

บทที่ 4

การวิเคราะห์คลื่นเอาต์พุตและสมการของวงจรเอชชอปเปอร์ สวิตช์ที่ความถี่สูงที่ 20 kHz

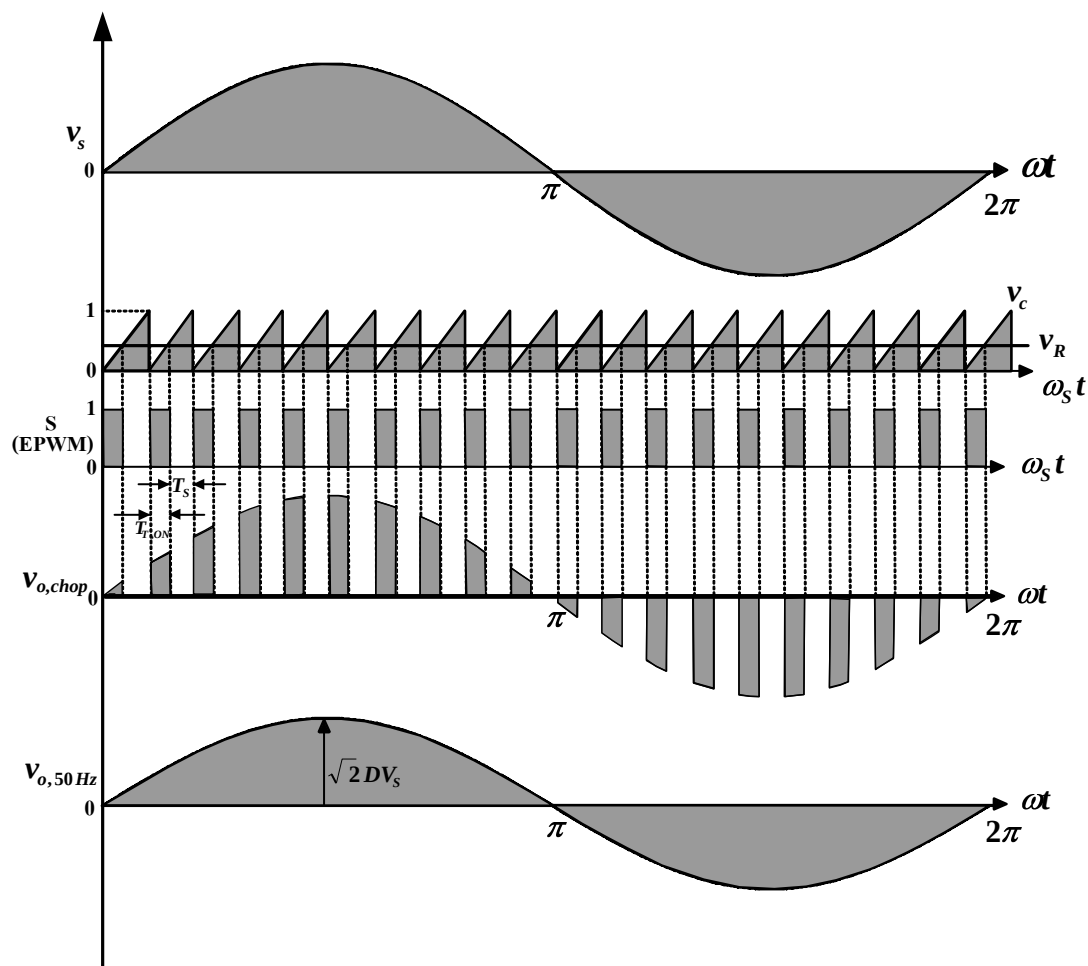
4.1 บทนำ

ในการทำวิจัยงานที่ต้องการความถูกต้องสูงนั้นต้องมีการเปรียบเทียบค่าที่ได้ระหว่างการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ในงานวิจัยชิ้นนี้ก็เช่นกันที่ได้นำผลจากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยผลการทดลองนั้นได้ทำการเก็บผลจากเครื่องต้นแบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นมาและยังได้ทดลองใช้กับงานหลากหลายรูปแบบจนได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจและดีที่สุด ส่วนในเรื่องการคำนวณนั้นได้ทำการจำลองลักษณะของคลื่นอินพุตเอาต์พุตแล้วทำการคำนวณ โดยใช้วิธีการคำนวณคลื่นแบบอนุกรมฟูเรียร์แบบง่าย ๆ ทำให้สามารถเข้าใจง่ายไม่ยุ่งยาก ซึ่งจะสามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มาความสนใจในรุ่นหลัง โดยเฉพาะนักศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ผู้ที่พอจะมีความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่แล้วจะสามารถนำไปพัฒนาได้ง่ายขึ้น

4.2 การวิเคราะห์หาสมการและคลื่นแรงดันเอาต์พุต

จากการทำงานของสวิตช์ในวงจรเอชชอปเปอร์ ในลักษณะการตัดต่อวงจรให้แรงดันอินพุตไหลผ่านไปได้เป็นช่วงๆ โดยมีการทำงานในการตัดต่อเท่ากับ 20 kHz ในหนึ่งไซเคิลไซน์การไฟฟ้า 50 Hz จะทำให้เกิดโหมดการทำงานต่างๆ โหมดการทำงานจะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกี่ยวข้องกันไปในแต่ละโหมด สามารถดูลักษณะแรงดันในแต่ละโหมดการทำงานได้จากคลื่นที่เอาต์พุตของวงจรเอชชอปเปอร์ก่อนที่จะนำคลื่นที่ได้ไปผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ โดยลักษณะคลื่นก่อนผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์นั้นจะเป็นโครงคลื่นไซน์การไฟฟ้า 220 v /50 Hz ซึ่งภายในจะถูกสวิตช์ทำการตัดต่อวงจรเพื่อควบคุมการไหลผ่านของคลื่นไซน์ทำให้ได้ลักษณะของคลื่นไซน์ 220 v/50 Hz เป็นคลื่นที่บ๊วๆ ที่ภายในจะเป็นคลื่นไซน์ที่ถูกแบ่งเป็นแท่งโดยมีความกว้างของแต่ละแท่งเท่าๆกัน แต่ในทางการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการคูณสมการของคลื่นไซน์การไฟฟ้า 220 v /50Hz ด้วยสมการของสวิตช์ซึ่งฟังก์ชันทำให้ได้คลื่นไซน์ที่ถูกสับมีลักษณะเหมือนกับค่าที่ได้จากการทดลองและทำให้ได้ค่ากระแสและแรงดันอีกด้วย โดยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ทั้งการคำนวณในแบบฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันคู่ (Even Function)

อีกทั้งยังได้ทำการกระจายสเปกตรัมของสวิตช์ฟังก์ชันโดยการคำนวณด้วยมือเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเกิดแถบสเปกตรัมทั้งตำแหน่งและขนาดเพราะลักษณะการเกิดฮาโมนิกส์ของสวิตช์ฟังก์ชันจะมีผลต่อการเกิดฮาโมนิกส์ของคลื่น ไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับคั้งนั้นจึงได้ทำการคำนวณมาไว้อย่างละเอียด



รูปที่ 4.1 แนวคิดในการวิเคราะห์หาค่าแรงดันเอาต์พุตของเอชชีชอบเปอร์ที่นำเสนอ

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

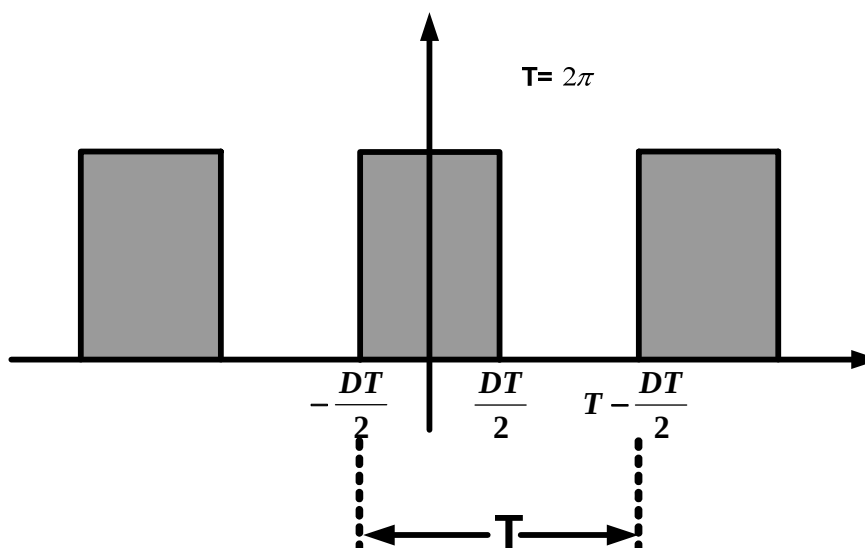
$$D = \frac{T_{S,ON}}{T_S} = \frac{V_R}{V_C} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (4.1)$$

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)

แรงดันคลื่นไซน์ 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 ของแรงดันไซน์ 50 Hz

ในการคำนวณหาสมการของแรงดันเอาต์พุต $v_{o,chop}$ ที่เกิดจากผลคูณระหว่างแรงดันไซน์ 50-Hz

$v_s(\omega t)$ กับสวิตช์ฟังก์ชันความถี่สูง

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

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

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 $a_0 = D \quad (4.5)$

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) จะได้สมการของสวิตช์ฟิงชั่นดังสมการที่ (4.10)

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

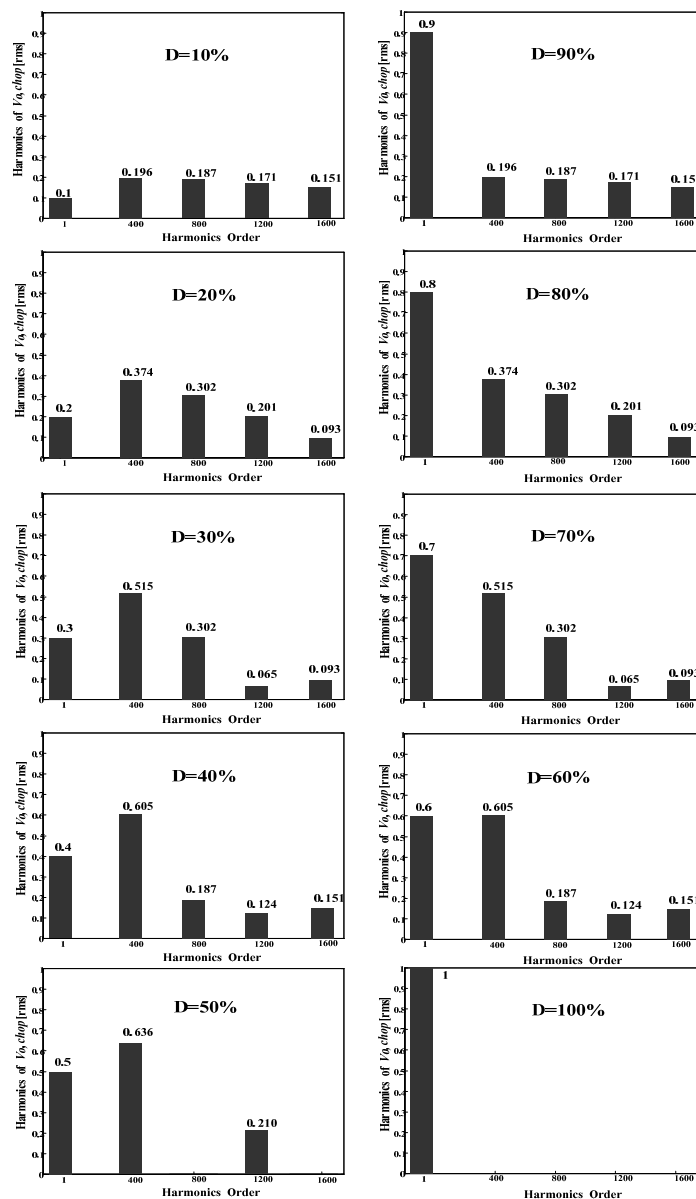
$$S(\omega_s t) = D + \frac{2 \sin(D\pi)}{\pi} \cos(\omega_s t) + \frac{2 \sin(2D\pi)}{2\pi} \cos(2\omega_s t) + \dots \\ + \frac{2 \sin(nD\pi)}{n\pi} \cos(n\omega_s t) : k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.11)$$

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

โดยที่ ω_s คือความถี่เชิงมุมของสวิตชิ่งฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$

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

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



รูปที่ 4.3 การกระจายฮาร์โมนิกของสวิตชิ่งฟังก์ชันเพื่อเปรียบเทียบตัวดีไอซีที่มีฮาร์โมนิกเท่ากัน

4.3.1 การคูณสมการของสวิตช์ฟังก์ชันกับสมการของแรงดันอินพุต

จากการคำนวณหาสมการของสวิตช์ฟังก์ชันสามารถนำมาคำนวณหาค่าเอาต์พุต $v_{o,chop}$ ของวงจรเอซีชอปเปอร์ได้โดยการนำสมการสวิตช์ฟังก์ชันในสมการที่ (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 $k = 1,2,3,...n$ เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นจะได้ดังสมการที่(4.14)

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

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

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

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

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

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

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

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

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 ขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ k ซึ่งมีค่าเป็น

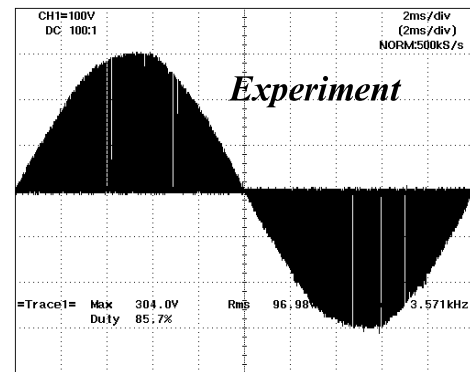
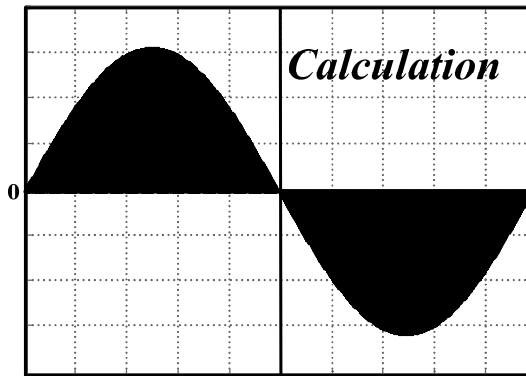
$$V_{o,swk} = V_s \sin(kD\pi) / k\pi \quad (4.17)$$

4.3.2 การวิเคราะห์คลื่นแรงดันเอาต์พุต

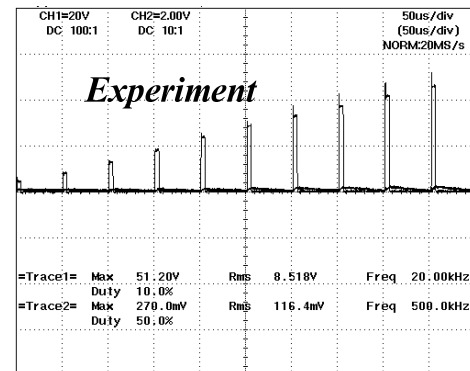
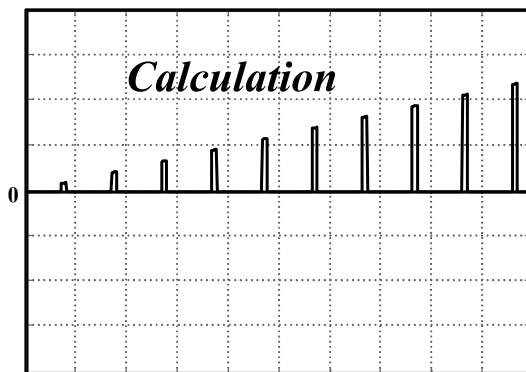
แรงดันไซน์ความถี่ต่ำจากไลน์การไฟฟ้า 50Hz เมื่อป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรเอชชอปเปอร์จะได้แรงดันเอาต์พุต $v_{o,chop}$ ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (4.16) จะประกอบด้วยความถี่ต่ำ 50-Hz รวมอยู่กับความถี่สูง $k \times (20kHz) \pm 50Hz$ และเมื่อนำคลื่น $v_{o,chop}$ ผ่านวงจร LC ฟิเตอร์องค์ประกอบความถี่สูงของ $v_{o,chop}$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

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

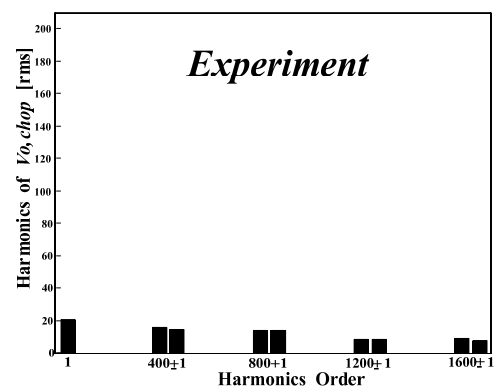
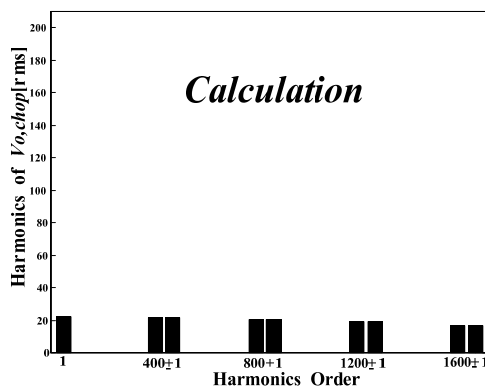
เมื่อแทนค่าดิวิดีไจเคิลเท่ากับ 0.1 หรือ 10 % เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



- (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



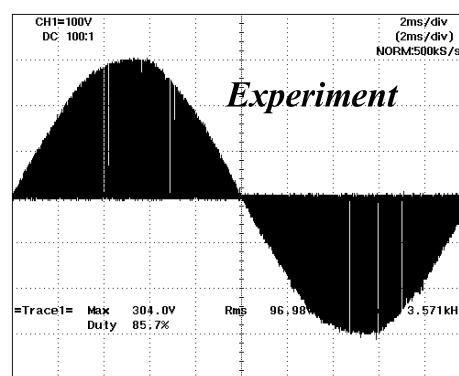
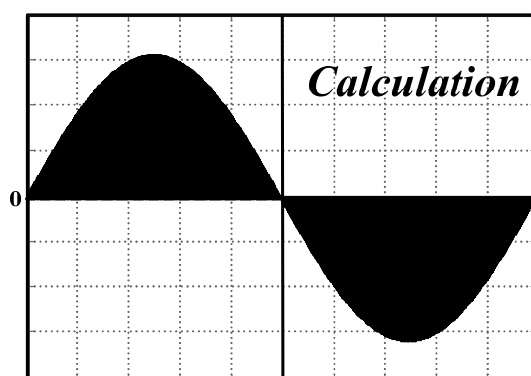
- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชียอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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

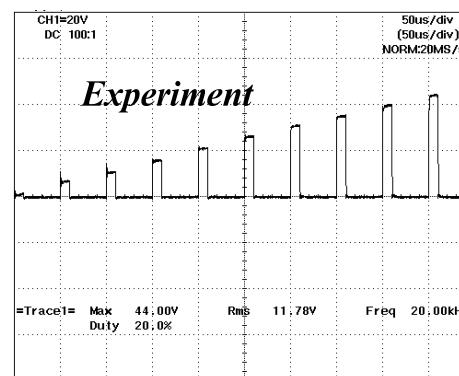
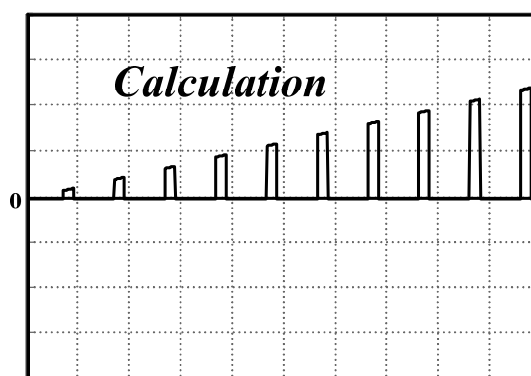
4.3.2.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ความถี่ 20%

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

เมื่อแทนค่าความถี่ที่ 0.2 หรือ 20 % เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

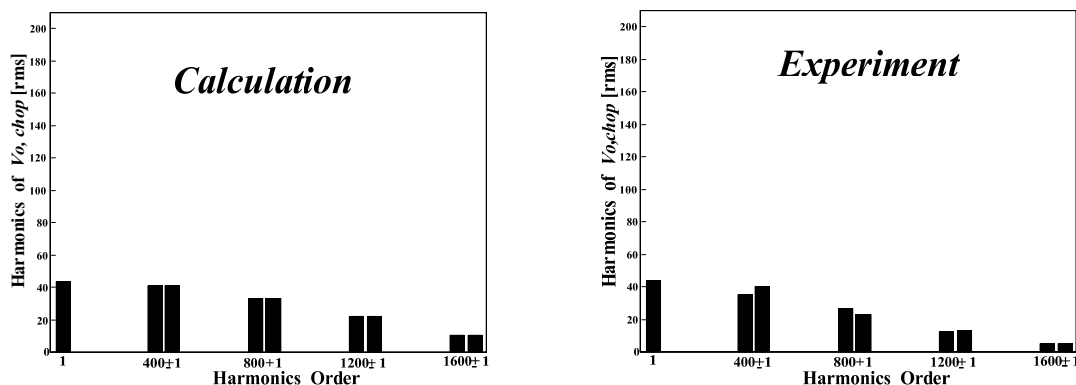


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



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

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



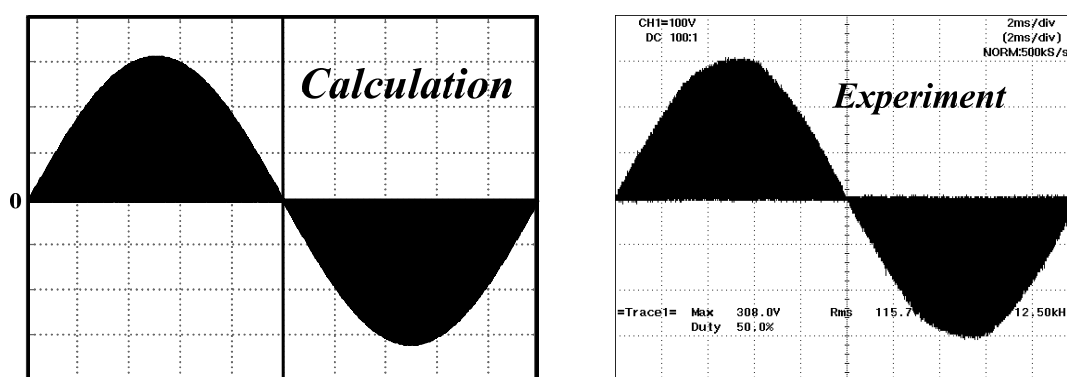
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชีชอป
เปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.5 ต่อ

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

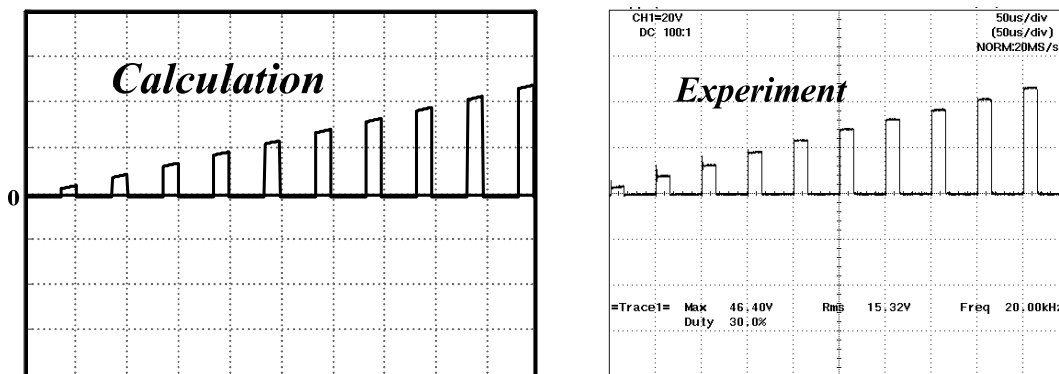
เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตรวมสวิตช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.6 (a-b) ส่วนในรูปที่ 4.6 (c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าควัตซ์เคลิลเท่ากับ 0.3 หรือ 30% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

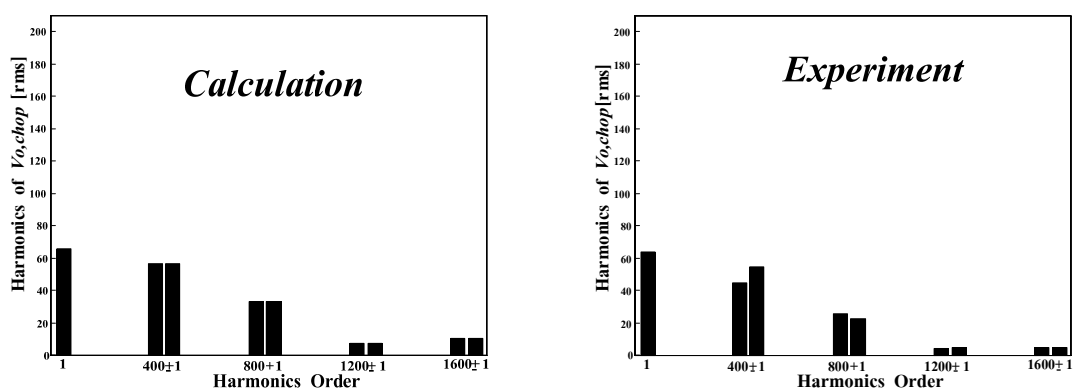


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.6 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,switc}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควัตซ์เคลิล 30%



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



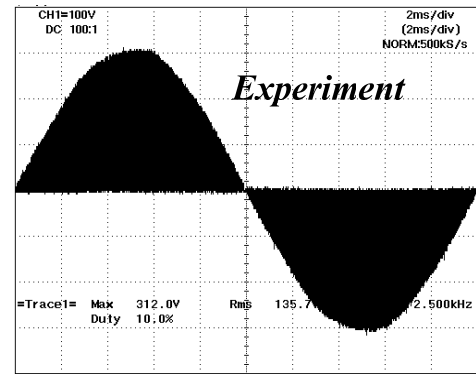
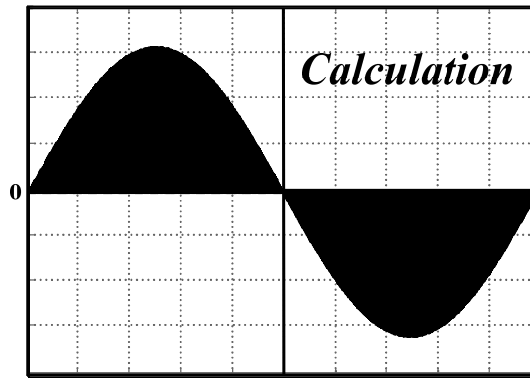
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีฮอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.6 ต่อ

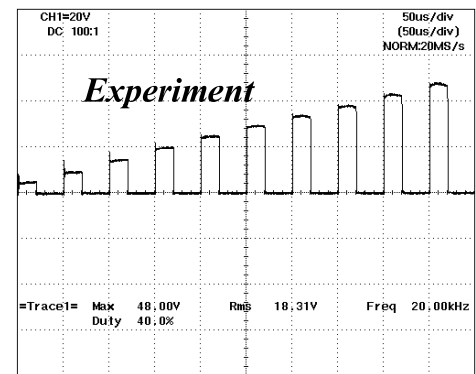
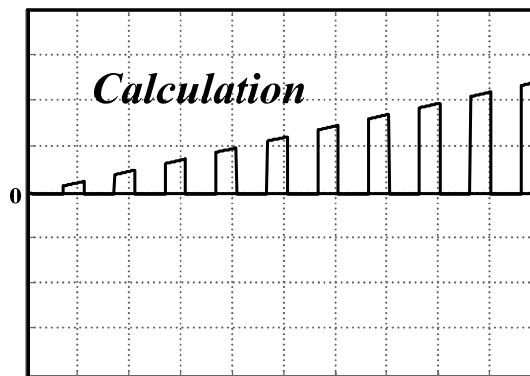
4.3.2.4 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดีไซเคิล 40%

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

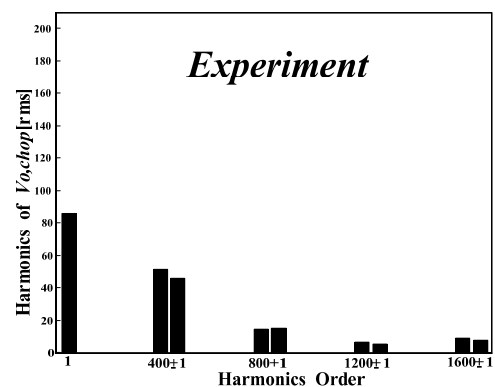
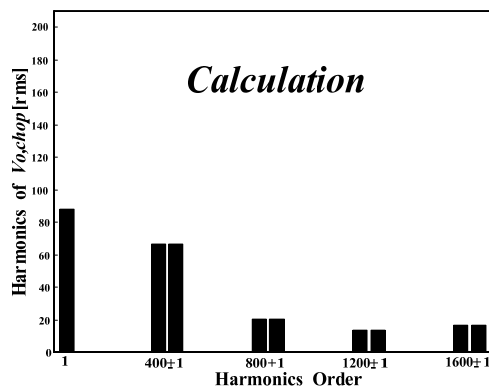
เมื่อแทนค่าคิวดีไซเคิลเท่ากับ 0.4 หรือ 40% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชีฮอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



- (a) คลื่นแรงดันทางด้าแอด์พุตก่อนผ่าน LC ฟิเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จาก
การคำนวณและการทดลอง



- (d) คลื่นแรงดันทางด้าแอด์พุตก่อนผ่าน LC ฟิเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=20V/div, x=50us/div$) ที่ได้จากการ
คำนวณและการทดลอง



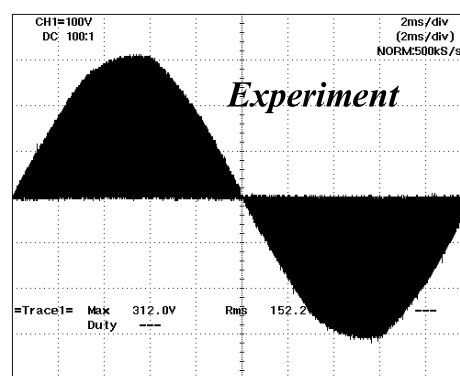
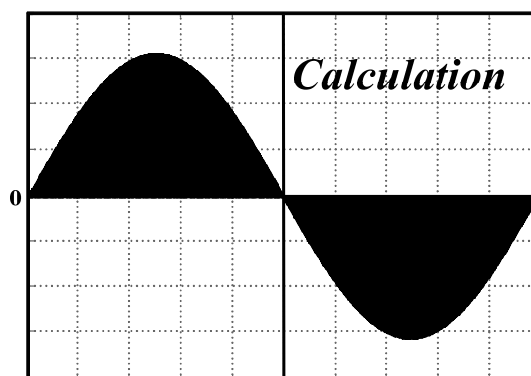
- (c) ลักษณะสเปคตรัมแรงดันแอด์พุตที่ยังไม่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอป
เปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,swite}$ พร้อมแถบสเปคตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการ
ทดลองที่ควิตี้ไซเคิล 40%

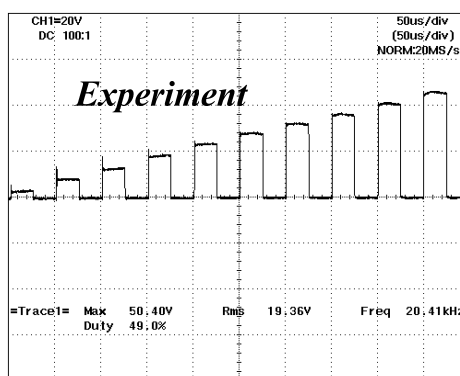
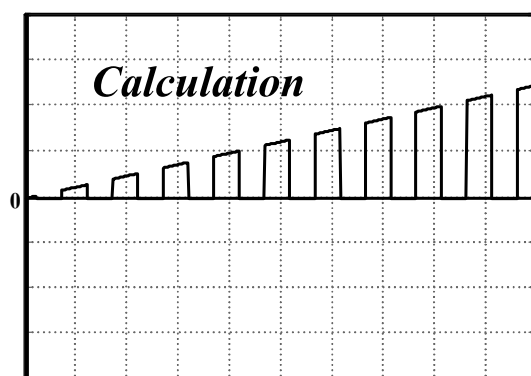
4.3.2.5 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ดิวตี้ไซเคิล 50%

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

เมื่อแทนค่าดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.5 หรือ 50% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชโซปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

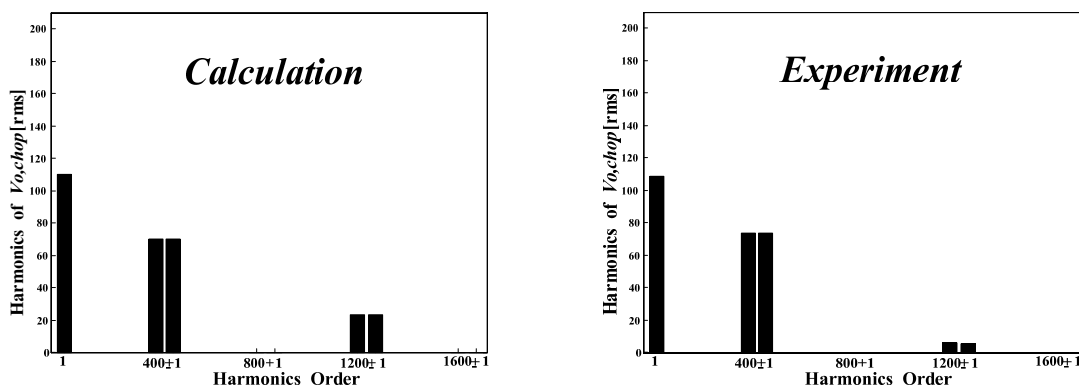


- (a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



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

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



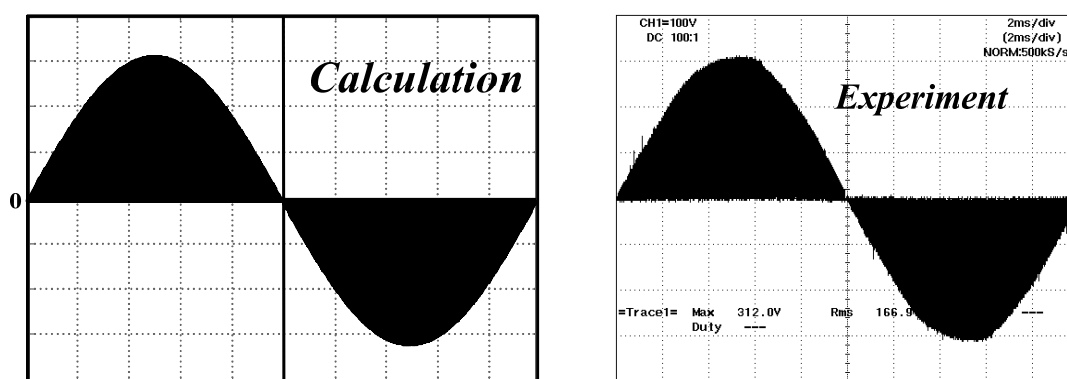
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชีชอป
เปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.8 ต่อ

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

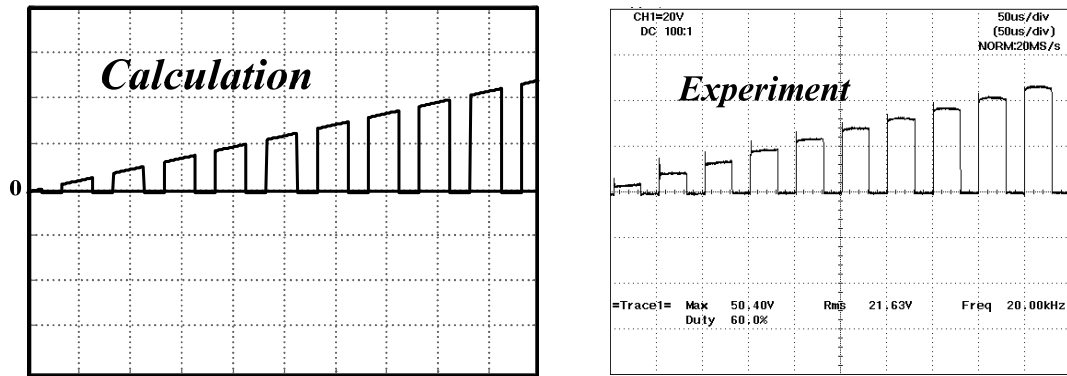
เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตรวมสวิตช์ S_3 , S_4 มาการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.9(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.9(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคัตออฟ 60% หรือ 0.6 เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิล 50 Hz

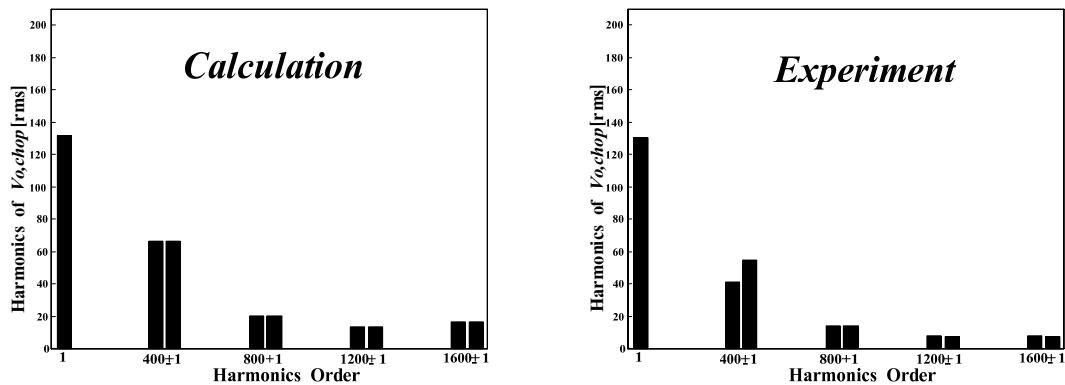


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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



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



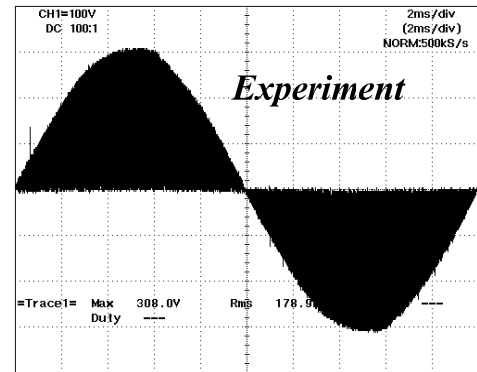
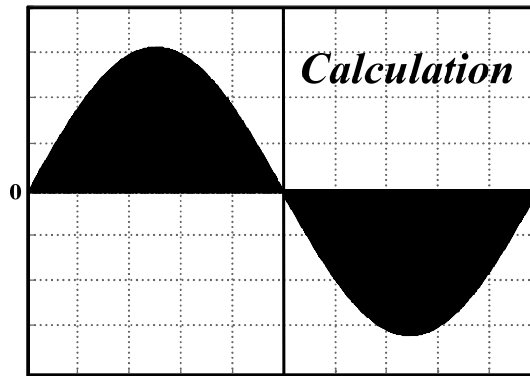
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีชอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.9 ต่อ

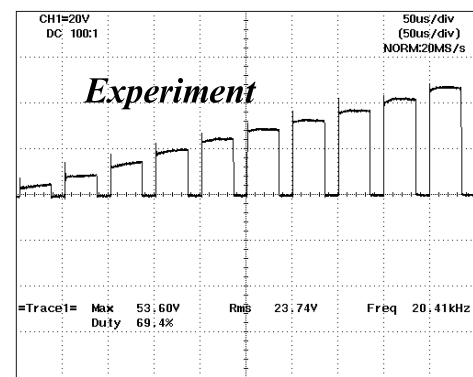
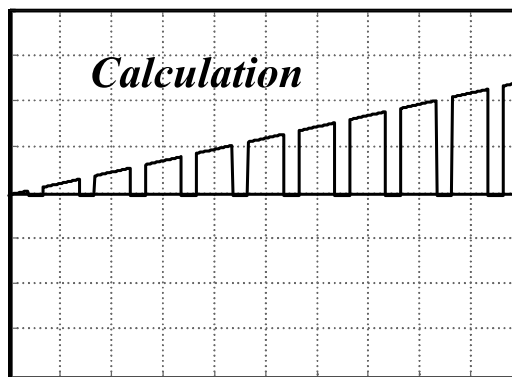
4.3.2.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดีไซเคิล 70%

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

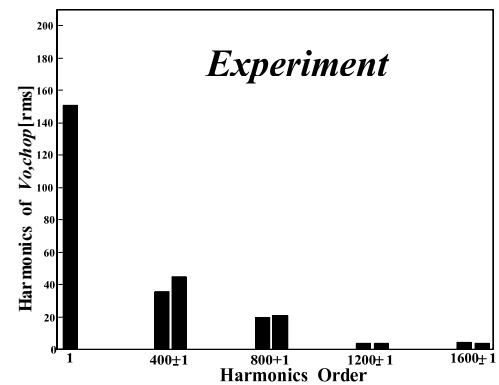
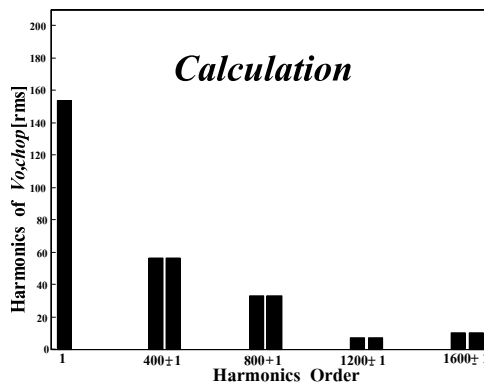
เมื่อแทนค่าคิวดีไซเคิลเท่ากับ 0.7 หรือ 70% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชชีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



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



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



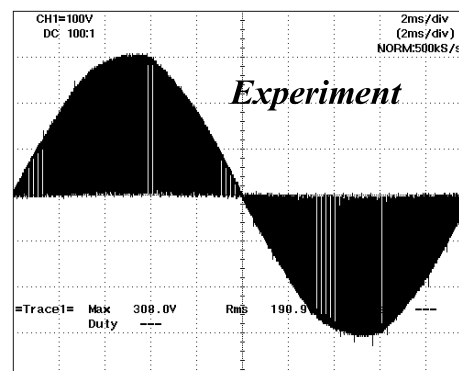
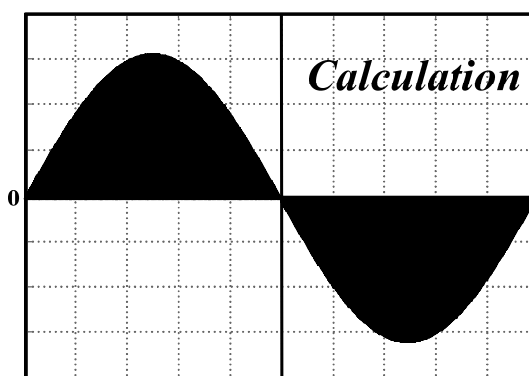
- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชชีเอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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

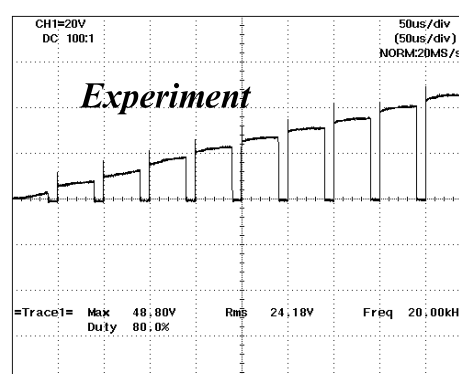
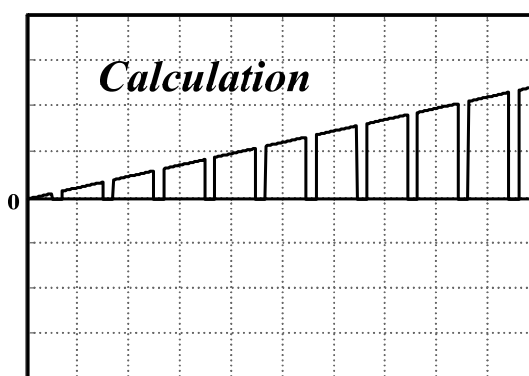
4.3.2.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,switc}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ควิตัวถี่ 80%

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตคร่อมสวิตช์ S_3, S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.11(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.11(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าควิตัวถี่เท่ากับ 0.8 หรือ 80% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชโอบเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองเอาฮาร์มอนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

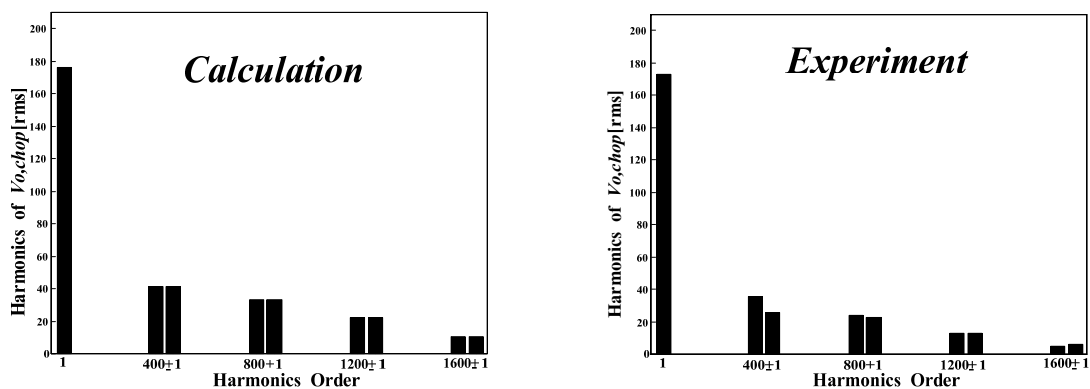


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



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

รูปที่ 4.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,chop}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ควิตัวถี่ 80%



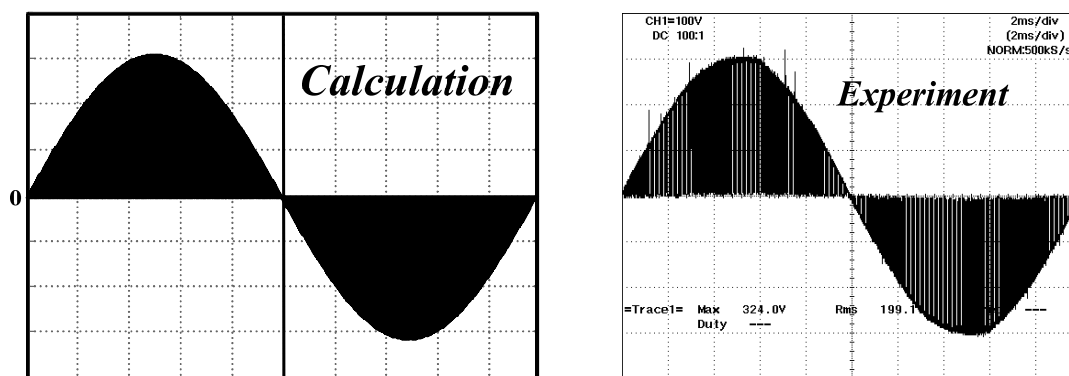
(c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชียอปเปอร์: $v_{o, chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.11 ต่อ

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

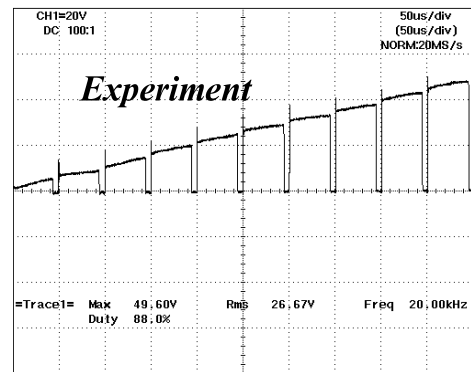
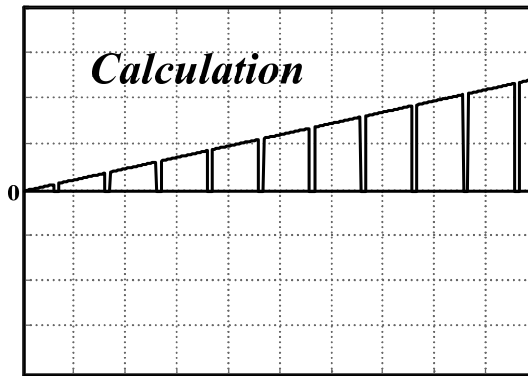
เมื่อนำสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตรวมสวิตช์ S_3 , S_4 มาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.12(a-b) ส่วนในรูปที่ 4.12(c) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าคิวตี้ไจเคิลเท่ากับ 0.9 หรือ 90% เข้าไปในสมการที่ (4.16) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชียอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ยังไม่ได้กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกจะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz

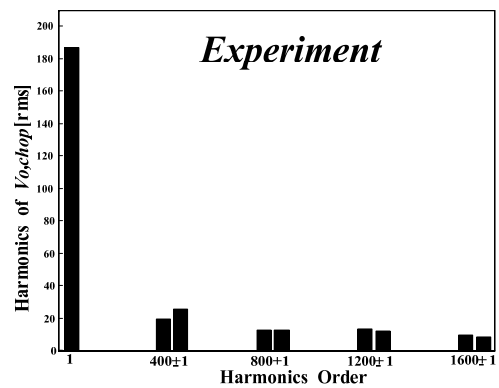
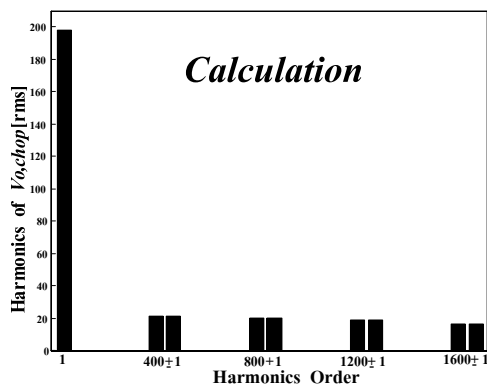


(a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตก่อนผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o, chop}$ ($y=100V/div, x=20ms/div$) ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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



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

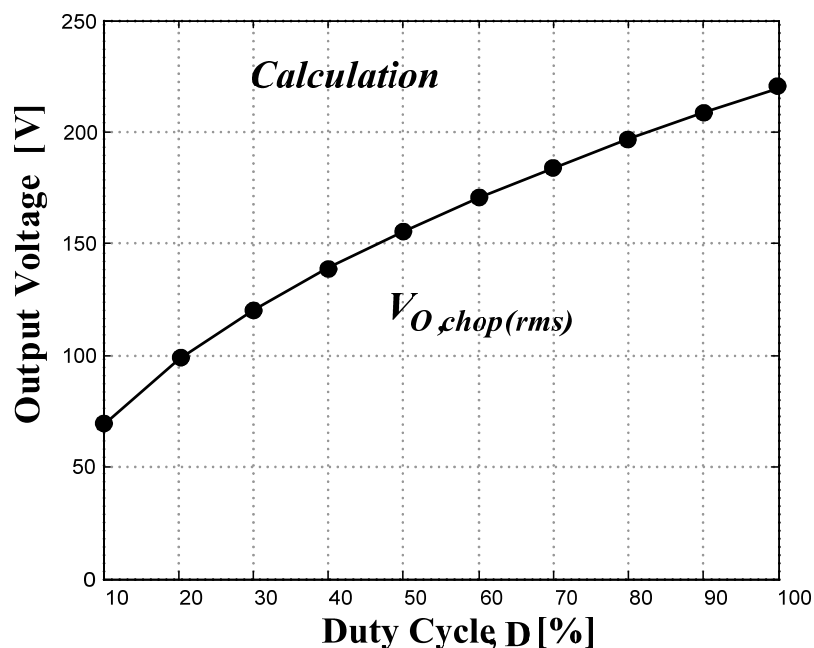


- (c) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่กรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกของวงจรเอชียอปเปอร์: $v_{o,chop}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.12 ต่อ

จากสมการที่ (4.16) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปจะทำให้ได้ลักษณะของคลื่นและองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆจากการแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ค่าดีวีไอซ์เกิดตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1 สามารถนำค่า rms ของแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์สับ ($v_{o,chop}$) มาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันเทียบกับค่าดีวีไอซ์เกิดดังในรูปที่ 4.13 และเมื่อแทนค่าดีวีไอซ์เท่ากับ 1 หรือ 100% จะได้รูปคลื่นเอาต์พุต ($v_{o,chop}$) เท่ากับที่อินพุตและจะไม่มีฮาร์โมนิกส์ โดยค่า rms สามารถหาได้จากสมการที่ (4.18)

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



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

จากสมการที่ (4.16) เมื่อทำการจำลองการทำงานของ LC ฟิลเตอร์โดยตัดสมการในส่วนที่เป็นกลุ่มฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกจะสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4.18)

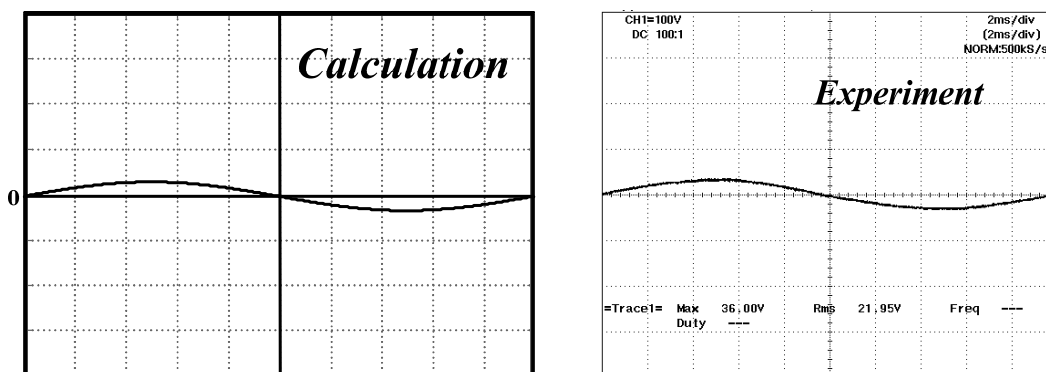
$$v_{o, chop}(t) = D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (4.18)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์แล้วโดยตัดกลุ่มฮาโมนิกส์ความถี่สูงออกมาแทนค่าแรงดันอินพุตเข้าไปที่ค่าคิวดัซไคเลตปรับเปลี่ยนไปตั้งแต่ 0.1, 0.2, ..., 1 จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าคิวดัซไคเลตสามารถนำมาพล็อตคลื่นที่ค่าคิวดัซไคเลตต่างๆ จะได้ลักษณะของรูปคลื่นและองค์ประกอบฮาโมนิกส์ออกมาดังรูปที่จะแสดงต่อไป

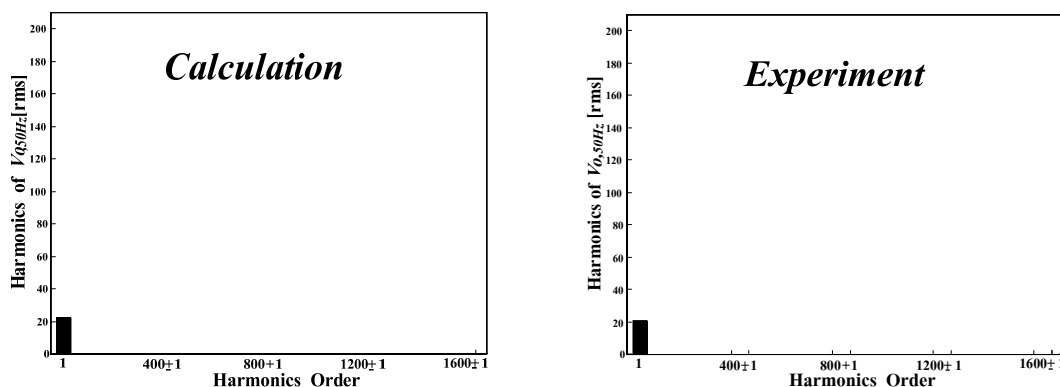
4.3.2.10 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o, 50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่คิวดัซไคเลต 10%

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

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



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



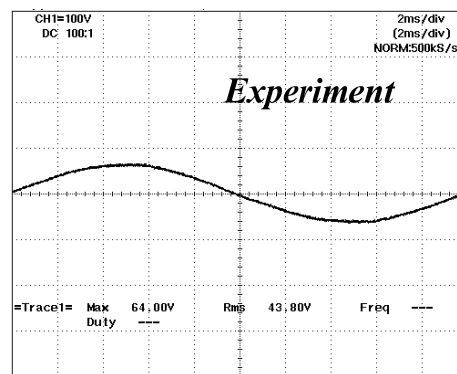
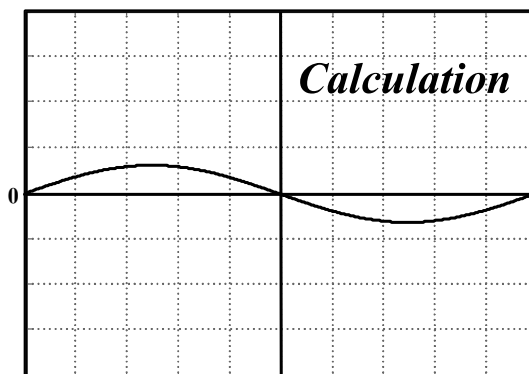
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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

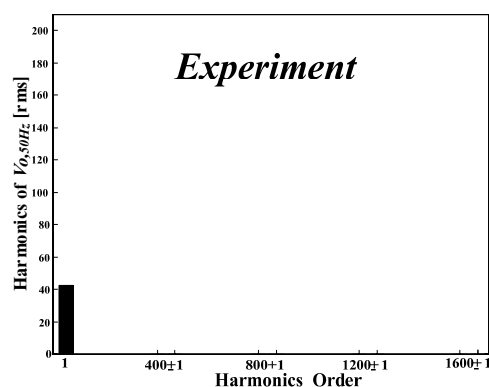
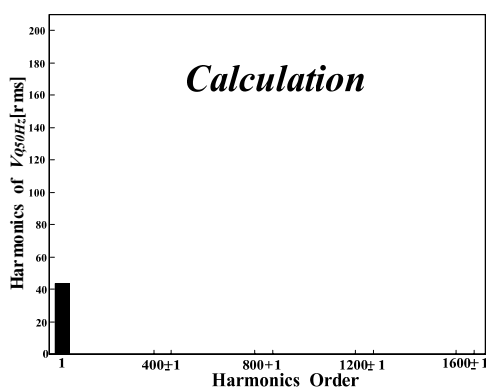
4.3.2.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ มแถบสเปกตรัม ที่ความถี่ไซเคิล 20%

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

เมื่อแทนค่าความดีไซเคิลเท่ากับ 0.2 หรือ 20% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอโอพีเออร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



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



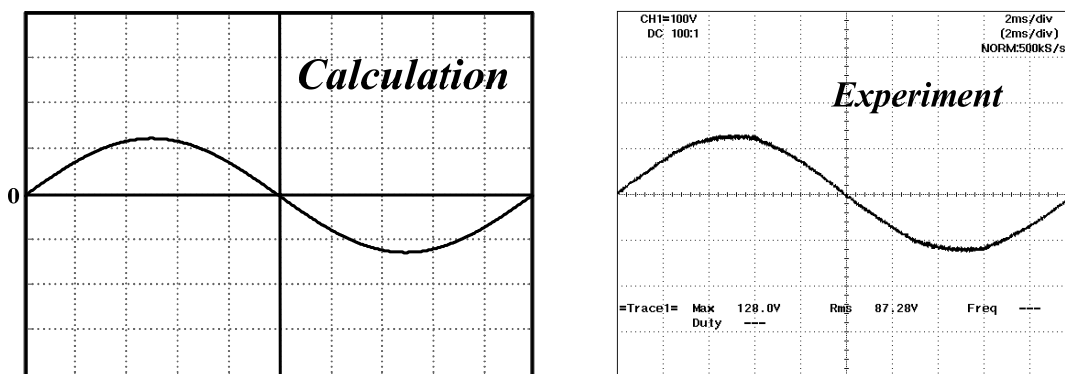
- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชไอโอพีเออร์: $v_{o,50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.15 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความดีไซเคิล 20%

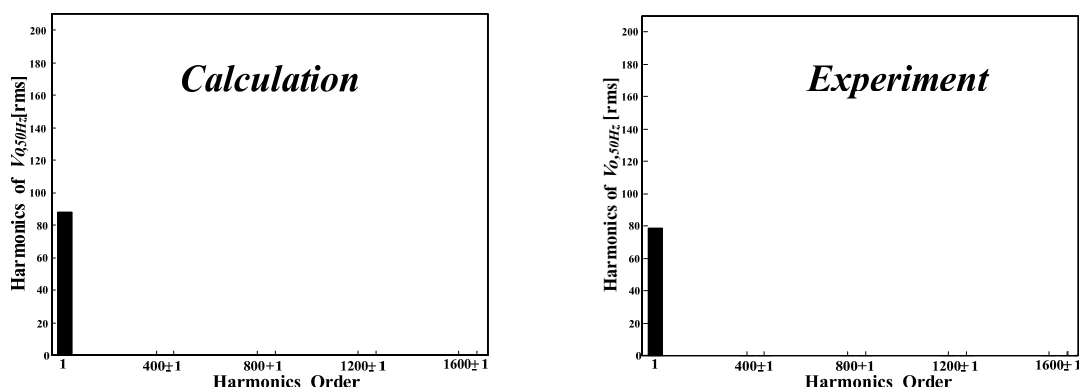
4.3.2.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ มแถบสเปกตรัม ที่ความดีไซเคิล 30%

เมื่อนำสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการแรงดันที่เอาต์พุตที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วมาคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันความถูกต้องจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.16(a) ส่วนในรูปที่ 4.16(b) เป็นการแสดงสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณและการทดลองโดยใช้ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20kHz

เมื่อแทนค่าตัวชี้ไขเคลเท่ากับ 0.4 หรือ 40% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



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



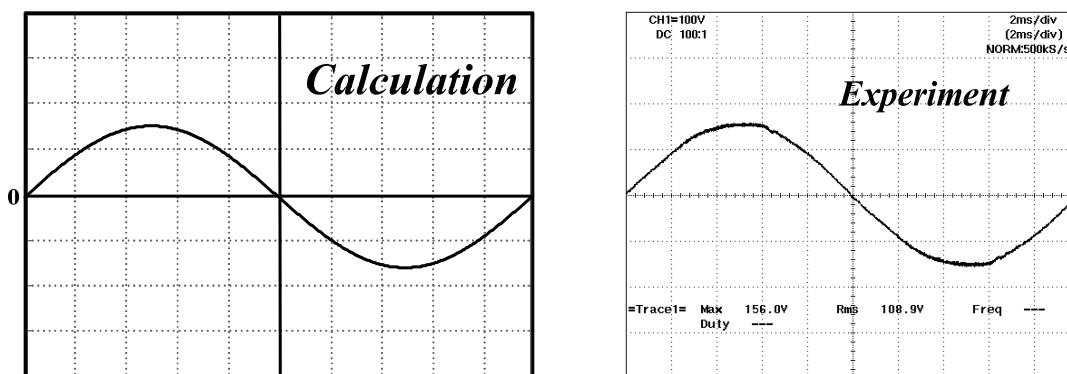
- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชอปเปอร์: $v_{o,50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตัวชี้ไขเคล 40%

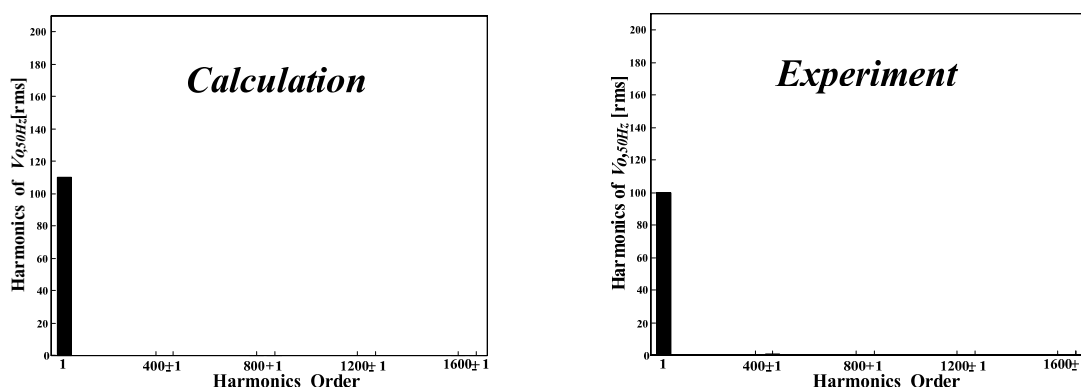
4.3.2.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ตัวชี้ไขเคล 50%

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

เมื่อแทนค่าดีวีไอซีเท่ากับ 0.5 หรือ 50% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



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



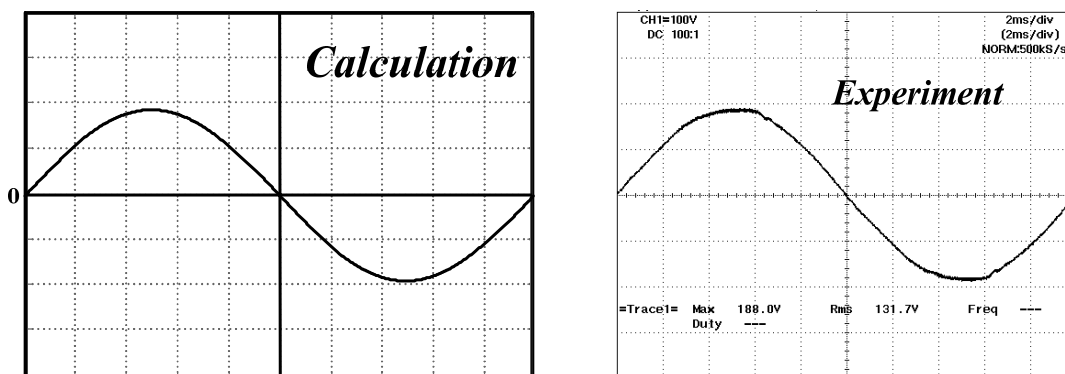
- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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

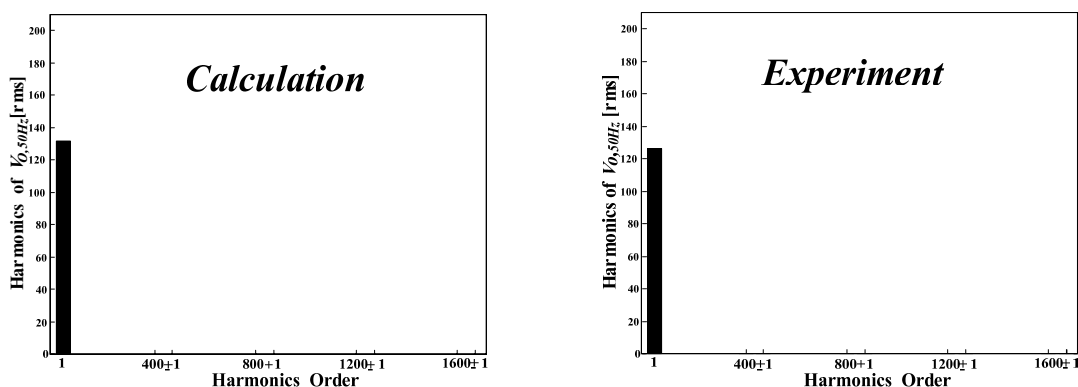
4.3.2.15 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ดีวีไอซีเท่ากับ 60%

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

เมื่อแทนค่าความถี่ไซน์เคลเท่ากับ 0.6 หรือ 60% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซน์เคลไซน์ 50 Hz



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



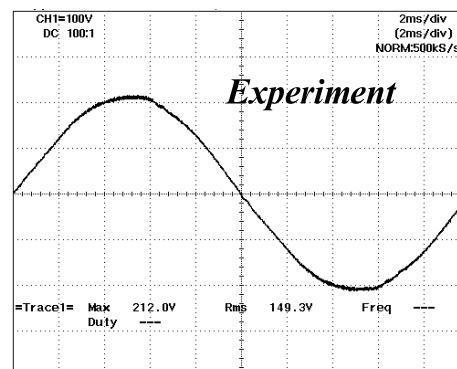
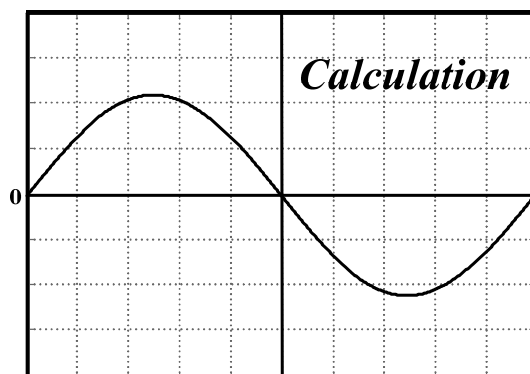
- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชอปเปอร์: $v_{o,50Hz}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

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

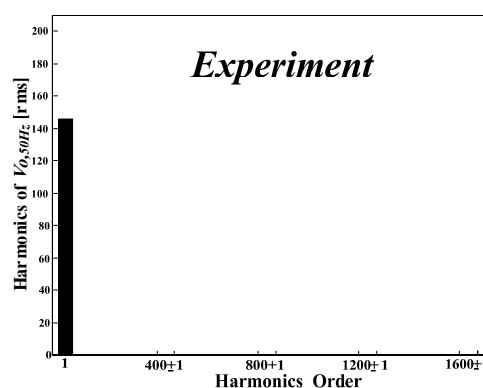
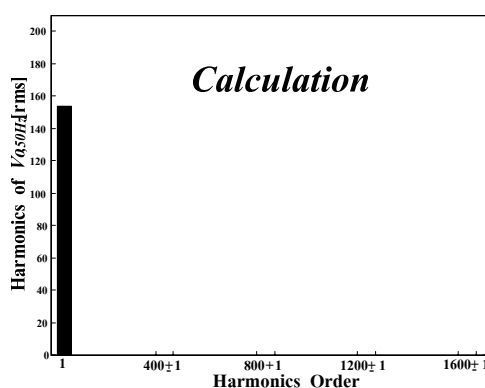
4.3.2.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50Hz}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ความถี่ 70%

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

เมื่อแทนค่าดีไซน์เซลล์เท่ากับ 0.7 หรือ 70% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอโอพีเออร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



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



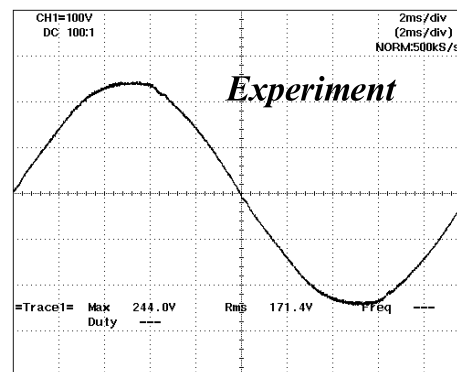
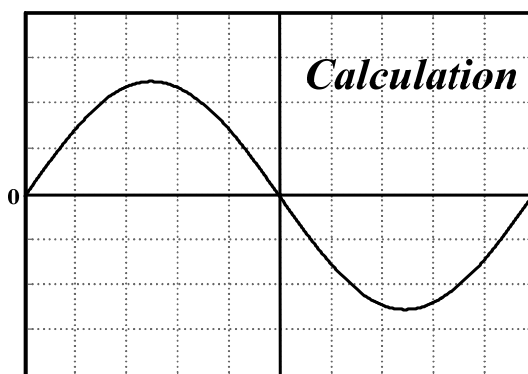
(b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเอชไอโอพีเออร์: $v_{o,50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.20 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ดีไซน์เซลล์ 70%

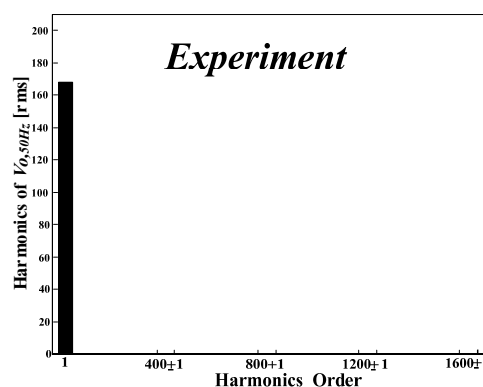
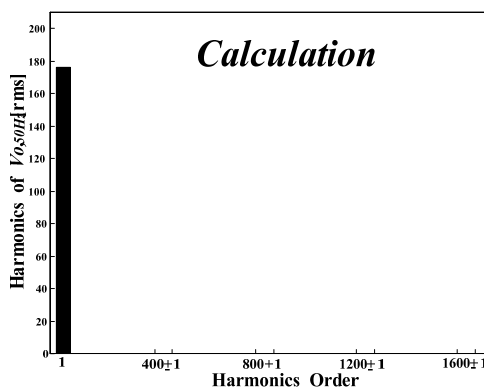
4.3.2.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ดีไซน์เซลล์ 80%

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

เมื่อแทนค่าความถี่ไซน์เคลเท่ากับ 0.8 หรือ 80% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเรซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซน์ 50 Hz



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



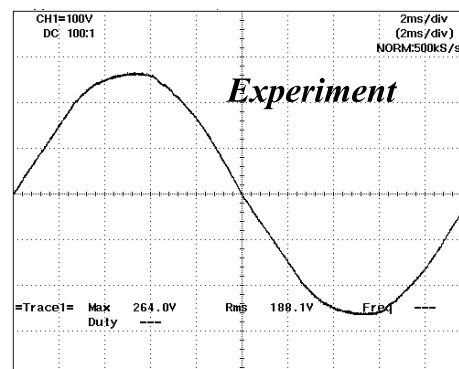
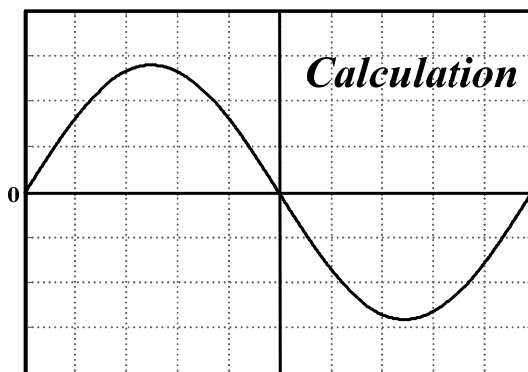
- (b) ลักษณะสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุต ที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วของวงจรเรซีชอปเปอร์: $v_{o,50\text{Hz}}$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

รูปที่ 4.21 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ไซน์เคล 80%

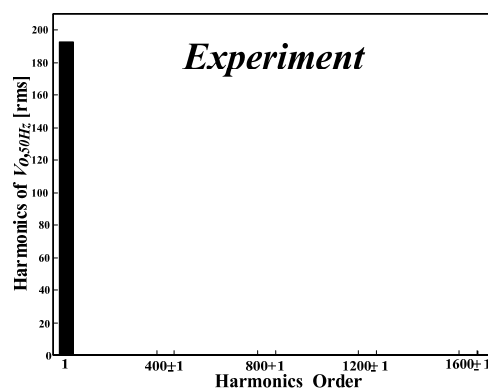
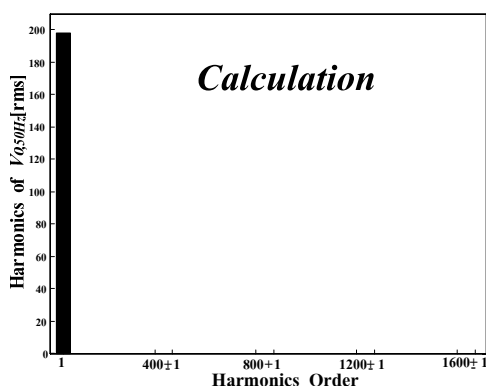
4.3.2.18 ลักษณะคลื่นแรงดัน $v_{o,50\text{Hz}}$ พร้อมแถบสเปกตรัมที่ความถี่ไซน์เคล 90%

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

เมื่อแทนค่าดีวีไอเซลเท่ากับ 0.9 หรือ 90% เข้าไปในสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นสมการเอาต์พุตของวงจรเอชไอซีชอปเปอร์โดยเป็นคลื่นแรงดันที่ได้กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออก จะได้รูปคลื่นแรงดันในหนึ่งไซเคิลไซน์ 50 Hz



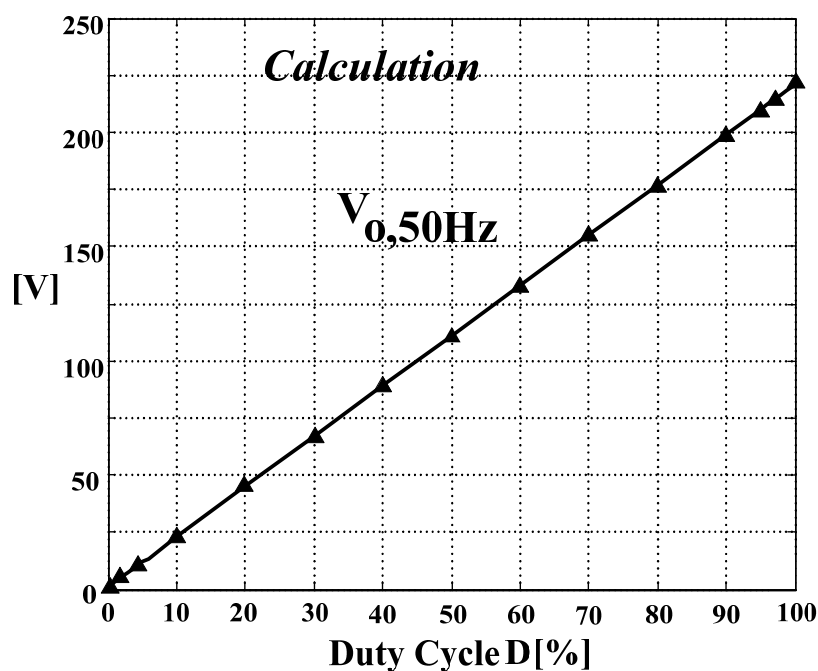
- (a) คลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ผ่าน LC ฟิลเตอร์ $v_{o,50Hz}$ $100V/div, x=20ms/div$ ที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง



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

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

จากสมการที่ (4.18) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปจะทำให้ได้ลักษณะของคลื่นและสามารถนำไปหาค่าของแรงดัน rms ที่ค่าดีวีไอเซลต่าง ๆ ได้จากนั้นจึงได้นำค่าแรงดัน rms ที่ได้ไปทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่าของดีวีไอเซลที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ได้กราฟดังในรูปที่



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่กรองฮาโมนิกส์ความถี่สูงออก($v_{o,50Hz}$) กับ ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 1

4.3.3 การคำนวณหาค่า LC ฟิเตอร์ที่ใช้ในวงจร

จากผลการซิมูเลชันที่ดิวตี้ไซเคิล 0.5 จะมีองค์ประกอบความถี่ 20 kHz มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 70 V เพื่อลดทอนองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์นี้ออกไปจึงเลือกความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองให้มีค่าประมาณ 20 เท่า ของความถี่มูลฐานและต่ำกว่าความถี่การสวิตช์ 20 เท่าด้วยเช่นกัน เพื่อให้ให้อัตราการขยายเกนของวงจรกรองที่ความถี่ 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 ฟิเตอร์ได้จากสมการที่ 4.20

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

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

4.21

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

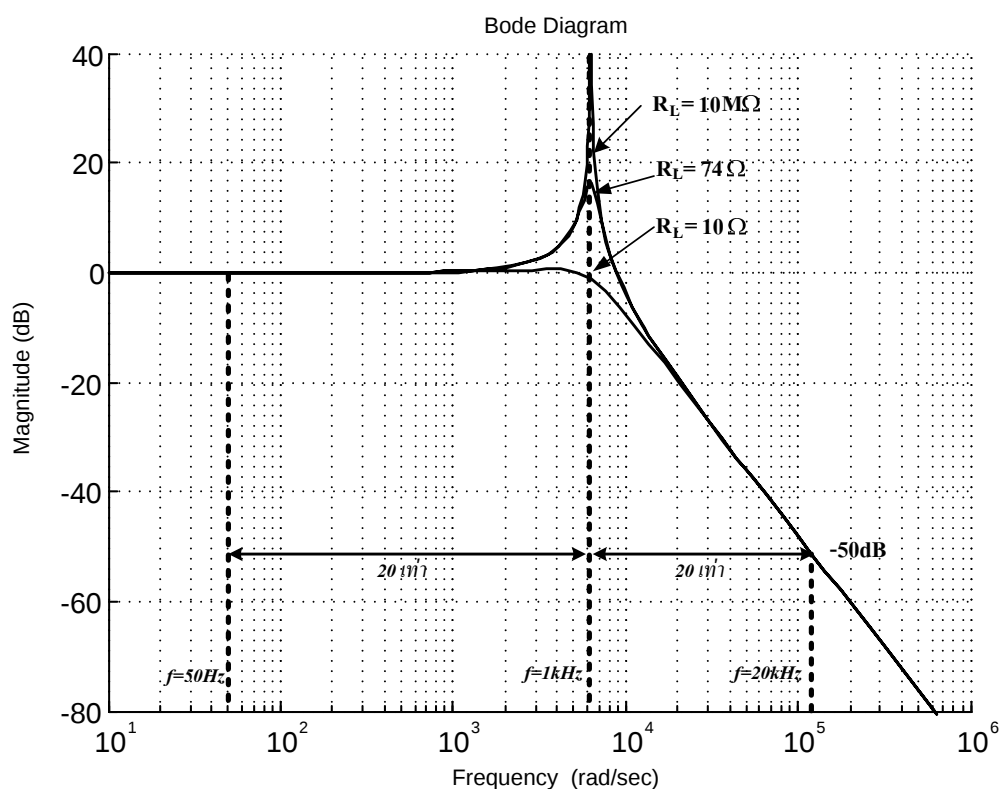
$$= 25.3 \times 10^{-9}$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 4.21 มาหาค่า L โดยการกำหนดค่า C ฟิลเตอร์

$$C = 14 \mu F$$

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

$$L = 1.8 mH$$



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ฟิลเตอร์

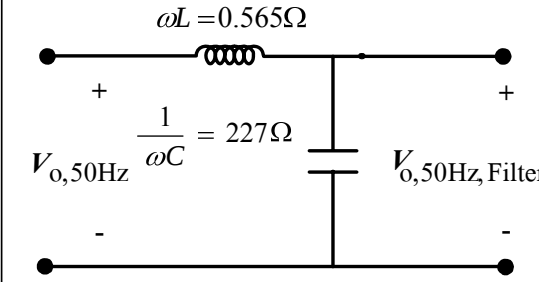
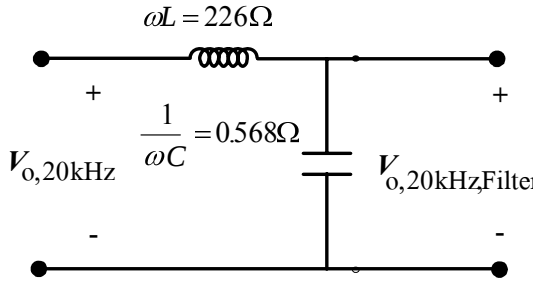
รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ฟิลเตอร์ ที่โหลดความต้านทานค่าต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 20 kHz LC ฟิลเตอร์ มีเกนเท่ากับ -52 dB หรือ 2^{-51} ซึ่งเพียงพอในการลดทอนองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของเอชชอปเปอร์ได้ เพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อ

นำ $v_{o,chop}$ ผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์แล้วจะได้แรงดันเอาต์พุต เป็นคลื่นไซน์ที่ไม่มีมอดูเลชันฮาร์โมนิกส์ ความถี่สูงปะปนอยู่ด้วย สามารถแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของแรงดันความถี่ต่ำและความถี่สูงที่สามารถผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้ โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงดันพิกคาเมนทอล 50Hz และแรงดันฮาร์โมนิกส์ 20kHz ซึ่งใช้ค่าจาก รูปคลื่น $v_{o,chop}$ ที่ ค่าดีวีดีไซเกิลต่างที่ได้แสดงไปข้างต้นผลการเปรียบเทียบดังกล่าวได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงดันความถี่ต่ำ จะสามารถผ่านวงจรฟิลเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้เกือบทั้งหมดในขณะที่แรงดันความถี่สูงจะผ่านวงจรฟิลเตอร์ไปยังเอาต์พุตได้น้อยมากซึ่งได้แสดงดังในสมการ (4.22) และ (4.23) [2]

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

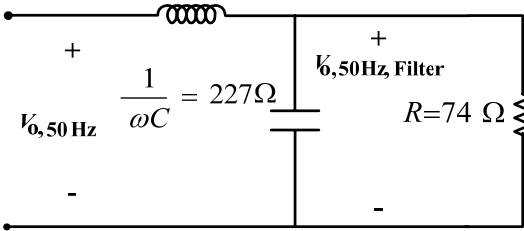
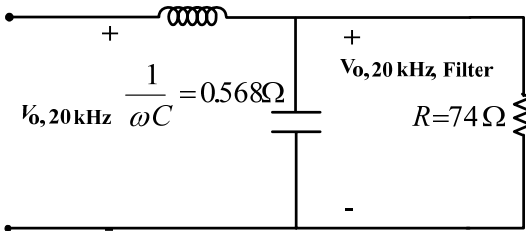
$$\left[\frac{1}{\omega C} \middle/ \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{O,20\text{ kHz}} \approx 0 \times V_{O,20\text{ kHz}} \quad \dots \omega L \gg \frac{1}{\omega C} \quad (4.23)$$

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%

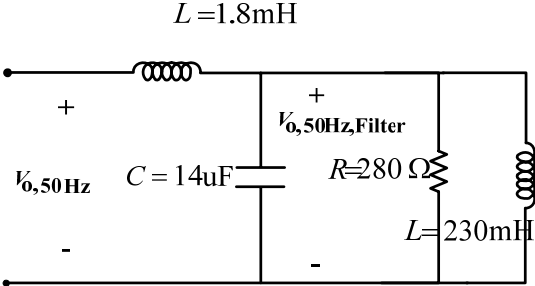
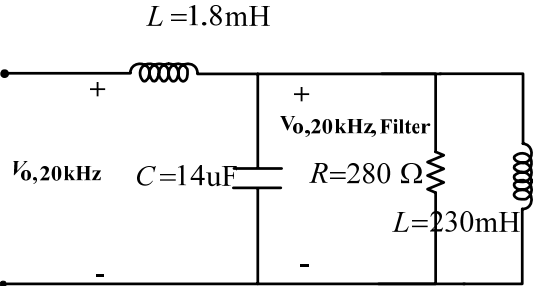
ผลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 4.1 ได้แสดงเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 50% ที่ความถี่ต่ำเท่ากับ 50 Hz และที่ความถี่สูงเท่ากับ 20 kHz ในภาคผนวกที่ ก-1

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50 Hz ที่มีโหลด เป็น R

50 Hz					20 kHz			
$L = 0.565 \Omega$ 					$\omega L = 226 \Omega$ 			
D	$V_{0,50Hz}$	$V_{L,50Hz}$	$V_{0,50Hz \text{ Filter}} = V_{C,50Hz}$	$[\%] V_{0,50Hz}$	$V_{0,20kHz}$	$V_{L,20kHz}$	$V_{0,20kHz \text{ Filter}} = V_{C,20kHz}$	$[\%] V_{0,20kHz}$
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 ได้แสดงเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีที่กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 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 ได้แสดงเป็นตัวอย่างสำหรับกรณีที่ค่าตัวชี้ไขเกิดเท่ากับ 50% ที่ความถี่ต่ำเท่ากับ 50 Hz และที่ความถี่สูงเท่ากับ 20 kHz ในภาคผนวกที่ ค-3

โดยจะสรุปแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชียอปเปอร์ที่กรองเอาฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงออกแล้วจะเท่ากับแรงดันอินพุตคูณกับค่าตัวชี้ไขเกิดดังในสมการที่ (4.21)

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

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

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

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

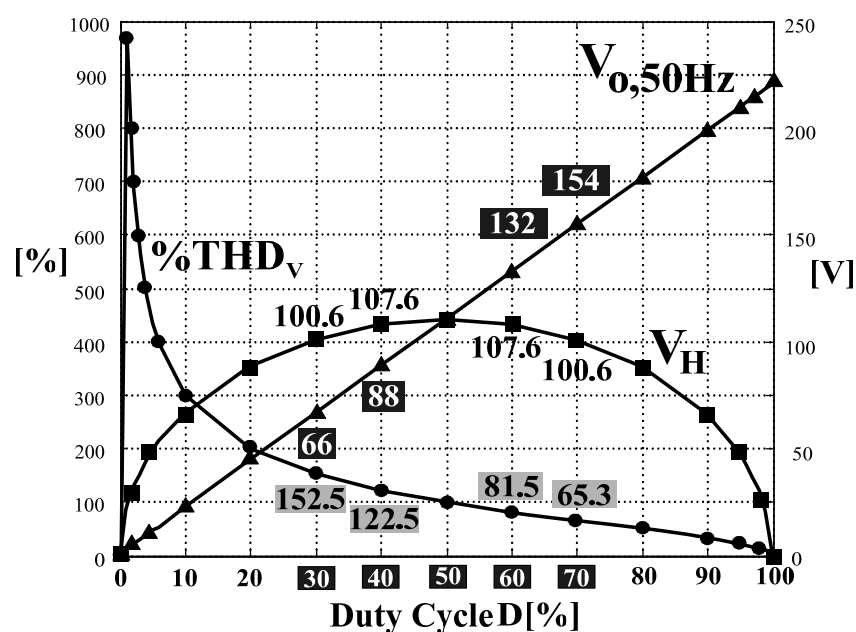
โดยที่ V_{Hk} คือค่า rms ของฮาร์โมนิกส์และสามารถหาค่า rms ของฮาร์โมนิกส์ได้จากสมการ (4.23)

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

และสามารถคำนวณหาค่า %THD ของคลื่นแรงดันเอาต์พุตได้จากสมการ (4.24)

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

เมื่อนำสเปกตรัมในรูปที่ 4.23 มาพิจารณารวมกับสมการ (4.21),(4.23)และ(4.24)สามารถนำมาเขียนเส้นกราฟเทียบกับค่าดีวตี้ไซเคิลจาก 0-100% สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.24



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

4.4 สรุป

จากสมการคลื่นแรงดันตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเอชไอโอปเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูงที่รับแรงดันแหล่งจ่ายเป็นไซน์การไฟฟ้า 220 v 50Hzที่ได้จากการวิเคราะห์ เมื่อนำมาเขียนลักษณะคลื่นโดยใช้โปรแกรม Matlab และเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการคลื่นแรงดันตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเอ

ซึ่งขอเปอร์เซ็นต์ที่สูงจึงนำคลื่นแรงดันตามจุดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกับคลื่นที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะเห็นว่า ลักษณะคลื่นที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก และได้แสดงการทำงานของวงจร LC ฟิเตอร์ที่ค่าตัวตัวไซเคลและที่ฮามอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ทำให้เห็นการทำงานได้อย่างชัดเจน