

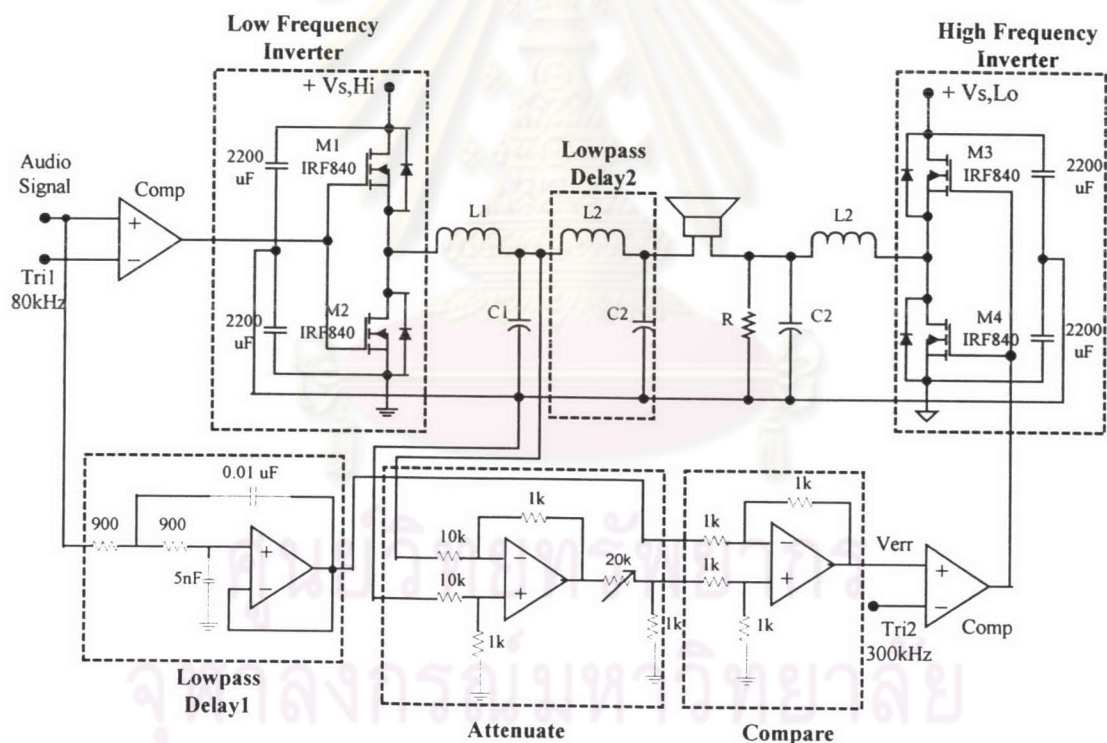
บทที่ 4

การออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ โดยอาศัยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งโครงสร้างของภาคขยายกำลังเลือกใช้ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ 2 วงจรทำงานร่วมกัน ทำให้สามารถมองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ทั้ง 2 วงจร เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

4.1 วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

โครงสร้างของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

รูปที่ 4.1 แสดงวงจรส่วนต่างๆที่ใช้ เช่น อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (Low Frequency Inverter) อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High Frequency Inverter) วงจรลดทอน (Attenuate) วงจรหน่วงเวลา (Lowpass Delay1) วงจรหน่วงเวลา (Lowpass Delay2) และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณลดทอนกับสัญญาณไซน์

4.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ

ใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบพาสซีฟอันดับสอง (Second Order) สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แสดงดังต่อไปนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} \quad (4.2)$$

โดยที่ f_c คือ ความถี่หักมุม (Comer Frequency)

Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor)

R คือ ความต้านทานของลำโพง มีค่าเท่ากับ $8\ \Omega$

จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 เราสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ โดยการเลือกค่าตัวประกอบคุณภาพ $Q = 0.707$ สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำ ทั้งในส่วนของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ และ อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง เลือกค่าความถี่หักมุม $f_{c1} = 25\ \text{kHz}$ สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ และเลือกค่าความถี่หักมุม $f_{c2} = 200\ \text{kHz}$ สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงจะได้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความเก็บประจุดังนี้

$$L_1 = 72.04\ \mu\text{H}, C_1 = 0.56\ \mu\text{F}, L_2 = 9\ \mu\text{H}, C_2 = 70.33\ \text{nF}$$

โดยที่ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ

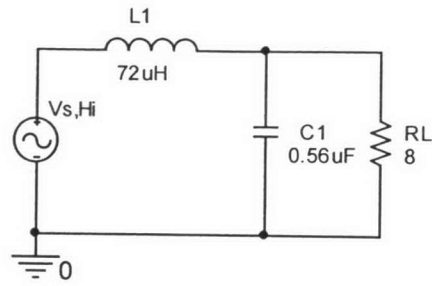
C_1 คือ ค่าความเก็บประจุของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ

L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

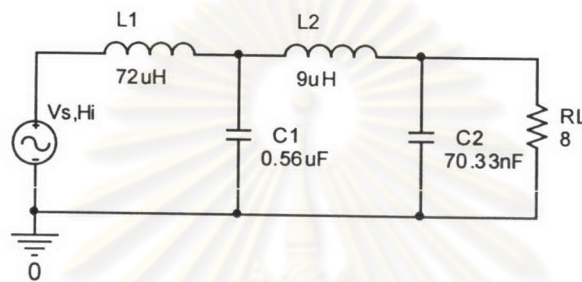
C_2 คือ ค่าความเก็บประจุของวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

จากวงจรในรูปที่ 4.1 เราจะนำ L_2 และ C_2 มาทำการเชื่อมต่อกับ L_1 และ C_1 เพื่อชดเชยเฟสที่ล่าช้า เมื่อสัญญาณผิผ่านวงจรกรองผ่านต่ำของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ก่อนที่จะนำไปป้อนเข้าสู่ลำโพง

เมื่อทดลองใช้พารามิเตอร์ของวงจรกรองผ่านต่ำที่คำนวณได้ มาหาผลตอบเชิงความถี่เพื่อเปรียบเทียบผลตอบเชิงความถี่ระหว่าง วงจรกรองผ่านต่ำของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำก่อนทำการชดเชยเฟสกับหลังทำการชดเชยเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 (โดยโปรแกรม Orcad 9.1)

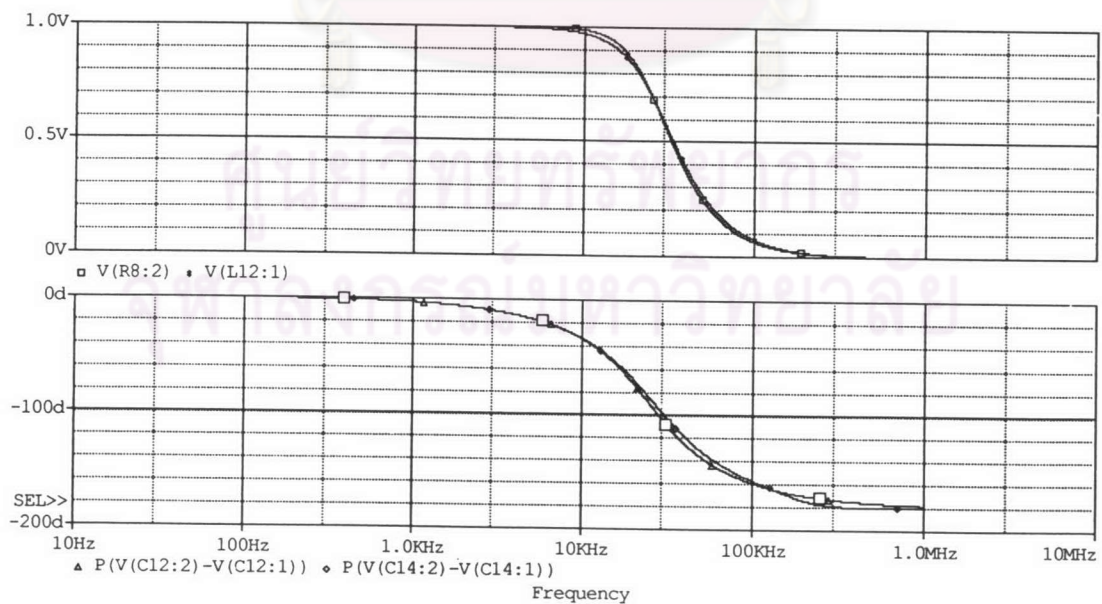


รูปที่ 4.2 วงจรกรองผ่านต่ำก่อนทำการชดเชยเฟส



รูปที่ 4.3 วงจรกรองผ่านต่ำหลังทำการชดเชยเฟส

รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำก่อนทำการชดเชยเฟส และ หลังทำการชดเชยเฟส โดยรูปที่ 4.2 ทำการวัดคร่อมโหลด และ รูปที่ 4.3 วัดคร่อมตัวเก็บประจุ C1 ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบเชิงความถี่ทั้งขนาดและเฟสมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถนำมาใช้แทนกันได้



รูปที่ 4.4 ผลตอบเชิงความถี่ก่อนทำการชดเชยเฟสและหลังทำการชดเชยเฟส

4.3 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟตรง (DC BUS)

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เราสามารถมองวงจรเป็นอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ ซึ่งจะมีสวิตช์สองตัวต่อวงจรในขณะจ่ายกระแสให้กับโหลด กระแสโหลด i_{LOAD} จะไหลผ่านความต้านทานเบียดเบียดในวงจร ความต้านทานของวงจรกรองและความต้านทานของโหลด เราสามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสโหลด i_{LOAD} กับ แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ V_S ได้ดังนี้ (Danz, 1996)

$$V_S = i_{LOAD} (2 * R_{DS(on)} + R_x + R_{LOAD}) \quad (4.3)$$

โดยที่ $R_{DS(on)}$ คือ ความต้านทานของสวิตช์ขณะต่อวงจร

R_x คือ ความต้านทานเบียดเบียดในวงจรและความต้านทานของวงจรกรอง

R_{LOAD} คือ ความต้านทานของโหลด(ลำโพง)

ในกรณีสัญญาณไซน์ เราสามารถคำนวณได้ว่า $I_{PEAK} = \sqrt{2} * I_{RMS}$ และกำลังที่จ่ายให้กับโหลด $P_{LOAD} = I_{RMS}^2 R_{LOAD}$ ซึ่งเมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ 4.3 เราสามารถหาความสัมพันธ์ของกำลังที่จ่ายให้กับโหลด P_{LOAD} กับแหล่งจ่ายไฟตรง ได้ดังนี้

$$V_{SI} = \sqrt{\frac{2 * P_{LOAD}}{R_{LOAD}}} (2 * R_{DS(on)} + R_x + R_{LOAD}) \quad (4.4)$$

แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{S2} = A_V * V_{ERR} \quad (4.5)$$

P_{LOAD} คือ กำลังด้านออก

V_{S1}, V_{S2} คือ แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำและอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ตามลำดับ

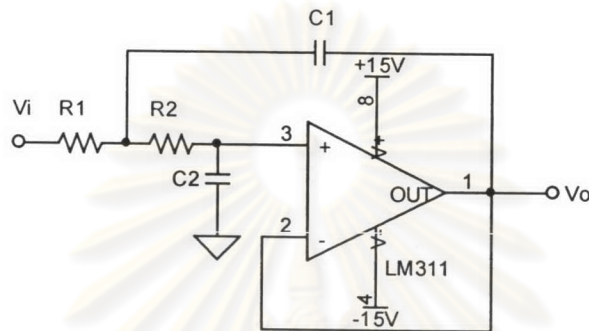
A_V คือ อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

V_{ERR} คือ แรงดันผิดเพี้ยนของสัญญาณด้านออก

4.4 การออกแบบวงจรหน่วงเวลา

เนื่องจากสัญญาณด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ จะมีเฟสล่าหลัง สัญญาณด้านเข้าหรือสัญญาณไซน์ ดังนั้นเราจะทำการชดเชยเฟสของสัญญาณไซน์ก่อนโดยใช้วงจรกรองผ่านค่าแบบแอกทีฟอันดับสองเพื่อให้สัญญาณมีเฟสเดียวกับสัญญาณด้านออกที่ได้ทำการลดทอน ก่อนที่จะนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะได้ค่าสัญญาณผิดเพี้ยน เพื่อป้องกันเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง วงจรหน่วงเวลาสัญญาณด้านออกของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำนั้น เราจะใช้วงจรกรองผ่านค่าของ

อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงมาทำการชดเชย ส่วนวงจรหน่วงเวลาสัญญาณด้านเข้าหรือสัญญาณไซน์ เราจะใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับสอง แสดงดังรูปที่ 4.5 และ ในการออกแบบเราจะใช้ตารางที่ 4.1 โดยเราจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ Butterworth เนื่องจากมีค่าตัวประกอบการหน่วง (Damping Factor) ตรงกับวงจรกรองผ่านต่ำของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ และเลือกความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับสอง ให้มีค่าเท่ากับความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำแบบพาสซีฟของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณไซน์ที่มีเฟสเดียวกับสัญญาณด้านออก ที่ได้ทำการลดทอนขนาดลงมาเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.5 วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับสอง

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวเก็บประจุที่ไม่ได้ทำการสเกล(Unscaled) สำหรับวงจรกรองในรูปที่ 2.10

Type of Two-Pole Low-Pass Filter	ζ	C_1, F	C_2, F
Bessel	0.8659	0.9066	0.6799
Butterworth	0.7072	1.414	0.7071
Chebyshev (0.1-dB peak)	0.6516	1.638	0.6955
Chebyshev (0.25-dB peak)	0.6179	1.778	0.6789
Chebyshev (0.5-dB peak)	0.5789	1.949	0.6533
Chebyshev (1-dB peak)	0.5228	2.218	0.6061
Chebyshev (2-dB peak)	0.4431	2.672	0.5246
Chebyshev (3-dB peak)	0.3833	3.103	0.4558

ขั้นตอนการออกแบบ

1. เลือก C_1 และ C_2 จากตารางที่ 4.1 ตามชนิดของวงจรกรองผ่านต่ำที่ต้องการ
2. ทำการสเกลความถี่ (Frequency Scaling) โดยการใช้ความถี่หักมุม (Corner Frequency) ที่ต้องการ ดังนี้

$$C_1' = \frac{C_1''}{2\pi f_{cp}} \quad C_2' = \frac{C_2''}{2\pi f_{cp}} \quad (4.6)$$

โดยที่ C_1', C_2' คือ ค่าของตัวเก็บประจุที่ได้ทำการสเกล (Scaling)

C_1'', C_2'' คือ ค่าของตัวเก็บประจุที่ยังไม่ได้ทำการสเกลจากตารางที่ 2.2

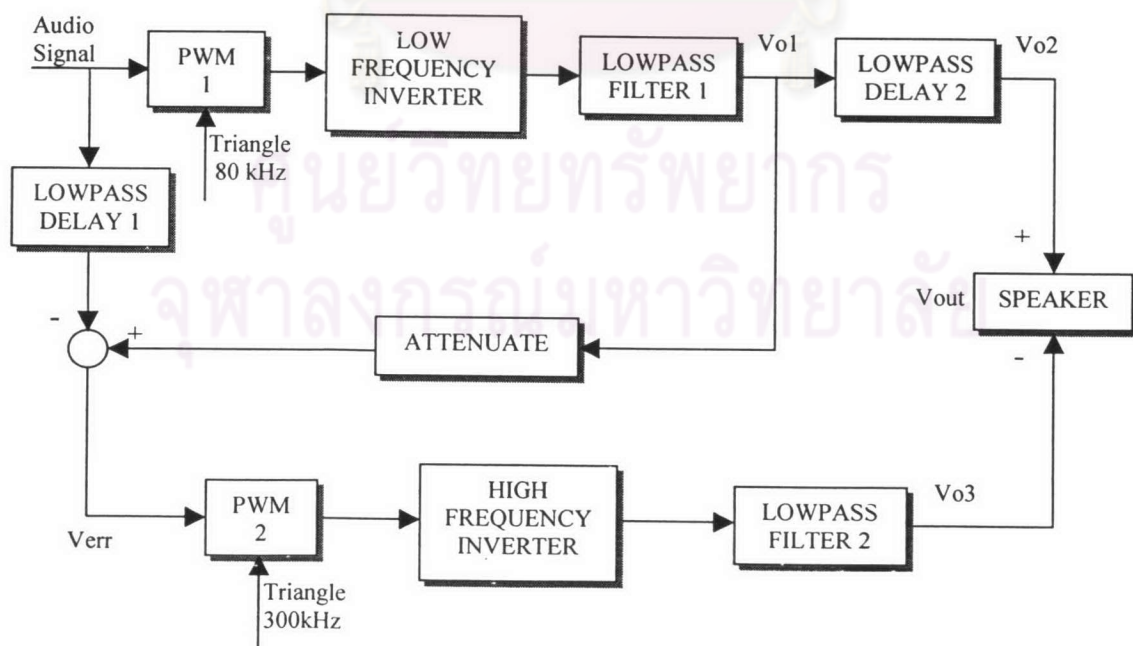
3. เลือกค่า $R = R_1 = R_2$ จะได้ค่า C_1 และ C_2 ดังนี้

$$C_1 = \frac{C_1'}{R} \quad C_2 = \frac{C_2'}{R} \quad (4.7)$$

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเลือกความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำแบบ Butterworth และใช้สมการที่ 4.6 และ 4.7 จะได้ค่า $R_1 = R_2 = 900 \Omega$, $C_1 = 0.01 \mu F$ และ $C_2 = 5 \text{ nF}$

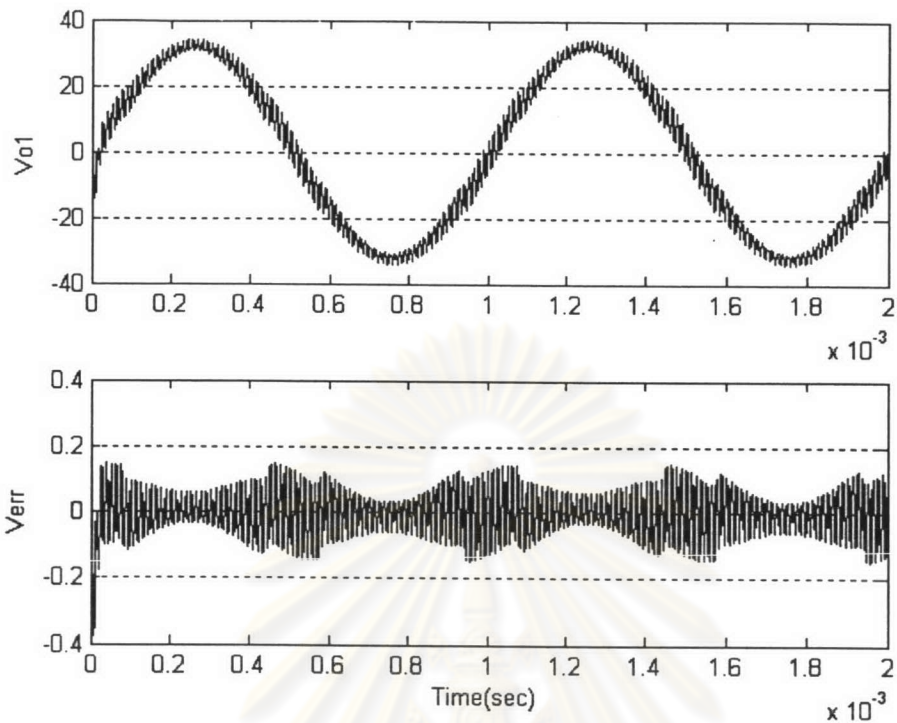
4.5 ผลการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Matlab

ผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Simulink/Matlab แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยการกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทำงานดังนี้ สัญญาณอ้างอิง 1 kHz, 0.85 Vp สัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ต่ำ 1 Vp, 80 kHz แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำเท่ากับ $\pm 40 \text{ V}$ สัญญาณสามเหลี่ยมความถี่สูง 0.25 Vp, 300 kHz แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงเท่ากับ $\pm 9.395 \text{ V}$ Dead Time = 0.15 us ความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำในอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำมีค่าเท่ากับ 25 kHz และ ความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำในอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 200 kHz ตัวประกอบคุณภาพ $Q = 0.707$

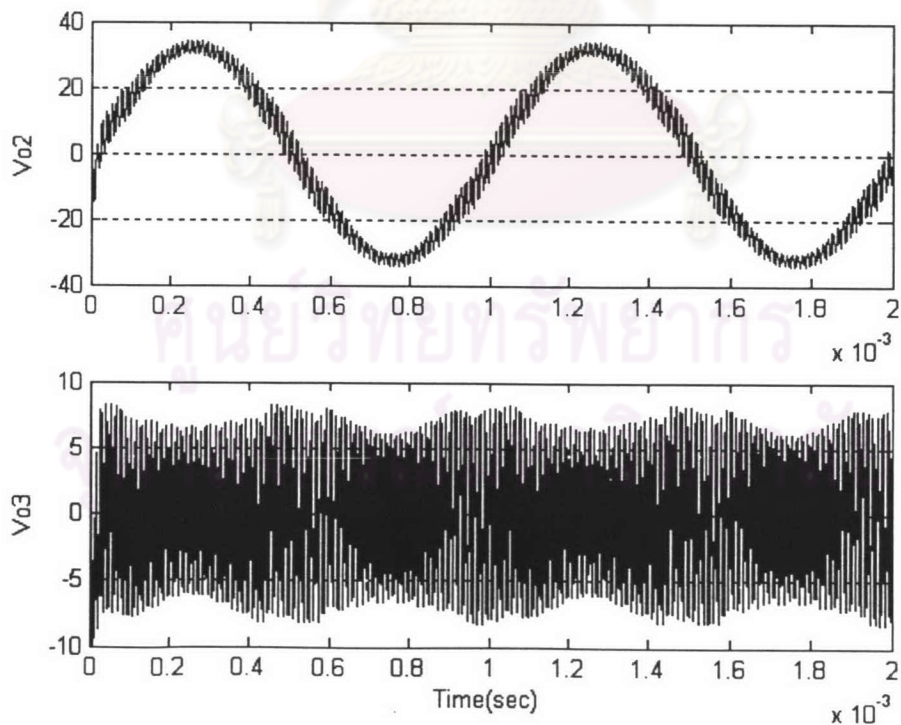


รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่นำเสนอ

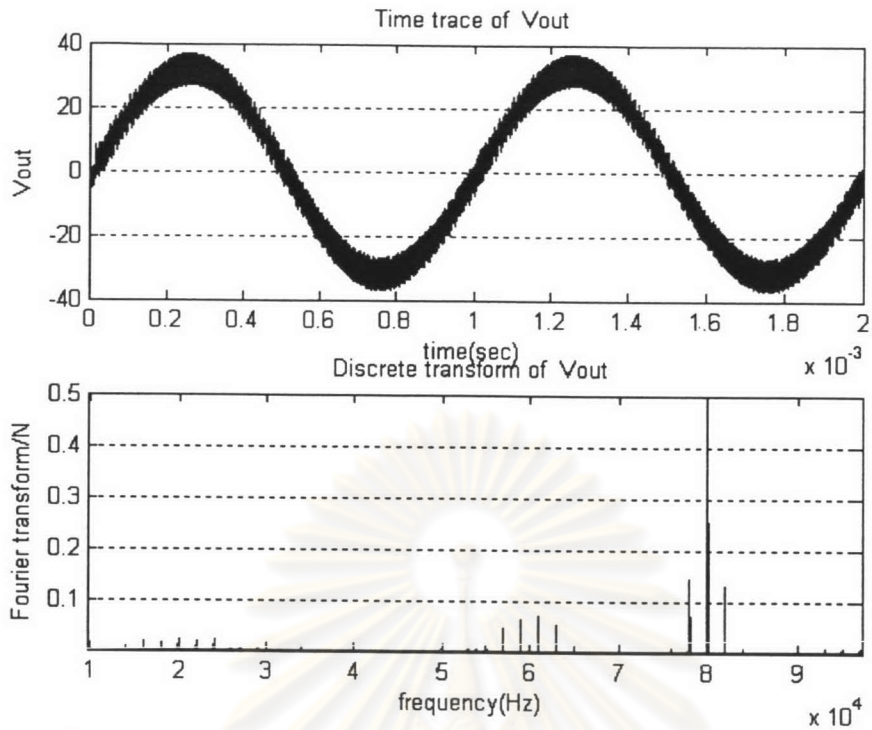
4.5.1 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 1 kHz , 0.85 Vp



รูปที่ 4.7 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์

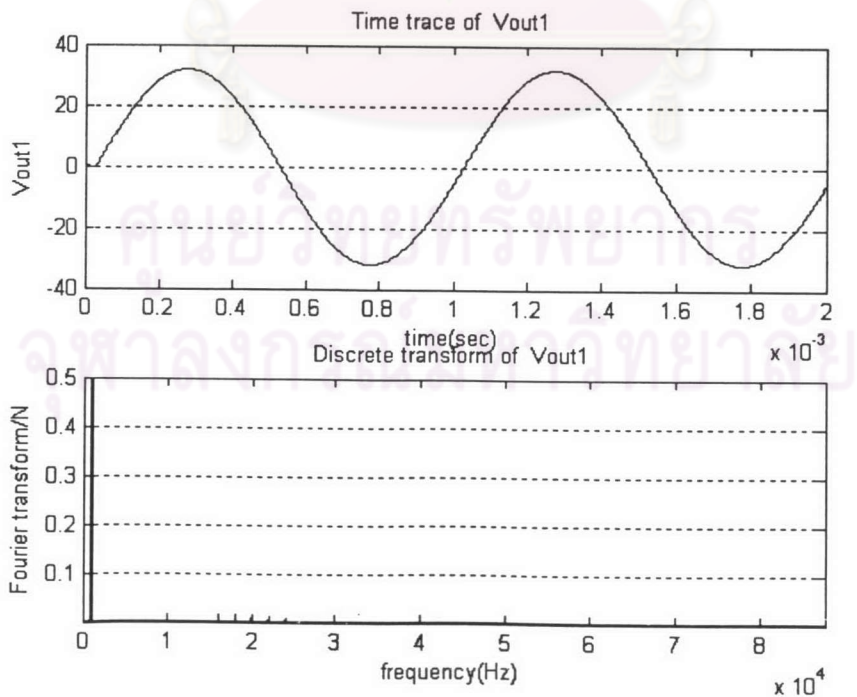


รูปที่ 4.8 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3})



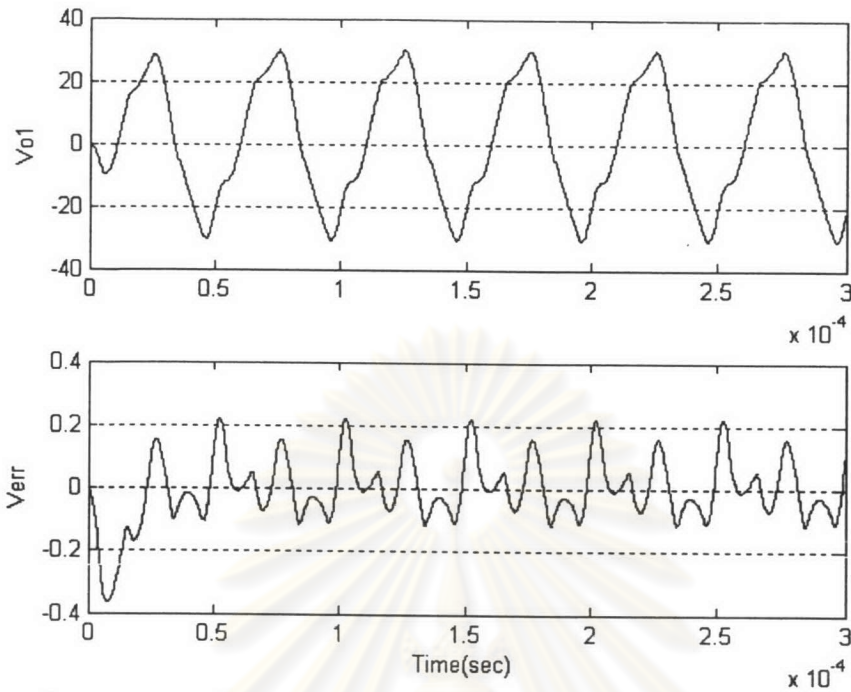
รูปที่ 4.9 แรงดันและสเปกตรัมของสัญญาณด้านออก(Vout) ที่ได้จากการนำแรงดันVo2 มาหักล้างกับแรงดันVo3

จากรูปที่ 4.9 เราจะพิจารณาสเปกตรัมถึงความถี่ 20 kHz ส่วนที่เกินออกไปเราจะถือว่าลำโพงไม่ตอบสนอง เพราะฉะนั้น เราจะจำลองเสียงที่ออกลำโพงโดยการกรองความถี่ที่เกิน 20 kHz ออกไปได้ดังรูปที่ 4.10

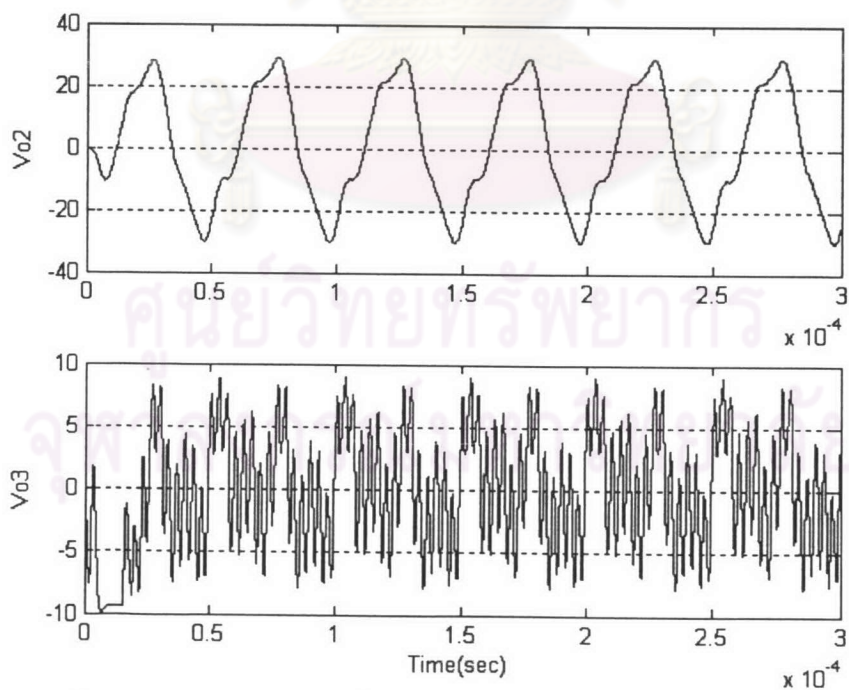


รูปที่ 4.10 รูปจำลองสัญญาณเสียงและสเปกตรัมที่ออกจากลำโพง

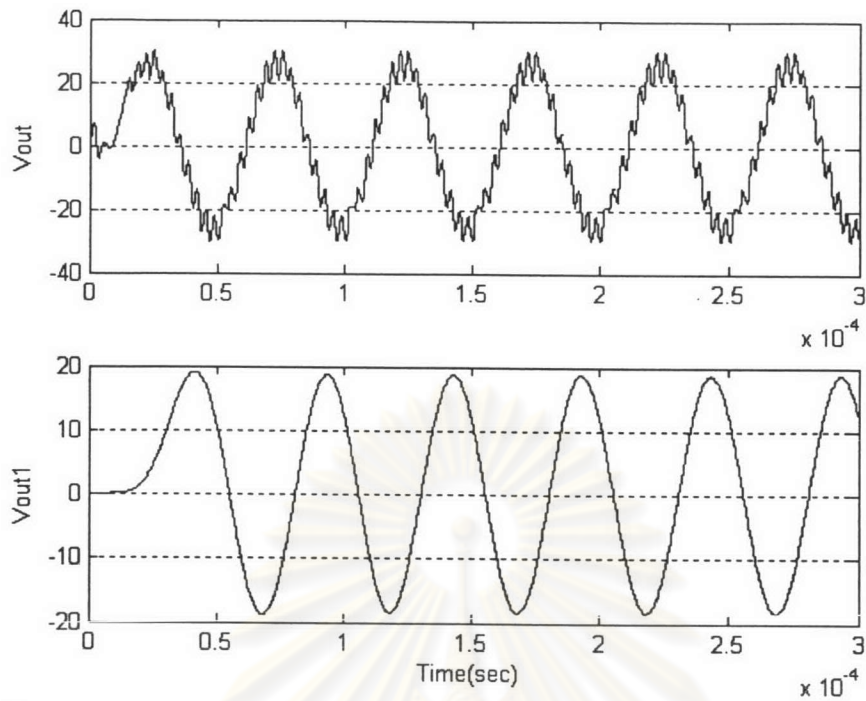
4.5.2 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 kHz , 0.85 Vp



รูปที่ 4.11 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์



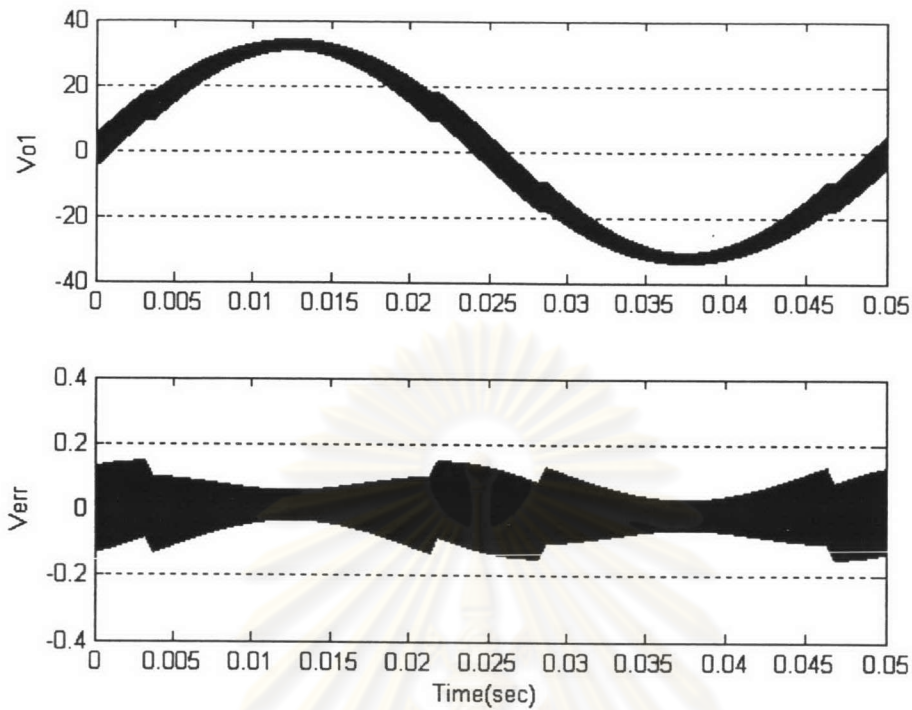
รูปที่ 4.12 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3})



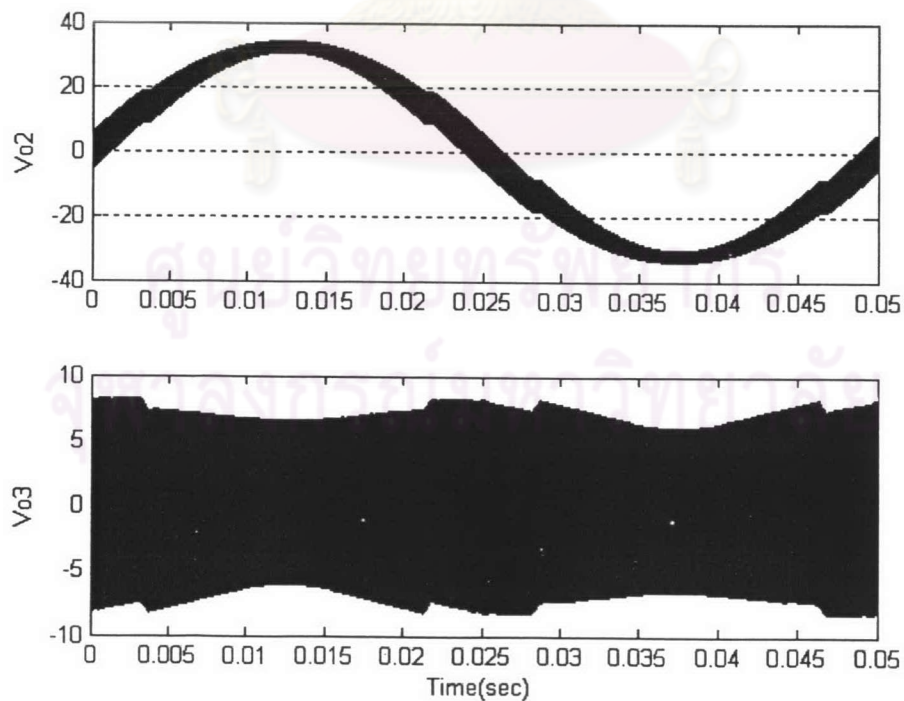
รูปที่ 4.13 แรงดันของสัญญาณด้านออก(Vout) ที่ได้จากการนำแรงดันVo2 มาหักล้างกับแรงดันVo3 และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงโดยการกรองความถี่ที่เกิน 20 kHz ออกไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

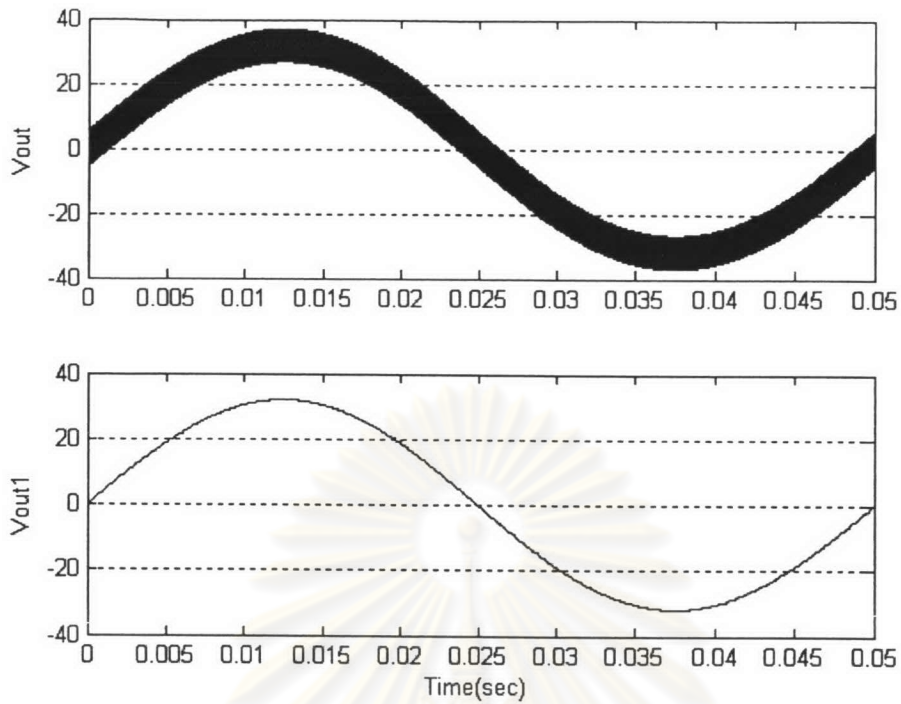
4.5.3 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 Hz , 0.85 Vp



รูปที่ 4.14 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์



รูปที่ 4.15 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3})



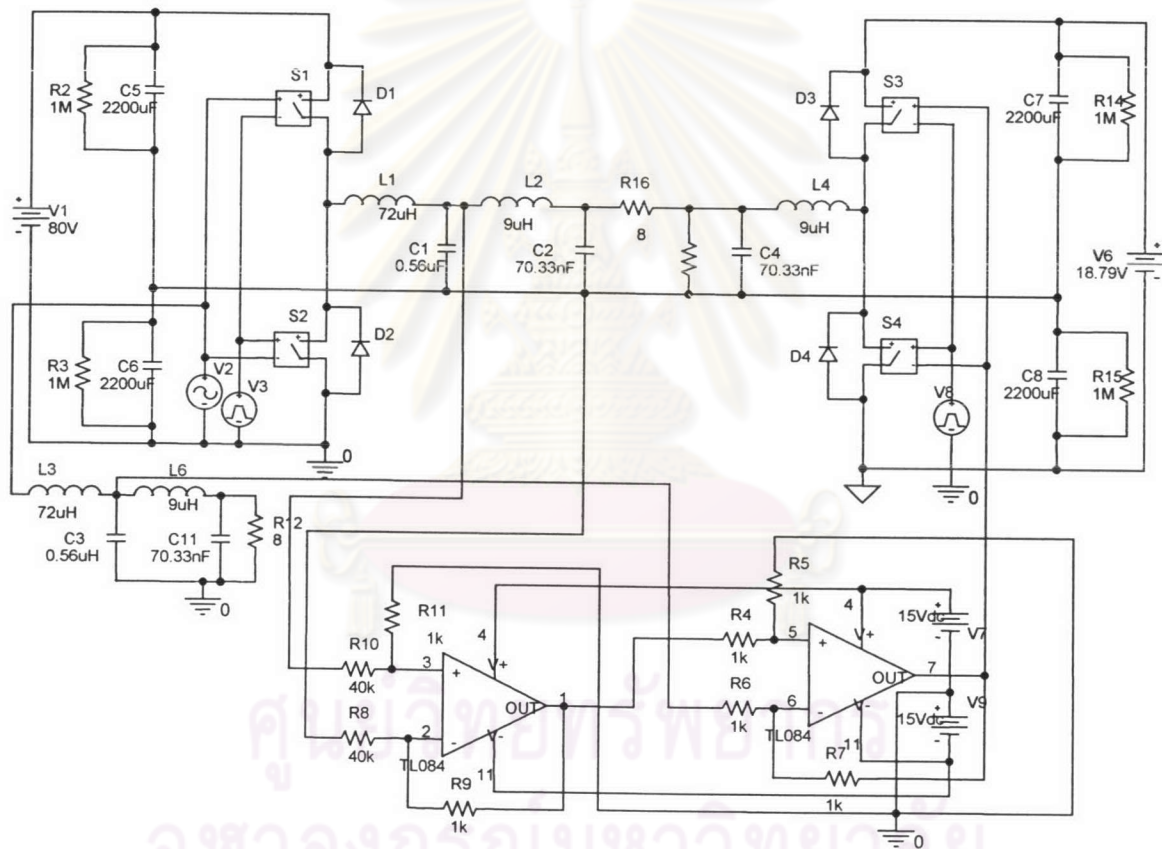
รูปที่ 4.16 แรงดันของสัญญาณด้านออก(V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้างกับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงโดยการกรองความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการทำงานที่ใช้สัญญาณอ้างอิงความถี่ต่างๆ

	20Hz	1kHz	20kHz
V_{o1}	32.5Vp	32.5 Vp	30 Vp
V_{err}	0.147Vp	0.15 Vp	0.22 Vp
V_{o2}	5.4Vp	5 Vp	6.2 Vp
V_{o3}	32.25Vp	32.2 Vp	29.1 Vp
V_{out}	32Vp	32 Vp	27.8 Vp
Phase Delay	≈ 0 องศา	≈ 4.5 องศา	≈ 86.4 องศา

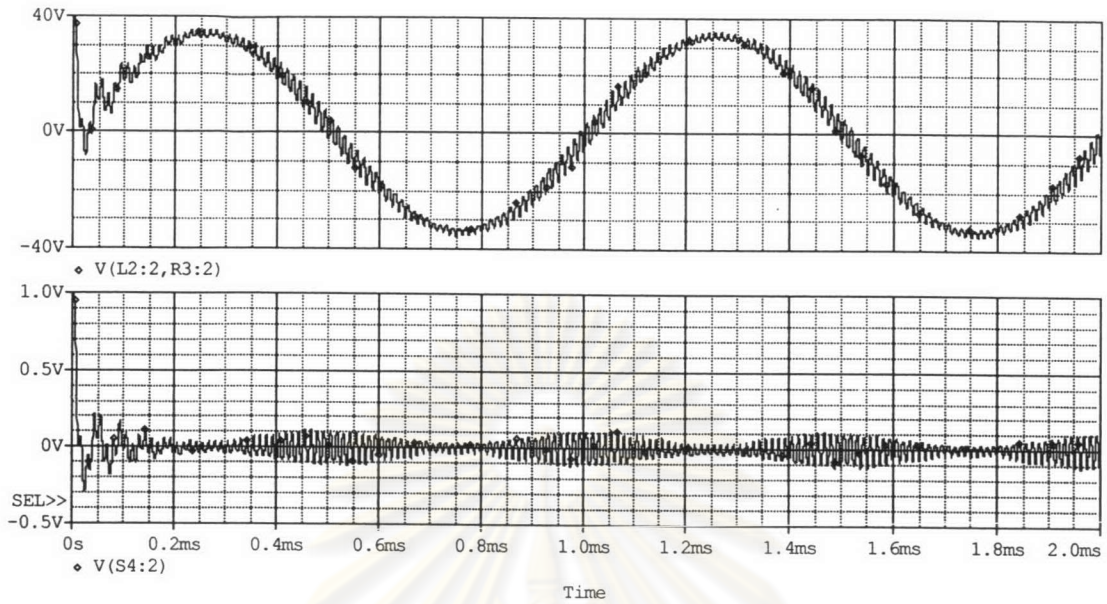
4.6 ผลการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรม Orcad

ผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยการกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการทำงานดังนี้ สัญญาณอ้างอิง 1 kHz , 0.85 Vp สัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ต่ำ 1 Vp , 80 kHz แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำเท่ากับ ± 40 V สัญญาณสามเหลี่ยมความถี่สูง 0.25 Vp , 300 kHz แหล่งจ่ายไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงเท่ากับ ± 9.395 V Dead Time = 0.15 us ความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำในอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำมีค่าเท่ากับ 25 kHz และความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำในอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 200 kHz ตัวประกอบคุณภาพ $Q = 0.707$

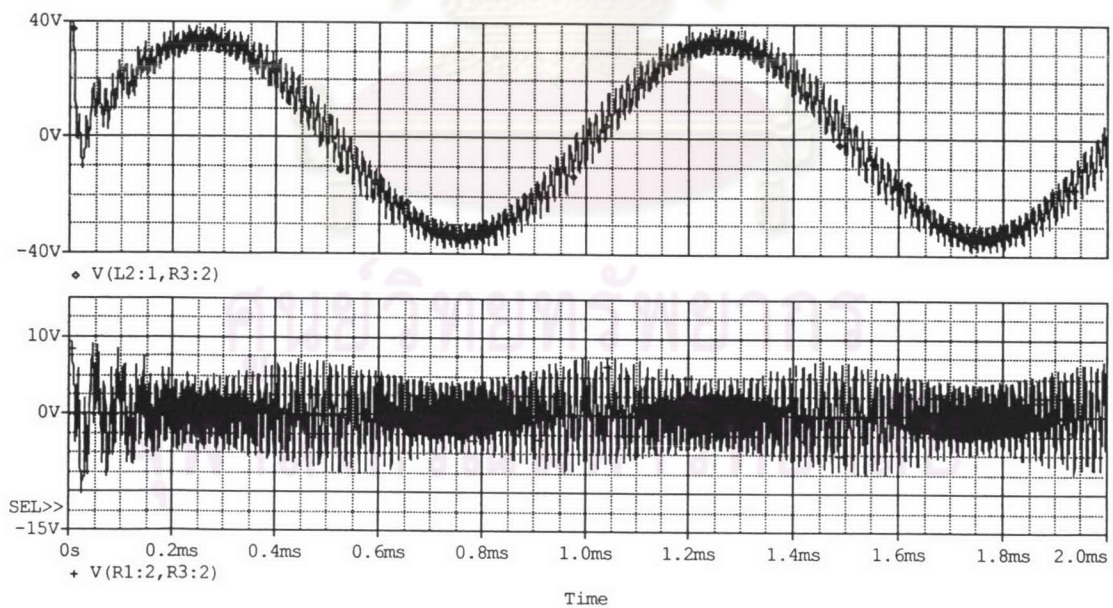


รูปที่ 4.17 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

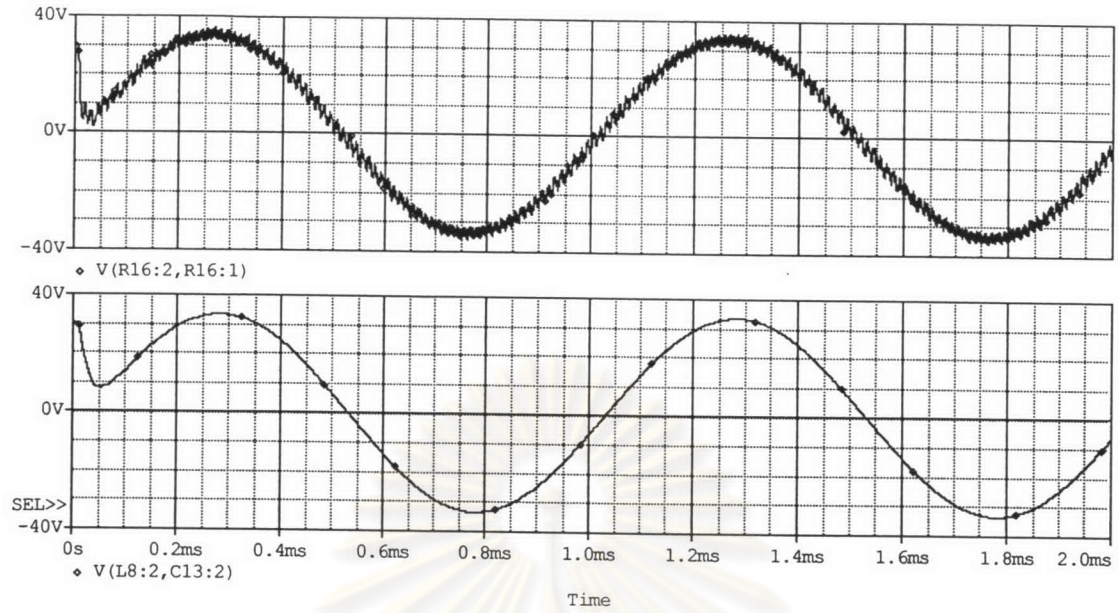
4.6.1 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 1 kHz , 0.85 V_p



รูปที่ 4.18 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (Vo1) และแรงดันผิดเพี้ยน (Verr) ที่ได้จากการลดทอนแรงดันVo1 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์



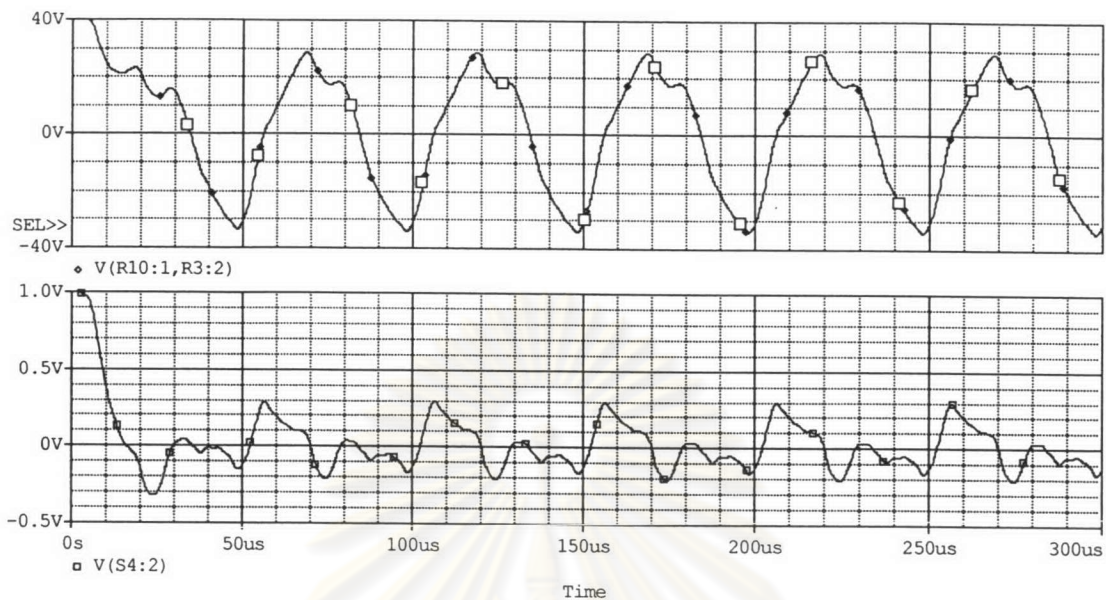
รูปที่ 4.19 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (Vo2) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (Vo3)



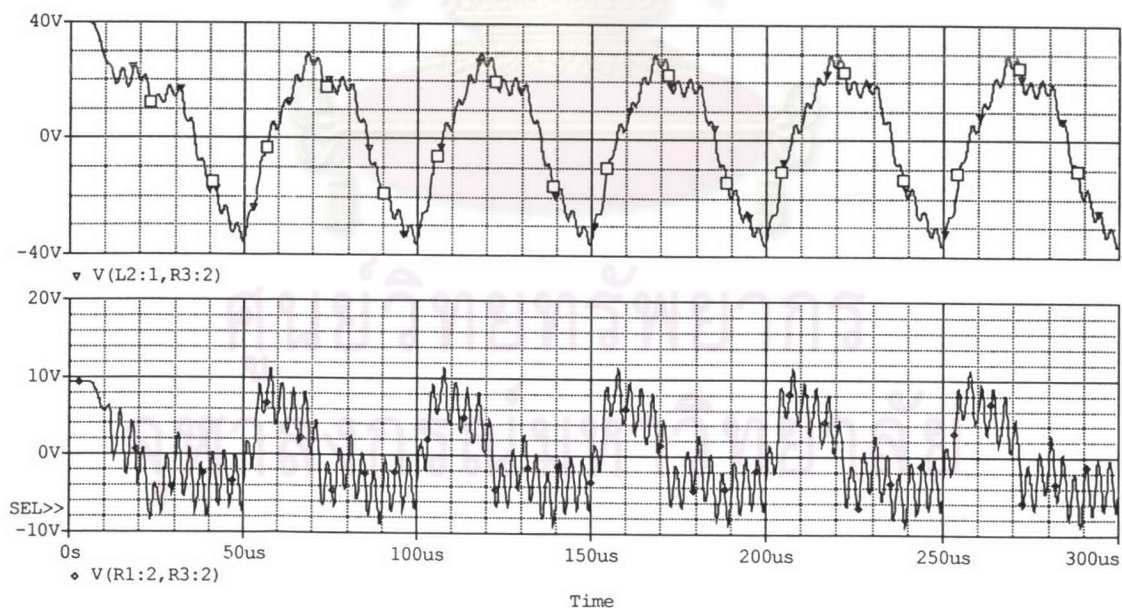
รูปที่ 4.20 แรงดันของสัญญาณด้านออก(V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้างกับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพง โดยการกรองความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

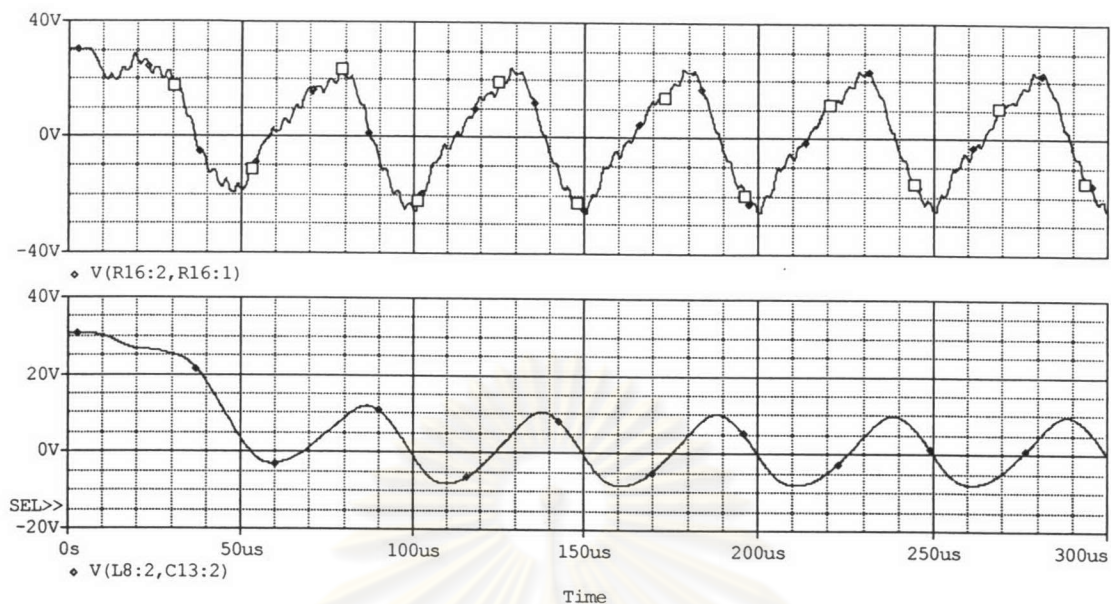
4.6.2 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 kHz , 0.85 Vp



รูปที่ 4.21 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเฟส (V_{err})
ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์



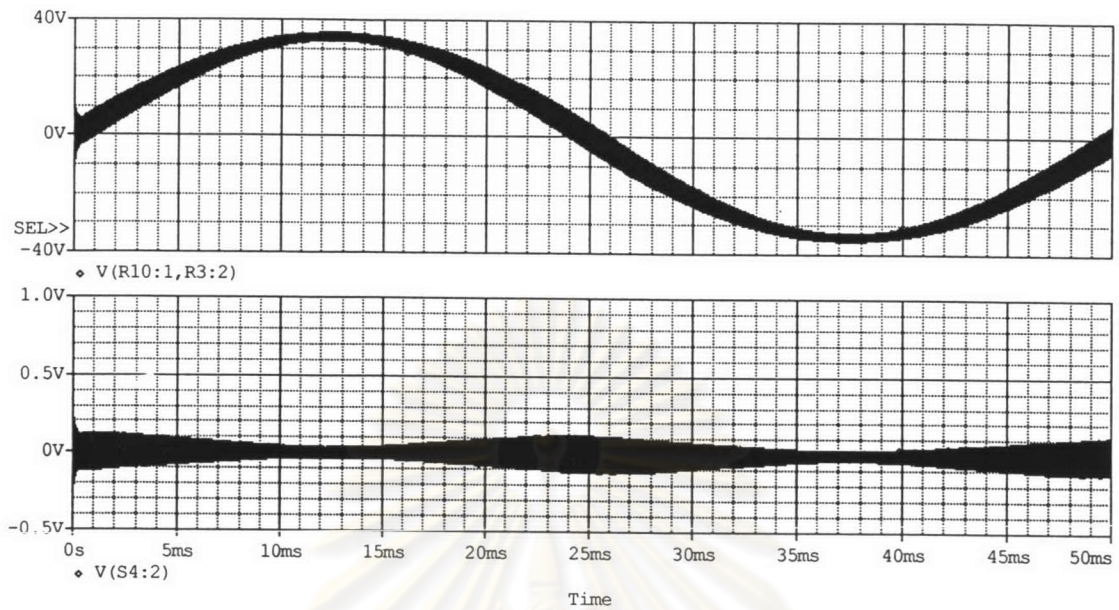
รูปที่ 4.22 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2})
และแรงดันผิดเฟสที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3})



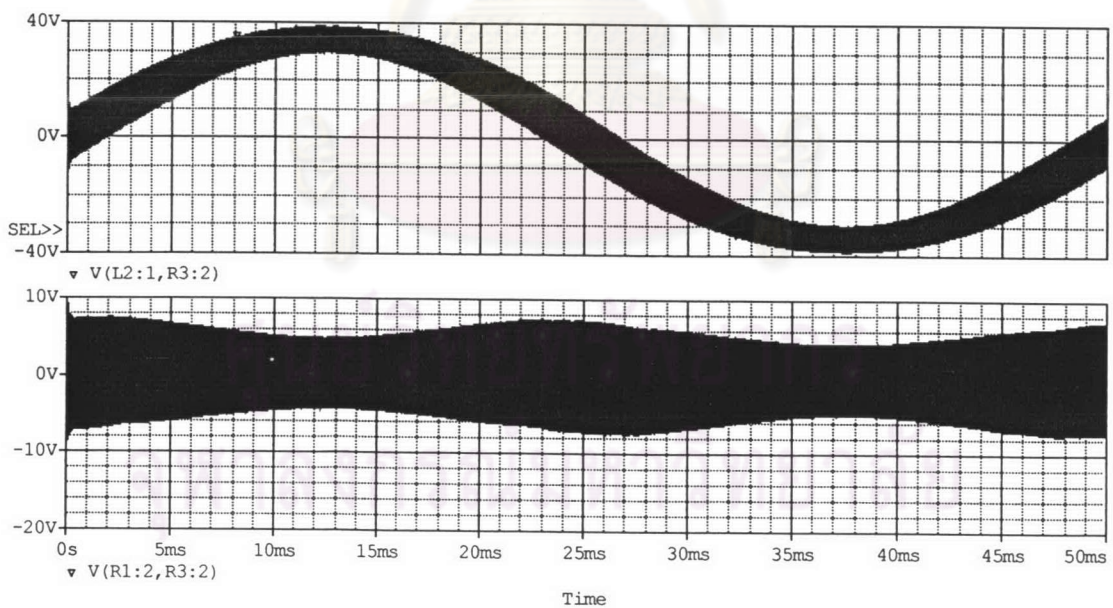
รูปที่ 4.23 แรงดันของสัญญาณด้านออก(V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้างกับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงโดยการกรองความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

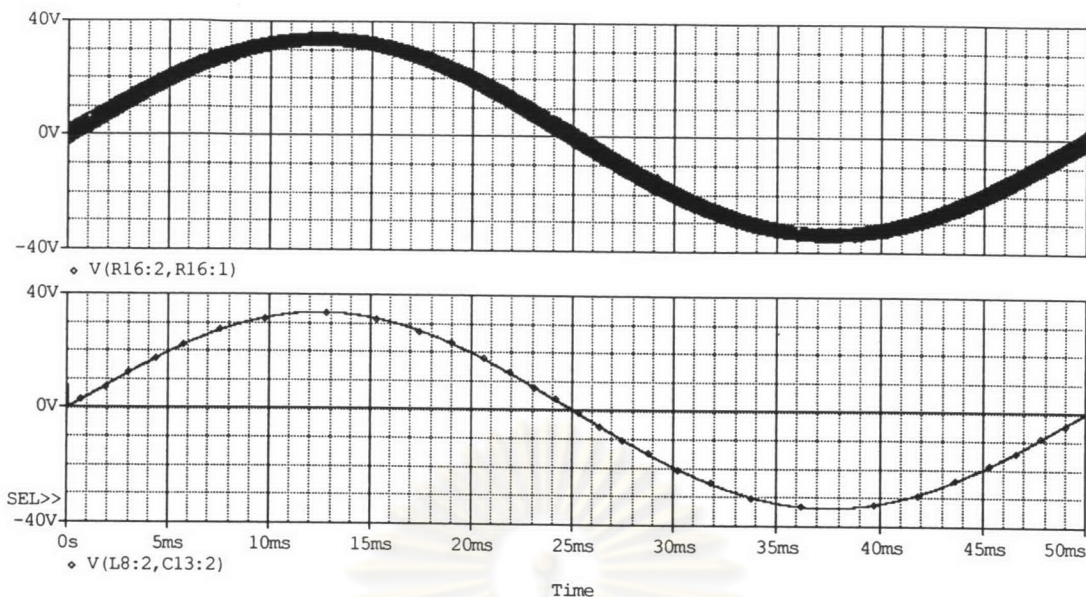
4.6.3 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 Hz , 0.85 Vp



รูปที่ 4.24 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err})
ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์



รูปที่ 4.25 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2})
และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3})



รูปที่ 4.26 แรงดันของสัญญาณด้านออก(V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้างกับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพง โดยการกรองความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป

จากผลการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Simulink / Matlab และ โปรแกรม Orcad จะเห็นว่า ผลการจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันหรืออาจจะต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Simulink/Matlab นั้น มีการจำลองผลของเวลา On/Off ของสวิตช์ และผลของเวลาพักของสวิตช์ด้วย แต่การจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Orcad นั้น ใช้สวิตช์แบบอุดมคติ ซึ่งในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Orcad นั้น เราใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟในการหน่วงเวลาสัญญาณด้านเข้าหรือสัญญาณไซน์ แต่เมื่อนำไปใช้จริงเราจะใช้วงจรกรองแบบแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 4.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย