

บทที่ 4

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ แรงดันแหล่งจ่าย $380V$ 3 เฟส , ความถี่ $50Hz$, ความถี่การสวิตช์ $20kHz$, วงจรกรองด้านเข้า $0.1mH$ $20\mu F$, วงจรกรองด้านออก $10mH$ $1\mu F$, ต่อกับโหลด 3 เฟสด้านออก 50Ω $30mH$ และกำหนดวัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 ได้ผลจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.1 - 4.9 ในที่นี้

$v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), i_{i1}(t), i_{i2}(t), i_{i3}(t)$: เป็นแรงดันและกระแสด้านเข้าเฟส 1, 2, 3 ตามลำดับ

$v_{o1}(t), v_{o2}(t), v_{o3}(t), i_{o1}(t), i_{o2}(t), i_{o3}(t)$: เป็นแรงดันและกระแสด้านเข้าเฟส 1, 2, 3 ตามลำดับ

$v_{ox1}(t), v_{ox2}(t), v_{ox3}(t)$: เป็นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรองเฟส 1, 2, 3 ตามลำดับ

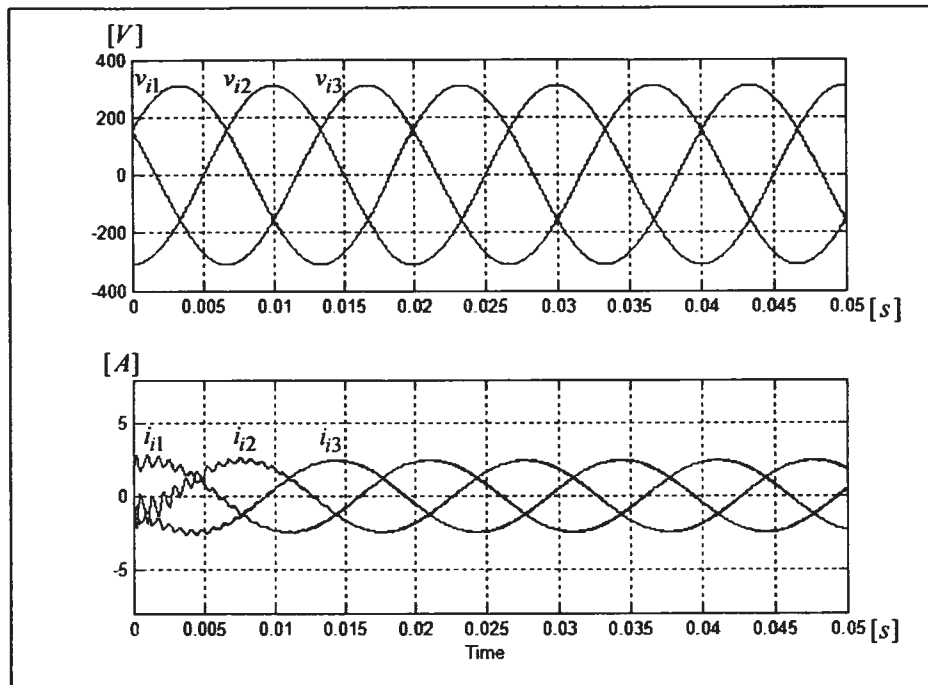
$v_{C-clamp}$: เป็นแรงดันที่ตัวเก็บประจุของวงจรเคลมปี

รูปที่ 4.1 - 4.3 เป็นการทำงานโดยใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส จะเห็นได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้ กระแส, แรงดันด้านเข้าและกระแส, แรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ ขนาดของแรงดันด้านออกมีค่าเท่ากับ $110V$ หรือแรงดันค่ายอดเท่ากับ $156V$ แสดงให้เห็นว่าวงจรทำงานได้ตามวัฏจักรงานที่ต้องการ และแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรองไม่มีแรงดันสไปค์ที่จะสร้างความเสียหายกับวงจร แต่ในช่วงเริ่มต้นจะสังเกตเห็นว่ามีแรงดันสไปค์เกิดขึ้นเล็กน้อย เป็นเพราะว่าสัญญาณอ้างอิงกระแสที่ตรวจจับจากกระแสด้านออกกำลังผ่านศูนย์กลางอยู่ในวงสภาวะชั่วคราว

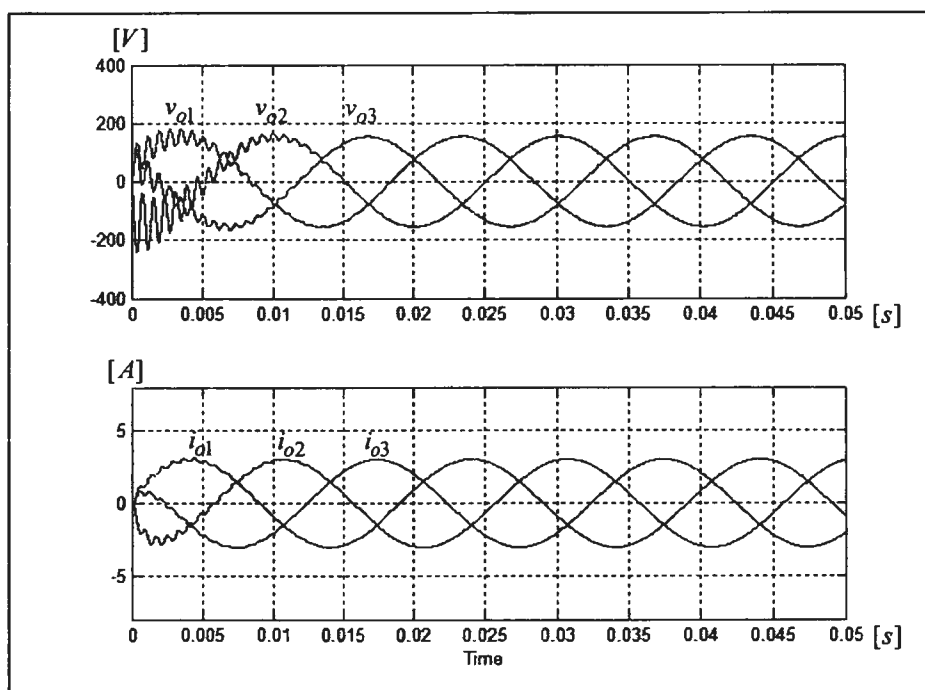
รูปที่ 4.4 - 4.6 เป็นการทำงานโดยใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันก็จะเห็นได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้เช่นเดียวกัน กระแส, แรงดันด้านเข้าและกระแส, แรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ และรูปคลื่นของแรงดันด้านออกที่ได้แสดงให้เห็นว่าวงจรทำงานได้ตามวัฏจักรงานที่ต้องการ ในช่วงเริ่มต้นจะไม่ปรากฏแรงดันสไปค์เหมือนกับแบบกระแสเพราะสัญญาณอ้างอิงแรงดันตรวจจับมาจากแรงดันแหล่งจ่าย

รูปที่ 4.7 - 4.9 เป็นการทำงานโดยใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม จะเห็นได้ว่าวงจรสามารถใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมที่เป็นการสลับการทำงานระหว่างแบบแรงดันและแบบกระแสก็ให้ผลการทดลองได้เช่นเดียวกับทั้งสองแบบก่อนหน้า กระแส, แรงดันด้านเข้าและกระแส, แรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ รูปคลื่นของแรงดันด้านออกที่ได้แสดงให้เห็นว่าวงจรทำงานได้ตามวัฏจักรงานที่ต้องการ และจากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าไม่พบแรงดันสไปค์ในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ในช่วงที่กระแสไหลอยู่ใน

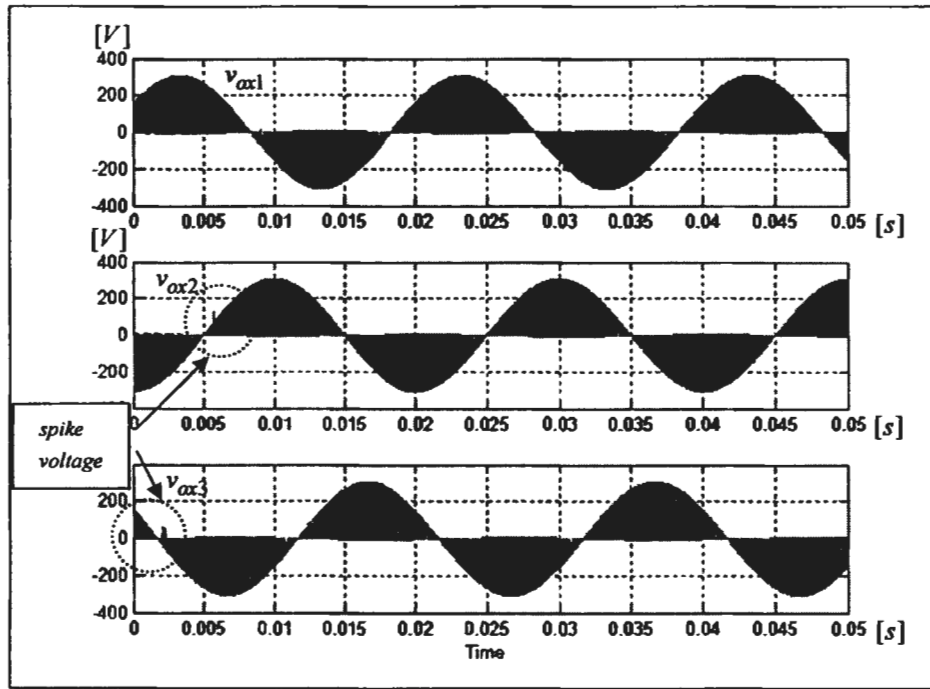
สภาวะชั่วคราวกำลังผ่านศูนย์จะสลับไปใช้สัญญาณอ้างอิงแรงดันและทำการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันแทน



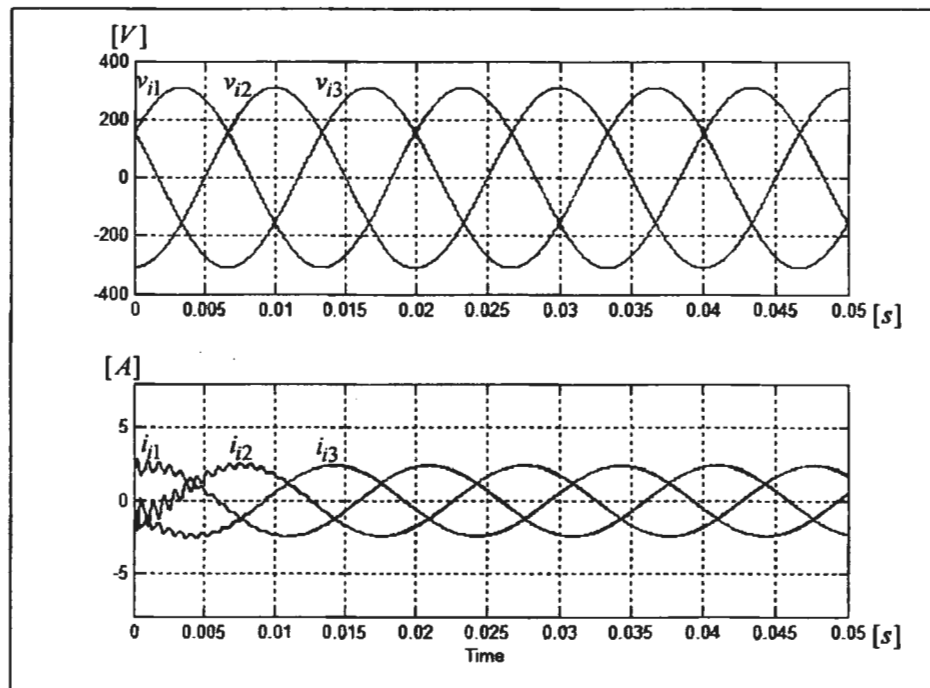
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านเข้า 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส



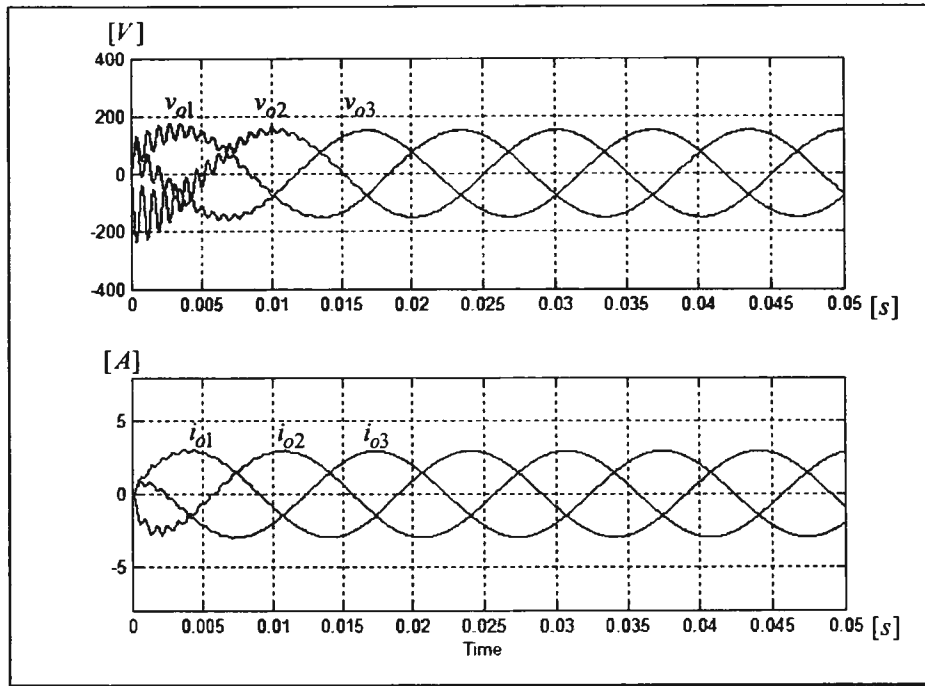
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันด้านออกและกระแสด้านออก 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส



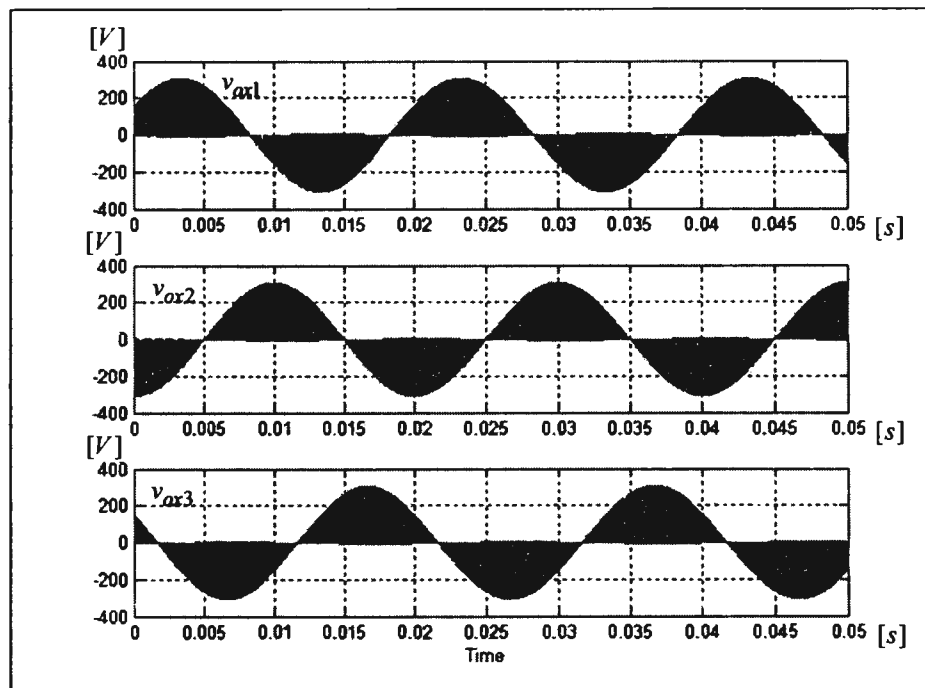
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่าง สวิตช์แบบกระแส



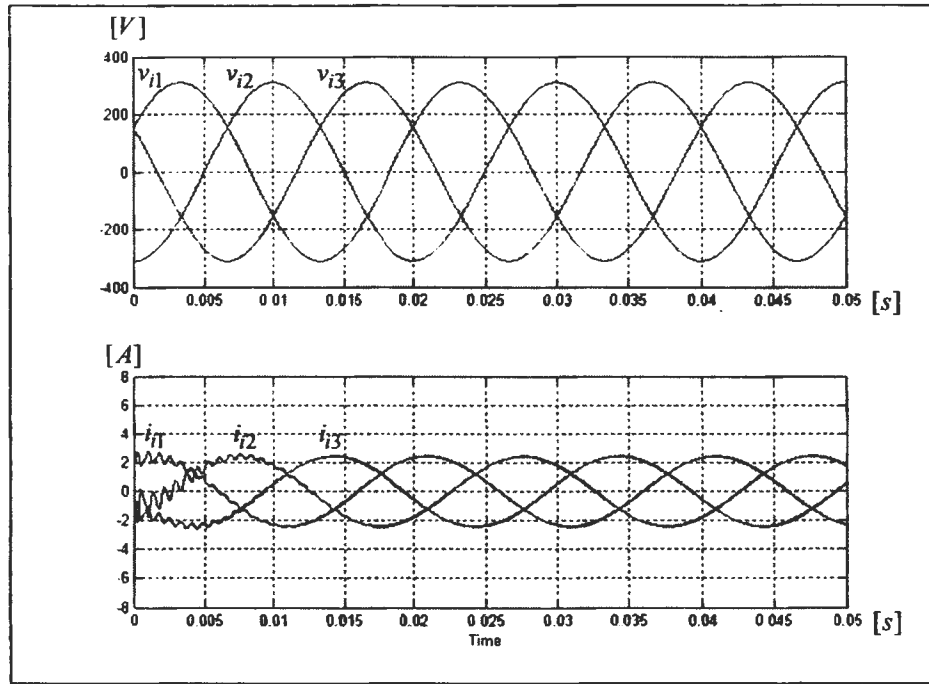
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านเข้า 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่าง สวิตช์แบบแรงดัน



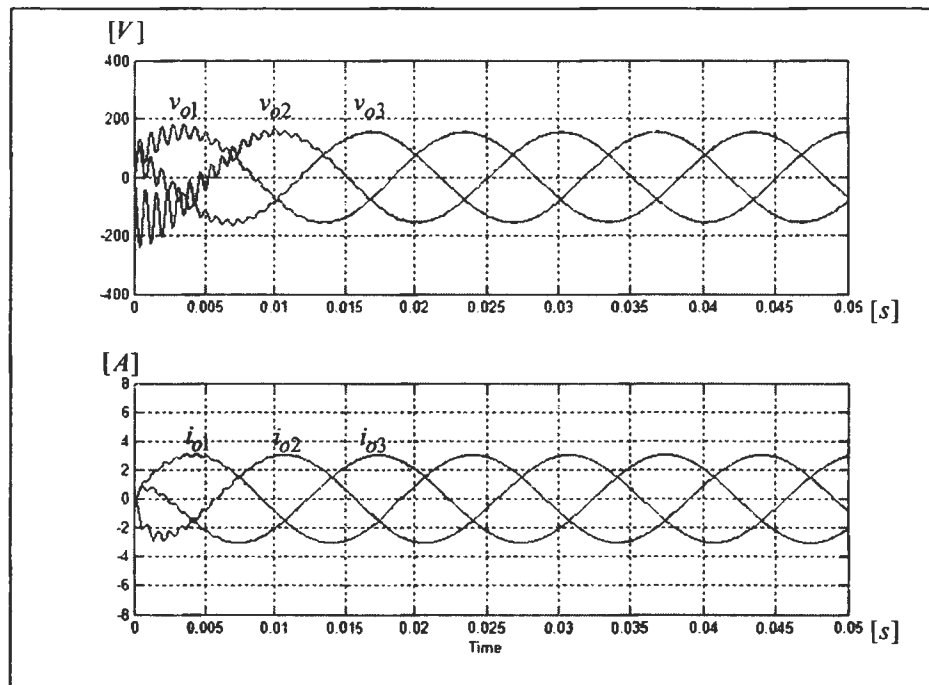
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันด้านออกและกระแสด้านออก 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน



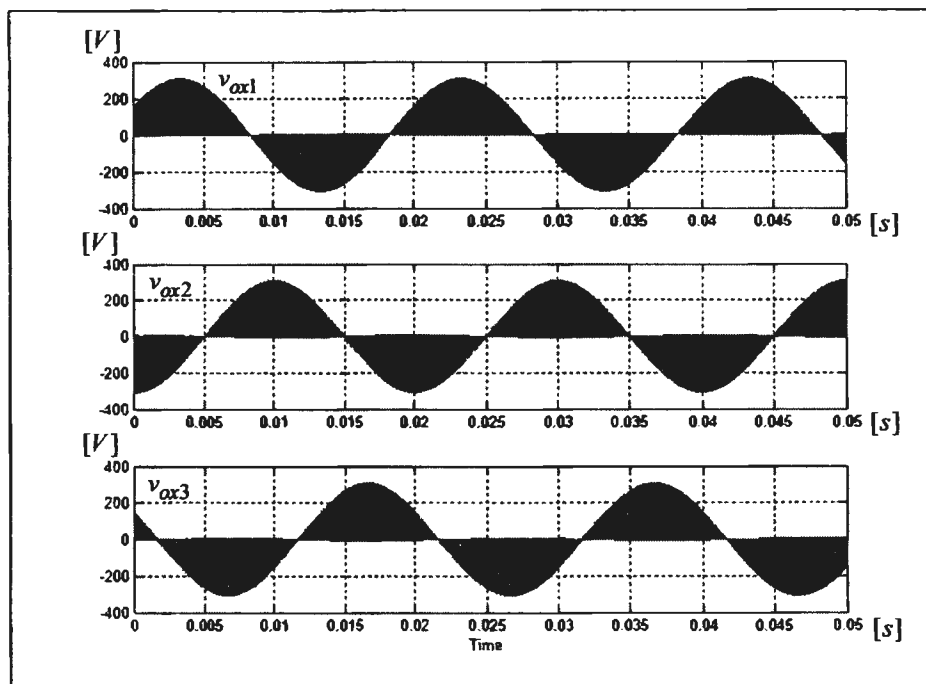
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านเข้า 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม



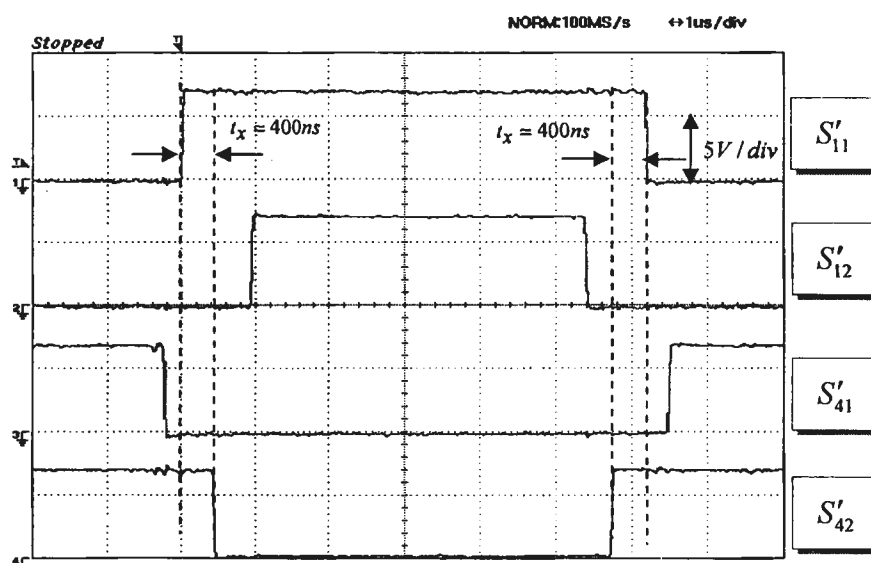
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านออกและกระแสด้านออก 3 เฟส ในการใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม



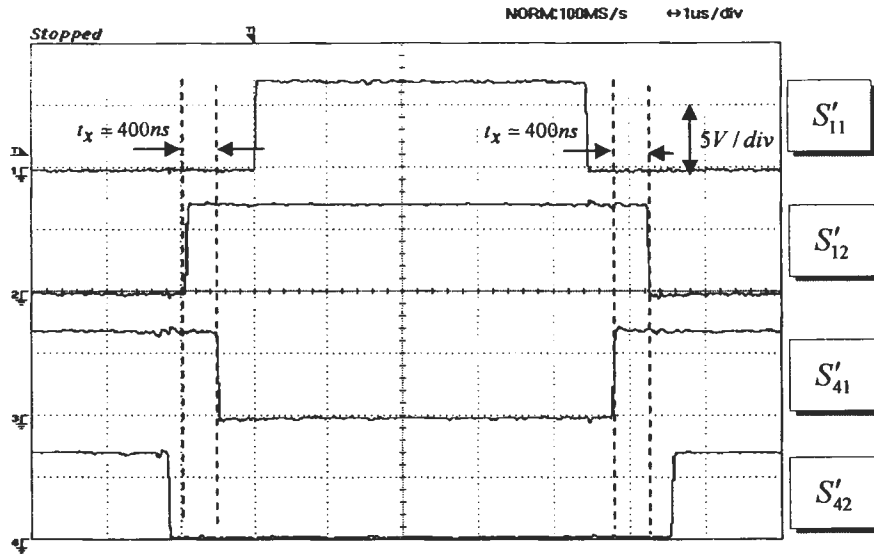
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง ในกรณีใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม

4.2 ผลการทดลองของวงจรควบคุม

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส ที่เป็นแบบกระแสมากกว่าศูนย์และกระแสน้อยกว่าศูนย์ตามลำดับ สัญญาณที่แสดงสร้างจากวงจรหน่วงเวลา ปรับช่วงห่างของเวลาแต่ละลำดับให้มีค่าประมาณ $100\text{ ns} - 400\text{ ns}$ โดยเฉพาะช่วงเวลาที่มียุคสำคัญจะปรับให้มีค่าเท่ากับ 400 ns หรือมากกว่าเล็กน้อย

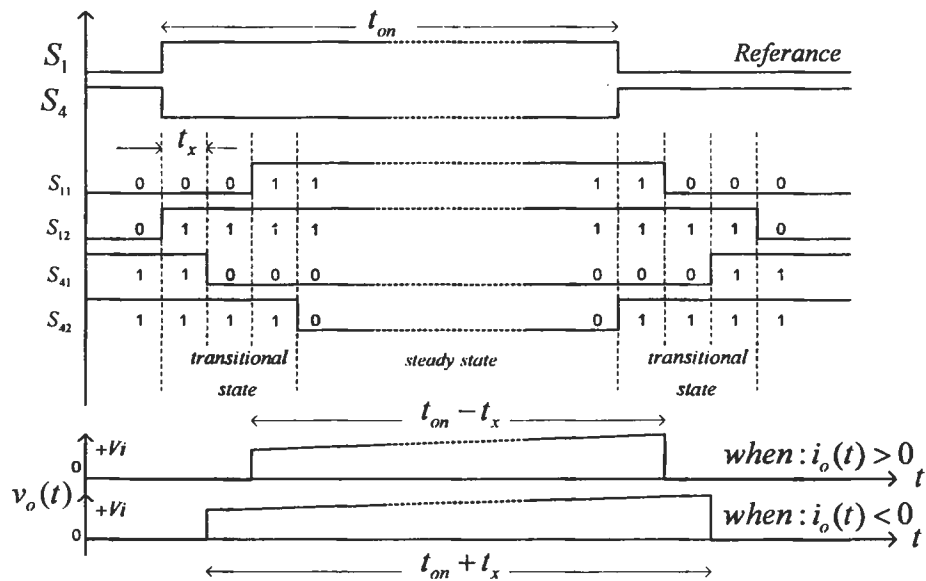


รูปที่ 4.10 สัญญาณขับนำสำหรับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์

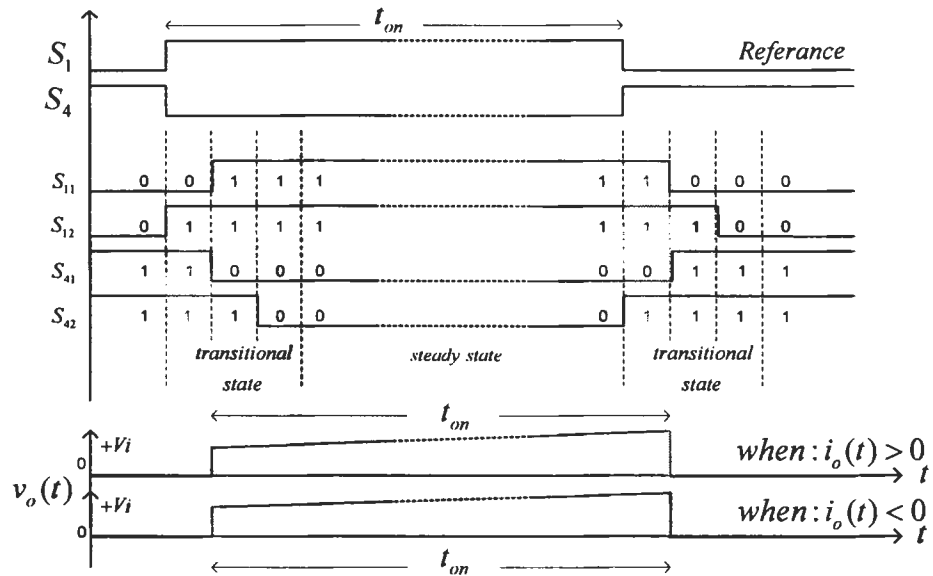


รูปที่ 4.11 สัญญาณขับนำสำหรับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อ กระแสน้อยกว่าศูนย์

รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เทียบกับแรงดันที่เกิดขึ้นจริง กรณีแรงดันมากกว่าศูนย์ การปรับช่วงห่างของเวลาแต่ละลำดับให้มีค่าเท่ากับ t_x จากรูปแสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านออกในช่วงเวลาที่กระแสมากกว่าศูนย์ มีค่าเวลาเท่ากับ $t_{on} - t_x$ น้อยกว่าวัฏจักรงานที่ตั้งไว้ เพื่อลดผลกระทบนี้จึงได้ปรับเลื่อนตำแหน่งของสัญญาณขับนำ S_{11} ให้เร็วขึ้นดังรูปที่ 4.13 โดยการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ยังสามารถทำงานได้เช่นเดิม

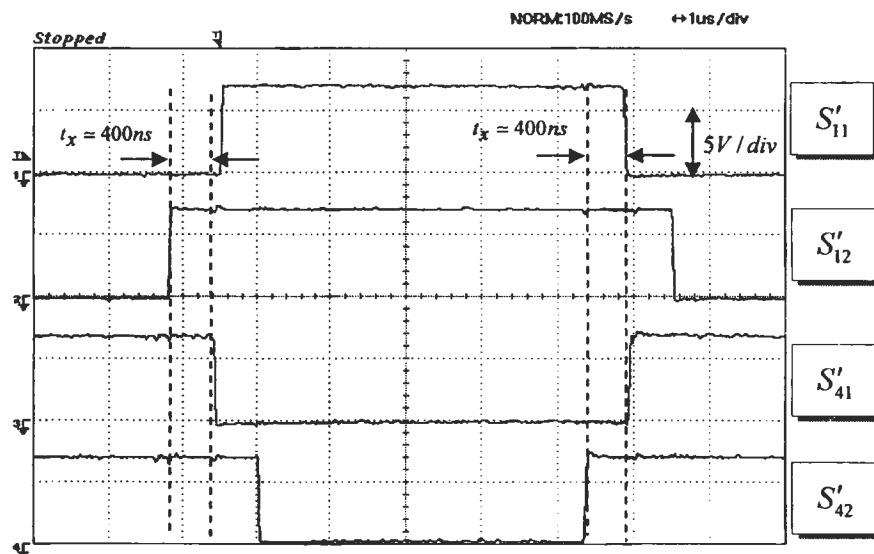


รูปที่ 4.12 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันกรณีแรงดันมากกว่าศูนย์ และแรงดันด้านออกที่เกิดขึ้นจริง

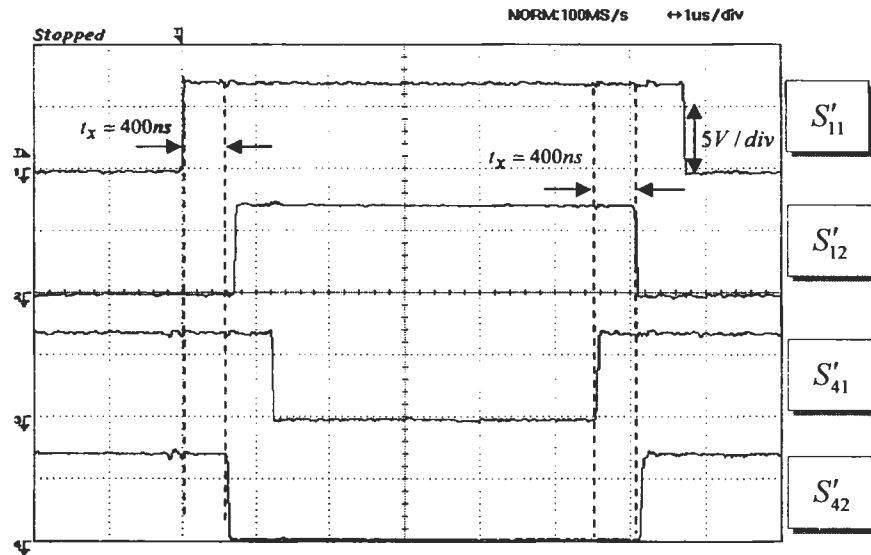


รูปที่ 4.13 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน กรณีแรงดันมากกว่าศูนย์ และแรงดันด้านออกที่เกิดขึ้นจริง เมื่อมีการเลื่อนเวลาของสัญญาณขับนำ

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน ที่เป็นแบบแรงดันมากกว่าศูนย์และแรงดันน้อยกว่าศูนย์ตามลำดับ สัญญาณที่แสดงสร้างจากวงจรหน่วงเวลา ปรับช่วงห่างของเวลาแต่ละลำดับให้มีค่าประมาณ 400 ns โดยเฉพาะช่วงเวลาที่มียุคสำคัญจะปรับให้มีค่าเท่ากับ 400 ns หรือมากกว่าเล็กน้อย

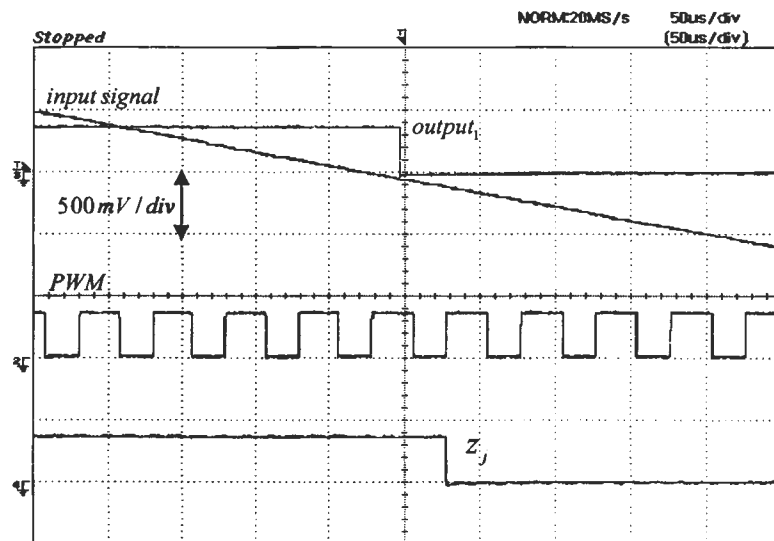


รูปที่ 4.14 สัญญาณขับนำสำหรับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์

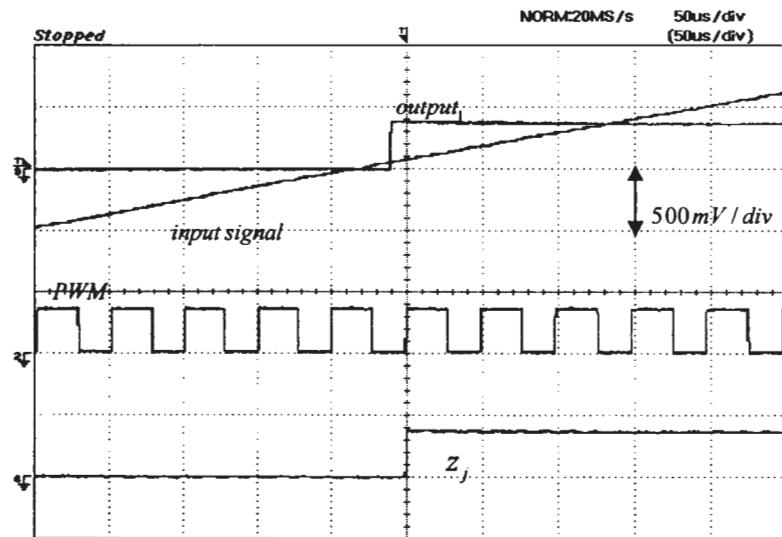


รูปที่ 4.15 สัญญาณขั้วนำสำหรับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงผลการทดสอบวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่มีวงรอบฮีสเตอร์ซิส และการคงค่าสัญญาณตลอด 1 คาบการสวิตช์ จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณที่ต้องการเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ คือไม่มีการเปลี่ยนเครื่องหมายในระหว่างคาบการสวิตช์ ทั้งขณะเปลี่ยนเครื่องหมาย จากบวกเป็นลบ และจากลบเป็นบวก

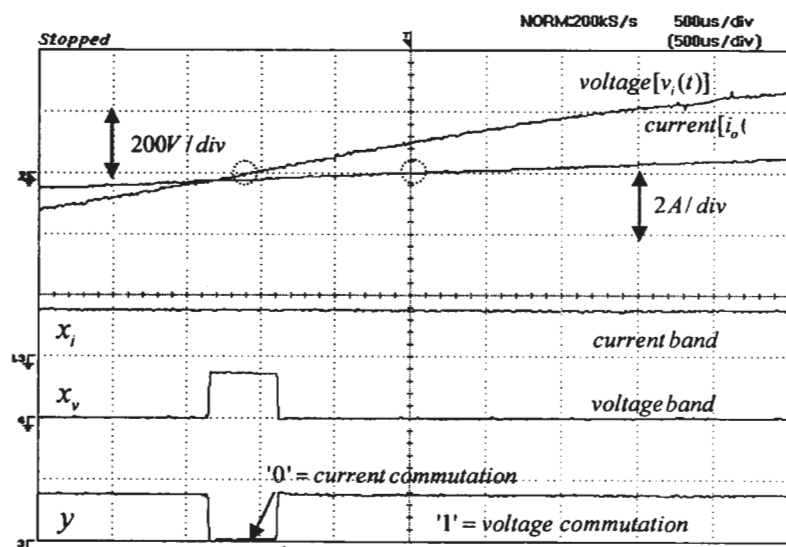


รูปที่ 4.16 การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่มีวงรอบฮีสเตอร์ซิสและการคงค่าสัญญาณตลอด 1 คาบการสวิตช์ ขณะเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ

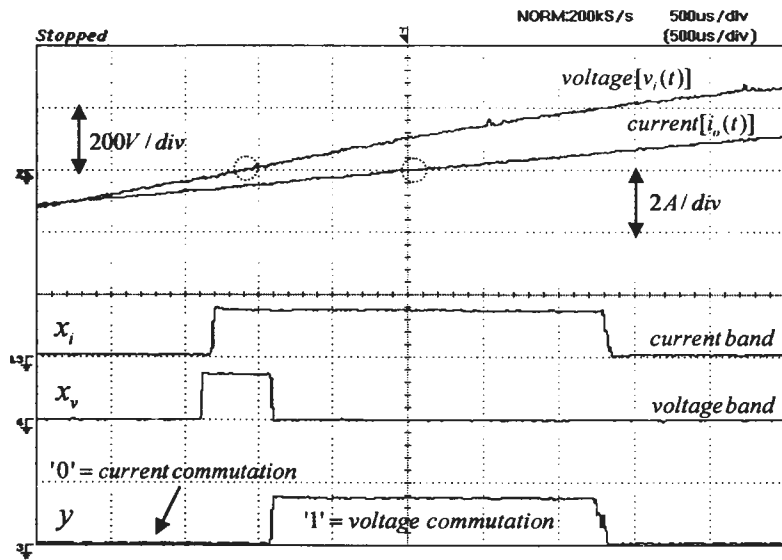


รูปที่ 4.17 การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่มีวงรอบฮิสเตอร์ซีสและการคงค่าสัญญาณตลอด 1 คาบการสวิตช์ ขณะเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก

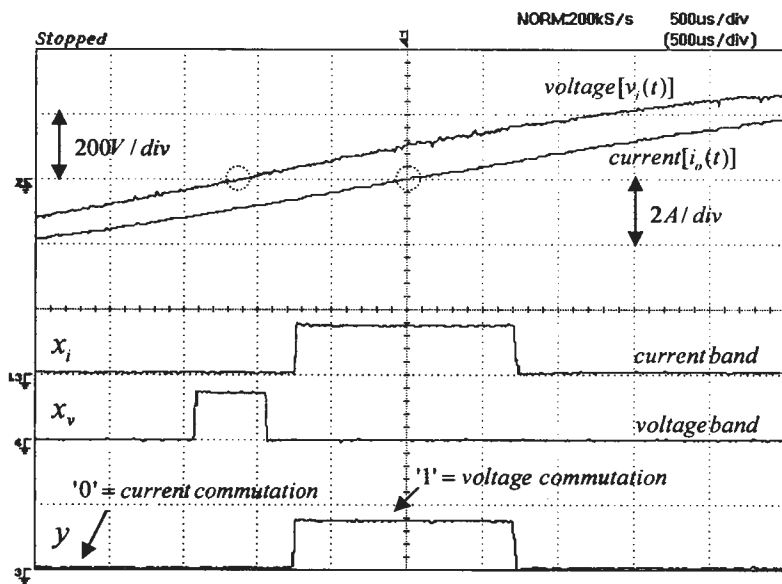
รูปที่ 4.18 – 4.20 แสดงสัญญาณที่ได้จากการทำงานของการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม การทดลองได้ทดสอบจากการทำงานจริงของวงจรเอชไอพีเปอร์ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส โดยค่อยๆเพิ่มกระแสโหลดขึ้น สัญญาณที่แสดงในรูปได้แก่ แรงดันแหล่งจ่ายกับกระแสโหลด เทียบกับสัญญาณที่ได้จากวงจรร่างย้านแรงดันกับย่านกระแส และสัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณควบคุมที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขคือ สัญญาณเลือกรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จะใช้สัญญาณอ้างอิงกระแสเป็นหลัก ยกเว้นกรณีที่มีสัญญาณอ้างอิงกระแสอยู่ในย่านสัญญาณและขณะเดียวกันสัญญาณอ้างอิงแรงดันอยู่นอกย่านสัญญาณจึงจะใช้สัญญาณอ้างอิงแรงดัน



รูปที่ 4.18 สัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ขณะกระแสโหลดมีค่าน้อย



รูปที่ 4.19 สัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ขณะกระแสไหลเพิ่มขึ้นจากรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.20 สัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ขณะกระแสไหลมีค่ามาก

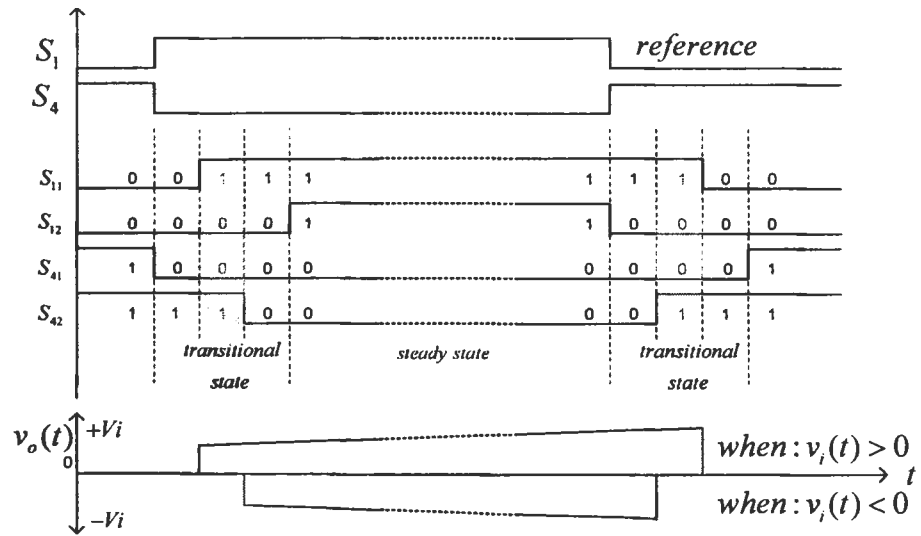
4.3 ผลการทดลองการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

ก) ผลการทดลองการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส

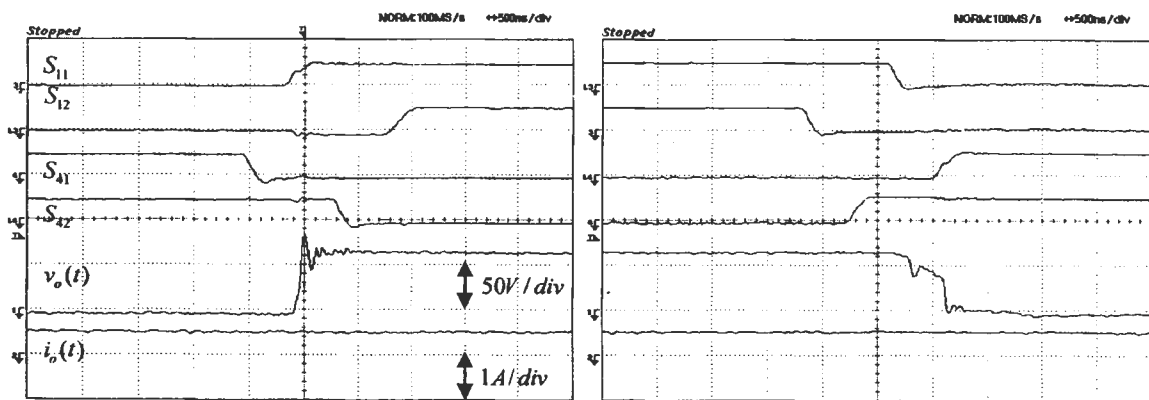
รูปที่ 4.21 - 4.26 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสทั้งแบบกระแสมากกว่าศูนย์และแบบกระแสน้อยกว่าศูนย์กับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ได้พิจารณาไว้ในบทที่ 2

โดยสังเกตจากแรงดันด้านออกจากรูปที่ 4.22 - 4.23 จะเห็นได้ว่าลำดับของการนำกระแส, หยุดนำกระแสของสวิตช์และการทำงานของวงจรถูกเป็นไปตามรูปที่ 4.21 กล่าวคือ รูปที่ 4.22 เป็นกรณีกระแสมากกว่าศูนย์, แรงดันมากกว่าศูนย์จะพบว่า $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{11} นำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{11} หยุดนำกระแส ส่วนรูปที่ 4.23 เป็นกรณีกระแสมากกว่าศูนย์, แรงดันน้อยกว่าศูนย์ซึ่งจะได้ว่า $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{42} หยุดนำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{42} นำกระแส

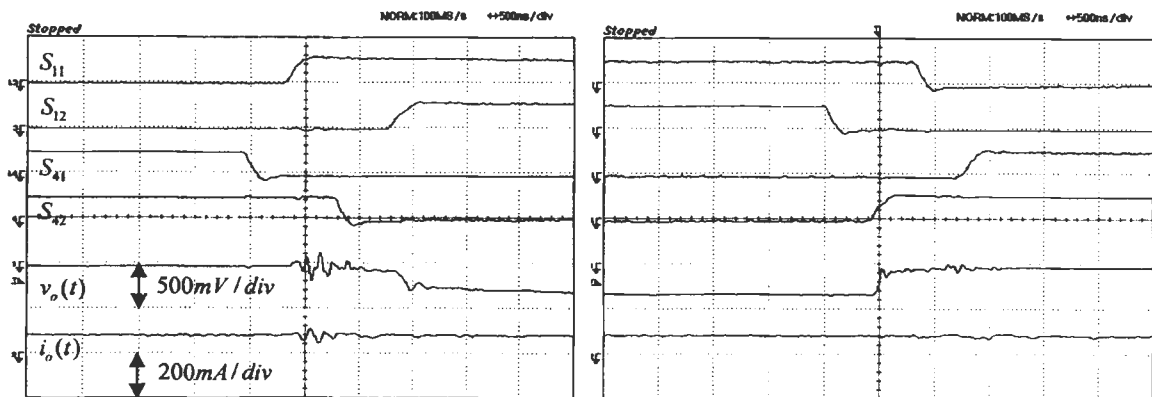
ในการทำงานเดียวกันโดยสังเกตจากแรงดันด้านออกจากรูปที่ 4.25 - 4.26 จะเห็นได้ว่าลำดับของการนำกระแส, หยุดนำกระแสของสวิตช์ และการทำงานของวงจรถูกเป็นไปตามรูปที่ 4.24 กล่าวคือ รูปที่ 4.25 เป็นกรณีกระแสน้อยกว่าศูนย์, แรงดันมากกว่าศูนย์จะได้ว่า $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{41} หยุดนำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{41} นำกระแส และรูปที่ 4.26 เป็นกรณีกระแสน้อยกว่าศูนย์, แรงดันน้อยกว่าศูนย์ซึ่ง $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{12} นำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{12} หยุดนำกระแส



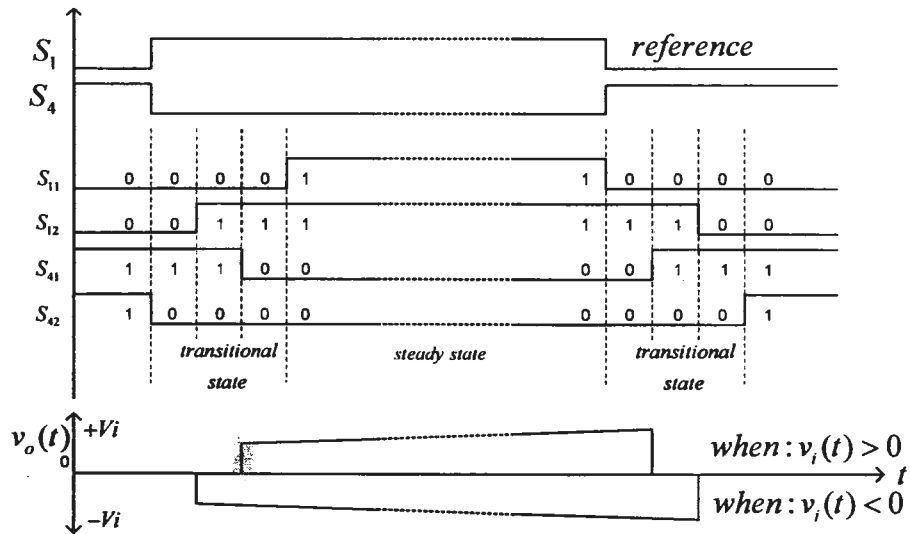
รูปที่ 4.21 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์และแรงดันออกที่เกิดขึ้นจริง



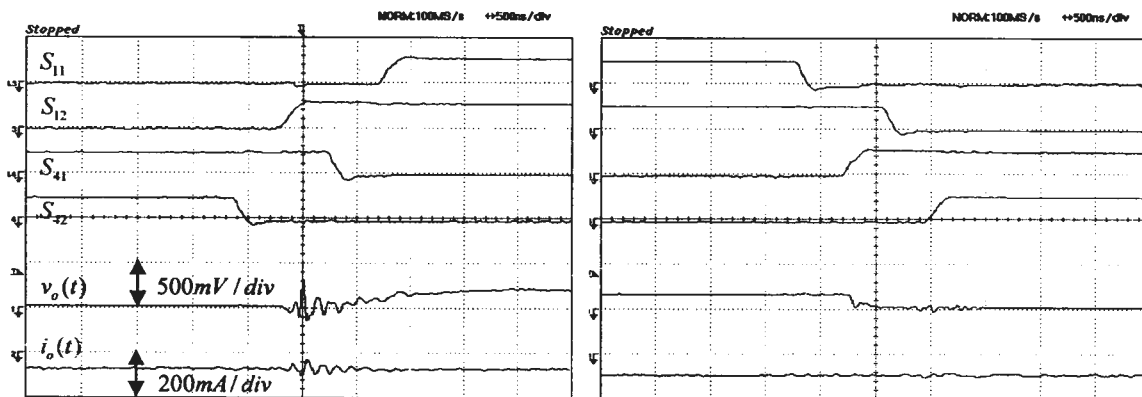
รูปที่ 4.22 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์, แรงดันมากกว่าศูนย์



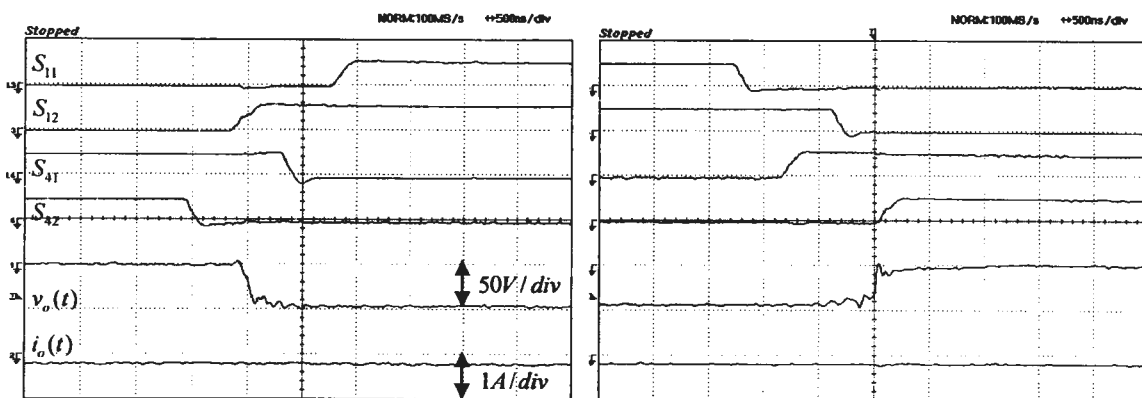
รูปที่ 4.23 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์, แรงดันน้อยกว่าศูนย์



รูปที่ 4.24 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์และแรงดันออกที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 4.25 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแส น้อยกว่าศูนย์,แรงดันมากกว่าศูนย์



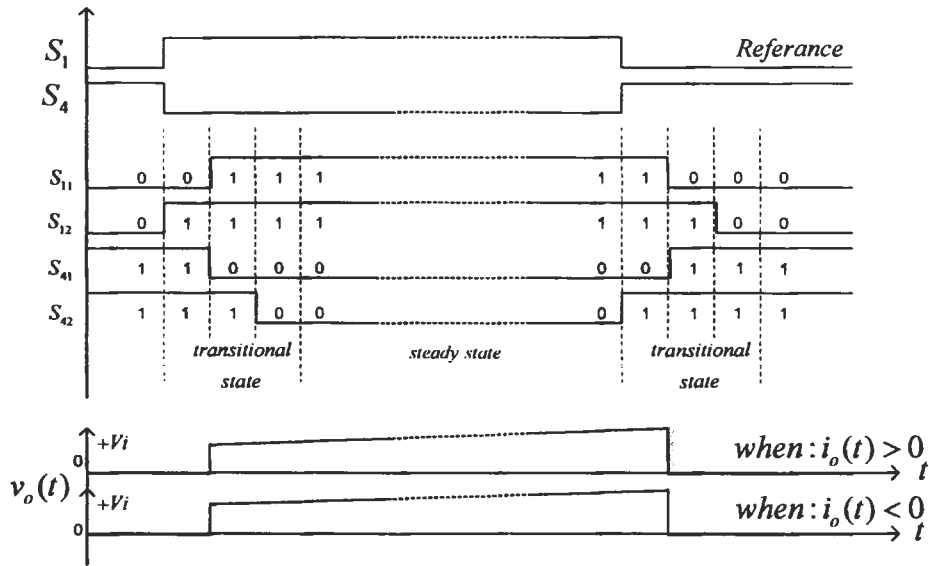
รูปที่ 4.26 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแส น้อยกว่าศูนย์,แรงดันน้อยกว่าศูนย์

ข) ผลการทดลองการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน

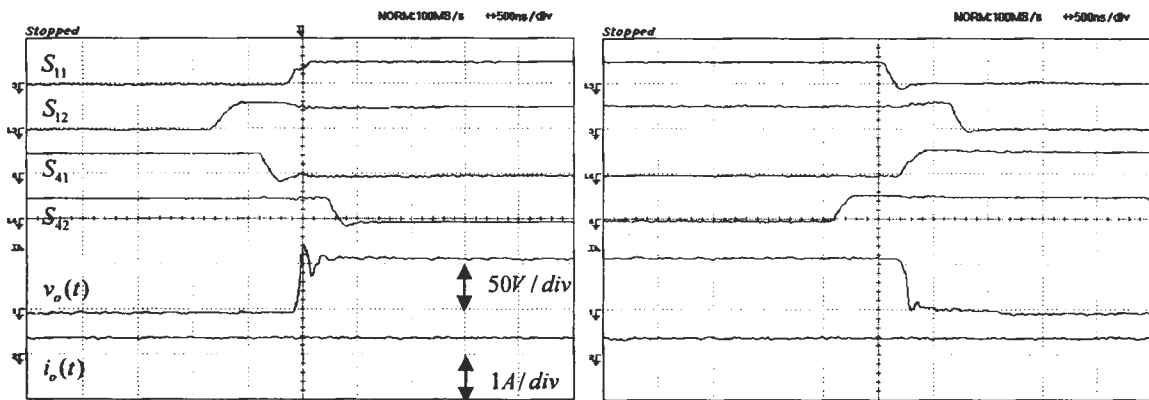
รูปที่ 4.27 - 4.32 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันทั้งแบบแรงดันมากกว่าศูนย์และแบบแรงดันน้อยกว่าศูนย์กับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ได้พิจารณาไว้ในบทที่ 2

โดยสังเกตจากแรงดันด้านออกจากรูปที่ 4.28 - 4.29 จะเห็นได้ว่าลำดับของการนำกระแส, หยุดนำกระแสของสวิตช์ และรูปคลื่นแรงดันด้านออกเป็นไปตามรูปที่ 4.27 กล่าวคือ รูปที่ 4.28 เป็นกรณีแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์จะได้ว่า $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{11} นำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{11} หยุดนำกระแส ส่วนรูปที่ 4.29 เป็นกรณีแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสน้อยกว่าศูนย์ซึ่งจะได้ว่า $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{41} หยุดนำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{41} นำกระแส

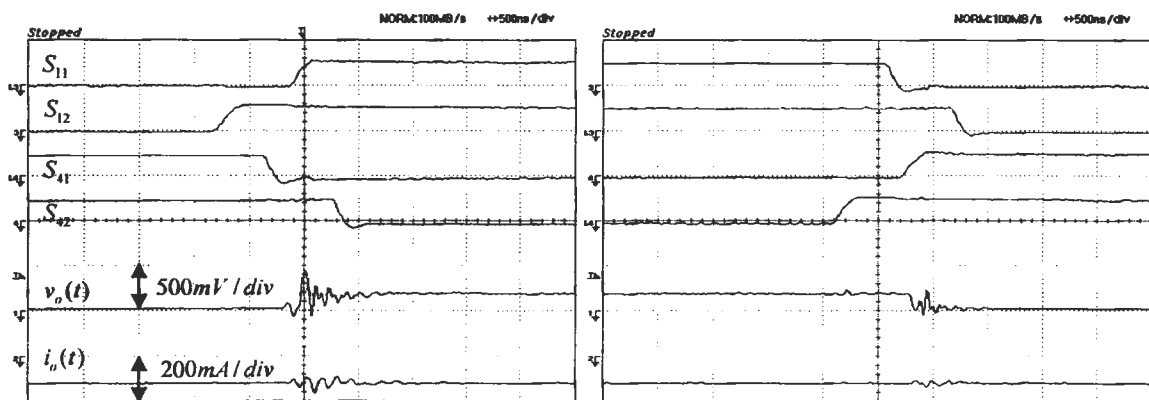
จากรูปที่ 4.31 - 4.32 จะเห็นได้ว่าลำดับของการนำกระแส, หยุดนำกระแสของสวิตช์ และการทำงานของวงจรมีไปตามรูปที่ 4.30 เช่นเดียวกันโดยรูปที่ 4.31 เป็นกรณีแรงดันน้อยกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์จะได้ $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{42} หยุดนำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{42} นำกระแส และรูปที่ 4.32 เป็นกรณีแรงดันน้อยกว่าศูนย์, กระแสน้อยกว่าศูนย์ซึ่งจะพบว่า $v_o(t) = v_i(t)$ เมื่อ S_{12} นำกระแส และ $v_o(t) = 0$ เมื่อ S_{12} หยุดนำกระแส



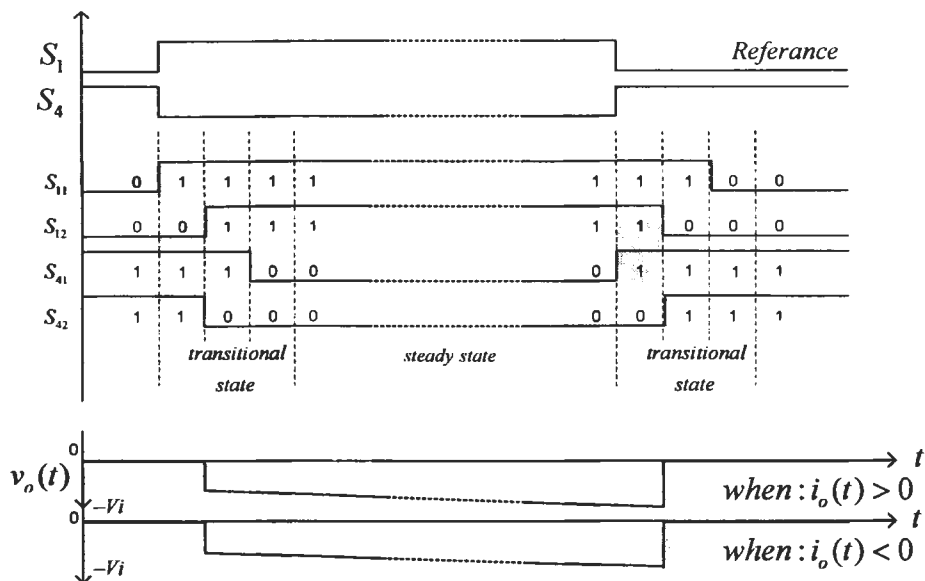
รูปที่ 4.27 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์และแรงดันออกที่เกิดขึ้นจริง



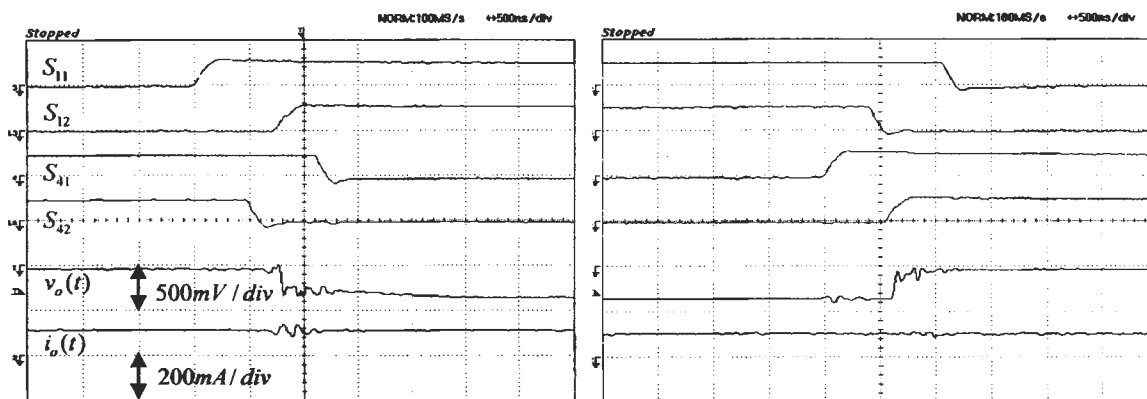
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์



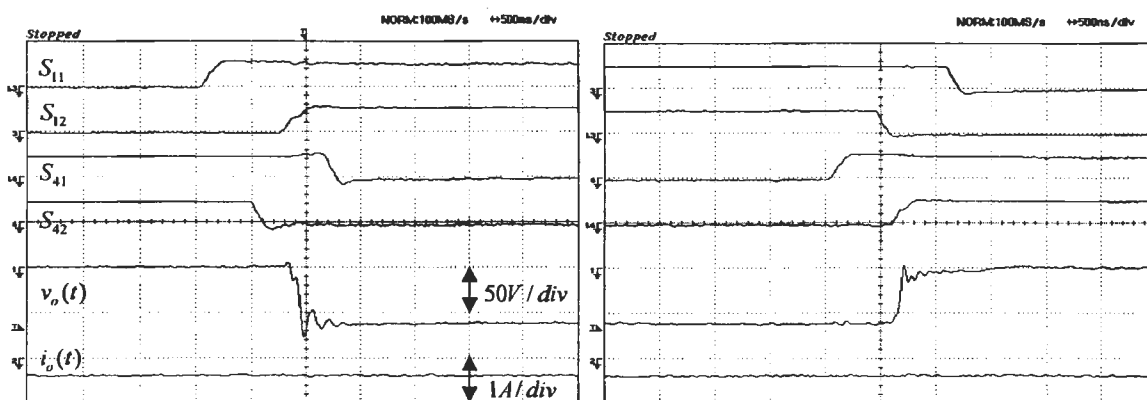
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสน้อยกว่าศูนย์



รูปที่ 4.30 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์และแรงดันด้านออกที่เกิดขึ้นจริง



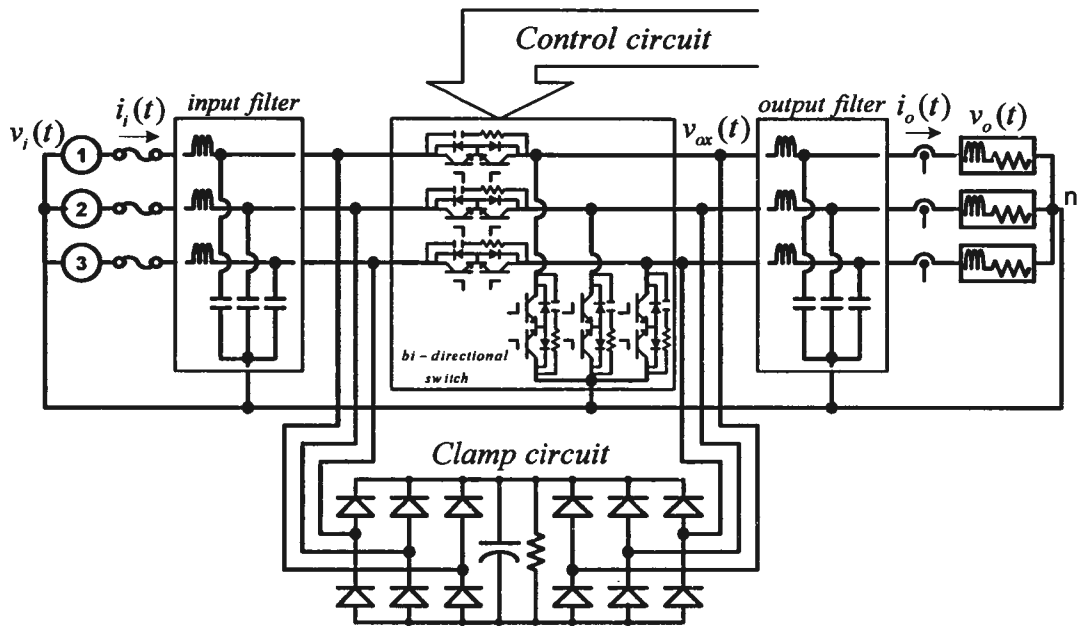
รูปที่ 4.31 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์



รูปที่ 4.32 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์, กระแสน้อยกว่าศูนย์

4.4 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย

ทำการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ขนาด 3.3 kVA แรงดันด้านเข้า 380 V 3 เฟส, ความถี่ 50 Hz , ความถี่การสวิตช์ 20 kHz , วงจรกรองด้านเข้า 0.1 mH $20\text{ }\mu\text{F}$, วงจรกรองด้านออก 8 mH $2\text{ }\mu\text{F}$, กระแสไหลสูงสุด 5 A และตัวเก็บประจุของวงจรแคลมป์มีค่า $25\text{ }\mu\text{F}/800\text{ V}$ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.33 วงจรที่ใช้ทดลอง

4.4.1 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสอย่างเดียว

รูปที่ 4.35 - 4.37 แสดงผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสอย่างเดียว ที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 โหลดความต้านทาน $50\text{ }\Omega$, ความเหนี่ยวนำ 30 mH จากรูปที่ 4.35 แรงดันด้านออกถูกสร้างขึ้นจริงตามวัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 มีค่ายอดของแรงดันประมาณเท่ากับ 156 V ตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้ากับแรงดันด้านออกคือ $v_o(t) = D \cdot v_i(t)$ แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถสร้างแรงดันได้ตามวัฏจักรงานที่กำหนด จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 กระแสและแรงดันด้านเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสและแรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ และระลอกคลื่นของกระแสก็มีค่าน้อยแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองสามารถกรองความถี่การสวิตช์ได้ตามที่ต้องการ จากรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสของวงจรสามารถทำงานได้โดยสังเกตจากที่ไม่เกิดแรงดันเกินหรือกระแสลัดวงจรเลย และจากรูปที่ 4.34 รูปคลื่นกระแสด้านเข้าปรากฏว่ารูปคลื่นไม่เป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์นั้นเป็นผลมาจากแรงดันฮาร์มอนิกที่มาจากภายนอกและมีความถี่อยู่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งไม่ได้เป็นผลมาจากวงจรเอซีชอปเปอร์เลย

4.4.2 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันอย่างเดียว

รูปที่ 4.38 – 4.40 แสดงผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันอย่างเดียว ที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ จากรูปแสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านออกถูกสร้างขึ้นตามวัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 มีค่ายอดของแรงดันประมาณเท่ากับ $156\ V$ เช่นเดียวกับแบบกระแส แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถสร้างแรงดันได้ตามวัฏจักรงานที่กำหนด จากรูปที่ 4.38 และ 4.39 แรงดันด้านเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสและแรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ ส่วนรูปคลื่นกระแสด้านเข้าก็ยังมีลักษณะเหมือนกระแสด้านเข้าในรูปที่ 4.35 ของแบบกระแส ซึ่งไม่ได้เป็นผลมาจากวงจรเอซีชอปเปอร์ และจากรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันของวงจรสามารถทำงานได้ และแสดงให้เห็นว่าการนำวิธีการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันที่ใช้กับคอนเวอร์เตอร์แบบเมทริกซ์มาใช้กับวงจรเอซีชอปเปอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นกัน

4.4.3 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม

- ที่วัฏจักรงาน 0.2

รูปที่ 4.41 – 4.46 แสดงผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.2 โหลดที่ใช้ทดลองมี 2 ค่าคือ ความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ และความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ จากการทดลองการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ผสมแสดงว่าวงจรสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดแรงดันเกินหรือกระแสลัดวงจรเลยและสามารถสร้างแรงดันด้านออกได้ตามต้องการ จากรูปที่ 4.42 และ 4.45 แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามวัฏจักรงานที่กำหนดไว้คือ 0.2 ทั้ง 2 การทดลอง โดยจากรูปมีแรงดันค่ายอดด้านออกประมาณเท่ากับ $62\ V$ ตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้ากับแรงดันด้านออกของวงจร คือ $v_o(t) = D \cdot v_i(t)$ ค่าระลอกคลื่นของกระแสด้านออกน้อยวงจรกรองที่ออกแบบทำงานได้ดี ลักษณะของแรงดันด้านเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสและแรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ ส่วนรูปคลื่นกระแสด้านเข้าก็ยังมีลักษณะเหมือนกับรูปคลื่นของการทดลองแบบกระแสและแบบแรงดันซึ่งก็มีสาเหตุเดียวกัน

- ที่วัฏจักรงาน 0.5

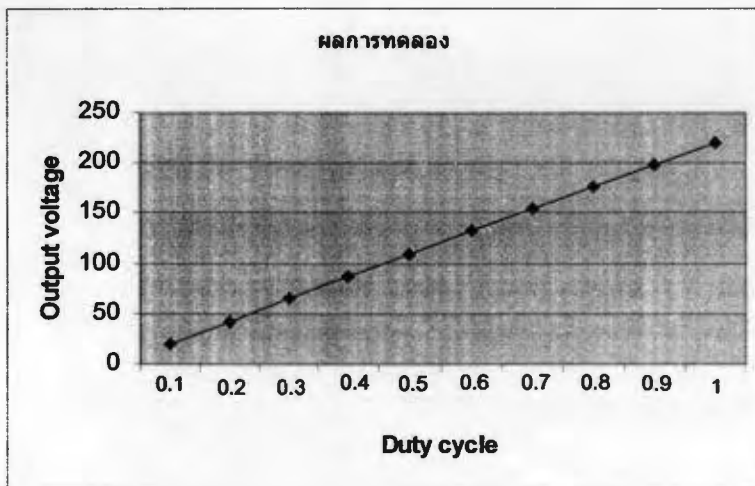
รูปที่ 4.47 – 4.52 แสดงผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 โหลดที่ใช้ทดลองมี 2 ค่าคือ ความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ และความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ จากรูปที่ 4.48 และ 4.51 แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามวัฏจักรงานที่กำหนดไว้คือ 0.5 ทั้ง 2 การทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับแรงดันด้านออกมีค่าเพิ่มขึ้นจากการทดลองก่อนหน้านี้ โดยสังเกตจากรูปคลื่นแรงดันค่ายอดด้านออกมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณเท่ากับ $156\ V$ และเช่นเดียวกัน ลักษณะของแรงดันด้านเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสและแรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ ส่วนรูปคลื่นกระแสด้านเข้าก็ยังมีลักษณะเหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา

- ที่วัฏจักรงาน 0.8

รูปที่ 4.53 – 4.58 แสดงผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.8 โหลดที่ใช้ทดลองมี 2 ค่าคือ ความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ และความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ จากรูปที่ 4.54 และ 4.57 แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามวัฏจักรงานที่กำหนดไว้คือ 0.8 ทั้ง 2 การทดลอง โดยจากรูปมีแรงดันค่ายอดด้านออกประมาณเท่ากับ $248\ V$ ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันด้านออกมีค่าเพิ่มขึ้นตามวัฏจักรงานที่ปรับในการทดลองจาก 0.2 เป็น 0.5 และ 0.8 ตามลำดับ และลักษณะของแรงดันด้านเข้าก็ยังเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสและแรงดันด้านออกก็เป็นคลื่นรูปไซน์ เช่นเดียวกัน ส่วนรูปคลื่นกระแสด้านเข้าก็ยังมีลักษณะเหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา

4.4.4 ผลการทดลองวงจรเอชชอปเปอร์จ่ายโหลดคงที่โดยปรับค่า D ตั้งแต่ 0.1 - 1
 ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันด้านออกที่วัฏจักรงานตั้งแต่ 0.1 - 1

Duty cycle	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Output [V]	20.3	42	65	88.8	109	132.1	155.4	176.1	198.9	220



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงแรงดันด้านออกที่วัฏจักรงานตั้งแต่ 0.1 - 1

ตารางที่ 1 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าแรงดันด้านออกโดยปรับวัฏจักรงานตั้งแต่ 0.1-1 และรูปที่ 4.34 เป็นการนำค่าในตารางที่ 1 มาเขียนกราฟ จากลักษณะของเส้นกราฟที่ได้ แสดงให้เห็นว่าแรงดันเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ $v_o(t) = D \cdot v_s(t)$ จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าวงจรเอชชอปเปอร์สามารถปรับแรงดันด้านออกได้ เช่นเดียวกับหม้อแปลงแบบชอโต้ และสามารถนำไปใช้ทดแทนกันได้

4.4.5 ผลการทดลองวงจรเอชชอปเปอร์ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมกับโหลดไม่เชิงเส้น

รูปที่ 4.59 - 4.62 แสดงผลการทดลองกรณีนำวงจรเอชชอปเปอร์ไปจ่ายให้กับโหลดไม่เชิงเส้น โหลดที่ใช้ทดลองก็คือวงจรไดโอดบริดจ์เฟสเดียว ที่มีตัวเก็บประจุกรองเท่ากับ $560\mu F$ ขนาดความต้านทาน 100Ω และโหลดความต้านทานเฟสเดียว 250Ω ในการทดลองปรับวัฏจักรงานเท่ากับ 0.6 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามารถปรับได้ตามวัฏจักรงานที่ควบคุมวงจรเอชชอปเปอร์ จากรูปคลื่นกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกจะเห็นได้ว่ามีลักษณะถูกแคลมป์หายไปในช่วงที่ไดโอดบริดจ์ของวงจรเรียงกระแสทำงาน รูปคลื่นแรงดันด้านออกยังคงมีลักษณะใกล้เคียงคลื่นรูปไซน์ขณะกระแสด้านออกเท่ากับศูนย์ในช่วงที่แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของ

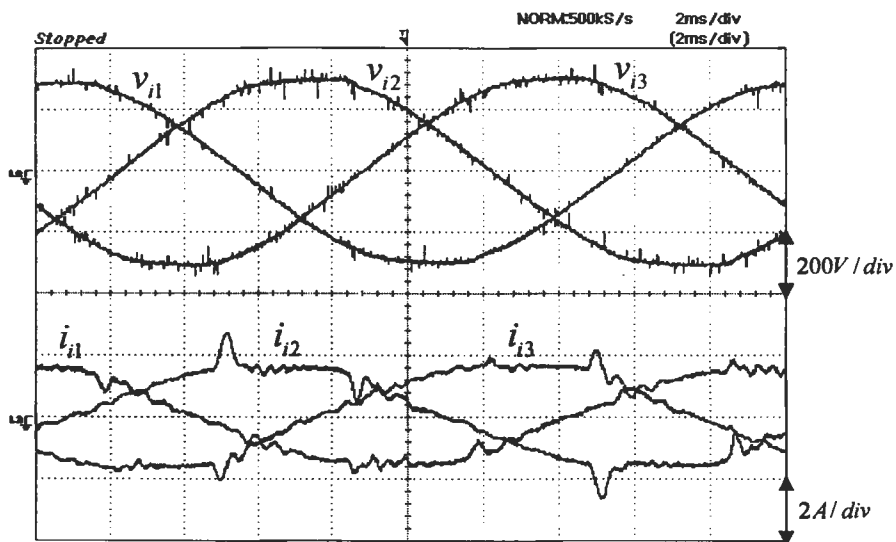
วงจรเรียงกระแสที่น้อยกว่าแรงดันด้านออกของวงจรเอซีชอปเปอร์ ในส่วนของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ใช้เป็นแบบผสมนั้นก็สามารถทำงานได้ดีเหมือนกรณีโหลดเชิงเส้น

4.4.6 ผลการทดสอบวงจรป้องกัน

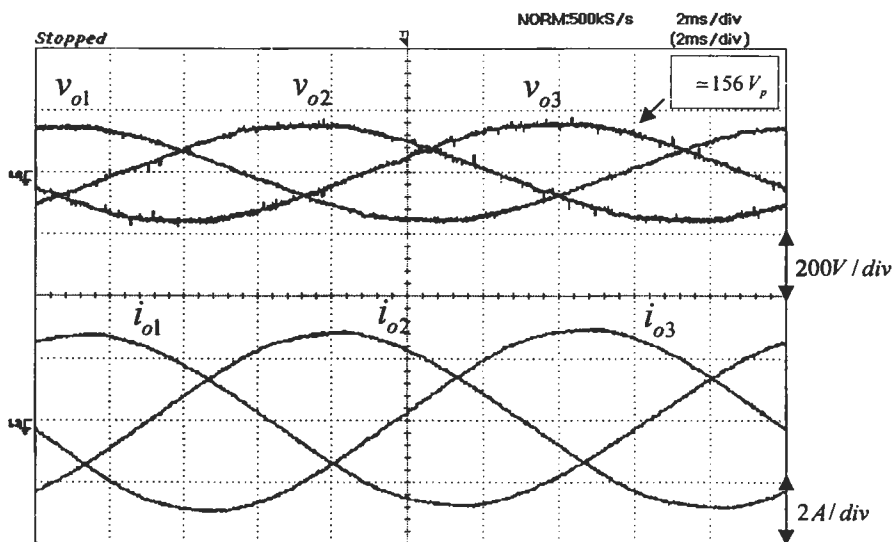
รูปที่ 4.63 แสดงผลการทดลองของวงจรป้องกันเมื่อเกิดกระแสเกิน จากรูปแสดงให้เห็นว่า วงจรแคลมป์สามารถรองรับพลังงานจากโหลดได้เมื่อสวิตช์ภายในวงจรทุกตัวหยุดนำกระแส รูปคลื่นแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่วัดได้ประมาณเท่ากับ 650 V ซึ่งก็ไม่เกินจากค่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งที่กำหนดค่าพิคกแรงดันของตัวเก็บประจุไว้อย่างน้อยเท่ากับ 760 V ทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าไม่สูงเกินกว่าค่าพิคกของสวิตช์ และจากการทดลองก็แสดงให้เห็นว่าวงจรแคลมป์ที่ใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเมทริกซ์สามารถนำมาใช้เป็นวงจรป้องกันวงจรเอซีชอปเปอร์ได้เช่นเดียวกัน

4.5 สรุปผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

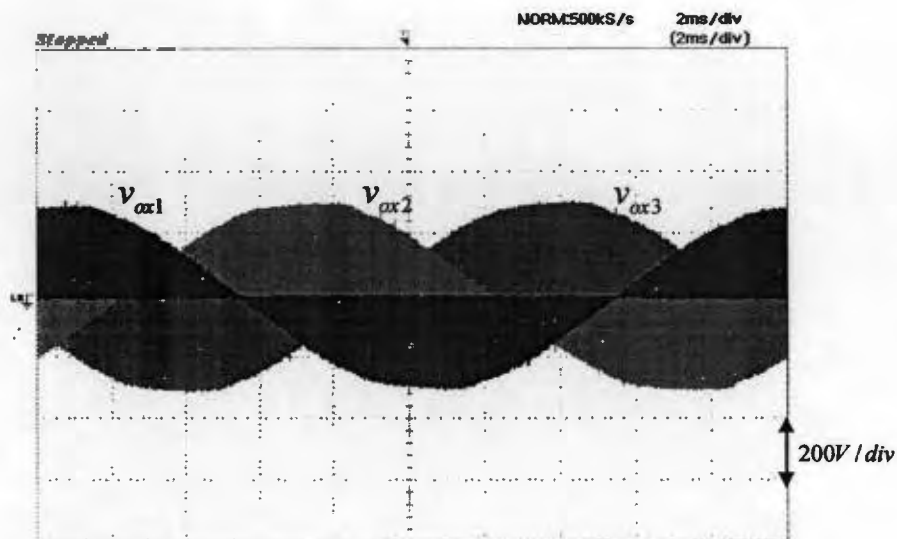
ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบวงจรจริงนั้นเป็นไปตามที่ได้ ออกแบบไว้ วงจรควบคุมสามารถจัดการและควบคุมรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ได้ ส่งผลให้การทดสอบวงจรจริงสร้างแรงดันได้ตามวัฏจักรงานที่ต้องการ รูปคลื่นกระแสและแรงดัน ด้านเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสและแรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์ ตลอดจนวงจรแคลมป์ก็สามารถรองรับพลังงานจากโหลดได้ซึ่งเป็นการป้องกันการพังเสียหายของสวิตช์เมื่อวงจรป้องกัน สั่งสวิตช์ทุกตัวให้หยุดนำกระแสเมื่อกระแสเกินพิคก



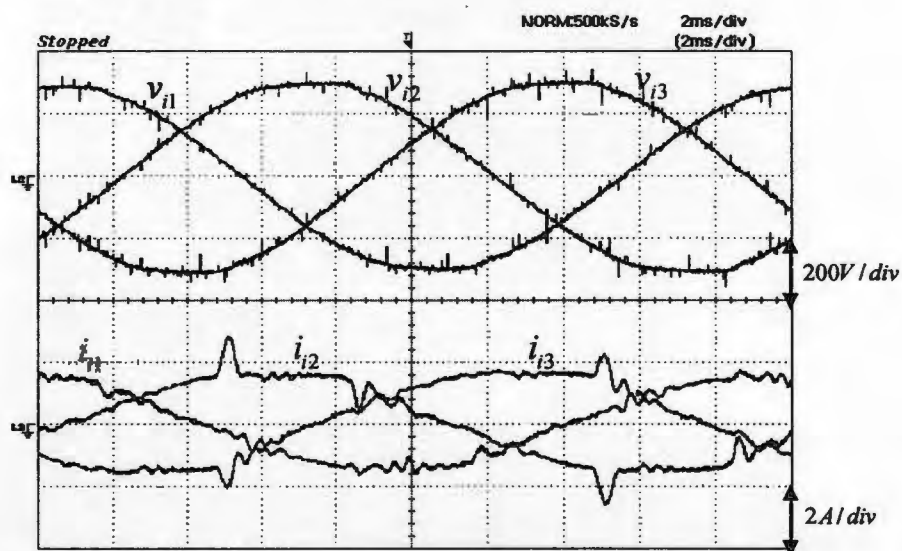
รูปที่ 4.35 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



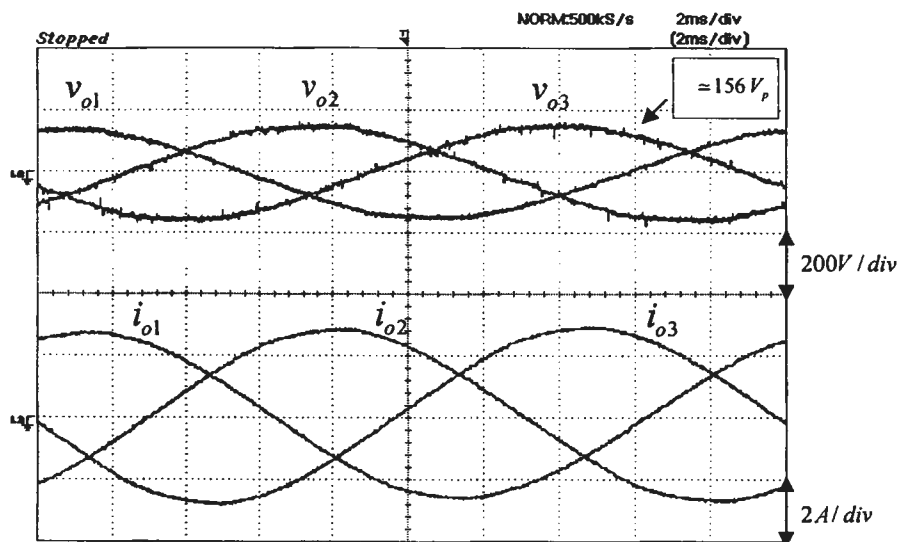
รูปที่ 4.36 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



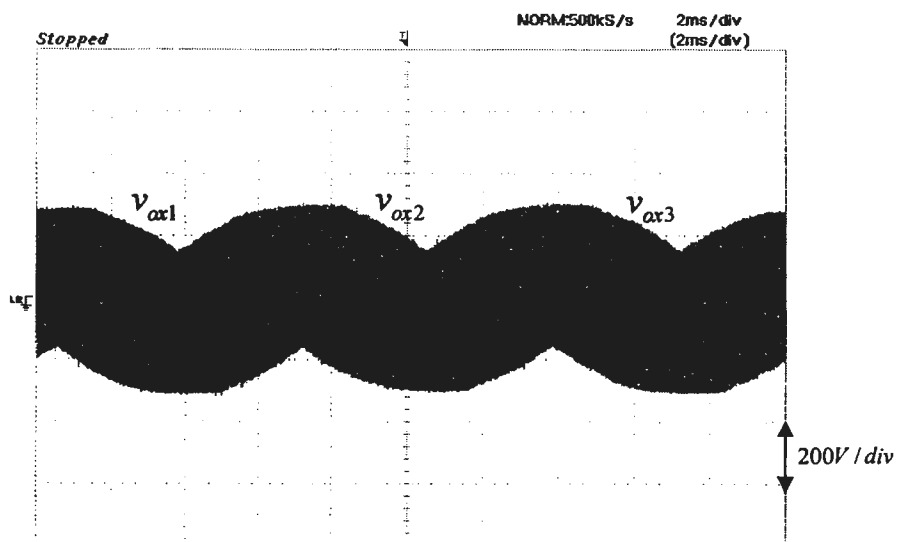
รูปที่ 4.37 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



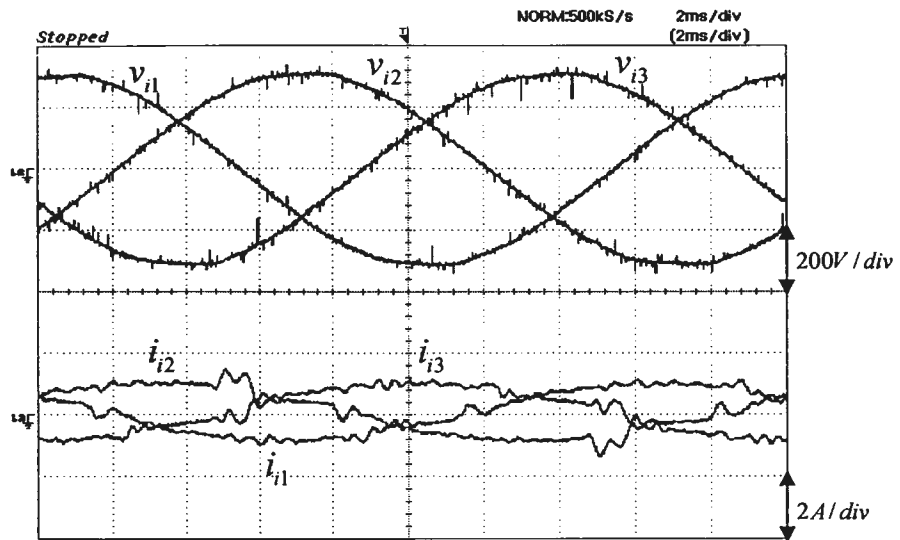
รูปที่ 4.38 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



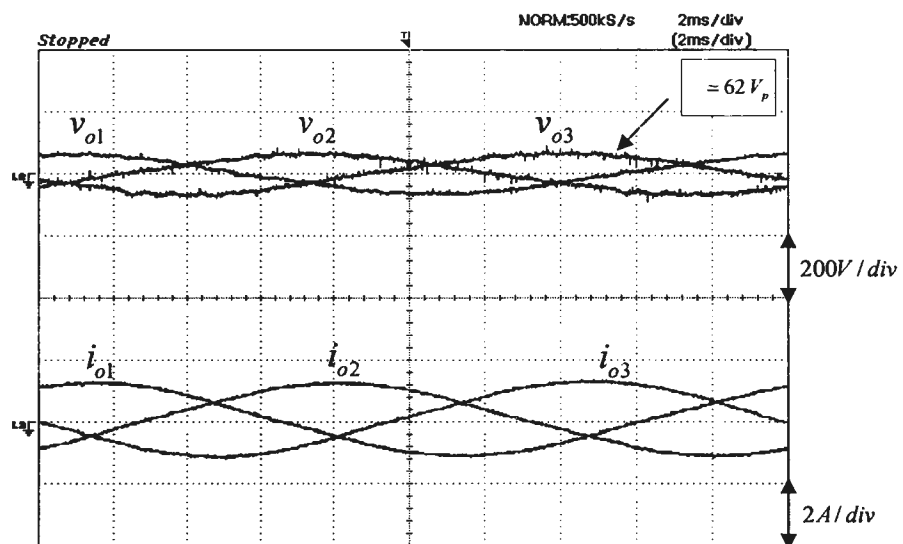
รูปที่ 4.39 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



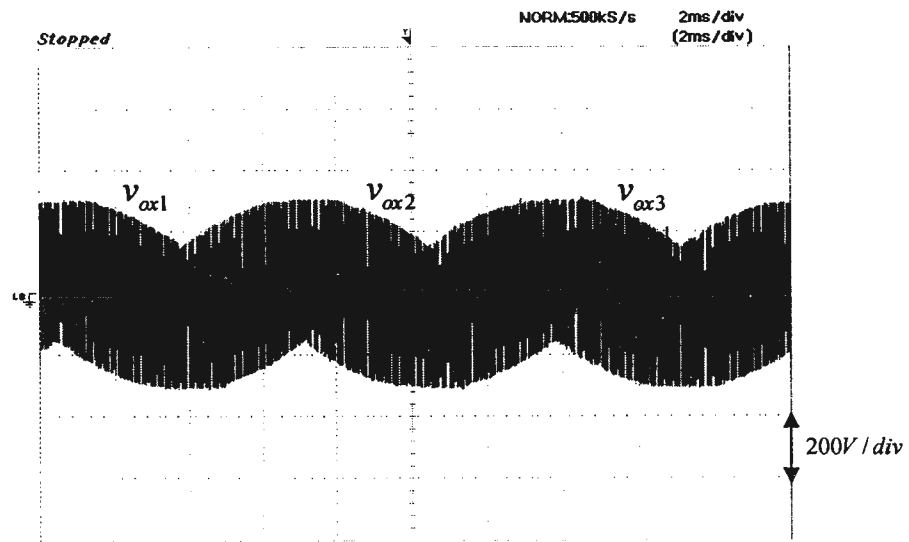
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



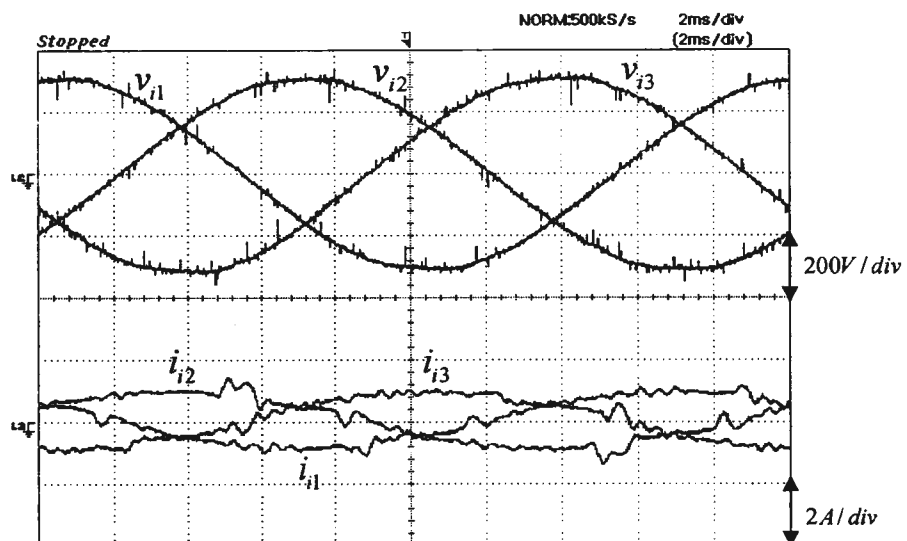
รูปที่ 4.41 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ \text{mH}$



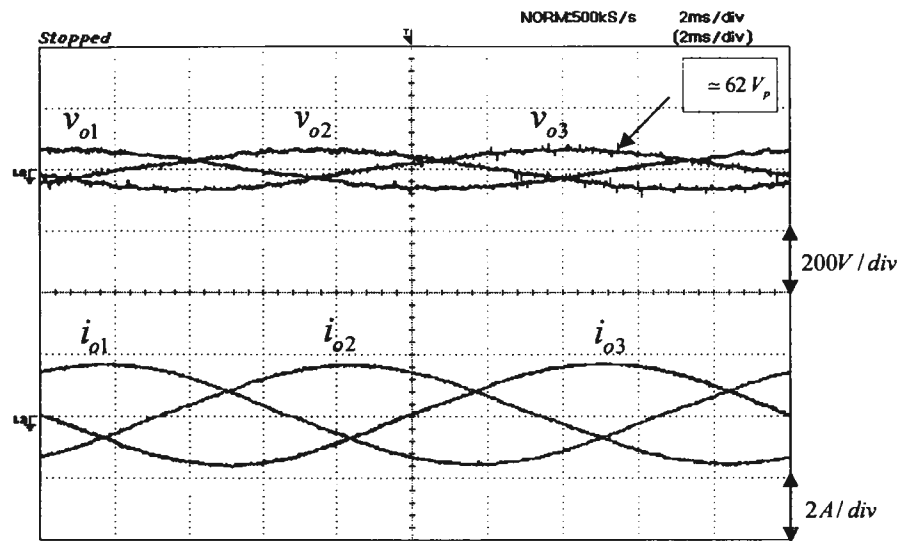
รูปที่ 4.42 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ \text{mH}$



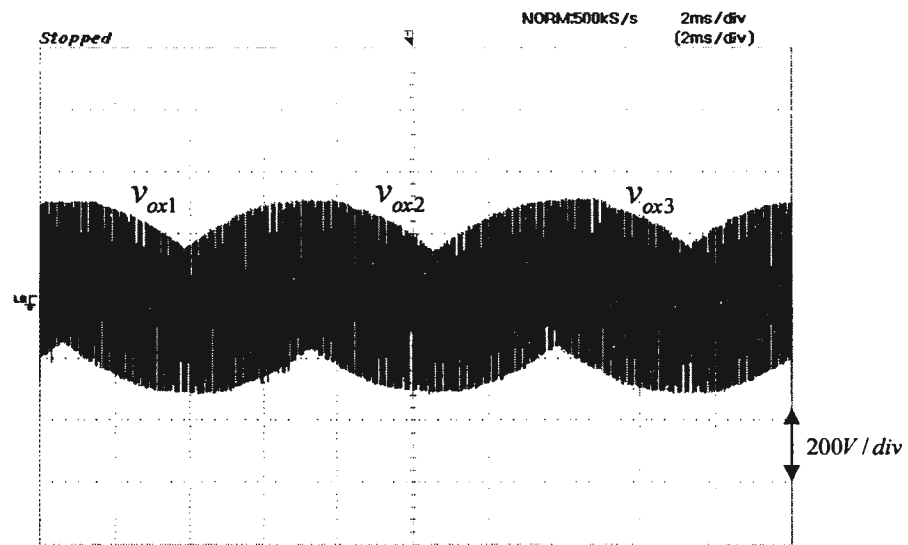
รูปที่ 4.43 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วิญจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



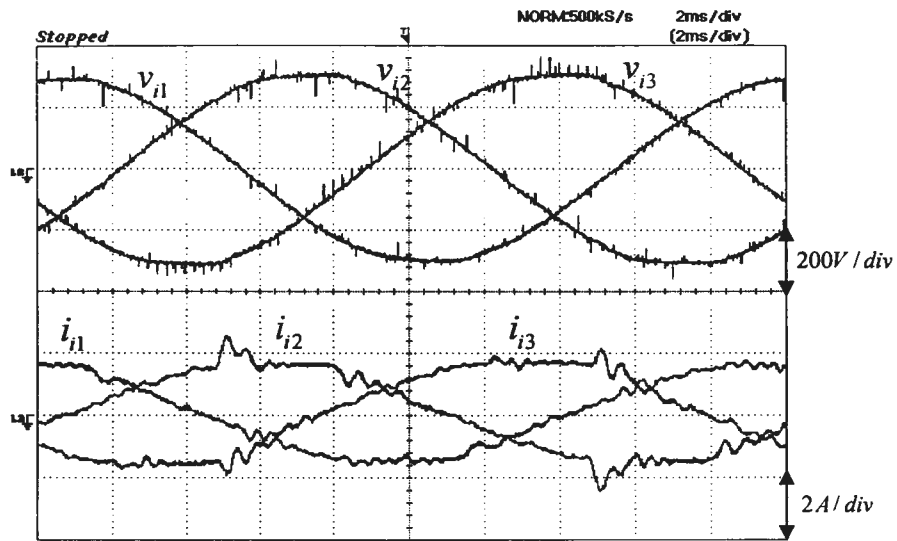
รูปที่ 4.44 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วิญจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



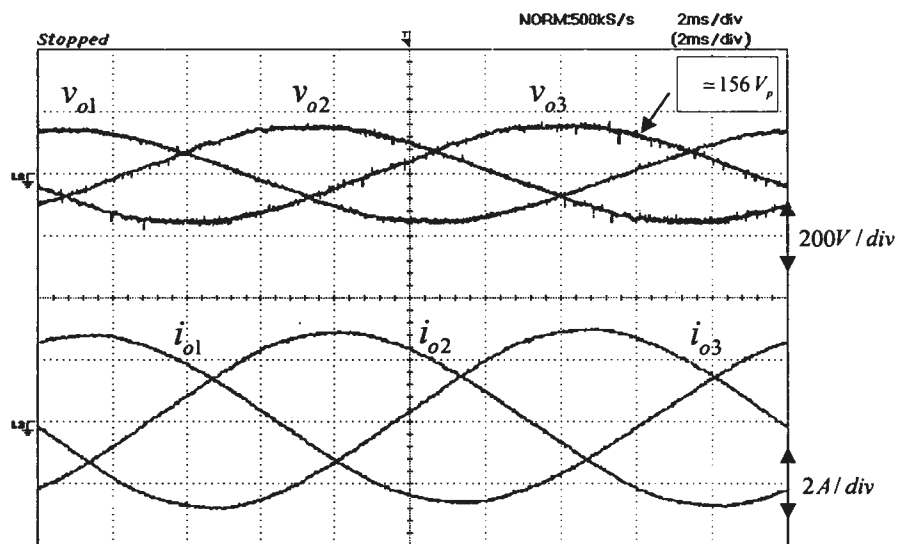
รูปที่ 4.45 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบ ผสม ที่วัฏจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน 35Ω ,ความเหนี่ยวนำ 30 mH



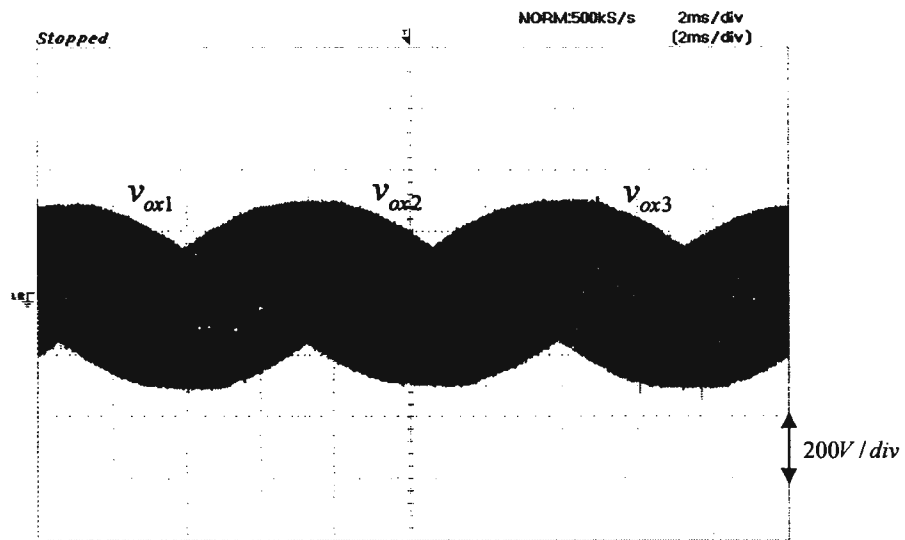
รูปที่ 4.46 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน 35Ω ,ความเหนี่ยวนำ 30 mH



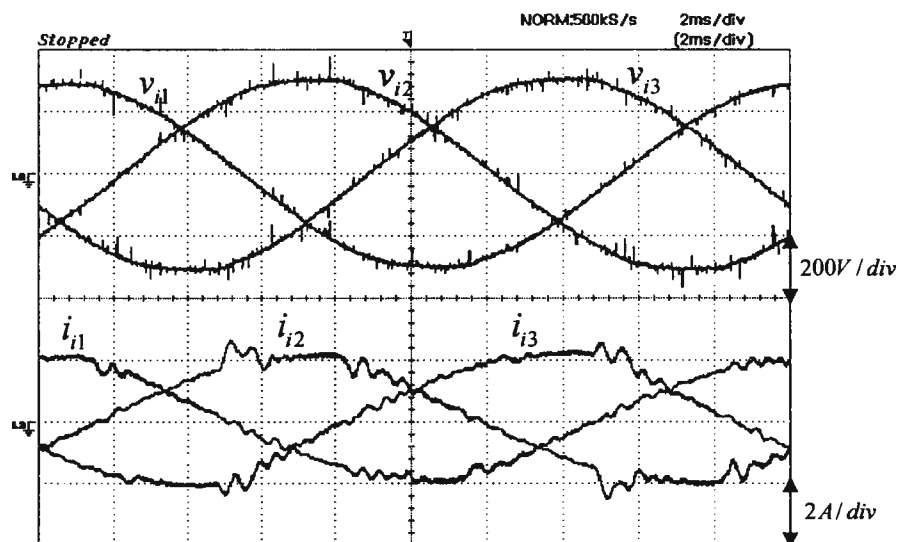
รูปที่ 4.47 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผลม
ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ \text{mH}$



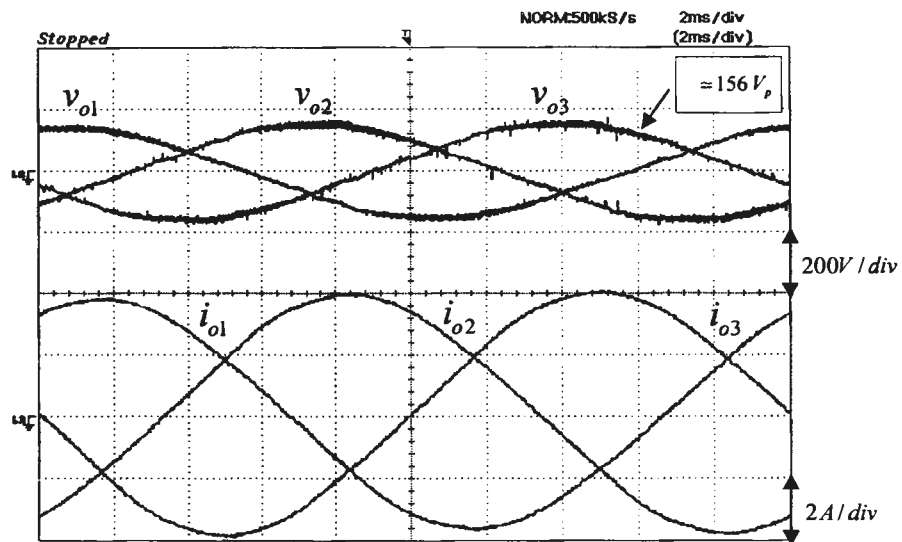
รูปที่ 4.48 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบ
ผลม ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ \text{mH}$



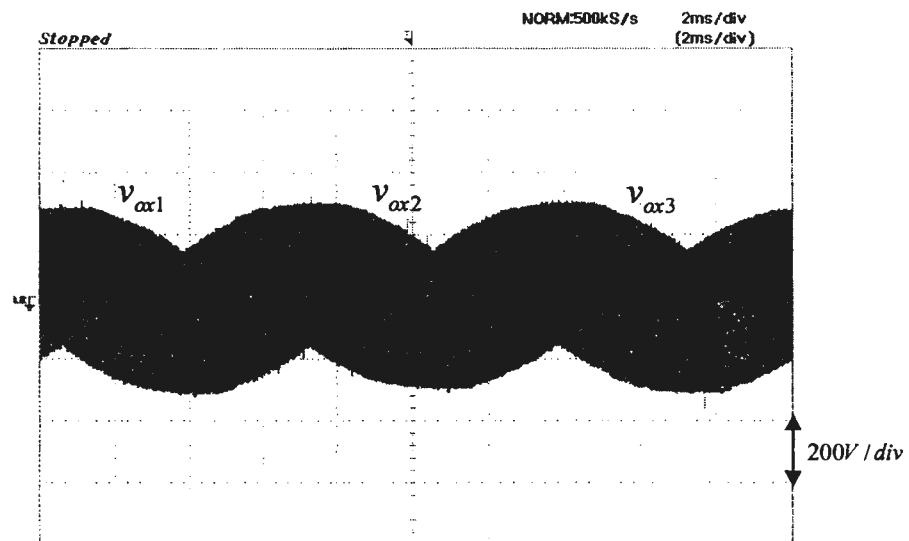
รูปที่ 4.49 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



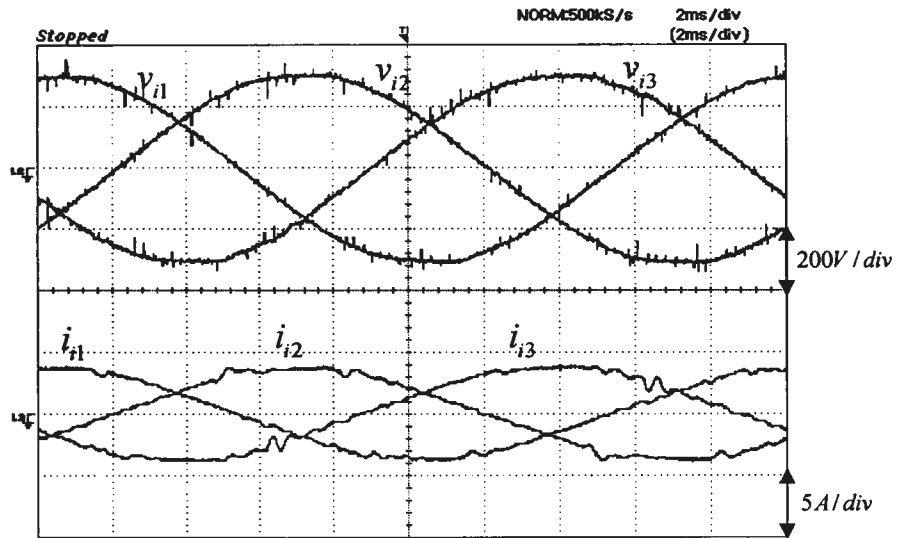
รูปที่ 4.50 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



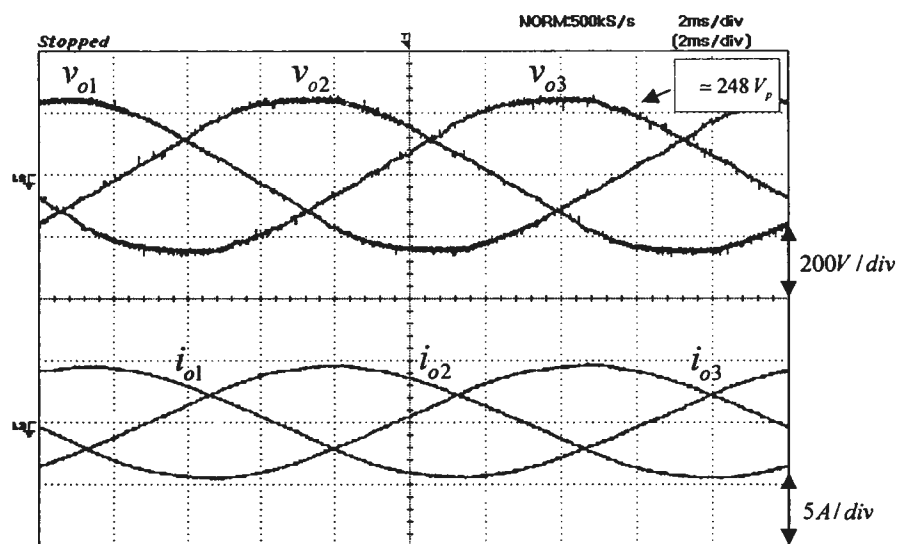
รูปที่ 4.51 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



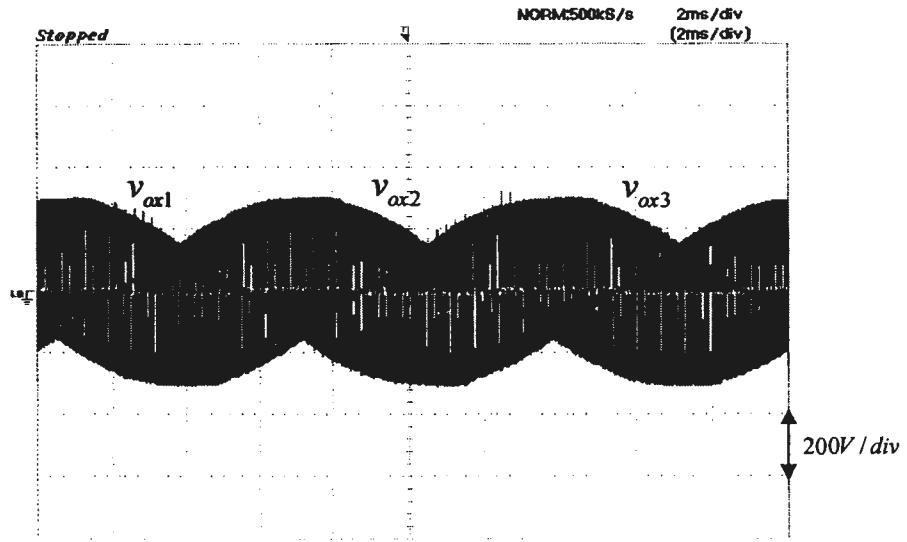
รูปที่ 4.52 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



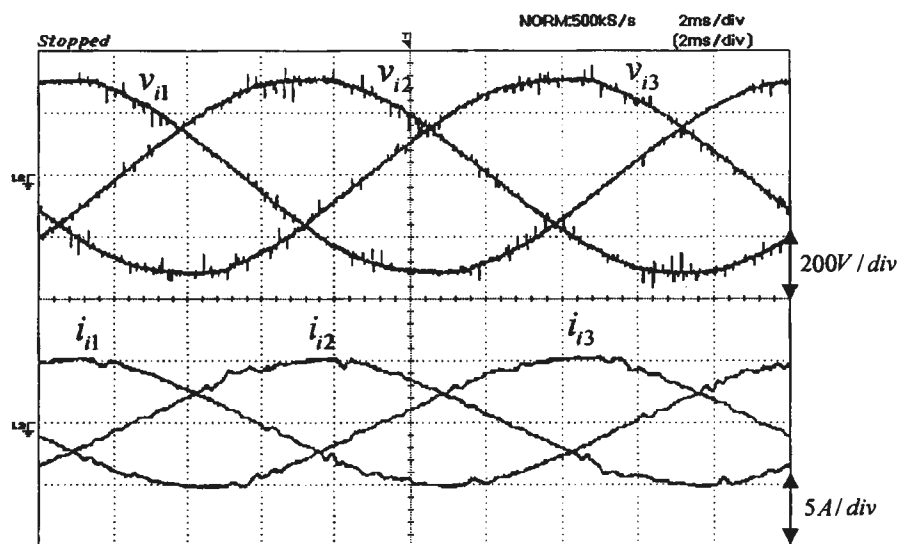
รูปที่ 4.53 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



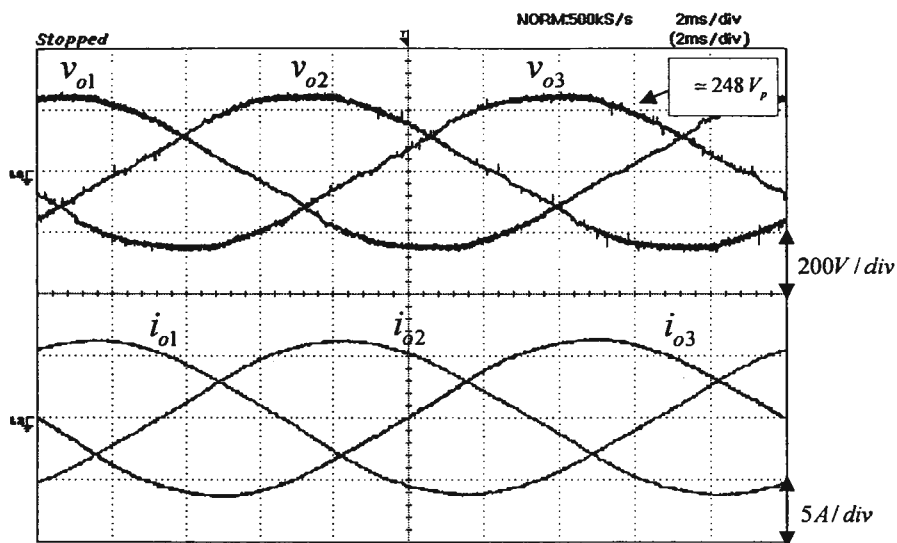
รูปที่ 4.54 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



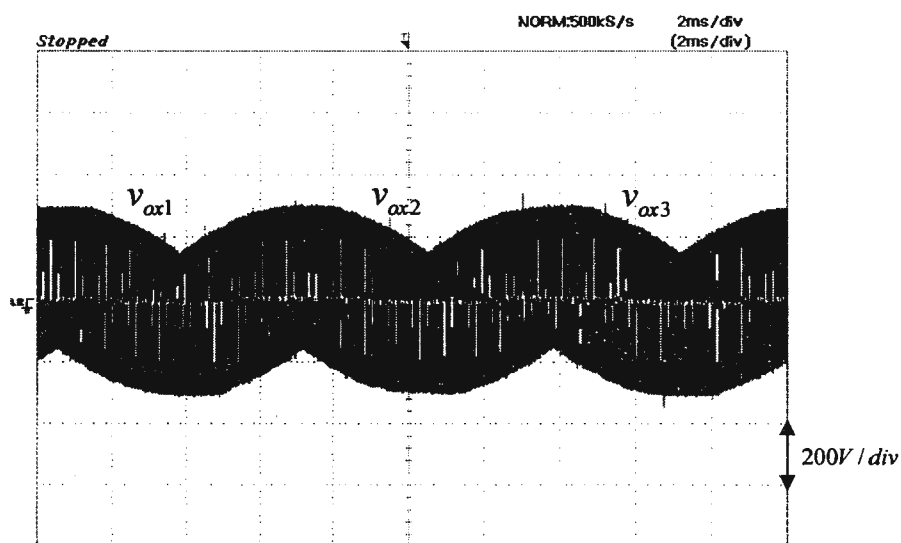
รูปที่ 4.55 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผลสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ \text{mH}$



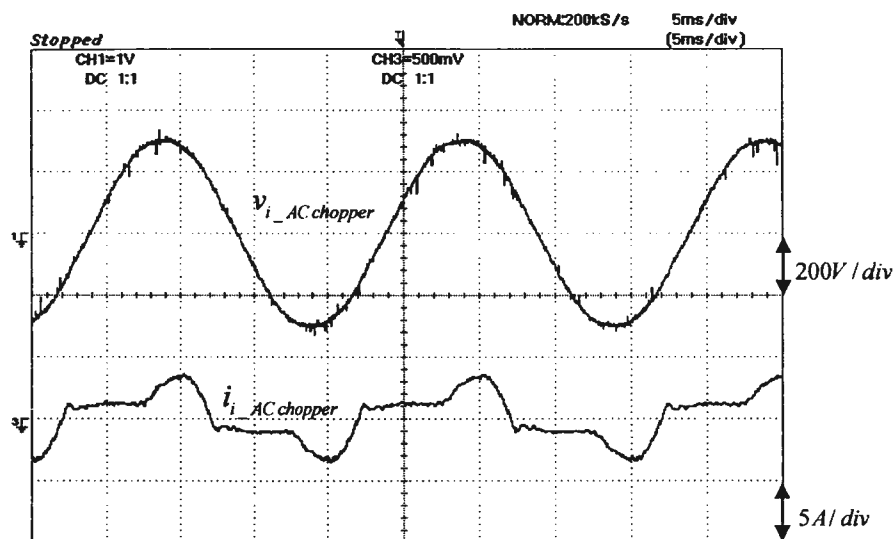
รูปที่ 4.56 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผลสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$,ความเหนี่ยวนำ $30\ \text{mH}$



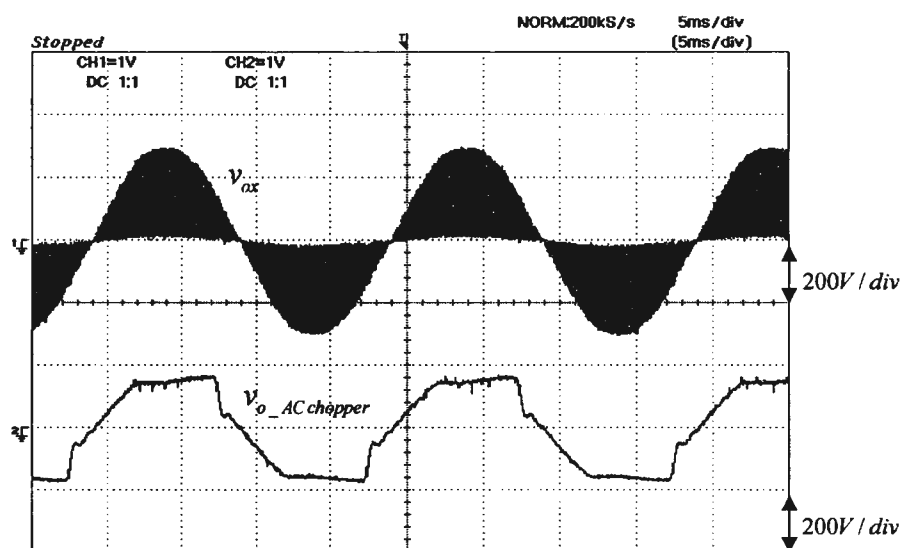
รูปที่ 4.57 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผลสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



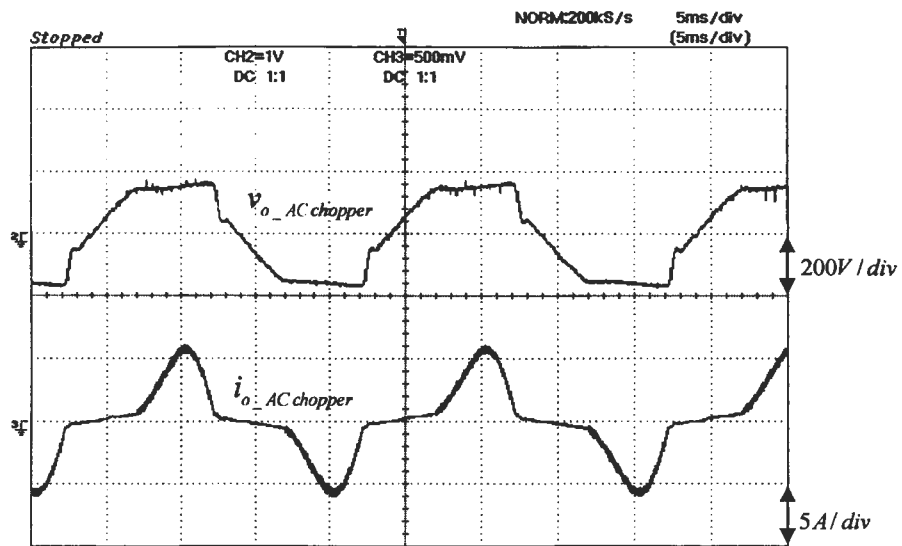
รูปที่ 4.58 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผลสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$



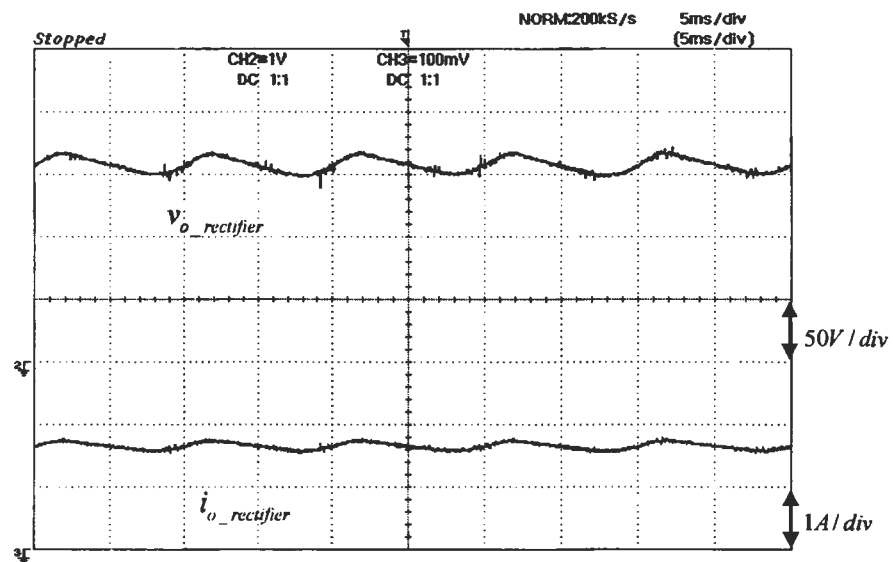
รูปที่ 4.59 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.6 โหลดไดโอดบริดจ์



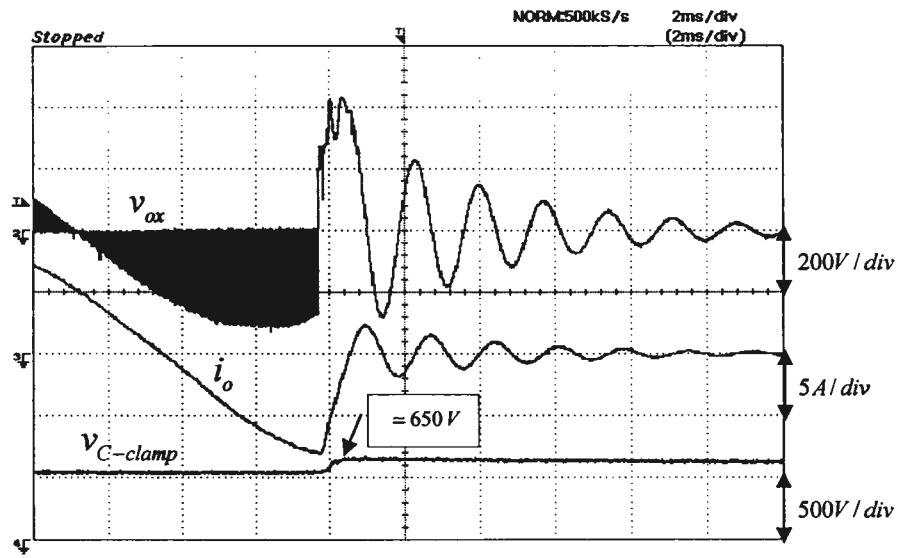
รูปที่ 4.60 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรองและแรงดันด้านออกหลังวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.6 โหลดไดโอดบริดจ์



รูปที่ 4.61 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.6 โหลดไดโอดบริดจ์



รูปที่ 4.62 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรไดโอดบริดจ์



รูปที่ 4.63 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์, กระแสด้านออก และแรงดันที่ตัวเก็บประจุของวงจรแคลมป์ เมื่อเกิดการป้องกันกระแสเกินพิกัด