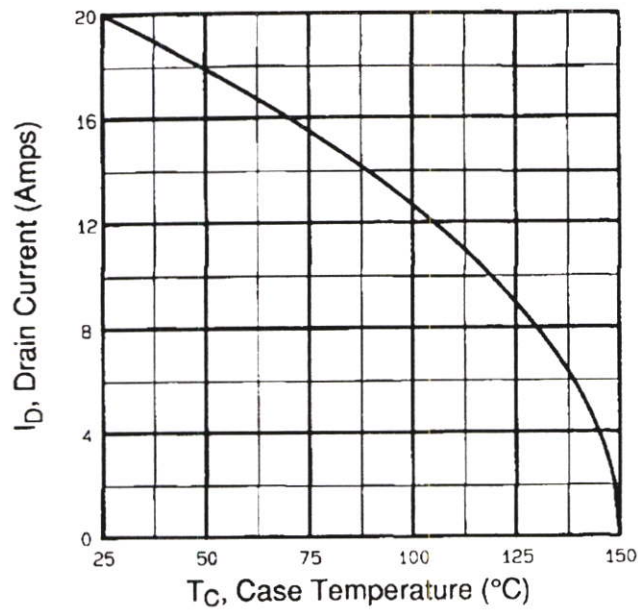


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

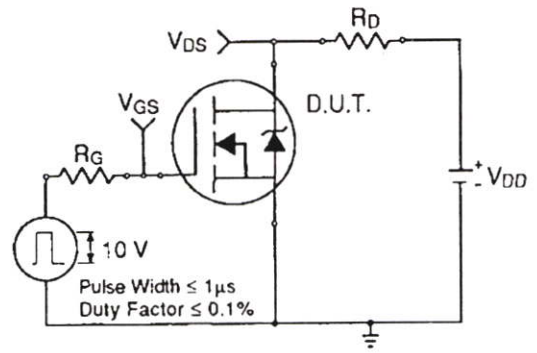


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

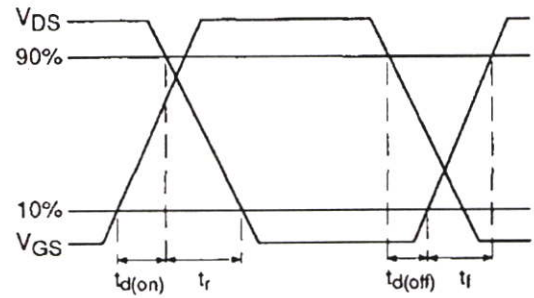


Fig 10b. Switching Time Waveforms

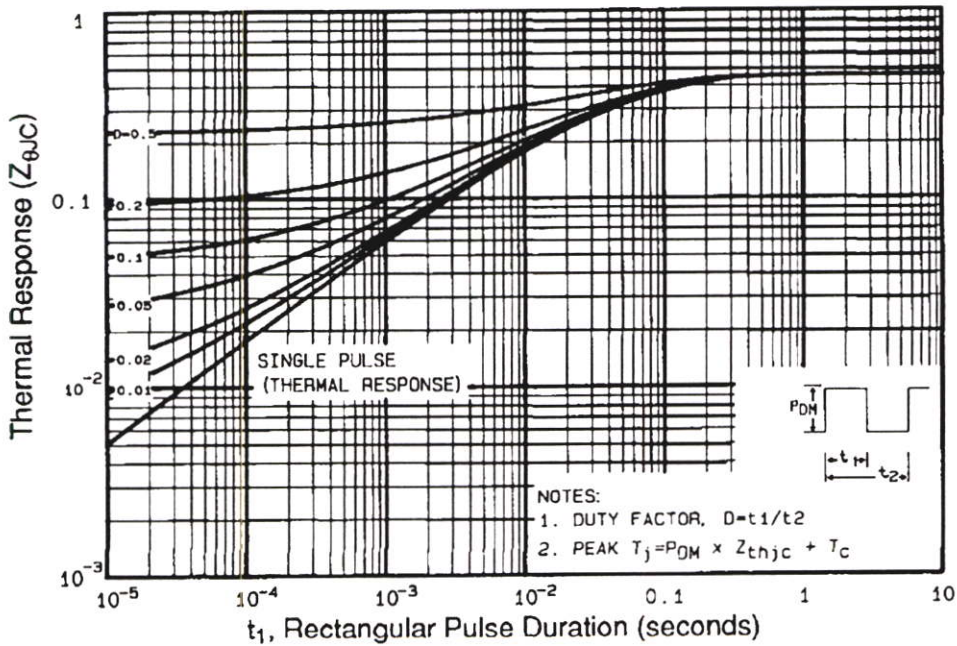


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

DATA SHEETS

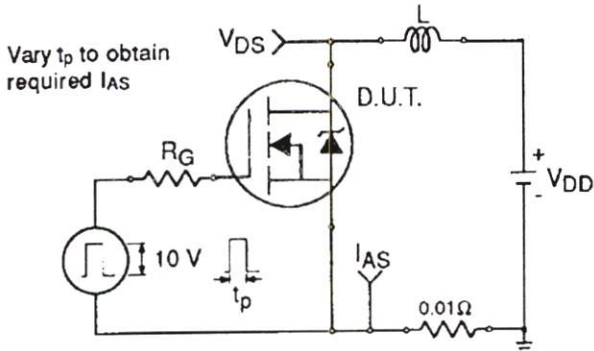


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

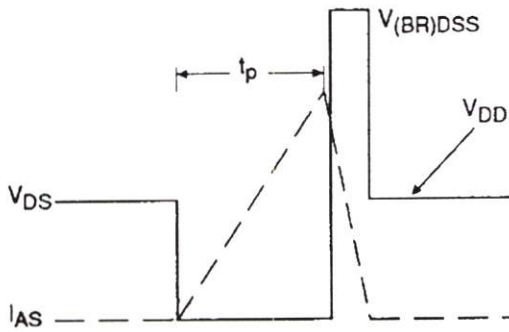


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

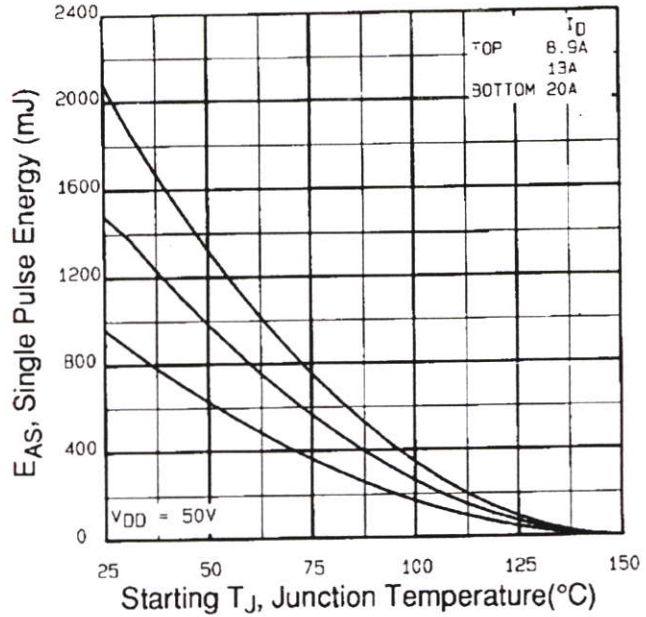


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

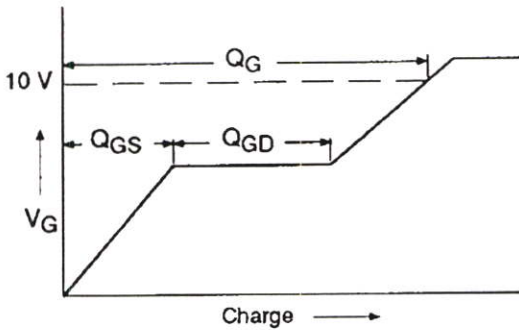


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

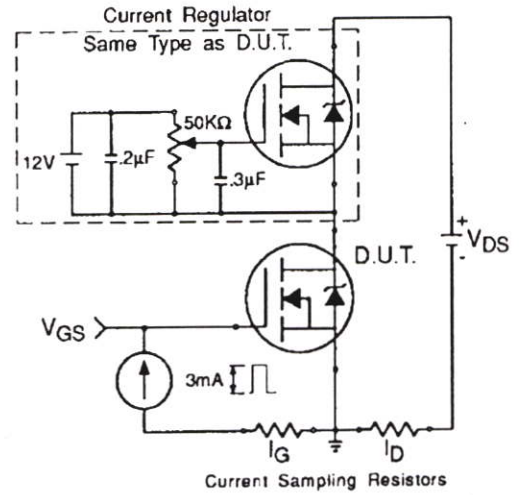


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรี ณัฐวุฒิ พลชะติน
วัน เดือน ปีเกิด	16 มกราคม 2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่อยู่	286/69 หมู่บ้านร่วมสุข ถ.คอนนง ต.มะขามเตี้ย อ.เมืองสุราษฎร์ธานี จ.สุราษฎร์ธานี 84000 โทร.077-285-574
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง