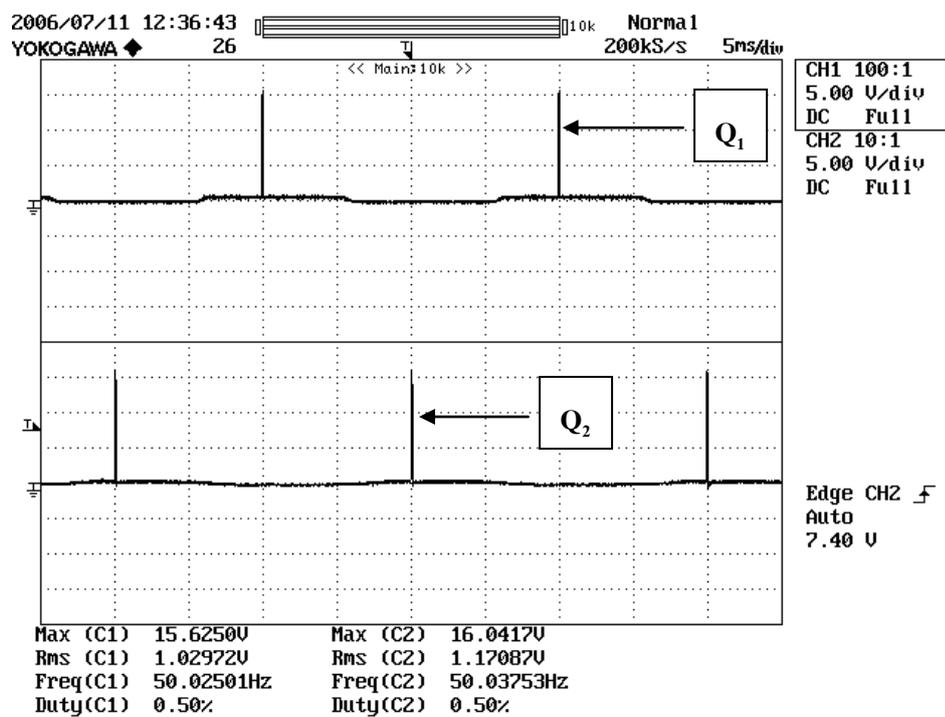


บทที่ 5

การทดลองอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสที่มีระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ

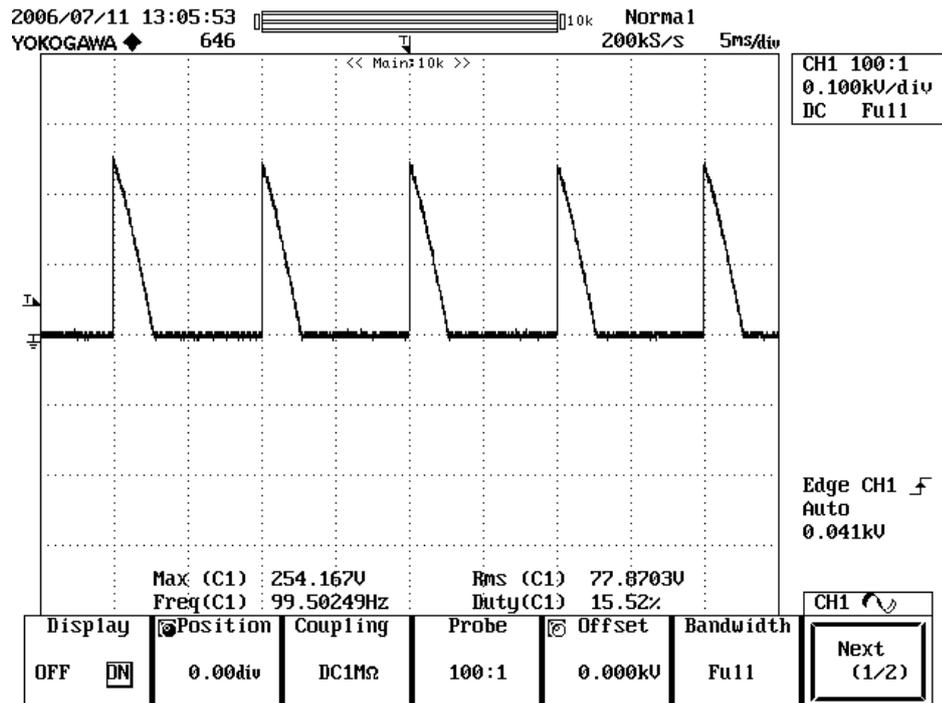
5.1 การทดสอบแหล่งจ่ายกระแส

สัญญาณที่ได้จาก TCA785 จะถูกแยกโคจรทางแสงโดยใช้ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ TLP250 จำนวน 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และในรูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณที่ผ่านการแยกโคจรทางแสงเพื่อใช้สำหรับจุดชนวนให้กับ SCR ขณะยังไม่ได้ต่อเกทของ SCR

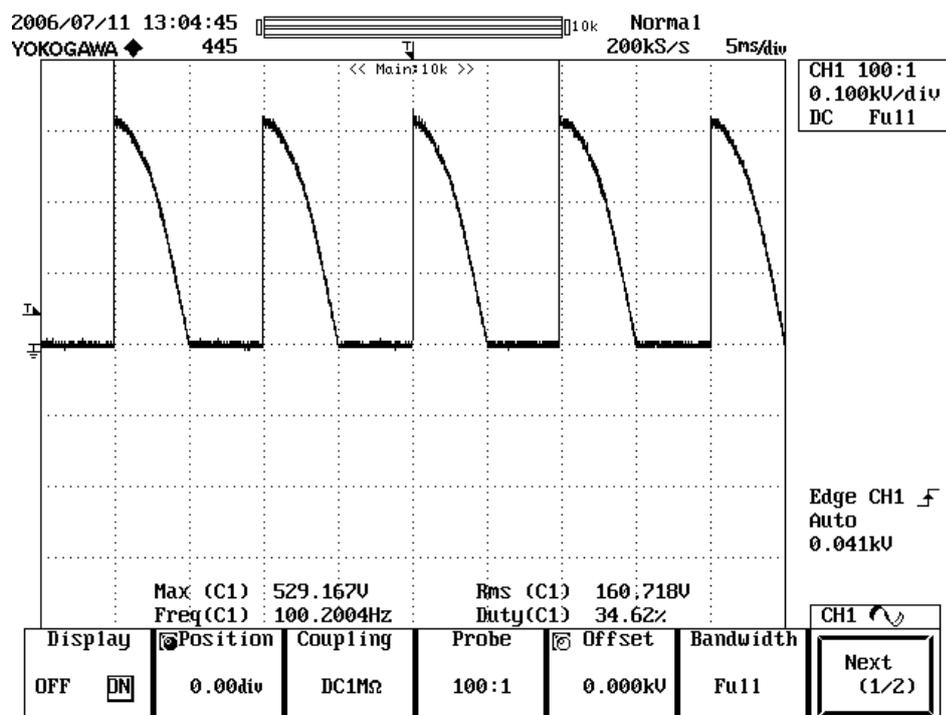


รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณที่ผ่านการแยกโคจรทางแสง เพื่อใช้สำหรับจุดชนวนให้กับ SCR Q_1 และ Q_2

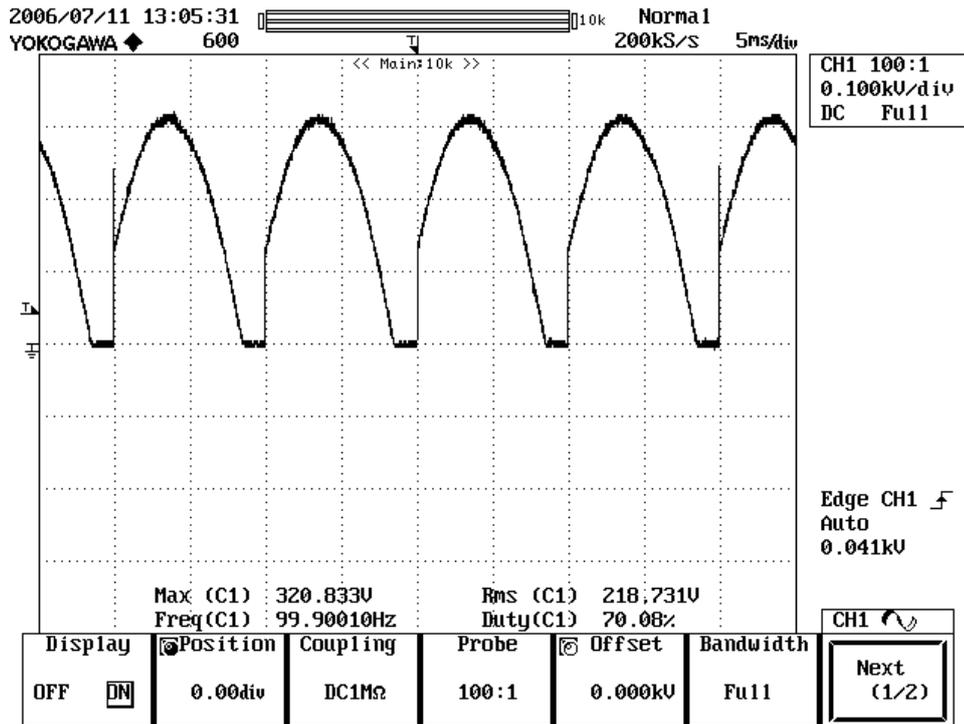
และในรูปที่ 5.2, 5.3, 5.4 และ 5.5 เป็นการทดสอบวัดแรงดันของวงจรเรียงกระแส ที่ยังไม่ผ่านการกรองกระแสให้เรียบ ณ มุมจุดชนวน (α) ของ SCR ที่มุมมากกว่า 90 องศา 90 องศา 30 องศา และ 0 องศาตามลำดับ โดยใช้หลอดไฟ 220 V. เป็นโหลด



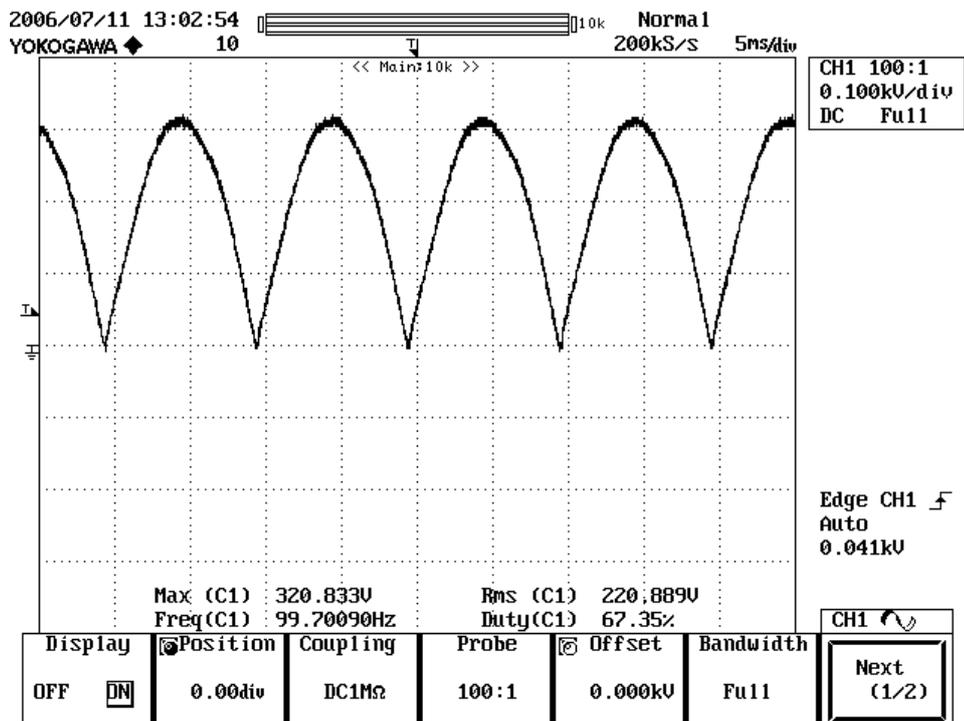
รูปที่ 5.2 แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha > 90^\circ$ (สเกลแรงดัน:100 V/div, Time:5 mS/div)



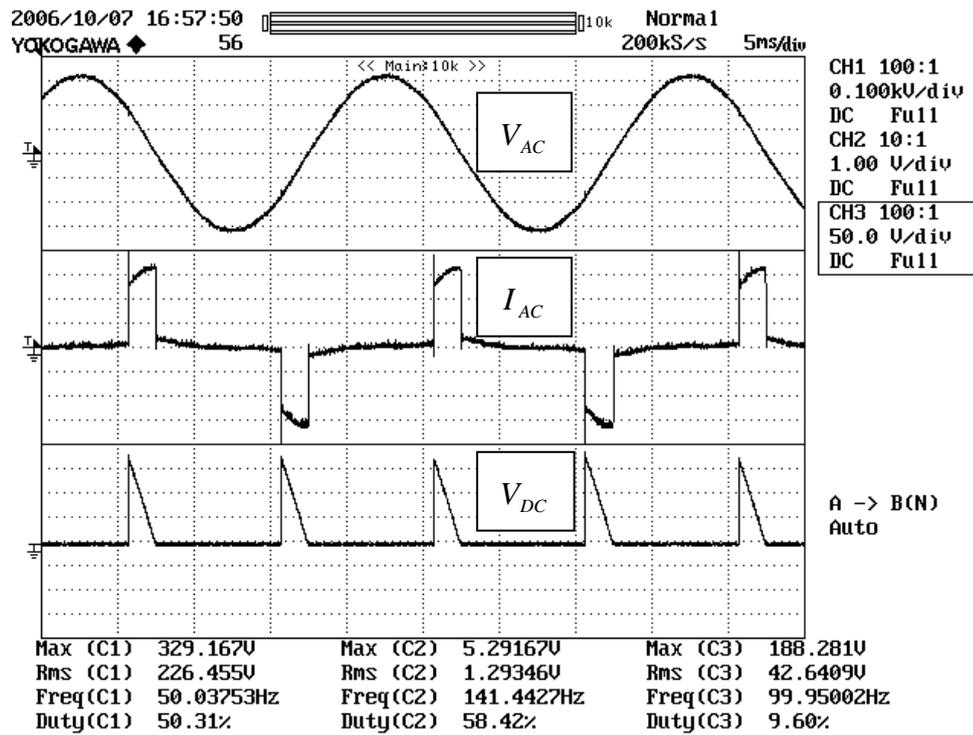
รูปที่ 5.3 แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha \approx 90^\circ$ (สเกลแรงดัน:100 V/div, Time:5 mS/div)



รูปที่ 5.4 แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha \approx 30^\circ$ (สเกลแรงดัน:100 V/div, Time:5 ms/div)



รูปที่ 5.5 แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha \approx 0^\circ$ (สเกลแรงดัน:100 V/div, Time:5 ms/div)

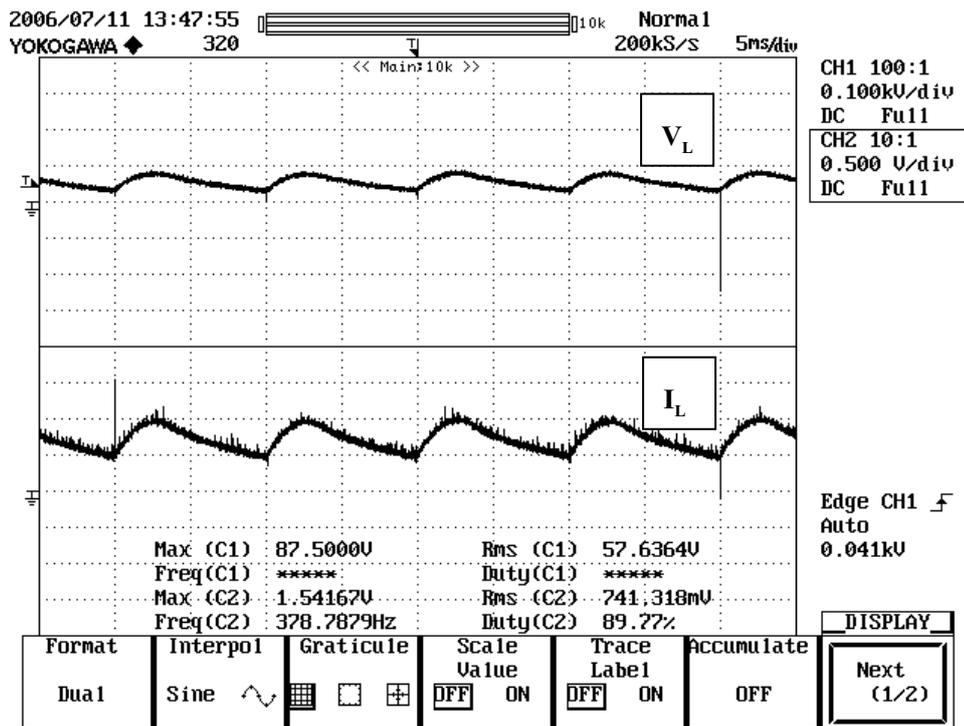


รูปที่ 5.6 รูปร่างของสัญญาณแรงดัน V_{AC} และกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ I_{AC}

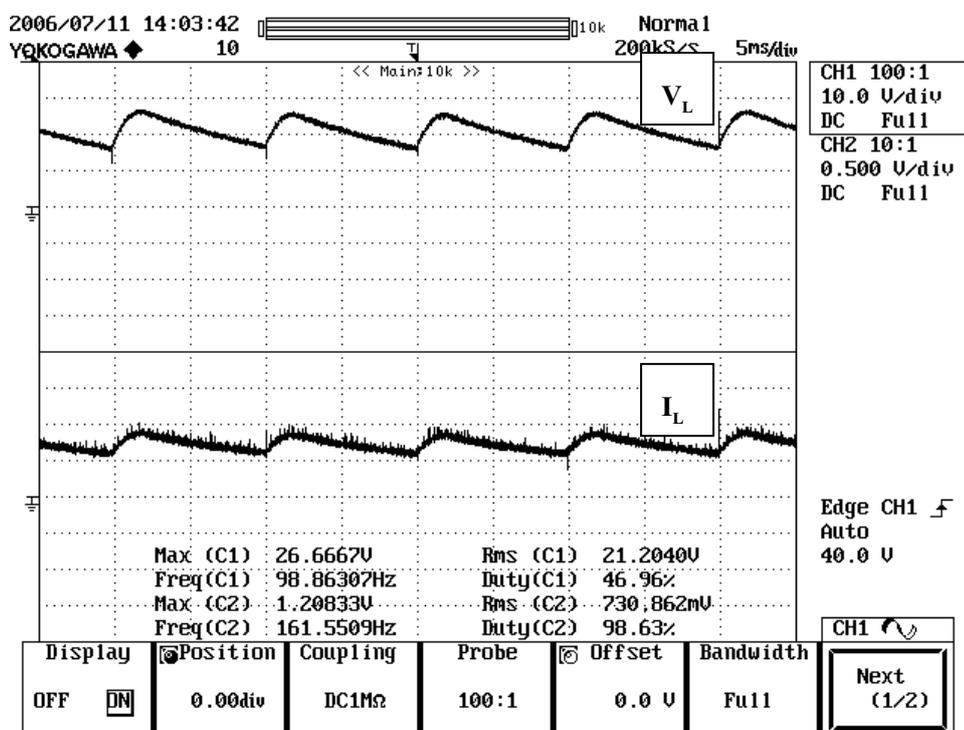
และแรงดันของวงจรเรียงกระแส V_{DC}

(สเกลของแรงดัน V_{AC} : 100 V/div, I_{AC} : 1 A/div, V_{DC} : 50 V/div)

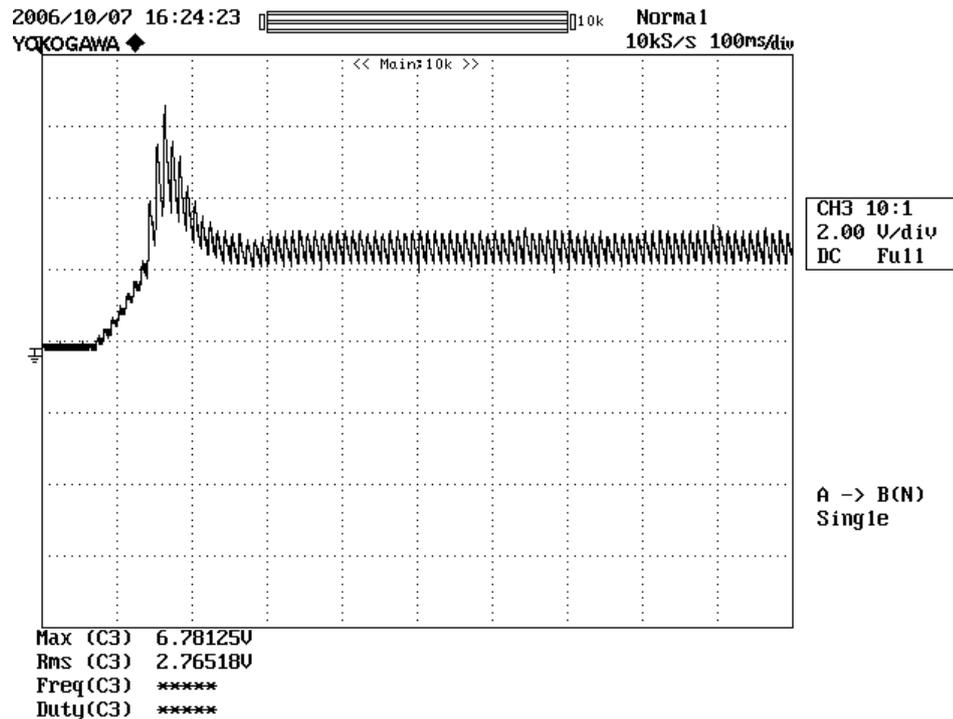
ในรูปที่ 5.6 เป็นรูปร่างของสัญญาณ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ V_{AC} และกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ I_{AC} และแรงดันของวงจรเรียงกระแส V_{DC} โดยขนาดของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันของวงจรเรียงกระแส V_{DC} ซึ่งขนาดของแรงดัน V_{DC} จะขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวนของ SCR (Q_1 และ Q_2) โดยขนาดของกระแส I_{AC} จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมจุดชนวนของ SCR อยู่ที่มุม 0 องศา และจะมีขนาดของกระแส I_{AC} ต่ำสุดเมื่อมุมจุดชนวนของ SCR อยู่ใกล้มุม 180 องศา สำหรับการทดสอบแหล่งจ่ายกระแสไฟตรงเพื่อดูความสามารถของระบบควบคุมกระแสที่ได้ออกแบบ โดยจะดูผลการตอบสนองต่อสเตปการเปลี่ยนคำสั่งของกระแส I_{dc} และเมื่อความต้านทานของโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมกระแสที่ได้ออกแบบไว้สามารถที่จะควบคุมให้กระแสดีซีลิงค์มีค่าคงที่ โดยในการทดลองจะใช้โหลดที่เป็นค่าความต้านทาน 80 โอห์ม โดยทำการควบคุมกระแสดีซีลิงค์ให้มีค่าคงที่ 0.7 A ทำการบันทึกค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่โหลด หลังจากนั้นทำการปรับลดค่าความต้านทานของโหลดลงเหลือ 20 โอห์ม ให้พิจารณาที่กระแสดีซีลิงค์ว่าคงที่อยู่ที่ 0.7 A หรือไม่ ถ้าคงที่แสดงว่าระบบควบคุมที่ได้ออกแบบตรงตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 5.7 กระแสไหลด (I_L) และแรงดันเอาต์พุทของวงจรเรียงกระแส(V_L) เมื่อโหลด มีค่า 80 โอห์ม (สเกลกระแส I_L :0.5A/div และสเกลแรงดัน V_L :100V/div, Time:5 mS/div)



รูปที่ 5.8 กระแสไหลด (I_L) และแรงดันเอาต์พุทของวงจรเรียงกระแส(V_L) เมื่อโหลด มีค่า 20 โอห์ม (สเกลกระแส I_L :0.5A/div และสเกลแรงดัน V_L :10V/div, Time:5 mS/div)

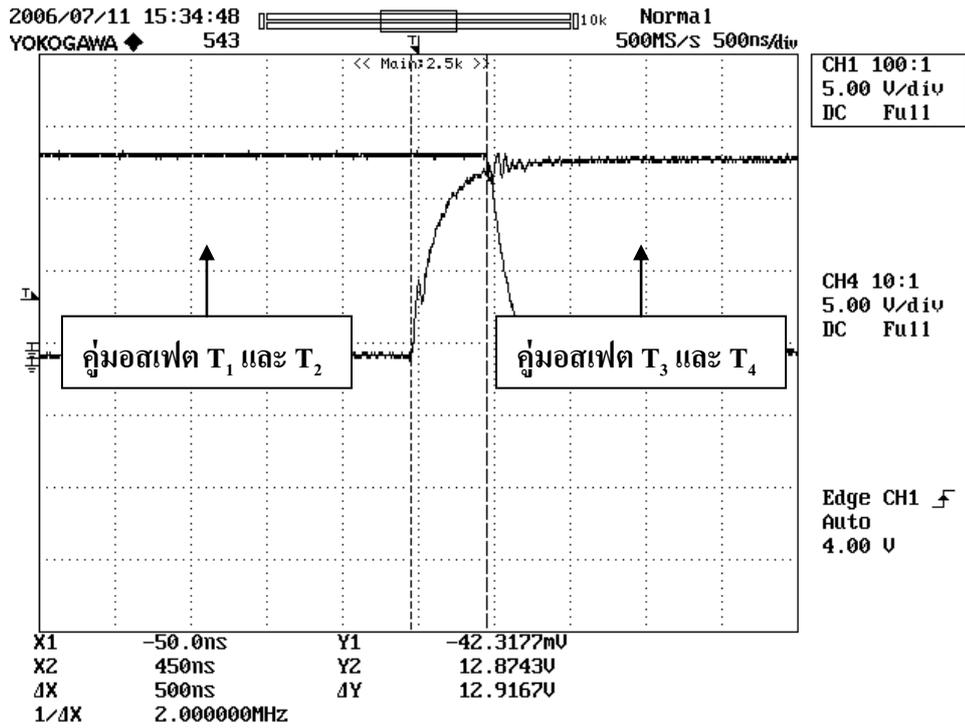


รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองต่อสแต็ปคำสั่งกระแส I_{dc}
(ทดสอบที่คำสั่ง กระแส I_{dc} จากค่า 0.1 A เปลี่ยนเป็น 3 A ,สเกลกระแส I_{dc} : 2 V/div)

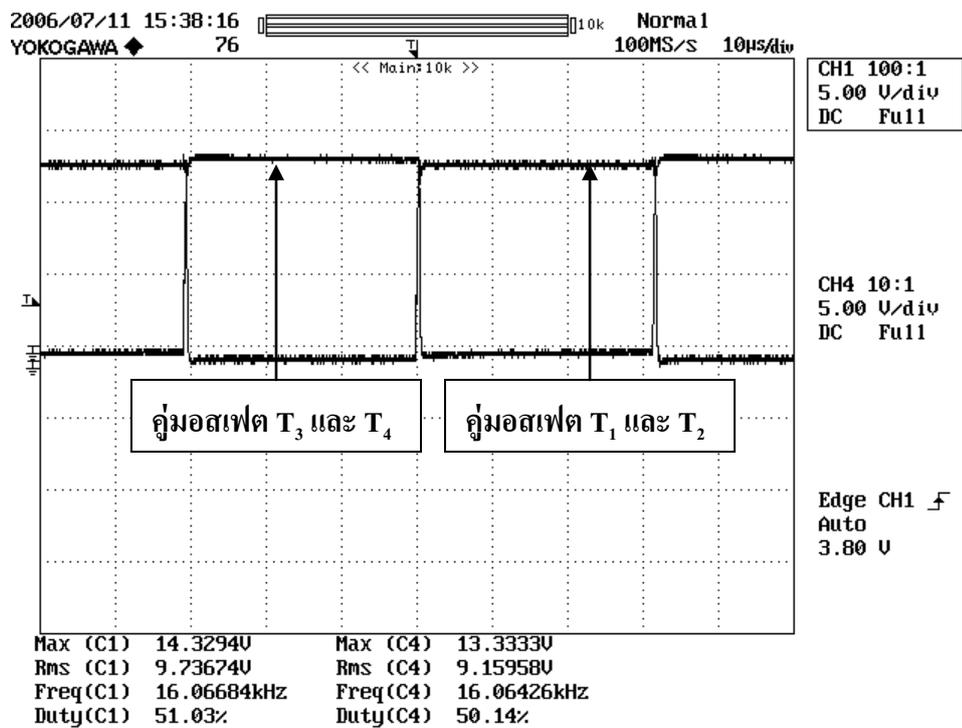
จากการทดสอบการควบคุมกระแสคงที่แบบลูปิด ที่ใช้โหลดเป็นความต้านทาน 80 โอห์ม โดยตั้งค่ากระแสไว้ที่ 0.7 A. จากนั้นทำการปรับค่าความต้านทานให้ลดลงเพื่อทดสอบดูว่ากระแสที่มีการควบคุมจะคงที่ดังแสดงในรูปที่ 5.7 กระแสที่โหลดกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสที่โหลดค่าเริ่มต้น และรูปที่ 5.8 กระแสที่โหลดกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเมื่อโหลดมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่ากระแสมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนแรงดันต่างกันคือโหลดที่มีความต้านทานสูงแรงดันจะมีค่าสูงกว่าโหลดที่มีค่าความต้านทานต่ำ ส่วนในรูปที่ 5.9 เป็นผลตอบสนองต่อสแต็ปคำสั่งกระแส I_{dc} ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบลูปิดที่ได้ออกแบบไว้มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนคำสั่งของกระแส I_{dc} และสามารถควบคุมกระแสดีซีลิงค์ให้มีค่าคงที่อย่างต่อเนื่อง

5.2 การทดสอบสัญญาณขั้วเกทของมอสเฟตในวงจรอินเวอร์เตอร์

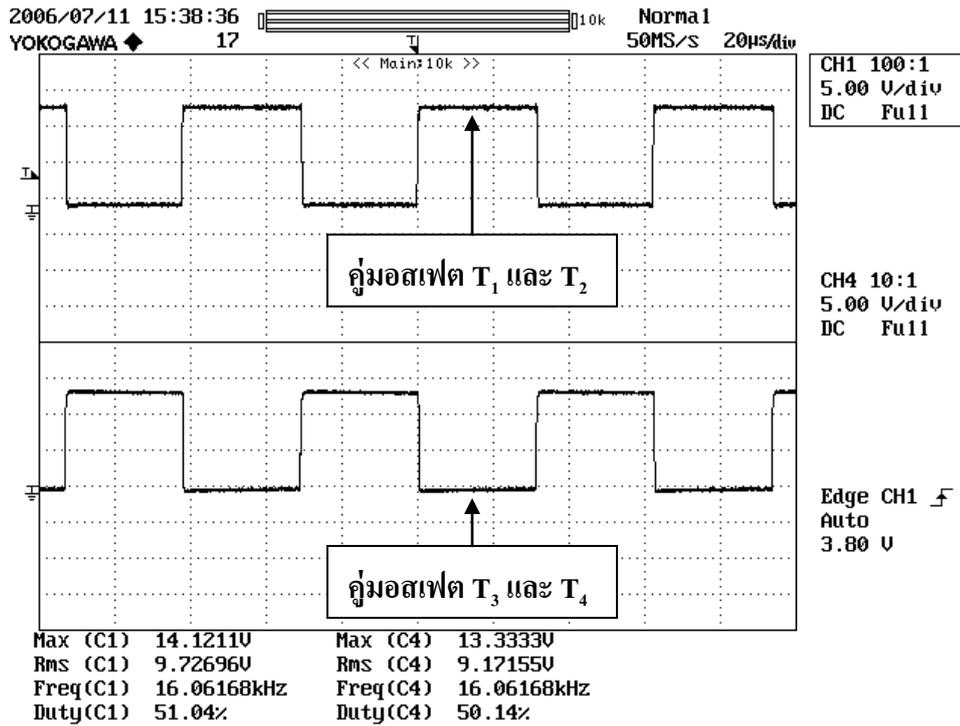
สัญญาณขั้วเกทของมอสเฟตทั้งสองชุดจะต้องมีการเหลื่อมกันอยู่เล็กน้อย โดยในที่นี้กำหนดให้มีค่าประมาณ 450ns. ซึ่งเหมาะสมกับค่า turn-on delay time และ turn-off delay time ของ Mosfet ลักษณะสัญญาณขั้วของมอสเฟตทั้งสองคู่ที่ได้จากการวัดสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.10 รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 โดยในช่วงสัญญาณ ON มีขนาดประมาณ 15 โวลต์ และช่วงสัญญาณ OFF ประมาณ 0 โวลต์



รูปที่ 5.10 สัญญาณสำหรับขั้วมอสเฟตทั้ง 2 คู่ มีสัญญาณเหลือมกัน 450 nS
(กลุ่มอสเฟต T₁ และ T₂ มีสัญญาณเหลือมกลุ่มอสเฟต T₃ และ T₄ อยู่ 450 nS)



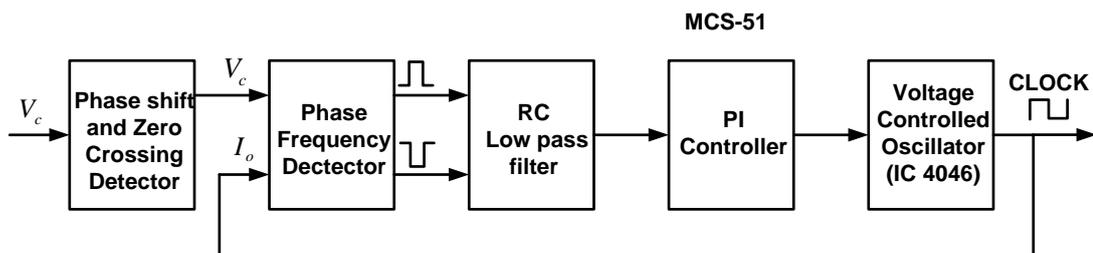
รูปที่ 5.11 สัญญาณสำหรับขั้วมอสเฟตทั้ง 2 คู่ มีสัญญาณเหลือมกัน 450 nS
(กลุ่มอสเฟต T₁ และ T₂ มีสัญญาณเหลือมกลุ่มอสเฟต T₃ และ T₄ อยู่ 450 nS)



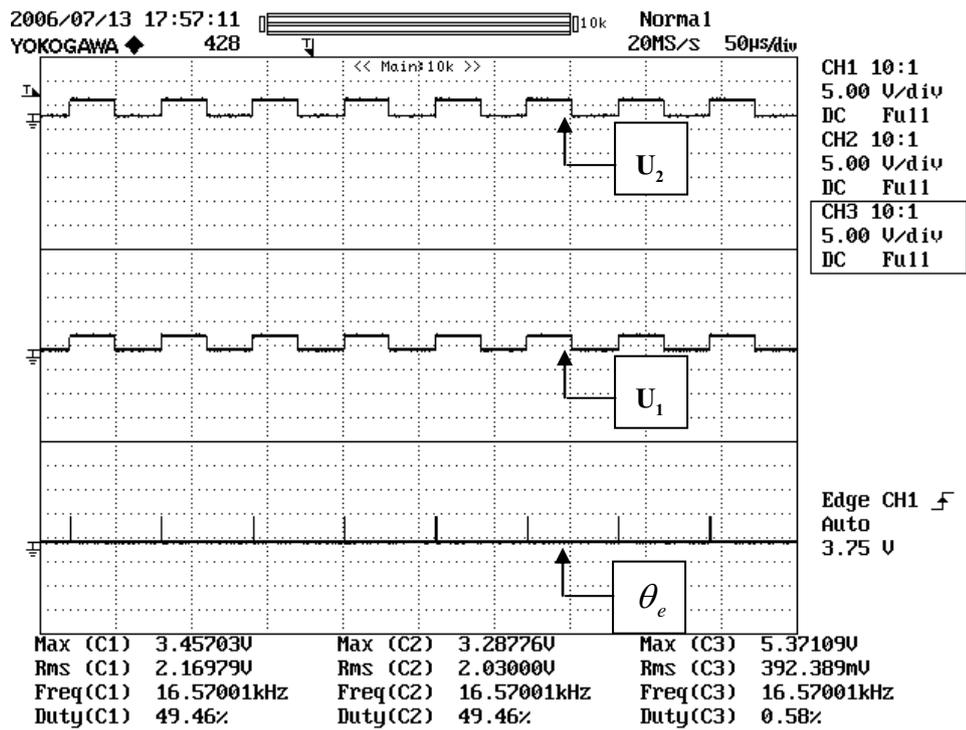
รูปที่ 5.12 สัญญาณสำหรับขั้วมอสเฟตทั้ง 2 คู่ มีสัญญาณเหลือมกัน 450 nS (คู่มอสเฟต T₁ และ T₂ มีสัญญาณเหลือมคู่มอสเฟต T₃ และ T₄ อยู่ 450 nS)

5.3 การทดสอบระบบเฟสล็อกกลุ๊ป

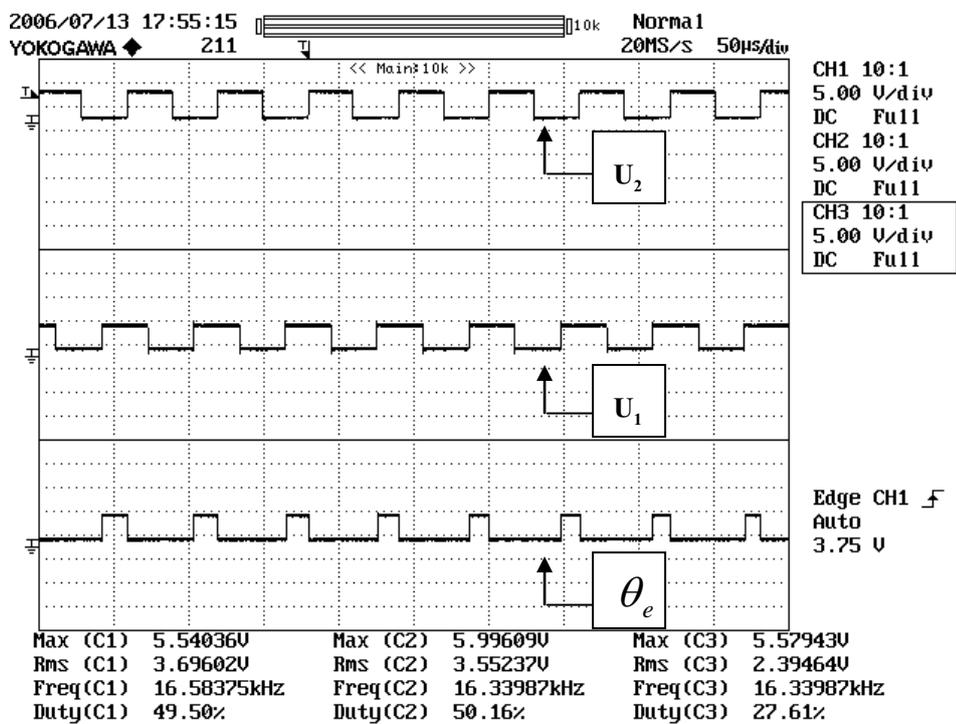
การทดสอบตัวตรวจจับเฟสแบบแบบเฟส-ความถี่ ของระบบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ ที่ความถี่ประมาณ 16 kHz ทดลอง 3 สถานะคือ ในสถานะที่สัญญาณ SIGNAL INPUT (V_c) มีเฟสตรงกันกับสัญญาณ VCO OUTPUT (I_o) สถานะที่สัญญาณ SIGNAL INPUT มีเฟสนำหน้าสัญญาณ VCO OUTPUT และสถานะที่สัญญาณ SIGNAL INPUT มีเฟสล่าหลังสัญญาณ VCO OUTPUT (โดยสัญญาณ SIGNAL INPUT คือสัญญาณ U1 และสัญญาณ VCO OUTPUT คือสัญญาณ U2)



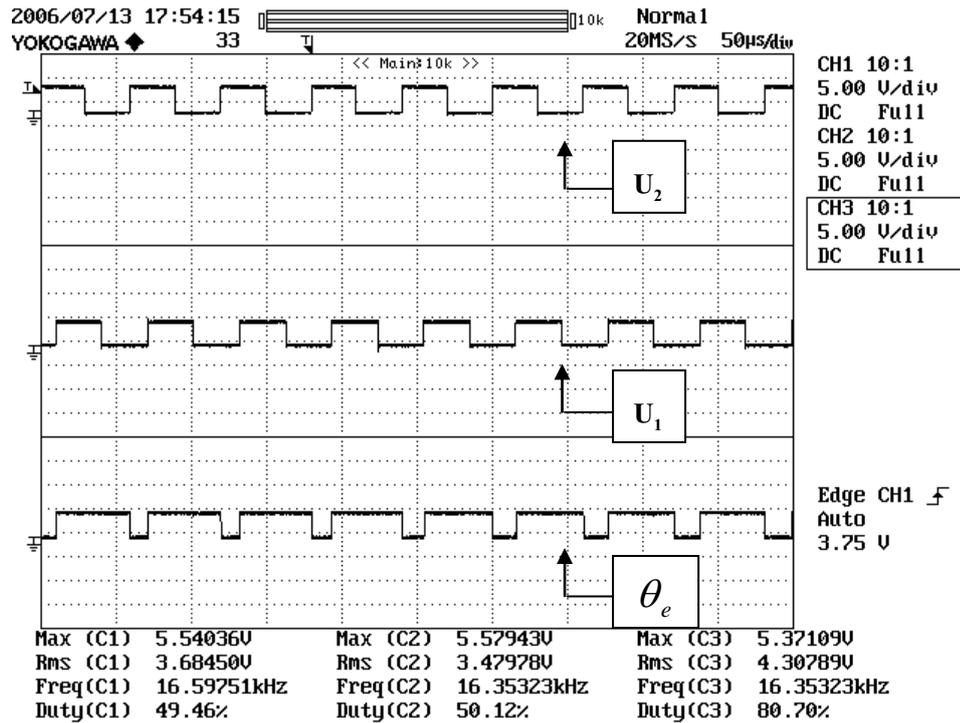
รูปที่ 5.13 ระบบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ



รูปที่ 5.14) แสดงผลการทดลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 มีเฟสตรงกับ สัญญาณ U2
ความคลาดเคลื่อนของเฟส (θ_e)เป็นศูนย์

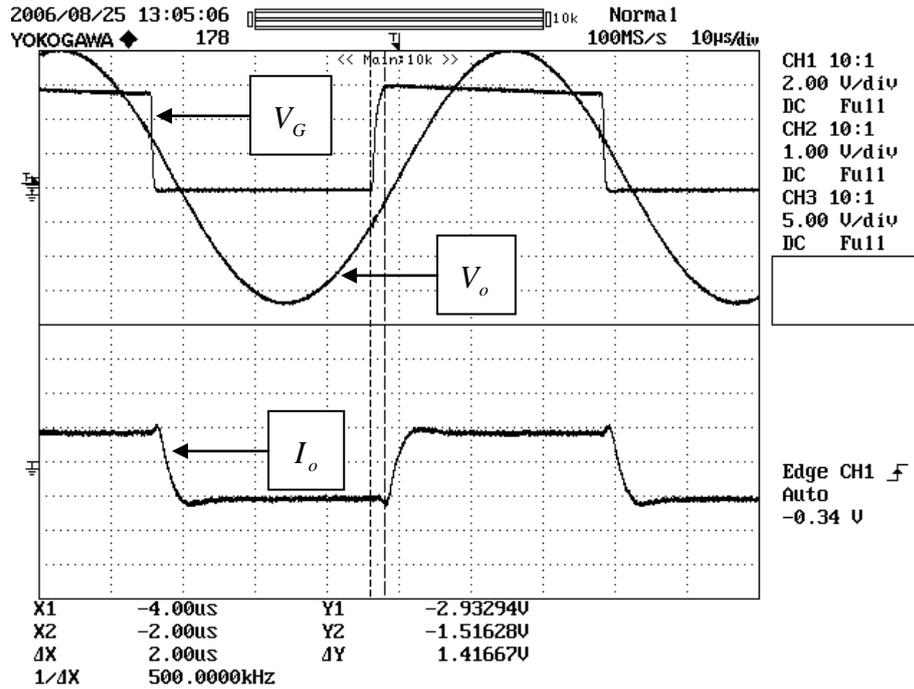


รูปที่ 5.15) แสดงผลการทดลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 มีเฟสหน้า สัญญาณ U2
ความคลาดเคลื่อนของเฟส (θ_e)เป็นบวก

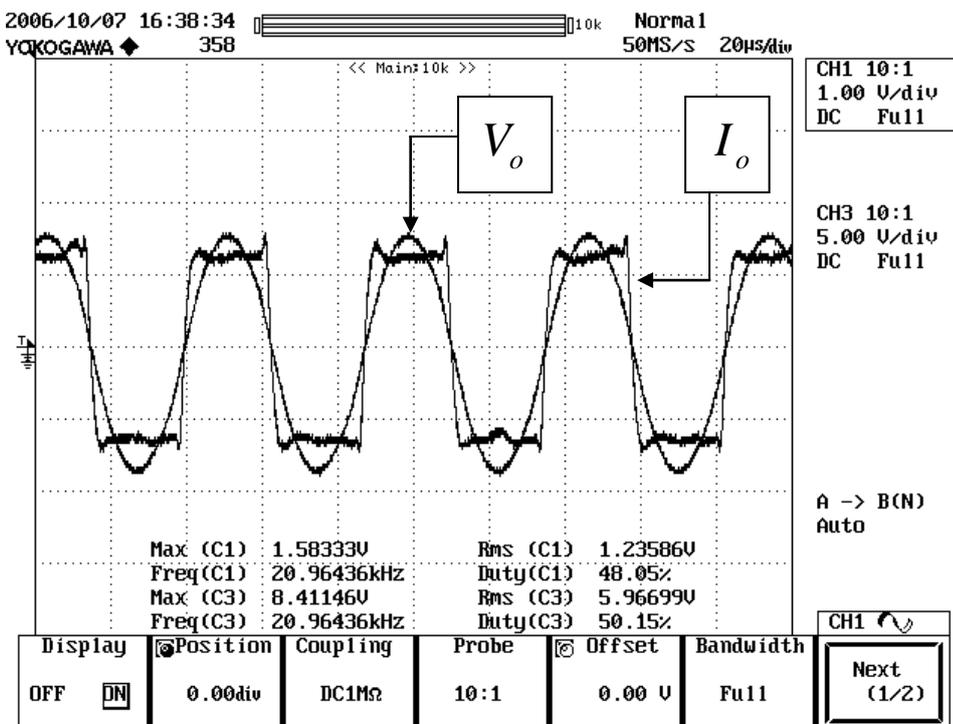


รูปที่ 5.16) แสดงผลการทดลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U_1 มีเฟสล่าหลัง สัญญาณ U_2
ความคลาดเคลื่อนของเฟส (θ_e) เป็นลบ

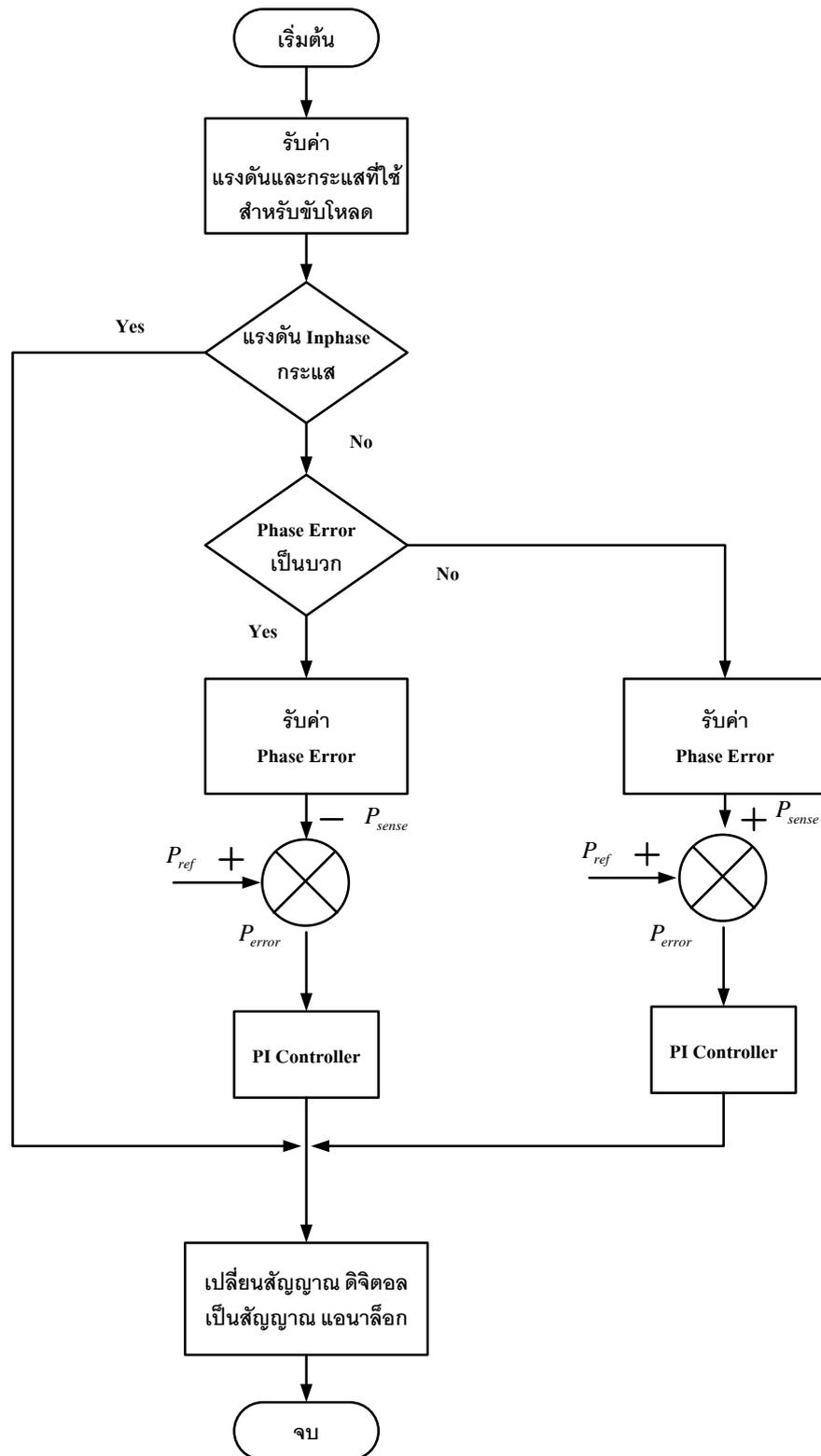
ผลการทดลองคุณสมบัติของตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5.14) เมื่อสัญญาณ U_1 มีเฟสตรงกับสัญญาณ U_2 และรูปที่ 5.15) เมื่อสัญญาณ U_1 นำหน้าสัญญาณ U_2 ส่วนในรูปที่ 5.16) เมื่อสัญญาณ U_1 ล่าหลังสัญญาณ U_2 สำหรับการทำงานของระบบควบคุมความถี่ของการสวิตช์ที่สถานะเรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13) จะทำการตรวจจับเฟสของแรงดันและกระแสที่ใช้สำหรับขับโหลด โดยแรงดันนั้นจะใช้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c) ส่วนกระแสจะใช้สัญญาณสำหรับขับเกทของมอสเฟต โดยเมื่อวัดสัญญาณสำหรับขับเกทเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ใช้ขับโหลดพบว่ามิเฟสหนาน้อยอยู่ $2 \mu s$ ดังแสดงในรูปที่ 5.17) และเมื่อทำการเลื่อนเฟสของแรงดันไปข้างหน้า $2 \mu s$ เมื่อวัดสัญญาณกระแสและแรงดันสำหรับขับโหลดจะอยู่ในสถานะมีเฟสตรงกันดังแสดงในรูปที่ 5.18) จากนั้นส่งผ่านไปยังวงจร Zero Crossing Detector เพื่อทำการเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยสัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลดที่เป็นระบบสัญญาณดิจิทัล จะถูกตรวจจับเฟสโดยวงจรตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ทำให้ได้ Phase Error ส่งไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จากนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทำการประมวลผลค่าความคลาดเคลื่อนของเฟสตามสถานะของ Phase Error ดังแสดงในรูปที่ 5.19) จากนั้นทำการเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนาล็อก ซึ่งสัญญาณแอนาล็อกที่ได้จะเป็นแรงดันที่ใช้ควบคุมวงจรถ่ายความถี่โดยใช้ไอซี CD4046 เพื่อใช้สำหรับเป็นสัญญาณนาฬิกาสำหรับขับเกทของมอสเฟตของวงจรรีเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.17 แสดงสัญญาณสำหรับขั้วเกตมอสเฟส (V_G) นำหน้าสัญญาณกระแสสำหรับขั้วโหลด (I_o) เป็นเวลา $2 \mu S$

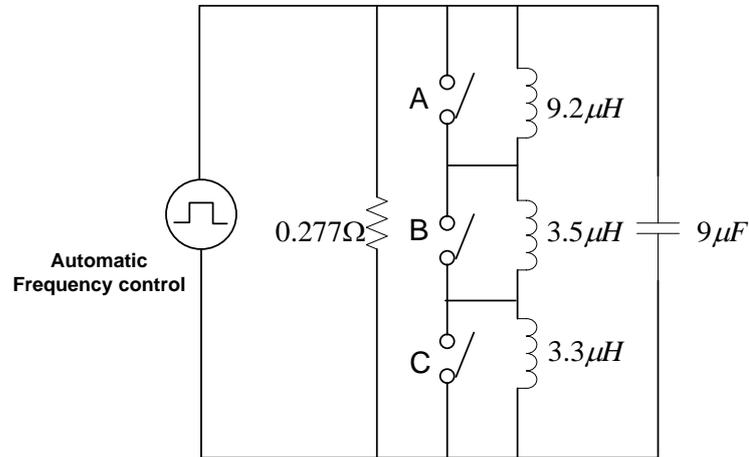


รูปที่ 5.18 สัญญาณกระแส (I_o) และแรงดัน (V_o) สำหรับขั้วโหลดอยู่ในสภาวะมีเฟสตรงกันเมื่อทำการเลื่อนเฟสแรงดัน (V_o) ไปข้างหน้า $2 \mu S$ (สเกลแรงดัน V_o : 5 V/div, กระแส I_o : 1 A/div)



รูปที่ 5.19) แผนผังการตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนของเฟส โดยใช้ MCS-51

จากนั้นทำการทดลองระบบควบคุมความถี่ของการสวิตช์ที่สภาวะเรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ เมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.20) วงจรที่ใช้ในการทดลองระบบควบคุมความถี่แบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 5.20) ค่าความเหนี่ยวนำรวมมีค่า $16.2\mu H$ ตัวเก็บประจุ $9\mu F$ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์มีค่า

$$fr_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{16 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{-6}}} = 13.26 \text{ kHz}$$

เมื่อทำการปิดสวิตช์ A จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่า $6.8\mu H$ ตัวเก็บประจุ $9\mu F$ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์มีค่า

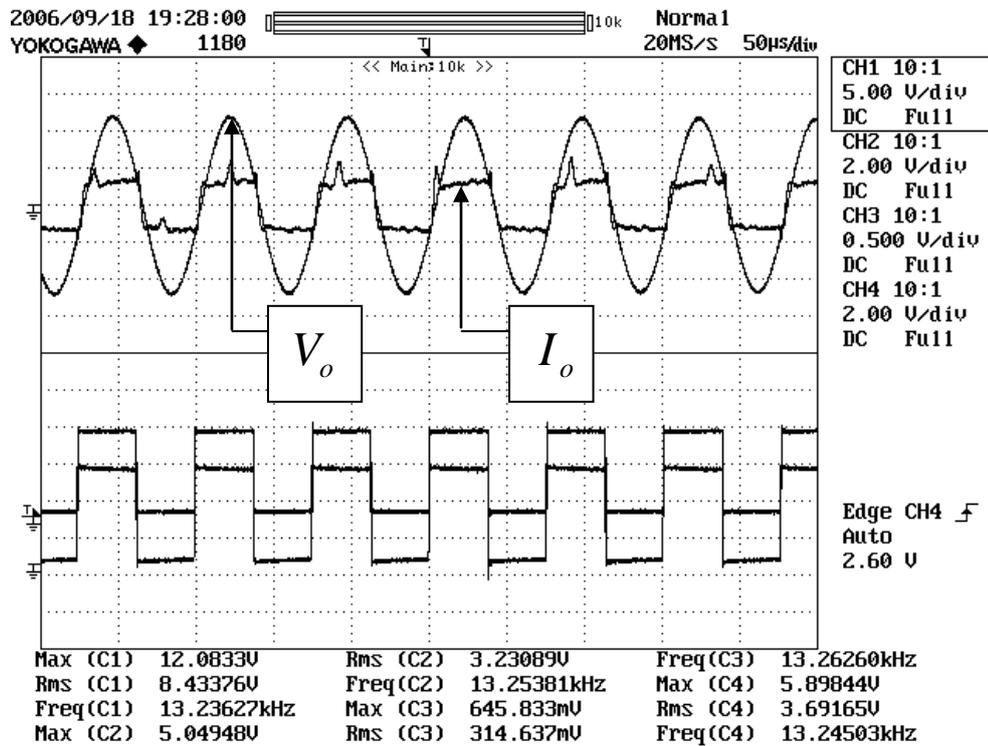
$$fr_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6.8 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{-6}}} = 20.34 \text{ kHz}$$

เมื่อทำการปิดสวิตช์ A และ B จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่า $3.3\mu H$ ตัวเก็บประจุ $9\mu F$ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์มีค่า

$$fr_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.3 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{-6}}} = 29.2 \text{ kHz}$$

ทำการทดลองอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสที่มีระบบควบคุมความถี่ในการสวิตช์ที่สภาวะเร

โซ่แรงดันแบบอัตโนมัติ โดยทำการทดลองในสถานะที่ 1 คือเมื่อสวิตช์ A, B และ C เปิดทำให้ความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในสถานะความถี่ f_{r1} ทำการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5.21)

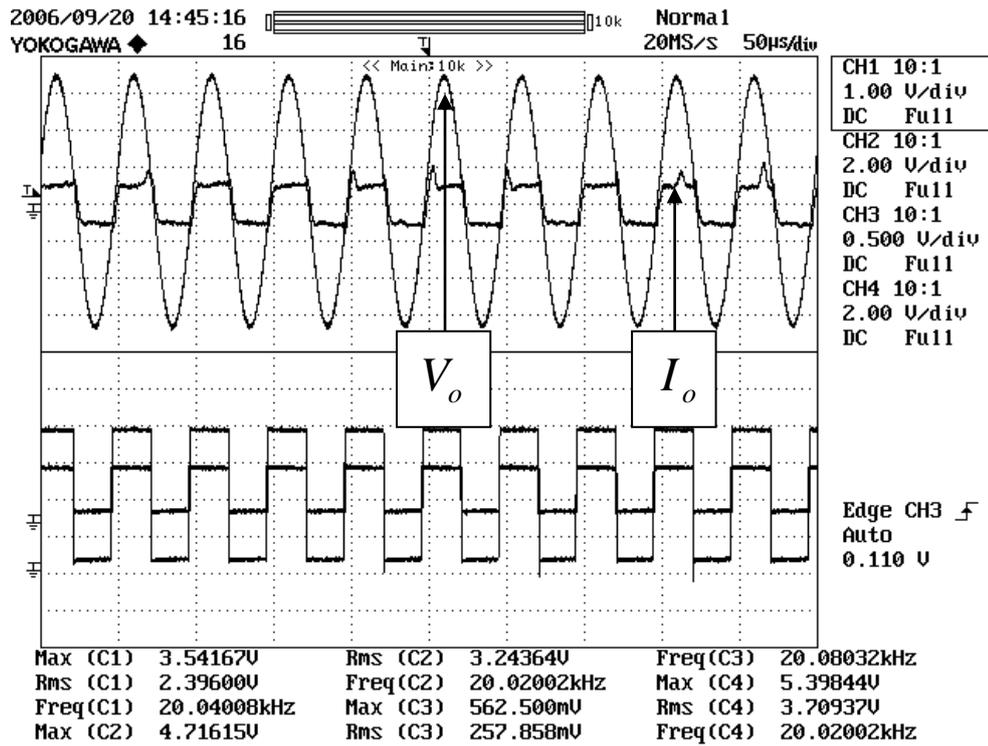


รูปที่ 5.21) สัญญาณกระแส (I_o) และแรงดัน (V_o) ที่ใช้สำหรับขับโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับเฟส เมื่ออยู่ในสถานะความถี่เรโซแนนซ์ค่า 13.24kHz (Time:50 μ S)

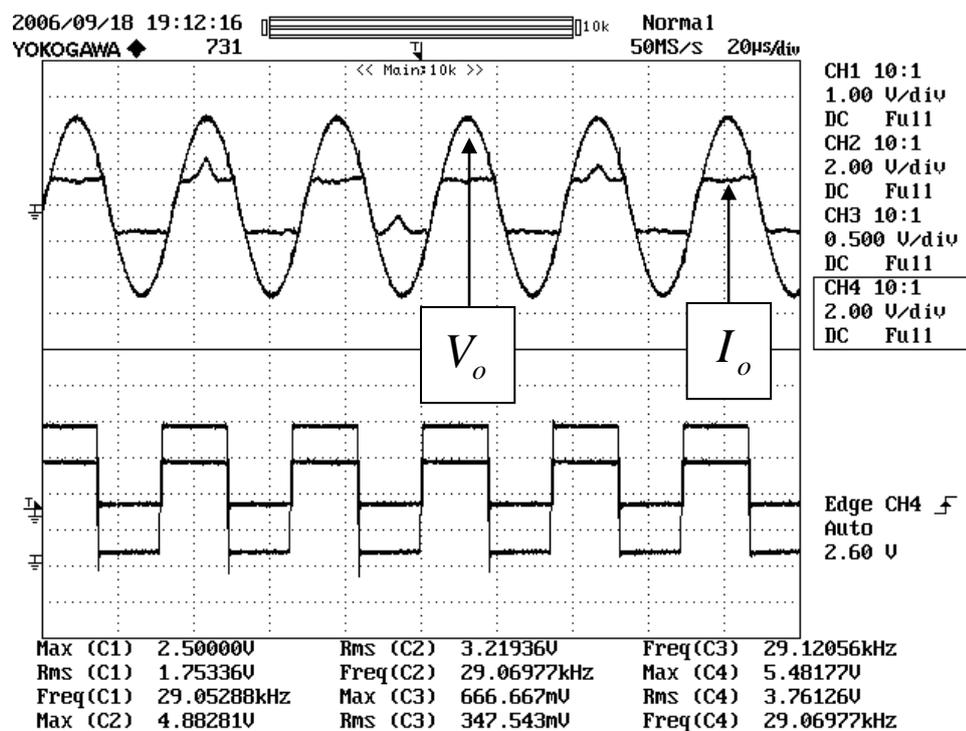
ทำการทดลองในสถานะที่ 2 เมื่อสวิตช์ A ปิดทำให้ความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในสถานะความถี่ f_{r2} ทำการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5.22) และทำการทดลองในสถานะที่ 3 เมื่อสวิตช์ A และ B ปิดทำให้ความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในสถานะความถี่ f_{r3} ทำการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5.23) และบันทึกค่าความถี่เรโซแนนซ์ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าความถี่เรโซแนนซ์จากการคำนวณและจากการทดลอง

ค่าความเหนี่ยวนำ	ค่าตัวเก็บประจุ	ความถี่เรโซแนนซ์	
		ค่าที่ได้จากการคำนวณ	ค่าที่ได้จากการทดลอง
16 μ H	9 μ F	13.26kHz	13.24kHz
6.8 μ H	9 μ F	20.34kHz	20kHz
3.3 μ H	9 μ F	29.2kHz	29kHz

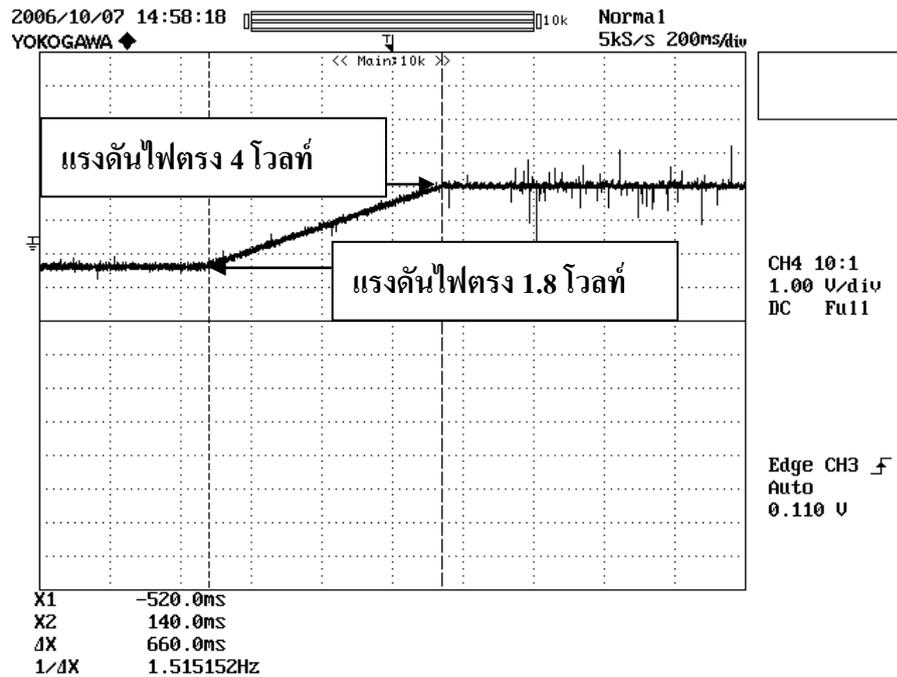


รูปที่ 5.22) สัญญาณกระแส (I_o) และแรงดัน (V_o) ที่ใช้สำหรับขับโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการตรวจเฟสเมื่ออยู่ในสถานะความถี่เรโซแนนซ์ค่า 20 kHz (Time:50 μ S)



รูปที่ 5.23) สัญญาณกระแส (I_o) และแรงดัน (V_o) ที่ใช้สำหรับขับโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับเฟสเมื่ออยู่ในสถานะความถี่เรโซแนนซ์ค่า 29 kHz (Time:50 μ S)

จากรูปที่ 5.20) ทำการทดสอบหาผลตอบสนองต่อส tep ความถี่อินพุท โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ จาก f_{r1} ซึ่งมีค่าความถี่อยู่ที่ 13.26 kHz เป็นค่าความถี่ f_{r3} ซึ่งมีค่าความถี่อยู่ที่ 29.2 kHz โดยทำการวัดผลตอบสนองทางด้านอินพุทของวงจรรำเนิคความถี่ (VCO ของไอซี CD4046) ผลการวัดสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.24)



รูปที่ 5.24) ผลตอบสนองต่อส tep ความถี่อินพุทของตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ เมื่อมีการควบคุมแบบลูปปิด (สเกลแรงดันไฟกระแสตรง : 1 V/div)

เมื่อใช้ตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ โดยที่

$$K_d = \frac{V_{cc}}{4\pi} = \frac{5}{4\pi} = 0.4 \text{ V/rad}$$

$$K_o = \frac{2 \times \pi \times (29.2 \times 10^3 - 13.26 \times 10^3)}{5(4 - 1.8)} = 6.2 \times 10^3 \text{ rad/s/V}$$

$$\tau_1 = 0.001 \text{ s}$$

$$\tau_2 = 0.0015 \text{ s}$$

จากตารางที่ 3.1 ใช้วงจรรองลูปชนิดพาสซีฟเล็กฟิลเตอร์ จะทำได้

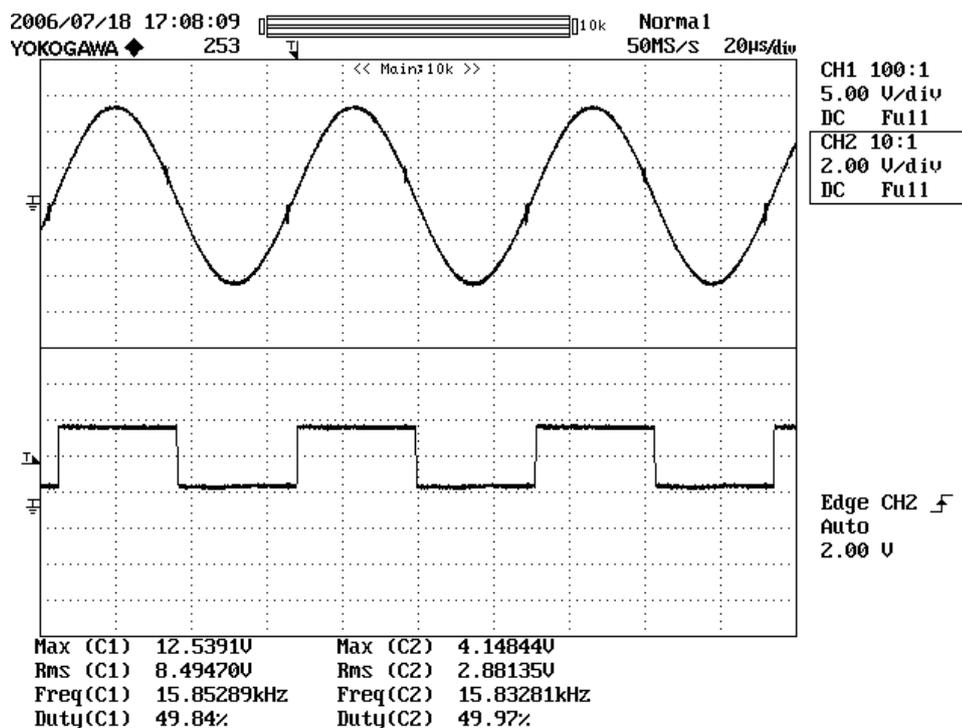
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_o K_d}{N(\tau_1 + \tau_2)}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{6.2 \times 10^3 \times 0.4}{(0.001 + 0.0015)}} = 996$$

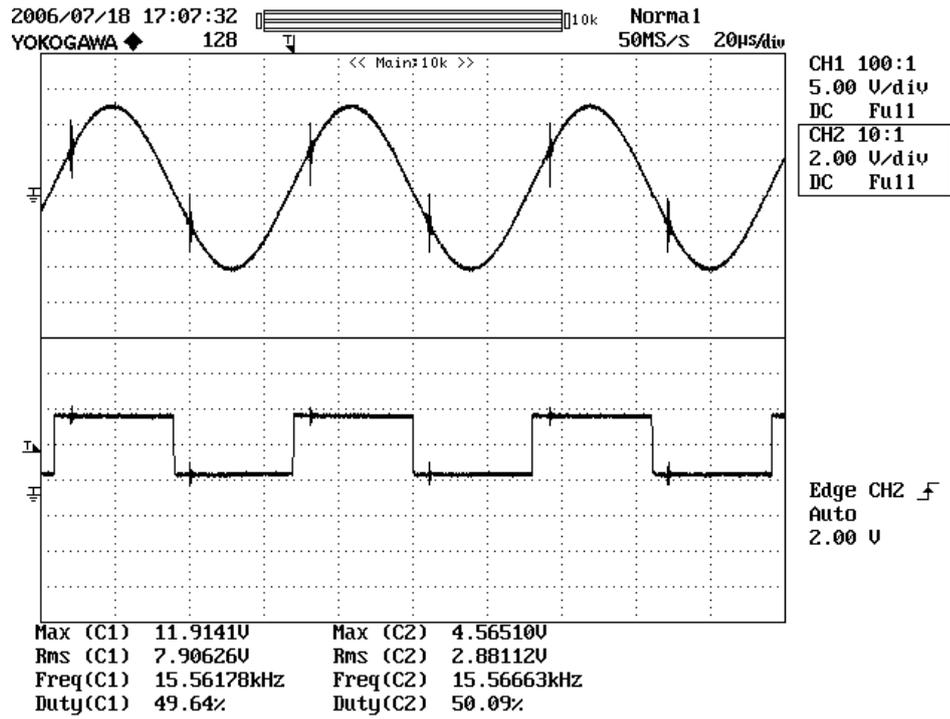
$$\zeta = \frac{\omega_n \tau_2}{2} = \frac{996 \times 0.0015}{2} = 0.75$$

5.4 การทดสอบวงจรวัดแรงดันที่โหลด

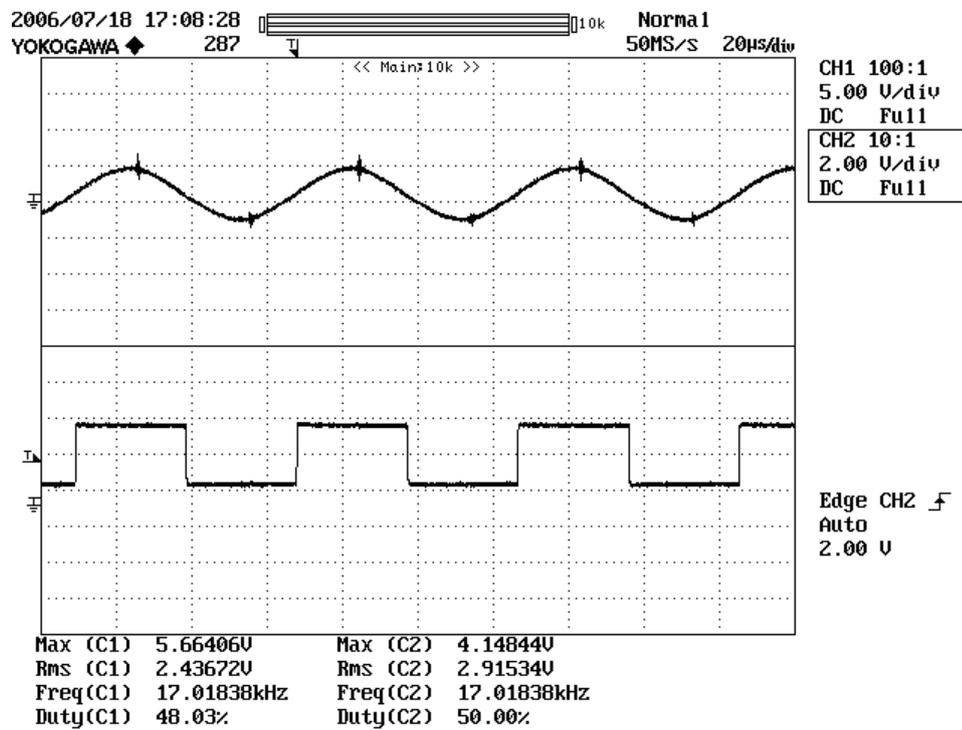
การวัดแรงดันที่โหลดนั้นจะต้องใช้ตัววัดที่ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และให้เฟสของสัญญาณที่วัดได้กับเฟสแรงดันจริงมีค่าความแตกต่างกันน้อยที่สุด เนื่องจากแรงดันดังกล่าวมีความถี่สูง โดยทำการลดระดับแรงดันที่โหลดโดยใช้ความต้านทานแบ่งแรงดัน จากนั้นวัดแรงดันที่ความต้านทานโดยใช้ Differential Amplifier สัญญาณที่วัดได้นำไปผ่านวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ (Zero Crossing) โดยมีการแยกโคตทางแสงก่อนที่จะส่งต่อไปยังระบบควบคุมเฟสล็อกกลุ๊ป และได้ทำการทดสอบการวัดแรงดันที่โหลดในสถานะต่างๆดังนี้ในรูปที่ 5.25) เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสตรงกับกระแสที่ใช้ในการขับโหลด และในรูปที่ 5.26) ทำการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสนำหน้ากระแสที่ใช้ในการขับโหลด ส่วนในรูปที่ 5.27) ทำการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสล่าหลังกระแสที่ใช้ในการขับโหลด



รูปที่ 5.25) ผลตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสตรงกับกระแสที่ใช้ในการขับโหลด



รูปที่ 5.26) ผลตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสหน้า
กระแสที่ใช้ในการขับโหลด

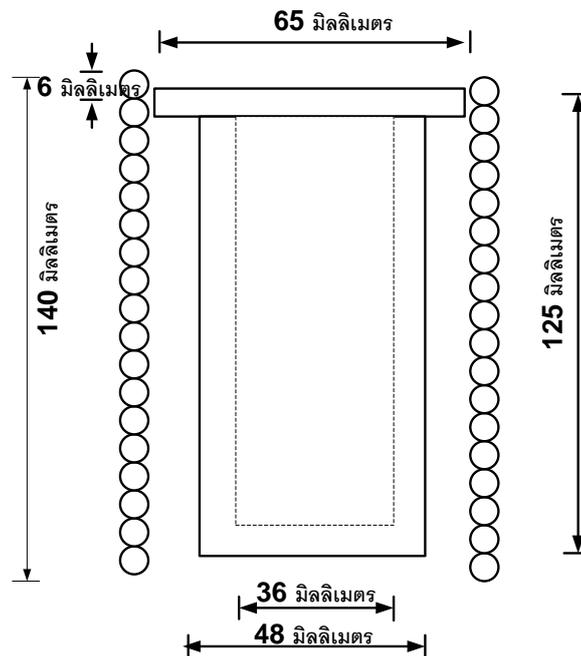


รูปที่ 5.27) ผลตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสล้าหลัง
กระแสที่ใช้ในการขับโหลด

จากการทดลองโดยการจำลองสภาวะการทำงานเมื่อค่าความเหนียวมีค่าที่ต่างกันความถี่เรโซแนนซ์ก็จะต่างกัน ซึ่งระบบควบคุมที่ได้นำเสนอได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมความถี่ของการสวิตช์ที่สภาวะเรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ

5.5 การทดสอบระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ

ในการออกแบบขดลวดสำหรับเหนี่ยวนำความร้อน เลือกใช้ท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก $\frac{1}{4}$ นิ้ว หนา 1.5 มิลลิเมตร สำหรับพันรอบเข้าหาลอมที่ทำมาจากแกรไฟต์ ซึ่งมีขนาดความสูง 125 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 48 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร สามารถพันได้ทั้งหมด 18 รอบ โดยท่อทองแดงมีจำนวนกั้นในแต่ละรอบ ดังแสดงในรูป 5.28) จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ขดลวดเหนี่ยวนำมีวงจรสมมูลประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน (R_s) และค่ารีแอคแตนซ์ (X_s) โดยค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบมีอยู่ 2 ชุด คือค่าพารามิเตอร์ในขณะที่ไม่ใส่ชิ้นงาน (ที่อุณหภูมิห้อง) และในขณะที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.28 มิติของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและเข้าหาลอม

ขดลวดเหนี่ยวนำขณะไม่ใส่ชิ้นงาน

f	=	21	kHz	ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์
N_c	=	18	รอบ	จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ
l_c	=	140	มิลลิเมตร	ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ

k_r	=	1.1	Coil Correction Factor
μ_o	=	$4\pi \times 10^{-7}$	Permeability ของอากาศ
μ_w	=	2	Relative Permeability ของชั้นงาน
μ_c	=	1	Relative Permeability ของขดลวดเหนี่ยวนำ
d_w	=	10 มิลลิเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นงาน
d_c	=	5 มิลลิเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ
ρ_w	=	$16 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นงานที่อุณหภูมิ 20 °C
ρ_c	=	$2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	ค่าความต้านทานจำเพาะของทองแดง

ขั้นตอนการคำนวณ

ความถี่เชิงมุม $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 21 \times 10^3$
 $\omega = 131.94 \times 10^3$ rad/sec

ความลึกผิวของชั้นงาน $\delta_w = \sqrt{\frac{2\rho_w}{\mu_o \mu_w \omega}}$ เมตร

แทนค่าที่จะทำให้ได้ $\delta_w = 0.694$ มิลลิเมตร

ความลึกผิวที่ขดลวดเหนี่ยวนำ $\delta_c = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu_o \mu_c \omega}}$ เมตร

แทนค่าที่จะทำให้ได้ $\delta_c = 0.347$ มิลลิเมตร

จากค่าความลึกที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะได้อัตราส่วน

$$\frac{d_w}{\delta_w} = 14.40$$

เมื่อค่า $\frac{d_w}{\delta_w} > 0.8$ [2] สามารถหาค่า p และ q ได้ดังนี้

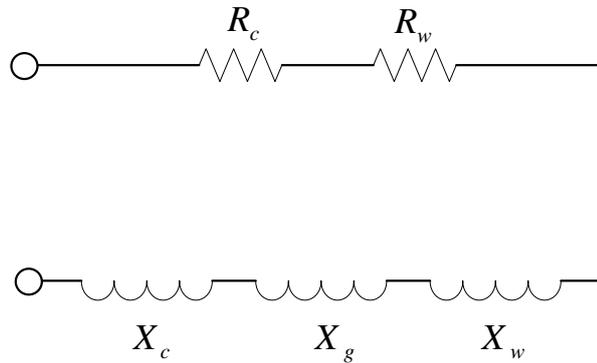
$$p = \frac{2}{\left(1.23 + \frac{d_w}{\delta_w}\right)}$$

$$q = \frac{2}{\frac{d_w}{\delta_w}}$$

แทนค่า $\frac{d_w}{\delta_w}$ จะทำให้ได้ค่า

$$p = 0.13$$

$$q = 0.14$$



รูปที่ 5.29 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\text{เมื่อ } K = \frac{\omega \mu_o N_c^2}{l_c}$$

$$R_w = K(\mu_r p A_w) = 0.05 \quad \text{โอห์ม}$$

$$R_c = K\left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2}\right) = 0.046 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_g = K(A_g) = 0.006 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_w = K(\mu_r q A_w) = 0.002 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_c = K\left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2}\right) = 0.046 \quad \text{โอห์ม}$$

จากรูปที่ 5.29) ทำให้ได้ค่าความต้านทานรวม $R_s = 0.072$ โอห์ม และค่ารีแอกแตนซ์รวม

$$X_s = 0.054 \quad \text{โอห์ม}$$

ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\text{จาก } \theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s} = 36.86^\circ$$

ดังนั้น

$$PF. = \cos \theta = 0.8$$

$$\text{ประสิทธิภาพขดลวดเหนี่ยวนำ } \eta = \frac{R_w}{R_s} \times 100 = 80 \%$$

ขดลวดเหนี่ยวนำขณะขึ้นงานมีอุณหภูมิ 500 °C

ขึ้นงานเป็นตะกั่วมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.015 กิโลกรัม

f	=	21	kHz	ความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์
N_c	=	18	รอบ	จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ
l_c	=	140	มิลลิเมตร	ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ
k_r	=	1.5		Coil Correction Factor
μ_o	=	$4\pi \times 10^{-7}$		Permeability ของอากาศ
μ_w	=	1		Relative Permeability ของขึ้นงาน
μ_c	=	1		Relative Permeability ของขดลวดเหนี่ยวนำ
d_w	=	10	มิลลิเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางของขึ้นงาน
d_c	=	5	มิลลิเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ
ρ_w	=	120×10^{-8}	$\Omega \cdot m$	ความต้านทานจำเพาะของขึ้นงาน ที่อุณหภูมิ 500 °C
ρ_c	=	4×10^{-8}	$\Omega \cdot m$	ความต้านทานจำเพาะของทองแดง

ขั้นตอนการคำนวณ

ความถี่เชิงมุม $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 21 \times 10^3$
 $\omega = 131.94 \times 10^3$ rad/sec

ความลึกผิวของขึ้นงาน $\delta_w = \sqrt{\frac{2\rho_w}{\mu_o \mu_w \omega}}$ เมตร

แทนค่าที่จะทำได้ $\delta_w = 3.89$ มิลลิเมตร

ความลึกผิวที่ขดลวดเหนี่ยวนำ $\delta_c = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu_o \mu_c \omega}}$ เมตร

แทนค่าที่จะทำได้ $\delta_c = 0.71$ มิลลิเมตร

จากค่าความลึกที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะได้อัตราส่วน

$$\frac{d_w}{\delta_w} = 2.57$$

เมื่อค่า $\frac{d_w}{\delta_w} > 0.8$ [2] สามารถหาค่า p และ q ได้ดังนี้

$$p = \frac{2}{\left(1.23 + \frac{d_w}{\delta_w}\right)}$$

$$q = \frac{2}{\frac{d_w}{\delta_w}}$$

แทนค่า $\frac{d_w}{\delta_w}$ จะทำให้ได้ค่า

$$p = 0.39$$

$$q = 0.78$$

เมื่อ $K = \frac{\omega \mu_o N_c^2}{l_c}$

$$R_w = K(\mu_r p A_w) = 0.3 \quad \text{โอห์ม}$$

$$R_c = K\left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2}\right) = 0.02 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_g = K(A_g) = 0.4 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_w = K(\mu_r q A_w) = 0.01 \quad \text{โอห์ม}$$

$$X_c = K\left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2}\right) = 0.02 \quad \text{โอห์ม}$$

จะทำให้ได้ค่าความต้านทานรวม $R_s = 0.32$ โอห์ม และค่ารีแอกแตนซ์รวม $X_s = 0.43$ โอห์ม

ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ

จาก $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s} = 53.3^\circ$

ดังนั้น $PF. = \cos \theta = 0.6$

ประสิทธิภาพขดลวดเหนี่ยวนำ $\eta = \frac{R_w}{R_s} \times 100 = 60 \%$

เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาด $6\mu F$ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{9.2 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}}$$

$$= 21 \text{ kHz}$$

เมื่อไม่ได้ใส่ชิ้นงานจะทำให้ค่า

$$\text{Quality Factor} = \frac{\omega L}{R}$$

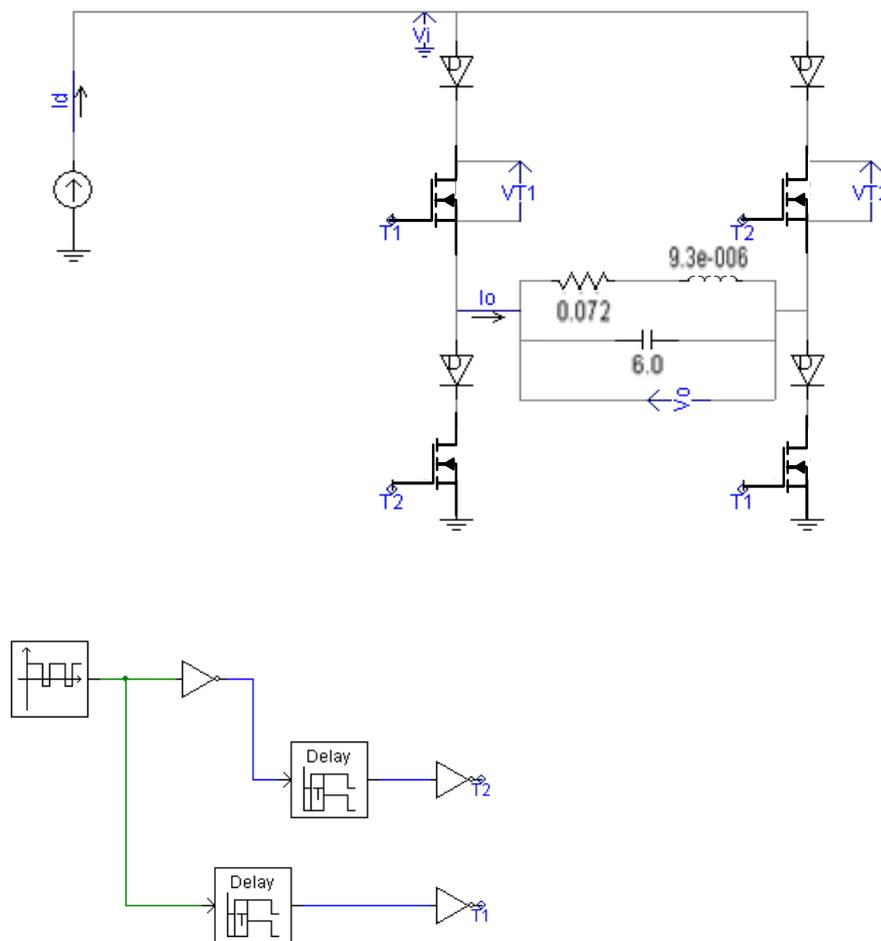
$$= \frac{2 \times \pi \times 21 \times 10^3 \times 9.2 \times 10^{-6}}{0.072}$$

$$= 16$$

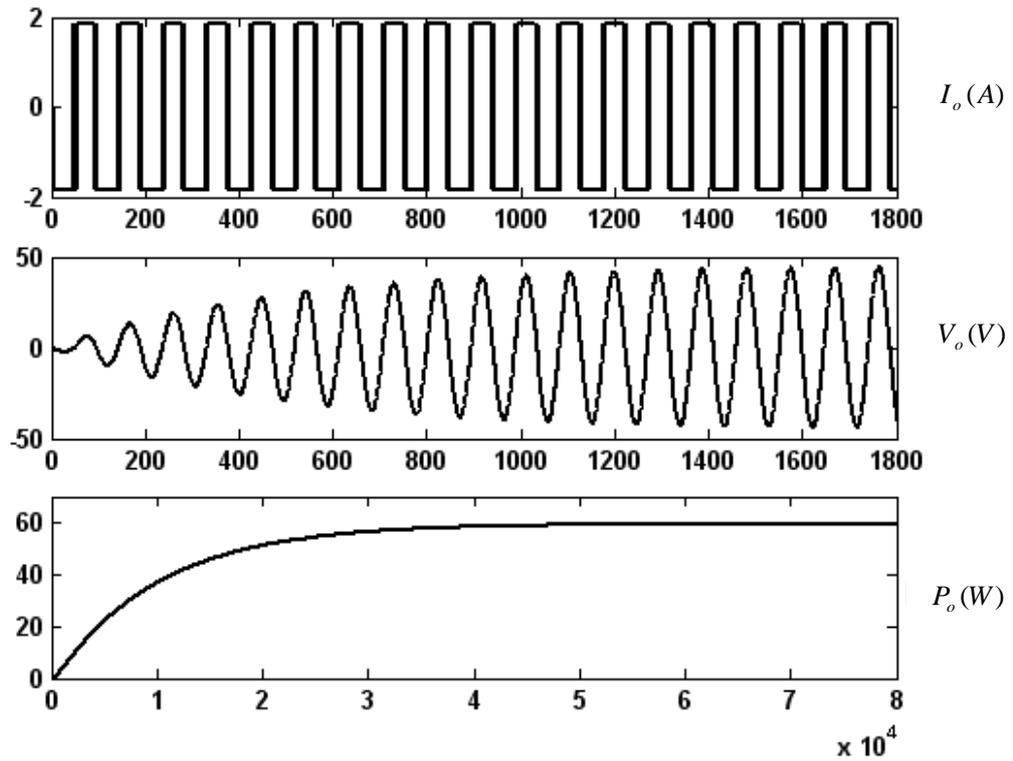
และเมื่อใส่ชิ้นงานจะทำให้ค่า (R มีค่า 0.32 โอห์ม)

$$\text{Quality Factor} = 4$$

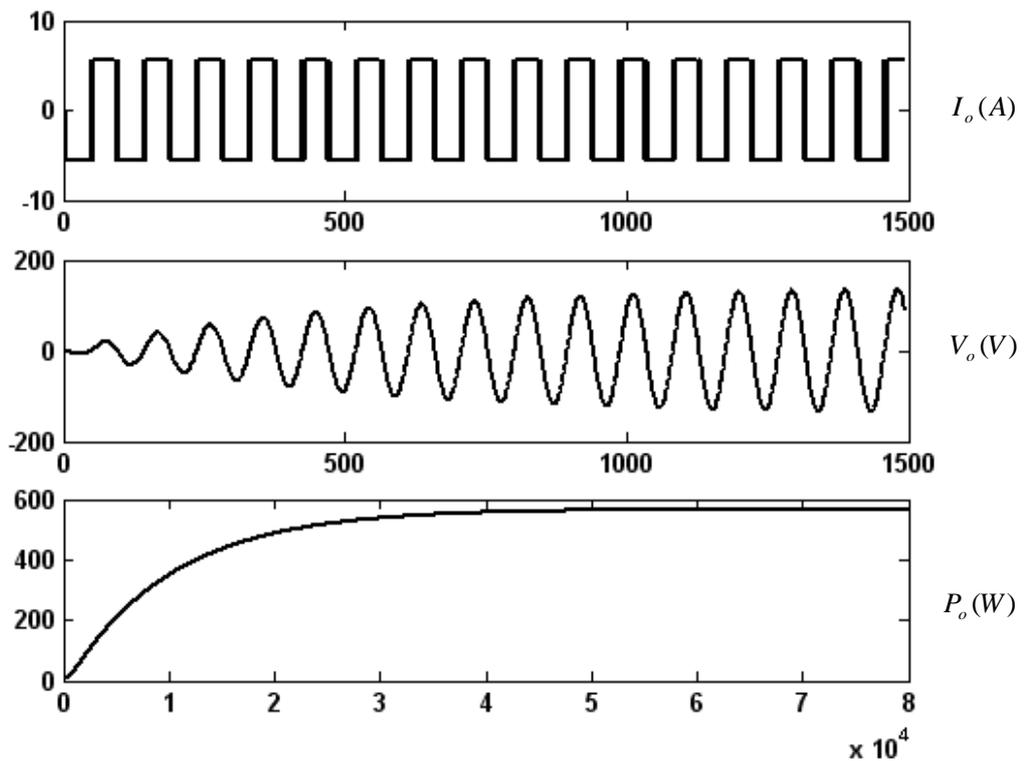
การจำลองการทำงานบนโปรแกรม PSCAD ขณะไม่ได้ใส่ชิ้นงาน



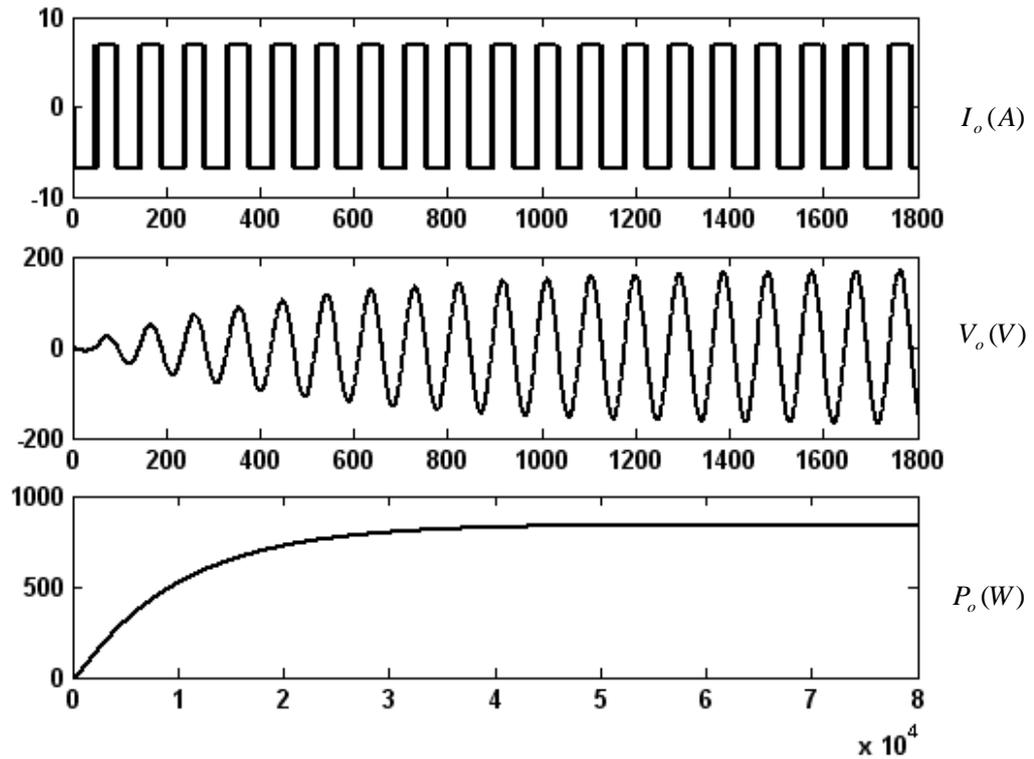
รูปที่ 5.30) ไลอะแกรมจำลองการทำงานขณะไม่ได้ใส่ชิ้นงาน บนโปรแกรม PSCAD



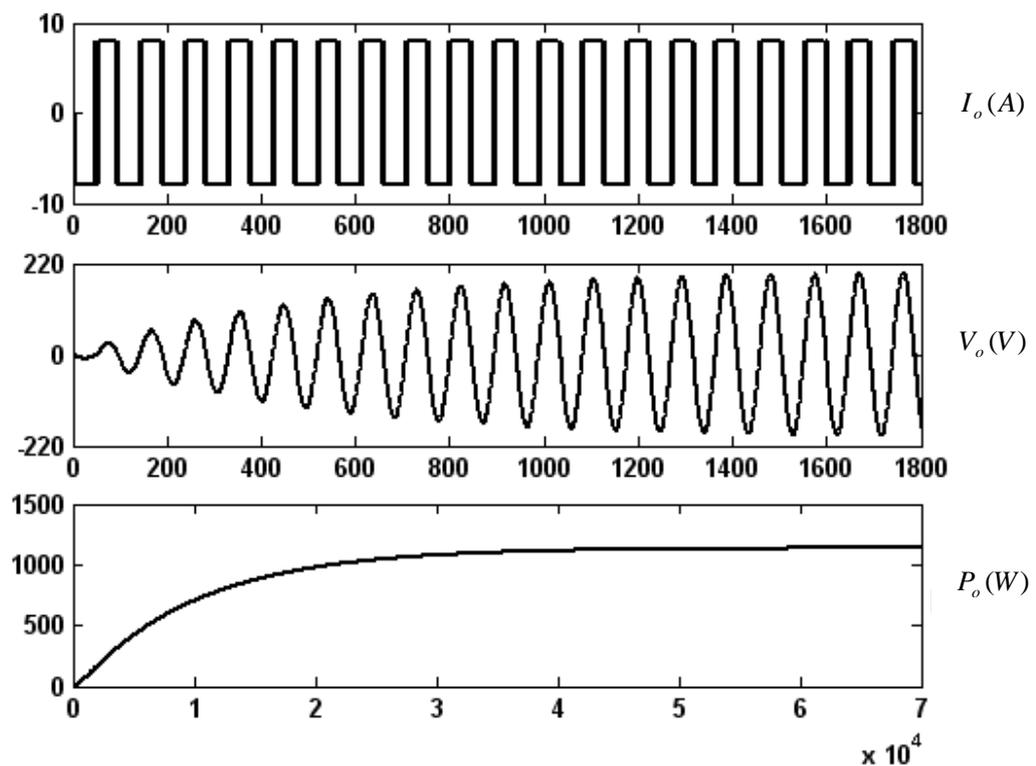
รูปที่ 5.31) รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดั่งชีถึงค้ที่ 1.8 A.



รูปที่ 5.32) รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดั่งชีถึงค้ที่ 5.5 A.



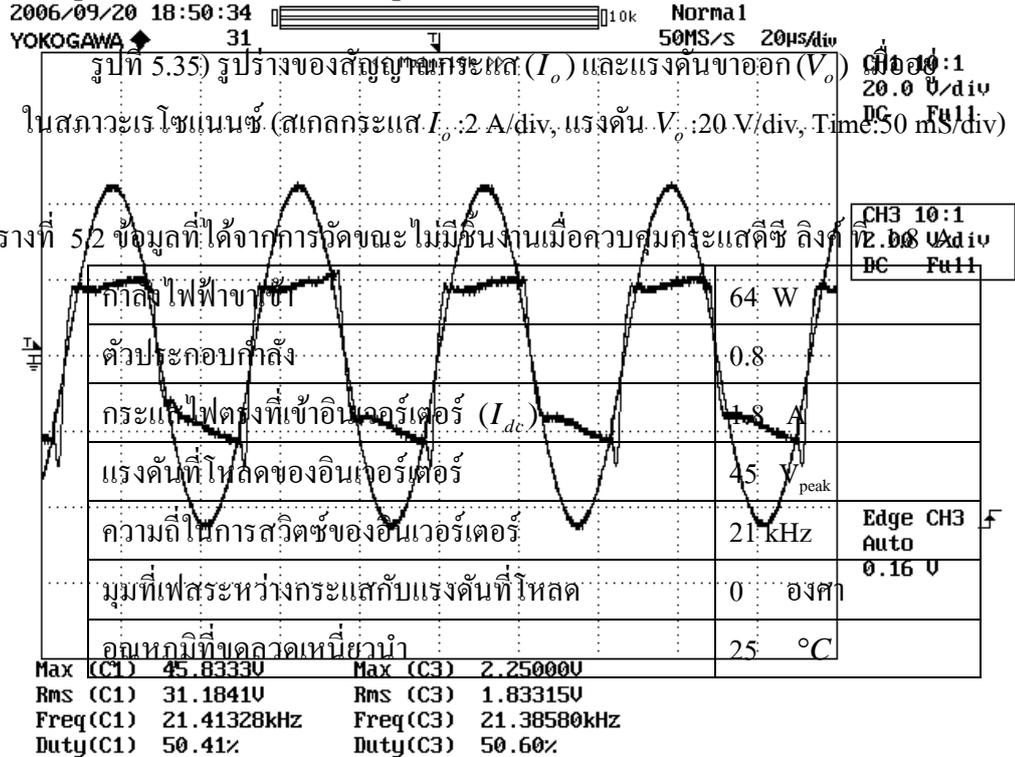
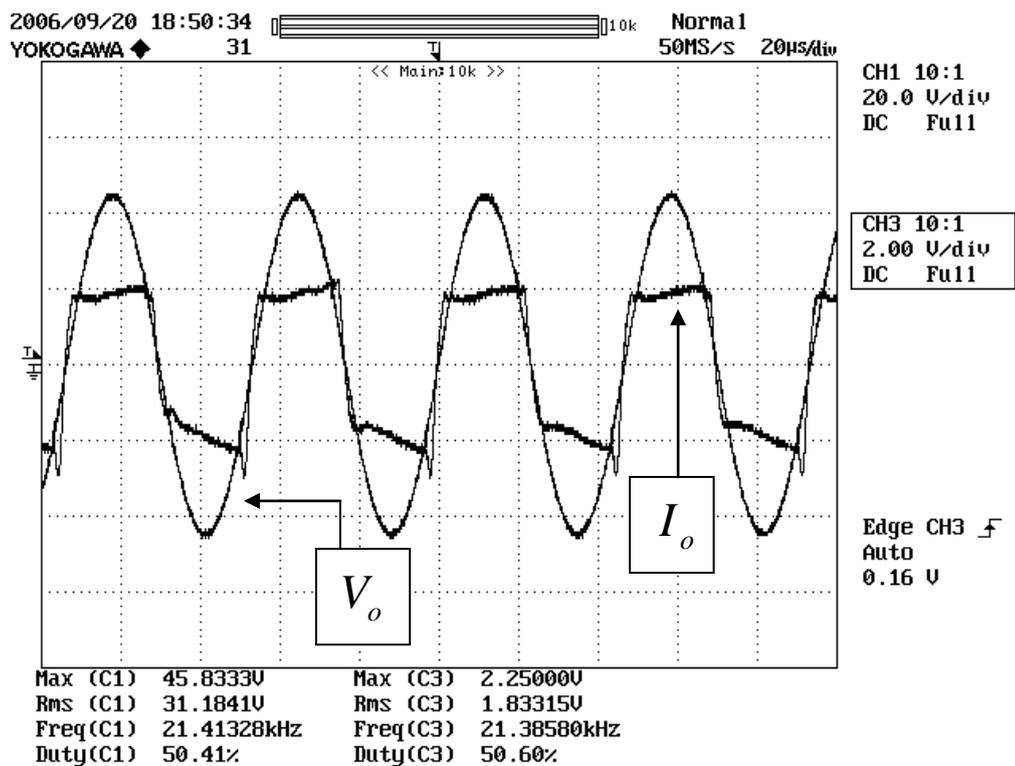
รูปที่ 5.33) รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดั่งมีลิ่งค์ที่ 6.8 A.



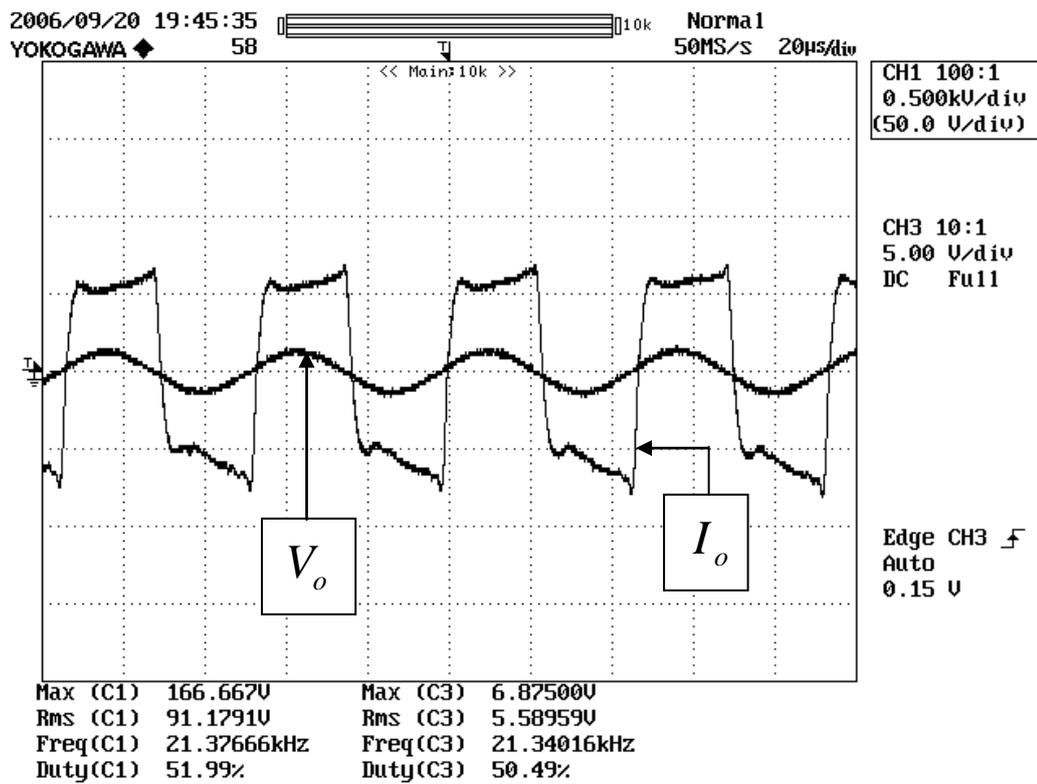
รูปที่ 5.34) รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดั่งมีลิ่งค์ที่ 7.9 A.

ทำการทดลองระบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยไม่มีระบบควบคุมความถี่ โดยทำการปรับค่ากระแสไฟตรงที่เข้าอินเวอร์เตอร์เริ่มที่ 1.8 A ให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและทำการบันทึกค่าที่ 1.8 A, 5.5 A, 6.8 A และ 7.9 A โดยมีความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ 21 kHz ทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าโดยใช้ตัวประกอบกำลัง มีค่าเท่ากับ 0.8 (ค่าที่ได้จากการคำนวณ) และทำการบันทึกค่าลงในตารางที่ 5.2 – 5.5 (เมื่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นทุกๆ 5 °C จากอุณหภูมิห้อง) เมื่ออุณหภูมิห้องอยู่ที่ 25 °C

ทำการทดสอบเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 1.8 A.



ผลการทดสอบเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 5.5 A.



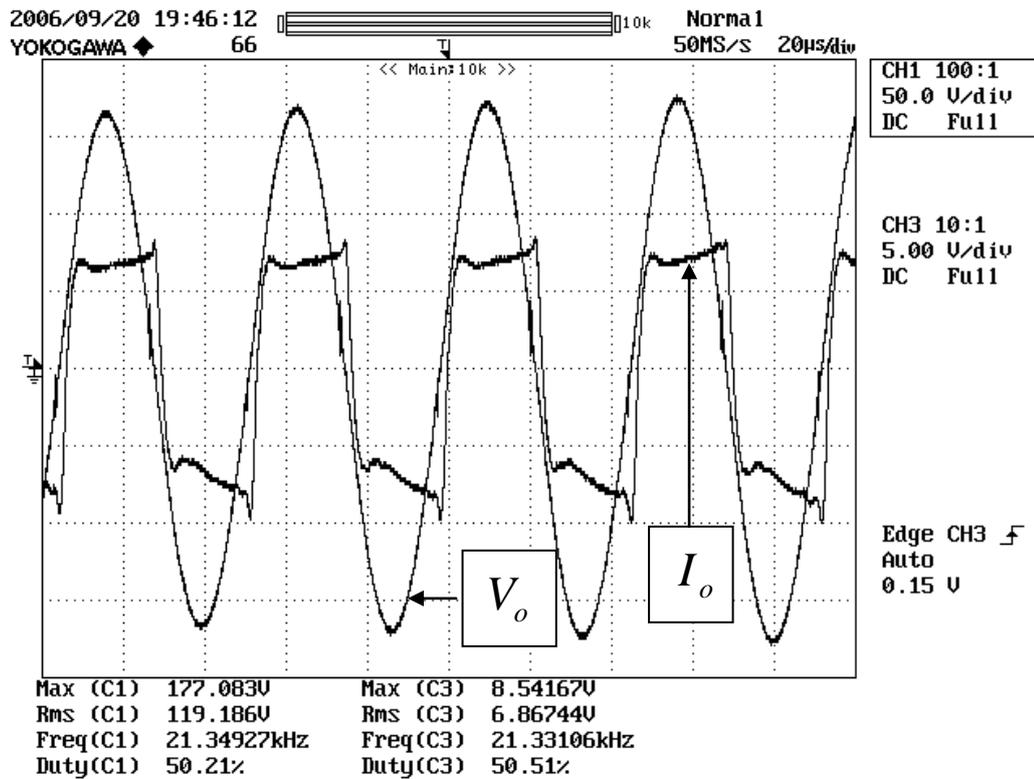
รูปที่ 5.36) รูปร่างของสัญญาณกระแส (I_o) ถัดหลังแรงดันขาออก (V_o) เป็นมุม 10 องศา
เมื่อเกิดอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ 30 °C

(สเกลกระแส I_o :5 A/div, แรงดัน V_o :500 V/div, Time:50 μ S/div)

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 5.5 A.

กำลังไฟฟ้าขาเข้า	726 W
ตัวประกอบกำลัง	0.8
กระแสไฟตรงที่เข้าอินเวอร์เตอร์ (I_{dc})	5.58 A
แรงดันที่โหลดของอินเวอร์เตอร์	166 V _{peak}
ความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	21 kHz
มุมที่เฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่โหลด	10 องศา
อุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ	30 °C

ผลการทดสอบเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 6.8 A.



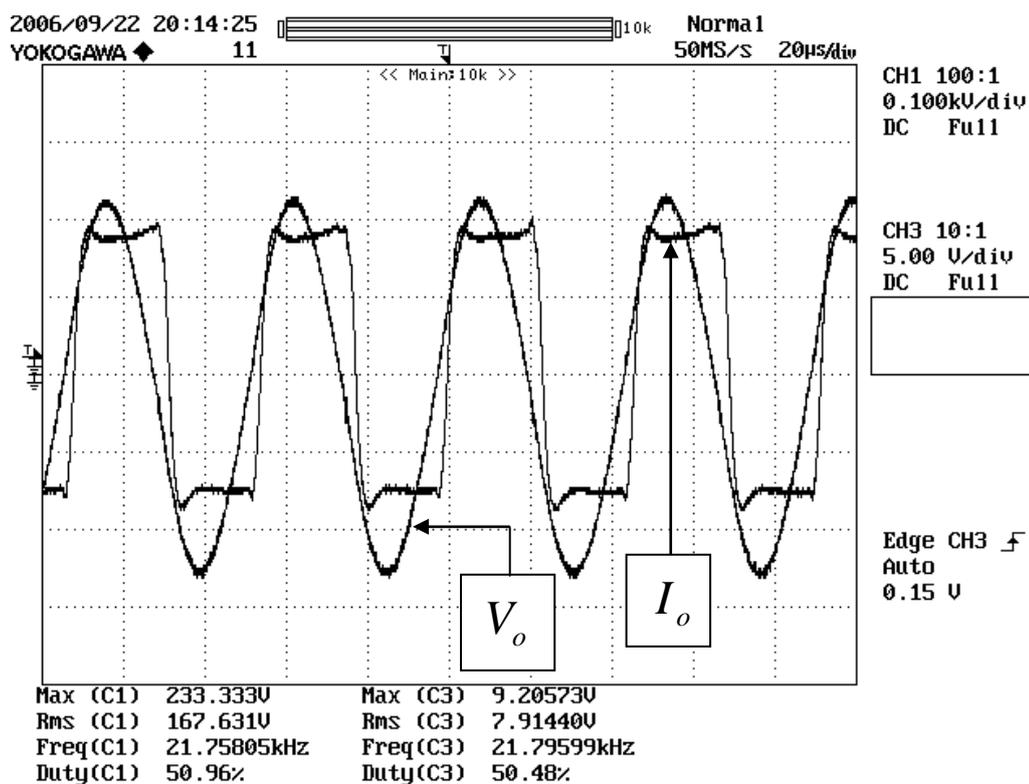
รูปที่ 5.37 รูปร่างของสัญญาณกระแส (I_o) ถัดหลังแรงดันขาออก (V_o) เป็นมุม 15 องศา
เมื่อเกิดอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ 35 °C

(สเกลกระแส I_o :5 A/div, แรงดัน V_o :50 V/div, Time:20 μ S/div)

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 6.8 A.

กำลังไฟฟ้าขาเข้า	925 W
ตัวประกอบกำลัง	0.8
กระแสไฟตรงที่เข้าอินเวอร์เตอร์ (I_{dc})	6.8 A
แรงดันที่โหนดของอินเวอร์เตอร์	177 V _{peak}
ความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	21 kHz
มุมที่เฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่โหนด	15 องศา
อุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ	35 °C

ผลการทดสอบเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 7.9 A.



รูปที่ 5.38 รูปร่างของสัญญาณกระแส (I_o) ถัดหลังแรงดันขาออก (V_o) เป็นมุม 20 องศา
เมื่อเกิดอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ 40 °C

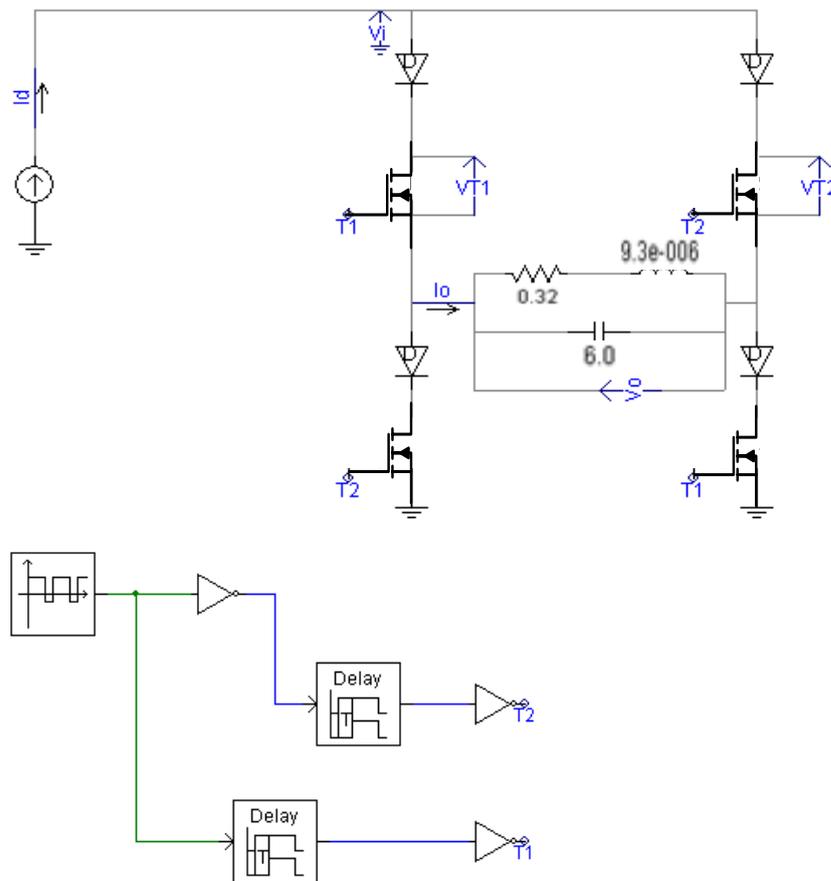
(สเกลกระแส I_o : 5 A/div, แรงดัน V_o : 100 V/div, Time: 20 μ S/div)

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 7.9 A.

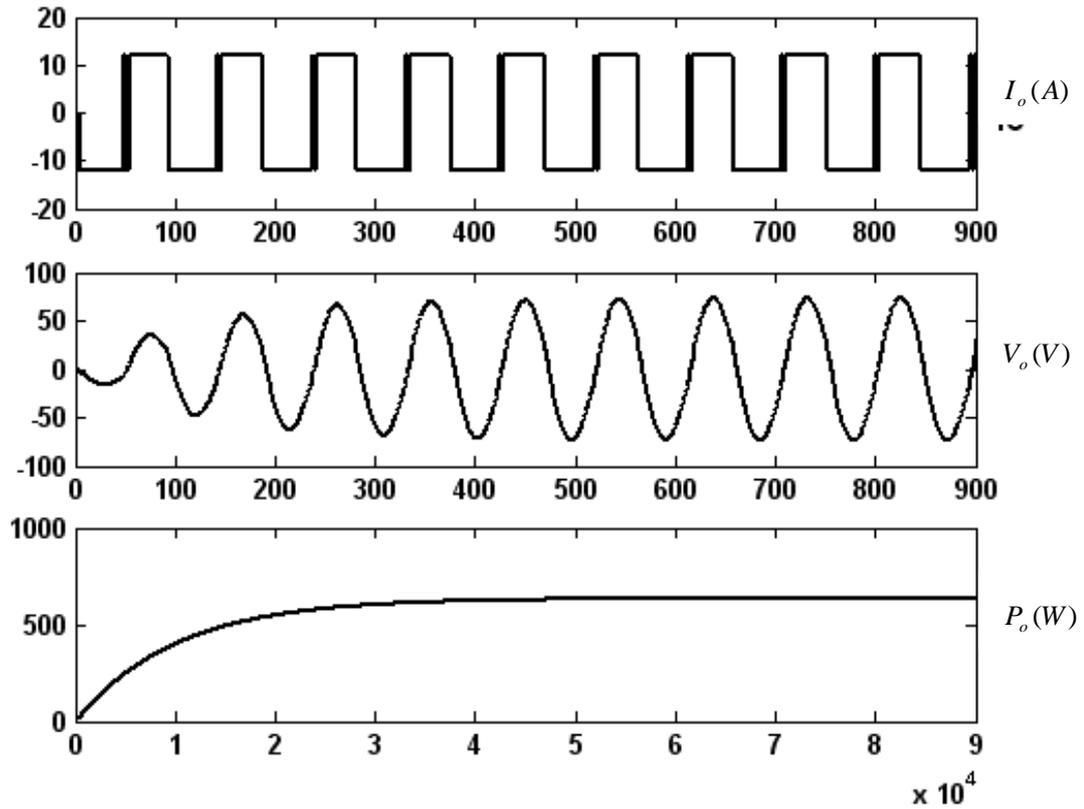
กำลังไฟฟ้าขาเข้า	1377 W
ตัวประกอบกำลัง	0.8
กระแสไฟตรงที่เข้าอินเวอร์เตอร์ (I_{dc})	7.9 A
แรงดันที่โหนดของอินเวอร์เตอร์	233 V _{peak}
ความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	21 kHz
มุมที่เฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่โหนด	20 องศา
อุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ	40 °C

จากผลการทดลองเมื่อไม่มีระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ เมื่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าลดลง ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ของโหลดจะเปลี่ยนโดยมีค่าสูงขึ้นจากเดิม จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อคงความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เอาไว้ที่ 21 kHz เมื่อเกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำ รูปร่างสัญญาณของกระแสจะเริ่มล้าหลังแรงดัน ดังนั้นจะทำการทดสอบระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ โดยจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่โหลด 500 °C โดยการหลอมตะกั่วน้ำหนัก 0.015 กิโลกรัม เพื่อแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดอุณหภูมิที่ 500 °C ที่โหลด ระบบมีความสามารถในการควบคุมให้กระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลดอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ได้

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSCAD โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ และทำการทดลองหลอมตะกั่วน้ำหนัก 0.015 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 500 °C โดยมีระบบควบคุมความถี่ของการสวิตช์ที่สภาวะเรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ และทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเข้า โดยใช้ตัวประกอบกำลังมีค่าเท่า 0.6 (ค่าจากการคำนวณ) ทำการบันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 5.6



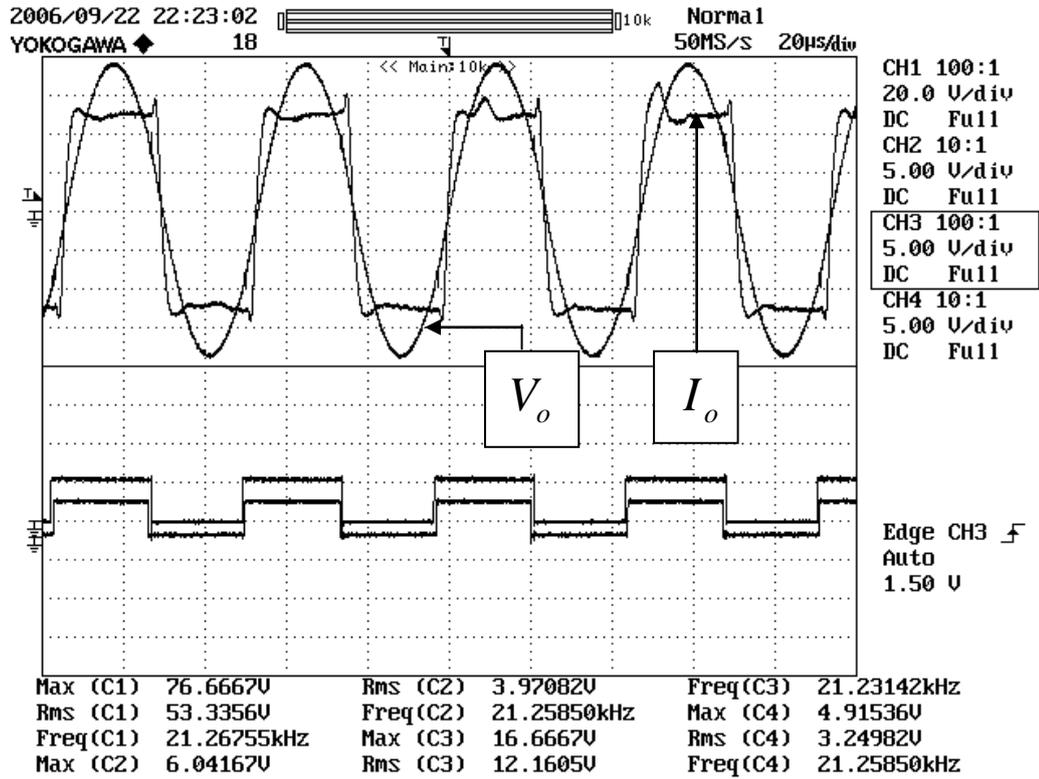
รูปที่ 5.39) โปรแกรมจำลองการทำงานขณะไม่ได้ใส่ชิ้นงาน บนโปรแกรม PSCAD



รูปที่ 5.40) รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดิวตีจิลล์ที่ 12 A.

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะหลอมชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 °C

กำลังไฟฟ้าขาเข้า	968 W
ตัวประกอบกำลัง	0.6
กระแสไฟตรงที่เข้าอินเวอร์เตอร์ (I_{dc})	12 A
แรงดันที่โหนดของอินเวอร์เตอร์	76 V _{peak}
ความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	21 kHz
มุมที่เฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่โหนด	0 องศา
อุณหภูมิที่โหนด	500 °C
ระยะเวลาในการหลอม	60 วินาที



รูปที่ 5.41 รูปร่างของสัญญาณกระแส (I_o) และแรงดันขาออก (V_o)
 เมื่ออยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ ที่อุณหภูมิ 500 °C
 (สเกลกระแส I_o :5 A/div, แรงดัน V_o :20 V/div, Time:20 μ S/div)

จากการทดลอง ได้แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ มีความสามารถในการควบคุมให้ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะมีค่าสูงถึง 500 °C ระบบควบคุมก็ยังสามารถควบคุมให้กระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลดอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ได้ และในรูปที่ 5.42 แสดงรูปหลังการหลอมชิ้นงาน



รูปที่ 5.42 รูปภาพหลังจากชิ้นงานถูกหลอมที่อุณหภูมิ 500 °C