

อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ สำหรับเครื่องตัดไฟฟ้า

นายนฤคม สกุลวิไลกิจเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A 10 MHZ CURRENT-FED INVERTER FOR ELECTROSURGICAL UNIT

Mr. Narukom Sagoonvilaikidcharoen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ สำหรับ
เครื่องตัดไฟฟ้า

โดย

นายณฤศม สกุลวิไลกิจเจริญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา กุลวิทิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา กุลวิทิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ)

วสุโรจน์ ศรีอุดมพร : อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ 10 เมกกะเฮิรตซ์สำหรับเครื่อง
 จี้ตัดไฟฟ้า.(A 10MHZ CURRENT-FED INVERTER FOR ELECTROSURGICAL)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ยุพธนา กุลวิทิต, 79 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอขั้นตอนวิธีการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่
 10 เมกกะเฮิรตซ์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตเป็นตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ของวงจร
 โหลด ค่าของตัวเก็บประจุภายในมอสเฟตมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน รูปคลื่นแรงดันคร่อม
 เดรณและซอร์สแตกต่างกันอย่างมากจากรูปคลื่นสัญญาณไซน์แบบเรียงกระแส ในการ
 วิเคราะห์และออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ แรงดันคร่อมขั้วเดรณและซอร์สของมอสเฟตถูก
 ประมาณด้วยผลรวมของค่าคงที่กับฟังก์ชันโคไซน์ แรงดันคร่อมขั้วเดรณและซอร์สของเมสเฟต
 มีความเกี่ยวข้องกับแรงดันไฟตรงที่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงตามหลักสมมูล แรงดัน-
 วิตาที่ของตัวเหนี่ยวนำ กฎการอนุรักษ์พลังงานถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเรื่องตัวประกอบ
 คุณภาพที่สูงของวงจรโหลด ในการประเมินค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดรวมถึงค่ากระแสสูงสุด
 ในตัวเหนี่ยวนำ วิทยานิพนธ์นี้ยังได้สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ 10 เมกกะ
 เฮิรตซ์ กำลังงานออก 40 วัตต์ และมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 73% โดยค่ากำลังออกสูงสุด
 ของวงจรถูกจำกัดโดยค่าสูงสุดของแรงดันและกระแสที่มอสเฟต ผลของการคำนวณที่ได้มี
 ความสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานรวมถึงการทดลองที่ได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554.....

5270673421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CURRENT-FED RESONANT INVERTER / ZVS / PARASITIC
CAPACITANCE / PARASITIC INDUCTANCE

NARUKOM SAKOONVILAIKIDCHAROEN : A 10 MHZ CURRENT-FED
INVERTER FOR ELECTROSURGICAL UNIT. ADVISOR: ASSOC.PROF.
YOUTHANA KULVITIT, Ph.D, 79 pp.

This thesis presents a design procedure for a 10 MHz current-fed resonant inverter using MOSFETs' parasitic capacitances as resonant capacitors of the load circuit. As values of the MOSFETs' parasitic capacitances are voltage dependent, the drain-source voltage waveforms are heavily distorted from a rectified sine wave. In the analysis and design of the inverter, The MOSFETs' drain-source voltages are approximated by a combination of a constant and cosine function. The MOSFETs' drain-source voltages are related to dc voltage of the current source by the principle of volt-sec balance of an inductor. The principle of energy conservation is applied to the high quality factor load circuit, in order to estimate load circuit inductance as well as its maximum current. A 40 W, 10-MHz current-fed resonant inverter was implemented. The inverter's efficiency of 73% is achieved. The maximum output power is limited by either maximum current or maximum voltage of the MOSFETs. The results of theoretical calculations are in good agreement with the simulation results as well as those obtained experimentally.

Department : Electrical Engineering..... Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ รศ.ดร.ยุพธนา กุลวิทิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิต รวมถึง ผศ.ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และ ผศ.ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกรวิน อาจารย์สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิชาการและการวิจัยตลอดเวลาที่ผ่านไปมา จึงขอกราบ ขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบคุณนายปัทมะ ฉลภิญโญ เพื่อนผู้ให้กำลังใจฟันฝ่าอุปสรรคนานาประการในขณะที่ ศึกษาอยู่ และทำยที่สุดข้าพเจ้าจะไม่สามารถประสบผลสำเร็จได้เลยหากปราศจาก การสนับสนุน จากคุณพ่อและคุณแม่ ผู้เป็นที่รัก ผู้ที่คอยให้กำลังใจอยู่เสมอและให้โอกาสข้าพเจ้าในการศึกษา อันมีค่ายิ่งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสแบบกึ่งบริดจ์.....	5
2.1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูง.....	6
2.1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์.....	7
2.1.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์มากกว่าความถี่การสวิตช์.....	8
2.1.2.2 ความถี่เรโซแนนซ์น้อยกว่าความถี่การสวิตช์.....	12
2.2 องค์ประกอบวงจรอินเวอร์เตอร์ความแหล่งกระแสความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์.....	16
2.2.1 แหล่งจ่ายกระแสไฟตรง.....	16

บทที่	หน้า
2.2.2 มอสเฟตกำลัง.....	17
2.2.3 วงจรไหลด.....	20
2.3 ตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลัง.....	21
3. การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์.....	23
3.1 การประมาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมเดรนซอร์สมอสเฟต.....	24
3.2 แรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	28
3.3 การออกแบบคัตตัวเหนี่ยวนำวงจรไหลดโดยอาศัยกฎอนุรักษพลังงาน.....	30
3.4 ผลของรูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์เมื่อวงจรไหลดมี Q ต่ำ.....	34
3.5 ข้อกำหนดและขีดจำกัดในการออกแบบ.....	41
3.6 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลัง.....	46
4. การจำลองการทำงานและผลการทดลอง.....	47
4.1 ผลการจำลองการทำงาน.....	47
4.1.1 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดยอดแรงดันออกในภาวะไร้อไหลด.....	49
4.1.2 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของไหลด.....	52
4.2 ผลการทดลอง.....	57
4.2.1 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดยอดแรงดันออก.....	59
4.2.2 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของไหลด.....	63
4.2.3 กำลังสูญเสียจากสวิตช์ที่เกิดขึ้นจากการขับนำที่ตำแหน่งแรงดันคร่อมสวิตช์ต่างกัน.....	69
4.3 พฤติกรรมของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อมีผลของตัวเหนี่ยวนำแฝง.....	72
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74

บทที่	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลการคำนวณและจำลองของอินเวอร์เตอร์ สำหรับแรงดันออกต่าง ๆ กัน.....	49
4.2	ผลการคำนวณและจำลองของอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลดแต่ละค่า.....	52
4.3	ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่า.....	59
4.4	ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ที่แสดงกระแส I_{Ldc} และ P_{IN} ที่แรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่า.....	62
4.5	ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลดแต่ละค่า.....	63
4.6	ผลการคำนวณและจำลองของอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่าที่คำนวณ	67
4.7	ผลการทดลองเพื่อดูผลของการสูญเสียภายในสวิตช์ที่แรงดันขั้วนำแต่ละค่า.....	69
4.8	ผลการทดลองเพื่อดูผลของการสูญเสียภายในสวิตช์ที่แรงดันขั้วนำแต่ละค่า.....	70
4.9	ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เพื่อดูผลของกำลังออกที่ตัวเหนี่ยวนำแฝงแต่ละค่า.....	72

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงแบบสวิตช์แรงดันศูนย์	
(ก) รูปลักษณะของวงจร.....	6
(ข) แสดงรูปคลื่นการทำงานของวงจร.....	6
2.2 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ระดับเมกกะเฮิรตซ์.....	7
2.3 แสดงรูปคลื่นและวงจรในแต่ละช่วงสำหรับความถี่การเรโซแนนซ์มากกว่าความถี่การสวิตช์	
(ก) รูปคลื่นการทำงานในแต่ละช่วง.....	8
(ข) วงจรช่วงเวลา $t_0 - t_1$	8
(ค) วงจรช่วงเวลา $t_1 - t_2$	8
(ง) วงจรช่วงเวลา ก่อน t_0 และ $t_2 - t_3$	9
2.4 รูปคลื่นการทำงานวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์วงจรไหลดมากกว่าความถี่การสวิตช์	
(ก) ชับนำขณะแรงดันคร่อมมอสเฟตเริ่มเป็นศูนย์.....	11
(ข) การชับนำก่อนกระแสเดรนเริ่มเปลี่ยนทิศ.....	11
2.5 แสดงรูปคลื่นและวงจรในแต่ละช่วงสำหรับความถี่การเรโซแนนซ์น้อยกว่าความถี่การสวิตช์	
(ก) รูปคลื่นการทำงานในแต่ละช่วง.....	12
(ข) วงจรช่วงเวลา $t_0 - t_1$	12
(ค) วงจรช่วงเวลา $t_1 - t_2$	12
(ง) วงจรช่วงเวลา ก่อน t_0 และ $t_2 - t_3$	13
2.6 รูปคลื่นการทำงานวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์วงจรไหลดน้อยกว่าความถี่การสวิตช์	
(ก) การชับนำขณะแรงดันคร่อมมอสเฟตเริ่มเป็นศูนย์.....	15
(ข) การชับนำก่อนกระแสเดรนเริ่มเปลี่ยนทิศ.....	15

ภาพที่	หน้า
2.7	รูปลักษณะวงจรในการเกิดเรโซแนนซ์ของอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแส
	(ก) สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งไม่นำกระแส..... 16
	(ข) สวิตช์ทั้งสองตัวไม่นำกระแส..... 16
2.8	แหล่งกระแสไฟตรงและสมมูลของแหล่งกระแสไฟตรง..... 17
2.9	มอสเฟตและวงจรสมมูลของมอสเฟต..... 17
2.10	ความสัมพันธ์ของค่าตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันของมอสเฟตเบอร์ IRF830..... 20
2.11	วงจรสมมูลโหลดเรโซแนนซ์แบบขนานของอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแส..... 20
2.12	วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์สำหรับเครื่องตัดไฟฟ้า..... 21
2.13	กราฟความสัมพันธ์ของกำลังออกกับตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลัง..... 22
3.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเก็บประจุ C_{oss} เมื่อแรงดัน V_{ds} เปลี่ยน..... 24
3.2	เปรียบเทียบลูกคลื่นของแรงดัน v_{DS} กับลูกคลื่นโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรง..... 25
3.3	รูปคลื่นแรงดันคร่อมมอสเฟตที่แทนด้วยฟังก์ชันโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรงในหนึ่งคาบการสวิตช์..... 26
3.4	รูปวงจรและรูปคลื่นขณะสวิตช์มอสเฟตตัวบนนำกระแส
	(ก) รูปลักษณะวงจรที่แสดงเฉพาะมอสเฟตตัวบนขณะนำกระแส..... 27
	(ก) รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสในตัวเหนี่ยวนำไฟตรง..... 27
3.5	วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูง
	วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงที่เป็นตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวต้านทานโหลด..... 28
	วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงที่ปราศจากตัวต้านทานโหลดและวงจรสมมูลโหลด..... 28
3.6	รูปคลื่นแรงดันคร่อมวงจรโหลดและกระแสเดรนของมอสเฟต..... 29

ภาพที่	หน้า
3.7 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรนในสภาวะที่ใส่ตัวต้านทานโหลด.....	35
3.8 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์ที่มีฟังก์ชันแรงดันต่างกัน.....	36
3.9 คลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรน	
(ก) รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรนในช่วงเวลาที่เกิดเรโซแนนซ์ทั้งหมด..	37
(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเดรนสำหรับกรณีซิกซ์ช่ายของรูปคลื่น(ก).....	37
(ค) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเดรนสำหรับกรณีซิกซ์ช่ายของรูปคลื่น(ข).....	37
3.10 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรนที่แสดงการเก็บและคายประจุ (Q).....	39
4.1 การต่อมอสเฟตเพื่อให้ค่า C_{OSS} มีค่าใกล้เคียงการวัด.....	47
4.2 กราฟ C-V ของตัวเก็บประจุ C_{ds} และ C_{gd} ภายในมอสเฟตจากการวัดและปรับค่า...	48
4.3 ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์ $V_{DS}=100,150$ และ $200V$ รูปคลื่น switching- trajectory	
(a) $V_{DS} = 100V$	50
(b) $V_{DS} = 150V$	50
(c) $V_{DS} = 200V$	51
4.4 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลด $R=\infty,440$ และ 300Ω รูปคลื่น switching- trajectory	
(a) $R = 100 \Omega$	53
(b) $R = 150 \Omega$	54
(c) $R = 200 \Omega$	55
4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณเพื่อขับนำมอสเฟตและส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่ง กระแส.....	58

ภาพที่	หน้า
4.6 ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์ $V_{DS}=100,150$ และ $200V$ รูปคลื่น switching- trajectory และค่าพลังงานการสูญเสียที่มอสเฟต	
(a) $V_{DS} = 100V$	60
(b) $V_{DS} = 150V$	60
(c) $V_{DS} = 200V$	61
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียของมอสเฟตและยอดแรงดันคร่อมมอสเฟต.....	62
4.8 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลด $R=\infty,440$ และ 300Ω	
(a) $R = 100 \Omega$	64
(b) $R = 150 \Omega$	65
(c) $R = 200 \Omega$	66
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟออกและกำลังไฟเข้าของวงจร	68
4.10 รูปคลื่นการทดลองที่ชั้บนามอสเฟตที่แรงดันคร่อมสวิตช์ต่างกัน โดยกำหนดให้ $V_{TH} = 3V$	70
4.11 รูปวงจรในการจำลองและผลการจำลองด้านวงจรโหลดที่มีค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง ต่างกัน.....	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

i_L	คือ กระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอด
i_{Ldc}	คือกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอดกระแสตรงหรือกระแสด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์
i_D	คือ กระแสผ่านขั้ว Drain ของ MOSFET
i_{CH}	คือ กระแสผ่าน Channel ของ MOSFET
i_{INV}	คือ กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์
i_O	คือ กระแสผ่านตัวต้านทานโหลด
i_C	คือ กระแสผ่านตัวเก็บประจุแม่เหล็กขั้วเดรนซอร์ส
i_{Ldc_peak}	คือ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอดกระแสตรงทั้งหมด
i_{p+}	คือ ยอดกระแสของกระแสในตัวเก็บประจุแม่เหล็กขั้วเดรนซอร์สทั้งหมด
Δi	คือ กระแสรีปเปิ้ลของตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอดกระแสตรงที่คิดจากยอดถึงยอด
I_{Ldc}	คือ กระแสไฟตรงผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอดกระแสตรง
I_{Lmax}	คือ กระแสสูงสุดผ่านตัวเก็บประจุแม่เหล็กขั้วเดรนซอร์สในขณะตัวประกอบ
คุณภาพมีค่าสูง	
I_{dc}	คือ กระแสของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง
v_O	คือ แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์
v_L	คือ แรงดันออกของตัวเหนี่ยวนำวงจรถอด
v_C	คือ แรงดันออกของตัวเก็บประจุแม่เหล็กขั้วเดรนซอร์ส
v_{SIG}	คือ แรงดันออกของวงจรสวิตช์หรือวงจรถอด
v_{GS}	คือ แรงดันระหว่างขั้ว Gate กับ Source ของ MOSFET
v_{GD}	คือ แรงดันระหว่างขั้ว Gate กับ Drain ของ MOSFET
v_{DS}	คือ แรงดันระหว่างขั้ว Drain กับ Source ของ MOSFET
V_p	คือ ค่ายอดแรงดันออกสูงสุดของมอสเฟตขั้วเดรนซอร์ส
V_{dc}	คือ แรงดันไฟตรงด้านเข้าของวงจรถอดอินเวอร์เตอร์
V_{TH}	คือ แรงดัน Threshold ของ MOSFET
C_{GD}	คือ ตัวเก็บประจุภายในระหว่างขั้ว Gate กับ Drain ของ MOSFET
C_{DS}	คือ ตัวเก็บประจุภายในระหว่างขั้ว Drain กับ Source ของ MOSFET
C_{gd}	คือ ตัวเก็บประจุภายในระหว่างขั้ว Gate กับ Source ของ MOSFET

C_{bd}	คือ ตัวเก็บประจุภายในระหว่างขั้ว Gate กับ Source ของ MOSFET
C_{bd0}	คือ ตัวเก็บประจุภายในระหว่างขั้ว Gate กับ Source ของ MOSFET
C_{en}	คือ ตัวเก็บประจุภายในระหว่างขั้ว Gate กับ Source ของ MOSFET
C_{OSS}	คือ ตัวเก็บประจุแฝงด้านออกของ MOSFET
Q	คือ ตัวประกอบคุณภาพ
PB	คือ ค่าแรงดันของรอยต่อ Bulk ของ MOSFET
MJ	คือ ค่า Bulk bottom grading coefficient ของ MOSFET
E_C	คือ ค่าพลังงานภายในตัวเก็บประจุ
E_{Store}	คือ ค่าพลังงานสะสมภายในตัวเก็บประจุ
E_L	คือ ค่าพลังงานภายในตัวเหนี่ยวนำ
E_{Ldc}	คือ ค่าพลังงานภายในตัวเหนี่ยวนำด้านเข้ากระแสตรง
P_{IN}	คือ ค่ากำลังด้านขั้วเข้าของแหล่งจ่ายกระแสตรง
P_O	คือ ค่ากำลังออกของวงจรรีเลย์เตอร์
P_{mos}	คือ ค่ากำลังการสูญเสียที่ MOSFET
L_r	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรีเลย์เตอร์เรโซแนนซ์
L_{dc}	คือ ค่าความเหนี่ยวนำด้านเข้าของแหล่งจ่ายกระแสตรง
T_S	คือ $1/f$ หรือคาบการสวิตช์
T_r	คือ คาบการเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุแฝงและตัวเหนี่ยวนำวงจรรีเลย์
T_{rLeft}	คือ คาบการเรโซแนนซ์ของรูปคลื่นแรงดันที่สมมติในซีกซ้ายเทียบจากยอด
T_{rRight}	คือ คาบการเรโซแนนซ์ของรูปคลื่นแรงดันที่สมมติในซีกขวาเทียบจากยอด
ω_S	คือ ความถี่การสวิตช์
ω_0	คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรรีเลย์เตอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องจี้ตัดไฟฟ้า[1,2] ในงานศัลยกรรมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเครื่องจี้ตัดไฟฟ้าจะช่วยลดการสูญเสียเลือดของคนไข้ขณะผ่าตัดได้มากเมื่อเทียบกับการใช้มีดผ่าตัดธรรมดา เครื่องจี้ตัดไฟฟ้าทำงานโดยผ่านกระแสไฟฟ้าสลับ เข้าไปในเนื้อเยื่อเพื่อให้เกิดความร้อนกับเนื้อเยื่อโดยตรงตามกฎของจูล ผลของความร้อนที่เกิดกับเนื้อเยื่อจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อได้รับ ค่าวัฏจักรงานและระยะเวลาของคาบในการป้อนกำลังไฟฟ้า หากความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อได้รับมีค่าสูง ของเหลวภายในเซลล์กลายเป็นไออย่างรวดเร็ว ทำให้เซลล์ขยายตัวและปริแยกออกจากกันส่งผลให้เป็นการตัดเนื้อเยื่อ แต่ถ้าหากความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อได้รับมีค่าไม่สูงมากนักของเหลวภายในเซลล์กลายเป็นไอช้าลง ทำให้เซลล์สูญเสียน้ำและแห้งจับตัวเป็นก้อนปิดหลอดเลือดส่งผลให้เป็นการห้ามเลือด การควบคุมกำลังไฟฟ้า ค่าวัฏจักรงานและระยะเวลาของคาบอย่างเหมาะสม จะส่งผลให้เป็นการตัดและห้ามเลือดไปพร้อมกัน

ปัญหาสำคัญของการผ่าตัดด้วยเครื่องจี้ตัดไฟฟ้าคือ การกระตุกของประสาทและกล้ามเนื้อเมื่อความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูง[3-5] และปัญหาที่เกิดจากการติดแผ่น Return Electrode ไม่แนบสนิท [6, 7]กับผิวหนังคนไข้ทำให้การกระจายตัวของกระแสไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดการไหม้ที่ผิวหนังบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสสูง การลดปัญหาเหล่านี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในระดับเมกะเฮิรตซ์เนื่องจากความไวในการรับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าของประสาทและกล้ามเนื้อจะลดลงและกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านตัวเก็บประจุระหว่างผิวหนังและแผ่น Return Electrode โดยไม่จำเป็นต้องผ่านจุดสัมผัส

ในการสร้างอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงระดับเมกะเฮิรตซ์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับเนื้อเยื่อ สิ่งที่มีอาจมองข้ามได้ในการสร้างคือ กำลังสูญเสียจากการสวิตช์ (switching loss) การสวิตช์แต่ละครั้งจึงต้องมีการขับนำอย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดกำลังสูญเสียต่ำที่สุด ดังโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เสนอไว้ใน [8-10] ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่ง

กระแสทำงานที่ความถี่สูงสุด 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่โครงสร้างเป็นกึ่งบริดจ์ ใช้สวิตช์แรงดันศูนย์ครึ่งคลื่นโดยใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ไวงานต่อขั้วซอร์สรวมกันทำให้ไม่มีปัญหาของการเชื่อมโยงระหว่างกราวด์ของแต่ละแหล่งขับนำ อีกทั้งสวิตช์แต่ละตัวรับแรงดันเพียงครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันคร่อมโหลด พิกัดสูงสุดของสวิตช์จึงอยู่ที่ครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันโหลดสูงสุด[10]

เมื่อวงจรมอดูเลเตอร์ทำงานที่ความถี่สูงขึ้นขนาดของตัวอุปกรณ์ของวงจรถอดเช่น ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเล็กลง สำหรับวงจรมอดูเลเตอร์แหล่งกระแสที่มีโหลดเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน การเพิ่มความถี่การสวิตช์ขนาดตัวเก็บประจุของวงจรมอดูเลเตอร์มีค่าเล็กลงใกล้เคียงกับขนาดของตัวเก็บประจุแฝงในมอสเฟตและมีค่าเปลี่ยนตามแรงดันที่ตกคร่อมขั้วเดรนซอร์สของมอสเฟต[11-13] ในการออกแบบวงจรถอดค่าตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตจึงต้องนำมาพิจารณา

นอกจากขนาดของตัวอุปกรณ์ของวงจรถอดจะมีค่าลดลงเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงขึ้น ในส่วนของสายส่งกำลังที่มีขนาดยาวและต่อออกจากขั้วออกของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานไปยังโหลดหรือเนื้อเยื่อ จะประพฤติตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำโดยมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายส่งกำลังและความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น ขนาดตัวเหนี่ยวนำแฝงที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้กำลังออกที่โหลดมีค่าลดลงเนื่องจากแรงดันที่ส่งออกจากขั้วออกของอินเวอร์เตอร์จะแบ่งตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำแฝงมากกว่าที่จะตกคร่อมโหลด

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรมอดูเลเตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแสโครงสร้างกึ่งบริดจ์ ที่ใช้สวิตช์แรงดันศูนย์ครึ่งคลื่นความถี่ระดับเมกกะเฮิร์ตซ์ ที่มีตัวเก็บประจุแฝงภายในสวิตช์มอสเฟตที่แปรค่าตามแรงดันตกคร่อมขั้วเดรนซอร์สของมอสเฟต สร้างสภาวะเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอด โดยมีแนวคิดประเมินรูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตให้ออกมาเป็นสมการ แล้ววิเคราะห์ตัวแปรต่างๆออกมา และใช้หลักการทางพลังงานภายในตัวเก็บประจุเพื่อการออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้านวงจรถอด และออกแบบให้มีจังหวะการสวิตช์ของมอสเฟตที่เหมาะสม เกิดการสูญเสียจากการสวิตช์น้อย ในส่วนขั้วออกของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน ที่เป็นสายไฟยาวต่อเข้ากับโหลดที่ต้องการให้พลังงานมีพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำ ทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นว่าลักษณะการเดินของสายมีผลมากน้อยเพียงไร

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องจักรตัดไฟฟ้าที่ความถี่สูงในระดับเมกะเฮิรตซ์
2. ใช้ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอเตอร์ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลดในการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์
3. ศึกษาแนวทางในการลดผลของตัวเหนี่ยวนำแฝงในสายตัวนำระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลดที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีผลต่อการส่งกำลังออกไปยังโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงระดับเมกะเฮิรตซ์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์ตัวเก็บประจุแฝงในสวิตช์ ให้ทำหน้าที่แทนตัวเก็บประจุของวงจรโหลดในการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด
2. ศึกษาแนวทางในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแฝงเป็นตัวเก็บประจุที่สร้างสภาวะเรโซแนนซ์ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด
3. ศึกษาผลกระทบของตัวเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังที่ต่อไปยังหัวจักรตัดไฟฟ้า
4. หาแนวทางลดผลของตัวเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังที่ต่อไปยังหัวจักรตัดไฟฟ้า
5. กำหนดเกณฑ์ในการออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงที่คำนึงถึงผลของตัวอุปกรณ์แฝง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานและปัญหาของเครื่องจักรตัดไฟฟ้าที่มีใช้ในปัจจุบัน
2. ศึกษาการทำงานของวงจร และอุปกรณ์ต่างๆเกี่ยวกับเครื่องจักรตัดไฟฟ้า
3. จำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องจักรตัดไฟฟ้า ในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อพิจารณากระทบจากค่าอุปกรณ์แฝง

4. หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังที่ต่อไปยังหัวจี้ตัดไฟฟ้า
5. กำหนดเกณฑ์การออกแบบและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องจี้ตัดไฟฟ้า
6. เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของวงจรที่สร้างขึ้น
7. ประเมินผล และสรุปผลการทดลอง
8. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบแนวทางการใช้ประโยชน์จากตัวเก็บประจุแฝง
2. เข้าใจปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหาที่เป็นผลจากตัวเหนี่ยวนำแฝง
3. เข้าใจขอบเขตแนวคิดการประเมินตัวเก็บประจุไฟฟ้าแฝงเพื่อการออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรไหลด
4. สามารถนำทฤษฎีต่างๆที่พัฒนาขึ้นมาไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

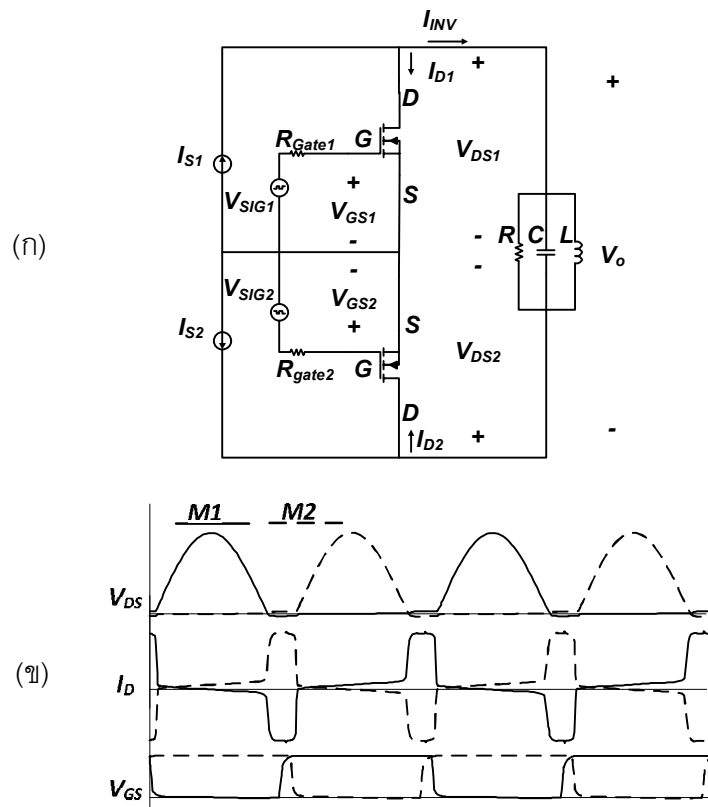
บทนำ

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องจักรตัดไฟฟ้าที่ความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์ โดยใช้วงจรมอสเฟตเรโซแนนซ์แหล่งกระแส ในการออกแบบวงจรไหลดจำเป็นต้องศึกษาถึงการทำงานของวงจรมอสเฟต จังหวะการสวิตช์ของมอสเฟต การคำนวณค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรไหลดแบบขนาน ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในย่านความถี่สูง ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของวงจรมอสเฟตเรโซแนนซ์แหล่งกระแสโครงสร้างกึ่งบริดจ์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตสร้างสภาวะกับตัวเหนี่ยวนำไหลด และรูปแบบการขับนำสวิตช์มอสเฟตในกรณีต่างๆกัน ได้แก่ ในกรณีที่ความถี่การสวิตช์มากกว่าความถี่การเรโซแนนซ์ ความถี่การสวิตช์เท่ากับความถี่การเรโซแนนซ์ ความถี่การสวิตช์น้อยกว่าความถี่การเรโซแนนซ์ ทำให้รูปแบบการขับนำสวิตช์มอสเฟตมีความแตกต่างกันไปแตกต่างกัน และตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต

2.1 โครงสร้างวงจรมอสเฟตแหล่งกระแสแบบกึ่งบริดจ์

การทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสย่านความถี่สูงแต่ไม่ถึงเมกกะเฮิรตซ์กับสูงในระดับเมกกะเฮิรตซ์มีความแตกต่างกันในส่วนโครงสร้างการทำงาน ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เรโซแนนซ์ระดับความถี่ไม่สูงมากนัก การเกิดเรโซแนนซ์เกิดขึ้นโดยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุทางด้านวงจรไหลด ต่างกับการทำงานในระดับเมกกะเฮิรตซ์ขนาดของตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตมีผลต่อการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุวงจรไหลดมีค่าใกล้เคียงตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต จึงทำให้รูปลักษณะของการเกิดเรโซแนนซ์แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการทำงาน รูปแบบการขับนำมอสเฟตในเงื่อนไขความถี่การสวิตช์ที่แตกต่างกัน และอธิบายการขับนำมอสเฟตที่เหมาะสม

2.1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูง



รูปที่ 2.1 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงแบบสวิตช์แรงดันศูนย์

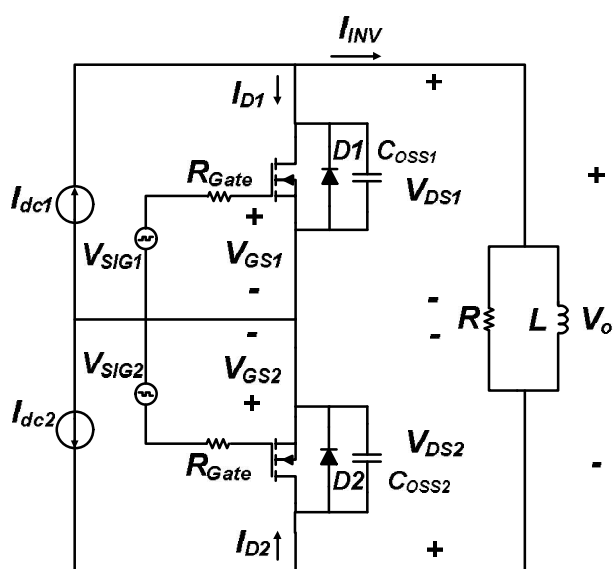
(ก) รูปลักษณะของวงจร (ข) แสดงรูปคลื่นการทำงานของวงจร

วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสแบบกึ่งบริดจ์ ในรูปที่ 2.1(ก) เป็นโครงสร้างที่ทำงานย่านความถี่สูง มีวงจรโหลดแบบขนาน สวิตช์มอสเฟต M1 และ M2 จะสลับการทำงานและมีการนำกระแสพร้อมกัน(นำกระแสเหลือมกัน) เป็นเวลาสั้นๆในช่วงที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะในการทำงาน เพื่อให้การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้มีกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำจะออกแบบความถี่ของวงจรโหลดให้มีค่าสูงกว่าความถี่การสวิตช์ของมอสเฟตและทำการชับนำมอสเฟตจะชับนำอย่างเหมาะสมโดยชับนำมอสเฟตในขณะที่แรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.1(ข)

2.1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในย่านความถี่ระดับเมกกะเฮิรตซ์ ขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้ที่วงจรไหลดแบบขนานสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแส นี้ ค่าตัวเก็บประจุวงจรไหลดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต จึงสามารถใช้ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตแทนตัวเก็บประจุวงจรไหลด ในรูปที่ 2.2 ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ในระดับนี้จะถูกจำกัดอยู่ที่ค่าตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตที่เลือกใช้ เนื่องจากการทำงานที่ความถี่การสวิตช์มีค่าสูง จะต้องเลือกใช้มอสเฟตที่มีค่าตัวเก็บประจุแฝงต่ำ เพื่อให้ค่าตัวประกอบกำลังของวงจรไหลดมีค่าสูง และง่ายแก่การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรไหลด

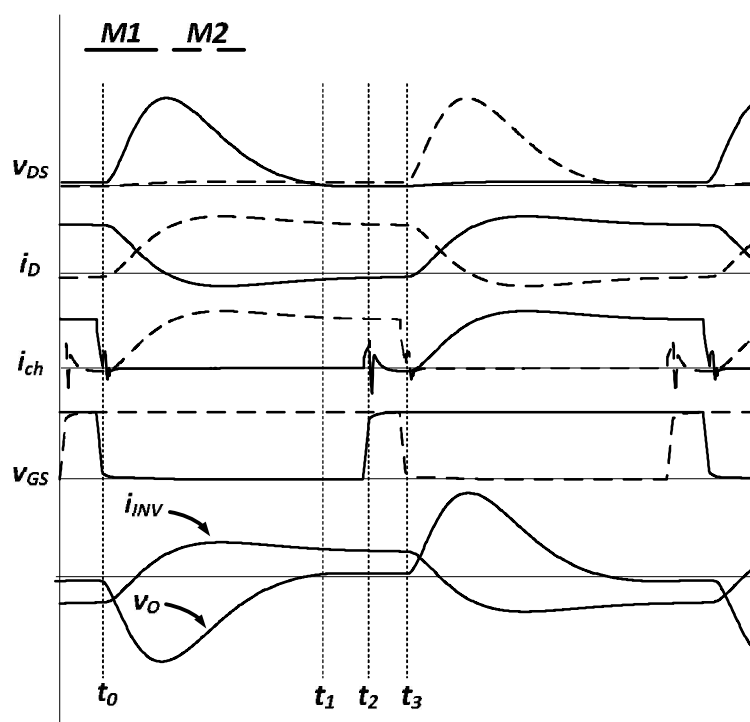
วงจรอินเวอร์เตอร์โครงสร้างที่ใช้ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตสร้างสภาวะเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำวงจรไหลดจะมีความแตกต่างกับวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงในเรื่องของการขับนำเนื่องจากการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำวงจรไหลดเปลี่ยนไป ลักษณะการขับนำของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์สามารถจำแนกการขับนำออกเป็น 2 ลักษณะ โดยขึ้นกับความถี่การเรโซแนนซ์และความถี่การสวิตช์



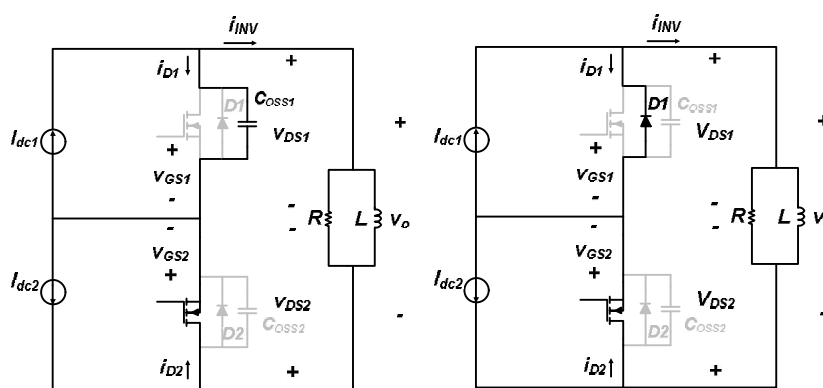
รูปที่ 2.2 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ระดับเมกกะเฮิรตซ์

2.1.2.1 ความถี่การเรโซแนนซ์มากกว่าความถี่การสวิตช์

ในการออกแบบวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์ออกแบบให้ความถี่การเรโซแนนซ์มากกว่าความถี่การสวิตช์ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์จะเป็นแบบแรงดันผ่านศูนย์ แรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตแต่ละตัวจะตกลงศูนย์ก่อนถึงครึ่งคาบของการสวิตช์ดังรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายคร่าวๆ โดยแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วงภายในครึ่งคาบการสวิตช์ได้ดังนี้

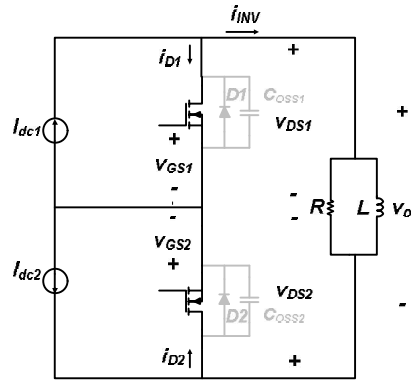


(ก) รูปคลื่นการทำงานในแต่ละช่วง



(ข) วงจรช่วงเวลา $t_0 - t_1$

(ค) วงจรช่วงเวลา $t_1 - t_2$

(ง) วงจรช่วงเวลา ก่อน t_0 และ $t_2 - t_3$

รูปที่ 2.3 รูปคลื่นและวงจรในแต่ละช่วงสำหรับความถี่การเรโซแนนซ์มากกว่าความถี่การสวิตช์

ช่วงเวลาก่อน t_0

เริ่มหยุดขับนำมอสเฟต M1 แต่แรงดันคร่อมเกตและซอร์ส v_{GS1} ยังคงมีค่ามากกว่าแรงดันเปรียบเทียบของมอสเฟต V_{TH} ส่วนมอสเฟต M2 ยังได้รับสัญญาณขับนำ แรงดันคร่อมเกตและซอร์ส v_{GS2} มากกว่า V_{TH} ทำให้ มอสเฟตทั้ง M1 และ M2 นำกระแส กระแสเดรน i_{D1} เป็นผลต่างของแหล่งกระแสไฟตรง I_{dc} กับกระแสอินเวอร์เตอร์ i_{INV} ส่วนกระแสเดรน i_{D2} เป็นผลรวมของแหล่งกระแสไฟตรง I_{dc} กับกระแสอินเวอร์เตอร์ i_{INV} กระแส i_{D1} และ i_{D2} ไหลผ่านช่องนำกระแสของมอสเฟต (I_{ch}) แรงดันระหว่างเดรน-ซอร์ส v_{DS1} และ v_{DS2} มีค่าเป็นศูนย์และแรงดันออก V_o ซึ่งเป็นผลของแรงดัน v_{DS1} และ v_{DS2} มีค่าเป็นศูนย์ จนกระทั่งที่เวลา t_0 แรงดัน v_{GS1} มีค่าต่ำลงช่องนำกระแสเริ่มหยุดนำกระแส

ช่วงเวลา $t_0 - t_1$

v_{GS1} มีค่าลดลงต่ำกว่า V_{TH} ทำให้กระแสที่ไหลผ่านช่องนำกระแสของมอสเฟต M1 จะลดลงเป็นศูนย์ กระแส i_{D1} จะย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต C_{OSS1} เกิดการเรโซแนนซ์กันระหว่าง C_{OSS1} และตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่วงจรโหลด L แรงดัน v_{DS1} และ V_o จึงมีค่าเพิ่มขึ้น กระแส i_{INV} มีค่าลบและมีขนาดลดลง ทำให้ i_{D1} มีค่าเป็นบวกและมีขนาดลดลงเช่นกัน เมื่อกระแส i_{INV} กลับทิศและมีขนาดเพิ่มขึ้นเท่ากับกระแสของแหล่งกระแสตรง ทำให้ i_{D1} เป็นศูนย์

แรงดัน v_{DS1} และ v_o มีค่าสูงสุด เมื่อกระแส i_{INV} เพิ่มขึ้นมากกว่า I_{dc} กระแสเดรน i_{D1} จะเปลี่ยนเป็นลบ ทำให้ C_{OSS1} คลายประจุ แรงดัน v_{DS1} และ v_o มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์และเปลี่ยนทิศทางเป็นลบ เมื่อ v_{DS1} มีค่าเป็นลบและมีขนาดเพียงพอที่จะไบแอสตาม D1 กระแส i_{D1} ที่เคยไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{OSS1} จะย้ายไปไหลผ่านไดโอดแฝง D1 ที่เวลา t_1

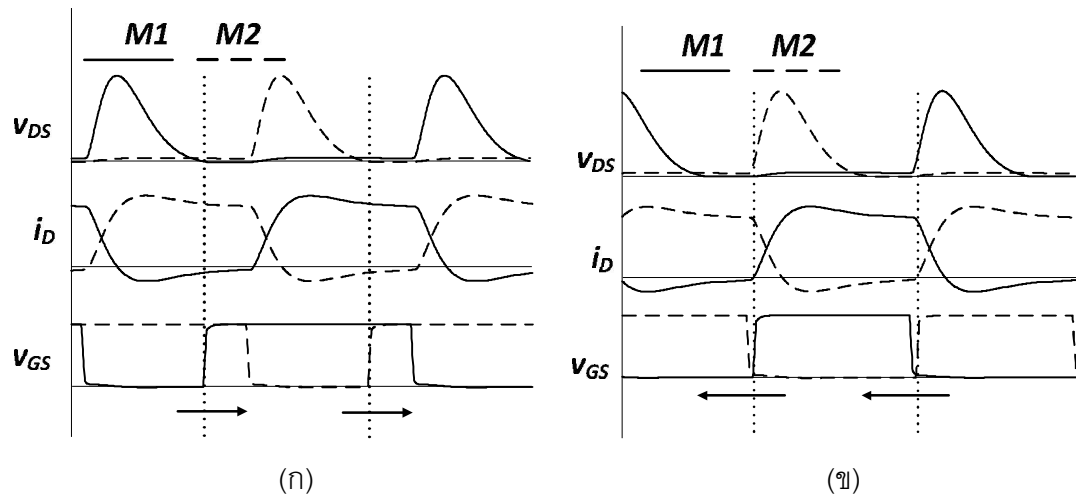
ช่วงเวลา $t_1 - t_2$

M1 ยังคงไม่ถูกขับนำ และ M2 ยังคงถูกขับนำ แรงดัน v_{DS1} มีค่าเป็นลบเพียงพอที่ไบแอสตาม D1 กระแส i_{D1} ไหลผ่านไดโอดแฝง D1 ที่ M2 แรงดัน v_{DS2} ยังคงเป็นศูนย์ และกระแส i_{D2} ยังไหลผ่านช่องนำกระแส จนกระทั่งที่เวลา t_2 เริ่มขับนำ M1

ช่วงเวลา $t_2 - t_3$

เมื่อขับนำ M1 แรงดัน v_{GS1} มีค่าเพิ่มสูงกว่า V_{TH} i_{INV} มีค่าบวกขนาดลดลงแต่มีขนาดมากกว่ากระแส I_{dc} ทำให้ i_{D1} มีค่าเป็นลบและมีขนาดลดลง ในการขับนำที่เหมาะสมจะต้องทำให้แรงดัน v_{GS1} เพิ่มขึ้นสูงกว่า V_{TH} ก่อนที่ i_{D1} จะเปลี่ยนทิศ เพื่อให้มอสเฟต M1 เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ จนกระทั่งที่เวลา t_3 แรงดัน v_{GS1} มีค่าต่ำลงช่องนำกระแสเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งเป็นการเริ่มทำงานครึ่งคาบหลังของวงจรที่มี การสลับการทำงานระหว่าง M1 และ M2

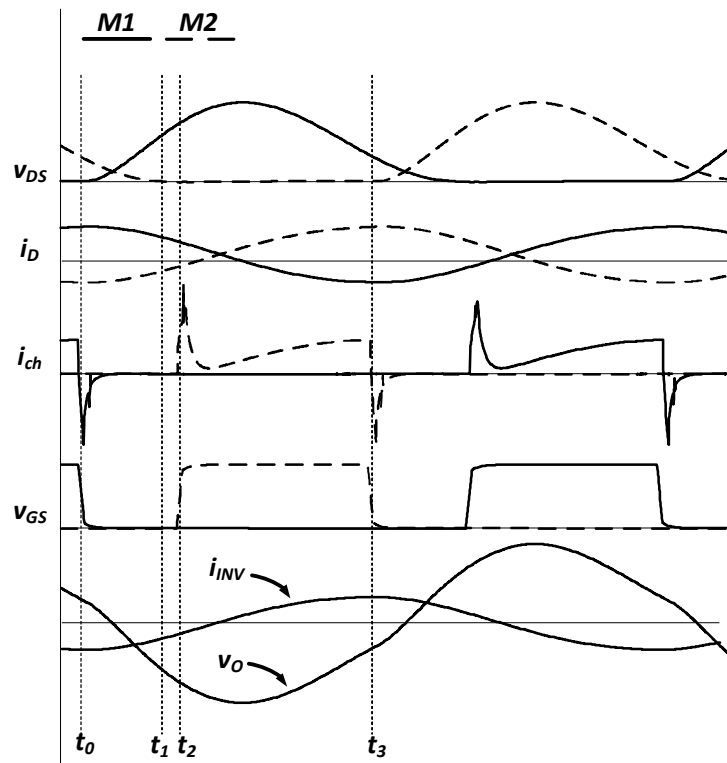
จากที่ได้กล่าวเกี่ยวกับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในเงื่อนไข ความถี่การเรโซแนนซ์มากกว่าความถี่การสวิตช์ สิ่งที่ต้องคำนึงในการขับนำเพื่อให้สวิตช์ขับนำถูกจ้งหวะ คือขับนำมอสเฟตให้นำกระแสหลังจากแรงดันคร่อมมอสเฟตเป็นศูนย์ดังรูป 2.4ก และก่อนกระแสเดรนกลับทิศดังรูป 2.4ข อีกทั้งการขับนำสวิตช์จะขับนำแบบนำกระแสเหลื่อมกันหรือไม่เหลื่อมกันก็ได้ โดยช่วงเวลาของการนำกระแสเหลื่อมกันต้องไม่มากกว่าผลต่างของครึ่งคาบการเกิดเรโซแนนซ์กับครึ่งคาบการสวิตช์



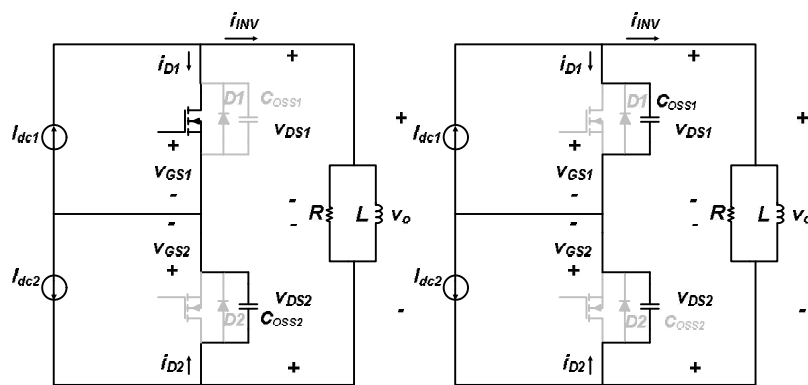
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นการทำงานวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์วงจรโหลดมากกว่าความถี่การสวิตช์
 (ก) การขับนำขณะแรงดันคร่อมมอสเฟตเริ่มเป็นศูนย์ (ข) การขับนำก่อนกระแสเดรนเริ่มเปลี่ยนทิศ

2.1.2.2 ความถี่เรโซแนนซ์น้อยกว่าความถี่การสวิตช์

ในการออกแบบวงจรโวลต์ของอินเวอร์เตอร์ออกแบบให้ความถี่การเรโซแนนซ์น้อยกว่าความถี่การสวิตช์ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์จะเป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากแรงดันคร่อมสวิตช์มีออสเฟดแต่ละตัวตกลงหลังจากครึ่งคาบการสวิตช์ไปแล้ว ดังรูปที่ 2.5 สามารถอธิบายคร่าวๆ โดยแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วงภายในครึ่งคาบการสวิตช์ได้ดังนี้

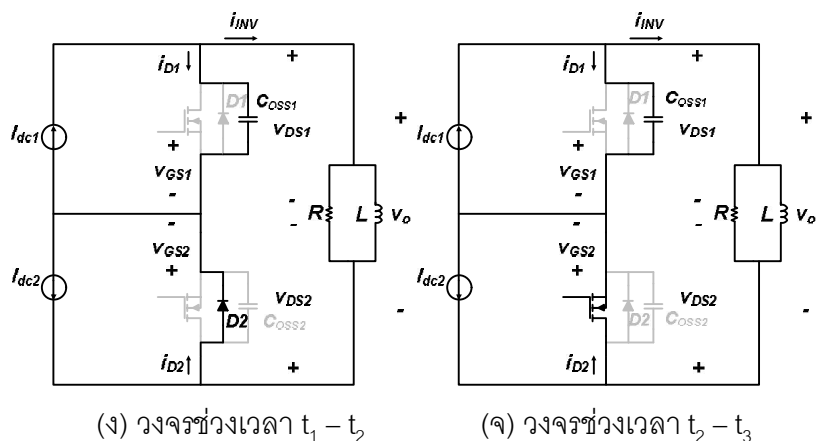


(ก) รูปคลื่นการทำงานในแต่ละช่วง



(ข) วงจรช่วงเวลาก่อน t_0

(ค) วงจรช่วงเวลา $t_0 - t_1$

(ง) วงจรช่วงเวลา $t_1 - t_2$ (จ) วงจรช่วงเวลา $t_2 - t_3$

รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นและวงจรในแต่ละช่วงสำหรับความถี่การเรโซแนนซ์
น้อยกว่าความถี่การสวิตช์

ช่วงเวลาก่อน t_0

เริ่มหยุดขั้วนำมอสเฟต M1 แต่แรงดันคร่อมเกตและซอร์ส v_{GS1} ยังคงมีค่ามากกว่าแรงดันเปรียบเทียบของมอสเฟต V_{TH} ส่วนมอสเฟต M2 สัญญาณขั้วนำเป็นศูนย์จึงไม่ขั้วนำกระแส กระแสเดรน i_{D1} เป็นผลต่างของแหล่งกระแสไฟตรง i_{dc} กับกระแสอินเวอร์เตอร์ i_{INV} ไหลผ่านช่องนำกระแสของมอสเฟตทิศทางเป็นบวก ส่วนกระแสเดรน i_{D2} เป็นผลรวมของแหล่งกระแสไฟตรง i_{dc} กับกระแสอินเวอร์เตอร์ i_{INV} ไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝง C_{OSS2} แรงดันระหว่างเดรน-ซอร์ส v_{DS1} มีขนาดลดลง และ v_{DS2} มีค่าเป็นศูนย์และแรงดันออก v_o ซึ่งเป็นผลของแรงดัน v_{DS1} และ v_{DS2} มีค่าเท่ากับแรงดัน v_{DS2} จนกระทั่งที่เวลา t_0 แรงดัน v_{GS1} มีค่าต่ำลงช่องนำกระแสเริ่มหยุดนำกระแส

ช่วงเวลา $t_0 - t_1$

v_{GS1} มีค่าลดลงต่ำกว่า V_{TH} ทำให้กระแสที่ไหลผ่านช่องนำกระแสของมอสเฟต M1 จะลดลงเป็นศูนย์ กระแส i_{D1} จะย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต C_{OSS1} เกิดการเรโซแนนซ์กันระหว่าง C_{OSS1} และตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่วงจรโหลด L แรงดัน v_{DS1} มีขนาดเพิ่มขึ้น แรงดัน v_{DS2} มีขนาดลดลง ในช่วงเวลานี้เริ่มต้น v_o ซึ่งเป็นผลของแรงดัน v_{DS1} และ v_{DS2} จึงมีทิศทางเป็นบวกขนาดลดลง และมีทิศทางเป็นลบขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดที่ช่วงเวลานี้ ที่เวลา t_1 แรงดัน v_{DS2} มีขนาดลดลงเป็นศูนย์และกลับทิศมีค่าเป็นลบ ขนาดเพียงพอที่จะและมีขนาดเพียงพอที่จะไบแอสตาม D1 กระแส i_{D2} ที่เคยไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{OSS2} จะย้ายไปไหลผ่านไดโอดแฝง D2 ที่เวลา t_1

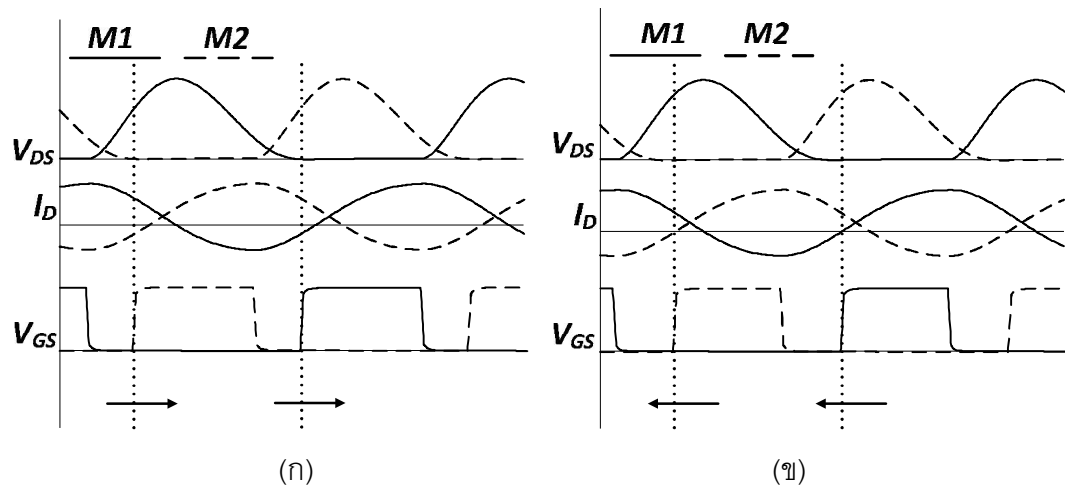
ช่วงเวลา $t_1 - t_2$

M1 และ M2 ยังคงไม่ถูกขับนำ แรงดัน v_{DS2} มีค่าเป็นลบเพียงพอที่ไบแอสตาม D2 กระแส i_{D2} ไหลผ่านไดโอดแฝง D2 ที่ M1 แรงดัน v_{DS1} ยังคงมีขนาดเพิ่มขึ้น และกระแส i_{D1} ยังไหลตัวเก็บประจุแฝง C_{OSS1} จนกระทั่งที่เวลา t_2 เริ่มขับนำ M2

ช่วงเวลา $t_2 - t_3$

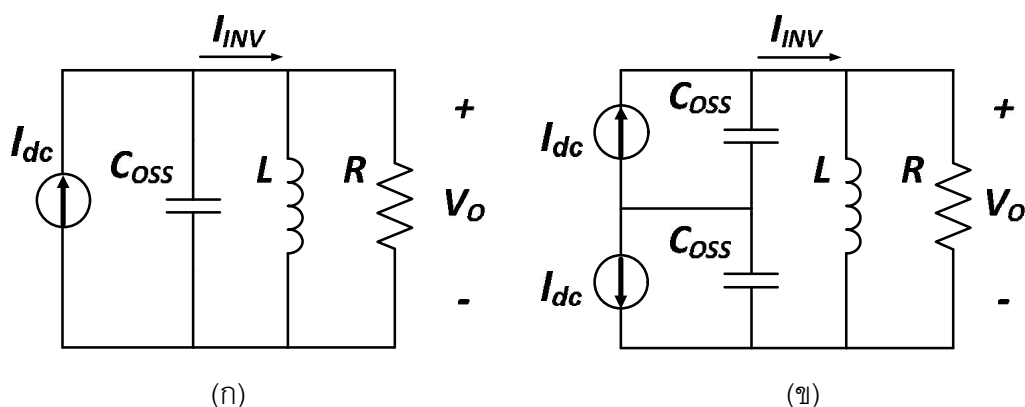
เมื่อขับนำ M2 แรงดัน v_{GS2} มีค่าเพิ่มสูงกว่า V_{TH} i_{INV} มีค่าลบขนาดลดลงแต่มีขนาดมากกว่ากระแส I_{dc} ทำให้ i_{D2} มีค่าเป็นลบและมีขนาดลดลง ในการขับนำที่เหมาะสมจะต้องทำให้แรงดัน v_{GS2} เพิ่มขึ้นสูงกว่า V_{TH} ก่อนที่ i_{D2} จะเปลี่ยนทิศ เพื่อให้มอสเฟต M2 เริ่มนำกระแสที่แรงดันศูนย์ กระแส i_{D2} จึงย้ายไปไหลผ่านช่องนำกระแสของ M2 หลังจากนั้นกระแส i_{INV} มีค่าลบและมีขนาดลดลง ทำให้ i_{D1} มีค่าเป็นบวกและมีขนาดลดลงเช่นกัน เมื่อกระแส i_{INV} กลับทิศและมีขนาดเพิ่มขึ้นเท่ากับกระแสของแหล่งกระแสตรง ทำให้ i_{D1} เป็นศูนย์ แรงดัน v_{DS1} และ v_O มีค่าสูงสุด เมื่อกระแส i_{INV} เพิ่มขึ้นมากกว่า I_{dc} กระแสเดรน i_{D1} จะเปลี่ยนเป็นลบ ทำให้ C_{OSS1} คลายประจุ แรงดัน v_{DS1} และ v_O มีขนาดลดลง จนกระทั่งที่เวลา t_3 แรงดัน v_{GS2} มีค่าต่ำลงช่องนำกระแสเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งเป็นการเริ่มทำงานครึ่งคาบหลังของวงจรมี การสลับการทำงานระหว่าง M1 และ M2

สิ่งที่ต้องคำนึงในการขับนำสวิตช์เพื่อให้สวิตช์ขับนำถูกจ้งหวะ คือขับนำมอสเฟตให้นำกระแสขณะแรงดันคร่อมมอสเฟตเป็นศูนย์ดังรูป 2.6ก และก่อนกระแสเดรนกลับทิศดังรูป 2.6ข โดยการขับนำสวิตช์ในกรณีนี้จะขับนำแบบไม่นำกระแสเหลือมกันเท่านั้นจึงจะทำให้การสวิตช์เป็นการสวิตช์แรงดันศูนย์



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นการทำงานวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์วงจรโหลดน้อยกว่าความถี่การสวิตช์
 (ก) การขับนำขณะแรงดันคร่อมมอสเฟตเริ่มเป็นศูนย์ (ข) การขับนำก่อนกระแสเดรอนเริ่มเปลี่ยนทิศ

ดังที่ได้กล่าวมาในเงื่อนไขต่างๆ พบว่าสัญญาณแรงดันออกที่เกิดขึ้นในแต่ละครึ่งลูกคลื่นมาจากการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตกับตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดแต่ละตัวรวมกันในหนึ่งคาบทำให้ได้สัญญาณแรงดันออกที่มีทั้งซีกบวกและซีกลบ และมีลักษณะรูปลักษณะของวงจรแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.7 ในเงื่อนไขการทำงานวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์วงจรโหลดมากกว่าความถี่การสวิตช์ การทำงานแต่ละคาบมีปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุในมอสเฟตกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลดเกิดขึ้นเพียง 1 ลักษณะดังรูปที่ 2.7ก เพียงแต่สลับการทำงานกัน ส่วนในเงื่อนไขการทำงานวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์วงจรโหลดน้อยกว่าความถี่การสวิตช์ การทำงานในแต่ละคาบจะมีปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่เป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด 2 ลักษณะ ซึ่งเป็นการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด กับตัวเก็บประจุแฝง 1 ตัว และ 2 ตัวสลับกันโดยมีลักษณะของวงจรดังในรูปที่ 2.7ก และ 2.7ข ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 รูปลักษณะวงจรในการเกิดเรโซแนนซ์ของอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแส

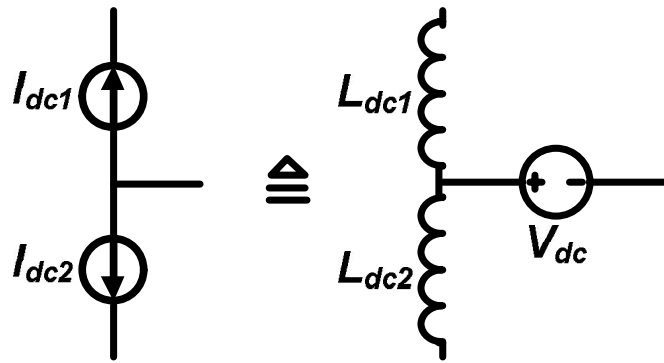
(ก) สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งไม่นำกระแส (ข) สวิตช์ทั้งสองตัวไม่นำกระแส

2.2 องค์ประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่ระดับเมกกะเฮิรตซ์

ในการวิเคราะห์ออกแบบและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแผ่นภายในสวิตช์มอสเฟตเป็นตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ของวงจรโหลด จำเป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบต่างๆของวงจร ได้แก่ แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงที่ไม่เป็นอุดมคติ มอสเฟตกำลัง และวงจรโหลดของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ออกแบบอย่างหลักการ

2.2.1 แหล่งจ่ายกระแสไฟตรง

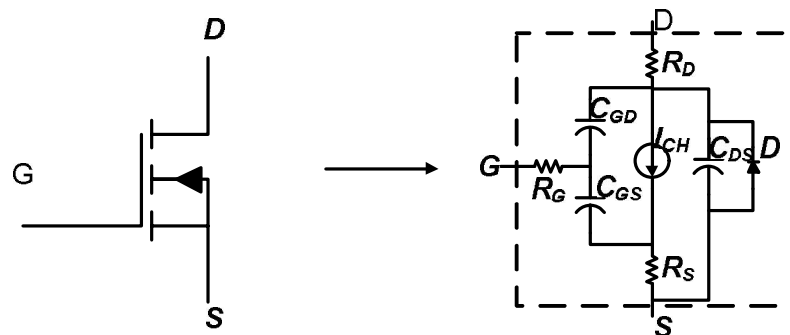
ดังที่ทราบกันอยู่แล้วว่าแหล่งจ่ายกระแสไฟตรงในเชิงปฏิบัติไม่สามารถสร้างจริงๆได้ แต่สามารถสร้างโดยอาศัยแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงช่วย ดังรูปที่ 2.8 แหล่งกระแสไฟตรง I_{dc1} และ I_{dc2} ที่เป็นแหล่งพลังงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำได้โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำด้านแหล่งจ่ายไฟตรง L_{dc1} และ L_{dc2} ต่อกันกับแหล่งแรงดันไฟตรง V_{dc} แหล่งจ่ายกระแสตรงนี้ไม่ใช่แหล่งกระแสไฟตรงที่มีค่าคงที่ แต่ขนาดของกระแสไฟตรงจะมีค่าแปรตามโหลด ในภาวะอยู่ตัว สมดุลแรงดัน-วินาที ของตัวเหนี่ยวนำ L_{dc1} , L_{dc2} จะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยต่อคาบของแรงดันคร่อมมอสเฟตมีค่าเท่ากับขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง V_{dc} เนื่องจากแรงดันคร่อมมอสเฟตแต่ละตัวเป็นตัวกำหนดรูปคลื่นในแต่ละซีกของแรงดันออก ขนาดของแรงดันออกจึงถูกกำหนดด้วยขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง V_{dc} ดังนั้นการควบคุมแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ จึงต้องควบคุมผ่านขนาดของแรงดันไฟตรง V_{dc}



รูปที่ 2.8 แหล่งกระแสไฟตรงและสมมูลของแหล่งกระแสไฟตรง

2.2.2 มอสเฟตกำลัง

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ที่ความถี่ไม่สูงมาก จะมองมอสเฟตเป็นเพียงสวิตช์ไวงานทำหน้าที่ขับนำและหยุดขับนำให้ได้สัญญาณออกตามต้องการ แต่เมื่อความถี่การทำงานของสวิตช์มากขึ้นในระดับเมกกะเฮิร์ตซ์ ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตจะต้องถูกนำมาพิจารณาเพื่อการออกแบบและกำหนดขีดจำกัดในการสวิตช์ ดังรูปที่ 2.9 เป็นโครงสร้างมอสเฟตภายในซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_{GS} C_{GD} และ C_{DS} คือตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขาของมอสเฟต โดย C_{GD} และ C_{DS} มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ตกคร่อม เพราะผลจากการเปลี่ยนแปลงของรอยต่อของสารภายในมอสเฟต แต่ค่าของ C_{GS} มีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่าของ C_{GD} ที่มีการเปลี่ยนแปลงของขั้วเกตเดรนมากกว่ารอยเท้าหรือมากกว่านั้น ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตทางปฏิบัติแตกต่างจากการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice ดังนี้



รูปที่ 2.9 มอสเฟตและวงจรสมมูลของมอสเฟต

- C_{GS} คือตัวเก็บประจุแผ่นที่คร่อมระหว่างขอกเกตและซอร์สของมอสเฟต ในแบบจำลองมอสเฟตของ PSpice และใน Datasheet จะมีค่าคงที่
- C_{GD} คือตัวเก็บประจุแผ่นที่คร่อมระหว่างขอกเกตและเดรนของมอสเฟต ในแบบจำลองมอสเฟตของ PSpice มีค่าคงที่ แต่ใน Datasheet มีค่าไม่คงที่ขึ้นกับแรงดันเดรนซอร์ส (V_{DS}) ที่เปลี่ยนแปลงไป
- C_{DS} คือตัวเก็บประจุแผ่นที่คร่อมระหว่างขอดีรนและซอร์สของมอสเฟต ในแบบจำลองมอสเฟตของ PSpice และ Datasheet มีค่าไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงตามแรงดันคร่อมเดรนซอร์ส (V_{DS}) ตามสมการ

$$C_{DS} = \frac{C_{bd0}}{\left(1 + \frac{V_{DS}}{PB}\right)^{MJ}} \quad (2.1)$$

โดยทั่วไปแล้วใน Datasheet จะไม่บอกค่าตัวเก็บประจุเหล่านี้โดยตรง แต่จะบอกอยู่ในรูปของ C_{ISS} C_{OSS} และ C_{RSS} ซึ่งมีความหมายดังนี้

C_{ISS} คือค่าตัวเก็บประจุทางเข้า (Input Capacitance)

จากการวัดระหว่างขั้วเกตซอร์ส โดยซอร์สขั้วเกตเดรนสำหรับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าของ C_{ISS} ที่ได้จากการวัดคือตัวเก็บประจุขั้วเกตซอร์ส C_{GS} ขนานกับขั้วเกตเดรน C_{GD} หรือแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_{ISS} = C_{GS} + C_{GD} \quad (2.2)$$

ค่าของตัวเก็บประจุทางเข้าจะถูกประจุให้ถึงแรงดันอ้างอิง (*threshold voltage*) ก่อนที่มอสเฟตจะนำกระแส และคายประจุจนกระทั่งต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง มอสเฟตจึงจะหยุดนำกระแส ฉะนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวขั้วนำและ C_{ISS} มีผลโดยตรงต่อช่วงเวลาการเหลื่อมเวลาของการนำกระแสและไม่นำกระแสของมอสเฟต

C_{OSS} คือค่าตัวเก็บประจุทางออก (Output Capacitance)

จากการวัดระหว่างขั้วเดรนซอร์ส โดยซอร์ทขั้วเกตซอร์สสำหรับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าของ C_{OSS} ที่ได้จากการวัดคือตัวเก็บประจุขั้วเดรนซอร์ส C_{DS} และขั้วเกตเดรน C_{GD} หรือแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_{OSS} = C_{DS} + C_{GD} \quad (2.3)$$

สำหรับการขับนำสวิตช์แบบแรงดันศูนย์หรือกระแสผ่านศูนย์ ค่าของตัวเก็บประจุด้านออกมีผลต่อการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์ของวงจรโหลด

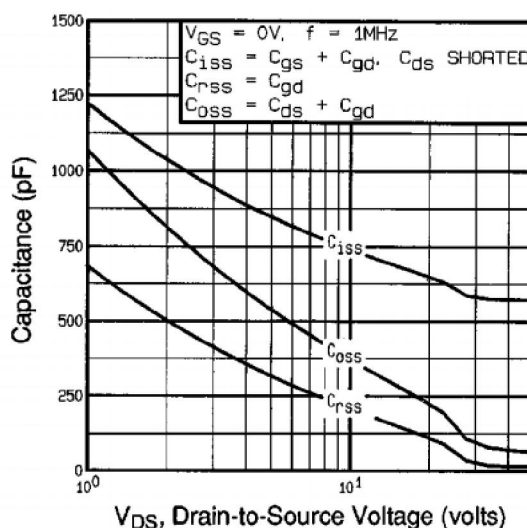
C_{RSS} คือค่าตัวเก็บประจุรีเวอร์สทรานเฟอร์ (Reverse Transfer Capacitance)

จากการวัดระหว่างขั้วเกตเดรน และขาซอร์สเข้ากับกราวน์ของวงจร ค่าของ C_{RSS} จะมีค่าเท่ากับค่าตัวเก็บประจุเกตเดรนแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_{RSS} = C_{GD} \quad (2.4)$$

ค่าของตัวเก็บประจุ C_{RSS} อาจจะมีอีกชื่อหนึ่งได้คือตัวเก็บประจุมิลเลอร์ (Miller Capacitance) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการในการเกิดช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงในขณะที่มีการสวิตช์ ทำให้เกิดการเหลื่อมของเวลาขณะจะทำการหยุดนำกระแสให้กับมอสเฟต

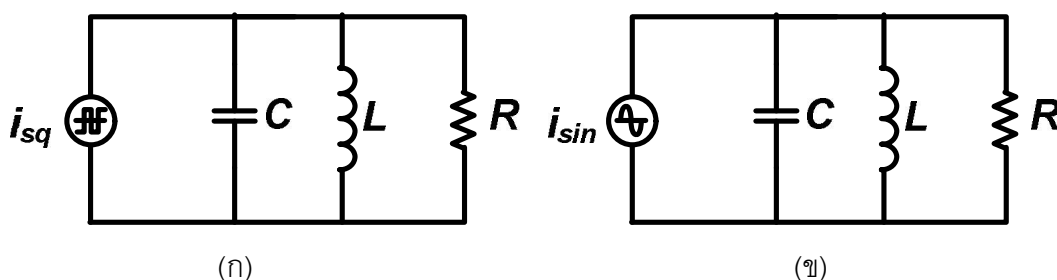
ในทางปฏิบัติการพิจารณาค่าของตัวเก็บประจุภายในมอสเฟตจึงสามารถพิจารณาได้จากกราฟตัวเก็บประจุกับแรงดันคร่อมเดรนซอร์สที่แสดงใน *Datasheet* ของมอสเฟตแต่ละเบอร์ดังเช่นในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของค่าตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันของมอสเฟตเบอร์ IRF830

2.2.3 วงจรโหลด

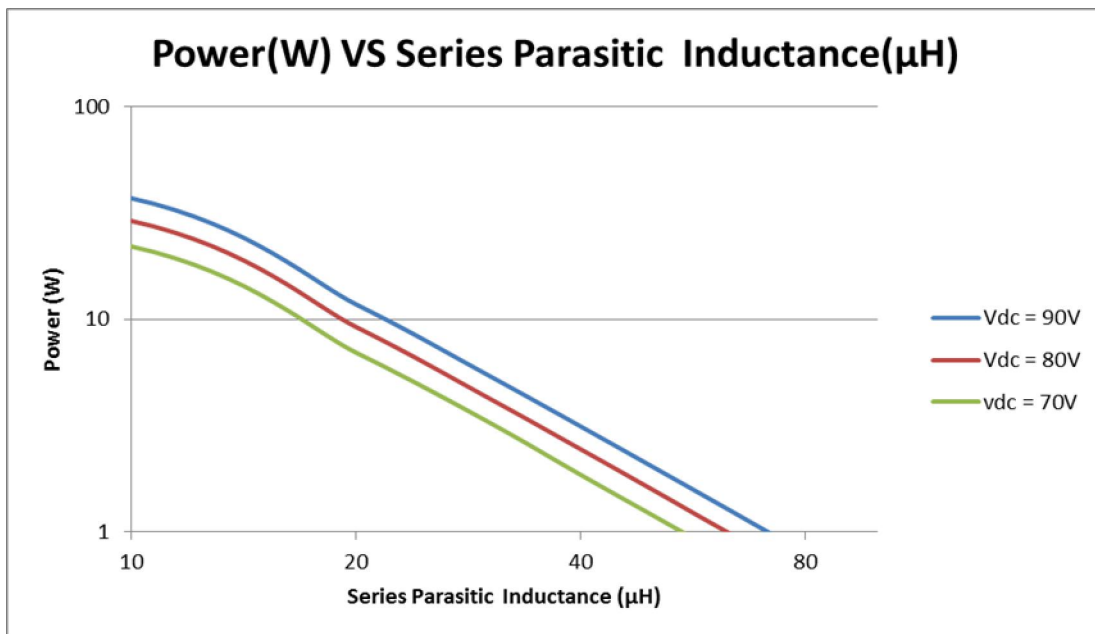
วงจรโหลดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรโหลดแบบขนาน ดังรูปที่ 2.11ก โดยตัวเก็บประจุของวงจรโหลดเป็นตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต ค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรโหลดขนานนี้จึงถูกกำหนดจากสวิตช์มอสเฟตที่เลือกใช้ แต่เดิม [8] ในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรโหลดจะใช้วิธีการประมาณแหล่งกระแสด้วยกระแสที่ความถี่หลักมูลโดยใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.11ข



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลโหลดเรโซแนนซ์แบบขนานของอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแส

แต่ในความเป็นจริงแล้วในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทั่วไป แรงดันออกของวงจรโหลดที่มีตัวเก็บประจุมอสเฟตที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นที่มาแทนตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดไม่ได้ทำให้แรงดันที่ออกมามีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์แบบเรียงกระแส ซึ่งรูปคลื่นมีองค์ประกอบ

= 644.1 pF, $C_{gd} = 45.08$ pF เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่คงที่เท่ากับ 10 เมกกะเฮิรตซ์ แกนที่พล็อตออกมาทั้งแกนตั้งแกนนอนเป็นแกนลอการิทึม เห็นได้ว่าค่ากำลังตกคร่อมที่ตัวต้านทานโหลดมีค่าลดลงอย่างมากเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังออกกับตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลัง

บทที่ 3

การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ แหล่งกระแสความถี่สูงระดับเมกกะเฮิรตซ์ ที่ ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุของวงจรโหลดสำหรับสร้างสภาวะเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด ในการออกแบบอุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จำเป็นต้องคำนึงถึงผลความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟต เนื่องจากในระหว่างสภาวะที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุคร่อมมอสเฟตมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต ทำให้ขนาดรูปร่างของกระแสและแรงดันในวงจรโหลดรวมทั้งคาบของการทำงานมีความแตกต่างจากกรณีในตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ ไม่สามารถคำนวณด้วยวิธีทั่วไปได้

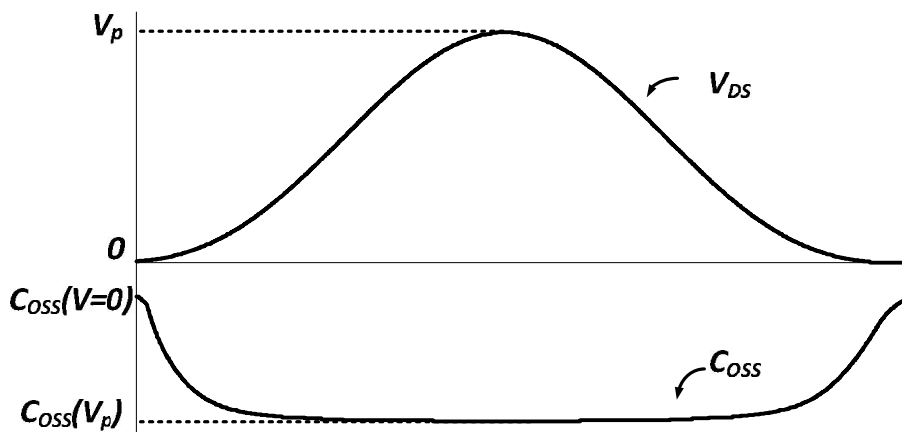
เนื้อหาในบทนี้จะ นำเสนอแนวคิดในการออกแบบค่าอุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะค่าอุปกรณ์ของวงจรโหลดที่สัมพันธ์กับตัวเก็บประจุที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ประมาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมเดรนซอสของมอสเฟต ด้วยแรงดันโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไปตรง
- 2) ใช้หลักการของสมมูลแรงดัน-วินาทีในตัวเหนี่ยวนำไฟตรง (L_{dc}) เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดแรงดันคร่อมเดรนซอสของมอสเฟตกับแรงดันไฟตรง (V_{dc}) ที่ป้อนให้แก่อินเวอร์เตอร์
- 3) ใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานระหว่างพลังงานของตัวเก็บประจุกับพลังของตัวเหนี่ยวนำ เพื่อออกแบบตัวเหนี่ยวนำในสภาวะที่ไม่มีตัวต้านทานโหลด (High Q)
- 4) คำนวณช่วงเวลาทั้งหมดในขณะที่เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ในกรณีที่มีตัวต้านทานโหลดหาช่วงเวลา (T_r)
- 5) ออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด
- 6) ประมาณขนาดของตัวเหนี่ยวนำแฝงในสายส่งกำลัง

3.1 การประมาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมทรานซอสโมสเฟต

ในการทำงานของวงจรวจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแส สภาวะเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุแฝง C_{OSS} กับตัวเหนี่ยวนำวงจรวจรโหลด จะเกิดเมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแส การถ่ายเทพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรวจรโหลดไปยังตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟต จะทำให้แรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้นโดยทั่วไปแล้วหากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ กระแสและแรงดันของวงจรวจรจะมีรูปคลื่นเป็นไซน์ แต่เนื่องจาก ตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน ส่งผลให้เกิดการเพี้ยนของกระแสและแรงดันของวงจรวจรโหลด

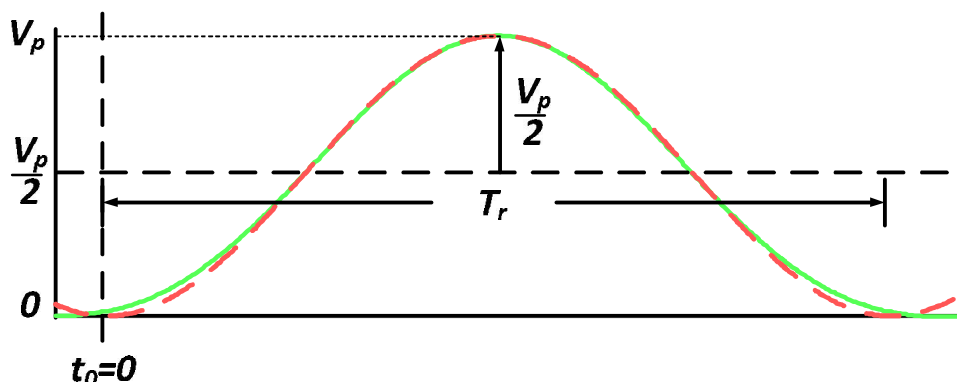
รูปที่ 3.1 แสดงรูปคลื่นของแรงดันออกและขนาดของตัวเก็บประจุแฝง C_{OSS} ที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน V_{DS} ในช่วงที่แรงดันออกมีค่าต่ำ ซึ่ง C_{OSS} มีค่าสูง อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อแรงดัน V_{DS} มีค่ามากขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าแรงดันสูงสุด หลังจากแรงดัน V_{DS} จะลดลงทำให้ C_{OSS} มีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันก็ลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์โดยมีลักษณะสมมาตรกับช่วงแรกในขณะที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเก็บประจุ C_{OSS} เมื่อแรงดัน V_{DS} เปลี่ยน

การเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเก็บประจุแฝงกับแรงดัน ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาสมการรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซอสของมอสเฟตด้วยวิธีที่ใช้กับตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ได้ แต่จากการสังเกตจะพบว่ารูปคลื่นแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นสัญญาณโคไซน์ที่มีองค์ประกอบของไฟตรง ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (3.1)

$$v(t) = \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_r} t\right) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบลูกคลื่นของแรงดัน v_{DS} กับลูกคลื่นโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรง

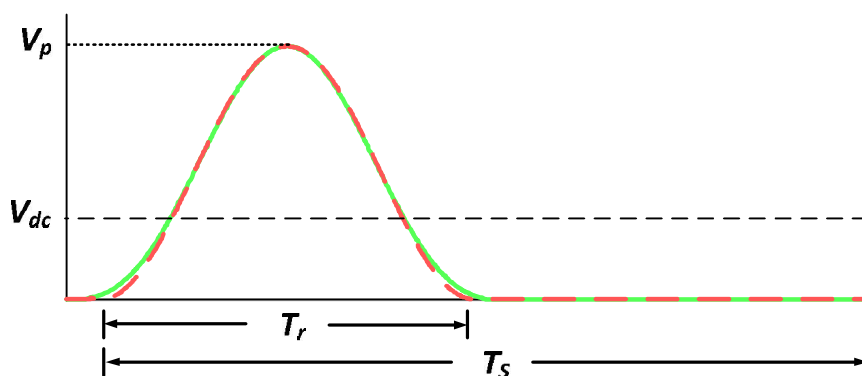
เพื่อตรวจสอบแนวคิดดังกล่าว รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบแรงดันที่คำนวณจากสมการที่ (3.1) (เส้นประ) กับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (เส้นทึบ) จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉพาะในย่านแรงดันต่ำ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ ออกแบบตัวเหนี่ยวนำไหลดจะใช้วิธีประมาณให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมสวิตช์ในช่วงที่เกิดการเรโซแนนซ์มีฟังก์ชันเป็นโคไซน์บวกกับแรงดันไฟตรง ดังนั้นแรงดัน v_{DS} ตลอดคาบการสวิตช์จะมีค่าตามสมการ(3.3)

$$v_{DS}(t) = \begin{cases} \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_r} t\right) & ; 0 \leq t \leq T_r \\ 0 & ; T_r \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (3.3)$$

โดยอาศัยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบเป็นศูนย์ในภาวะอยู่ตัว และสมการของแรงดัน v_{DS} ที่มีค่าตามสมการที่ (3.3) จะสามารถคำนวณค่ายอดของของแรงดัน v_{DS} ที่ขึ้นกับขนาดของแรงดันไฟตรงที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแหล่งแรงดันให้เป็นแหล่งกระแส โดยค่าเฉลี่ยต่อคาบของแรงดัน v_{DS} จะเท่ากับแรงดันไฟตรงตามสมการ (3.4) โดย

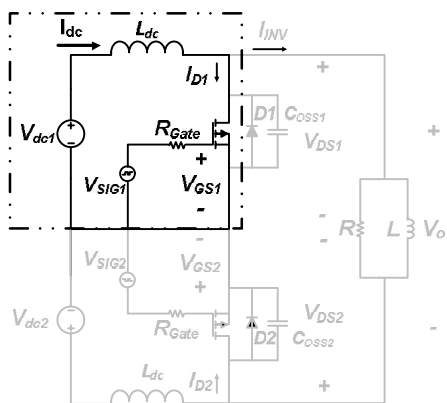
$$V_{dc} = \int_0^{T_s} v(t) dt = \frac{V_p}{2} \cdot \frac{T_r}{T_s} \Rightarrow V_p = 2V_{dc} \frac{T_r}{T_s} \tag{3.4}$$

จากสมการ 3.4 จะเห็นได้ว่า ค่ายอดของแรงดัน v_{DS} จะแปรตามแรงดันไฟตรง V_{dc} คาบการทำงานของวงจรวอร์เรโซแนนซ์ T_r และแปรผกผันกับคาบของการสวิตช์ T_s เนื่องจาก ขนาดของตัวเก็บประจุแฝง C_{OSS} ที่มีส่วนในการกำหนดค่า T_r แปรตามแรงดัน v_{DS} ที่ขึ้นกับขนาดของแรงดันไฟตรง ดังนั้น ค่ายอดของ v_{DS} จะฟังก์ชันเชิงซ้อนของ V_{dc} ดังรูปที่ 3.3

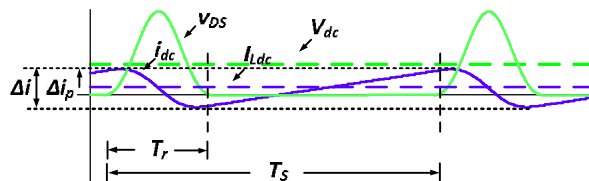


รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันคร่อมมอสเฟตที่แทนด้วยฟังก์ชันโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรงในหนึ่งคาบการสวิตช์

การประมาณแรงดัน v_{DS} ด้วยโคไซน์ฟังก์ชัน นอกจากจะช่วยให้สามารถประมาณค่ายอดของแรงดัน v_{DS} ยังช่วยให้สามารถประมาณขนาดของการกระเพื่อมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงโดยการคำนวณขนาดของกระแสที่เปลี่ยนแปลงรอบ ๆ ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟตรงด้านเข้าที่มีลักษณะดังในรูปที่ 3.4 กระแสของตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นจากค่าต่ำสุดเมื่อแรงดัน v_{DS} ลดลงเป็นศูนย์หลังจากการขั้วนำมอสเฟตให้นำกระแส โดยแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำในช่วงที่มอสเฟตนำกระแสจะมีค่าคงที่เท่ากับ V_{dc} ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.5) เมื่อ หยุดขั้วนำมอสเฟตแรงดัน v_{DS} เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มของกระแสในตัวเหนี่ยวนำลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ v_{DS} มีค่าเท่ากับ V_{dc} เมื่อโคไซน์ฟังก์ชันมีค่าเป็นศูนย์ และแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะเป็นฟังก์ชันไซน์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของกระแสรอบค่าเฉลี่ยของกระแสไฟตรงจะเป็นโคไซน์ฟังก์ชันรูปคลื่นของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีลักษณะเป็นดังในรูปที่ 3.4 และมีค่าตามสมการที่ (3.7)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 รูปวงจรและรูปคลื่นขณะสวิตช์มอสเฟตด้วยบนนำกระแส

(ก) รูปลักษณะวงจรที่แสดงเฉพาะมอสเฟตตัวบนขณะนำกระแส

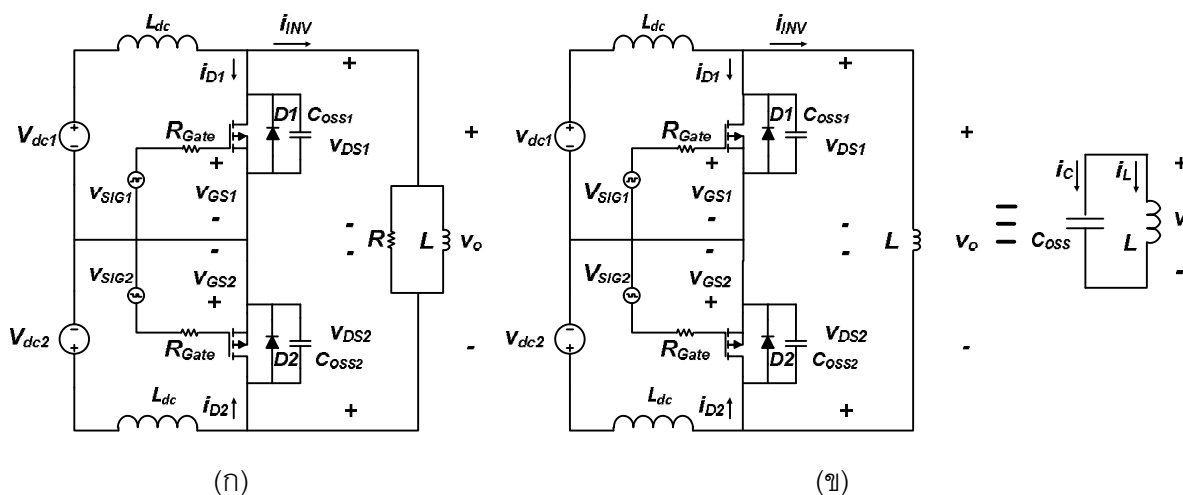
(ข) รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสในตัวเหนี่ยวนำไฟตรง

$$i_{Ldc} = I_{Ldc} - \frac{\Delta i_L}{2} + \frac{V_{DC}}{L_{dc}} t \quad ; 0 < t < (T_S - T_r) \tag{3.5}$$

เมื่อ
$$\Delta i_L = \frac{V_{dc}(T_S - T_r)}{L_{dc}} \tag{3.6}$$

$$i_{Ldc} = I_{Ldc} + \frac{\Delta i_L}{2} \cos[\omega_r \{t - (T_S - T_r)\}] \tag{3.7}$$

3.2 แรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูง

- (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงที่เป็นตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวต้านทานโหลด
- (ข) วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูงที่ปราศจากตัวต้านทานโหลดและวงจรสมมูลโหลด

หากพิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสดังรูปที่ 3.5(ก) ในส่วนของวงจรโหลดที่เป็นวงจรโหลดแบบขนานถ้าให้ค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูงหรือตัวต้านทานโหลดของวงจรมีค่ามากจนประมาณว่าเปิดวงจร ดังวงจรดังรูปที่ 3.5(ข) จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากันคือ

$$v_c(t) = v_L(t) = \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_r} t\right) \tag{3.8}$$

และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าดังนี้

$$i_c(t) = -i_L(t) = \frac{1}{L_r} \int_{-\infty}^t v_L(t) dt = \frac{1}{L_r} \int_0^t v_L(t) dt + I_{Lmax} \tag{3.9}$$

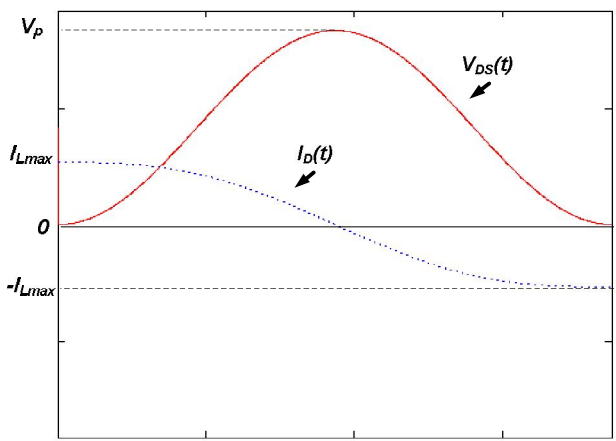
ค่าของกระแส I_{Lmax} คือค่าเริ่มต้นของกระแสภายในตัวเก็บประจุสูงสุดในขณะที่แรงดันลดลงเป็นศูนย์และกำลังเพิ่มขึ้น โดยที่ I_{Lmax} มีค่าดังสมการ

$$I_{Lmax} = \frac{V_p T_r}{4L_r} \tag{3.10}$$

เมื่อทำการแก้ปริพันธ์ของสมการที่ (3.9) แล้วจะได้สมการของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจากด้านเดรน(i_D)หรือที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ(i_C)ที่เวลาในช่วงที่เกิดการเรโซแนนซ์คือ

$$i_D(t) = i_C(t) = \frac{V_p T_r}{4\pi L_r} \sin\left(\frac{2\pi}{T_r} t\right) - \frac{V_p}{2L_r} \left(t - \frac{T_r}{2}\right) \tag{3.11}$$

เมื่อหาค่าสมการของแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุพล็อตออกมาจะได้รูปคลื่นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันคร่อมวงจรถอดและกระแสเดรนของมอสเฟต

เมื่อทราบค่าของแรงดันคร่อมสวิตช์เดรนของมอสเฟตแต่ละตัวแล้วทำให้สามารถหาค่าของแรงดันออกของวงจรถอดได้ เนื่องจากแรงดันออกของวงจรมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงดันคร่อมสวิตช์เดรนของมอสเฟตในหนึ่งคาบการสวิตช์ดังสมการที่ (3.12)

$$v_o(t) = v_{DS1}(t) - v_{DS2}(t) \quad (3.12)$$

ซึ่งมีสมการรูปคลื่นดังสมการที่ (3.13)

$$v_o(t) = \begin{cases} \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_r} t\right) & ; 0 \leq t \leq T_r \\ 0 & ; T_r < t \leq \frac{T_s}{2} \\ -\frac{V_p}{2} + \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_r} t\right) & ; \frac{T_s}{2} < t \leq \frac{T_s}{2} + T_r \\ 0 & ; \frac{T_s}{2} + T_r < t \leq T_s \end{cases} \quad (3.13)$$

3.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรโหนดโดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงาน

พฤติกรรมของวงจรเรโซแนนซ์ เช่นขนาดของกระแสและแรงดันของวงจร ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง f_0 ค่าตัวประกอบคุณภาพ Q ที่ขึ้นกับขนาดของอุปกรณ์ในวงจรสามารถคำนวณได้โดยง่ายสำหรับกรณีที่อยู่ภายในวงจรมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่สำหรับกรณีที่อุปกรณ์ในวงจรเรโซแนนซ์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังเช่นกรณีวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงภาคกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตที่มีคุณสมบัติแปรตามแรงดันเป็นตัวเก็บประจุของวงจรเรโซแนนซ์ จะไม่สามารถคำนวณคุณสมบัติของวงจรได้โดยตรง อย่างไรก็ตามหากวงจรโหนดมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง(High Q) ที่สามารถประมาณให้กำลังไฟฟ้าในความต้านทานโหนดมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำทำให้สามารถใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานกับการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหนดและตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตแม้ค่าตัวเก็บประจุแฝงจะมีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ประมาณให้การอัตราเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหนด อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหนดที่มีค่าตามสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15) ตามลำดับ

$$dE_C = q(v)dv = C(v)vdv \quad (3.14)$$

$$dE_L = L_r idi \quad (3.15)$$

ดังนั้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานในตัวเก็บประจุ โดยแทนสมการตัวเก็บประจุแฝงในมอสเฟตสมการที่ (2.1) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้ดังสมการคือ

$$\Delta E_C = \int_{V_1}^{V_2} C(v)vdv = \int_{V_1}^{V_2} C_{bd0} \left(1 + \frac{v}{PB}\right)^{-MJ} vdv \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_C = & \frac{C_{bd0}PB}{1-MJ} \left[V_2 \left(1 + \frac{V_2}{PB}\right)^{1-MJ} - V_1 \left(1 + \frac{V_1}{PB}\right)^{1-MJ} \right] \\ & - \frac{C_{bd0}PB^2}{(1-MJ)(2-MJ)} \left[\left(1 + \frac{V_2}{PB}\right)^{2-MJ} - \left(1 + \frac{V_1}{PB}\right)^{2-MJ} \right] \end{aligned} \quad (3.17)$$

และจากสมการที่ (3.15) ค่าพลังของตัวเหนี่ยวนำที่ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรถอดมีค่าคงที่ คือ

$$\Delta E_L = \int_{I_1}^{I_2} L_r idi = \frac{1}{2} L (I_2^2 - I_1^2) \quad (3.18)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน พลังงานสูงสุดที่สะสมในตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตจะเท่ากับพลังงานสูงสุดที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำตามสมการที่ (3.17) และ (3.18) ตามลำดับ

$$\Delta E_L + \Delta E_C = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{2}L_r I_{L_{\max}}^2 = \frac{C_{bd0}PB}{1-MJ} V_p \left(1 + \frac{V_p}{PB}\right)^{1-MJ} - \frac{C_{bd0}PB^2}{(1-MJ)(2-MJ)} \left[\left(1 + \frac{V_p}{PB}\right)^{2-MJ} - 1 \right] \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.20) คำนวณขนาดของตัวเหนี่ยวนำของวงจรโพลได้ตามสมการที่ (3.21)

$$L_r = \frac{2C_{bd0}}{I_{L_{\max}}^2} \left[\frac{PB}{1-MJ} V_p \left(1 + \frac{V_p}{PB}\right)^{1-MJ} - \frac{PB^2}{(1-MJ)(2-MJ)} \left[\left(1 + \frac{V_p}{PB}\right)^{2-MJ} - 1 \right] \right] \quad (3.21)$$

แทนค่า $I_{L_{\max}}$ จากสมการที่ (3.10) และ แรงดัน V_p จากสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.21) ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ (3.22)

$$L_r = \frac{V_{dc}^2 T_S^2}{8C_{bd0}} \left[\frac{2PB \cdot T_S}{(1-MJ)T_r} V_{dc} \left(1 + \frac{2V_{dc} \frac{T_S}{T_r}}{PB}\right)^{1-MJ} - \frac{PB^2}{(1-MJ)(2-MJ)} \left[\left(1 + \frac{2V_{dc} \frac{T_S}{T_r}}{PB}\right)^{2-MJ} - 1 \right] \right]^{-1} \quad (3.22)$$

ขนาดของตัวเหนี่ยวนำอาจเขียนในรูปของพลังงานสูงสุดที่สะสมในตัวเก็บประจุโดยพลังงานสูงสุดที่สะสมในตัวเก็บประจุจะขึ้นกับแรงดันไฟตรง (V_{dc}) คาบการสวิตช์ (T_S) และคาบการเรโซแนนซ์ (T_r) เป็นดังสมการที่ (3.23)

$$L_r = \frac{V_{dc}^2 T_S^2}{8\Delta E_C(V_{dc}, T_S, T_r)} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.23) เป็นการหาโดยทำงานในสภาวะที่ปราศจากการสูญเสียใดๆ และมีเพียงพลังงานของตัวเหนี่ยวนำวงจรไหลและตัวเก็บประจุแผ่ภายในมอสเฟตเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงจะมีผลของตัวเหนี่ยวนำไฟตรงเข้ามาด้วยในกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำไฟตรงนี้มีค่าไม่ใหญ่มากนัก เนื่องจากเกิดพลังงานสะสมภายในตัวเหนี่ยวนำไฟตรงขึ้นกับขนาดการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำไฟตรง (Δi_L) ดังนั้นเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการออกแบบจึงต้องนำพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำมาพิจารณา โดยสมการพลังงานของตัวเหนี่ยวนำไฟตรงคือ

$$\Delta E_{Ldc} = \frac{1}{2} L_{dc} (I_{Ldc}^2 - i_{Ldc_peak}^2); i_{Ldc_peak} = I_{Ldc} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3.24)$$

$$\Delta E_{Ldc} = -\frac{1}{2} L_{dc} \left(I_{Ldc} \Delta i_L + \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right)^2 \right) \quad (3.25)$$

$$\Delta E_{Ldc} = -\frac{1}{2} L_{dc} \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right)^2; I_{Ldc} \approx 0 \quad (3.26)$$

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในช่วงที่เกิดการเรโซแนนซ์กันระหว่างตัวเก็บประจุแผ่ภายในมอสเฟตกับตัวเหนี่ยวนำวงจรไหล จะมีการถ่ายเทพลังงานกันระหว่างตัวเก็บประจุแผ่ภายในมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำวงจรไหลขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส ซึ่งในความเป็นจริงตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟตรงจะถ่ายเทพลังงานเข้าไปในส่วนของวงจรไหลด้วยเช่นกัน โดยในช่วงที่แรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่ามากกว่าแรงดันคร่อมมอสเฟต ตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงจะสะสมพลังงาน เมื่อแรงดันคร่อมมอสเฟตมีขนาดมากขึ้นมากกว่าขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงในขณะนั้นตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงจะจ่ายพลังงานเข้าไปยังวงจรไหล ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงมีการเปลี่ยนแปลงเกิดกระแสกระเพื่อม และเนื่องจากในวงจรไหลที่มีตัวต้านทานก็จะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นที่ตัวต้านทาน ส่งผลทำให้แหล่งจ่ายแรงดันต้อง

จ่ายพลังงานเข้าไปชดเชยส่วนที่เสียไปในรูปของกระแสไฟ (I_{Ldc}) ตรงผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงส่งไปให้กับวงจรโหลดด้วย ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงจะมีทั้งองค์ประกอบของกระแสไฟสลับและกระแสไฟตรง ดังนั้นในการวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานจึงต้องนำผลการถ่ายเทพลังงานของตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงมาวิเคราะห์ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดด้วย ซึ่งค่าการเปลี่ยนของตัวเหนี่ยวนำไฟตรงสามารถหาได้ดังสมการที่ (3.24) แต่เนื่องในการวิเคราะห์ห้วงจรทำงานในสภาวะ Q สูงจึงประมาณว่ากระแสไฟตรงที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรงมีค่าประมาณศูนย์ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (3.26)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานอีกครั้งจะได้ดังสมการที่ (3.27)

$$\Delta E_{Ldc} + \Delta E_L + \Delta E_C = 0 \quad (3.27)$$

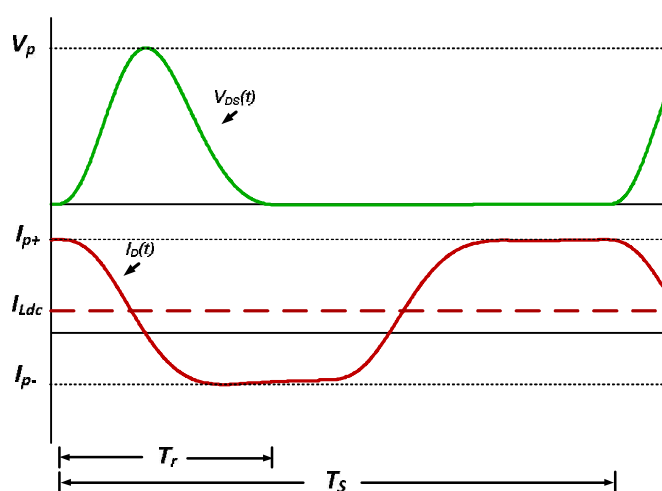
เมื่อแทนค่าต่างๆแล้วหาค่าตัวเหนี่ยวนำในเทอมของพลังงานในตัวเก็บประจุแฝงในมอสเฟต (ΔE_C) แรงแดันไฟตรง (V_{dc}) คาบการสวิตช์ (T_S) และการเรโซแนนซ์ (T_r) ได้ว่า

$$L = \frac{V_{dc}^2 T_S^2}{8(\Delta E_C(V_{dc}, T_S, T_r) + \Delta E_{Ldc}(V_{dc}, T_S, T_r))} \quad (3.28)$$

3.4 ผลของรูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์เมื่อวงจรโหลดมี Q ต่ำ

ในภาวะอยู่ตัว กระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด (i_L) ที่เกิดจากการถ่ายเทพลังงานกับตัวเก็บประจุแฝงของมอสเฟตทั้งสองที่ทำให้การแลกเปลี่ยนพลังงานกับตัวเหนี่ยวนำตัวละครึ่งคาบจะมีลักษณะสมมาตร กระแสที่ประจุตัวเก็บประจุแฝงจะมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแส i_L กับกระแสไฟตรงจากแหล่งจ่ายกระแส (I_{dc}) ส่วนกระแสที่คายประจุตัวเก็บประจุแฝงจะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส i_L กับ I_{dc} ในกรณีนี้ที่ค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรโหลดมีค่าสูง ขนาดของกระแส i_L จะมีค่ามากกว่าขนาดของกระแสไฟตรงจากแหล่งจ่ายกระแส ทำให้รูปคลื่นของกระแสที่ประจุตัวเก็บประจุแฝงและกระแสที่คายประจุตัวเก็บประจุแฝง มีขนาดใกล้เคียงกัน รูปคลื่นของแรงดัน v_{DS} ในช่วงประจุและคายประจุจะมีลักษณะสมมาตรรอบค่ายอด ตามสมการที่ (3.1) และแรงดันออกก็ใกล้เคียงกันโดยมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่ำ แต่หากค่าตัวประกอบคุณภาพของ

วงจรไหลลดลง ขนาดของกระแสไฟตรงจาก แหล่งจ่ายกระแส I_{dc} มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อ เทียบกับ ขนาดของกระแส i_L ทำให้รูปคลื่นของกระแสที่ประจุตัวเก็บประจุแฉง และกระแสที่คายประจุตัว เก็บประจุแฉง มีขนาดแตกต่างกัน มากขึ้นโดย กระแสที่ประจุตัวเก็บประจุแฉงจะมีค่ามากกว่า กระแสที่คายประจุตัวเก็บประจุแฉง รูปคลื่นของแรงดัน v_{DS} ในช่วงประจุและคายประจุจะมี ลักษณะไม่สมมาตร โดยช่วงเวลาในการประจุน้อยกว่าช่วงเวลาคายประจุโดยความแตกต่างจะ เพิ่มขึ้นเมื่อค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรไหลลดลง



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรนในสภาวะที่ใส่ตัวต้านทานโหลด

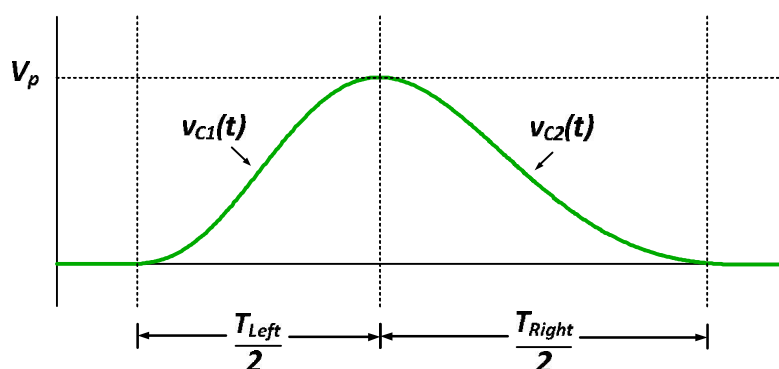
ในการวิเคราะห์หากระแส I_{Ldc} ถึงแม้ว่าแรงดันออกจะมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากเดิม แต่จะ ถือว่าค่ายอดของแรงดันออกเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นเมื่อคำนวณหากำลังเฉลี่ยในหนึ่งคาบ การสวิตช์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานโหลดหรือกำลังออกของอินเวอร์เตอร์(P_O) ได้ดังสมการที่ (3.29) เมื่อ $v_o(t)$ มีค่าตามสมการที่ (3.13)

$$P_O = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} \frac{v_o^2(t)}{R} dt = \frac{3}{4} \cdot \frac{T_r}{T_S} \cdot \frac{V_p^2}{R} = \frac{3T_S}{T_r} \cdot \frac{V_{dc}^2}{R} \quad ; V_p = 2V_{dc} \frac{T_S}{T_r} \quad (3.29)$$

กำลังออกของแหล่งจ่ายไฟตรงแต่ละชุดจะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ดังนั้น กระแสไฟตรงจากแหล่งจ่ายไฟตรง (I_{dc}) แต่ละชุด คำนวณได้จากกำลังออกของอินเวอร์เตอร์(P_O) โดยมีค่าตามสมการที่ (3.30)

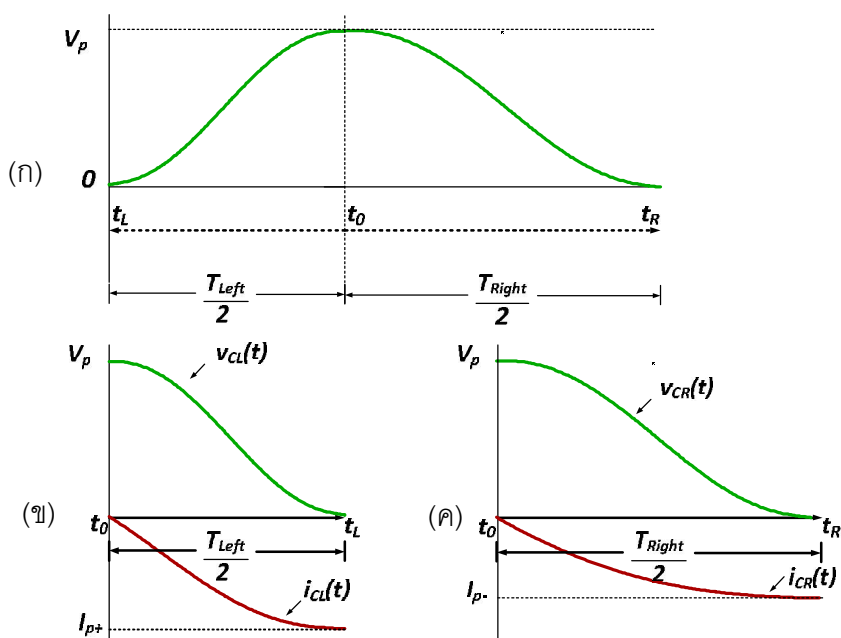
$$I_{Ldc} = \frac{P_O}{2V_{dc}} = \frac{3}{8} \cdot \frac{T_r}{T_S} \cdot \frac{V_p^2}{V_{dc}R} = \frac{3T_S}{2T_r} \cdot \frac{V_{dc}}{R} \quad (3.30)$$

การคำนวณช่วงเวลาที่มีอสเฟตหยุดนำกระแสที่เป็นตัวกำหนดจังหวะการขับนำมอสเฟตที่แรงดันศูนย์เพื่อลดกำลังสูญเสียจากการขับนำมอสเฟตเมื่อแรงดันยังไม่ลดลงเป็นศูนย์ โดยรูปคลื่นของแรงดัน v_{DS} ไม่สมมาตรกัน จะทำโดยการแบ่งรูปคลื่นของแรงดัน v_{DS} ในช่วงที่มีการประจุด้วยกระแสสูงออกจากช่วงคายประจุด้วยกระแสที่ต่ำกว่าอย่างละครึ่งคาบที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ ที่มีคาบแตกต่างกันโดยมีฟังก์ชัน $v_1(t)$ และ $v_2(t)$ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์ที่มีฟังก์ชันแรงดันต่างกัน

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณช่วงเวลาในการประจุและคายประจุของตัวเหนี่ยวนำแฝงของมอสเฟต ในที่นี้จะสมมติรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำไหลดเป็นฟังก์ชันของโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรงและวิเคราะห์แต่ละซีกของรูปคลื่นเพียงครึ่งรูปคลื่นดังรูปที่ 3.9(ก) เพื่อให้ง่ายในการหาพื้นที่ใต้กราฟของกระแสหรือประจุโดยเริ่มจากกระแสเป็นศูนย์โดยแบ่งเป็นรูปคลื่นทางด้านซ้ายและทางด้านขวา ดังรูปที่ 3.9(ข) และ 3.9(ค) ตามลำดับ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 คลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรน

(ก) รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรนในช่วงเวลาที่เกิดเรโซแนนซ์ทั้งหมด

(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเดรนสำหรับกรณีซีกซ้ายของรูปคลื่น(ก)

(ค) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเดรนสำหรับกรณีซีกขวาของรูปคลื่น(ก)

สำหรับรูปคลื่นทางด้านซ้าย

$$v_{CL}(t) = \frac{V_p}{2} + \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{Left}} t\right) \tag{3.31}$$

สำหรับรูปคลื่นทางด้านขวา

$$v_{CR}(t) = \frac{V_p}{2} + \frac{V_p}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{Right}} t\right) \tag{3.32}$$

คำนวณหากระแสในตัวเก็บประจุในลักษณะเดียวกับสมการที่ (3.11) ได้สมการของกระแสด้านซีกซ้ายและซีกขวาตามสมการที่ (3.33) และ (3.34) ตามลำดับ

สำหรับรูปคลื่นซ้าย

$$i_{CL}(t) = -\frac{V_p}{2L_r}t - \frac{V_p T_{Left}}{4\pi L_r} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{Left}}t\right) \quad (3.33)$$

สำหรับรูปคลื่นขวา

$$i_{CR}(t) = -\frac{V_p}{2L_r}t - \frac{V_p T_{Right}}{4\pi L_r} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{Right}}t\right) \quad (3.34)$$

ค่ายอดของกระแสที่ประจุ i_{p+} และคายประจุ i_{p-} ตัวเก็บประจุแฝงมีค่าตามสมการที่ (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ

$$I_{p+} = I_{Lmax} + I_{Ldc} \quad (3.35)$$

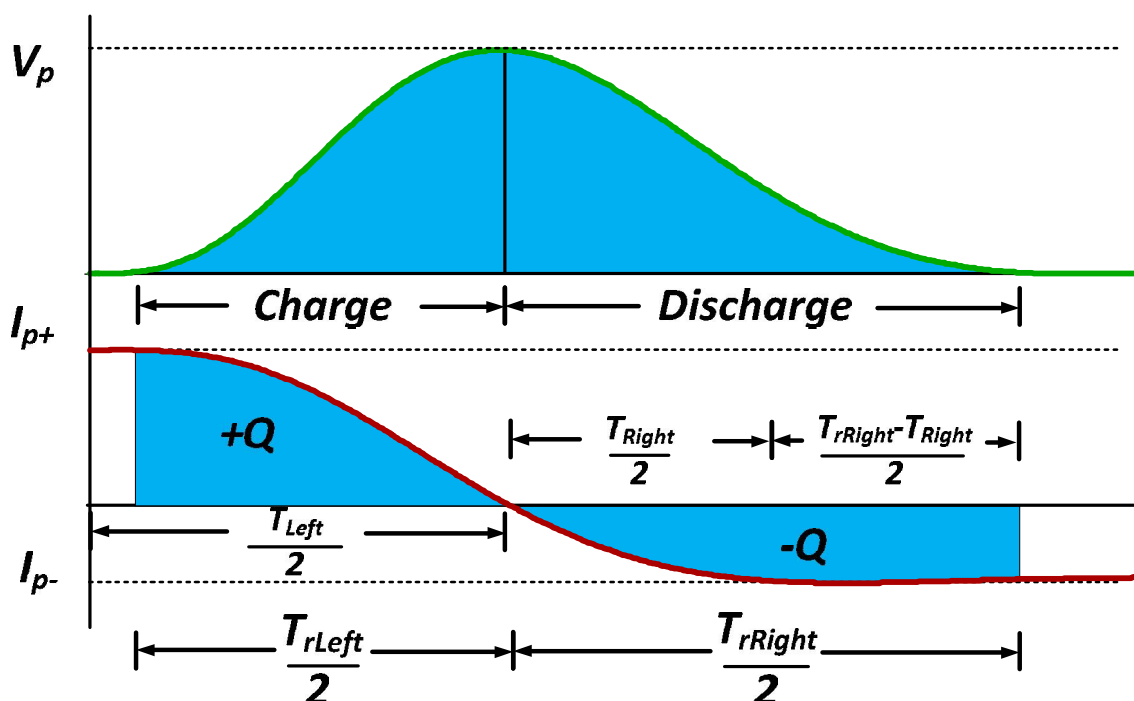
และ $I_{p-} = I_{Lmax} - I_{Ldc} \quad (3.36)$

เมื่อทราบค่ายอดของกระแสที่ประจุ i_{p+} และคายประจุ i_{p-} ตัวเก็บประจุแฝงทำให้สามารถหาค่าของคาบแต่ละซีกได้โดยแทนค่า I_{p+} และ I_{p-} ลงในสมการที่ (3.33) และ (3.34) ที่เวลา $t = T_{Left}/2$ และ $t = T_{Right}/2$ ได้ดังสมการที่ (3.37) และ (3.38) ตามลำดับ

$$T_{Left} = \frac{4L_r I_{p+}}{V_p} \quad (3.37)$$

และ $T_{Right} = \frac{4L_r I_{p-}}{V_p} \quad (3.38)$

ในการคำนวณหาค่า T_{Left} และ T_{Right} มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการของตัวแปร T_{Left} และ T_{Right} เพื่อให้สามารถแก้สมการเพื่อคำนวณ T_{rLeft} และ T_{rRight} ในการเขียนสมการในรูปของตัวแปร T_{rLeft} และ T_{rRight} ทำโดยการคำนวณหาประจุที่ใช้ในการประจุและคายประจุ C_{OSS} จากศูนย์ถึงค่าสูงสุด และจากค่าสูงสุดลงเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3.10 ตามสมการที่ (3.39) และ (3.40) ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสเดรนที่แสดงการเก็บและคายประจุ (Q)

สำหรับการประจุตัวเก็บประจุ

$$|Q| = \left| \int_0^{T_{rleft}} i_{CL}(t) dt \right| = \frac{V_p T_{Left}^2}{8\pi^2 L_r} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{T_{Left}} \frac{T_{rleft}}{2}\right) \right] + \frac{V_p}{4L_r} \left(\frac{T_{rleft}}{2}\right)^2; T_{rleft} \leq T_{Left} \quad (3.39)$$

สำหรับการคายตัวเก็บประจุ

$$|Q| = \left| \int_0^{T_{rright}} i_{CR}(t) dt \right| = \frac{V_p T_{Right}^2}{4\pi^2 L_r} + \frac{V_p}{16L_r} T_{Right}^2 + i_{p-} \left(\frac{T_{rright}}{2} - \frac{T_{Right}}{2}\right); T_{rright} \geq T_{Right} \quad (3.40)$$

ประจุที่ใช้ในการประจุและคายประจุ C_{OSS} จากศูนย์ถึงค่าสูงสุดและจากค่าสูงสุดลงเป็นศูนย์ สามารถคำนวณได้จากค่าตัวเก็บประจุที่แปรค่าตามแรงดันตามสมการที่ (3.41)

$$Q = \int_0^{V_p} C(v)dv = \frac{C_{bd0}PB}{1-MJ} \left[\left(1 + \frac{V_p}{PB} \right)^{1-MJ} - 1 \right] \quad (3.41)$$

เมื่อเขียนสมการโดยให้ค่าของประจุที่ใช้ในการประจุและคายประจุจากทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากันจะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณ T_{rLeft} และ T_{rRight} จากการคำนวณประจุที่ใช้ในการประจุและคายประจุตามลำดับนี้ สามารถหาค่าตัวแปร T_{rLeft} และ T_{rRight} ได้ตามสมการที่ (3.42) และ (3.43) ตามลำดับ

$$T_{rLeft} = 2 \cdot \left(\frac{T_{Left}^2}{2\pi^2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi T_{rleft}}{T_{Left}} \right) \right] + \frac{V_p}{4L_r} \left(\frac{T_{rleft}}{2} \right)^2 - \frac{4L_r}{V_p} |Q| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.42)$$

$$T_{rRight} = \frac{2|Q| - \frac{V_p T_{Right}^2}{2\pi^2 L_r} - \frac{V_p}{8L_r} T_{Right}^2}{i_{p-}} + T_{Right} \quad (3.43)$$

สำหรับสมการที่ (3.42) แก่ด้วย numerical method เพื่อให้ได้ค่า T_{rLeft}

ช่วงเวลาหยุดนำกระแสที่ใช้สำหรับการกำหนดเวลาหยุดนำกระแสคำนวณได้จากสมการที่ (3.44)

$$T_r = \frac{T_{rLeft}}{2} + \frac{T_{rRight}}{2} \quad (3.44)$$

3.5 ข้อกำหนดและขีดจำกัดในการออกแบบ

ข้อกำหนดและขีดจำกัดที่ใช้ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแส ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นดังนี้

1. กำหนดขดแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ที่ระดับแรงดัน 200V
2. ให้ค่ากำลังออกที่โหลดพิกัด 300Ω มีค่าไม่เกิน 40W
3. ค่าความต้านทานโหลดเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 300Ω จนถึงอนันต์
4. กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟตไม่เกิน 3.5A แรงดันคร่อมมอสเฟตไม่เกิน 400V

ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะออกแบบที่ความถี่การสวิตช์ 10MHz โดยประมาณว่าแรงดันที่คร่อมสวิตช์เป็นโคไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรงในขณะมอสเฟตรับแรงดัน

ขั้นที่ 1) ที่กำลังออก 40W ค่าตัวต้านทานโหลด 300Ω แรงดันขด 200V คาบการสวิตช์เท่ากับ 10MHz จากสมการที่ (3.4) จะได้ว่าคาบการเรโซแนนซ์ของวงจรเท่ากับ

$$T_r = \frac{4}{3} P_o \frac{T_s \cdot R}{V_p^2} = \frac{4}{3} \cdot 40 \cdot \frac{100n \cdot 300}{200^2} = 40ns$$

ขั้นที่ 2) ทางด้านเข้าคำนวณหาค่าแรงดันไฟตรงป้อนเข้าของอินเวอร์เตอร์จากสมการ

$$V_{dc} = \frac{V_p T_r}{2T_s} = \frac{200 \times 40n}{2 \times 125n} = 40V$$

ขั้นที่ 3) นำค่าแรงดันขดแรงดันออกสูงสุดลงในสมการพลังงานในตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตสมการที่ (3.18) สำหรับตัวเก็บประจุแฝงเดรนซอส และตัวเก็บประจุแฝงเกตซอส ได้ดังนี้

$$\Delta E_{C_{Ds}} = \frac{C_{bd01} P B_1}{1 - M J_1} V_p \left(1 + \frac{V_p}{P B_1} \right)^{1 - M J_1} - \frac{C_{bd01} P B_1}{(1 - M J_1)(2 - M J_1)} \left[\left(1 + \frac{V_p}{P B_1} \right)^{2 - M J_1} - 1 \right] = 1.568 \times 10^{-6} J$$

$$\Delta E_{C_{GD}} = \frac{C_{bd0_2} PB_2}{1 - MJ_2} V_p \left(1 + \frac{V_p}{PB_2}\right)^{1 - MJ_2} - \frac{C_{bd0_2} PB_2}{(1 - MJ_2)(2 - MJ_2)} \left[\left(1 + \frac{V_p}{PB_2}\right)^{2 - MJ_2} - 1 \right] = 0.469 \times 10^{-6} J$$

ดังนั้น

$$\Delta E_C = \Delta E_{C_{DS}} + \Delta E_{C_{GD}} = 2.037 \times 10^{-6} J$$

ขั้นที่ 3) หาค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{dc1} และ L_{dc2} ของภาคจ่ายกระแสที่ด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำตัวนี้ในทางทฤษฎีแล้วยังมีค่ามากเท่าไรหรือกระแสที่ไหลเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ยังมีค่าริบเป็ลน้อยลง แต่ในทางปฏิบัติแล้วความถี่รบกวนเปิดของกระแสที่ไหลมีค่าเท่ากับค่าความถี่ของการสวิตช์ ฉะนั้นตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวนี้จะต้องมีค่า self-resonant frequency ที่สูงกว่าค่าความถี่การสวิตช์ ซึ่งได้เลือกให้ค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสองนี้มีค่าประมาณ 10 เท่าของค่าตัวเหนี่ยวนำในวงจรโหลด ในที่นี้สามารถหาค่าได้ด้วยประมาณค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดในกรณีที่ปราศจากตัวเหนี่ยวนำไฟตรงสมการที่ (3.23) ได้ดังนี้

$$L = \frac{V_{dc}^2 T_S^2}{8E_C (V_{dc}, T_S, T_r)} = \frac{(40)^2 (100n)^2}{8(2.037 \times 10^{-6})} = 0.982 \mu H$$

ซึ่งในที่นี้ค่าตัวเหนี่ยวนำไฟตรงที่สร้างขึ้นมามีขนาดเท่ากับ

$$L_{dc1} = L_{dc2} = 12 \mu H$$

ดังนั้นสามารถประมาณค่ากระแสริบเป็ลที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงดังสมการที่ (3.6) ได้เท่ากับ

$$\Delta i_p = \frac{V_{dc} (T_S - T_r)}{2L_{dc}} = \frac{40(125n - 100n)}{2 \times 12 \mu} = 0.1 A$$

คำนวณหาค่าพลังงานภายในตัวเหนี่ยวนำไฟตรงจากสมการที่ (3.26) ได้ดังนี้

$$\Delta E_{Ldc} = \frac{1}{2} L_{dc} \Delta i_p^2 = \frac{1}{2} \times 12 \mu \times (0.125)^2 = 0.094 \times 10^{-6} J$$

ขั้นที่ 4) คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรถอดจากสมการที่ (3.28) ได้ดังนี้

$$L = \frac{V_{dc}^2 T_S^2}{8(E_C(V_{dc}, T_S, T_r) - E_{Ldc}(V_{dc}, T_S, T_r))} = \frac{(40)^2 (100n)^2}{8(2.037 \times 10^{-6} - 0.094 \times 10^{-6})} = 1.052 \mu H$$

ซึ่งในที่นี้ค่าตัวเหนี่ยวนำไฟตรงที่สร้างขึ้นมาได้มีขนาดเท่ากับ

$$L_r = 0.9 \mu H$$

ในความเป็นจริงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรถอดในเชิงปฏิบัติสามารถใช้สมการหาค่าตัวเหนี่ยวนำในกรณีที่ปราศจากผลของตัวเหนี่ยวนำไฟตรงหรือมีผลของตัวเหนี่ยวนำไฟตรงก็ได้ เนื่องจากในการพันตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถพันออกมาให้ตรงกับค่าที่ได้จากคำนวณ แต่สมการของตัวเหนี่ยวนำมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ในเชิงการจำลองการทำงานให้ถูกต้องมากขึ้นเพียงเท่านั้น

เนื่องจากการทำงานของวงจรในสถานะที่ Q ต่ำสำหรับค่าตัวต้านทานโหลดมีค่าเท่ากับ 300Ω ในการทำงานจริงช่วงเวลาในการเรโซแนนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณหาช่วงเวลาในการเรโซแนนซ์เมื่อวงจรทำงานในสถานะ Q ที่ตัวต้านทานมีค่า 300Ω เพื่อกำหนดช่วงเวลาของสัญญาณขับนำทางด้านเกตในสถานะแรงดันศูนย์ต่ำสุด โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1) คำนวณหาคาบการเรโซแนนซ์จริงในสถานะตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูงมาก จากค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรถอดมีขนาด $0.9 \mu H$ แรงดันยอด $200V$ คาบการสวิตช์เท่ากับ $100ns$ จากสมการที่ (3.28) ด้วยใช้ numerical method ได้ดังนี้

$$T_r = 38.3ns$$

และทำให้แรงดันไฟตรงที่ต้องจ่ายให้เปลี่ยนแปลงไปดังนั้นจึงต้องคำนวณใหม่ด้วยสมการ

$$V_{dc} = \frac{V_p T_r}{2T_s} = \frac{200 \times 38.3n}{2 \times 100n} = 38.3V$$

ขั้นที่ 2) คำนวณหาค่าของประจุที่ต้องใช้ในการประจุทั้งหมดหรือคายประจุทั้งหมดของตัวเก็บประจุจากสมการที่ (3.41) โดยค่าแรงดันยอดคือ 200V สำหรับตัวเก็บประจุขั้วเดรนซอร์สและขั้วเกตเดรน

$$Q_{DS} = \left[\left(1 + \frac{V_p}{PB_1} \right)^{1-M_1} - 1 \right] = 20.59nC$$

$$Q_{GD} = \left[\left(1 + \frac{V_p}{PB_2} \right)^{1-M_2} - 1 \right] = 10.12nC$$

ดังนั้นประจุทั้งหมดที่ใช้ในการประจุหรือคายประจุคือ

$$Q = Q_{DS} + Q_{GD} = 20.59nC$$

ขั้นที่ 3) คำนวณหาค่าของกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรถอดจากสมการที่ (3.10) และกระแสไฟตรงที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านไฟตรง (I_{Ldc}) ในสมการที่ (3.30) ได้ดังนี้

$$I_{Lmax} = \frac{V_p T_r}{4L_r} = 2.328A$$

$$I_{Ldc} = \frac{3T_s}{2T_r} \cdot \frac{V_{dc}}{R} = 0.5 A$$

ทำให้ได้ค่าของยอดกระแสสูงสุดและต่ำสุดในตัวเก็บประจุแฝงในมอสเฟตดังสมการที่ (3.35) และ (3.36) ตามลำดับดังนี้

$$I_{p+} = I_{Lmax} + I_{Ldc} = 2.828 A$$

$$I_{p-} = I_{Lmax} - I_{Ldc} = 1.828 A$$

ขั้นที่ 4) คำนวณหาค่าของ T_{Left} และ T_{Right} จากสมการที่ (3.37) และ (3.38) ตามลำดับ

$$T_{Left} = \frac{4L_r I_{p+}}{V_p} = 50.9 ns$$

$$T_{Right} = \frac{4L_r I_{p-}}{V_p} = 32.9 ns$$

ขั้นที่ 5) นำค่าทั้งหมดที่ได้ใส่ลงไปในสมการที่ (3.42) และ (3.43) เพื่อหาค่าของการเรโซแนนซ์แต่ละด้านคือ T_{rLeft} และ T_{rRight} ตามลำดับ โดยค่าของ T_{rLeft} หาโดยใช้ numerical method ในการหา ซึ่งได้ดังนี้

$$T_{Left} = 37.46 ns$$

$$T_{rRight} = \frac{2|Q| \left[\frac{V_p T_{Right}^2}{2\pi^2 L_r} - \frac{V_p}{8L_r} T_{Right}^2 \right]}{i_{p-}} + T_{Right} = 46.44 ns$$

คาบเวลาในการเรโซแนนซ์ทั้งหมดหาได้จากสมการที่ (3.44) ดังนี้

$$T_r = \frac{T_{rLeft}}{2} + \frac{T_{rRight}}{2} = 41.95ns$$

ดังนั้นสำหรับการขับนำควรกำหนดช่วงเวลาขับนำเกิดในขณะสัญญาณเป็นศูนย์มากกว่าหรือเท่ากับ 41.95ns ขึ้นไปเพื่อให้การสวิตช์ยังเป็นการสวิตช์แรงดันศูนย์

3.6 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลัง

การใช้งานอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องจักรตัดไฟฟ้าทางด้านหัวออกของอินเวอร์เตอร์ จำเป็นต้องต่อกับสายไฟที่มีความยาวค่าหนึ่งเพื่อให้สะดวกในการจับหัวจี้ตัดเพื่อผ่าตัดเนื้อเยื่อ ดังนั้นความยาวของสายส่งกำลังนี้จะประพฤติตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับเนื้อเยื่อ ซึ่งหากขนาดของอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำแฝงมีค่ามากก็จะส่งผลต่อกำลังออกของเนื้อเยื่อมีค่าลดลง แนวทางในการลดผลของตัวเหนี่ยวนำแฝงสามารถทำได้หลายวิธี ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิธีการลดโดยพิจารณาเดินสายไฟส่งกำลังซึ่งจะกล่าวถึงและทดลองในบทที่ 4

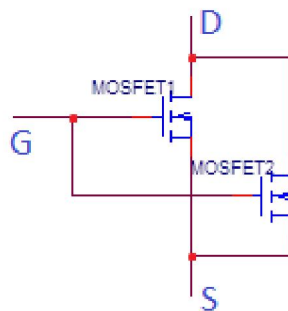
บทที่ 4

การจำลองและการทำงาน

4.1 การจำลองการทำงาน

ในบทที่ 3 ได้เสนอวิธีการออกแบบ ของวงจรในรูปที่ (2.12) และสมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ในบทนี้นำเสนอผลการคำนวณ ผลการจำลองและผลการทดลอง เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแรงดัน และการเปลี่ยนแปลงโหลดต่อลักษณะการทำงานของวงจรตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณทางทฤษฎี

ก่อนที่จะเข้าสู่การจำลองการทำงาน ในการวิเคราะห์รูปคลื่นที่ตกคร่อมเดรนซอสของมอสเฟตที่ถูกต้องจำเป็นต้องเปลี่ยนพารามิเตอร์ภายในมอสเฟตเสียก่อน เนื่องจากพารามิเตอร์ใน PSpice จะไม่ตรงตามที่ตามความเป็นจริง ในการปรับค่ามอสเฟตใน PSpice ให้สามารถนำมาจำลองการทำงานได้นั้นจำเป็นต้องใช้มอสเฟตสองตัวที่มีพารามิเตอร์แตกต่างกัน เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุคร่อมเกตเดรน (C_{gd}) ใน PSpice มีค่าคงที่ที่ต่างจากความจริงที่ค่าของ C_{gd} เปลี่ยนแปลงตามแรงดันคร่อมเดรนซอส จึงนำมอสเฟตทั้งสองมาต่อแบบขนานกันดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การต่อมอสเฟตเพื่อให้ค่า C_{oss} มีค่าใกล้เคียงการวัด

โดยมอสเฟตทั้งสองตัวจะปรับค่าให้ค่าตัวเก็บประจุคร่อมขั้วเกตเดรน (C_{gd}) ให้มีค่าน้อยมากๆ ตัวหนึ่ง(MOSFET1) จะใช้แทนผลของตัวเก็บประจุ C_{DS} และมอสเฟตตัวสอง(MOSFET2) จะใช้แทนผลของตัวเก็บประจุ C_{GD} โดยแล้วปรับค่าพารามิเตอร์ซึ่งได้แก่ C_{bd0} ,PB และ MJ ของ

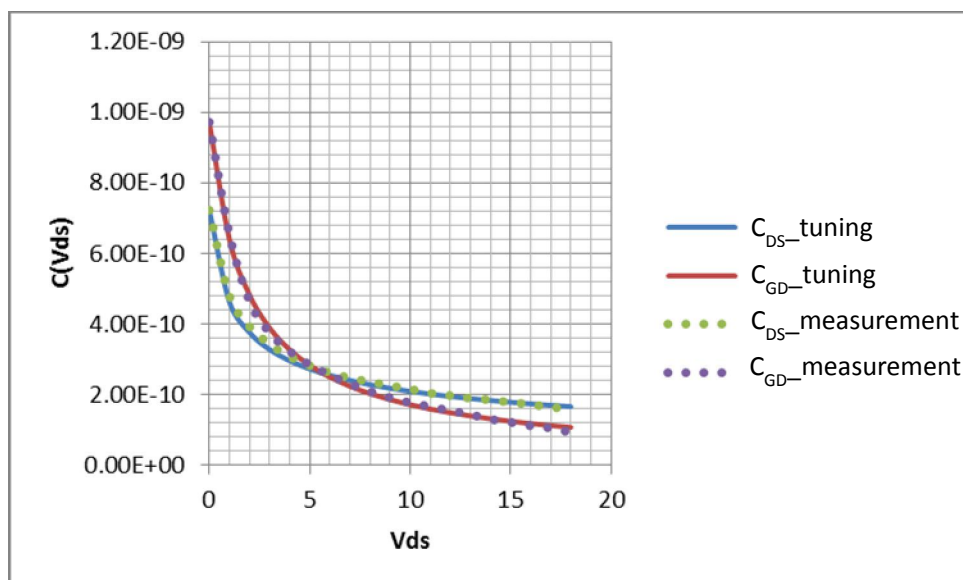
มอสเฟตทั้งสองให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของมอสเฟต ในวิธีการปรับค่าตัวแปร C_{bd0} PB และค่า MJ ของมอสเฟตทั้งสองตัวมีวิธีการดังนี้

1. วัดค่าของตัวเก็บประจุ C_{DS} และ C_{GD} จากเครื่อง Impedance Analyzer ที่แรงดันแต่ละค่าตั้งแต่ 0 ถึง 25 โวลต์ เก็บผลทำมาพล็อตกราฟของตัวเก็บประจุ C_{DS} และ C_{GD} ที่แปรตามแรงดัน V_{DS} ดังรูปที่ 4.1
2. ทำการปรับค่ามอสเฟตตัวที่หนึ่ง โดยเปิด PSpice Model ปรับค่าของ C_{bd0} ให้ตรงกับค่าตัวเก็บประจุ C_{DS} ที่วัดได้ขณะไม่ได้ป้อนแรงดันเดรนซอส ($V_{DS} = 0$) หลังจากนั้นค่อยๆปรับเปลี่ยนค่าของ PB และ MJ จนกระทั่งมีเส้นกราฟใกล้เคียงกับเส้นกราฟตัวเก็บประจุ C_{bd} จากการวัดด้วยโปรแกรม Excel
3. ทำการปรับค่ามอสเฟตตัวที่สอง โดยทำตามขั้นตอนที่สอง

เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของมอสเฟตตรงกับที่วัดแล้วจะได้ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าของตัวเก็บประจุ C_{OSS} มีค่าแตกต่างจากเดิมมากขั้นตอนการปรับค่าพารามิเตอร์ของมอสเฟตให้ตรงกับค่าที่วัดได้จึงมีความสำคัญมากกับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่สร้างสภาวะเรโซแนนซ์กับตัวเก็บประจุที่ไม่เป็นเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเรียบร้อยแล้วมีค่าดังนี้

สำหรับแทนตัวเก็บประจุมอสเฟต C_{DS} : $C_{bd01} = 723\text{pF}$, $PB_1 = 0.51$, $MJ_1 = 0.41$

สำหรับแทนตัวเก็บประจุมอสเฟต C_{GD} : $C_{bd02} = 972\text{pF}$, $PB_2 = 1.70$, $MJ_2 = 0.90$



รูปที่ 4.2 กราฟ C-V ของตัวเก็บประจุ C_{DS} และ C_{GD} ภายในมอสเฟตจากการวัดและปรับค่า

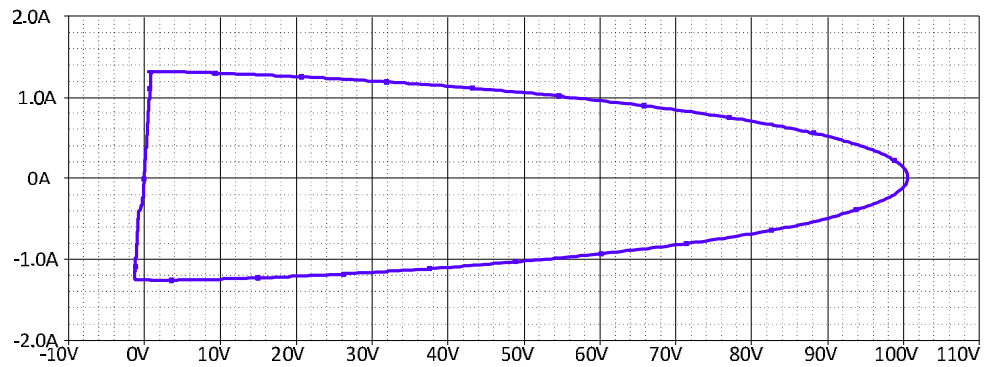
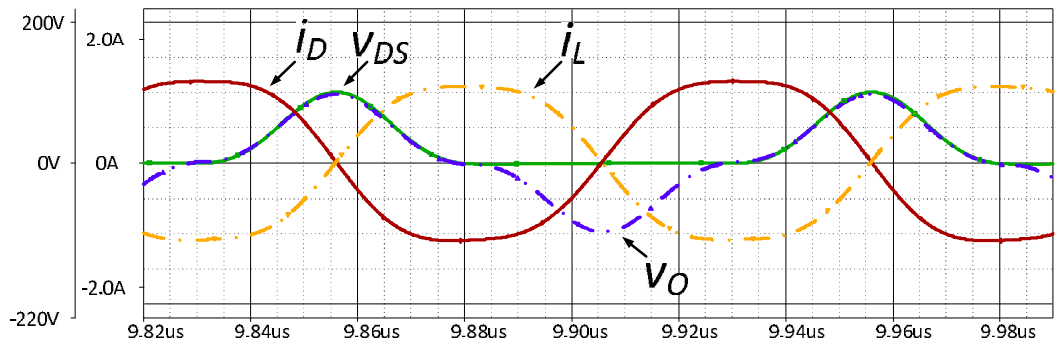
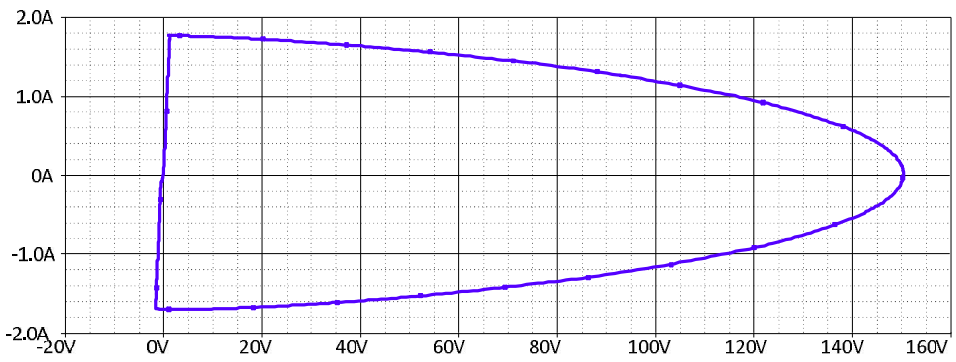
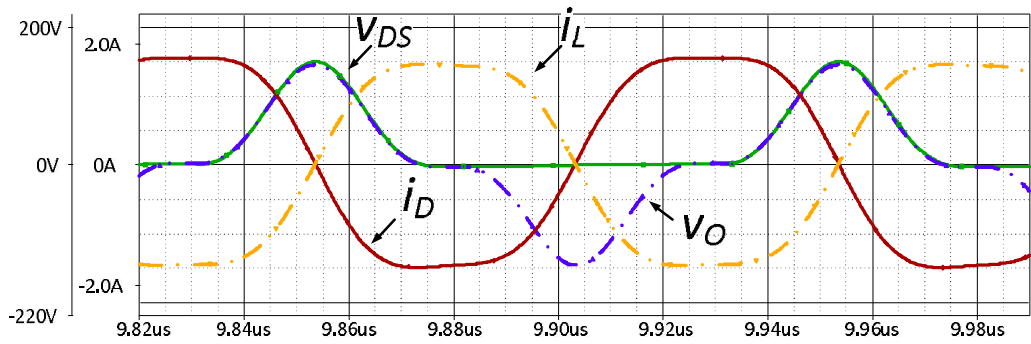
4.1.1 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดขดแรงดันออกในภาวะไร้โหลด

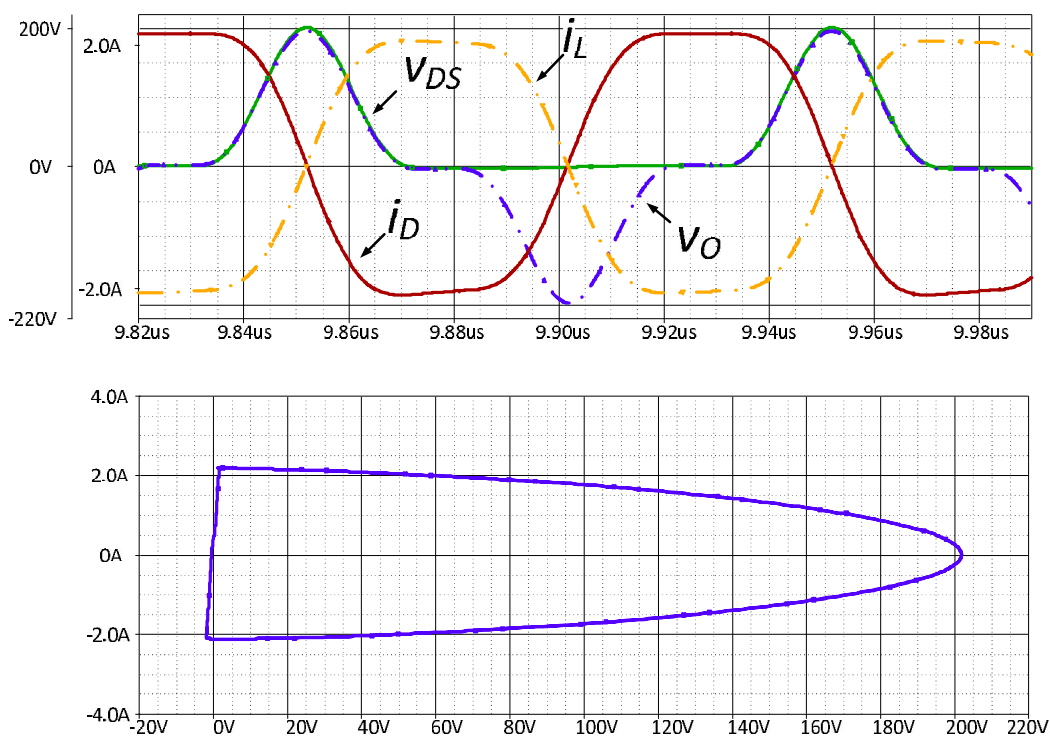
ในการศึกษาพฤติกรรมจากวงจรอินเวอร์เตอร์ จากผลการเปลี่ยนแปลงขนาดขดแรงดันออก กำหนดให้ $L_{dc} = 12\mu\text{H}$, $L_r = 0.9\mu\text{H}$, $R = \infty\Omega$ ค่าตัวต้านทานภายในโมสเฟตมีค่าน้อยมาก (ปราศจากการสูญเสีย) การเปลี่ยนแปลงขนาดขดแรงดันออกทำโดยการปรับขนาดแรงดันไฟตรงด้านเข้า ให้ได้ขนาดขดของแรงดันออกแตกต่างกัน 3 ค่าดังนี้คือ $V_p = 100\text{V}$, 150V และ 200V เนื่องจากค่าเฉลี่ยต่อคาบของแรงดัน V_{DS} จะถูกกำหนดด้วยแรงดันไฟตรงด้านเข้าตามหลักสมดุลแรงดัน-วินาทีของตัวเหนี่ยวนำของแหล่งจ่ายไฟตรงด้านเข้า

การคำนวณทำโดยการกำหนดค่าขดของแรงดันออกซึ่งมีค่าเท่ากับค่าขดของแรงดันคร่อมโมสเฟตที่หยุดนำกระแส ที่ใช้คำนวณ ค่าแรงดันไฟตรง V_{dc} กระแสสูงสุดที่ผ่านตัวเก็บประจุแฝง I_{Lmax} และคาบของการเกิดเรโซแนนซ์ T_r ตามสมการ 3.4 , 3.10, 3.26 ตามลำดับ ส่วนการจำลองจะปรับขนาดของแรงดันไฟตรงเพื่อให้ได้ค่าขดของแรงดันออกที่กำหนดและวัดค่า I_{Lmax} และ T_r จากผลการจำลองที่มีรูปคลื่นดังในรูปที่ 4.3 ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณและจำลองของอินเวอร์เตอร์ สำหรับแรงดันออกต่าง ๆ กัน

พารามิเตอร์	ค่าขดแรงดันออก V_p (V)					
	100		150		200	
	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง
V_{dc} (V)	22.96	22.7	31	30.5	38.3	37.9
I_{Lmax} (A)	1.276	1.3	1.719	1.72	2.128	2.137
T_r (ns)	45.92	44.36	41.26	40	38.3	37.17

(a) $V_{DS} = 100V$ (b) $V_{DS} = 150V$

(c) $V_{DS} = 200V$

รูปที่ 4.3 ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์ $V_{DS}=100,150$ และ $200V$

รูปคลื่น switching- trajectory

ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 ค่ายอดแรงดันออก มีค่า $100V$, $150V$ และ $200V$ ในภาวะไร้โหลด รูปคลื่นของแรงดัน V_{DS} , V_O , และ i_L ในขณะที่มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงจะมีลักษณะสมมาตรกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการคำนวณมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับผลการจำลองกล่าวคือ การเพิ่มแรงดันขนาดของแรงดันไฟตรงด้านเข้าจะทำให้ทั้งขนาดของแรงดันออกและกระแสในตัวเก็บประจุเพิ่มมากขึ้น ส่วนคาบการเกิดเรโซแนนซ์จะลดลงเมื่อแรงดันคร่อมมอสเฟตเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากการลดลงของค่าตัวเก็บประจุเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบแรงดันตรงด้านเข้าที่ได้จากการใช้หลักของสมดุลแรงดัน-วินาทีของตัวเหนี่ยวนำ ในการคำนวณและการจำลองค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าในการคำนวณการประมาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมมอสเฟตเป็นรูปคลื่นโคไซน์ที่มีองค์ประกอบแรงดันไฟตรงมีค่าใกล้เคียงกับการจำลอง ส่วนการคำนวณกระแสในตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดในสภาวะค่าตัวประกอบคุณภาพสูงโดยใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานให้ผลการคำนวณที่

ใกล้เคียงกับผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ในรูปคลื่น switching- trajectory จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ชีกบนและชีกล่างเท่ากันแสดงให้เห็นว่าการจำลองทำงานโดยปราศจากการสูญเสีย

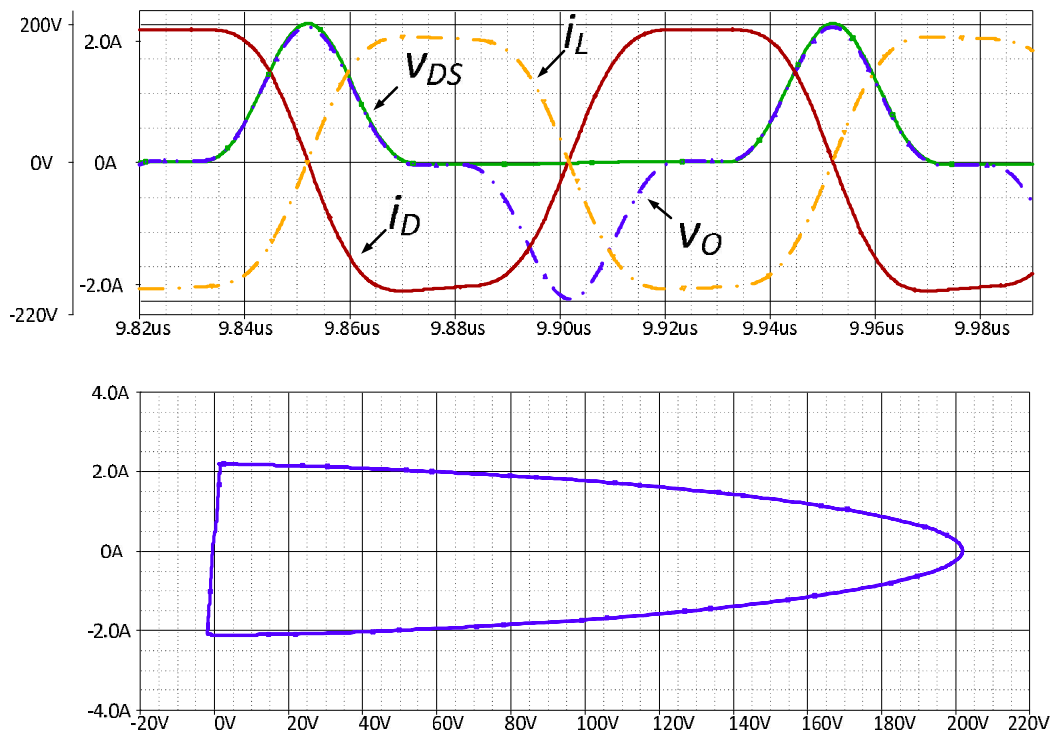
ดังนั้นในการขับนำสวิตช์เพื่อให้เป็น ZVS ช่วงเวลาของสัญญาณที่ขับนำมอสเฟตในสถานะศูนย์ที่น้อยที่สุด สามารถกำหนดได้จากช่วงเวลาเรโซแนนซ์จากยอดแรงดันออกหรือแรงดันเข้าไฟตรงที่ต้องการน้อยสุด เนื่องจากหากกำหนดช่วงเวลาของสัญญาณที่ขับนำมอสเฟตในสถานะศูนย์ จากช่วงเวลาเรโซแนนซ์จากยอดแรงดันออกหรือแรงดันเข้าไฟตรงออกสูงสุดอาจจะเกิดปัญหาเนื่องจากมอสเฟตมีการนำกระแสขณะที่แรงดันคร่อมเดรนซอสของมอสเฟตมีค่าแรงดันสูงก็เป็นได้

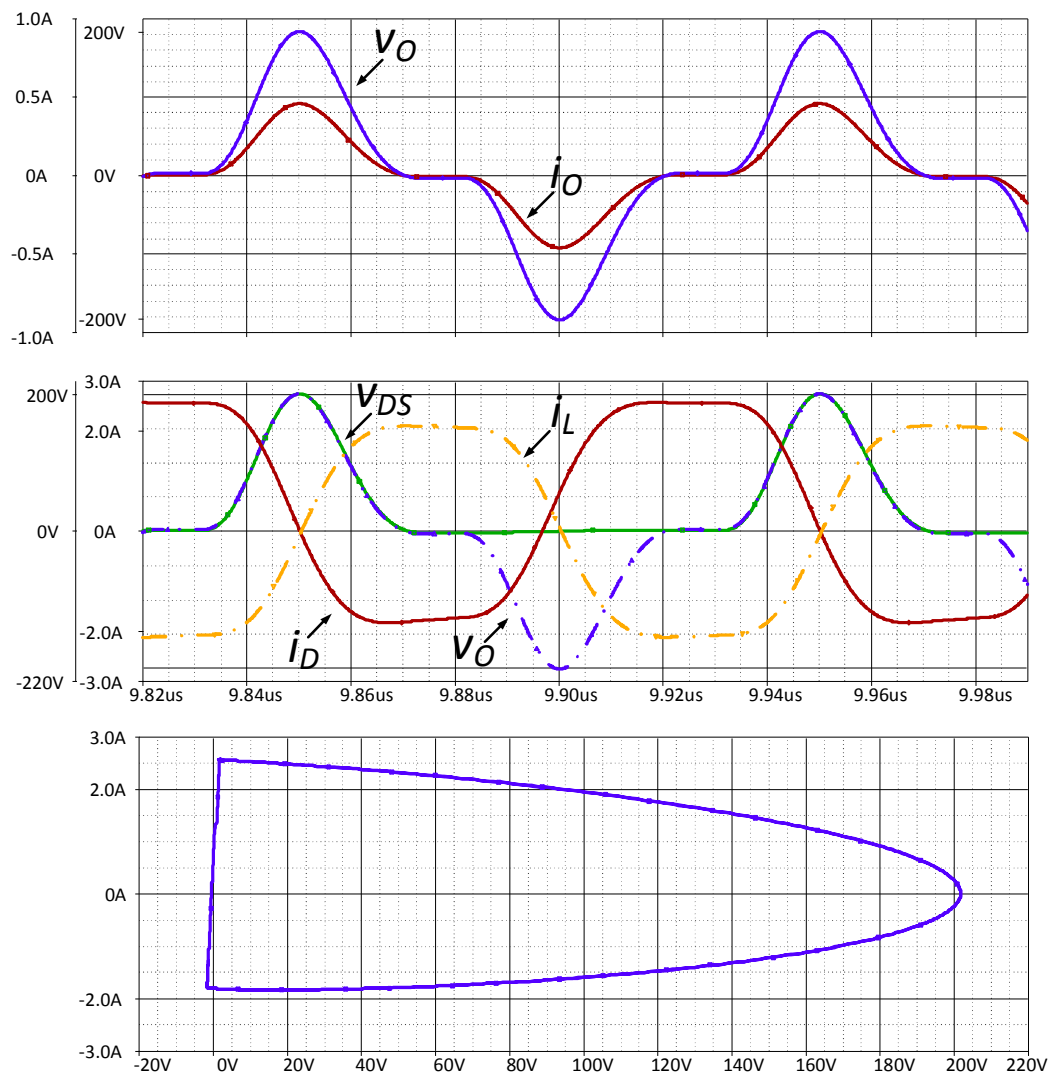
4.1.2 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลด

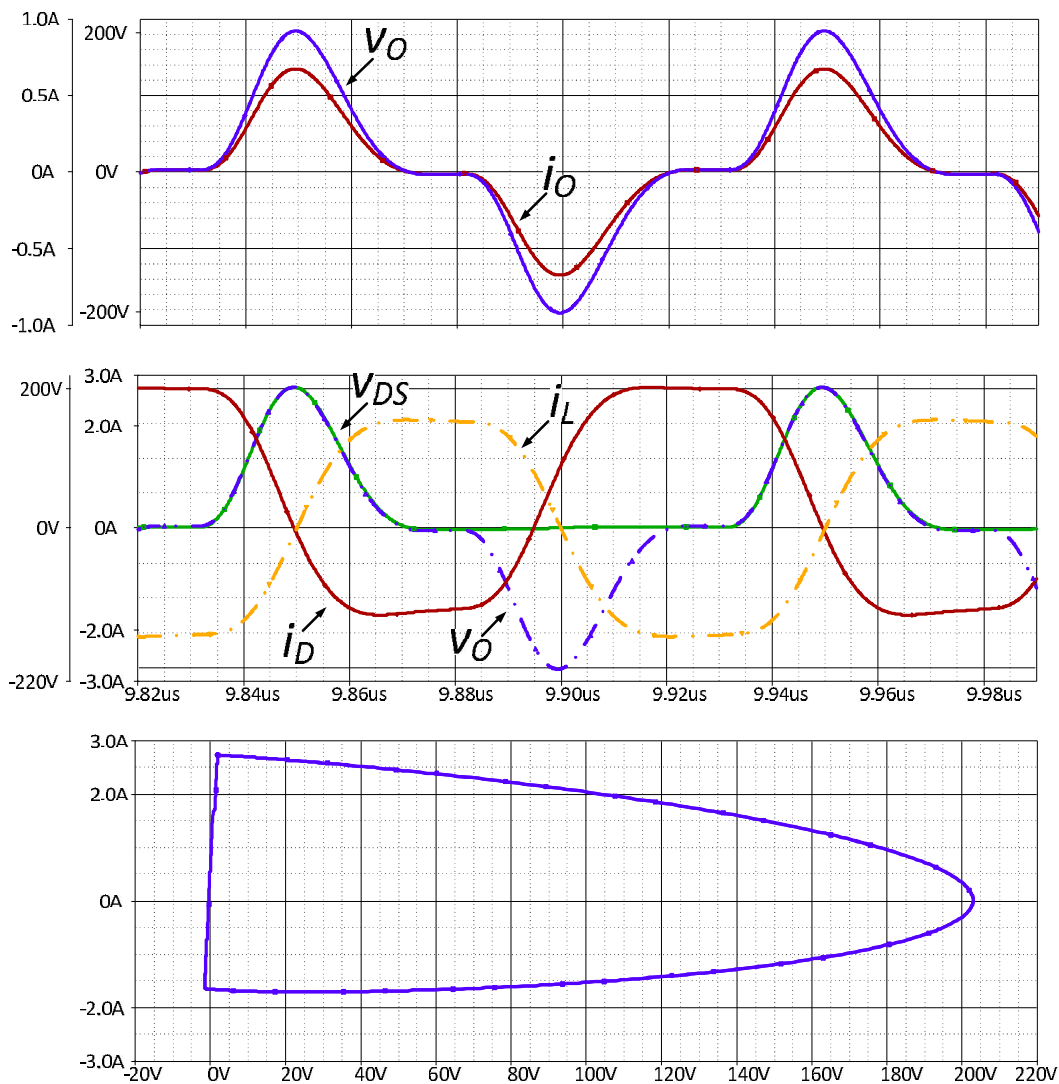
ในการศึกษาพฤติกรรมจากวงจรอินเวอร์เตอร์ จากผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลด ใช้ค่าอุปกรณ์เช่นเดียวกับกรณีศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกในข้อ 4.1.1 โดยการปรับค่าแรงดันเข้าไฟตรงให้ได้ขนาดยอดแรงดันออกเท่ากับ 200 V และศึกษาเปรียบเทียบการทำงานกรณีไร้โหลดและกรณีที่ตัวต้านทานโหลดมีค่า 440 Ω และ 300 Ω

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณและจำลองของอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลดแต่ละค่า

พารามิเตอร์	ค่าความต้านทานโหลด (Ω)					
	∞		440		300	
	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง
V_{dc} (V)	22.96	22.7	38.3	37.9	38.3	38.4
I_{Ldc} (A)	0	0	0.341	0.38	0.5	0.524
I_{Lmax} (A)	1.276	1.3	2.128	2.137	1.719	1.72
T_{rleft} (ns)	19.15	18.586	19.73	17.78	18.73	17.43
T_{rright} (ns)	19.15	18.586	21.97	19.484	23.22	19.8
T_r (ns)	38.3	37.17	41.7	37.264	41.95	37.23
P_o (W)	0	0	24	24	34.968	35.16

(a) $R = \infty \Omega$

(b) $R = 440\Omega$

(c) $R = 300\Omega$

รูปที่ 4.4 ผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลด $R = \infty, 440$ และ 300Ω

รูปคลื่น switching- trajectory

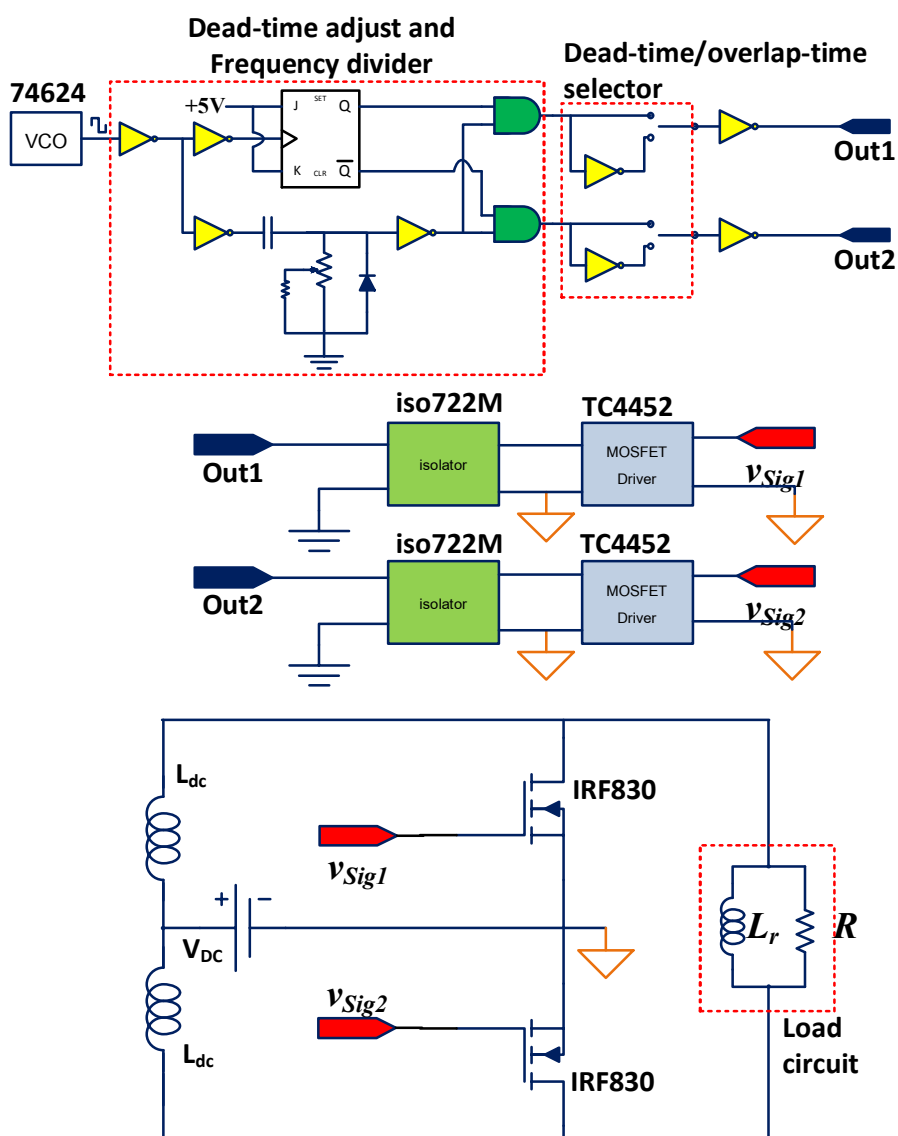
จากผลการคำนวณและการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ค่าโหลดต่างๆ ได้แก่ $R = \infty, 440\Omega$ และ 300Ω จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าของแรงดันเข้าไฟตรงที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันในกรณีที่โหลดแต่ละค่า และใกล้เคียงกันทั้งการคำนวณและการทดลอง แต่แตกต่างกันเพียงที่ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ไม่มีโหลดจะมีความสมมาตรกันทั้งซีกซ้ายและซีก แต่เมื่อมีการใส่โหลดตัวต้านทานขึ้น รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์

มอสเฟตจากเดิมที่สมมาตรกันทางซีกซ้ายและซีกขวาจะไม่สมมาตรโดยเอนไปทางซ้ายจากเดิมที่ปราศจากโหลด อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงค่ายอดของกระแสเดรนที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{OSS} เฉพาะที่เป็นองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับแล้วมีค่าใกล้เคียงกันที่โหลดแต่ละค่า รวมถึงการคำนวณด้วย แต่หากพิจารณารวมกันทั้งไฟตรงและไฟสลับแล้ว กระแสเดรนในกรณีที่มีโหลดตัวต้านทานก็คือกระแสเดรนในกรณีปราศจากตัวต้านทานบวกกับกระแสไฟตรงที่ตัวเหนี่ยวนำไฟตรง ดังสมการ(3.10) ในบทที่สามนั่นเอง อาจจะสามารถได้อีกประการหนึ่งคือในการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์กันระหว่างตัวเก็บประจุ C_{OSS} และตัวเหนี่ยวนำ L_r จำเป็นต้องใช้รีแอคทีฟพาวเวอร์ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าของกำลังส่วนนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงดันเข้าไฟตรงที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันเข้าไฟตรงนี้จะจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เพียงแค่ช่วงแรกของการทำงาน หลังจากนั้นพลังงานก็จะไหลเวียนอยู่ในตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลด แต่ถ้าหากในฝั่งวงจรโหลดมีการดึงพาวเวอร์ขึ้น แหล่งจ่ายไฟตรงก็จะจ่ายกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงเข้าไปยังวงจรโหลดทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเกิดองค์ประกอบของไฟตรงขึ้น

ในกรณีของการเปลี่ยนตัวต้านทานโหลดให้มีค่าน้อยลง จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตในแต่ละซีกแตกต่างกัน ส่งผลทำให้ช่วงเวลาในการสร้างสภาวะเรโซแนนซ์จากค่าแรงดันศูนย์ถึงยอด และจากยอดถึงศูนย์มีค่าไม่เท่ากัน ในการคำนวณและการจำลอง ช่วงเวลาดังที่ได้กล่าวก็มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากการวัดจากการจำลองแรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตในช่วงก่อนที่จะเพิ่มขึ้นแรงดันไม่ได้เป็นศูนย์ และหลังจากที่แรงดันคร่อมสวิตช์มอสเฟตลดลงเป็นศูนย์แล้วก็ไม่ใช่ศูนย์จริงๆ แต่มีค่าเป็นลบเล็กๆเนื่องจากไดโอดภายในมอสเฟตนำกระแส สาเหตุที่ของรูปคลื่นแรงดันออกคร่อมสวิตช์มีลักษณะเอียงไปด้านซ้าย เนื่องจากยอดแรงดันออกของแรงดันคร่อมสวิตช์ถูกกำหนดจากแรงดันเข้าไฟตรงตามหลักของสมดุลแรงดัน-วินาที ในการประจุในกรณีที่มีปราศจากโหลด และในกรณีที่มีโหลดก็ยังคงใช้ประจุเท่าเดิมในการประจุเข้าตัวเก็บประจุเท่าเดิม แต่เนื่องจากในกรณีที่มีโหลดตัวต้านทานขึ้น ทำให้กระแสเดรนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังสมการ คือค่ายอดสูงสุดของกระแสเดรนมาค่าสูงขึ้น และค่ายอดต่ำสุดของกระแสเดรนมีค่าต่ำลง ทำให้ในช่วงเวลาประจุจึงใช้เวลาน้อยลง ส่วนช่วงเวลาที่คายประจุใช้เวลามากขึ้น เนื่องจากการจำลองนี้ทำงานโดยปราศจากการสูญเสียรูปคลื่น switching- trajectory จะเห็นได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟทั้งซีกบนและซีกล่างเท่ากัน

4.2 ผลการทดลอง

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแสที่ใช้ทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 สวิตช์ไวงานใช้ มอสเฟตของ IR เบอร์ IRF830 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 500V กระแส 4.5A มีค่าความต้านทาน $R_{DS(on)}$ เท่ากับ 1.5Ω ค่าตัวเก็บประจุแผ่นด้านนอก C_{OSS} เท่ากับ 160pF โดยใช้ไอซี SN74LS624 เป็นตัว กำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่ความถี่ 20MHz ต่อเข้ากับชุดปรับช่วงเวลาเหลือมที่ใช้ตัวเก็บประจุ $C = 150\text{pF}$ กับตัวต้านทานปรับค่าได้ 500Ω และวงจรหารความถี่ที่ใช้ J-K flip-flop สัญญาณที่ได้จะมีความถี่ 10MHz และสามารถปรับช่วงเวลาเหลือมได้ จากนั้นอาจผ่านเข้าไปยังวงจรกลับ สัญญาณเพื่อเปลี่ยนโหมดของสัญญาณจากที่เป็นช่วงเหลือมมาเป็นแบบช่วงเวลาไม่เหลือมกันได้ สัญญาณที่ผ่านการปรับแต่งเรียบร้อยแล้ว จะผ่านเข้าไปยังไอซีเบอร์ ISO722M เพื่อแยกโดดทาง ไฟฟ้าระหว่างส่วนของสัญญาณการขับนำสัญญาณจากดิจิตอลป้องกันความเสียหายของวงจร ส่วนดิจิตอลในการมีการต่อผิดพลาดในส่วนของวงจรโหลดและวงจรเกต ผ่านเข้าไปยังวงจรขับนำ ตัวมอสเฟต ที่ใช้ไอซีเบอร์ TC4452 ที่มีค่าความต้านทานภายในเท่ากับ 1.5Ω โดยแรงดัน ขับนำ v_{SIG} ที่ระดับ high มีค่าเท่ากับ 8 – 10 V เนื่องจากกำลังที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ออกแบบไม่เกิน 40W จึงใช้ตัวต้านทาน 150Ω 25W จำนวน 2 ตัวอนุกรมกันสำหรับค่าตัวต้านทาน 300Ω และ ตัวต้านทาน 220Ω 25W จำนวน 2 ตัวอนุกรมกันสำหรับค่าตัวต้านทาน 440Ω ตัวเหนี่ยวนำวงจร โหลด(L_r)มีค่าเท่ากับ $0.9\mu\text{H}$ และตัวเหนี่ยวนำไฟตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์ (L_{dc}) มีค่าเท่ากับ $12\mu\text{H}$



รูปที่ 4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณเพื่อขับนำมอสเฟตและส่วนของวงจรมอเตอร์ตัวแปรแหล่งกระแส

ในการทดลองแบ่งออกเป็น 4 การทดลองในแต่ละการทดลองมีจุดประสงค์ดังนี้

1. การทดลองวงจรมอเตอร์ในสภาวะปราศจากตัวต้านทานโหลดโดยปรับแรงดันขด 3 ค่าเพื่อดูผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณและการจำลองการทำงานว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้
2. การทดลองวงจรมอเตอร์ในสภาวะที่ปราศจากโหลดและมีตัวต้านทานโหลด 2 ค่า โดยปรับแรงดันขดคงที่ทั้งสามกรณี เพื่อดูผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณและการจำลองการทำงานว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้

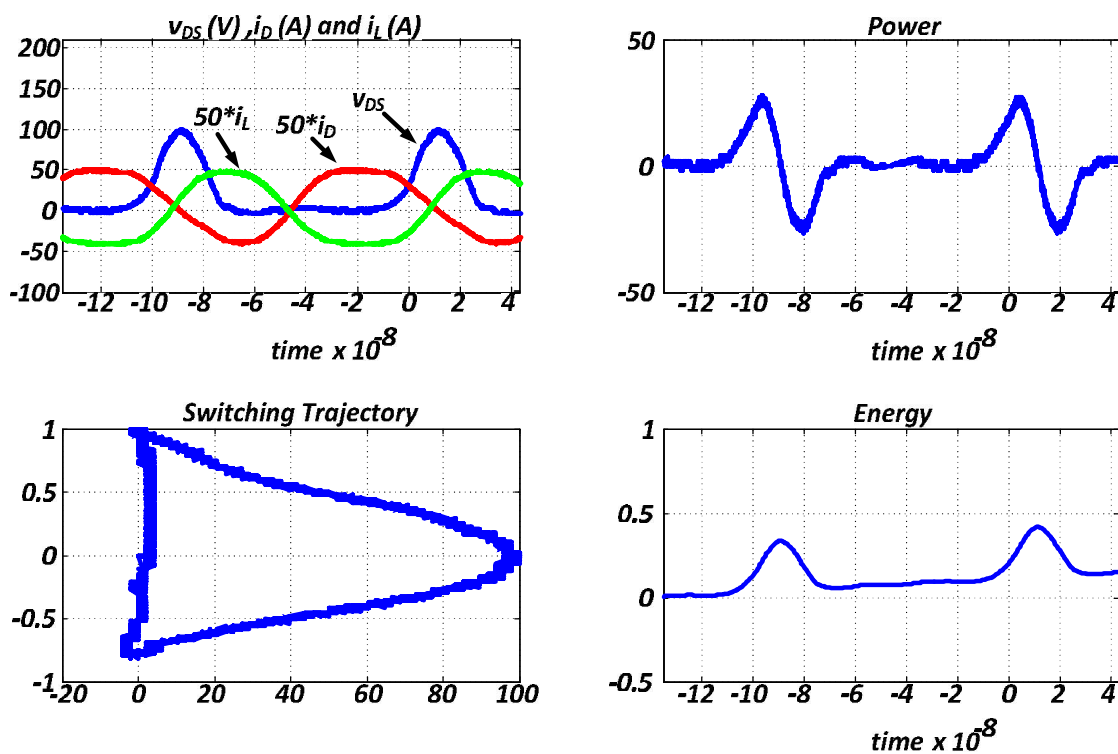
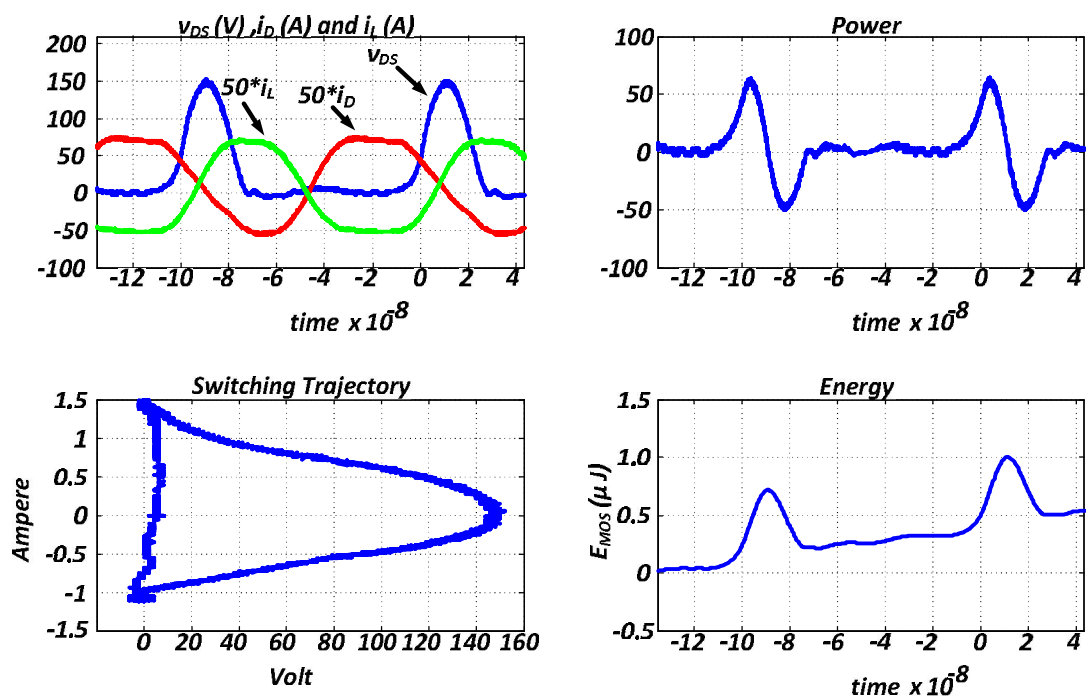
3. การทดลองวิเคราะห์หาค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการนำกระแสของมอสเฟต ณ ตำแหน่งของแรงดันคร่อมสวิตช์ V_{DS} แตกต่างกัน
4. การทดลองเพื่อดูผลของตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลังในกรณีที่มีสายยาว 3 เมตร แต่แตกต่างกันในลักษณะของการวางสายไฟ

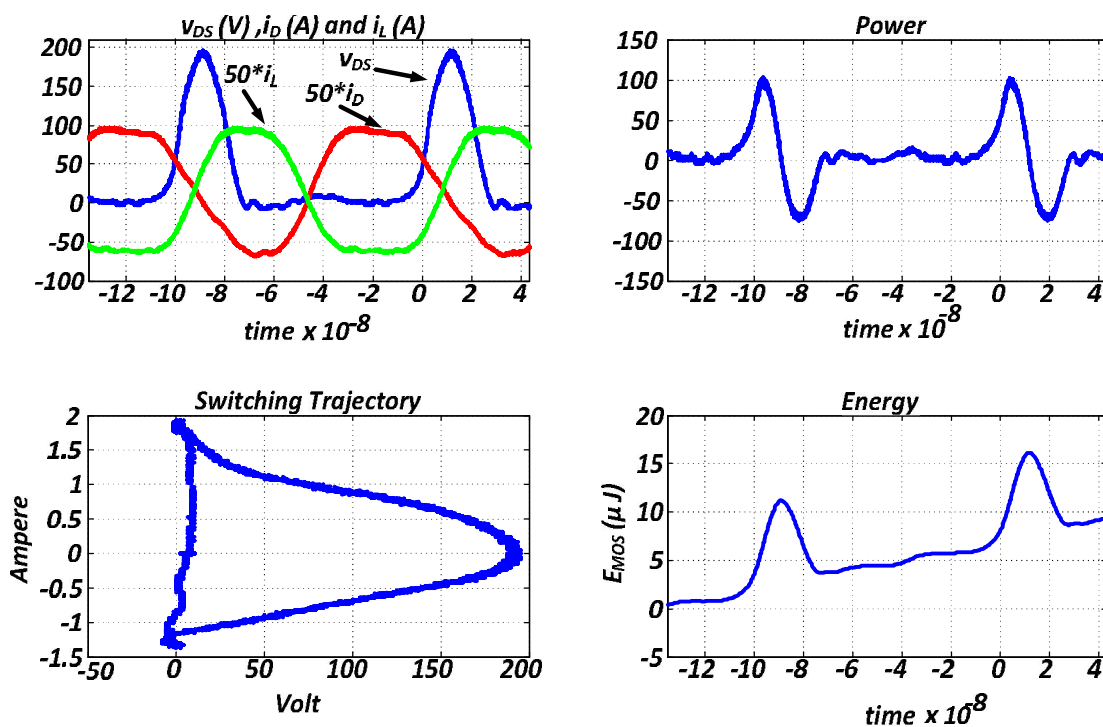
4.2.1 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดขดแรงดันออก

ในการทดลองศึกษาพฤติกรรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันขดโดยการปรับแรงดันเข้าไฟตรงให้ได้ขนาดขดแรงดันออกเท่ากับ 100 ,150 และ 200V ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่า

พารามิเตอร์	ค่าขดแรงดันออก V_p (V)		
	100	150	200
V_{dc} (V)	20.06	29.8	37.6
I_{Lmax} (A)	0.921	1.38	1.83
T_r (ns)	38.84	38.88	36.82
P_{MOS} (W)	0.82	2.84	6.38

(a) $V_{DS} = 100V$ (b) $V_{DS} = 150V$

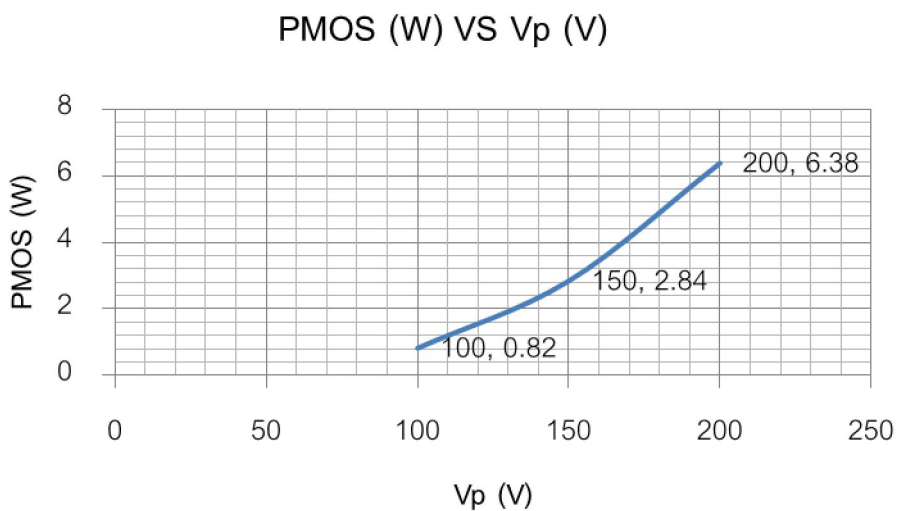
(c) $V_{DS} = 200V$

รูปที่ 4.6 ผลการจำลองวงจรรินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์ $V_{DS}=100,150$ และ $200V$

รูปคลื่น switching- trajectory และค่าพลังงานการสูญเสียที่มอสเฟต

สรุปผลการทดลองวงจรรินเวอร์เตอร์โดยการเปลี่ยนค่ายอดของแรงดัน 3 ค่า จากตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าของแรงดันเข้าไฟตรงมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในส่วนของการคำนวณและการจำลอง ค่ายอดกระแสเฉพาะของคัพระกอบไฟสลัปที่ได้มีค่าน้อยกว่าการคำนวณและการจำลองแต่ก็ไม่แตกต่างกันมากนัก ในส่วนของคาบการเรโซแนนซ์มีค่าใกล้เคียงกันในส่วนของการคำนวณและการจำลอง แต่เริ่มแตกต่างกันที่ยอดแรงดันออกมีค่าต่ำ ผลที่ไม่สอดคล้องกันบางประการที่ได้กล่าวมาข้างต้นอาจเป็นผลมาจากการประเมินรูปคลื่นแรงดันมีความเพี้ยนมากขึ้นที่แรงดันต่ำ ทำให้ผลที่ออกมามีความแตกต่างกันบ้าง เมื่อพิจารณารูปคลื่นที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 4.6 จะพบว่ารูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์ทั้งสองฝั่งไม่สมมาตรกัน และกระแสเดรนมีองค์ประกอบไฟตรงยกตัวขึ้นมา ซึ่งแตกต่างจากการจำลองการทำงาน ทั้งนี้ทั้งนั้นเกิดขึ้นจากการสูญเสียในการทำงานของวงจรรินเวอร์เตอร์ยิ่งมากเมื่อยอดแรงดันคร่อมสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสูงขึ้นเมื่อกระแสเดรนไหลผ่านมอสเฟตสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.7 เมื่อมีการสูญเสียเกิดขึ้นทางฝั่งของสวิตช์และโหลด ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันเข้าไฟตรงต้องจ่ายพลังงานเข้าไปเพื่อชดเชยกำลังงานที่เสียไป โดยการจ่าย

กระแสตรงผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงเข้าไปยังขั้วของสวิตช์และวงจรโหลดซึ่งในการทดลองได้เก็บข้อมูลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงไว้ด้วย ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียของมอสเฟตและยอดแรงดันคร่อมมอสเฟต

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ที่แสดงกระแส I_{Ldc} และ P_{IN} ที่แรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่า

พารามิเตอร์	ค่ายอดแรงดันออก V_p (V)		
	100	150	200
I_{Ldc} (A)	0.079	0.12	0.17
P_{IN} (W)	3.17	7.15	12.78

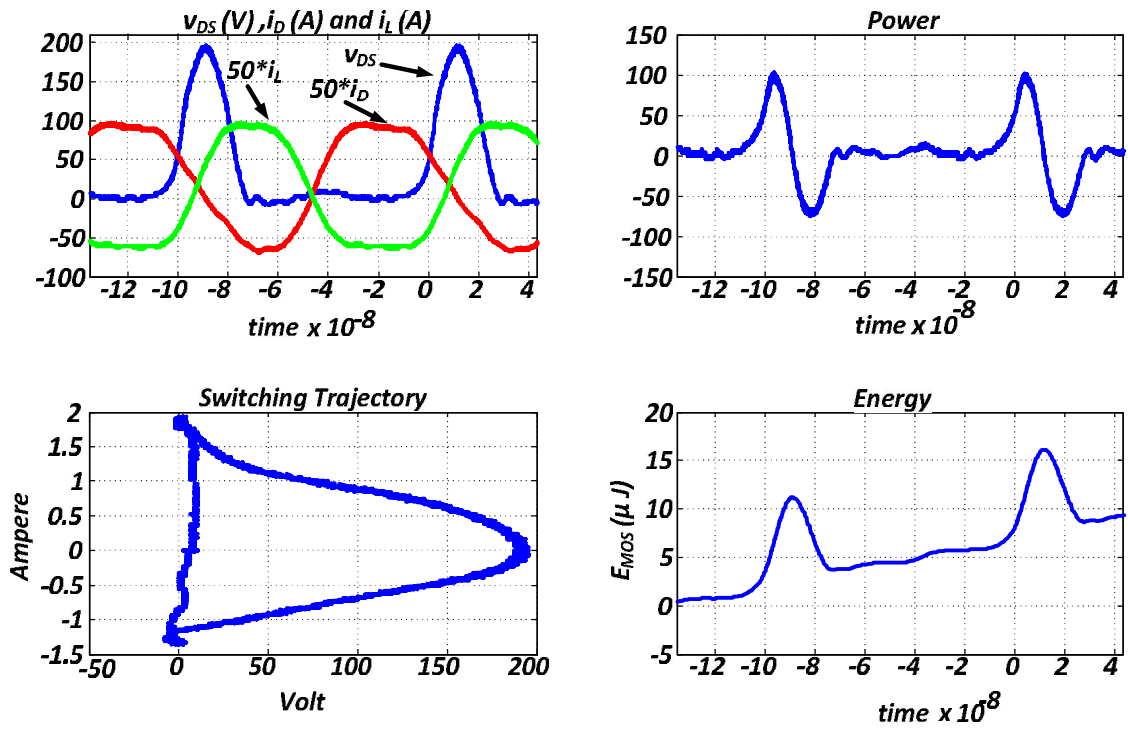
ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงมีค่าไม่เป็นศูนย์ ทำให้ทางด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงเกิดกำลังงานขึ้น ค่ากำลังงานที่แสดงในตารางเป็นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงทั้งสองตัวคูณกับแรงดันเข้าไฟตรง

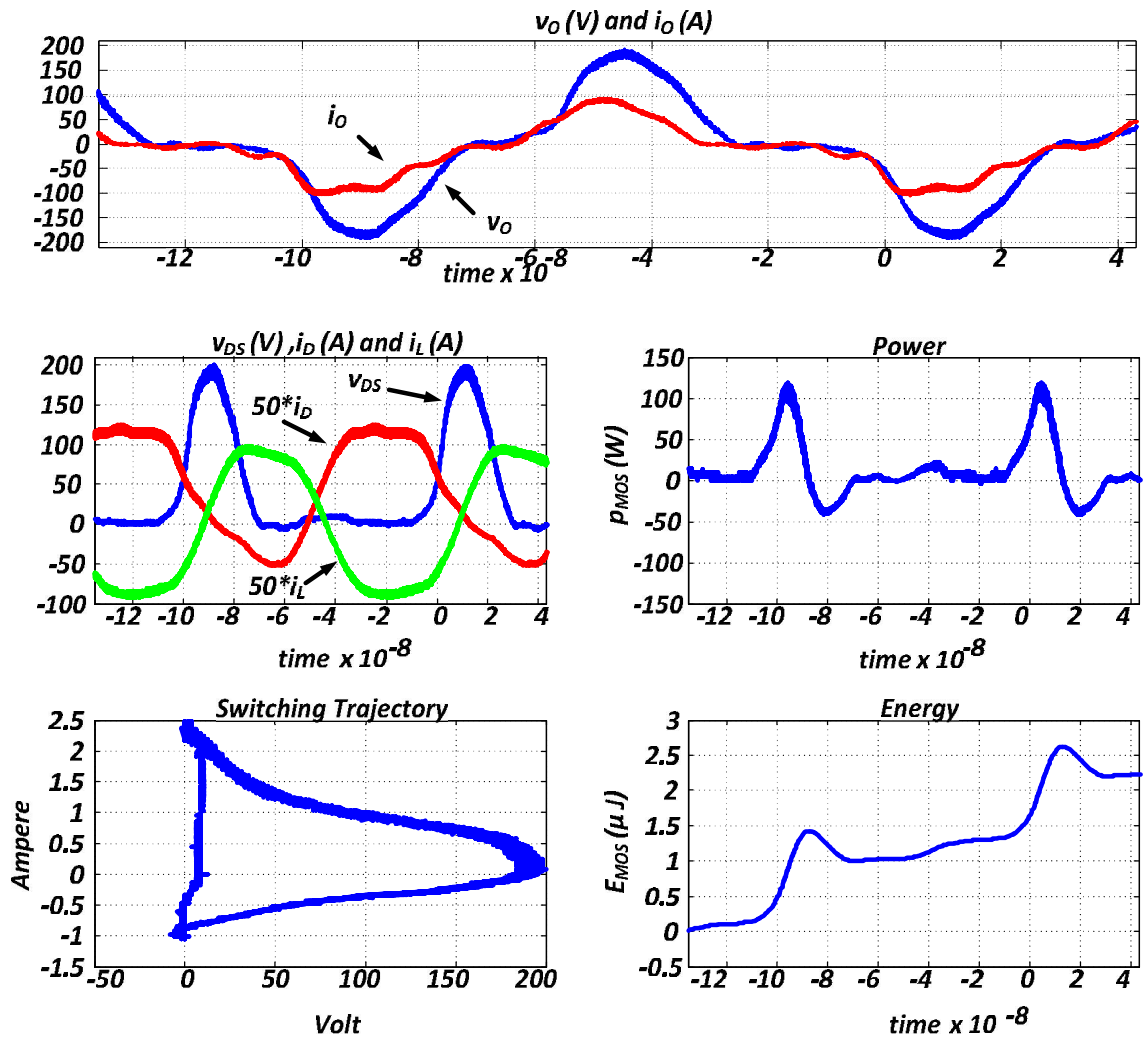
4.2.2 พฤติกรรมของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลด

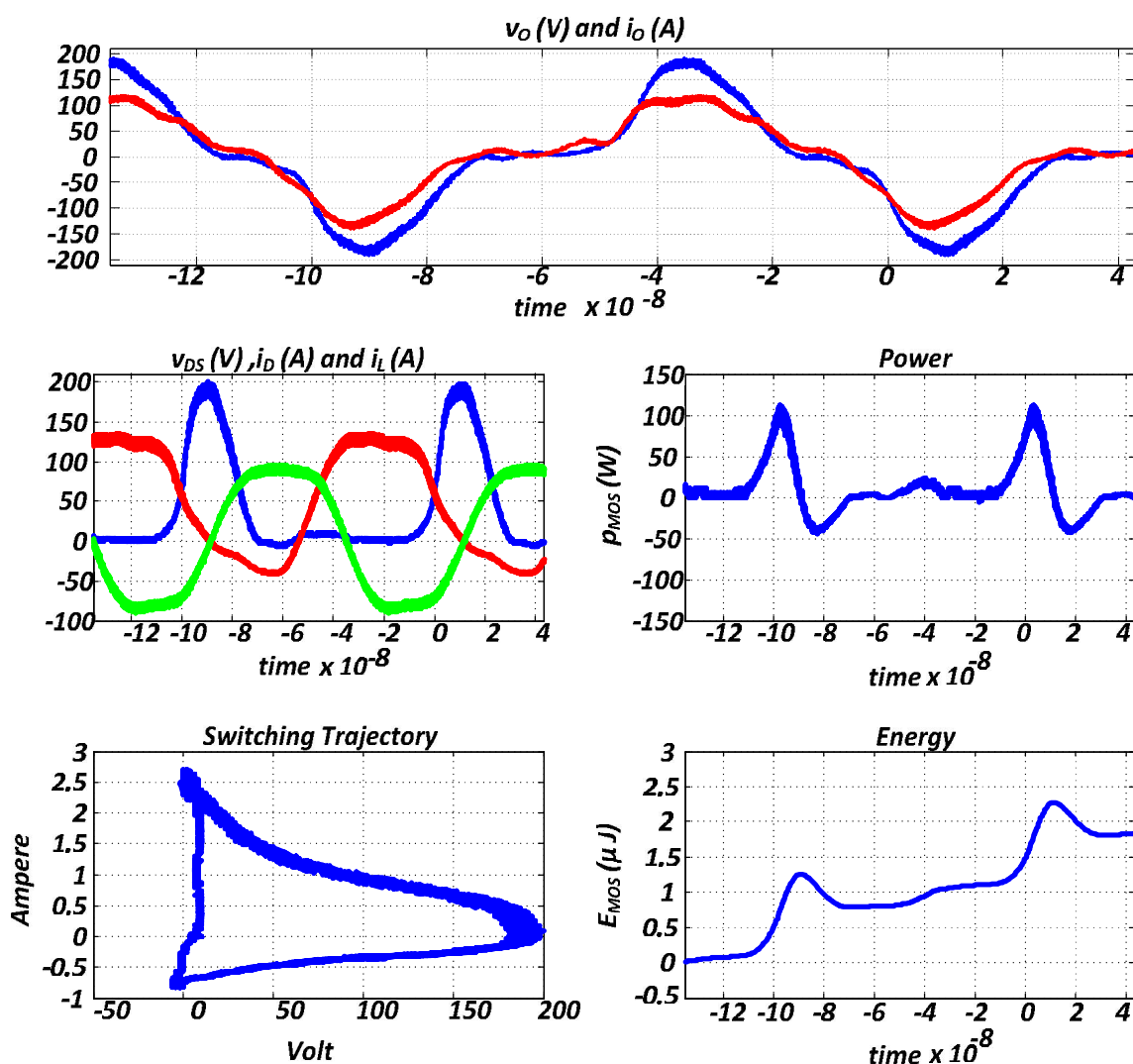
ในการทดลองศึกษาพฤติกรรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากผลการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวต้านทานโหลดที่ค่า $R = \infty\Omega, 440\Omega$ และ 300Ω โดยการปรับแรงดันเข้าไฟตรงให้ได้ขนาดขดแรงดันออกเท่ากับ $200V$ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลดแต่ละค่า

พารามิเตอร์	ค่าความต้านทานโหลด (Ω)		
	∞	440	300
V_{dc} (V)	37.6	40	40.5
I_{Ldc} (A)	0.17	0.68	0.58
I_{Lmax} (A)	1.83	1.82	2.12
T_{rleft} (ns)	17.82	17.66	17.44
T_{rright} (ns)	19	22.56	21.5
T_r (ns)	36.82	40.22	38.94
P_o (W)	0	25.32	34.26
P_{MOS} (W)	6.38	10.19	11.97

(a) $R = \infty \Omega$

(b) $R = 440\Omega$

(c) $R = 300\Omega$

รูปที่ 4.8 ผลการทดลองวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ความต้านทานโหลด $R = \infty, 440$ และ 300Ω รูปคลื่น switching- trajectory และค่าพลังงานการสูญเสียที่มอสเฟต

สรุปผลการทดลองวงจรรินเวอร์เตอร์ จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 การเปลี่ยนค่าตัวต้านทานโหลด ค่าแรงดันเข้าไฟตรงจากมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อเทียบจากผลจากการทดลองในสภาวะปรกติจากตัวต้านโหลด อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่ากำลังออกของวงจรรินเวอร์เตอร์จะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่าการจำลอง ด้วยผลดังนี้อาจเป็นไปได้ว่าในส่วนของการทำงานไม่ได้คิดถึงผลของตัวเก็บประจุภายในตัวต้านทาน เมื่อพิจารณาจากข้อมูลของตัวต้านทาน ค่าตัวเก็บประจุมีค่าเป็น 40pF ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการคำนวณและจำลองใหม่อีกครั้งแล้วจึง

นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลจากการเพิ่มตัวเก็บประจุแฝงภายในตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกันสองตัวแล้วนำมาคำนวณและจำลองการทำงานจะได้ดังตารางที่ 4.6

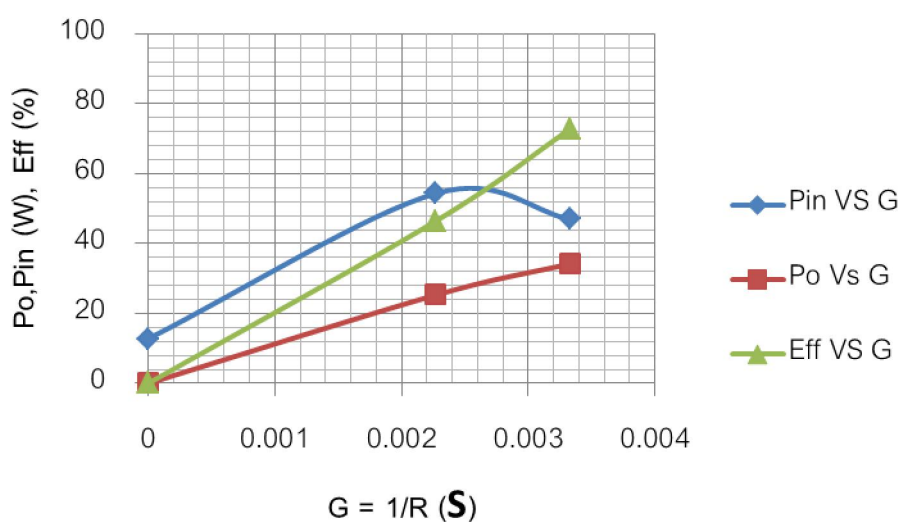
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณและจำลองของอินเวอร์เตอร์ที่แรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่าที่คำนวณใหม่

พารามิเตอร์	ค่าความต้านทานโหลด (Ω)					
	∞		440		300	
	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง	คำนวณ	จำลอง
V_{dc} (V)	38.3	37.9	41.9	41.3	41.9	41.6
I_{Ldc} (A)	0	0	0.341	0.399	0.5	0.554
I_{Lmax} (A)	2.128	2.137	2.328	2.373	2.328	2.373
T_{rleft} (ns)	19.15	18.586	20.11	19.59	19.82	19.19
T_{rright} (ns)	19.15	18.586	22.79	20.94	23.88	21.56
T_r (ns)	38.3	37.17	42.9	40.53	43.7	40.75
P_o (W)	0	0	28.568	27.815	41.9	40.82

จะพบว่าค่าหลังจากการเพิ่มผลของตัวเก็บประจุแฝงภายในตัวต้านทานค่าของแรงดันเข้าไฟตรงจากการทดลองมีค่าเข้าใกล้ผลจากการคำนวณและการทดลองมากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของตัวเก็บประจุแฝงภายในตัวต้านทานด้วย ดังนั้นจึงสร้างตารางการคำนวณการจำลองการทำงาน ออกใหม่โดยพิจารณาถึงผลของตัวเก็บประจุแฝงภายในตัวต้านทานด้วย

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.5 ปรากฏว่าแรงดันเข้าไฟตรง และคาบการเรโซแนนซ์ ณ ยอดแรงดันคร่อมสวิตช์แต่ละค่ามีค่าสอดคล้องกัน กระแสเดรนและค่ากำลังออกของวงจรจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าการคำนวณและการจำลอง แต่ก็ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก จากตารางข้อมูลที่น่าสังเกตคือค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงที่ค่าตัวต้านทาน 300 และ 440 Ω มีค่าใกล้เคียงกันทั้งที่ตัวต้านทานโหลดแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากขณะทำการ

ทดลองที่ตำแหน่งตัวต้านทาน 440Ω ปรับตำแหน่งการขับนำไม่เหมาะสมจนทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟตรงมีค่าไม่แตกต่างกันที่ตำแหน่งตัวต้านทานแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากค่ากำลังสูญเสียภายในมอสเฟตและประสิทธิภาพดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากันดังนั้นในการเลือกตำแหน่งในการนำกระแสจึงมีความสำคัญ เพราะในขณะที่ทำการทดลองผู้ทดลองได้ปรับจนเห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์แล้ว อีกทั้งสังเกตจากรูปแรงดันคร่อมสวิตช์ไม่มีลักษณะถูกตัด ด้วยเหตุนี้จึงทำการทดลองเพิ่มขึ้นมาจากเดิมโดยวิเคราะห์การสูญเสียที่ตำแหน่งแรงดันคร่อมสวิตช์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟออกและกำลังไฟเข้าของวงจร

ตารางที่ 4.7 ตารางผลการจำลองและการทดลองแสดงค่าตัวประกอบคุณภาพที่ความต้านทานโหลดแต่ละค่า

พารามิเตอร์	ค่าความต้านทานโหลด (Ω)					
	∞		440		300	
	จำลอง	ทดลอง	จำลอง	ทดลอง	จำลอง	ทดลอง
E_{store} (μJ)	2.112	1.03	1.965	1.297	1.979	1.146
Q_{Re} (var)	211.2	103	196.5	129.7	197.9	114.6
E_{RLoss} (μJ)	0	0	1.308	1.421	1.929	1.715
Q	∞	∞	1.5	0.91	1.03	0.67

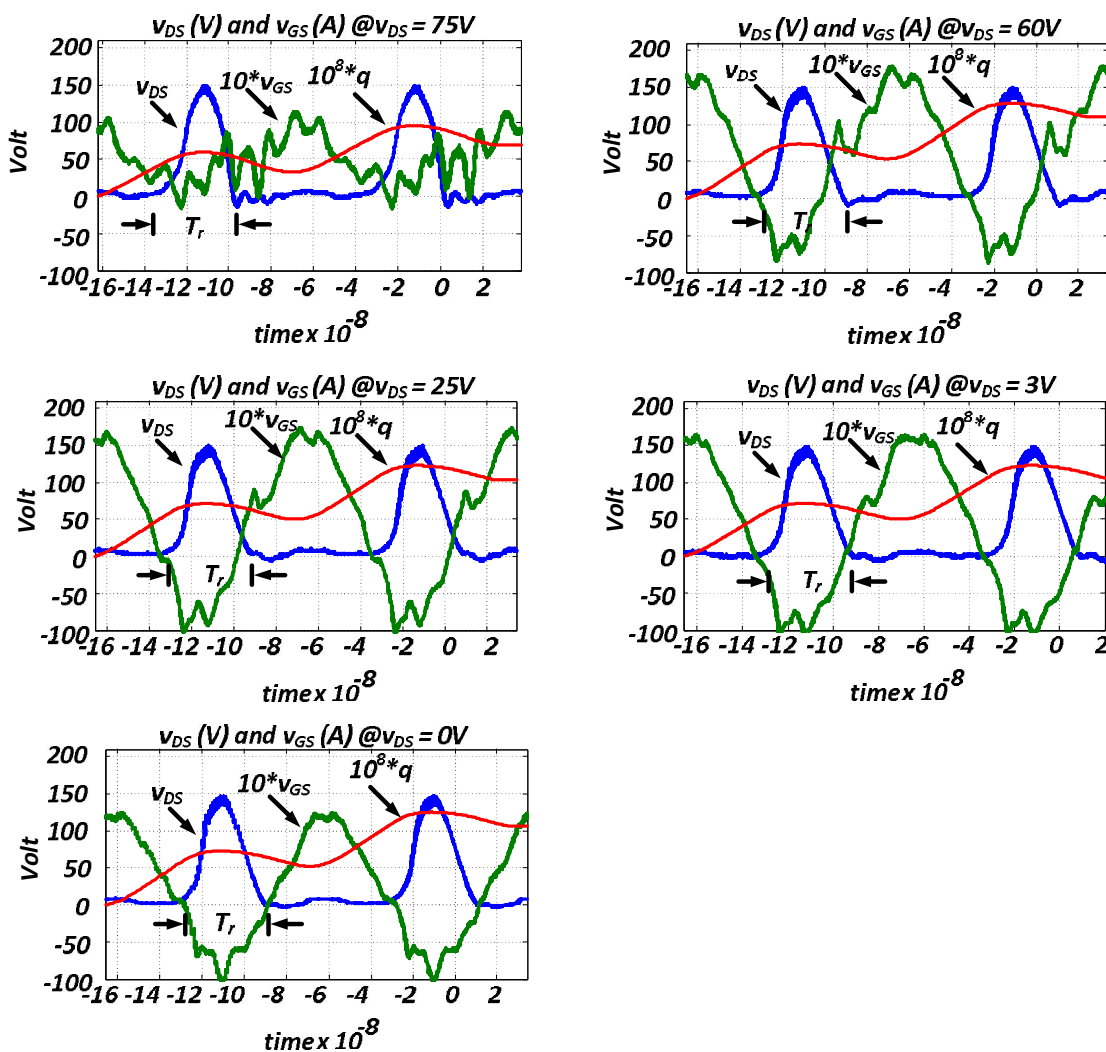
จะเห็นได้ว่าการเรโซแนนซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ระหว่างตัวเก็บประจุแฝงในมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดในความถี่สูงระดับเมกะเฮิรตซ์จำเป็นต้องใช้กำลังจินตภาพ Q_{Re} ที่สูงเมื่อเทียบกับกำลังออกจริงของวงจรโหลดแต่ละค่า และเมื่อพิจารณาจากการประมาณค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรที่หาทั้งการจำลองและการทดลอง จากอัตราส่วนของพลังงานที่สะสมที่ใช้ในการเรโซแนนซ์ของวงจรกับพลังงานที่สูญเสียไปในตัวต้านทานโหลดในช่วงเวลาครึ่งคาบการสวิตช์ ดังตารางที่ 4.7 ค่าตัวประกอบคุณภาพจากการใส่โหลดตัวต้านทานต่ำสุดสำหรับการจำลองอยู่ที่ 0.91 และสำหรับการทดลองต่ำสุดอยู่ที่ 0.67 ทั้งนี้ทั้งนั้นค่าตัวประกอบคุณภาพที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียขึ้นภายในมอสเฟตซึ่งทำให้พลังงานขณะป้อนเข้าไปและป้อนออกมาในมอสเฟตแตกต่างกัน

4.2.3 กำลังสูญเสียจากสวิตช์ที่เกิดขึ้นจากการขับนำที่ตำแหน่งแรงดันคร่อมสวิตช์ต่างกัน

ในการทดลองศึกษา กำลังสูญเสียจากสวิตช์ที่เกิดขึ้นจากการขับนำที่ตำแหน่งแรงดันคร่อมสวิตช์ต่างกัน ทำการทดลองโดยกำหนดให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะปราศจากโหลด ณ ตำแหน่งแรงดัน 150V แรงดันที่มอสเฟตเริ่มขับนำคือ 3V และปรับช่วงเวลาเหลือมเพื่อกำหนดตำแหน่งแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ถูกขับนำดังนี้ ปรับจนกระทั่งรูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์โดนตัด ที่แรงดัน 60V ,25V ,3V และ 0V ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองเพื่อดูผลของการสูญเสียภายในสวิตช์ที่แรงดันขั้วนำแต่ละค่า

พารามิเตอร์	at V_{DS} (V)				
	(NonZVS) 75	60	25	3	0
P_{MOS} (W)	4.52	3.986	3.405	1.678	3.551
q (C)	192.3	176	142.2	128.4	157.7



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นการทดลองที่ขั้วนำมอสเฟตที่แรงดันคร่อมสวิตช์ต่างกัน โดยกำหนดให้ $V_{TH} = 3V$

สรุปผลการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์จากการขั้วนำ จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 ณ ตำแหน่งการนำกระแสของมอสเฟตแตกต่างกัน การสูญเสียจากการขั้วนำในกรณีนี้ที่แรงดัน 75 มีค่าสูงสุด ที่ตำแหน่งแรงดัน 60V 25V และ 0V สูญเสียประมาณ 3.4 – 3.9 W สูญเสียน้อยที่สุดที่

ตำแหน่งแรงดัน 3V หากพิจารณาค่าของประจุ q ที่ได้จากการวัดหาประจุที่เพิ่มขึ้นในช่วงเกิดการถ่ายเทพลังงานของตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำวงจรถอด จะเห็นได้ว่าค่าประจุเพิ่มและลดตามกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น ในการขั้มนำมอสเฟตแบบแรงดันศูนย์จริงๆ ปริมาณในการชาร์ตประจุเท่ากับปริมาณในการคายประจุ เนื่องจากการขั้มนำอย่างไม่ถูกจังหวะ มอสเฟตนำกระแสก่อนการคายประจุจะเสร็จสิ้น การสูญเสียจึงเกิดขึ้น ในกรณีที่แรงดัน 75V มีการสูญเสียสูงสุดเนื่องจากการขั้มนำก่อนที่ไดโอดภายในมอสเฟตจะนำกระแส การขั้มนำจึงไม่เป็นแบบสวิตช์แรงดันศูนย์ ส่วนในกรณีหลังจากนี้ที่แรงดัน 60V และ 25V จะเห็นได้ชัดว่าควรจะเป็นการขั้มนำแบบสวิตช์แรงดันศูนย์ แต่ทั้งนี้รูปคลื่นแรงดันคร่อมมอสเฟตกลับไม่เพี้ยนดังเช่นกรณีที่แรงดัน 75V เนื่องจากภายในมอสเฟตมีตัวต้านทานเกตจึงทำให้จุดการนำกระแสไม่เป็น 3V จริงๆ เมื่อวัดจากขาของมอสเฟตโดยตรง เพราะเกิดจากตัวต้านทานภายในเกตมีแรงดันตกคร่อมรวมกับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแฝงเกตซอส หาใช่แรงดันของตัวเก็บประจุแฝงอย่างเดียว ทำให้ตำแหน่งการขั้มนำของมอสเฟตเปลี่ยนไปเมื่อวัดเทียบจากขาเกตซอสของมอสเฟต เมื่อเปรียบที่ตำแหน่งแรงดัน 60V 25V และ 0V กับที่แรงดัน 3V จะพบว่าที่ตำแหน่ง 3V เกิดการสูญเสียน้อยที่สุดเป็นไปได้ว่าการนำกระแสของมอสเฟตเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ไหลผ่านไดโอดไม่นาน ทำให้กระแสที่ไหลวนในไดโอดมีค่าน้อยมาก ซึ่งต่างจากการนำกระแสที่ 0V นั่นเอง อีกทั้งที่ตำแหน่งแรงดัน 60V และ 25V การนำกระแสอาจจะเกิดขึ้นที่แรงดันคร่อมสวิตช์ใกล้ศูนย์มาก แต่ยังไม่ไหลผ่านไดโอด ดังนั้นในการเลือกจุดในการขั้มนำมอสเฟตอาจจะไม่สามารถเลือกให้ได้การสูญเสียน้อยที่สุดเสมอไป เนื่องจากการทำงานที่วัดจากขาเกตซอสมอสเฟต ขึ้นกับกระแสเกตที่ไหลเข้าประจูดั้วเก็บประจุภายในคุณกับตัวต้านทานฝั่งเกตด้วยว่าเป็นเท่าไร ดังนั้นที่เหมาะสมในการขั้มนำควรที่จะขั้มนำในบริเวณที่แรงดันคร่อมสวิตช์ตกลงศูนย์พอดี

4.3 พฤติกรรมของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อมีผลของตัวเหนี่ยวนำแฝง

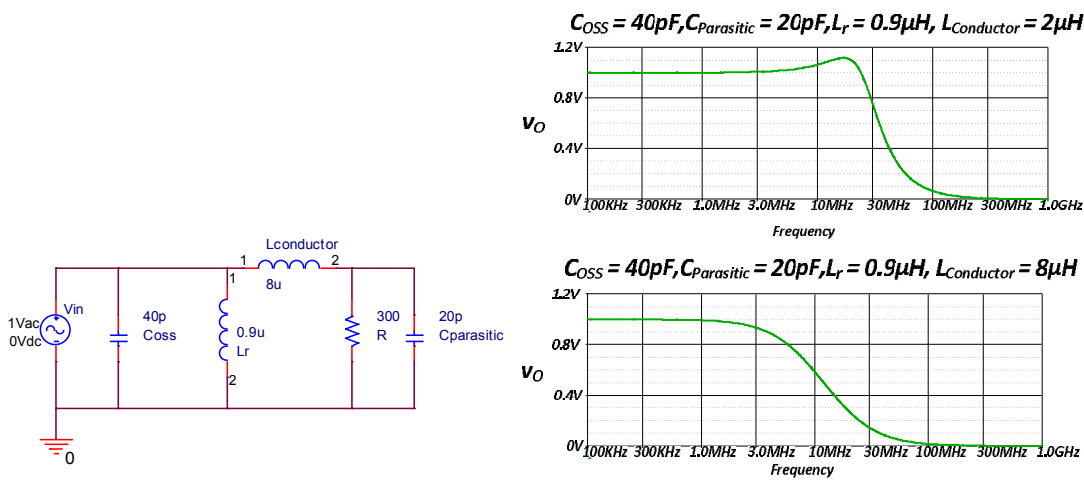
ในการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำของวงจรไหลดมีค่าในระดับเดียวกับค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด ดังนั้นขนาดตัวเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังจะมีผลต่อการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อศึกษาขนาดและผลของค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด ได้ทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำภายในสายด้วยเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด ที่มีความยาวสายรวม 6 เมตร ที่จัดวางแตกต่างกันสองลักษณะโดยแบบแรกจะวางสายนำกระแสไปกลับระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลดชิดกัน เพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำแฝงมีขนาดเล็ก ซึ่งผลการวัดได้ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง $2 \mu\text{H}$ ส่วนแบบที่สอง นำกระแสไปกลับระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลดวางห่างกันเป็นวงกว้างเพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำแฝงมีขนาดใหญ่ซึ่งผลการวัดได้ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง $8 \mu\text{H}$ ดังตารางที่ 4.9 แสดงค่ากำลังที่โหลดสำหรับกรณีที่ไม่มีความเหนี่ยวนำแฝงของสายส่งกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด R และ $L_{\text{conductor}}$ เท่ากับ $2 \mu\text{H}$ และ $8 \mu\text{H}$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เพื่อดูผลของกำลังออกที่ตัวเหนี่ยวนำแฝงแต่ละค่า

พารามิเตอร์	$L_{\text{Conductor}} (\mu\text{H})$					
	0		2		8	
	จำลอง	ทดลอง	จำลอง	ทดลอง	จำลอง	ทดลอง
P_o (W)	23.84	22.71	29.9	23.82	7.94	6.31

สรุปผลการทดลองผลของตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลัง เมื่อพิจารณาการจำลองก่อน จะเห็นได้ว่าที่ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝง $L_{\text{Conductor}} = 2 \mu\text{H}$ มีกำลังออกสูงกว่าตัวเหนี่ยวนำแฝง $L_{\text{Conductor}} = 0 \mu\text{H}$ ซึ่งตามหลักแล้วค่าตัวเหนี่ยวนำที่มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ลดลงเนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำยังมีค่ามาก อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะมากขึ้นตามส่งผลให้ตัวเหนี่ยวนำแฝงที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานโหลดแบ่งแรงดันตกคร่อมทำให้กำลังออกลดน้อยลง แต่ในกรณีนี้ น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากค่าของตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟต และภายในตัวต้านทานโหลด อีกทั้งตัวเหนี่ยวนำวงจรไหลดและตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในสายส่งกำลังมีค่า

ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าในการทำงานมีการเปลี่ยนจุดการทำงานเกิดขึ้นที่ตัวเหนี่ยวนำ
 แฉงมีค่าเท่ากับ แฉง $L_{Conductor} = 2\mu H$ ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 4.11 เป็นผลการจำลองหา
 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรที่ค่าตัวเหนี่ยวนำแฉงต่างกันเป็น $2\mu H$ และ $8\mu H$ โดยกำหนดให้
 ค่าตัวเก็บประจุแฉงในมอสเฟตมีค่าคงที่ประมาณเป็น $40pF$ ตัวเก็บประจุแฉงภายในตัวต้านทาน
 โหลดเป็น $20pF$ และตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดมีค่าเป็น $L = 0.9\mu H$ ซึ่งได้ผลออกมาสอดคล้องกับ
 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ค่าอัตราของแรงดันออกเทียบกับแรงดันเข้ามีค่าสูงกว่า 1 ในกรณีที่
 $L_{Conductor} = 2\mu H$ แต่จะมีค่าต่ำกว่า 1 ในกรณีที่ $L_{Conductor} = 8\mu H$ และเมื่อมาวิเคราะห์ผลจากการ
 ทดลองก็ให้แนวโน้มคล้ายคลึงกันกับผลการจำลอง แต่ก็ยังไม่เท่ากันที่ค่า $L_{Conductor} = 2\mu H$ อาจ
 เป็นเพราะค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด เช่นตัวเก็บประจุแฉงในตัวต้านทานต่อตัวไม่ได้เท่ากับ $40pF$
 พอดีนั่นเอง



รูปที่ 4.11 รูปวงจรในการจำลองและผลการจำลองด้านวงจรโหลดที่มีค่าตัวเหนี่ยวนำแฉงต่างกัน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งกระแสที่ใช้สวิตช์แรงดันศูนย์ครึ่งคลื่นและใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ไวงานมีความถี่การสวิตช์ 10 MHz เนื่องจากตัวเก็บประจุแผ่นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันตกคร่อมมอสเฟต ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้แรงดันที่เกิดจากสภาวะเรโซแนนซ์ ระหว่างตัวเก็บประจุแผ่นในมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำวงจรโหลดมีความเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์แบบครึ่งคลื่นค่อนข้างมากโดยเฉพาะในย่านแรงดันต่ำ ๆ เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุแผ่นมีขนาดใหญ่และแปรตามแรงดันมาก จากการสังเกตลักษณะของแรงดันคร่อมมอสเฟต พบว่ามีรูปคลื่นคล้ายกับโคไซน์ฟังก์ชันร่วมกับองค์ประกอบไฟตรง ดังนั้นในการประมาณแรงดันคร่อมมอสเฟตด้วยโคไซน์ฟังก์ชันบวกกับองค์ประกอบไฟตรง ทำให้สามารถวิเคราะห์และออกแบบวงจรได้ เช่นการใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับวงจรเรโซแนนซ์ที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง สำหรับออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรโหลด คำนวณขนาดกระแสเดรน และคาบการเรโซแนนซ์ การใช้หลักของสมดุลแรงดัน-วินาที คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์กับขนาดของแรงดันไฟตรงที่ใช้สร้างแหล่งกระแสเป็นต้น เนื่องจากแบบจำลองของมอสเฟตที่ใช้สำหรับการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ มีเพียง C_{ds} เท่านั้นที่แปรตามแรงดัน ส่วน C_{gd} มีค่าคงที่ ในขณะที่มอสเฟตที่ใช้ในการทดลอง ทั้ง C_{ds} และ C_{gd} มีขนาดแปรตามแรงดันทั้งคู่ ดังนั้นเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุแผ่นของแบบจำลองแปรตามแรงดันสอดคล้องกับคุณสมบัติของมอสเฟตในวงจรที่ทดลอง ในการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะใช้มอสเฟตสองตัวทำงานร่วมกัน แทนมอสเฟตที่มี C_{gd} คงที่

สำหรับกรณีที่มีวงจรมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง ผลการคำนวณจะสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง ยกเว้นองค์ประกอบไฟลต์ของกระแสเดรนและคาบการทำงานของวงจรมีผลการทดลองจะมีแตกต่างจากผลการคำนวณและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เนื่องจากการทำงานที่ความถี่สูงลักษณะการทำงานของวงจรมีแนวโน้มที่จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

ในสถานะที่มีโหลดน้อย (Q สูง) รูปคลื่นของแรงดันคร่อมมอสเฟตจะมีลักษณะใกล้เคียงกับโคไซน์ฟังก์ชัน แต่เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น (Q ต่ำ) รูปคลื่นของแรงดันคร่อมมอสเฟตจะมีเพี้ยนจากโคไซน์ฟังก์ชันโดยเฉพาะในช่วงที่แรงดันลดลง ทำให้แรงดันคร่อมมอสเฟตมีลักษณะไม่สมมาตร ส่วนขนาดขององค์ประกอบไฟตรงจากแหล่งจ่ายและองค์ประกอบไฟตรงของกระแสเดรนจะเพิ่มตามกำลังออกของวงจรมอสเฟต

ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณทางทฤษฎี นอกจากจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการประมาณรูปคลื่นของแรงดันคร่อมมอสเฟตจากผลของความเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเก็บประจุแฝงกับแรงดันและผลจากการลดลงของความต้านทานโหลดแล้วยังมีความคลาดเคลื่อนจากกำลังสูญเสียภายในมอสเฟตที่ไม่ได้นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์และออกแบบวงจร กำลังสูญเสียดังกล่าวจะเห็นได้จากการความแตกต่างของพลังงานและประจุที่ป้อนให้กับมอสเฟตกับพลังงานและประจุที่คืนออกมาจากมอสเฟตในช่วงหยุดนำกระแสที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันคร่อมมอสเฟต

สำหรับการทำงานในสถานะมีโหลด ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 73% ในกรณีโหลดตัวต้านทานมีค่าเป็น 300Ω และประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 47% ในกรณีตัวต้านทานโหลดมีค่าเป็น 440Ω การสูญเสียที่เกิดขึ้นทำให้แหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้าต้องจ่ายพลังงานชดเชยในส่วนที่สูญเสียไปอยู่ในรูปขององค์ประกอบไฟตรงของกระแสเดรนเช่นเดียวกับกรณีที่โหลดเพิ่มขึ้น (Q สูง) กำลังสูญเสียของมอสเฟตจะมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันออกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากกระแสเดรนมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มโหลด (ลด Q) ให้กับวงจร รวมถึงตำแหน่งการนำมอสเฟตที่เหมาะสม จะช่วยลดผลจากการสูญเสียให้น้อยลง

สายส่งกำลังที่ต่อออกจากอินเวอร์เตอร์ในลักษณะวางสายนำกระแสไปกลับระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลดชิดกัน ให้ผลของความเหนี่ยวนำแผ่งน้อยกว่าลักษณะวางสายการนำกระแสไปกลับระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลดวางห่างกันเป็นวงกว้างอย่างมาก กำลังออกของอินเวอร์เตอร์ในลักษณะวางสายนำกระแสไปกลับระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลดชิดกันมีค่าใกล้เคียงกับกรณีต่อโหลดชิดกับอินเวอร์เตอร์

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. ปรับค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุแฝงในโมเดลของมอสเฟตที่ใช้ในการคำนวณและการจำลองเพื่อให้ผลของการคำนวณและการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองยิ่งขึ้น
2. พยายามคิดผลของตัวเก็บประจุแฝงทั้งหมดที่สามารถหาค่าได้เข้าไปในการคำนวณและการจำลองเพื่อให้ผลของการคำนวณและการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองยิ่งขึ้น
3. เลือกใช้โมเดลของมอสเฟตที่ใช้ในการจำลองโมเดลที่สมบูรณ์กว่านี้ เนื่องจากโมเดลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถวิเคราะห์ได้เพียงแค่ส่วนของวงจรถอด แต่ยังไม่สามารถวิเคราะห์พร้อมร่วมกับส่วนของการขับนำได้

รายการอ้างอิง

- [1] L.A. Geddes, R.A. Roeder. De Forest and the first electrosurgical unit. IEEE Eng.Medicine in and Biology Magazine. 22 (Jan/Feb 2003): 84-87.
- [2] M.S. Tuleimat. The Electrosurgery A Story of Controversies and Discrepancies. IEEE-ICBBT. (April 2010): 356-359.
- [3] J. R. Lacourse, M. C. Vogt, W.T. Miller and S. M. Selikowitz. Spectral Analysis Interpretation of Electrosurgical. IEEE-trans. Biomed.Eng. 35 (July 1988): 505-509.
- [4] J. R. Lacourse, M. C. Vogt, W.T. Miller and S. M. Selikowitz. Effect of High-Frequency Current on Nerve. IEEE-trans. Biomed.Eng. 35 (Jan 1985): 82-86.
- [5] R. Haag and A. Cuschieri. Recent advances in high-frequency electrosurgery: development of automated systems. J.R.Coll.Surg.Edinb. 38 (Dec 1993): 354-364.
- [6] J. D. Wiley, J. G. Webster. Distributed Equivalent-Circuit Models for Circular. IEEE-Trans.Biomed.Eng. 29 (MAY 1982): 385-389.
- [7] J. D. Wiley, J. G. Webster. Analysis and Control of the Current Distribution. IEEE-Trans.Biomed.Eng. 29 (MAY 1982): 381-385.
- [8] วสุโรจน์ ศรีอุดมพร. อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งกระแสที่ใช้สวิตช์แรงดันศูนย์ครึ่งคลื่นที่ไม่มีช่วงเวลาเหลือของสัญญาณขับนำ,วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [9] Zbigniew Kaczmarczyk and Wojciech Jurczak. A Push–Pull Class-E Inverter. IEEE-Trans.Ind.Electron. 55 (Apr 2008): 1871-1874.

- [10] Sokal, N.O.; Sokal, A.D. Class E-A New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 10 (Jun 1975): 168-176.
- [11] Tadashi Suetsugu. Comparison of Class-E Amplifier With Nonlinear and Linear Shunt Capacitance. *IEEE-Trans.Circuits Syst.* 50 (Aug 2003): 1089-1097.
- [12] Michael J. Chudobiak. The Use of Parasitic Nonlinear Capacitors in Class E Amplifiers. *IEEE-Trans.Circuits Syst.* 41 (Dec.1994): 941-944.
- [13] Mediano, A. Molina-Gaudo, P. Bernal, C. Design of Class E Amplifier With Nonlinear and Linear Shunt Capacitances for Any Duty Cycle. IEEE-Trans. Microwave Theory and Techniques. 55 (March 2007):484-492.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นฤคม สกกุลวิไลกิจเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่อำเภอเบตง จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

นฤคม สกกุลวิไลกิจเจริญ; ยุทธนา กุลวิฑิต; การประเมินค่าตัวเก็บประจุแฝงภายในมอสเฟตเพื่อการออกแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งกระแสความถี่สูง, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON33), เล่ม 1, 2553, หน้า 561-564