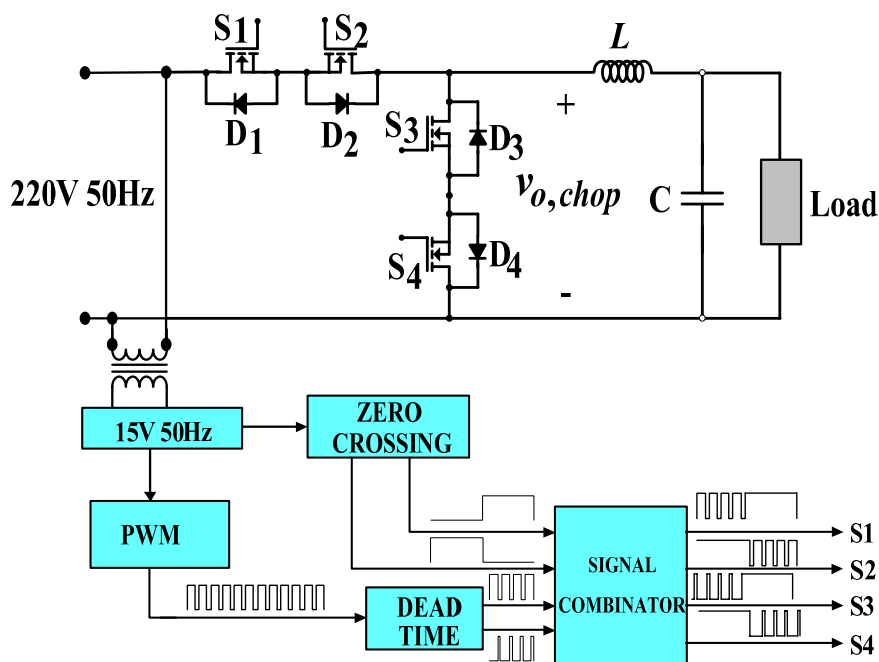


บทที่ 3

การทำงานของวงจรเอช็ีชอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูง

3.1 บทนำ

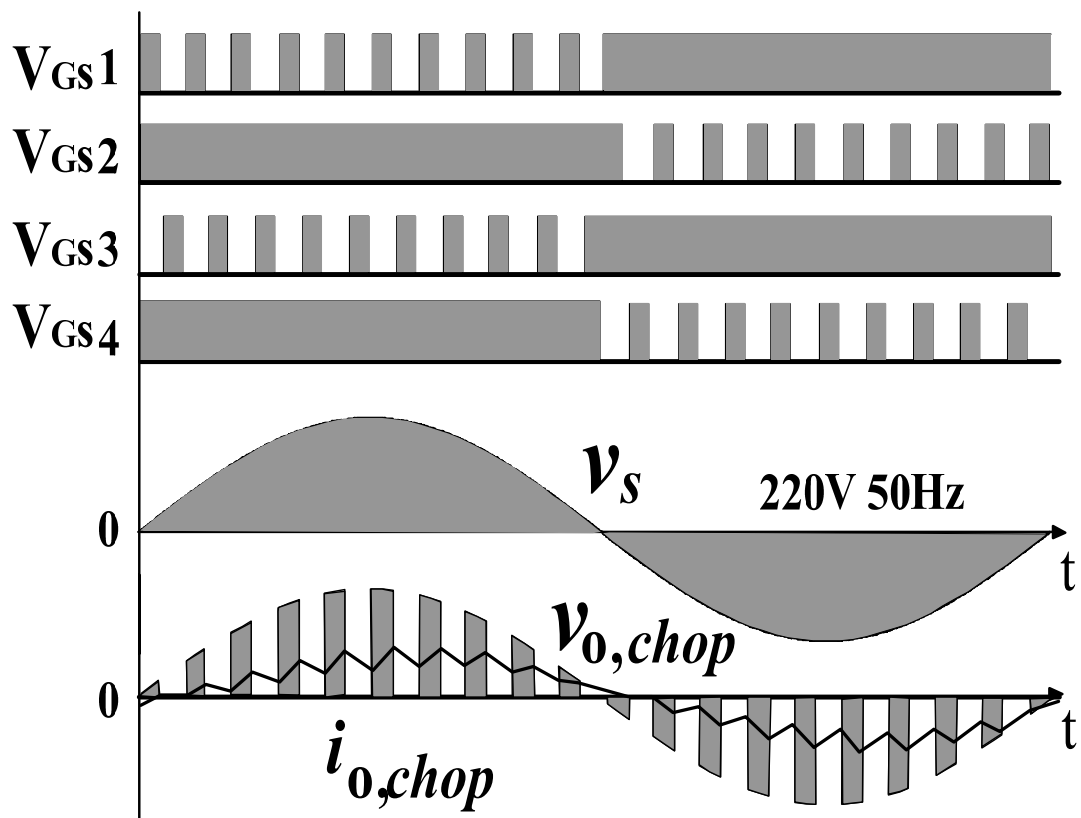
ในงานที่ต้องการแรงดันที่มีลักษณะคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz ที่สามารถปรับขนาดแรงดันได้อย่างต่อเนื่องในย่านกว้าง ตั้งแต่ระดับแรงดันศูนย์จนถึงระดับสูงสุด 200V สามารถทำได้โดยการนำเอาแรงดันไซน์การไฟฟ้า 50 Hz มาผ่านวงจรเอช็ีชอปเปอร์ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งทำงานที่ความถี่สวิตซ์ชิ่งในระดับ 20 kHz พร้อมกับผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์วงจรเอช็ีชอปเปอร์อย่างเป็นขั้นตอน ตั้งแต่การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรในแต่ละโหมดการทำงาน จากนั้นได้นำคลื่นไซน์ที่ถูกชอปด้วยความถี่สูง 20 kHz มาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าประกอบฮาโมนิกส์ที่มีปะปนในตัวคลื่นเอช็ีชอป องค์ประกอบที่ได้นี้สามารถนำข้อมูลไปออกแบบเพื่อกำหนดค่า LC ในวงจรฟิลเตอร์ได้ ผลปรากฏว่า LC ที่ใช้ในการออกแบบมีขนาดเล็กและสามารถปล่อยผ่านคลื่นไซน์ 50 Hz ออกไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่องค์ประกอบฮาโมนิกส์ความถี่สูงในลำดับต่ำสุดลำดับที่ 400 จะถูกกรองทิ้งได้เกือบทั้งหมดผลปรากฏว่าแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะคลื่น 50 Hz ใกล้เคียงคลื่นไซน์มาก พร้อมทั้งสามารถปรับขนาดของแรงดัน rms นี้ได้ตั้งแต่ 0 V ถึง 200 V



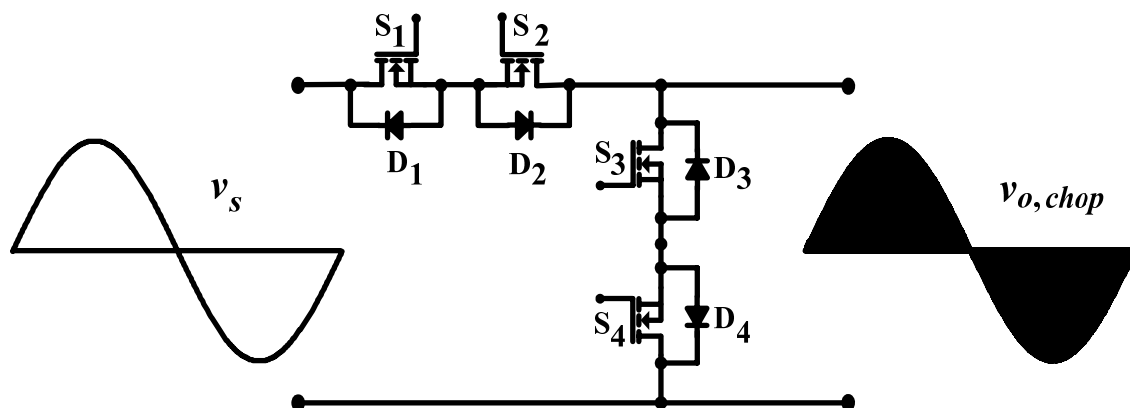
รูปที่ 3.1 วงจรเอช็ีชอปเปอร์และบล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับเคลื่อน

3.2 โหมดการทำงานของวงจรเอซี-ชอปเปอร์

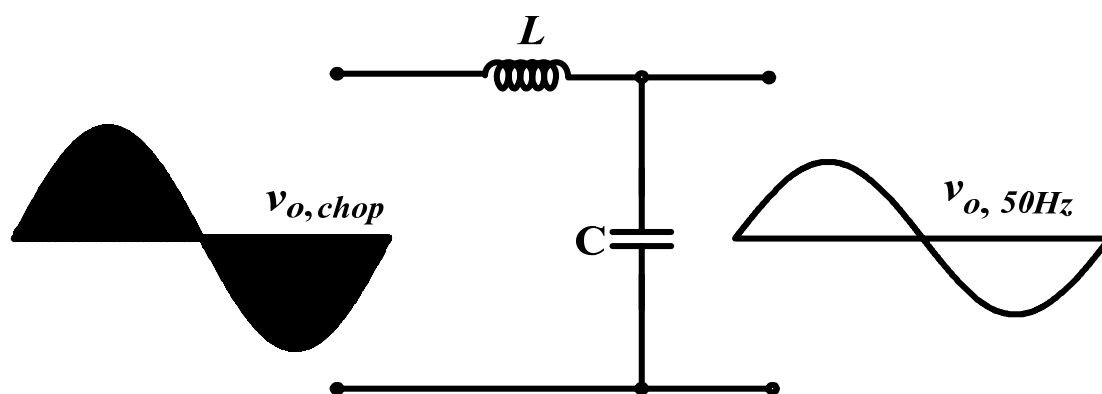
เมื่อป้อนสัญญาณกระตุ้นเกณฑ์ลักษณะดังรูปที่ 3.2 ให้กับสวิตช์ของวงจรในรูปที่ 3.3 จะเกิดเป็นการทำงานของวงจรเป็นจังหวะตามที่เรากำลังต้องการ ซึ่งการทำงานที่เกิดขึ้นนี้จะสร้างให้เกิดโหมดการทำงานของวงจรในรูปแบบต่างๆขึ้นมา โดยอินพุตของวงจรเอซีชอปเปอร์ คือสัญญาณไฟฟ้า 50 Hz และจะได้ลักษณะของคลื่นแรงดันที่ออกจากวงจรเอซีชอปเปอร์เป็น $v_{o,chop}$ และกระแส $i_{o,chop}$ ซึ่งมีลักษณะเป็นแรงดันไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 20 kHz ที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์ในวงจรเอซีชอปเปอร์ ทำงานตามสัญญาณขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นที่แสดงดังในรูปที่ 3.2 โดยสัญญาณไฟฟ้า 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่สูง 20 kHz นี้จะเกิดเป็นโหมดการทำงานต่างๆ และเมื่อนำไซน์ 50 Hz ที่มีฮาร์มอนิกความถี่สูง 20 kHz ไปอยู่ผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ ดังในรูปที่ 3.4 วงจร LC ฟิลเตอร์ก็จะทำหน้าที่กรองเอาฮาร์มอนิกความถี่สูงออกจากไซน์ 50 Hz ทำให้ได้เอาต์พุตของวงจร LC ฟิลเตอร์ออกมาเป็นไซน์ 50 Hz ที่สามารถปรับค่า rms ได้และมีฮาร์มอนิกความสูงปะปนออกมาน้อยมาก



รูปที่ 3.2 ลักษณะสัญญาณขับเคลื่อนและคลื่นอินพุตเอาต์พุต



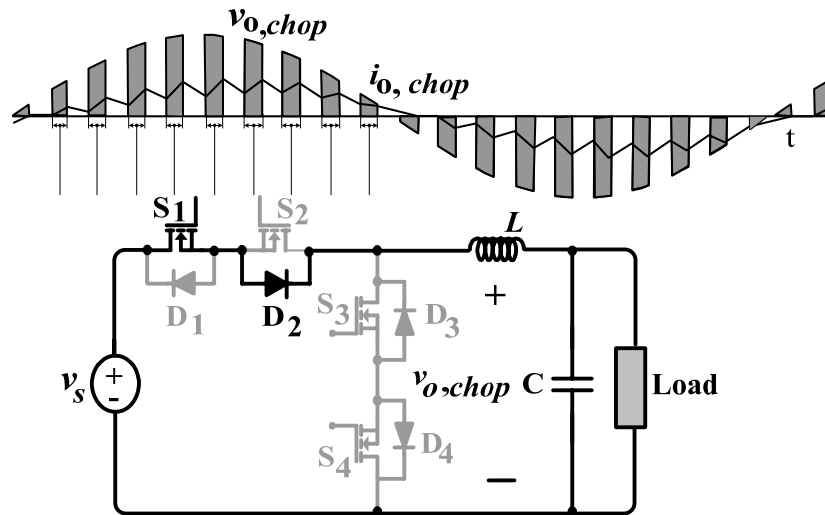
รูปที่3.3 ลักษณะของคลื่นก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรเอชีชอปเปอร์



รูปที่3.4 ลักษณะคลื่นก่อนผ่านและหลังผ่าน LC ฟิลเตอร์

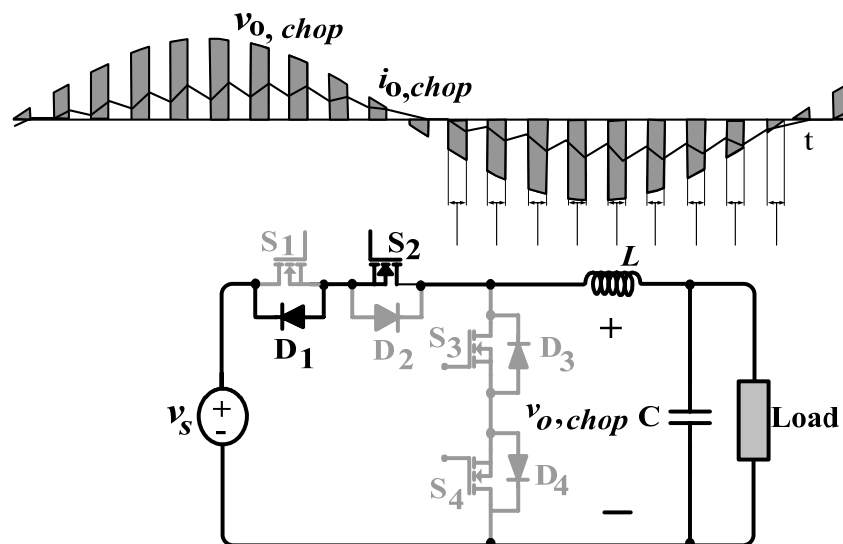
3.2.1 โหมดจ่ายกำลัง (Powering Mode)

โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวก โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมดที่โหลดได้รับกำลังจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ 50 Hz ในครึ่งไซเคิลบวก โดยมีแรงดันเป็นบวกและกระแสเป็นบวก ซึ่งจะมีลักษณะรูปคลื่นและการทำงานของวงจรดังรูปที่ 3.5 จากวงจรเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ S_1 สวิตช์ S_1 ก็จะทำการ ON เพื่อต่อวงจรทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ S_1 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_2 ผ่าน LC ฟิลเตอร์ไปยังโหลดและครบวงจร

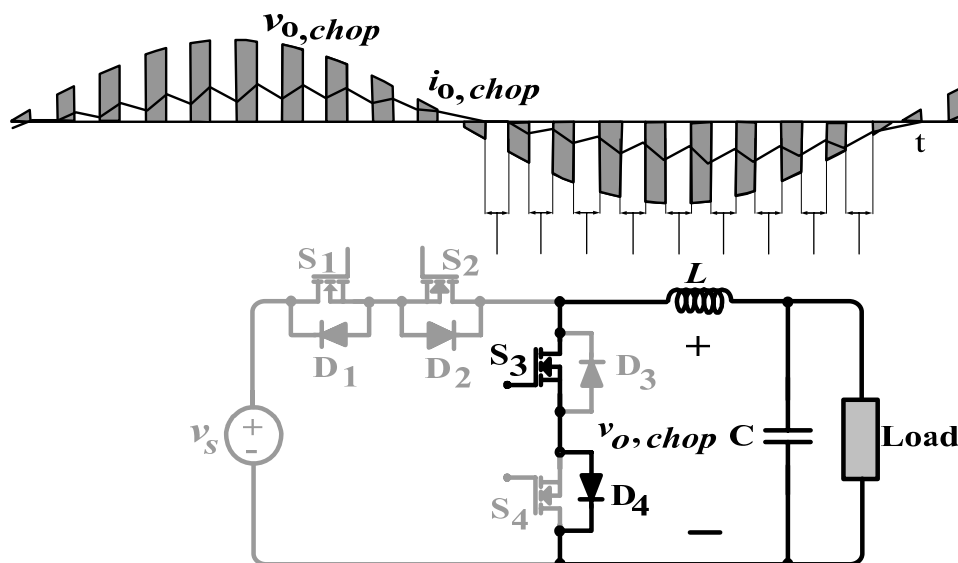


รูปที่ 3.5 ลักษณะวงจรของโหมดย่อยกำลังในครึ่งซีกเลบบวก

โหมดย่อยกำลังในครึ่งซีกเลบบวกเป็นโหมดที่โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 50 Hz ในครึ่งซีกเลบบวก โดยที่เมื่อแรงดันเป็นลบกระแสเป็นลบ ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.6 จากวงจรเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ S_2 สวิตช์ S_2 ก็จะทำการ ON เพื่อต่อวงจรทำให้พลังงานไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน LC ฟิลเตอร์ผ่านโหลดผ่านสวิตช์ S_2 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_1 กลับวงจร



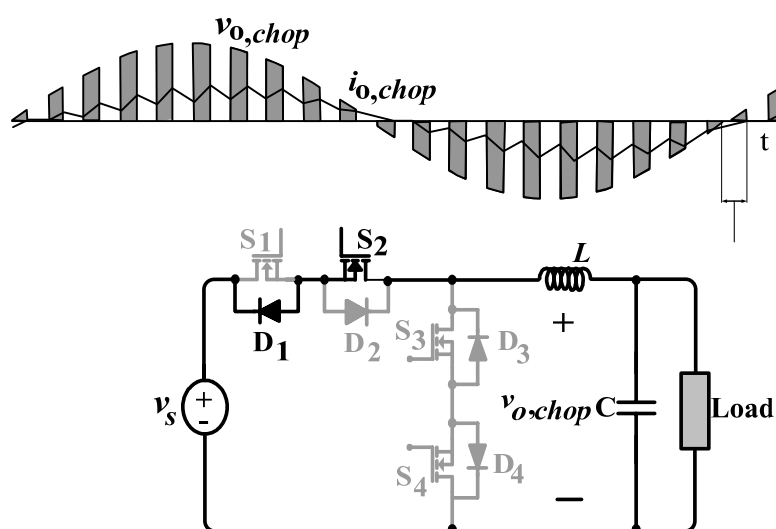
รูปที่ 3.6 ลักษณะวงจรของโหมดย่อยกำลังในครึ่งซีกเลบบวก



รูปที่ 3.8 โหมดฟรีวีลในครึ่งไซเคิลลบ

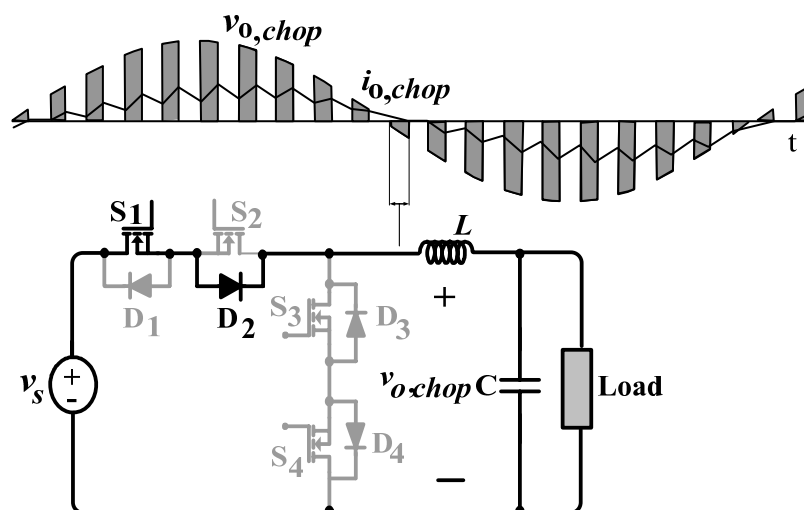
3.2.3 โหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Mode)

โหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลลบเป็นโหมดที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 50 Hz รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลด เกิดขึ้นในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเป็นลบและกระแสเอาต์พุตเป็นบวก ในบริเวณครึ่งไซเคิลลบของ แรงดันอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 50-Hz ดังวงจรรูปที่ 3.9 การทำงานของวงจรเอช็อบเปอร์ในโหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลลบนี้นั้นจะทำงานเหมือนกับโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลลบ แต่มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากลับกันโดยกำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโหลดผ่าน LC ฟิลเตอร์ผ่านสวิตช์ S_2 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_1 ไปยังแหล่งจ่ายกรวยวงจร



รูปที่ 3.9 โหมดรีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลลบ

โหมครีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมคที่แหล่งจ่ายไฟ 50Hz รับกำลังไฟฟ้าคืนจากโหลด เกิดขึ้นในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเป็นบวกและกระแสเอาต์พุตเป็นลบ ในบริเวณครึ่งไซเคิลบวกของ แรงดันไฟ 50-Hz ดังวงจรรูปที่ 3.10 การทำงานของวงจรเอชี่ชอปเปอร์ในโหมครีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลบวกนั้นจะทำงานเหมือนกับโหมคจ่ายกำลังไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลลบว แต่มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากลับกัน โดยกำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโหลดผ่าน LC ฟิลเตอร์ไปยังแหล่งจ่าย ผ่านสวิตช์ S_1 ผ่านไดโอดของสวิตช์ S_2 ครบวงจร



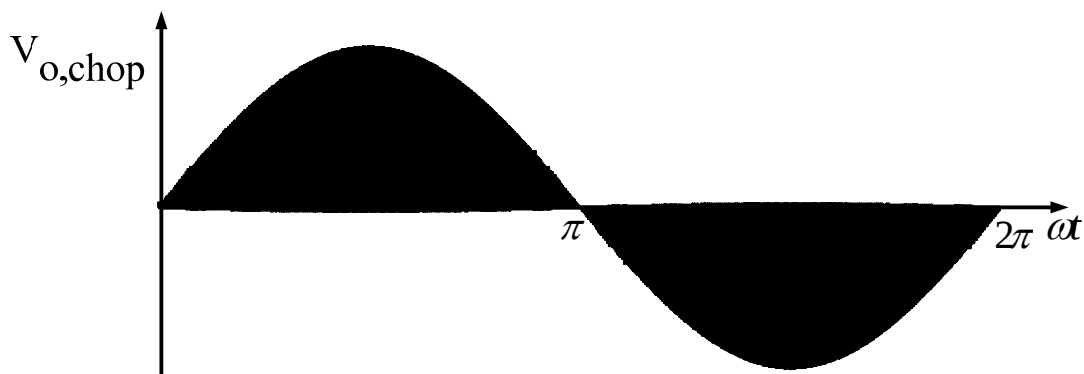
รูปที่3.10 โหมครีเจนเนอเรทีฟในครึ่งไซเคิลบวก

3.3 ลักษณะคลื่นของวงจรเอชี่ชอปเปอร์ที่ได้จากการทำงานเป็นโหมค

จากการร่วมกันทำงานของสวิตช์และอุปกรณ์ที่ต่อกันเป็นวงจรเอชี่ชอปเปอร์ซึ่งทำให้เกิดโหมคการทำงานดังที่ได้อธิบายการทำงานของแต่ละโหมคไปแล้วนั้น จากการทำงานในลักษณะดังกล่าวในหนึ่งไซเคิลไซน์อินพุตซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟ 220 V /50 Hz เมื่อทำงานครบหนึ่งไซเคิลจะได้คลื่นไซน์ 50Hz ที่ถูกสับให้เป็นช่องเล็กๆ ตามจังหวะการสวิตช์ของวงจร โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ทำให้ในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz แบบเป็นช่องได้เท่ากับ 400 ช่องดังสมการที่ (3.1) [2]

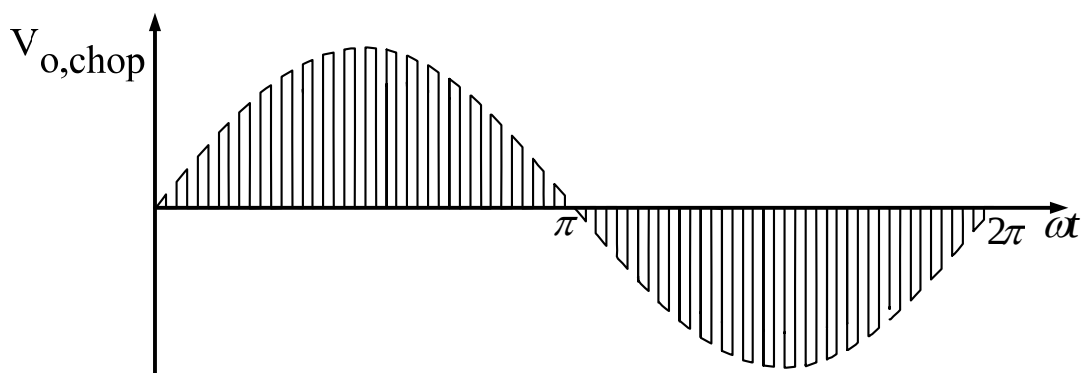
$$m_f = \frac{f_{sw}}{f} = \frac{20\text{kHz}}{50\text{Hz}} = 400 \quad (3.1)$$

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



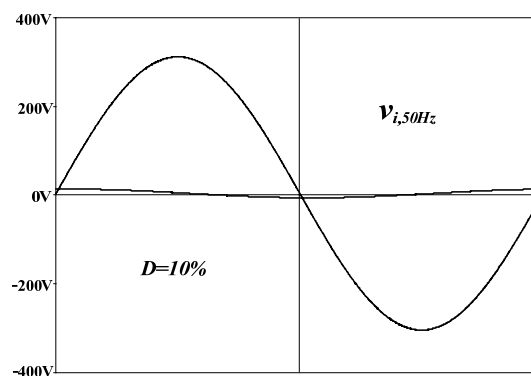
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นไซน์อินพุต 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 20 kHz

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

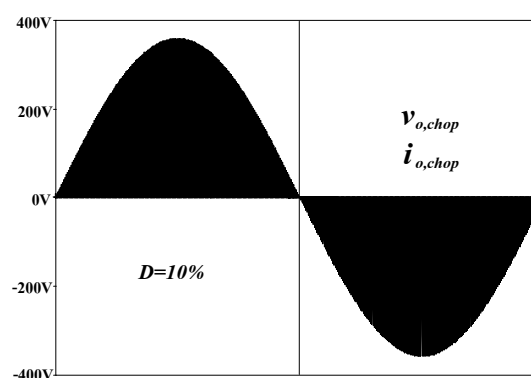


รูปที่ 3.12 รูปคลื่นไซน์อินพุต 50 Hz ที่ถูกสับด้วยความถี่ 2 kHz

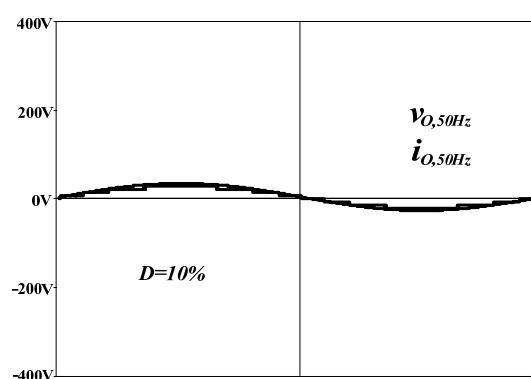
จากรูปที่ 3.13 ถึง รูปที่ 3.21 จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปสัญญาณที่ยังไม่ได้ผ่าน LC ฟิลเตอร์ทั้งในส่วนที่มีค่าดีวี่ไซเคิล D (Duty cycle) เท่ากับ 10 % 50% และ 90 % จะไม่แตกต่างกัน เพราะใน 1 ไซเคิลที่มีค่าแรงดันเท่ากันจะถูกสับแบ่งเป็น 400 ช่องแล้วจึงไปปรับความกว้างของช่องเล็ก 400 นั้นช่องให้กว้างมากขึ้นตามต้องการจึงทำให้มองเห็นเป็นไซน์ทึบ ต่างกับรูปที่ไซน์ทึบผ่าน LC ฟิลเตอร์แล้วก็จะเป็ไซน์สาย 50 Hz ที่สามารถปรับระดับแรงดันได้ในรูปที่ไซน์ทึบผ่าน LC ฟิลเตอร์แล้วจะมีความแตกต่างกัน เพราะในรูปที่มีค่าดีวี่ไซเคิล (D) มากกว่าจะให้ไซน์ที่มีความสูงมากกว่าคือมีแรงดันมากกว่านั่นเอง ซึ่งเป็นผลมาจากการสับไซน์ 1 ไซเคิลให้เป็นช่องเล็ก 400 จำนวนช่อง



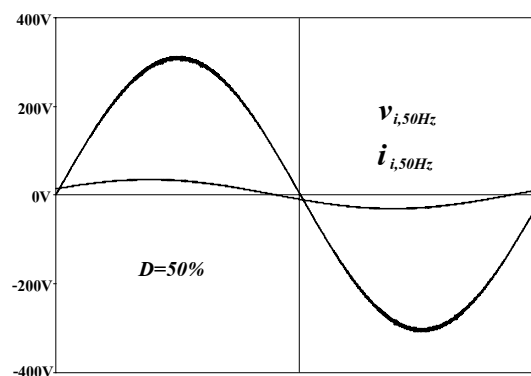
รูปที่ 3.13 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของวงจรเอชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 10 %



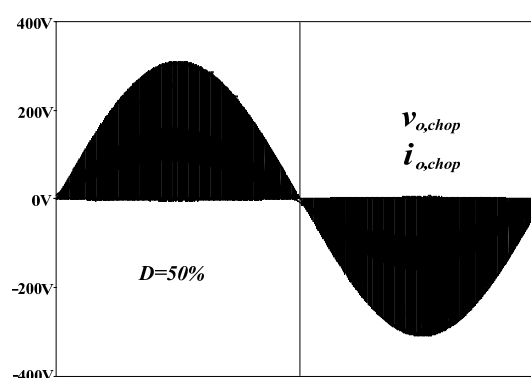
รูปที่ 3.14 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 10 %



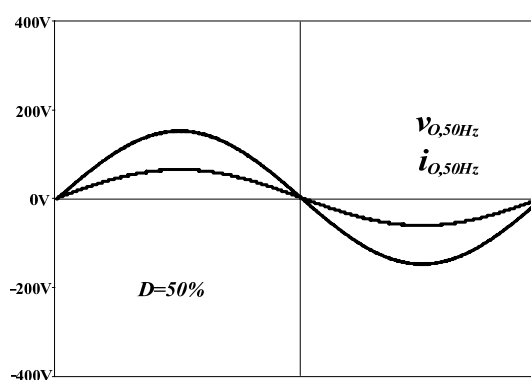
รูปที่ 3.15 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 10 %



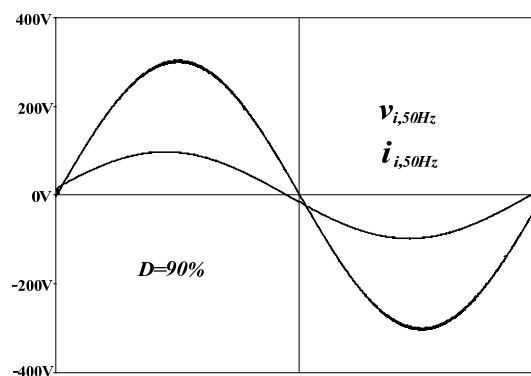
รูปที่ 3.16 คลื่นแรงและกระแสคั่นอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 50 %



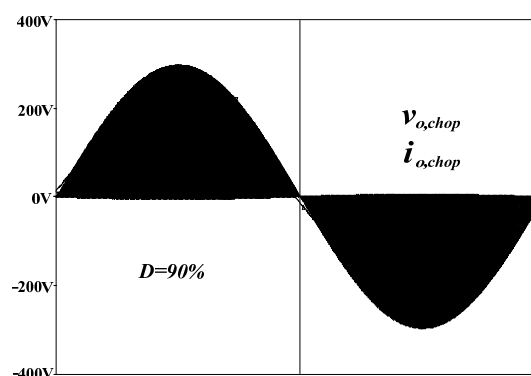
รูปที่ 3.17 คลื่นแรงคั่นและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 50 %



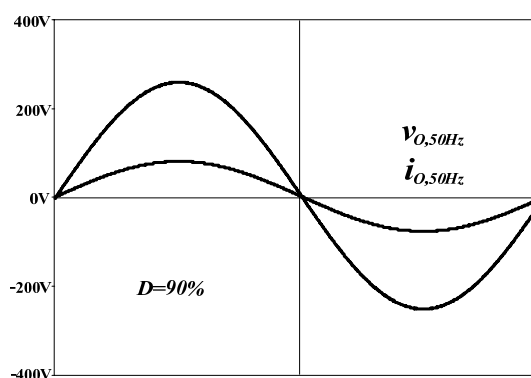
รูปที่ 3.18 คลื่นแรงคั่นและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 50 %



รูปที่ 3.19 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 90 %



รูปที่ 3.20 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ยังไม่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 90 %



รูปที่ 3.21 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล D เท่ากับ 90 %

จากรูปคลื่นที่ได้แสดงมาตั้งแต่ค่าคิวตี้ไซเคิลที่ 10% 50% และ 90% จะสังเกตได้ว่าแรงดันทางด้านอินพุตจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกระแสที่มากขึ้นตามค่าคิวตี้ไซเคิล ส่วนแรงดันและกระแสที่ถูกชอปจะมีรูปร่างลักษณะโครงสร้างที่ดูจากภายนอกแล้วเหมือนกันแต่ อันที่จริงถ้าขยายดูจะเห็นว่าที่ค่าคิวตี้ไซเคิลต่าง ๆ กันจะทำให้แรงดันที่ถูกชอปเป็นช่องมีค่าความกว้างของช่องที่เปลี่ยนไปตามค่าคิวตี้ไซเคิล โดยเมื่อนำแรงดันที่ถูกชอป ($v_{o, chop}$) มาผ่าน LC ฟิลเตอร์ ก็จะได้แรงดันไซน์สวที่มีความถี่ 50Hz เท่ากับความถี่อินพุตและสามารถปรับค่า rms ได้โดยการปรับค่าคิวตี้ไซเคิลที่สวิทช์ แต่ในการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ในแบบการชอปแรงดันในขณะที่สวิทช์เริ่มนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันสไปค์ ขึ้นมาซึ่งแรงดันสไปค์นี้จะทำให้การทำงานของวงจรทำได้ไม่เต็มที่ หรืออาจจะทำให้อุปกรณ์สวิทช์เกิดความเสียหายได้ในหัวข้อต่อไปจึงเป็นการกล่าวถึงการทำงานและการวิเคราะห์วงจรสับเบอร์

3.4 สับเบอร์

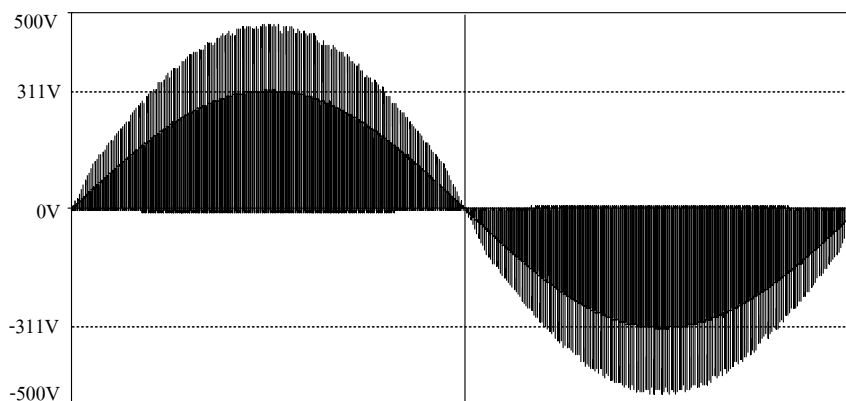
โดยทั่วไปการทำงานของอุปกรณ์สวิทช์ [1] จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิทช์นำกระแส ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันตกคร่อมสวิทช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และอีกกรณีหนึ่งคือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะของสวิทช์ (หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิทช์) ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเริ่มทำงานของสวิทช์จะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิทช์นำกระแสมาก ซึ่งการทำงานของวงจรนอกจากจะมีอุปกรณ์สวิทช์แล้วจะต้องมีอุปกรณ์อีกส่วนหนึ่งที่จะมาช่วยในการทำงานของอุปกรณ์ให้สวิทช์สามารถทำงานได้ดีขึ้น และเป็นตัวช่วยลดความสูญเสียให้กับวงจร ไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียในรูปของพลังงานหรือการเสียหายของอุปกรณ์ อันเนื่องมาจากการทำงานในสภาวะเกินพิกัด วงจรที่จะกล่าวถึงนี้ก็คือวงจรสับเบอร์ โดยการทำงานของวงจรสับเบอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนแรงดันในขณะที่อุปกรณ์สวิทช์เริ่มนำหรือหยุดนำกระแส เพราะการที่สวิทช์เริ่มนำหรือหยุดนำกระแสจะทำให้เกิดสไปค์(แรงดันหรือกระแสชั่วขณะ) เกิดขึ้นมาซึ่งการที่จะเกิดสไปค์(แรงดันหรือกระแสชั่วขณะ) นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อวงจรที่จะใช้งานและค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบอยู่ในวงจรด้วย ในทางการทำงานเราสามารถเลือกใช้อุปกรณ์สวิทช์ที่มีพิกัดที่สูงกว่าแรงดันสไปค์ได้แต่ไม่นิยมทำกันเพราะจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาสูงมากและเป็นการใช้งานที่ไม่คุ้มค่า ดังนั้นเราจึงมาใช้สับเบอร์เป็นอุปกรณ์ช่วยในการทำงานของสวิทช์ โดยที่วงจรสับเบอร์จะเข้าไปทำให้ค่าต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเทียบกับเวลา $\frac{di}{dt}$, อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา $\frac{dv}{dt}$, แรงดันสไปค์ (spike voltage) และค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงนำกระแส (turn-on)

และช่วงหยุดนำกระแส (turn-off) ให้มีค่าลดลงจนไม่สามารถที่จะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ โดยทั่วไปสแนบเบอร์มีอยู่ 3 แบบ คือ

1. Unpolarized Serise $R-C$ Snuber ซึ่งวงจรแบบนี้ทำหน้าที่ใช้ในการป้องกันไดโอดและไทรสเตอร์ โดยทำหน้าที่จำกัดค่าแรงดันเกิน และค่า $\frac{dv}{dt}$ ในช่วงเวลาย้อนกลับ
2. Polarized Serise $R-C$ Snuber วงจรแบบนี้ใช้ในการป้องกันอุปกรณ์จำพวกทรานซิสเตอร์ (transistor) เช่น BJT, Power MOSFET และ IGBT เป็นต้น โดยจะทำหน้าที่จำกัดแรงดันสไปค์ (spike voltage) และค่า $\frac{dv}{dt}$ ในช่วงหยุดนำกระแส (turn-off)
3. Polarized $R-L$ Snuber วงจรแบบนี้ใช้ในการจำกัดค่าของ $\frac{di}{dt}$ และกระแสเกินในช่วงนำกระแส (turn-on)

3.4.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจร RC สแนบเบอร์ในวงจรเอชโอบเปอร์สวิตซ์ที่ความถี่สูง

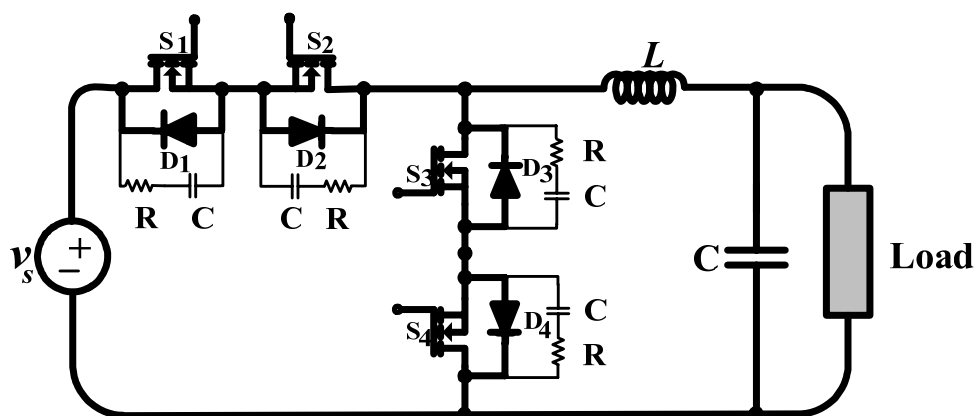
ในการทำงานของวงจรเอชโอบเปอร์เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งแรงดันไซน์ความถี่ต่ำที่ถูกสับเป็นช่วงๆ เท่าจำนวนเท่ากับความถี่สวิตซ์ซึ่งเป็นความถี่สูงที่เราใช้จะทำให้เกิดแรงดันสไปค์ (spike voltage) ในช่วงเริ่มนำกระแส ดังรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 3.22 โดยได้ใช้วงจรเอชโอบเปอร์ที่ยังไม่ได้ต่อสแนบเบอร์



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

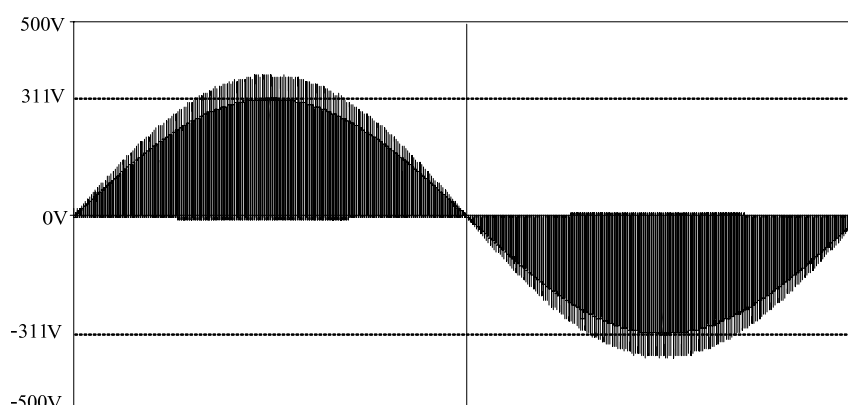
จากรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าแรงดันจะมีอยู่สองส่วนคือส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมมีจุดสูงสุดไม่เกิน 311V อีกส่วนคือแรงดันสไปค์ (spike voltage) ซึ่งมีค่าสูงสุดเกือบ 500V โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้

อุปกรณ์สวิตช์ที่ทนพิกัดแรงดันได้ไม่เกิน 500V จึงเป็นการอันตรายมากสำหรับการใช้งานอุปกรณ์สวิตช์ที่ว่า จึงต้องมาการใช้อุปกรณ์ช่วยเพื่อที่จะลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) ให้น้อยลงเราจึงทำการต่อวงจรสแน็บเบอร์ให้กับอุปกรณ์สวิตช์เพื่อลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) โดยมีการต่อวงจรสแน็บเบอร์ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรเอซีชอปเปอร์ที่มีวงจรสแน็บเบอร์ต่ออยู่

จากรูปวงจรในรูปที่ 3.23 จะเห็นได้ว่าวงจรสแน็บเบอร์ที่ใช้คือวงจร RC สแน็บเบอร์ โดยใช้ R ต่ออนุกรมอยู่กับ C จากนั้นนำ R-C ที่ต่ออนุกรมกันมาต่อขนานให้กับสวิตช์แต่ละตัวของวงจรเอซีชอปเปอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.23 โดยเมื่อต่อวงจรสแน็บเบอร์แล้วก็จะทำให้สามารถลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) ได้จริงดังที่จะแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งเป็นลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, chop}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์แต่ต่อวงจรสแน็บเบอร์แล้ว

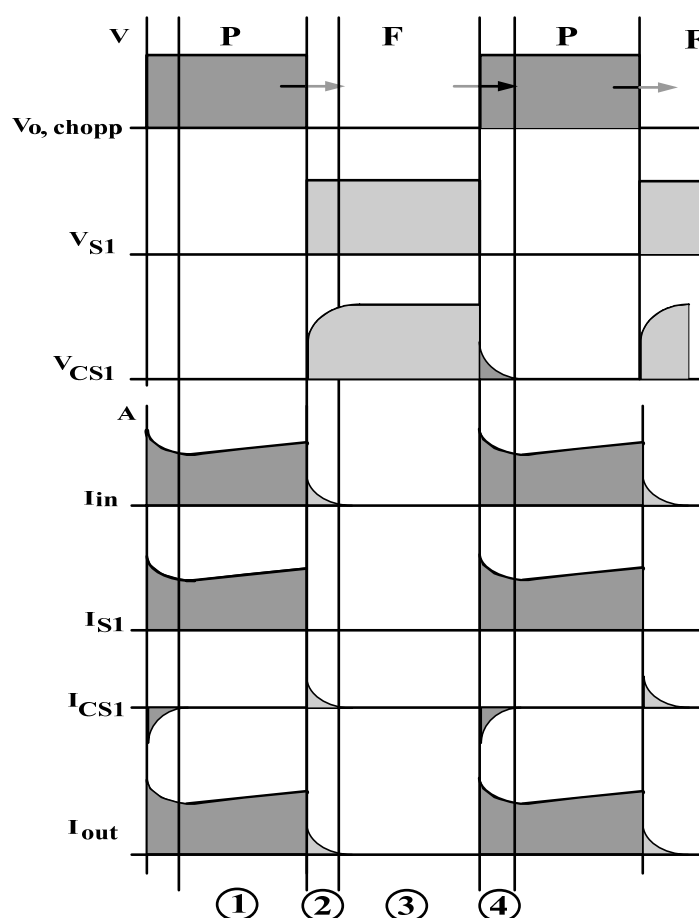


รูปที่ 3.24 ลักษณะของแรงดันเอาต์พุต ($v_{o, chop}$) ในหนึ่งไซเคิลของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์ที่ใส่สแน็บเบอร์แล้ว

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

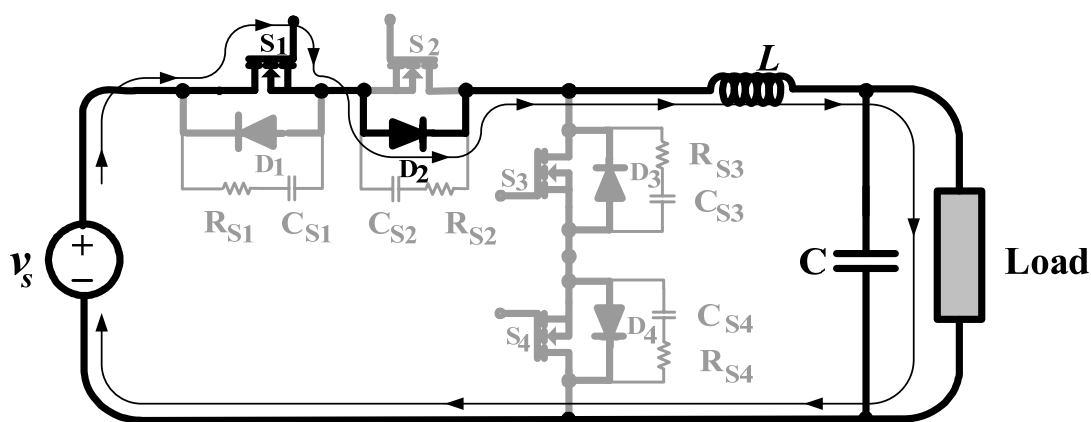
3.4.2 หลักการทำงานของวงจร R-C สับเบอร์

โดยทั่วไปการทำงานของวงจรสับเบอร์จะทำให้ได้คลื่นตามจุดต่างๆของวงจร โดยคลื่นที่ได้จากการทำงานนั้นเราสามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นเพื่อศึกษาถึงการทำงานของวงจร เพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานของวงจรและทิศทางกระแสได้อย่างแท้จริง ในการวิเคราะห์การทำงานของสับเบอร์ในวงจรเอชชอปเปอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ก็เช่นกัน เพื่อให้สามารถอธิบายการทำงานและลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ จึงได้ทำการซิมูเลตพร้อมทั้งนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงและได้อธิบายการทำงานไว้ดังนี้



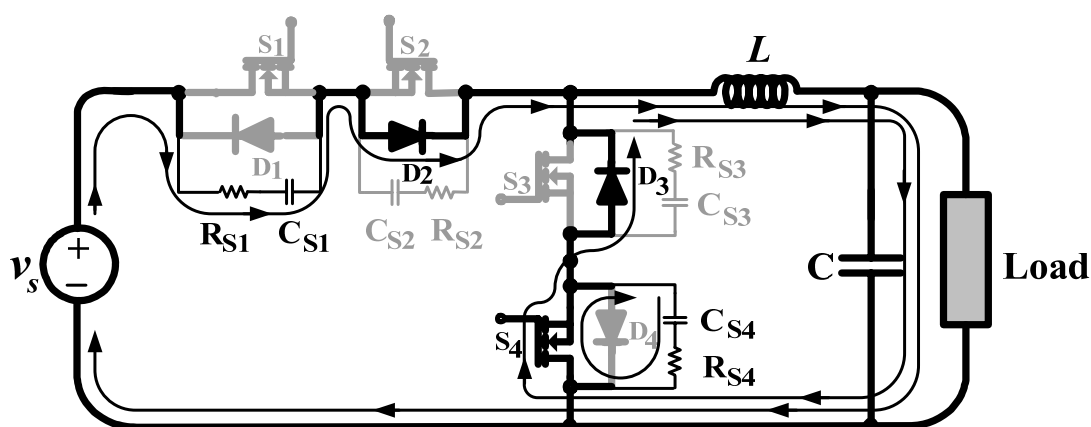
รูปที่ 3.25 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ในครึ่งไซเคิลบวก

จากคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในรูปที่ 3.25 สามารถนำมาอธิบายการทำงานของ วงจรสับเบอร์ที่ต่ออยู่ในวงจรเอชไอเอชเอชเอชได้ดังนี้



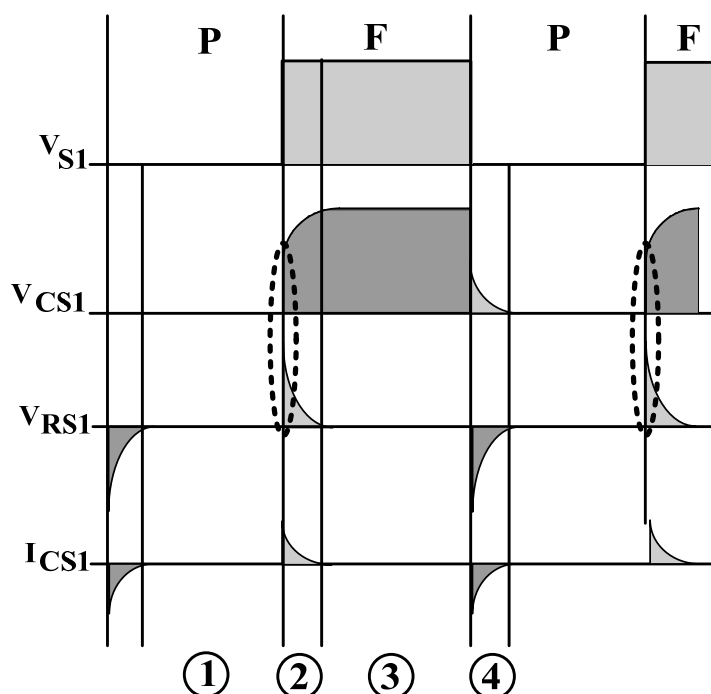
รูปที่ 3.26 ลักษณะการทำงานของวงจรเอชไอเอชเอชเอชในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Mode) ในครึ่ง ไซเคิลบวก

จากวงจรในรูปที่ 3.26 เป็นช่วงที่สวิตช์ S_1 นำกระแสซึ่งเป็นการทำงานในโหมดจ่าย กำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ของวงจรเอชไอเอชเอชเอช 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



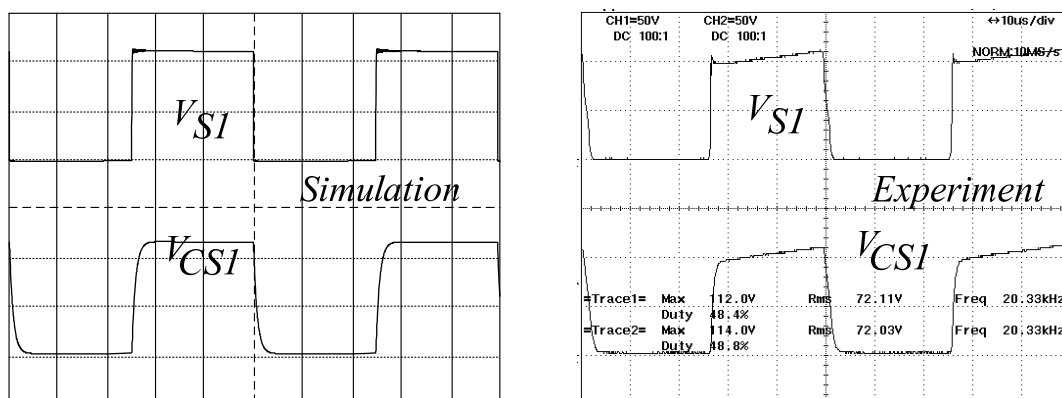
รูปที่ 3.27 ลักษณะการไหลของกระแสที่ซาร์ตเข้า C_{S1} และดิซชาร์ตประจุของ C_{S4} ในโหมดฟรีวีลิ่ง (Freewheeling Moad) ในครึ่ง ไซเคิลบวก

ในรูปที่ 3.27 เป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแสในขณะสวิตช์ S_1 ไม่นำกระแสทำให้แรงดันมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 (V_{S1}) มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกของวงจรเอชชอปเปอร์ ทำให้กระแสไหลผ่าน R_{S1} เข้าไปเก็บสะสมใน C_{S1} เพราะในขณะนั้น 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 โดยมีสาเหตุมาจากการที่สวิตช์หยุดนำกระแสทันทีทันใดนั้นทำให้เกิดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใดซึ่งก็เป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าเป็นแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์ด้วยนั้นเหมือนเป็นแรงดันที่มีความถี่สูงเพราะมีช่วงเวลาในการเปลี่ยนระดับแรงดันน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานใน C สับเบอร์มีค่าน้อยมากถือว่าเป็นศูนย์จึงมีค่าความต้านเฉพาะที่ R สับเบอร์ ดังในรูปที่ 3.28

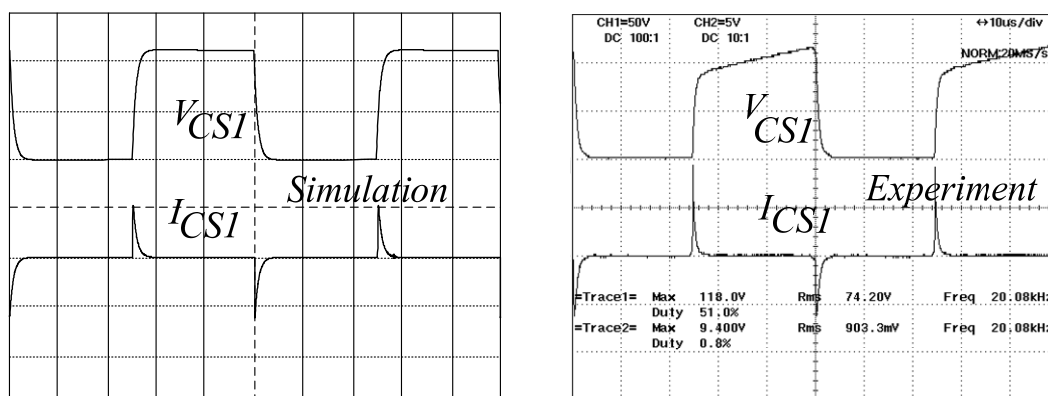


รูปที่ 3.28 แรงดันที่ตกคร่อม C_{S1} และแรงดันที่ตกคร่อม R_{S1} ในครึ่งไซเคิลบวก

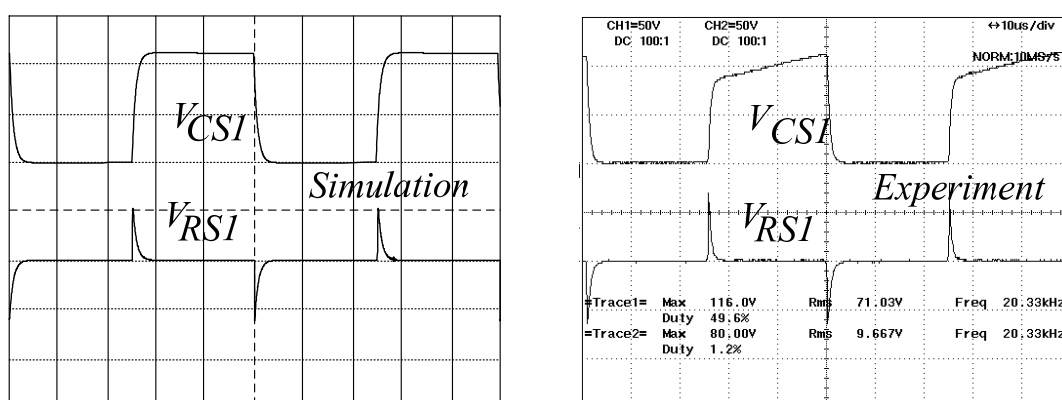
โดยได้ยืนยันความถูกต้องโดยได้แสดงผลที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองดังนี้



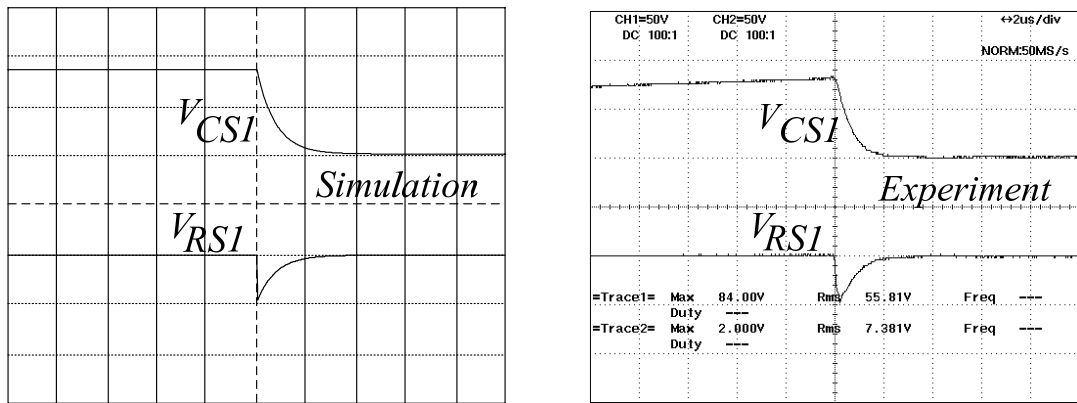
รูปที่ 3.29 คลื่นแรงดัน V_{S1} ที่ ($y=50V/div$, $x=10us/div$) และ V_{CS1} ที่ ($y=50V/div$, $x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



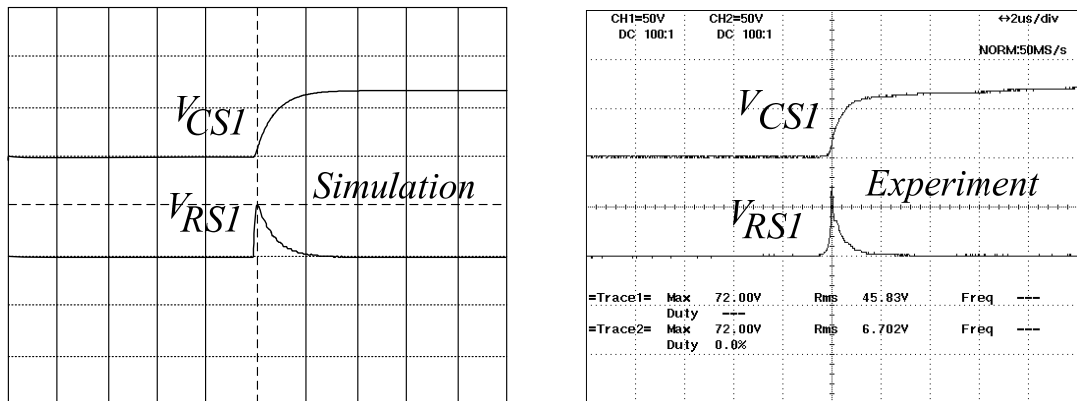
รูปที่ 3.30 คลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div$, $x=10us/div$) และ I_{CS1} ที่ ($y=5V/div$, $x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



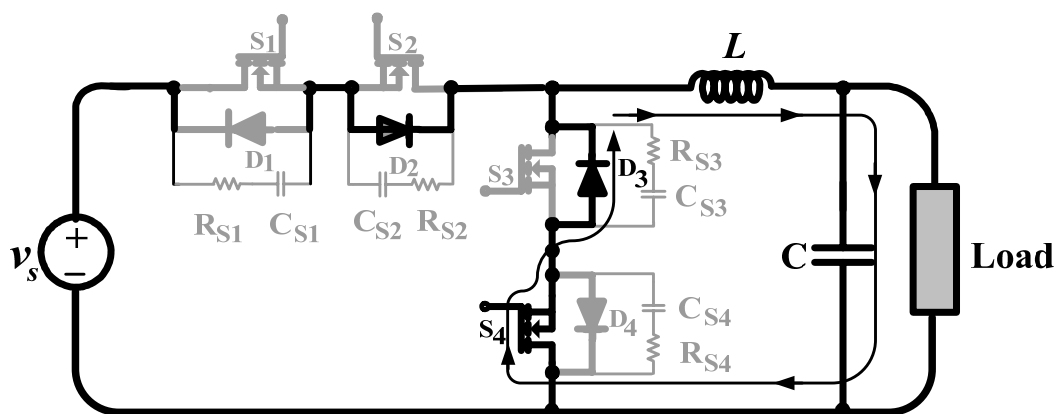
รูปที่ 3.31 คลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div$, $x=10us/div$) และ V_{RS1} ที่ ($y=50V/div$, $x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



รูปที่ 3.32 คลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขาตกที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

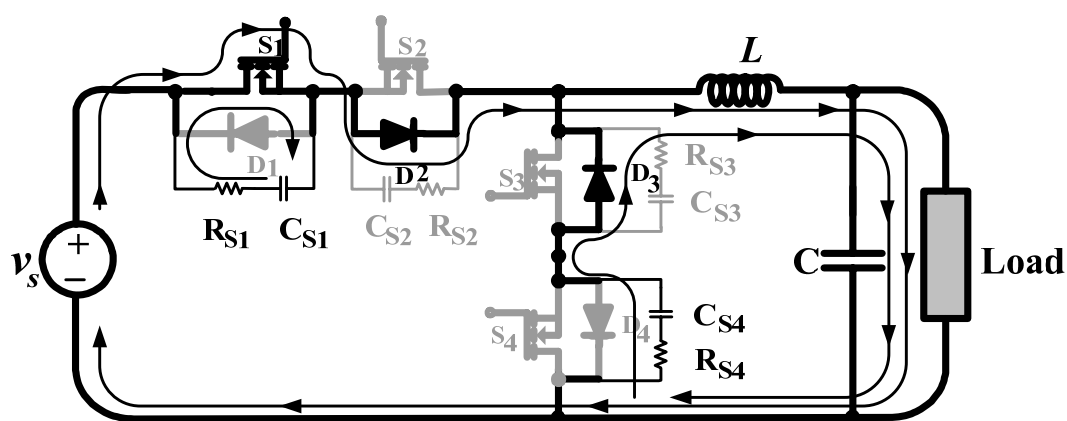


รูปที่ 3.33 คลื่นแรงดัน V_{CS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS1} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขาขึ้นที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



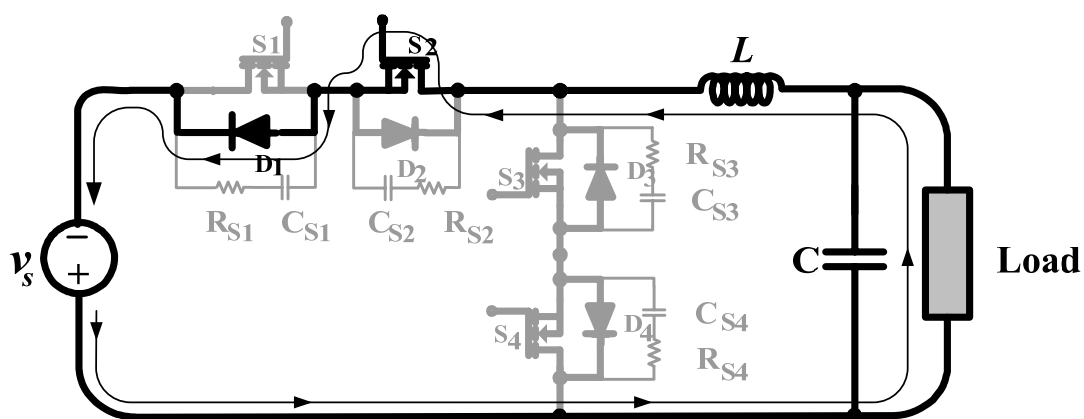
รูปที่ 3.34 วงจรเอชไอพเปอร์ในขณะสวิตช์ S_4 นำกระแสและ C_{S1} ถูกชาร์จประจุเต็มแล้ว เป็นทำงานในโหมดฟรีวิลลิง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวก

จากรูปที่ 3.34 เมื่อ C_{S1} ชาร์ตประจุเต็มแล้วกระแสจะไม่สามารถไหลผ่านไปได้อีกจึงทำให้วงจรถูกเปิดออกในขณะเดียวกัน C_{S4} ก็ทำการดิสชาร์จประจุหมดเช่นกันเพราะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_4 เป็นศูนย์เพราะอยู่ในช่วงโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกเป็นช่วงที่สวิตช์นำกระแสและจะคงอยู่ในสภาวะนี้ไปจนถึงช่วงที่วงจรถูกเอชซีขอปเปอร์เปลี่ยนการทำงานไปเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกในจังหวะต่อมาสวิตช์ S_1 เริ่มนำกระแสและสวิตช์ S_4 จะหยุดนำกระแสเป็นการเปลี่ยนจากการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวก ไปเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (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} เพราะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เดียวกันแต่ทำงานคนละช่วงเวลาการทำงานของวงจรจะเป็นดังวงจรในรูปที่ 3.35

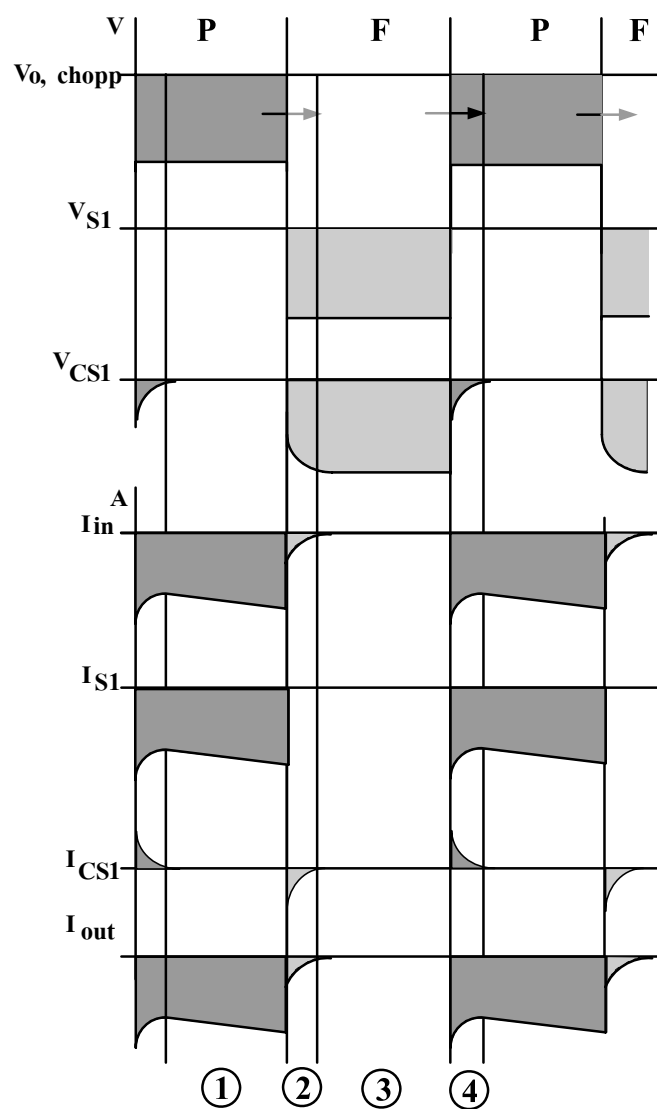


รูปที่ 3.35 การทำงานของวงจรถูกเอชซีขอปเปอร์ขณะสวิตช์ S_1 เริ่มนำกระแสโดยที่ C_{S1} ดิสชาร์จประจุผ่าน R_{S1} ผ่านไปยังสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_4 หยุดนำกระแสทำให้ C_{S4} ชาร์ตประจุ

และเมื่อ C_{S1} ดิสชาร์จประจุหมด C_{S4} ชาร์ตประจุเต็มการทำงานก็จะกลับไปเป็นในจังหวะแรกดังที่แสดงในรูปที่ 3.26 โดยการทำงานที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นการทำงานในครึ่งไซเคิลบวกของไซน์อินพุต ส่วนการทำงานในครึ่งไซเคิลลบก็จะเป็นหน้าที่ของสวิตช์ S_2 และสวิตช์ S_3 โดยที่สวิตช์ S_2 จะทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลบวก คือทำงานแบบเดียวกับสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_3 จะทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลบวกการทำงานก็จะเป็นแบบเดียวกันกับสวิตช์ S_4 โดยการทำงานในครึ่งไซเคิลลบจะเป็นดังที่จะแสดงต่อไปนี้จะเริ่มวงจรในรูปที่ 3.36

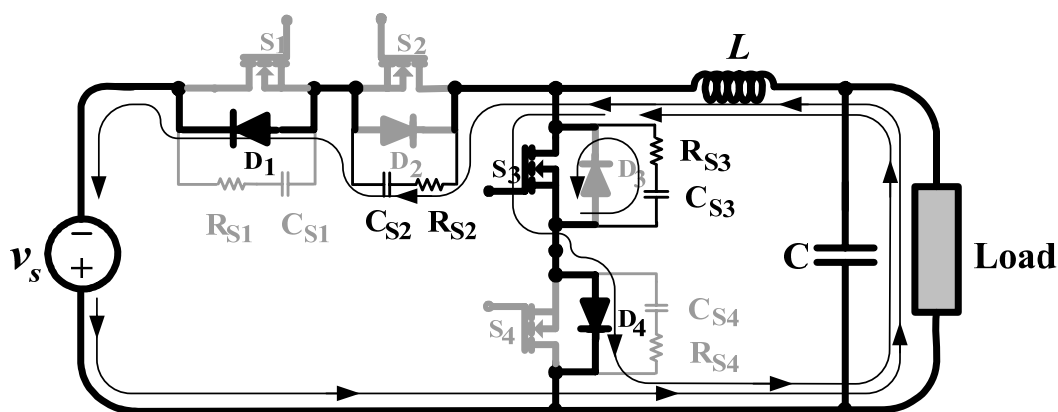


รูปที่ 3.36 ลักษณะการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Mode) ใน
ครั้งแรกเกิดลบ



รูปที่ 3.37 คลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสลับเบอร์ดในครึ่งไซเคิลลบ

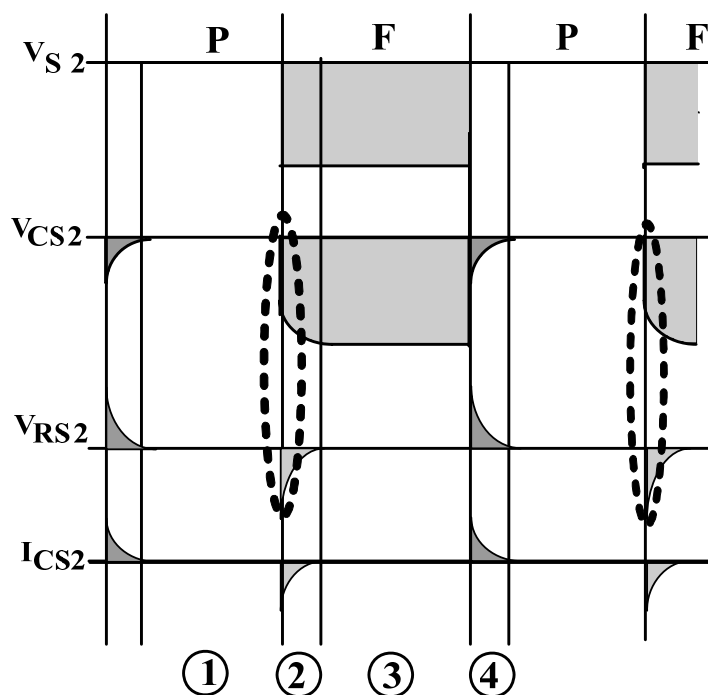
จากวงจรในรูปที่ 3.36 จะเป็นช่วงที่สวิตช์ S_2 นำกระแสโดยจากการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.36 นี้จะเป็นการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลของไซน์การไฟฟ้าที่เป็นแหล่งและจะทำให้ได้คลื่นการแสดและแรงดันตามจุดต่างดังในรูปที่ 3.37 โดยการทำงานจะคงอยู่เช่นนี้ไปจนกว่าสวิตช์ S_2 จนหยุดนำกระแสและในขณะเดียวกันสวิตช์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



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

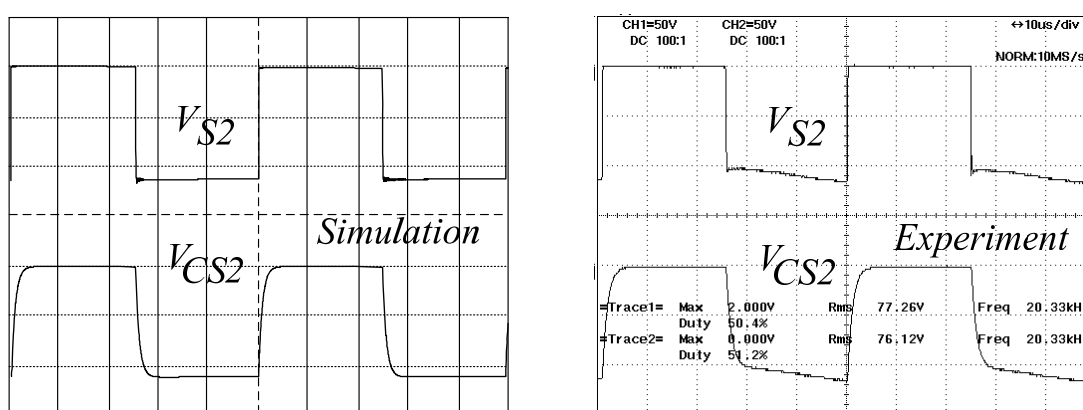
จากวงจรในรูปที่ 3.38 เมื่อสวิตช์ S_2 หยุดนำกระแสทำให้แรงดันไปตกคร่อมที่สวิตช์ S_2 ให้ (V_{S2}) มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบของวงจรเอชโซปเปอร์ ทำให้กระแสซาร์ตไหลผ่าน R_{S2} เข้าไปเก็บสะสมใน C_{S2} เพราะในขณะนี้ C_{S2} ไม่มีแรงดันหรือว่างอยู่ 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 นำกระแสทำให้ C_{S3} ดิซชาร์ตกระแสผ่านสวิตช์ S_3 ไปรวมกับกระแสในโหมดฟรีวิลริง (Freewheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลลบดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าในการทำงานของสับเบอร์จะมีช่วงที่สำคัญคือ ในจังหวะแรกที่สวิตช์หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใดในการทำงานของสวิตช์ในครึ่งไซเคิลลบก็เช่นกัน โดยแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ก็คือแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์นั่นเอง ในจังหวะแรกแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์แรงดันจะไปตกคร่อมที่ R สับเบอร์ทั้งหมด โดยมีสาเหตุมาจากการที่สวิตช์หยุดนำกระแสทันทีทันใดนั้นทำให้เกิดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ทันทีทันใดซึ่งก็เป็นที่น่าทึ่งกันแล้วว่าเป็นแรงดันที่ตกคร่อม RC สับเบอร์ด้วยนั้นเหมือนเป็นแรงดันที่มีความถี่สูง

เพราะมีช่วงเวลาในการเปลี่ยนระดับแรงดันน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานใน C สนับเบอร์มีค่าน้อยมากถือว่าเป็นศูนย์จึงมีค่าความต้านเฉพาะที่ R สนับเบอร์ ดังคลื่นในรูปที่ 3.39

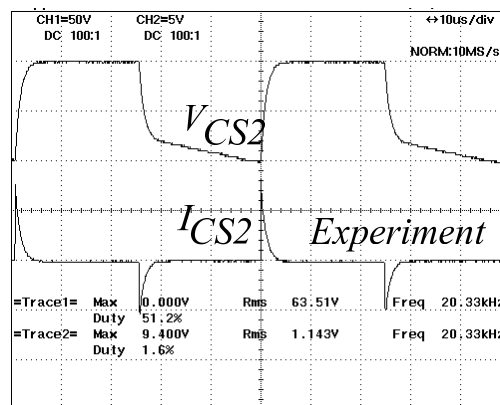
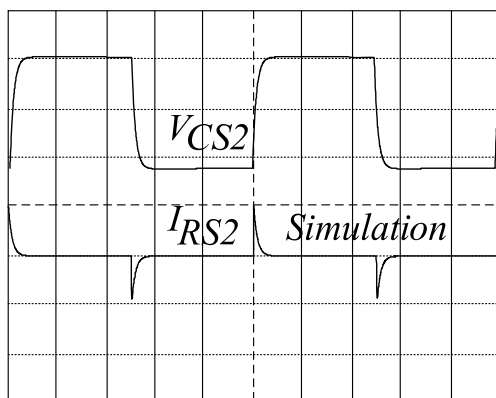


รูปที่ 3.39 แรงดันที่ตกคร่อม C_{S2} และแรงดันที่ตกคร่อม R_{S2} ในครึ่งไซเคิลบวก

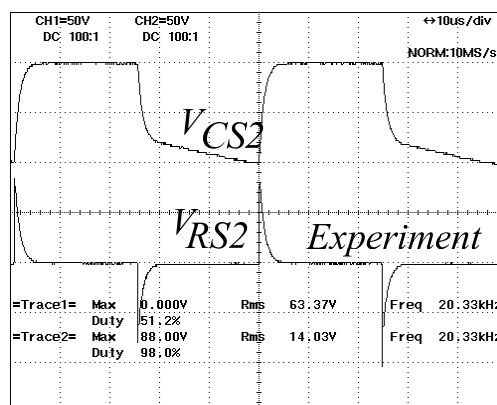
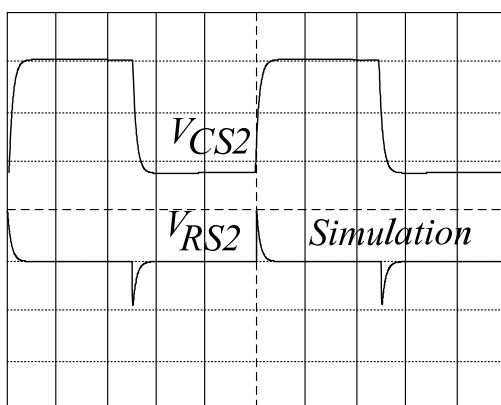
โดยได้ยืนยันความถูกต้องโดยได้แสดงผลที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลองดังนี้



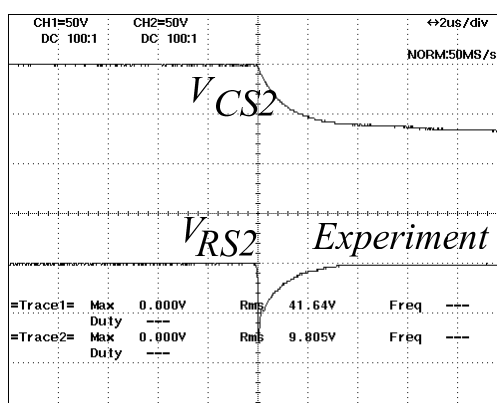
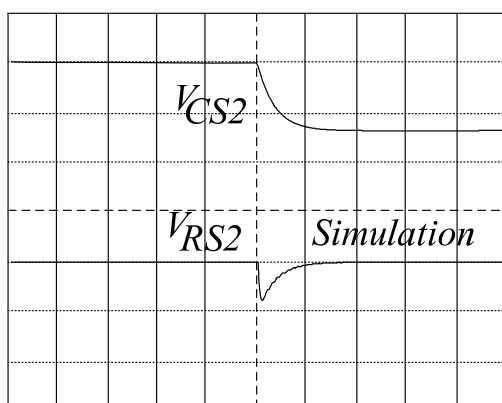
รูปที่ 3.40 คลื่นแรงดัน V_{S2} ที่ $(y=50V/div, x=10us/div)$ และ V_{CS2} ที่ $(y=50V/div, x=10us/div)$ ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



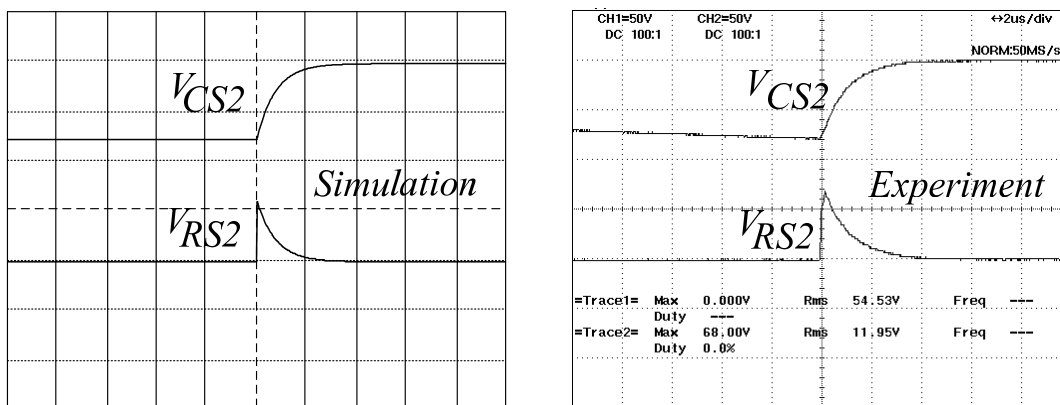
รูปที่ 3.41 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ I_{CS2} ที่ ($y=5V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



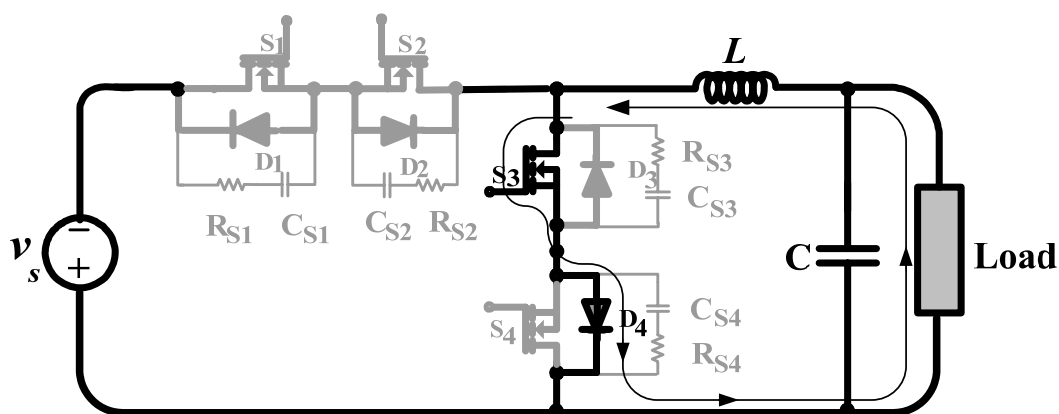
รูปที่ 3.42 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=10us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



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



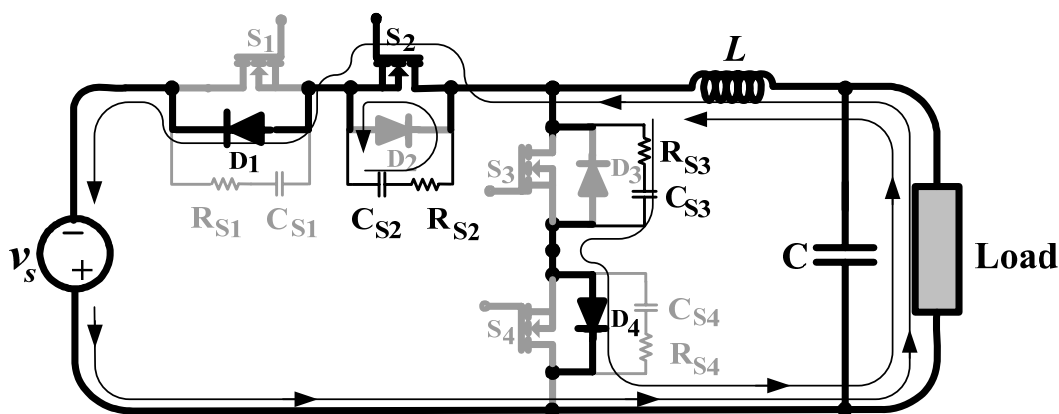
รูปที่ 3.44 คลื่นแรงดัน V_{CS2} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) และ V_{RS2} ที่ ($y=50V/div, x=2us/div$) ในช่วงขึ้นลงที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



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

จากรูปที่ 3.45 เมื่อ C_{S2} ชาร์จประจุเต็มแล้วกระแสจะไม่สามารถไหลผ่านไปได้อีกจึงทำให้วงจรถูกเปิดออกในขณะเดียวกัน C_{S3} ก็ทำการดิสชาร์จประจุหมดเช่นกันเพราะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_3 เป็นศูนย์เพราะอยู่ในช่วงโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลกลับเป็นช่วงที่สวิตช์นำกระแสและจะคงอยู่ในสภาวะนี้ไปจนถึงช่วงที่วงจรเอชชอปเปอร์เปลี่ยนการทำงานไปเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลกลับในจังหวะต่อมาสวิตช์ S_2 เริ่มนำกระแสและสวิตช์ S_3 จะหยุดนำกระแสเป็นการเปลี่ยนจากการทำงานในโหมดฟรีวิลริง (Free wheeling Moad) ในครึ่งไซเคิลกลับ ไปเป็นโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Powering Moad) ในครึ่งไซเคิลกลับเมื่อสวิตช์ S_2 นำกระแสจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_2 มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ C_{S2} ดิสชาร์จประจุผ่าน R_{S2} ผ่านไปยังสวิตช์ S_2 ไปพร้อมกับกระแสนินพุตต่อไป 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 การทำงานของวงจรเอชไอชอปเปอร์ขณะสวิตช์ S_2 เริ่มนำกระแสโดยที่ C_{S2} ดิซชาร์ตประจุผ่าน R_{S2} ผ่านไปยังสวิตช์ S_2 และสวิตช์ S_3 หยุดนำกระแสทำให้ C_{S3} ชาร์ตประจุ

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

3.4.3 การคำนวณค่า 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)

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

$$= 103.66 \Omega$$

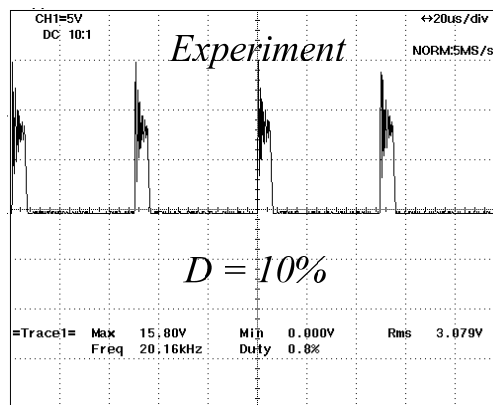
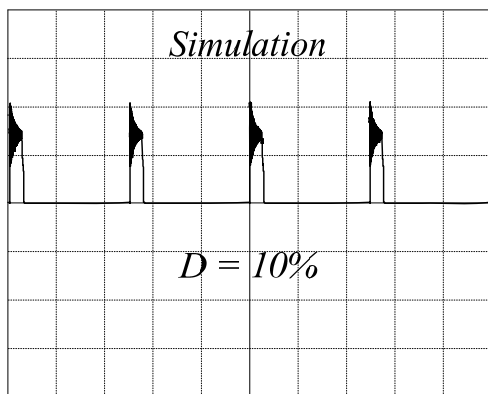
ดังนั้นเลือกค่า R_s เท่ากับ 105Ω

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

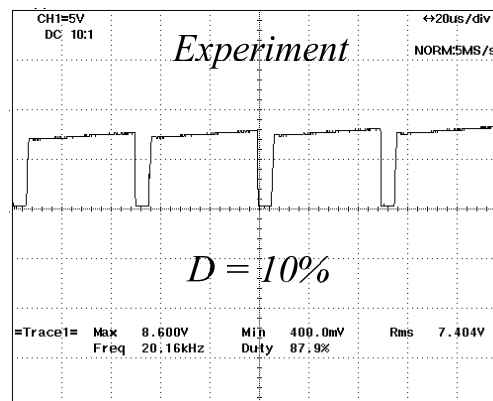
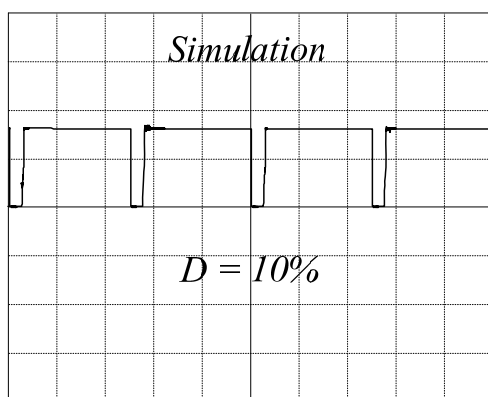
3.4.4 ผลการทดลองและผลจากการซิมูเลตที่ได้จากวงจรสนับเบอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงลักษณะของคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ที่ค่าดีวีไอไซเคิลประมาณ 10% , 50% และ 90% โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการซิมูเลตกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อความถี่สวิตซ์คงที่เท่ากับ 20 kHz ที่ค่าดีวีไอไซเคิลตามลำดับดังนี้

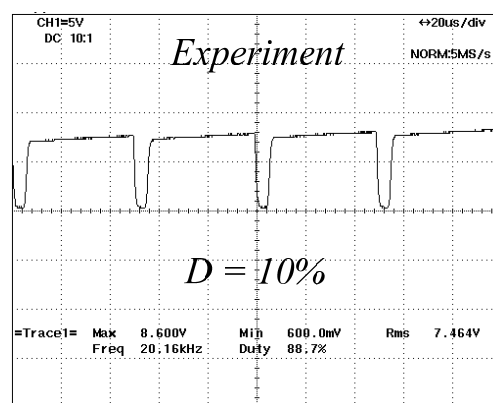
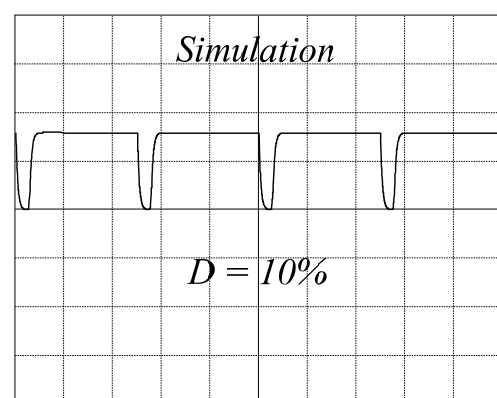
แรงดันและกระแสของวงจรสนับเบอร์ตามจุดต่างๆ โดยวงจรเอซีชอปเปอร์สวิตซ์ที่ค่าดีวีไอไซเคิลเท่ากับ 10 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz



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

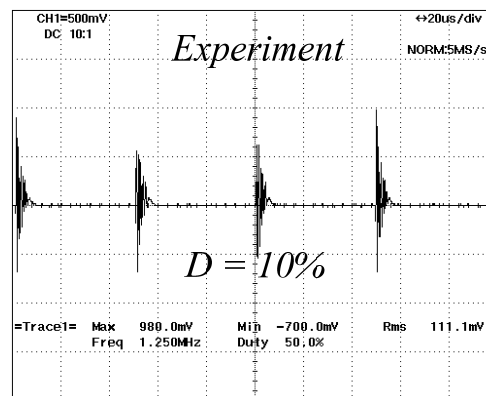
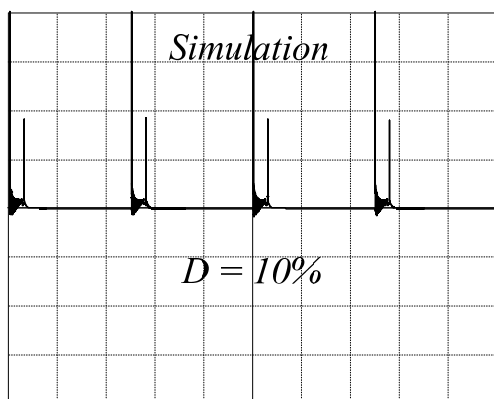


- (b) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่หนึ่ง v_{s1} ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

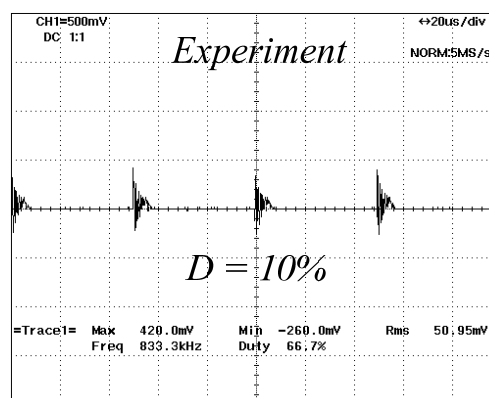
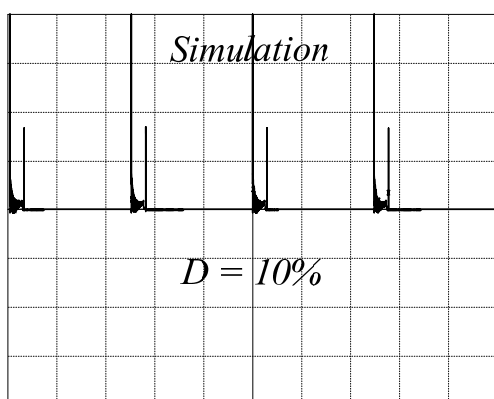


- (c) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อม C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

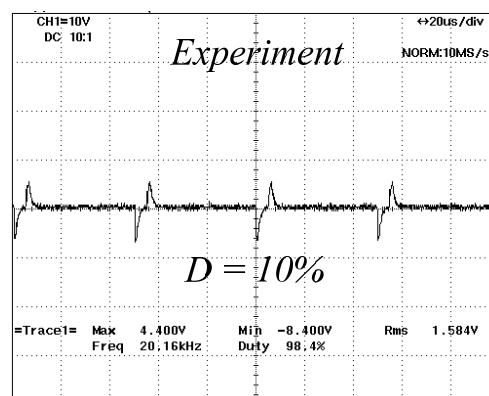
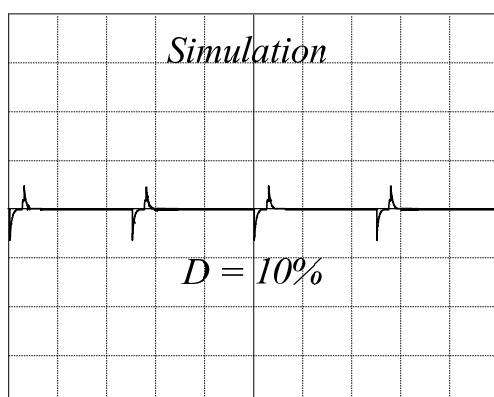
รูปที่ 3.47 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่
ค่าตัวใช้เคลทำกับ 10% และความถี่สวิตซ์เท่ากับ 20kHz



(d) คลื่นกระแสอินพุตของวงจรเอชไอโอเปอร์ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

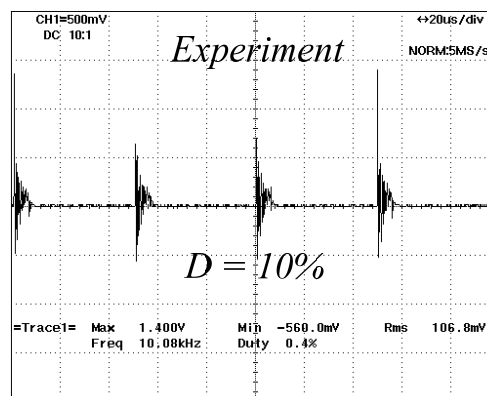
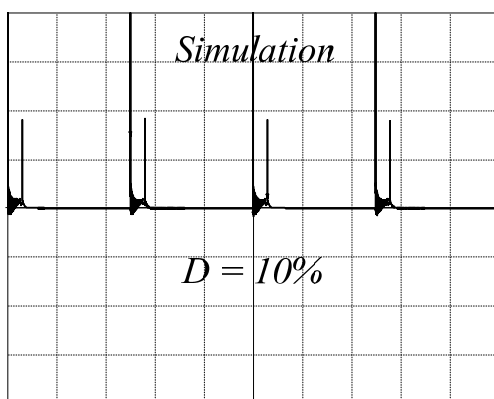


(e) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่ง i_{s1} ที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



(f) คลื่นกระแสที่ไหลผ่าน C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่ง ที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

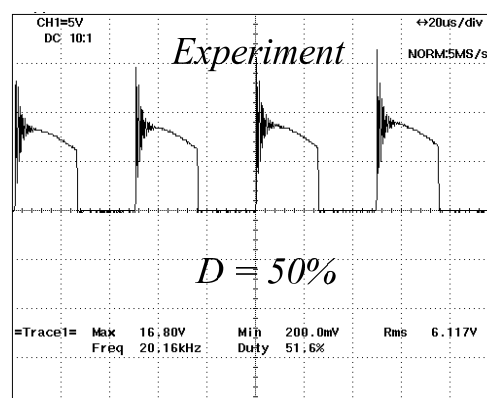
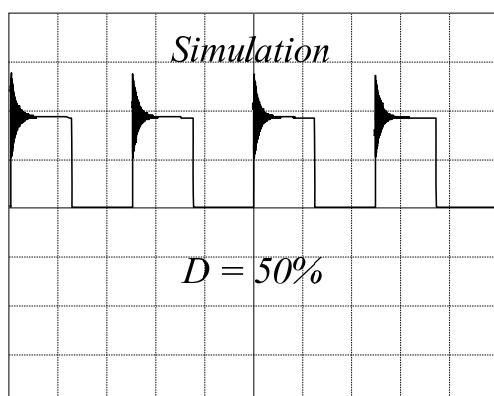
รูปที่ 3.47 ต่อ



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

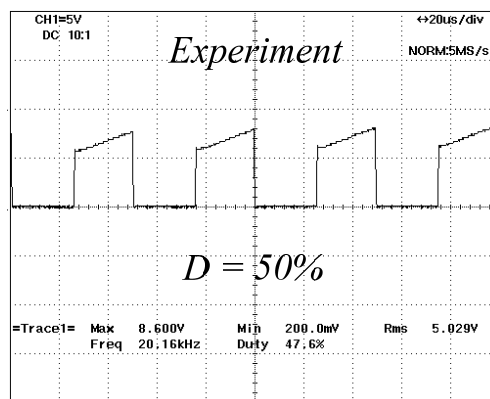
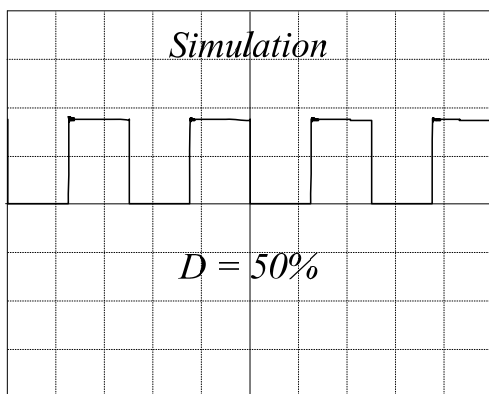
รูปที่ 3.47 ต่อ

แรงดันและกระแสของวงจรสับเบอร์ตามจุดต่างๆ โดยวงจรเอชี่ชอปเปอร์สวิตช์ที่ค่าดีวี่ไซเคิลเท่ากับ 50 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

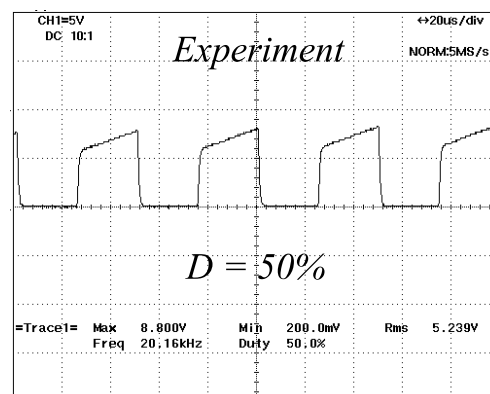
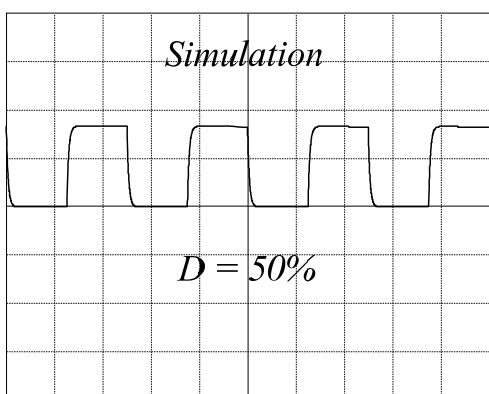


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ที่ ($y=5\text{V/div}, x=20\text{us/div}$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

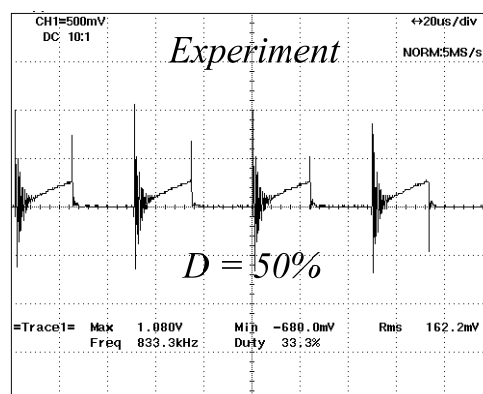
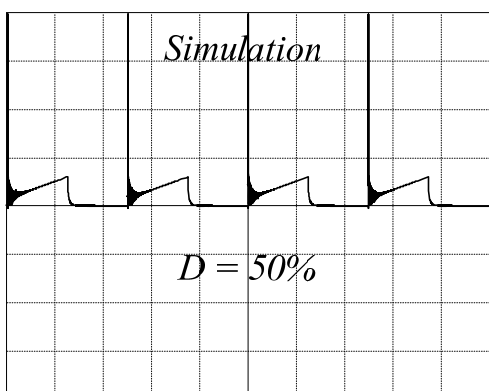
รูปที่ 3.48 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ค่าดีวี่ไซเคิลเท่ากับ 50% และความถี่สวิตซ์เท่ากับ 20 kHz



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

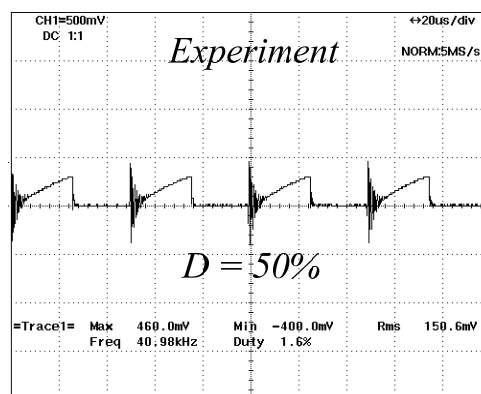
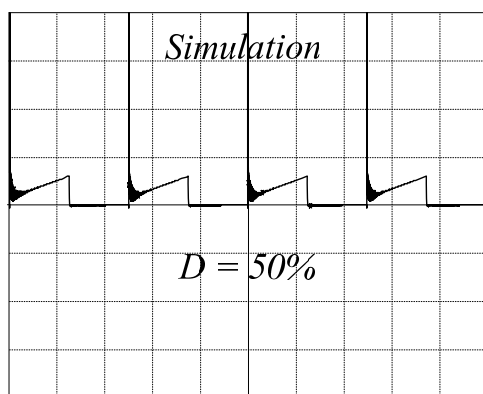


(c) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อม C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่ง ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

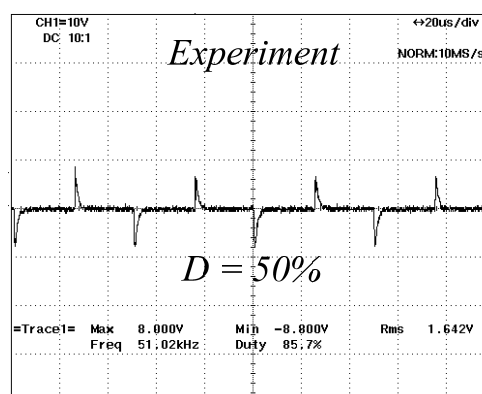
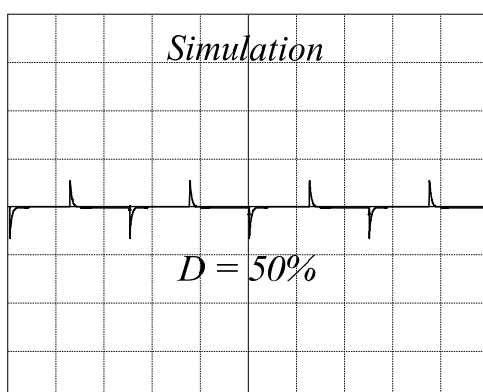


(d) คลื่นกระแสอินพุตของวงจรเอชชอปเปอร์ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

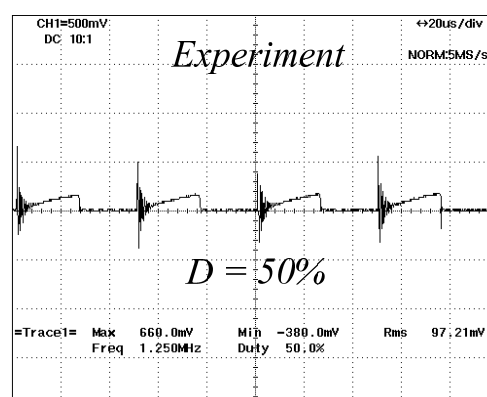
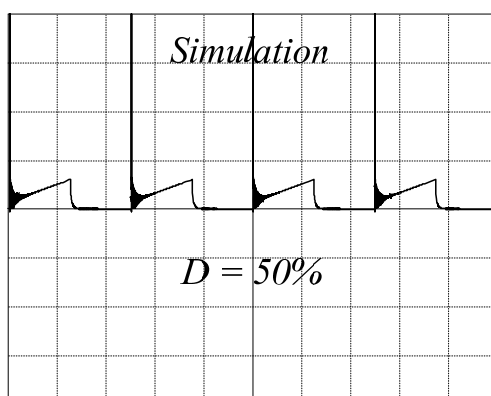
รูปที่ 3.48 ต่อ



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



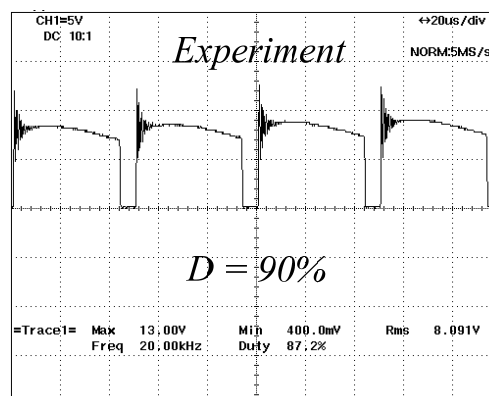
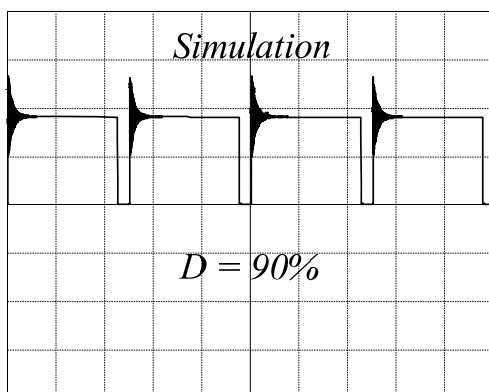
(f) คลื่นกระแสที่ไหลผ่าน C สนับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง



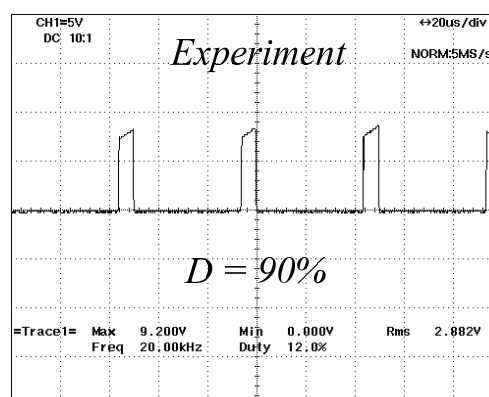
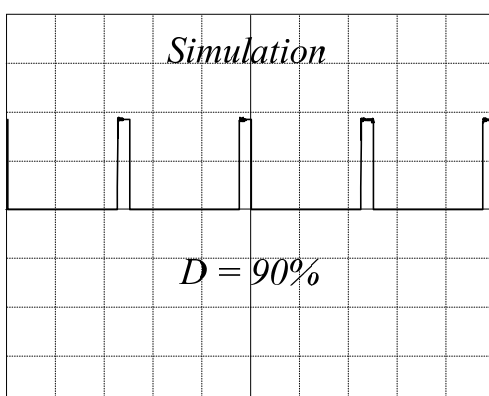
(g) คลื่นกระแสที่เอาต์พุตของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 3.48 ต่อ

แรงดันและกระแสของวงจรสับเบอร์ตามจุดต่างๆ โดยวงจรเอชชอปเปอร์สวิตช์ที่
ค่าดีวีไอซีเคลเท่ากับ 90 % ที่โหลดทางด้านเอาต์พุตเท่ากับ 500 W และมีความถี่ในการสวิตช์
เท่ากับ 20kHz

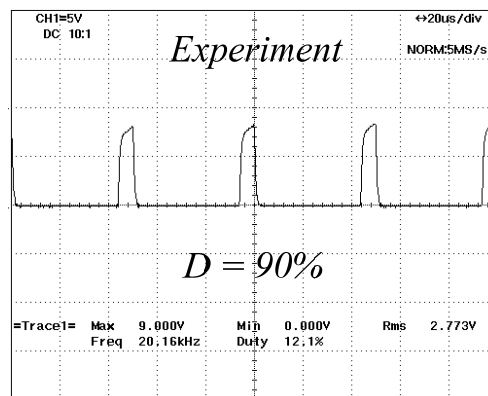
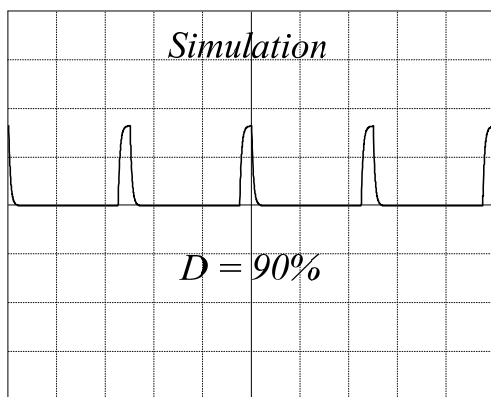


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จาก
การซิมูเลตและการทดลอง

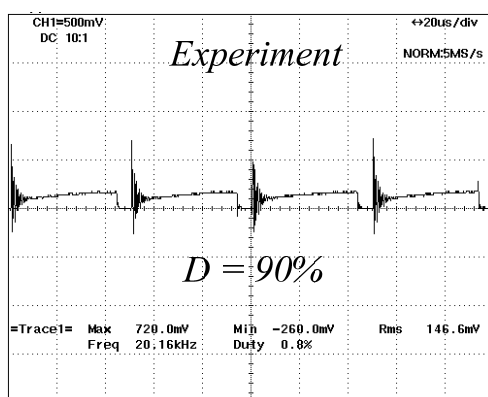
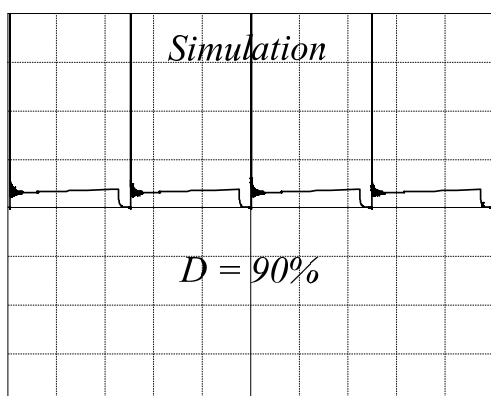


(b) คลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่หนึ่ง v_{s1} ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและ
การทดลอง

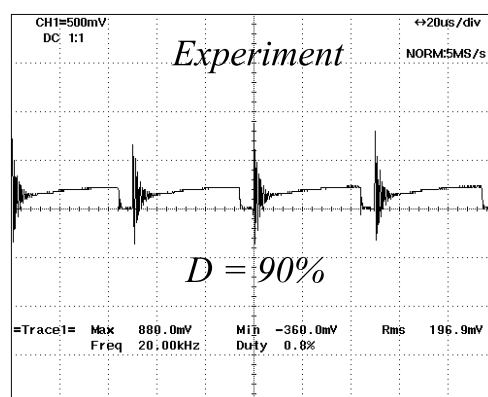
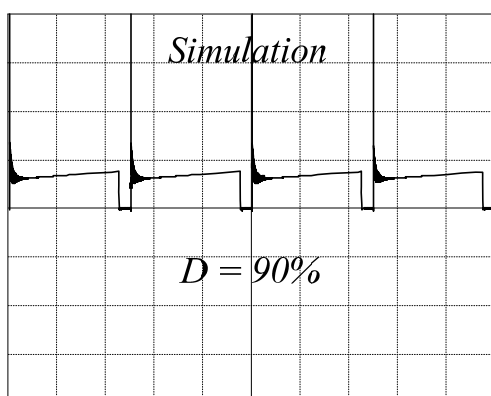
รูปที่ 3.49 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของสับเบอร์ของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่
ค่าดีวีไอซีเคลเท่ากับ 90% และความถี่สวิตช์เท่ากับ 20 kHz



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

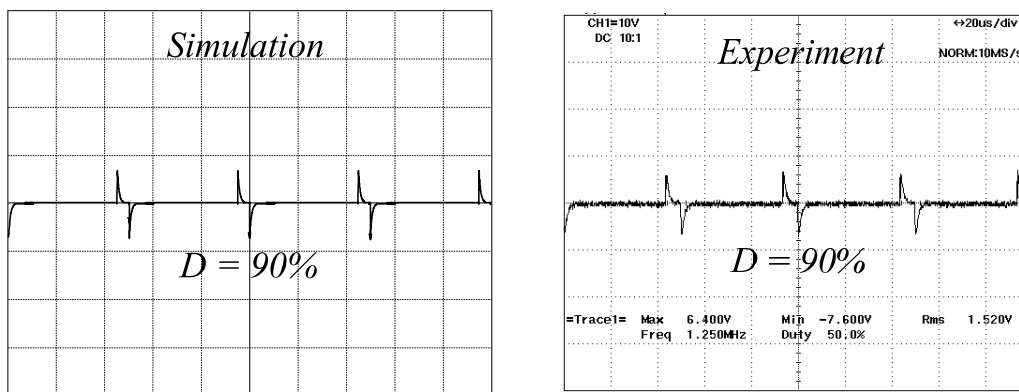


(d) คลื่นกระแสอินพุตของวงจรเอชี่ซอปเปอร์ที่ ($y=5V/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

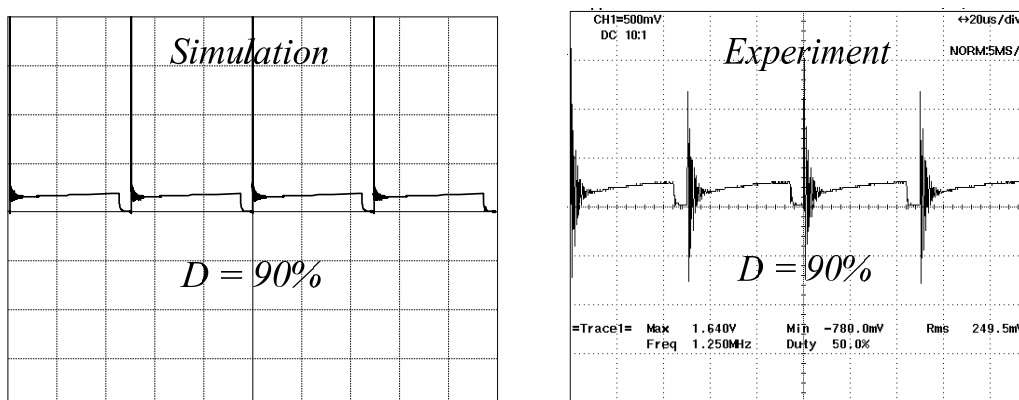


(e) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่ง i_{s1} ที่ ($y=500mV/div, x=20us/div$) ที่ได้จากการซิมมูลเตและการทดลอง

รูปที่ 3.49 ต่อ



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



(g) คลื่นกระแสที่เอาต์พุตของสวิตช์ตัวที่หนึ่งที่ ($y=500mV/div, x=20\mu s/div$) ที่ได้จากการซิมูเลตและการทดลอง

รูปที่ 3.49 ต่อ

3.5 สรุป

จากลักษณะการทำงานของวงจรเอชไอโอปเปอร์จะได้ลักษณะของแรงดันแลกระในจังหวะการทำงานสวิตช์ส่งผลให้สามารถแบ่งการทำงานได้เป็นโหมด ๆ ทั้งหมด 3 โหมดคือ

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

โดยการทำงานของโหมดการทำงานทั้งสามโหมดนี้จะมีผลมาจาก LC ฟิลเตอร์ และโหลดที่ใช้ โดย CL ฟิลเตอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีขนาดเล็กและสามารถรองรับฮาร์มอนิกส์ความถี่

สูงไม่ให้ผ่านออกไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่เดียวกันก็จะปล่อยให้ความถี่ต่ำผ่านไปได้เกือบทั้งหมดเช่นกัน ดังได้แสดงการซิมมูลเตดโดยโปรแกรม PSpice โดยปรับค่าตัวชี้ไซเคิลต่าง ๆ อีกทั้งในบทนี้ยังได้แสดงวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรสับเบอร์ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้วงจรเอชไอซีชอปเปอร์ทำงานได้โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดอันก่อให้เกิดความสูญเสียต่อพลังงานและอุปกรณ์โดยได้อธิบายการทำงานอย่างละเอียด และได้แสดงคลื่นที่ได้จากวงจรสับเบอร์ตามจุดต่างๆ โดยได้เปรียบเทียบระหว่างผลการซิมมูลเตดกับผลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องโดยผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก