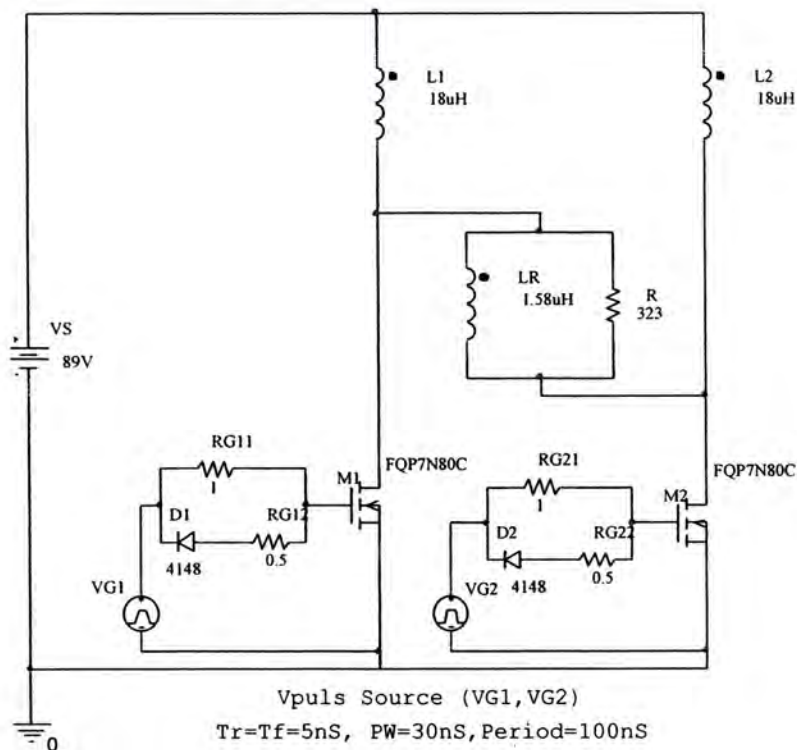


บทที่ 4

การจำลองการทำงานและผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองการทำงาน

ในบทที่ 3 ได้อธิบายการทำงานและแสดงวิธีการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแส ในบทนี้จะนำเสนอผลการจำลองและการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ วงจรที่ใช้ในการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.1 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลดที่มีต่อลักษณะการทำงานของวงจร และศึกษาแนวทางการควบคุมกำลังออกโดยการควบคุมแรงดันไฟตรงด้านเข้า ได้มีการการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อการแปรค่าความต้านทานโหลดและแรงดันไฟตรงด้านเข้า



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแสที่ใช้ในการจำลอง

4.1.1 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโหลด

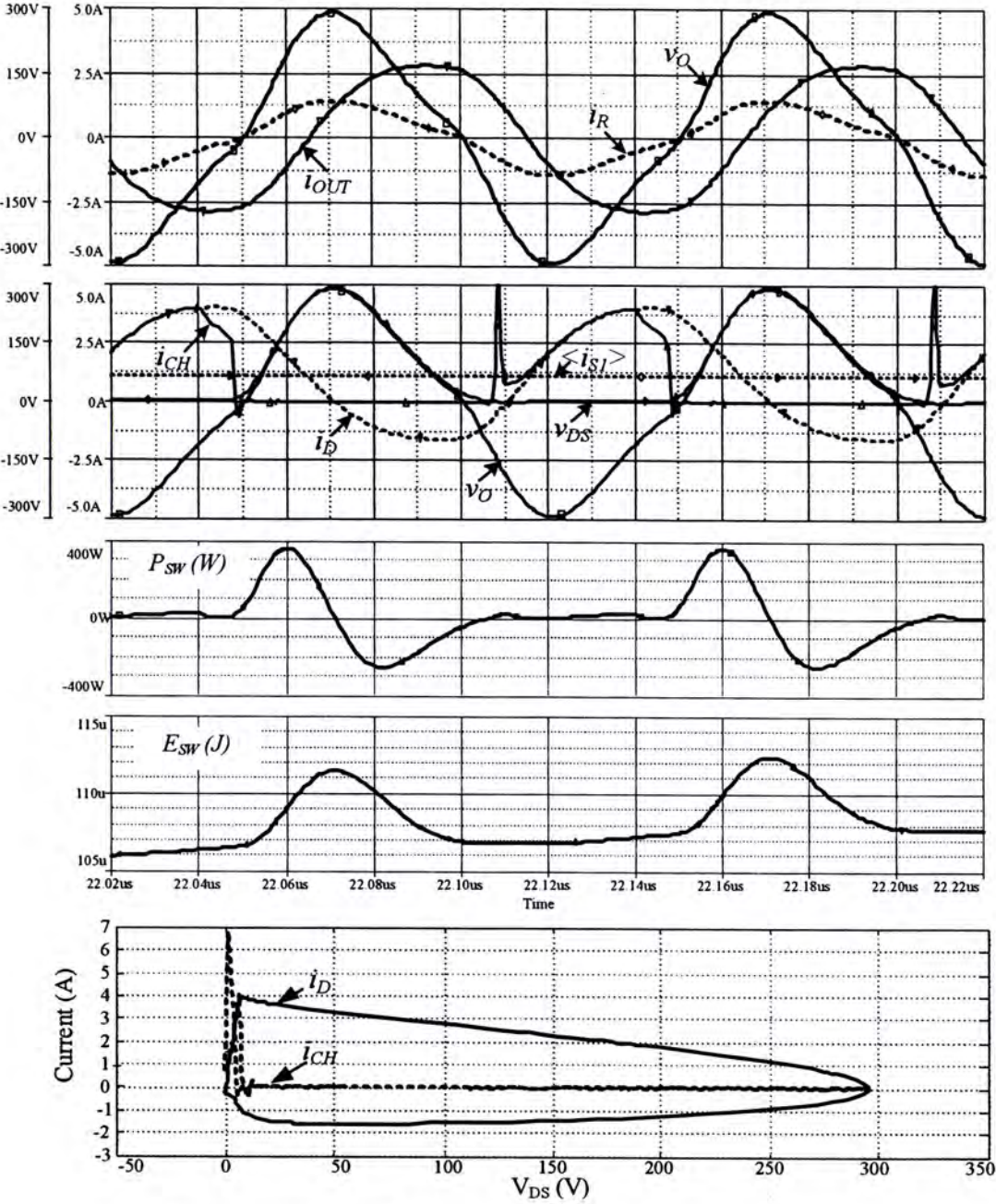
ในการศึกษาพฤติกรรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลด(R) กำหนดให้ $V_S=89V$, $L_1=L_2=18\mu H$, $L=1.58\mu H$, $R_{G11}=R_{G21}=1\Omega$, $R_{G12}=R_{G22}=0.5\Omega$, $V_G=12V$, และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลดรอบๆค่าความต้านทานพิกัด 323 Ω โดยมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันดังในตารางที่ 4.1 รูปที่4.2-4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันต่างๆที่ได้จากการจำลองสำหรับค่าความต้านทานค่าต่างๆ และ ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการจำลองที่ค่าความต้านทานโหลดต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานโหลดที่ใช้ในการจำลอง

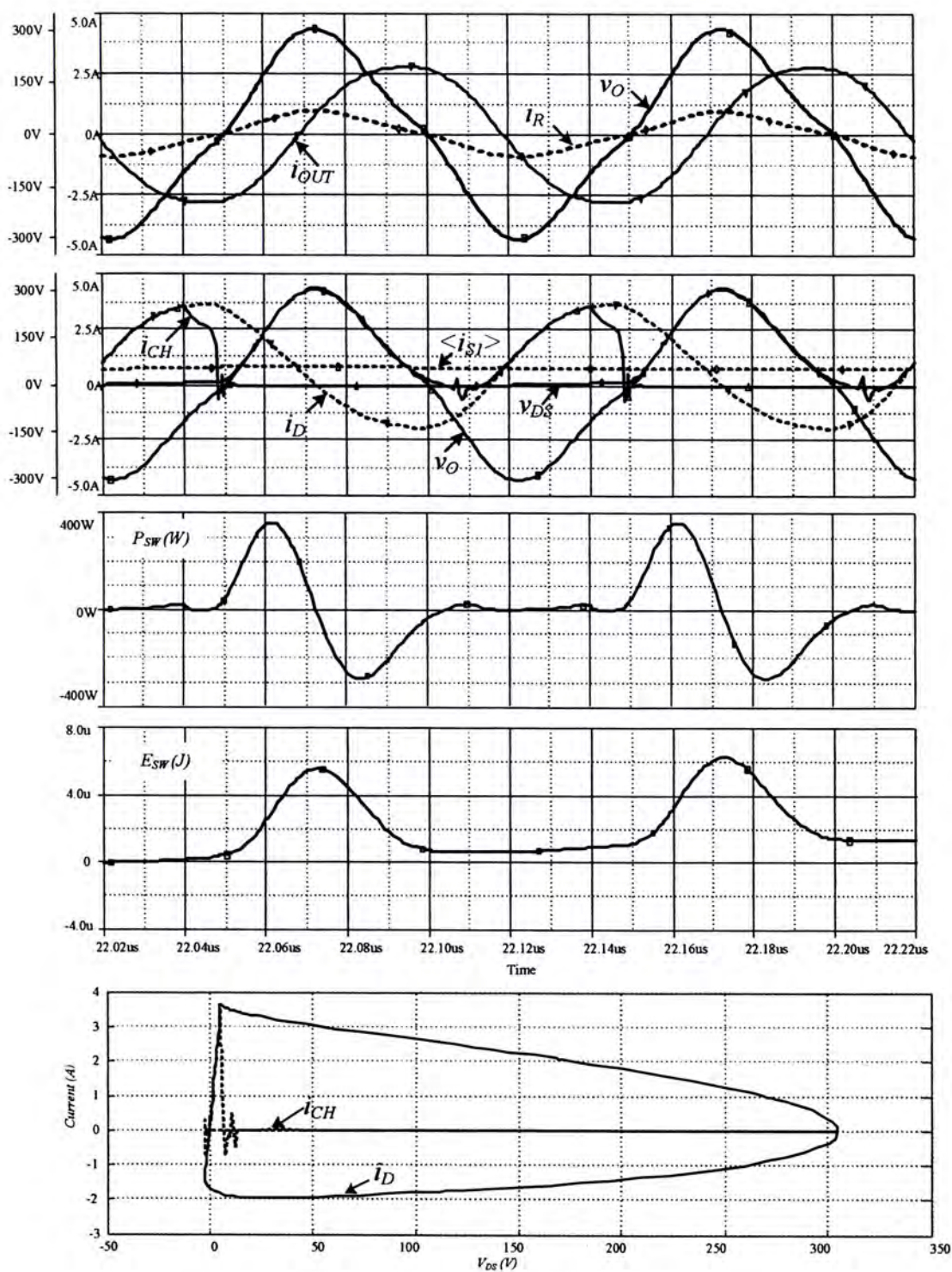
พารามิเตอร์	R ค่าที่ 1	R ค่าพิกัด	R ค่าที่ 3	R ค่าที่ 4
ค่าความต้านทานโหลด Ω	200 Ω	323 Ω	600 Ω	900 Ω

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการจำลองที่ค่าความต้านทานโหลดต่างๆ

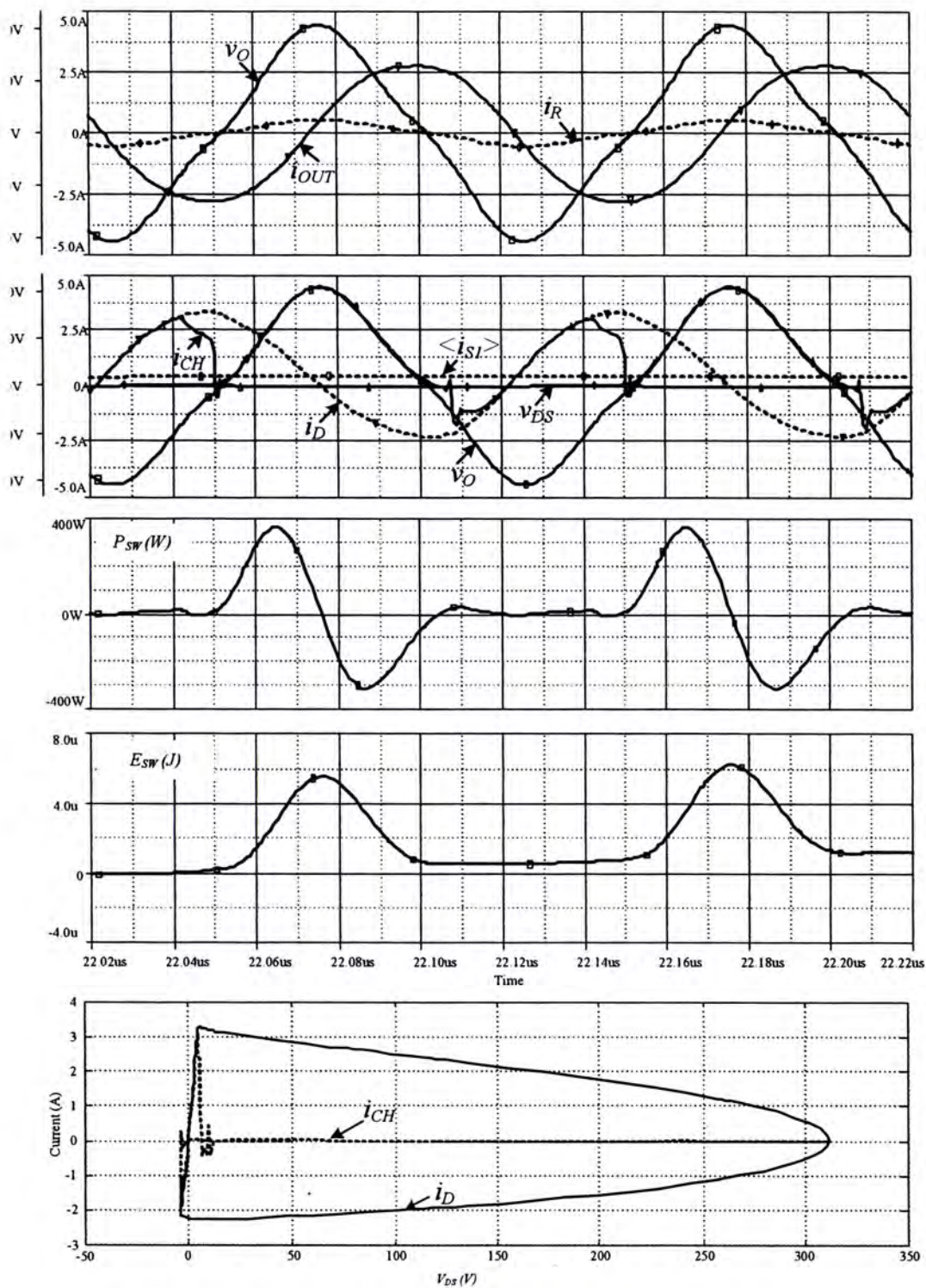
พารามิเตอร์	R ค่าที่1 200 Ω		R ค่าพิกัด 323 Ω		R ค่าที่3 600 Ω		R ค่าที่4 900 Ω	
	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง
V_S (V)	89	89	89	89	89	89	89	89
$2 \cdot I_S$ (A)	2.2	2.26	1.36	1.52	0.73	0.90	0.49	0.66
V_{OP} (V)	279.6	291.8	279.6	303.3	279.6	310.4	279.6	312.1
V_{ORMS} (V)	197.71	191.2	197.71	197.6	197.71	201.4	197.71	202.7
P_{OUT} (W)	195.4	182.8	121.02	120.9	65.15	67.6	43.43	45.7
Mosfet power loss (W)	-	18.86	-	15.5	-	13.98	-	13.8



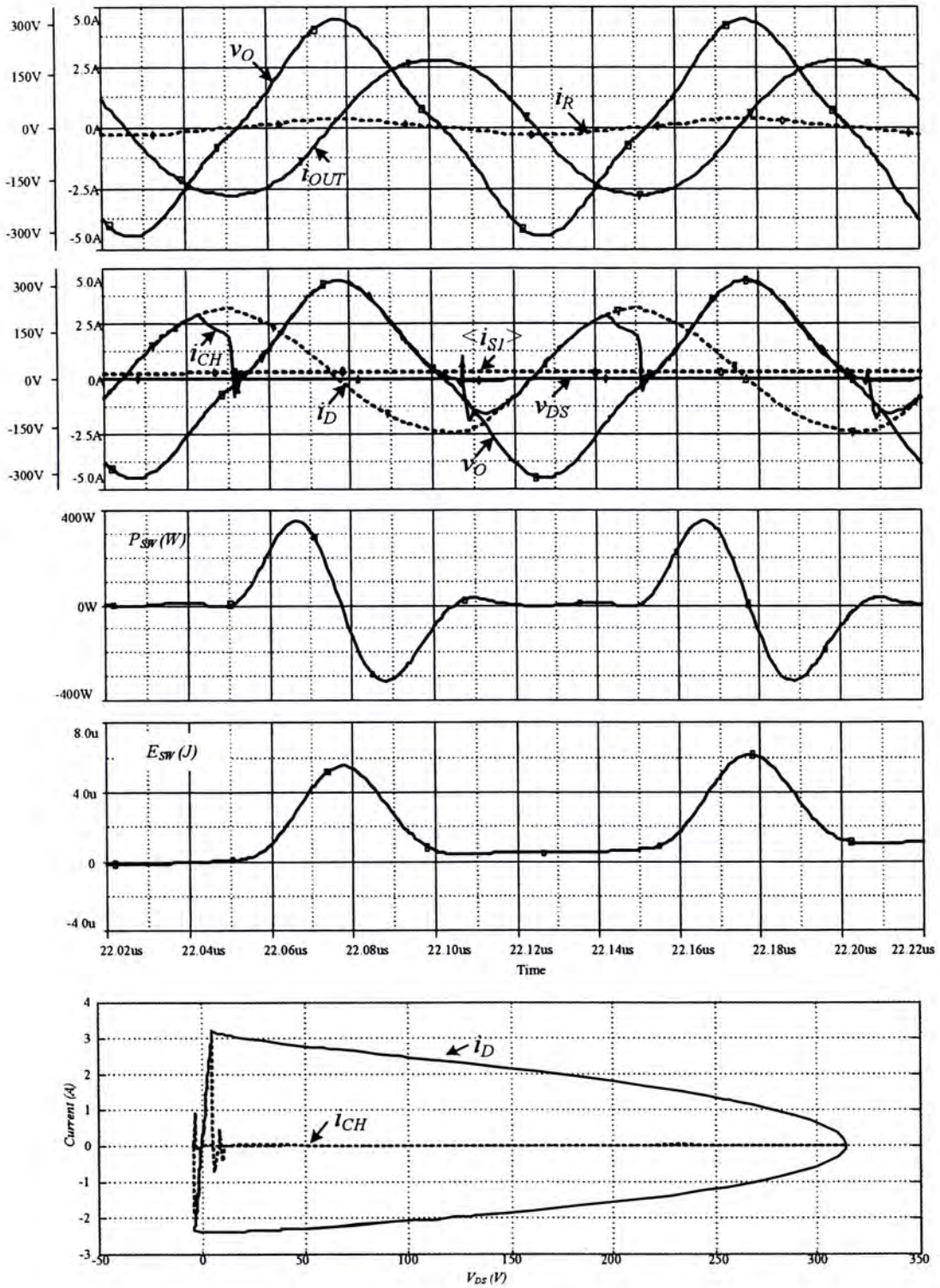
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองเมื่อความต้านทานโหลด $R=200\Omega$, $V_s=89V$



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองเมื่อความต้านทานโหลด $R=323\Omega$, $V_S=89V$



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองเมื่อความต้านทานโหลด $R=600\Omega$, $V_S=89V$



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองเมื่อความต้านทานโหลด $R=900\Omega$, $V_S=89V$

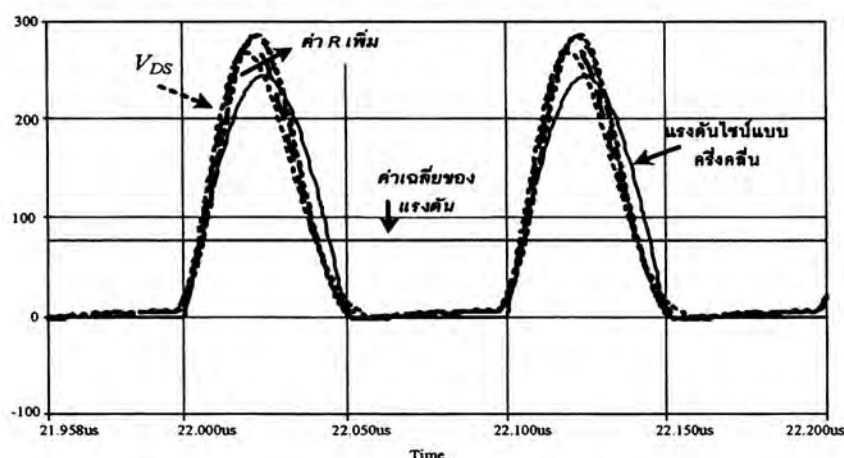
สรุป เนื่องจากแหล่งกระแสด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้จากการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับแหล่งแรงดันไฟตรง ซึ่งในภาวะอยู่ตัวค่าเฉลี่ยต่อคาบของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ตามกฎหมาย volt-sec balance ของตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันคร่อมมอสเฟตมีค่าเท่ากับขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้าดังแสดงในรูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลดจะมีผลให้รูปคลื่นของแรงดันออกเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยค่ายอดและค่าประสิทธิผลของแรงดันออกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามค่าความต้านทานโหลด ดังจะเห็นได้จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.2 เนื่องจากการคำนวณค่ายอดและค่าประสิทธิผลของแรงดันไม่ได้พิจารณาผลของความเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ของแรงดันคร่อมมอสเฟต ทำให้ผลการคำนวณมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานโหลดดังเช่นกรณีที่ได้จากผลการจำลอง เมื่อแรงดันออกมีค่าประมาณคงที่การเพิ่มความต้านทานโหลดจะมีผลทำให้กระแสออก กำลังออก และกระแสไฟตรงด้านเข้ามีค่าลดลง การลดลงของกระแสทั้งด้านเข้าและด้านออกทำให้กำลังสูญเสียในมอสเฟตลดลง

ในกรณีที่มีการลดค่าความต้านทานโหลดลงจะส่งผลทำให้กระแสผ่านตัวต้านทานมีขนาดเพิ่มขึ้นในขณะที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำโหลดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง มีผลทำให้กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสทั้งสองส่วนดังกล่าวข้างต้นมีมูฟเฟสล่าหลังแรงดันออกน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของกระแสด้านเข้าตามการเพิ่มขึ้นของกำลังออกจะส่งผลให้ผลต่างระหว่างกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์กับกระแสด้านเข้ามีขนาดลดลงทำให้อัตราการคายประจุของตัวเก็บประจุแผ่นลดลง ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองที่ค่าความต้านทานโหลดเท่ากับ 200Ω ซึ่ง การลดลงของแรงดัน V_{DS} เป็นไปอย่างค่อนข้างช้า ส่งผลให้แรงดันคร่อมมอสเฟตไม่ลดลงเป็นศูนย์เมื่อครบคาบการสวิตช์ ดังนั้นเมื่อมีการขับนำให้มอสเฟตนำกระแสจึงมีการ discharge ตัวเก็บประจุแผ่นในมอสเฟต ดังจะสังเกตได้จากค่าของกระแสในแกนแนลที่มีการกระชากในขณะที่เริ่มนำกระแส กระแสกระชากดังกล่าวจะทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น

การคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียที่มอสเฟตในหนึ่งคาบการสวิตช์ คำนวณได้จากผลต่างของพลังงานที่เกิดขึ้นที่มอสเฟต (E_{mos}) ต่อคาบความถี่การสวิตช์ ค่าพลังงานที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตเป็นผลลัพธ์ของค่าปริพันธ์ของค่า instantaneous power โดยค่านี้เป็นผลคูณระหว่างกระแส $i_D(t)$ กับแรงดัน $v_{DS}(t)$ ที่มอสเฟต สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{mos} = \frac{1}{T_S} \times E_{mos} = \frac{1}{T_S} \int_{t=0}^{t=T_S} v_{DS}(t) \cdot i_D(t) \times dt \quad (4.1)$$

การคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในมอสเฟตด้วยวิธีหาผลต่างของพลังงานในหนึ่งคาบการสวิตช์ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นผลรวมของกำลังสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์และการนำแรงแของมอสเฟต



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองเปรียบเทียบแรงดัน v_{DS} ที่ค่าความต้านทานโหลดต่างๆ

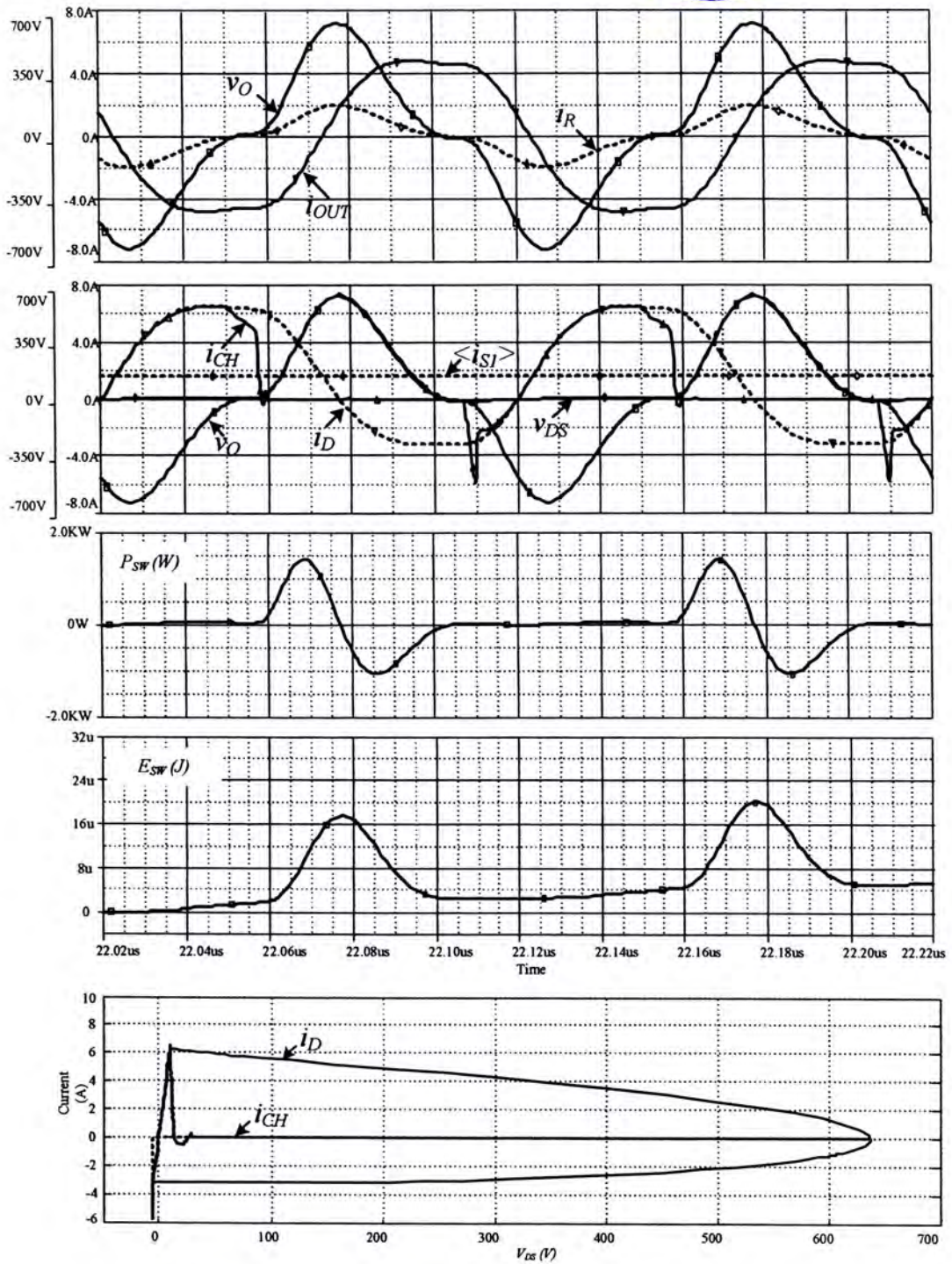
ปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลด จากผลของการจำลองการเปลี่ยนค่าความต้านทานโหลดตั้งแต่ 200-900 Ω พบว่าเมื่อความต้านทานโหลดมีค่าต่ำ (200 Ω) ทำให้การลดลงของแรงดันคร่อมมอสเฟตเป็นไปอย่างค่อนข้างช้าเนื่องจากขนาดของกระแส I_S ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากำลังออกของโหลดที่เพิ่มขึ้นในขณะที่แรงดันออกมีค่าประมาณคงที่ ดังนั้นขนาดกระแสของตัวเหนี่ยวนำในวงจรโหลดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงทำให้ผลต่างของกระแส i_{out} กับกระแส I_S ที่เป็นกระแสที่ไปคายประจุของตัวเก็บประจุมีค่าลดลง เพื่อที่จะให้มอสเฟตทำงานที่สวิตช์แรงดันสูงจะต้องเพิ่มระยะเวลาการคายประจุนี้ให้สูงขึ้น สามารถทำได้โดยการหน่วงเวลาสัญญาณขับนำให้เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มเวลาของ dead time ของสัญญาณขับนำให้มากขึ้น แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดที่สัญญาณขับนำจะต้องมีระยะเวลาไม่เกินกว่าที่กระแสเดรนของมอสเฟตจะเปลี่ยนทิศ (จากลบเป็นบวก) ทำให้เกิดการประจุตัวเก็บประจุนี้อีกครั้ง อีกวิธีสามารถทำได้จากการเพิ่มคาบเวลาในการสวิตช์โดยการลดความถี่การสวิตช์ลง เพื่อเพิ่มระยะเวลาของคาบการสวิตช์ ทำให้เวลาที่ใช้ในการคายประจุของตัวเก็บประจุยาวนานขึ้น

4.1.2 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า

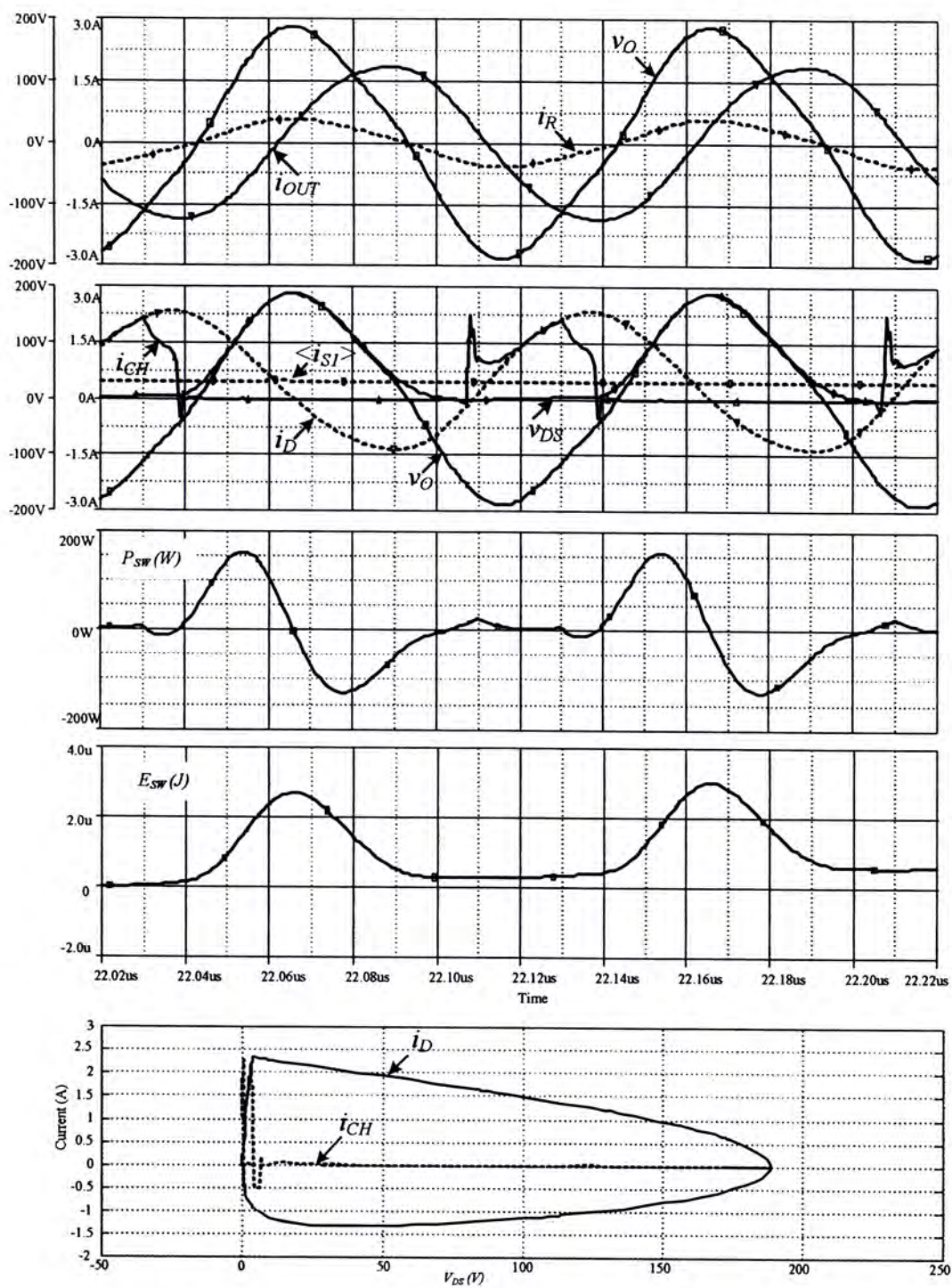
จากการศึกษาพฤติกรรมของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลดจะเห็นได้ว่าแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ขึ้นกับขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้า พฤติกรรมดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานโหลด เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมกำลังด้านออกในหัวข้อนี้จะศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า ที่ค่าความต้านทานโหลด $R=323\Omega$ คงที่ โดยมีค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าที่แตกต่างกันดังในตารางที่ 4.3 และใช้พารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการจำลองในหัวข้อ 4.1.1 รูปที่4.7-4.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันต่างๆ ที่ได้จากการจำลองสำหรับค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าค่าต่างๆ และตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองที่ค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าที่ใช้ในการจำลองที่ความต้านทานโหลด $R = 323\Omega$

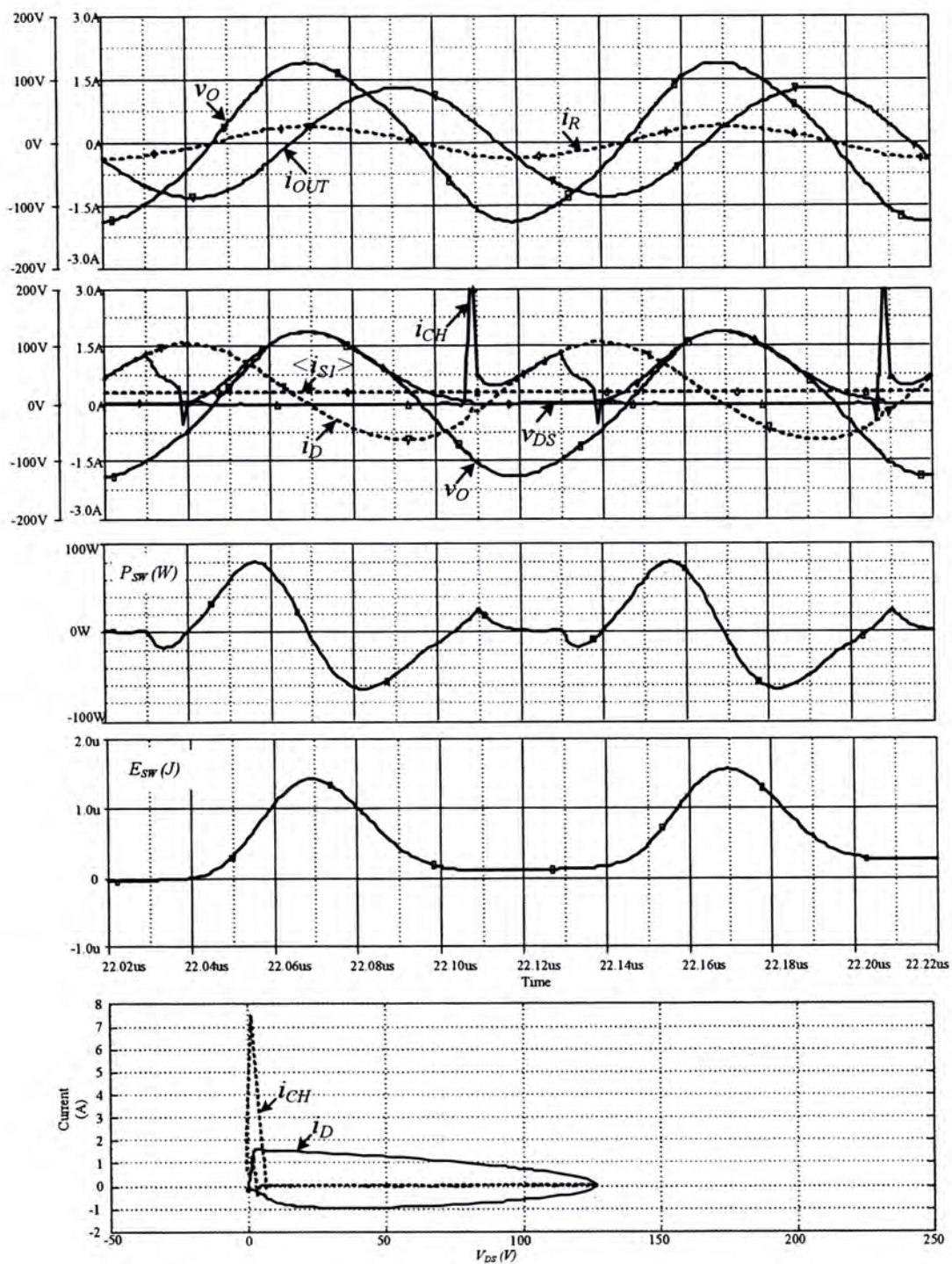
แรงดันด้านเข้า V_s	แรงดันค่าที่ 1 $V_s = 150V$	แรงดันค่าที่พิกัด $V_s = 89V$	แรงดันค่าที่ 2 $V_s = 61V$	แรงดันค่าที่ 3 $V_s = 45V$
กำลังออก P_{OUT} (W)	420	120	50	25



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองที่ความต้านทานโหลด $R=323\Omega$ และ $V_S=150V$



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองที่ความต้านทานโหลด $R=323\Omega$ และ $V_S=61V$



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองที่ความต้านทานโหลด $R=323\Omega$ และ $V_S=45V$

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟตรงด้านเข้า ที่ $R=323\ \Omega$

พารามิเตอร์	$V_S=150V$	$V_S=89V$	$V_S=61V$	$V_S=45V$
$2 \cdot I_S$ (A)	3.18	1.52	0.92	0.6
V_{OP} (V)	633	303.3	187.3	126
V_{ORMS} (V)	369.9	197.6	127.1	87.8
V_{DSP} (V)	638	305.6	188.6	126.9
P_{OUT} (W)	423.6	120.9	50	23.9
Mosfet power loss (W)	54.2	15.5	7.14	4.28

สรุป การควบคุมกำลังออกของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้ามีข้อจำกัดอยู่ที่ค่ายอดของแรงดันคร่อมมอสเฟตต้องไม่เกินค่าสูงสุดที่มอสเฟตสามารถรับได้ และการทำงานที่ต้องเป็นแรงดันศูนย์ ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ทำงานที่แรงดันด้านเข้าสูงสุดจากผลการจำลองในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 ในกรณีนี้แรงดันด้านออกมีค่าสูงสุด กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแส i_D ที่เป็นกระแสการคายประจุของตัวเก็บประจุแผ่นมีค่าสูงขึ้นแรงดันคร่อมมอสเฟตลดลงมาอย่างรวดเร็วทำให้แรงดันด้านออกเกิดความเพี้ยนตัดข้าม วงจรอินเวอร์เตอร์จะไม่มีปัญหาในเรื่องการขับนำที่ไม่เป็นแรงดันศูนย์ ส่วนการสูญเสียของมอสเฟตที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นสาเหตุจากการนำกระแสที่เพิ่มขึ้นของมอสเฟต

การจำลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ค่าแรงดันด้านเข้าต่ำสุด จะเห็นได้ว่าเมื่อลดขนาดแรงดันด้านเข้าลงจะทำให้ค่ากระแสต่างๆลดลง โดยเฉพาะกระแสในตัวเหนี่ยวนำไหลที่ทำหน้าที่คายประจุของตัวเก็บประจุแผ่น ปัญหาของการทำงานที่จุดนี้คือการขับนำมอสเฟตที่ไม่เป็นแรงดันศูนย์ ในรูปที่ 4.9 ในจังหวะเริ่มขับนำมอสเฟตที่ไม่เป็นแรงดันศูนย์จะเกิดการกระชากของกระแสแกนแนล การเกิดกระชากดังกล่าวเป็นการคายประจุของตัวเก็บประจุแผ่น ทำให้กำลังสูญเสียในขณะเริ่มนำกระแสมีค่าสูงขึ้น จากผลการจำลองในตารางที่ 4.4 เมื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่แรงดัน $V_S=61V$ และ $V_S=45V$ (เกิดการสูญเสียในขณะเริ่มนำกระแสจากแรงดันคร่อมมอสเฟตในขณะเริ่มนำกระแสไม่เป็นศูนย์) เห็นได้ว่าค่ากำลังสูญเสียที่มอสเฟตลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับค่ากำลังออกที่ลดลง

การเกิดความเพี้ยนตัดข้ามของแรงดันออกเมื่อแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้อีกแนวทางหนึ่งคือ การที่แรงดันคร่อมมอสเฟตที่สูงขึ้นทำให้ผลลัพธ์ของตัวเก็บประจุประสิทธิผลมีค่าเล็กลง กล่าวคือความถี่เรโซแนนซ์ของโหลดมีค่าสูงขึ้น จึงเกิดความเพี้ยนตัดข้ามของแรงดันออก การแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยวิธีการเพิ่มความถี่การสวิตช์ของมอสเฟตให้มีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อชดเชยให้คาบเวลาการสวิตช์ของมอสเฟตกับแรงดันคร่อมมอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน ในทางกลับกันเมื่อลดค่าแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ที่ส่งผลให้แรงดันคร่อมมอสเฟตมีการลดลงที่ช้าและแรงดันไม่เป็นศูนย์เมื่อเริ่มขับนำ การแก้ปัญหานี้ใช้วิธีการเพิ่มค่า dead time ของสัญญาณขับนำ หรือการลดความถี่การสวิตช์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ช่วยให้มอสเฟตทำงานที่ย่านแรงดันศูนย์

การปรับค่า dead time และความถี่การสวิตช์นั้นไม่ส่งผลต่อค่ากำลังงานด้านออกอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนค่าแรงดันไฟตรงทางด้านเข้า การปรับค่าดังกล่าวข้างต้นเป็นเพียงการปรับแก้จังหวะการสวิตช์ของมอสเฟตเมื่อจังหวะการสวิตช์ของมอสเฟตไม่ได้ทำงานที่แรงดันศูนย์เท่านั้น

4.2 การควบคุมกำลังออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

การควบคุมกำลังออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ที่ใช้แหล่งกระแส ที่ได้จากการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง ทำได้โดยการควบคุมแรงดันไฟตรงด้านเข้า เพราะไม่สามารถควบคุมด้วยการแปรค่าความถี่การสวิตช์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านการทำงานของสวิตช์ที่ต้องเป็นแบบแรงดันศูนย์ตลอดย่านการทำงาน และความเพี้ยนของรูปคลื่นของแรงดันออก ย่านของการควบคุมกำลังออกและการแปรค่าความต้านของโหลดจะถูกจำกัดโดย กระแสสูงสุดผ่านมอสเฟต แรงดันสูงสุดคร่อมมอสเฟตและการทำงานของสวิตช์ที่ต้องเป็นแบบแรงดันศูนย์

ได้มีการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการแปรค่าความต้านทานโหลดระหว่าง $200\text{--}900\ \Omega$ โดยแปรค่าแรงดันเข้าเพื่อให้ได้กำลังออกสูงสุดที่จำกัดด้วยพิกัดสูงสุดของกระแสและแรงดันที่มอสเฟต ผลการจำลองให้ค่ากระแส แรงดัน กำลังออก และกำลังสูญเสียในสวิตช์ดังในตารางที่ 4.5

นอกจากนี้ยังได้มีการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยแปรค่าแรงดันเข้าเพื่อให้ได้กำลังออกต่ำสุดที่มอสเฟตยังคงทำงานแบบแรงดันศูนย์ ผลการจำลองให้ค่ากระแส แรงดัน กำลังออก และกำลังสูญเสียในสวิตช์ดังในตารางที่ 4.6

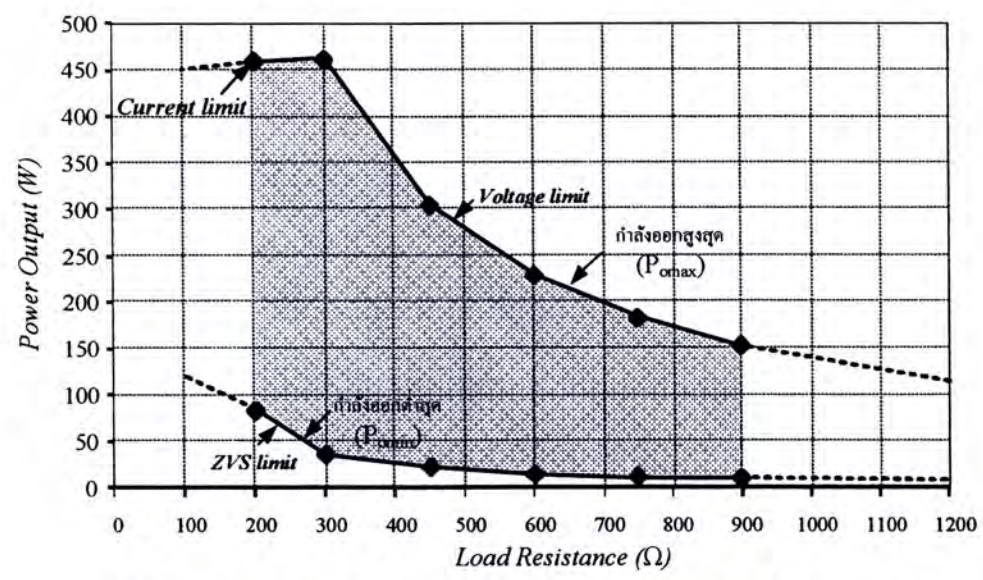
จากผลการจำลองเพื่อหาค่าการควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 สามารถแสดงกราฟหาค่าการควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 4.10 จากกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากำลังออกสูงสุดของอินเวอร์เตอร์สำหรับความต้านทานโหลดที่ต่ำกว่า 300 Ω จะถูกจำกัดด้วยค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านมอสเฟต ส่วนความต้านทานโหลดที่อยู่ระหว่าง 300-900 Ω กำลังออกสูงสุดของอินเวอร์เตอร์จะถูกจำกัดด้วยแรงดันสูงสุดคร่อมมอสเฟต สำหรับขีดจำกัดต่ำสุดของกำลังออกตลอดย่านค่าความต้านทาน จะถูกจำกัดด้วยการทำงานของมอสเฟตที่ต้องเป็นสวิตช์แบบแรงดันศูนย์

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองวงจรเมื่อให้ค่าแรงดันด้านออกมีค่าสูงสุด

พารามิเตอร์	$R=200\ \Omega$	$R=300\ \Omega$	$R=450\ \Omega$	$R=600\ \Omega$	$R=750\ \Omega$	$R=900\ \Omega$
V_S (V)	134	151	148	147	146.5	146
$2 \cdot I_S$ (A)	3.76	3.42	2.38	1.87	1.56	1.34
I_{DP} (A)	6.5	6.2	6.01	5.72	5.56	5.44
V_{DSP} (V)	488.4	640.4	639	638.9	639	638.6
V_{ORMS} (V)	303.2	372.1	370.5	370.8	371	370.8
P_{OUT} (W)	460	461.5	305	229.2	183.5	152.8
Mosfet power loss (W)	45.8	56.1	48.4	46.2	44.8	44.2

ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองวงจรเมื่อลดกำลังออกต่ำสุดโดยไม่เกิดการขับน้ำที่ผิดจังหวะ

พารามิเตอร์	$R=200\ \Omega$	$R=300\ \Omega$	$R=450\ \Omega$	$R=600\ \Omega$	$R=750\ \Omega$	$R=900\ \Omega$
V_S (V)	60	50	48	45	45	45
$2 \cdot I_S$ (A)	1.42	0.8	0.54	0.39	0.33	0.29
I_{DP} (A)	2.43	1.96	1.74	1.56	1.53	1.5
V_{DSP} (V)	196.1	154.1	148.4	137.3	137.9	138.1
V_{ORMS} (V)	128.6	103.3	100.3	93.6	94	94.4
P_{OUT} (W)	82.7	35.6	22.4	14.6	11.8	9.9
Mosfet power loss (W)	7.88	5.69	4.92	4.39	4.31	4.28



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองย่านการควบคุมกำลังออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

จากกราฟในรูปที่ 4.10 เส้นกราฟด้านบนแสดงถึงย่านกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูงสุด ในย่านดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณีคือ กรณีแรกย่านการควบคุมกระแสที่ความต้านทานโหลดมีค่า 200 Ω ค่าสูงสุดของกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ถูกจำกัดด้วยกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟต กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟตถูกจำกัดไว้ที่ 6.5A เมื่อ V_S เท่ากับ 134 โวลต์ กรณีที่สองย่านการควบคุมแรงดัน ในช่วงค่าความต้านทาน 300-900 Ω กำลังออกของ

อินเวอร์เตอร์จะถูกจำกัดที่แรงดันคร่อมมอสเฟตสูงสุด ค่าประสิทธิภาพของแรงดันออกในย่านนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 370 โวลต์ และค่ายอดของแรงดันคร่อมมอสเฟตมีค่าเท่ากับ 640 โวลต์

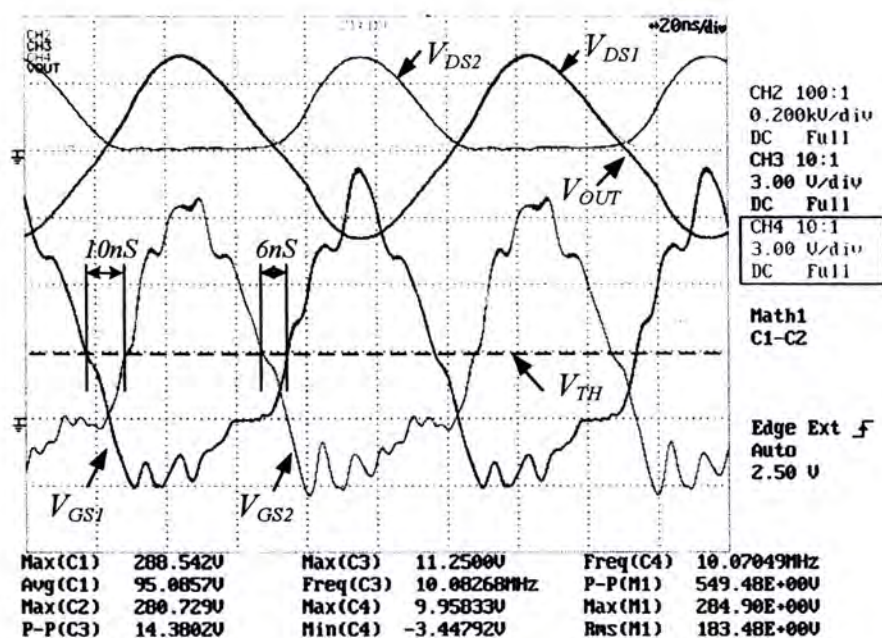
ส่วนกราฟด้านล่างแสดงถึงย่านกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าต่ำสุด โดยย่านการควบคุมนี้ถูกจำกัดด้วยจังหวะการสวิตช์ของมอสเฟตที่เป็นแบบแรงดันศูนย์ เมื่อค่าความต้านทานโหลดมีค่าสูงกว่า 600Ω ทำให้ไม่สามารถลดค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้าได้ต่ำกว่า 45 โวลต์ เนื่องจากขีดจำกัดของการสวิตช์ของมอสเฟตที่แรงดันศูนย์

4.3 ผลการทดลอง

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแสที่ใช้ทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 สวิตช์ไวงานใช้มอสเฟตของ FairChild เบอร์ FQP7N80C ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 800V กระแส 6.6A มีค่าความต้านทาน $R_{DS(on)}$ เท่ากับ 1.9Ω ค่าตัวเก็บประจุแผ่นด้านออก C_{oss} เท่ากับ 155pF โดยใช้วงจรประมวล SN74LS624 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 20MHz และต่อกับวงจรหาร 2 ที่ใช้ J-K flip-flop และวงจรปรับค่า dead-time ที่ใช้ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ C 150pF กับตัวต้านทานปรับค่าได้ 500Ω สัญญาณที่ได้จะมีความถี่ 10MHz และสามารถปรับ dead-time ได้ สัญญาณที่ผ่านการปรับแต่งที่เหมาะสมแล้วจะใช้เป็นสัญญาณเข้าของไอซีวงจรประมวล สำหรับขับนำ FET เบอร์ IXFH414 ที่มีค่าความต้านทานภายในเท่ากับ 1Ω เป็นสัญญาณขับนำ โดยแรงดันขับนำ V_G ที่ระดับ high มีค่าเท่ากับ 12 โวลต์ เนื่องจากตัวต้านทานของวงจรโหลดต้องรับกำลังออกที่สูงถึง 100W เพื่อให้ได้ค่ากำลังงานของตัวต้านทานโหลดที่สูงขึ้นจึงใช้ตัวต้านทาน 470Ω 50W จำนวน 2 ตัวอนุกรมกันจำนวน 3 ชุดและใช้ตัวต้านทานอนุกรม 3 ชุดต่อขนานกัน ได้ค่าตัวต้านทานของโหลดมีค่าเท่ากับ 313Ω อย่างไรก็ดีเนื่องจากความคาดเคลื่อนของค่าความต้านทานโหลด ค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 323Ω ตัวเหนี่ยวนำในวงจรโหลด(L)มีค่าเท่ากับ 1.58uH พันบนแกนชนิด pot- core จำนวน 4 รอบ และตัวเหนี่ยวนำด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์(L_1, L_2) มีค่าเท่ากับ 18uH โดยพันบนแกนชนิด toroid จำนวน 17 รอบ ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองพันด้วยลวดทองแดงแบบ litz wire ขนาด AWG46 จำนวน 175 เส้น

4.3.1 ผลการวัดสัญญาณขับนำเกต

รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นสัญญาณขับนำเกตและแรงดันคร่อม FET ที่ทำงานแบบคู่ ประกอบกัน สัญญาณขับนำจะมีช่วงที่มอสเฟตทั้งสองหยุดนำกระแส (dead-time) เนื่องจากการทำงานของวงจรดังกล่าวจะต้องมีช่วงเวลาที่มอสเฟตทั้งสองหยุดนำกระแสพร้อมกันเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายของแรงดันออกในช่วงผ่านศูนย์ และเพื่อให้การคายประจุของตัวเก็บประจุแห่งของมอสเฟตยังดำเนินต่อไปจนแรงดันคร่อมมอสเฟตมีค่าลดลงเป็นศูนย์ก่อนการขับนำมอสเฟตอีกครั้ง จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า rise-time, fall-time ของแรงดัน V_{GS} เป็นค่าที่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคาบการทำงานของสวิตช์ การปรับค่า dead time ให้สอดคล้องกับการจำลองทำได้โดยการปรับวัฏจักรงานของสัญญาณขับนำ จากการทดลองวัดแรงดันคร่อมเกต v_{GS} ที่มอสเฟตเท่ากับ $V_{TH}(3V)$ พบว่าระยะเวลา dead time ของสัญญาณทั้งสองต่างกันอยู่ประมาณ 4ns

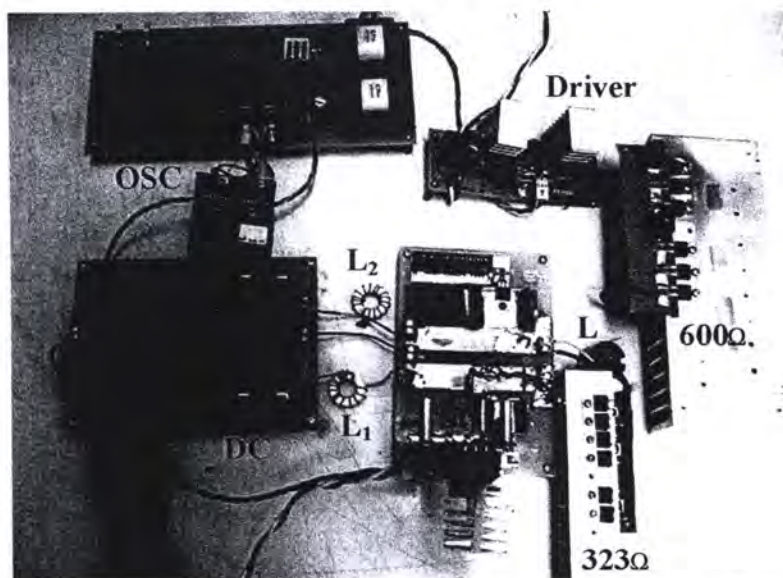


รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดัน $V_{GS1,2}$, $V_{DS1,2}$ และ V_{OUT} ที่ความต้านทานโหลด 323 Ω

4.3.2 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความต้านทานโหลดเปลี่ยนแปลง

เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้จากการจำลองการทำงานจึงได้สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์เร-

โซแนนซ์แหล่งกระแสขึ้นซึ่งมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 4.13

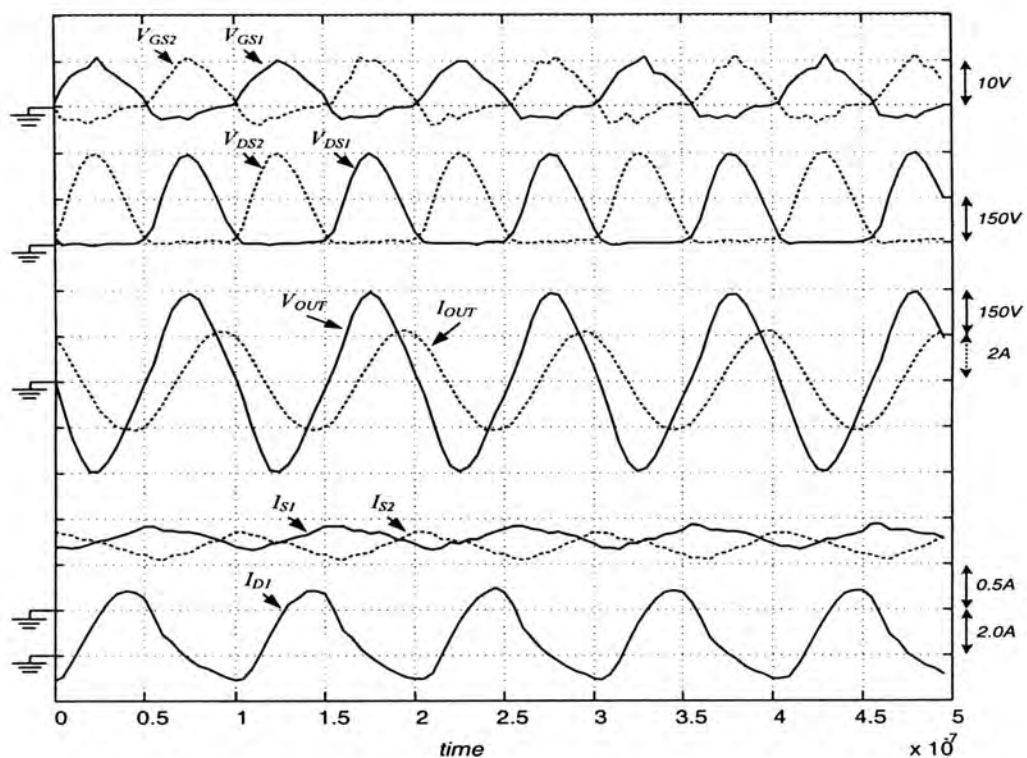


รูปที่ 4.13 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแสที่ทดลองสร้าง

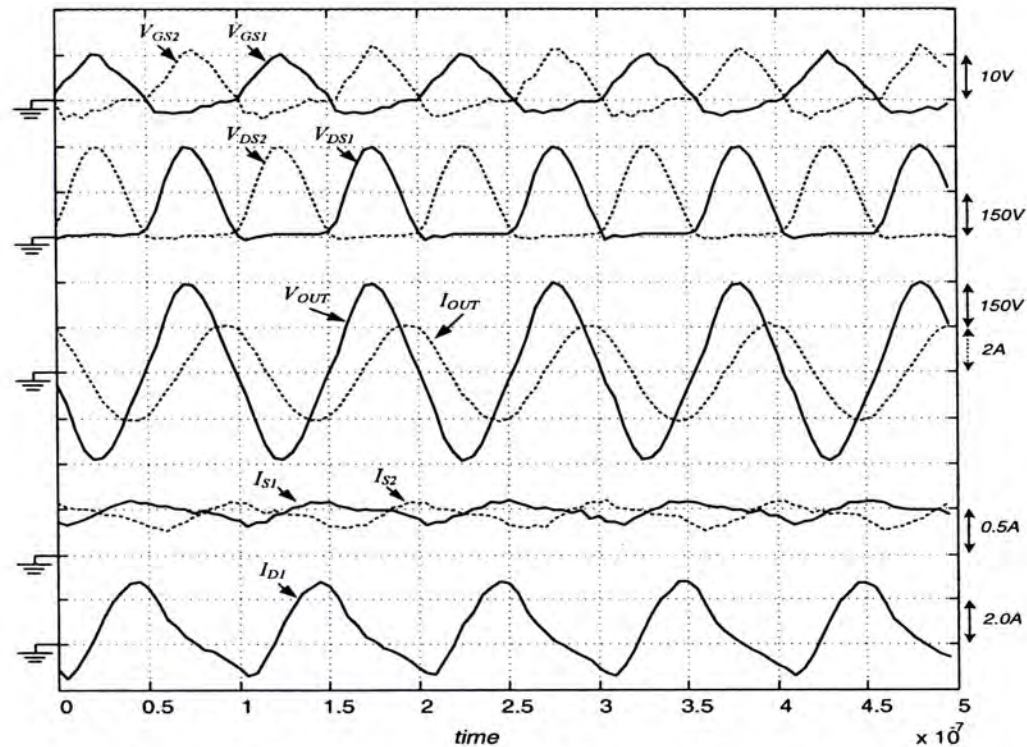
ได้ทำการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ที่ได้สร้างขึ้นโดยทำการวัดกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆ ที่แรงดันไฟตรงด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ $V_s=89V$ ค่าความต้านทานโหลดพิกัดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 323Ω และได้ทำการเพิ่มค่าความต้านทานโหลดไปเป็น 600Ω และ 900Ω ตามลำดับผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับค่าความต้านทานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.14–4.16 ตามลำดับ และตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ค่าความต้านทานโหลดค่าต่างๆ

ผลการทดลองในรูปที่ 4.20 เป็นรูปคลื่น switching trajectory ของมอสเฟต รวมทั้งรูปคลื่นการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตในเทอมของพลังงาน (Joules) ที่เกิดขึ้น ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังการสูญเสียที่มอสเฟตดังแสดงในตารางที่ 4.8

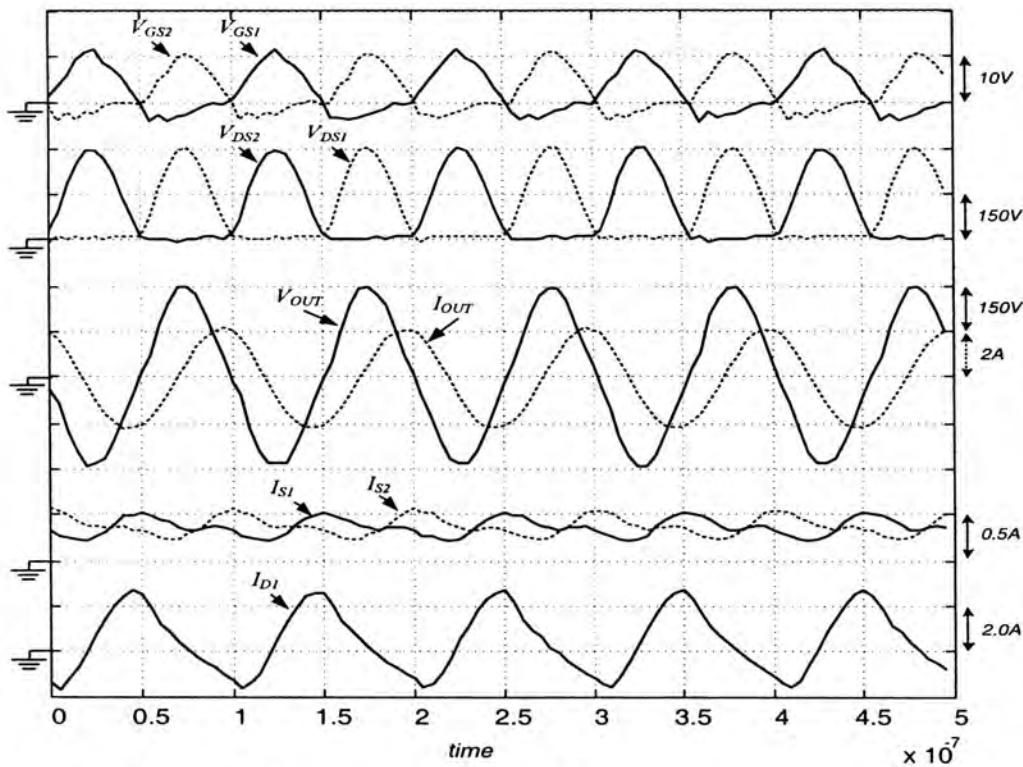
เพื่อเป็นการยืนยันผลได้ทำการจับภาพจากหน้าจอของออสซิลโลสโคปของการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความต้านทานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.17-รูปที่ 4.19



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นผลการทดลองที่ค่าความต้านทานโหลด 323Ω และ $V_S=89V$



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นผลการทดลองที่ค่าความต้านทานโหลด 600Ω และ $V_S=89V$

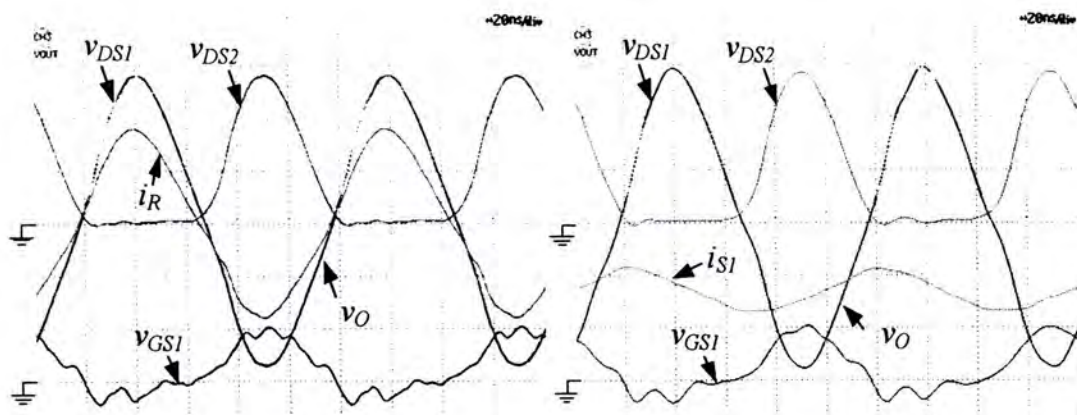


รูปที่ 4.16 รูปคลื่นผลการทดลองที่ค่าความต้านทานโหลด 900Ω และ $V_S=89V$

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความต้านทานต่างๆ

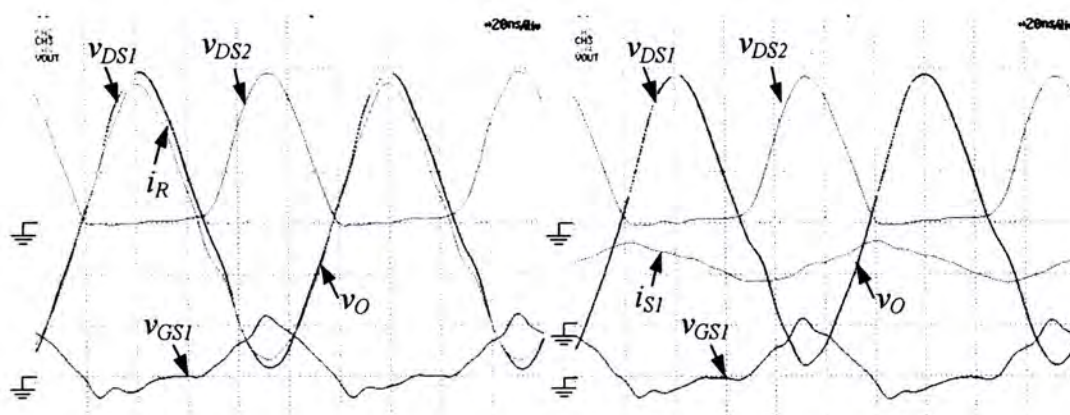
พารามิเตอร์	$R=323\ \Omega$	$R=600\ \Omega$	$R=900\ \Omega$
$V_S\ (V)$	89	89	89
$2 \cdot I_S\ (A)$	1.59	0.88	0.73
$V_{ORMS}\ (V)$	191.59	196.15	197.69
$V_{OP}\ (V)$	291.67	295.77	296.87
$V_{DSP}\ (V)$	295.83	300	300
$P_O\ (W)$	113.64	64.12	43.42

การคำนวณค่ากำลังงานด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถหาได้จากค่ากำลังสองของกระแสที่ผ่านตัวต้านทานโหลด I_R คูณกับค่าของตัวต้านทานและหาค่าเฉลี่ยต่อคาบ ในที่นี้ใช้เทคนิคการหาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลขในการหาค่ากำลังงานด้านออก



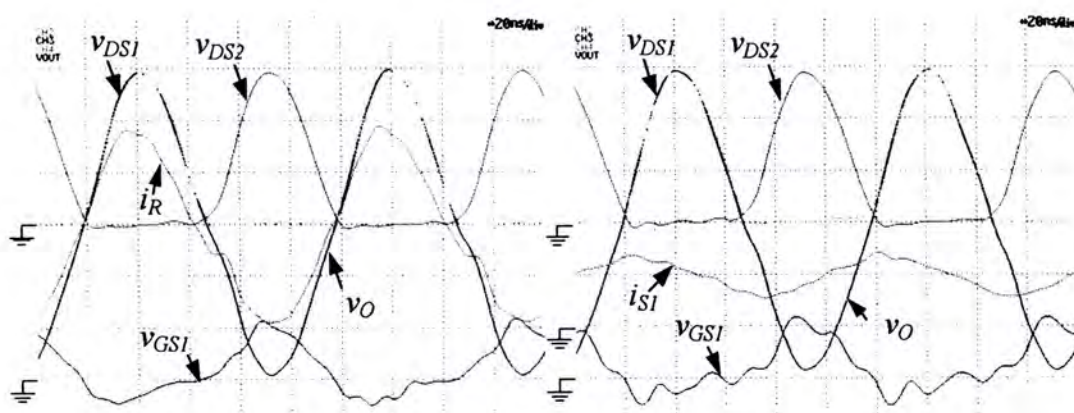
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปของการทดลองที่ความต้านทานโหลด 323 Ω $V_S=89V$

เมื่อ V_{DS} , $V_O=100V/div$, $V_{GS}=10V/div$, $I_R=0.5A/div$ และ $I_{S1}=0.5A/div$



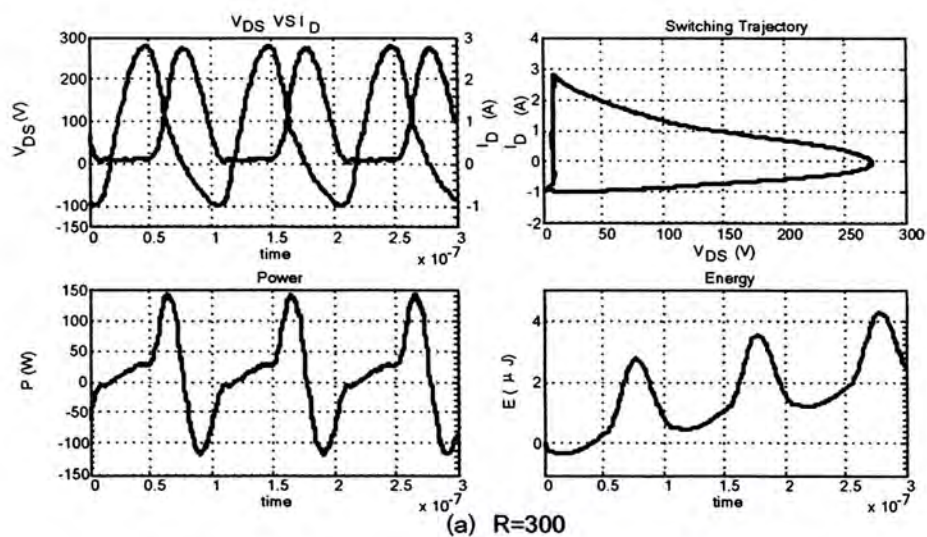
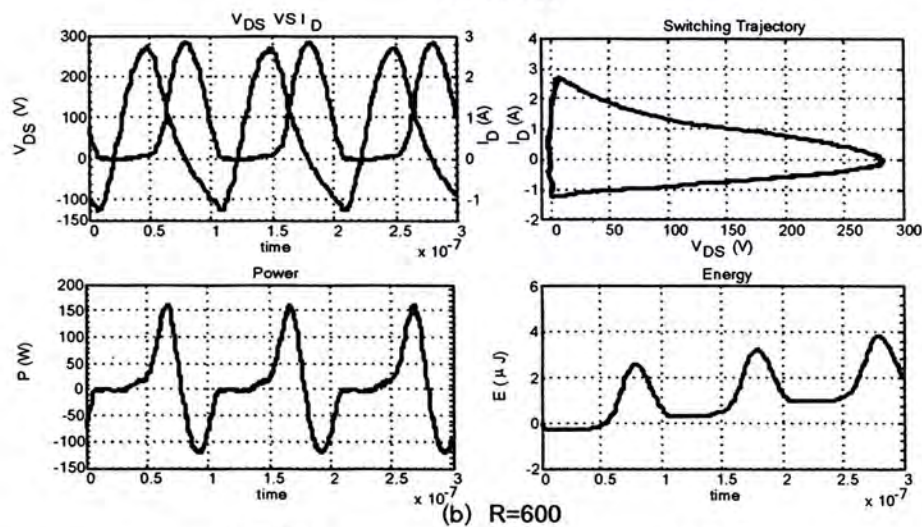
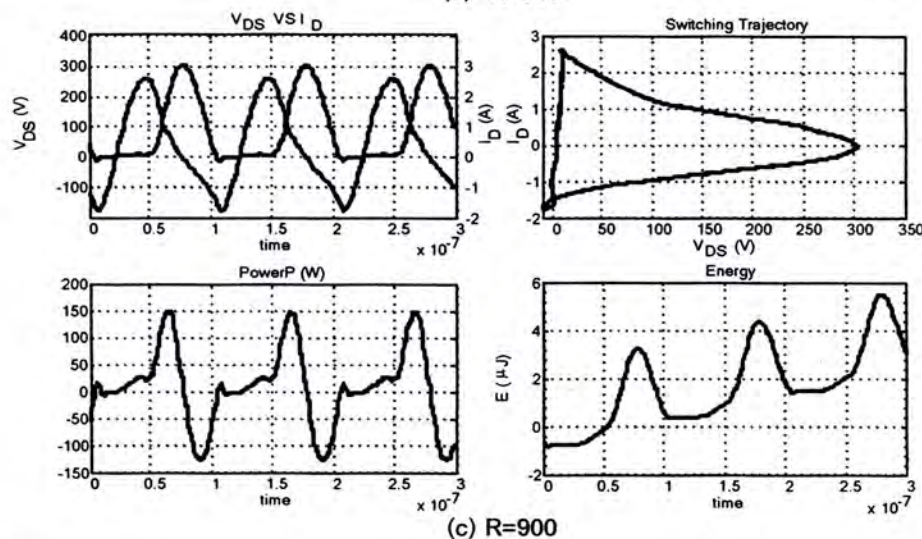
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปของการทดลองที่ความต้านทานโหลด 600 Ω $V_S=89V$

เมื่อ V_{DS} , $V_O=100V/div$, $V_{GS}=10V/div$, $I_R=0.2A/div$ และ $I_{S1}=0.5A/div$



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปของการทดลองที่ความต้านทานโหลด 900 Ω $V_S=89V$

เมื่อ V_{DS} , $V_O=100V/div$, $V_{GS}=10V/div$, $I_R=0.2A/div$ และ $I_{S1}=0.5A/div$

(a) $R=300$ (b) $R=600$ (c) $R=900$

รูปที่ 4.20 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลด $R=323,600$ และ 900Ω

รูปคลื่น switching- trajectory และค่าพลังงานการสูญเสียที่มอสเฟต

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียที่มอสเฟต(M_1) จากการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความต้านทานโหลดค่าต่างๆ

พารามิเตอร์	$R=323\Omega$	$R=600\Omega$	$R=900\Omega$
$E_{mos} (\mu J)$	0.765	0.645	0.511
$P_{mos} (W)$	7.65	6.45	5.11

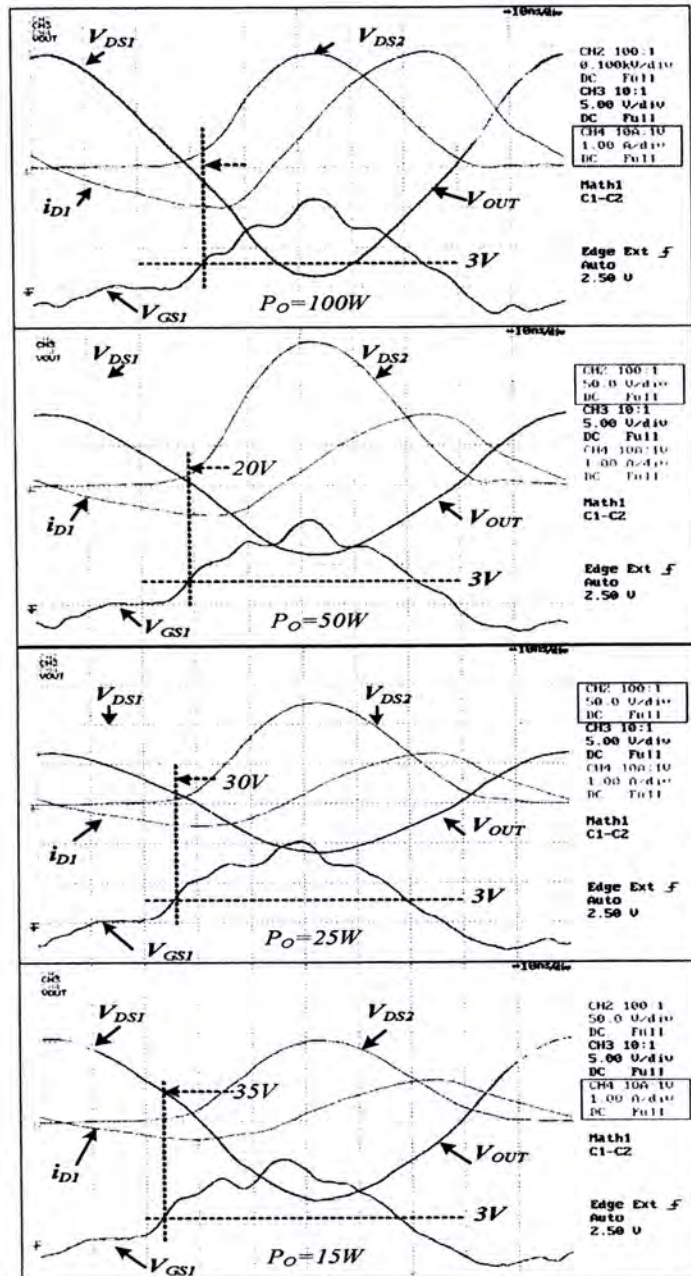
สรุปการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานโหลด ผลการวัดค่าแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆของวงจรจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากในการจำลองไม่ได้รวมผลของการสูญเสียในส่วนอื่นๆ อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับการจำลอง กล่าวคือเมื่อให้แรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโหลดจะมีผลให้รูปคลื่นของแรงดันออกเปลี่ยนแปลงไม่มากนักดังแสดงในรูปที่ 4.17- รูปที่ 4.19 ค่าการสูญเสียของมอสเฟตดังแสดงในตารางที่ 4.8 เป็นค่าการสูญเสียที่มอสเฟต M_1 เพียงตัวเดียว เมื่อประมาณค่ากำลังงานสูญเสียที่มอสเฟตทั้งสองตัวให้มีค่าใกล้เคียงกันแล้วสามารถหาค่าการสูญเสียที่มอสเฟตรวมทั้งสองตัวได้ ที่ค่าความต้านทานโหลด 323Ω , 600Ω และ 900Ω จะมีค่ากำลังงานการสูญเสียที่มอสเฟตเท่ากับ 15.3W, 12.9W และ 10.22W ตามลำดับ

ข้อแตกต่างของลักษณะรูปคลื่นสัญญาณจากการทดลองกับการจำลองที่สังเกตเห็นได้ชัดคือกระแสเดรนของมอสเฟต ในการทดลองกระแสเดรนมีลักษณะที่คล้ายกับสัญญาณฟันเลื่อย ส่วนในการจำลองกระแสเดรนมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากการทดลองโดยมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์ การที่ลักษณะของรูปคลื่นที่แตกต่างกันเนื่องจากโมเดลมอสเฟตที่ใช้ในการจำลองเป็น model level3 ที่มีการประมาณค่าตัวเก็บประจุแฝง C_{DG} ที่เป็นค่าคงที่ โดยที่ตัวเก็บประจุ $C_{RSS}(C_{DG})$ ในทางปฏิบัติแล้วจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ตกคร่อมเหมือนกับ C_{OSS}

4.3.3 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟตรงด้านเข้า

จากการจำลองในหัวข้อที่ 4.1.2 เพื่อเป็นการพิสูจน์แนวคิดในการควบคุมค่ากำลังงานออกของอินเวอร์เตอร์โดยการควบคุมผ่านแรงดันไฟตรงด้านเข้า จึงได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้าที่ค่าความต้านทานโหลด 323Ω เนื่องจากตัวต้านทานโหลดที่ใช้

ไม่สามารถรับกำลังงานที่สูงเกิน 100W ได้ เพื่อความปลอดภัยจึงได้ทำการทดลองเพียงลดขนาดแรงดันไฟตรงด้านเข้าเท่านั้น ผลการทดลองที่ขนาดของแรงดันด้านเข้าต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.9 และรูปคลื่นผลการทดลองดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 ค่าแรงดัน V_{GS} (เท่ากับ 3 โวลต์) ที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงค่าแรงดัน V_{DS} ในขณะเริ่มนำกระแส มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{TH} ที่ผู้ผลิตได้ออกมาใน data sheet ในที่นี้ค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{TH} ที่จะใช้เป็นจุดอ้างอิงเท่ากับ 3 V



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นผลการทดลองเมื่อลดค่ากำลังด้านออกที่ค่าความต้านทานโหลด 323 Ω

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อลดขนาดแรงดันไฟตรงด้านเข้าที่โหลด 323Ω

พารามิเตอร์	$V_S=89V$	$V_S=59V$	$V_S=43V$	$V_S=35V$
$P_O(W)$	113.6	46.5	25	16
$V_{ORMS} (V)$	191.6	122.54	87.13	70.7
$V_{OP} (V)$	291.67	183.85	128.12	102.47
$V_{DSP} (V)$	295.83	184.38	128.91	103.65
V_{DS} ที่ $V_{GS}=3V$	0	20	30	35

สรุป ผลการทดลองลดค่าแรงดันด้านเข้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ การลดแรงดันไฟตรงด้านเข้าทำให้กำลังงานด้านออกของวงจรมีค่าลดลง เมื่อทำการลดขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ทำให้จังหวะเวลาการสวิตช์ของมอสเฟตไม่เป็นการขับนำแบบแรงดันศูนย์จากรูปคลื่นผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่าแรงดัน V_{DS1} ที่แรงดัน $v_{GS}=3V$ ($v_{GS}=V_{TH}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0V ที่แรงดันด้านเข้า $V_S=89V$ (เมื่อ $P_O=113.6W$) มาเท่ากับ $V_{DS1}=35V$ ที่แรงดันด้านเข้า $V_S=35V$ (เมื่อ $P_O=16W$) การสวิตช์ของมอสเฟตที่ไม่เป็นการขับนำแบบแรงดันศูนย์เนื่องจากขนาดของแรงดันด้านออกที่ลดลงทำให้กระแส i_D ที่เป็นกระแสคายประจุลดลง จึงทำให้การลดขนาดของแรงดัน V_{DS} ต้องใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะให้แรงดัน V_{DS} มีค่าลดลงสู่ศูนย์หรือกลับทิศก่อนทำการขับนำอีกครั้ง ย่านการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ค่ากำลังออกต่ำสุดจะเกิดปัญหาของการสวิตช์ของมอสเฟตที่ไม่เป็นแรงดันศูนย์สอดคล้องกับผลของการจำลองในหัวข้อที่ 4.1.2

การแก้ปัญหาในกรณีนี้อาจใช้วิธีการลดความถี่การสวิตช์ลงหรือ เพิ่มระยะเวลา dead-time ของสัญญาณขับนำทั้งสองให้มีค่ามากขึ้น เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการคายประจุของตัวเก็บประจุแผ่นให้นานขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว