

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์และออกแบบควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์  
แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

ANALYSIS AND DESIGN OF ZERO-VOLTAGE-SWITCHED (ZVS)  
QUASI-RESONANT DC-DC BUCK CONVERTERS



T104172



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 104172

วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552

.....
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง

การวิเคราะห์และออกแบบควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์  
แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์  
ANALYSIS AND DESIGN OF ZERO-VOLTAGE-SWITCHED (ZVS)  
QUASI-RESONANT DC-DC BUCK CONVERTERS

คณะผู้จัดทำ

นาย นริศ ทิพวงศ์กุล  
นางสาว นิกานารถ รุ่งแสง  
นาย ปราชญ์ หิรัญไพบูรณ์



  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ชรินทร์ บุญลัทธานุสรณ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หัวข้อปริญญานิพนธ์

การวิเคราะห์และออกแบบควอซีเรโซแนนท์ดีซี-ดีซี บัค คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

## นักศึกษา

นาย นริศ ทิพวงศ์กุล รหัส 48010425

นางสาว นิสานารถ รุ่งแสง รหัส 48010466

นาย ปราณู หิรัญไพบูลย์ รหัส 48010519

## ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

## สาขาวิชา

วิศวกรรมระบบควบคุม

## พ.ศ.

2551

## อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะานุสรณ์

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัค คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ โดยแสดงการวิเคราะห์การทำงาน การจำลองแบบ และการออกแบบวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์ วงจรต้นแบบทำงานที่แรงดันอินพุต 20V-25V แรงดันเอาต์พุต 5V และกระแสโหลด 1A-5A ได้ถูกสร้างขึ้น ผลการทดสอบพบว่าวงจรต้นแบบมีการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ และมีประสิทธิภาพสูงกว่า 80% ตลอดย่านการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Analysis and Design of Zero-Voltage-Switched (ZVS) Quasi-Resonant DC-DC Buck Converters	
<b>Student</b>	Mr. Naris Thipangkul	ID 48010425
	Miss Nisanart Rungsaeng	ID 48010466
	Mr. Prach Hiranpaiboon	ID 48010507
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Control Engineering	
<b>Year</b>	2008	
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Chanin Bunlaksananusorn	

### ABSTRACT

This thesis presents analysis and design of a Zero-Voltage-Switched (ZVS) Quasi-Resonant (QR) DC-DC Buck converter. The ZVS-QR DC-DC Buck converter and its feedback control circuit are analyzed, modeled, and designed. The prototype circuit, which operates with the input voltage of 20V to 25V, the output voltage of 5V, and the load current of 1A to 5A, was constructed. Experimental results show that the prototype converter achieves zero voltage switching, with the efficiency over 80% throughout its operating range.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณ ดร. ชรินทร์ บุญดิษฐ์ ภาควิชาการศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะทางวิชาการ และสนับสนุนในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณคณาจารย์ ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้สามารถมีความรู้ในการศึกษาและทำโครงการ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจ

ขอขอบคุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง ทุกคนที่คอยให้การสนับสนุน ช่วยเป็นกำลังใจ และส่งแรงใจในการทำโครงการมาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดและขอบเขตที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัลคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ปัญหาที่เกิดจากการสวิตช์ที่ความถี่สูง.....	4
2.3 หลักการทำงานของวงจร.....	5
2.4 แรงดันเอาต์พุตของวงจร.....	14
2.5 เงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์.....	18
2.5.1 การเลือกค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance, $Z_0$ ).....	19
2.5.2 การเลือกค่าความถี่เรโซแนนท์ (resonant frequency, $f_r$ ).....	21
2.6 ผลการซิมูเลชัน.....	23
2.7 สรุป.....	24
บทที่ 3 การออกแบบวงจรต้นแบบ.....	25
3.1 บทนำ.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การออกแบบวงจรภาคกำลัง.....	25
3.2.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์และตัวเก็บประจุเรโซแนนท์.....	25
3.2.2 การเลือกพิกัดกระแสและแรงดันของไดโอดและมอสเฟต.....	26
3.3 การจำลองแบบวงจรภาคควบคุม.....	33
3.4 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอสเฟต.....	38
3.5 สรุป.....	41
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	42
4.1 บทนำ.....	42
4.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต.....	43
4.3 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันในวงจร.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์การหาสมการของแรงดันที่ตกคร่อม $C_r$ และกระแสที่ไหลผ่าน $L_r$ .....	53
ภาคผนวก ข การสร้างตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์.....	57
ภาคผนวก ค การทำงานของไอซี UC3864.....	61
ภาคผนวก ง ภาพถ่ายของงานวิจัย.....	66

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่กระแสไหลคและแรงดันอินพุตค่าต่างๆ.....	43
4.2 ผลการวัดค่าความถี่สวิตช์ของวงจรที่กระแสไหลคและแรงดันอินพุตค่าต่างๆ.....	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของสวิตช์.....	4
(ก) วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่สวิตช์ด้วยวิธีพัลส์สวิตช์มอดูเลชัน.....	4
(ข) วงจรควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัค คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์.....	4
2.2 (ก) มอสเฟตและตัวเก็บประจุแฝง $C_{DS}$ .....	5
(ข) $C_{DS}$ สะสมประจุขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส.....	5
(ค) $C_{DS}$ คายประจุขณะมอสเฟตนำกระแส.....	5
2.3 วงจรควอซีเรโซแนนท์ดีซี-ดีซี บัค คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์.....	5
2.4 วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.3.....	6
2.5 รูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ ( $v_{C_r}$ ) กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ ( $i_s$ ) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ( $i_{L_r}$ ) แรงดันคร่อม ( $v_D$ ) และสัญญาณขั้วเกิด ของสวิตช์ ( $v_{gs}$ ) แสดงเวลาเริ่มต้น.....	6
2.6 วงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา $0 < t < t_1$ ของวงจรรูปที่ 2.4.....	6
2.7 คลื่น $v_{C_r}$ $i_s$ $i_{L_r}$ $v_D$ และ $v_{gs}$ ในช่วงเวลา $0 < t < t_1$ .....	8
2.8 วงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$ ของวงจรรูปที่ 2.4.....	8
2.9 คลื่น $v_{C_r}$ $i_s$ $i_{L_r}$ $v_D$ และ $v_{gs}$ ในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$ .....	9
2.10 วงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา $t_2 < t < t_3$ ของวงจรรูปที่ 2.4.....	10
2.11 คลื่น $v_{C_r}$ $i_s$ $i_{L_r}$ $v_D$ และ $v_{gs}$ ในช่วงเวลา $t_2 < t < t_3$ .....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

2.12	คลื่นวงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา $t_3 < t < T_s$ ของวงจรรูปที่ 2.4.....	12
2.13	คลื่น $v_{C_r}$ , $i_S$ , $i_{L_r}$ , $v_D$ และ $v_{gs}$ ในช่วงเวลา $t_3 < t < T_s$ .....	13
2.14	คลื่น $v_s$ , $i_s$ และ $v_{gs}$ .....	13
2.15	วงจรควอซีเรโซแนนท์คิซี-คิซี บัค คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ แสดงค่าแรงดัน เฉลี่ยของ $D$ แรงดันเฉลี่ยของ $L_f$ และ $V_o$ .....	14
2.16	คลื่น $v_D$ และค่าเฉลี่ยของ $v_D$ .....	16
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่าง $M$ และ $F$ ที่ $r$ ค่าต่างๆ.....	17
2.18	คลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $C_r$ แสดงลักษณะรูปคลื่นในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$ .....	19
2.19	ผลการซิมมูลชันที่ขอบเขตของระบบ $F_{max} = 108kHz$ $V_{in} = 25V$ $R_{L,min} = 5\Omega$ .....	23
2.20	ผลการซิมมูลชันที่ขอบเขตของระบบ $F_{mid} = 104kHz$ $V_{in} = 23V$ $R_{L,min} = 3\Omega$ .....	23
2.21	ผลการซิมมูลชันที่ขอบเขตของระบบ $F_{max} = 108kHz$ $V_{in} = 25V$ $R_{L,min} = 5\Omega$ .....	24
3.1	คลื่นแรงดันคร่อมไดโอด.....	27
3.2	คลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์.....	28
3.3	คลื่นกระแสสวิตช์ ( $i_s$ ) และ คลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ( $i_{L_r}$ ) แสดง ความสัมพันธ์กันในช่วงเวลา $t_2 < t < t_3$ .....	29
3.4	แสดงการหาพื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นกระแสสวิตช์.....	30
3.5	แสดงวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ที่ได้ออกแบบ.....	33
3.6	(ก) ไอซี UC3864 (ข) โครงสร้างภายในไอซี.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

3.7 โครงสร้างภายในวงจรขยายความถี่พลาต (EA) และวงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่ (VCO).....	35
3.8 การเปรียบเทียบสัญญาณ $v_{C_{VCO}}$ กับ $V_{M_{max}}$ และ $V_{M_{min}}$ ที่ความถี่ $f_{s,min}$ และ $f_s$ .....	35
3.9 การต่อขาต่าง ๆ ของ UC3864.....	37
3.10 วงจรจับเกตมอสเฟตที่ใช้สำหรับวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์.....	38
3.11 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ต้นแบบพร้อมวงจรป้อนกลับ.....	40
3.12 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ต้นแบบ.....	41
4.1 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ แสดงกระแสและแรงดันที่ต้องการวัด.....	42
4.2 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต.....	43
4.3 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปคลื่น.....	45
4.4 คลื่นของ $v_{gs}$ $v_s$ $i_s$ และ $i_{Lr}$ ที่ $V_{in,min} = 20V$ $I_{o,max} = 5A$ $f_{min} = 80kHz$ .....	45
4.5 คลื่นของ $v_{gs}$ $v_s$ $i_s$ และ $i_{Lr}$ ที่ $V_{in,max} = 25V$ $I_{o,min} = 1A$ $f_{max} = 104kHz$ .....	46
4.6 คลื่นของ $v_{gs}$ $v_s$ $i_s$ และ $i_{Lr}$ ที่ $V_{in,min} = 20V$ $I_{o,max} = 5A$ $f_{max} = 95kHz$ .....	47
4.7 คลื่นของ $v_{gs}$ $v_s$ $i_s$ และ $i_{Lr}$ ที่ $V_{in,max} = 25V$ $I_{o,min} = 1A$ $f_{min} = 88kHz$ .....	48
ก.1 วงจรสมมุติแสดงการทำงานในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$ ของวงจรรูปที่ 2.4.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 รูปคลื่น $i_{L_f}$ , $i_{L_r}$ และ $v_{gs}$ .....	59
ค.1 (ก) ไอซี UC3864 (ข) โครงสร้างภายในไอซี.....	62
ค.2 โครงสร้างภายในวงจรขยายความผิดพลาด (EA) และวงจรเปลี่ยนแรงดันควม เป็นความถี่ (VCO).....	63
ค.3 การเปรียบเทียบสัญญาณ $v_{C_{VCO}}$ กับ $V_{M_{max}}$ และ $V_{M_{min}}$ ที่ความถี่ $f_{s,min}$ และ $f_s$ .....	63
ค.4 การต่อขาต่าง ๆ ของ UC3864.....	65
ง.1 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ต้นแบบ.....	67
ง.2 วงจรโพลที่ใช้ทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

a	พื้นที่ตัดขวางของลวดทองแดง
$A_c$	พื้นที่ตัดขวางของแกน
$A_p$	ผลคูณพื้นที่ระหว่างพื้นที่ตัดขวางของแกนกับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$A_w$	พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$B_{max}$	ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด
$C_{DS}$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแฝง $C_{DS}$ ระหว่างขาคอนเวอร์เตอร์สของมอเตอร์
$C_f$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_f$
$C_{FP}$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{FP}$ ในวงจรชดเชยแบบสองโพลหนึ่งซีโร
$C_{FS}$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{FS}$ ในวงจรชดเชยแบบสองโพลหนึ่งซีโร
$C_p$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_p$ ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
$C_r$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ $C_r$
$C_s$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_s$ ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง
$C_{VCO}$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{VCO}$ ในวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่
$C_T$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_T$ กำหนดช่วงเวลาหยุดนำกระแส
$C_1$	คอมพาราเตอร์ในวงจรขยายความผิดพลาด
$C_2$	คอมพาราเตอร์ในวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่
dB	เดซิเบล
D	ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$D_B$	ไดโอดแฝงภายในมอสเฟต
$D_{max}$	ควิตีไซเคิลสูงสุด
$D_Z$	ซีเนอร์ไดโอด
$D_1$	ไดโอดตัวที่หนึ่งในวงจรขยายความผิดพลาด
$D_2$	ไดโอดตัวที่สองในวงจรขยายความผิดพลาด
$D_3$	ไดโอดตัวที่สามในวงจรขยายความผิดพลาด
$E$	พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ
EA	วงจรรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier)
ESR	ความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance)
$f_{cc}$	ความถี่ครอสโอเวอร์ของระบบที่ใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลหนึ่งซีโร
$f_{cea}$	ความถี่ครอสโอเวอร์ของระบบที่ใช้วงจรชดเชย EA
$f_{cp}$	ความถี่ครอสโอเวอร์ของวงจรรภาคกำลัง
$f_{p2c}$	ความถี่ของโพลตัวที่สองในวงจรชดเชยแบบสองโพลหนึ่งซีโร
$f_{p1p}$	ความถี่ของโพลตัวที่หนึ่งในวงจรรภาคกำลัง
$f_{p2p}$	ความถี่ของโพลตัวที่สองในวงจรรภาคกำลัง
$f_s$	ความถี่สวิตช์
$\tilde{f}_s$	สัญญาณขนาดเล็กลงของความถี่สวิตช์
$f_{s,max}$	ความถี่สวิตช์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$f_{s,\min}$	ความถี่สวิตช์ต่ำสุด
$f_r$	ความถี่เรโซแนนท์
$f_{zc}$	ความถี่ของซีโรในวงจรชดเชยแบบสองโพลหนึ่งซีโร
$f_{zp}$	ความถี่ของซีโรในวงจรภาคกำลัง
$F$	Normalized switching frequency
F	ฟารัด
$G_c(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยแบบสองโพลหนึ่งซีโร
$G_{EA}(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรขยายความผิดพลาด
$G_p(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
$G_{vco}(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่
H	เฮนรี่
Hz	เฮิรตซ์
$i_{c_r}$	กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ $C_r$
$i_{vco}$	กระแสชาร์จตัวเก็บประจุ $C_{vco}$ ในวงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่
$i_{L_r}$	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ $L_r$
$i_s$	กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ (มอสเฟต)
$i_{SWITCH}$	กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์
$\bar{i}_{L_f}$	กระแสเฉลี่ยไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L_f$
$\bar{i}_s$	กระแสเฉลี่ยไหลผ่านมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\tilde{i}_{C_f}$	สัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสที่ไหลผ่าน $C_f$
$\tilde{i}_{L_f}$	สัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L_f$
$\tilde{i}_o$	สัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสไหล
$\tilde{i}_s$	สัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์
$I_{L,max}$	กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L$
$I_{min}$	กระแสกำหนดความถี่ต่ำสุด
$I_o$	กระแสไหล
$I_{o,max}$	กระแสไหลสูงสุด
$I_{o,min}$	กระแสไหลต่ำสุด
$I_{range}$	กระแสกำหนดความถี่สูงสุด
$\Delta I_{L_f}$	ริบเปิดของกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวเหนี่ยวนำ $L_f$
$J$	ความหนาแน่นกระแสในเส้นลวดทองแดง
$k_{ii}$	สัมประสิทธิ์หน้า $\tilde{i}_{L_f}$ ในสมการสัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต
$k_{if}$	สัมประสิทธิ์หน้า $\tilde{i}_s$ ในสมการสัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต
$k_{iv}$	สัมประสิทธิ์หน้า $\tilde{i}_{in}$ ในสมการสัญญาณขนาดเล็กลงของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต
$k_{vi}$	สัมประสิทธิ์หน้า $\tilde{i}_{L_f}$ ในสมการสัญญาณขนาดเล็กลงของแรงดันคร่อมไดโอด
$k_{vf}$	สัมประสิทธิ์หน้า $\tilde{i}_s$ ในสมการสัญญาณขนาดเล็กลงของแรงดันคร่อมไดโอด
$k_{vv}$	สัมประสิทธิ์หน้า $\tilde{i}_{in}$ ในสมการสัญญาณขนาดเล็กลงของแรงดันคร่อมไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$K_C$	อัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนภาคกำลัง
$l_g$	ความยาวของช่องอากาศ
$L$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ
$L_f$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ $L_f$
$L_p$	ความเหนี่ยวนำทางด้าน primary ของหม้อแปลง
$L_r$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ $L_r$
$m$	มิติ
$m$	เมตร
$M$	เมกะ
$M$	Normalized Output Voltage
$M_{\max}$	Maximum Normalized Output Voltage
$M_{\min}$	Minimum Normalized Output Voltage



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงเพื่อความสะดวกในการใช้งานและพกพา แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์เหล่านี้เป็นวงจรดีซี-ดีซีบัคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมโดยวิธีพัลส์วidthมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) ซึ่งสวิตช์ที่ความถี่สูง ในขณะที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะการทำงาน แรงดันและกระแสของสวิตช์จะมีการคาบเกี่ยวกัน (Overlapping) ทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น นอกจากนี้ตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นระหว่างขาแคทริน-ชอร์สของมอสเฟตที่ใช้เป็นสวิตช์ยังทำให้เกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากการคายพลังงานในขณะที่สวิตช์นำกระแสอีกด้วย กำลังสูญเสียทั้งสองแบบนี้จะเพิ่มขึ้นตามความถี่สวิตช์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ลดน้อยลงที่ความถี่สวิตช์สูงขึ้น วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือการใช้วงจรควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซีบัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการวิเคราะห์และออกแบบควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ พร้อมทั้งเสนอผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรต้นแบบ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของวงจรควอซีเรโซแนนท์ บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ เงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ รวมถึงการจำลองและออกแบบวงจรควอซีเรโซแนนท์ บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ และนำวงจรที่ออกแบบได้มาทดสอบหาความสามารถในการรักษาแรงดันเอาต์พุต และประสิทธิภาพของวงจร และพฤติกรรมของกระแสและแรงดันของสวิตช์ขณะแรงดันอินพุตและกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดและขอบเขตของการวิจัย

วงจรทำงานโดยอาศัยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเข้าไปในวงจร ดีซี-ดีซี บัค คอนเวอร์เตอร์ปกติ ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ได้สภาวะการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ในหนึ่งคาบเวลา การสวิตช์ การทำงานของวงจรจะแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงเวลา ซึ่งพฤติกรรมของแรงดันและกระแสในแต่ละช่วงเวลาสามารถหาได้จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า สมการการทำงานในแต่ละช่วงที่ได้นี้จะถูกนำมาใช้หาสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจร นอกจากนี้เพื่อให้วงจรมีสมรรถนะและเสถียรภาพที่ดีนั้น จะต้องมีการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งก่อนที่จะออกแบบได้นั้นต้องทราบแบบจำลองของระบบก่อน แบบจำลองของวงจรควอซีเรโซแนนซ์ บัค คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์หาโดยวิธีการเฉลี่ยวงจร (circuit averaging) โดยนำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในการออกแบบวงจรและนำวงจรที่ออกแบบได้มาทดสอบหาความสามารถในการรักษาแรงดันเอาต์พุต การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต ประสิทธิภาพของวงจร และพฤติกรรมของกระแสและแรงดันของสวิตช์ขณะแรงดันอินพุตและกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



## 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการการทำงานของวงจรควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ เงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ (บทที่ 2)
3. ออกแบบวงจรควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ต้นแบบ (บทที่ 3)
4. ทำการทดสอบวงจรต้นแบบในขอบเขตแรงดันอินพุตและกระแสโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่กำหนด (บทที่ 4)
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ (บทที่ 5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

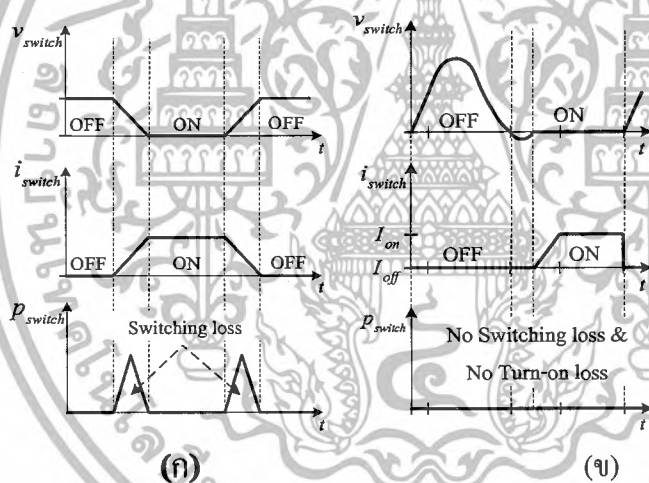
## บทที่ 2

# ทฤษฎีของวงจรจรวจกรควอซีเรโซแนนท์ บัค คอนเวอร์เตอร์แบบ สวิตช์ที่แรงดันศูนย์

### 2.1 บทนำ

ปัญหาการสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ที่ความถี่สูงในวงจรดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรน้อยลง การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การทำงานของวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ พร้อมทั้งแสดงเงื่อนไขการออกแบบเพื่อให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ตลอดย่านการทำงานของวงจร

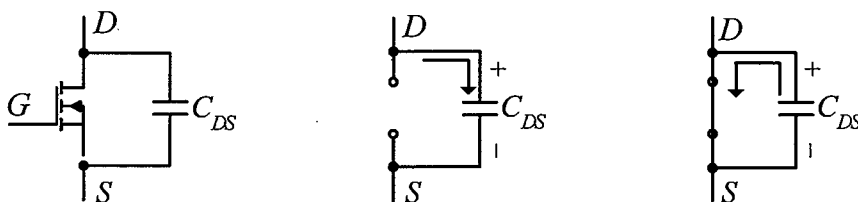
### 2.2 ปัญหาที่เกิดจากการสวิตช์ที่ความถี่สูง



**รูปที่ 2.1** คลื่นกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของสวิตช์ของ (ก) วงจรดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์ที่ สวิตช์ด้วยวิธีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน [4] (ข) วงจรควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงเพื่อความสะดวกในการใช้งานและพกพา แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์เหล่านี้เป็นวงจรดีซี-ดีซีบัคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมโดยวิธีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) ซึ่งสวิตช์ที่ความถี่สูง ในขณะที่เปลี่ยนสถานะการทำงาน แรงดันและกระแสของสวิตช์จะมีการคาบเกี่ยวกัน (Overlapping) ทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น ดังรูปที่ 2.1 (ก) โดยกำลังสูญเสียดังกล่าวเรียกว่า switching loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

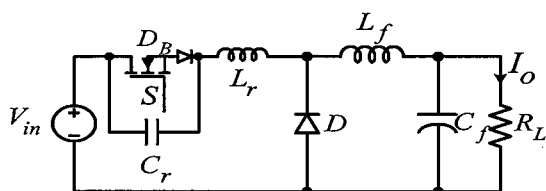


**รูปที่ 2.2** (ก) มอสเฟตและตัวเก็บประจุแผ่น  $C_{DS}$  (ข)  $C_{DS}$  สะสมประจุขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส (ค)  $C_{DS}$  คายประจุขณะมอสเฟตนำกระแส [4]

นอกจากนี้ตัวเก็บประจุแผ่น ( $C_{DS}$ ) ระหว่างขาเดรน-ซอร์สของมอสเฟตในรูปที่ 2.2(ก) ยังทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า turn-on loss กล่าวคือ ในขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส  $C_{DS}$  จะสะสมประจุและมีพลังงานเก็บไว้ค่าหนึ่งดังรูปที่ 2.2(ข) พลังงานที่สะสมใน  $C_{DS}$  นี้จะสูญเสียภายในมอสเฟตเมื่อสวิตช์เริ่มนำกระแสดังรูปที่ 2.2(ค) กำลังสูญเสีย switching loss และ turn-on loss นี้จะเพิ่มขึ้นตามความถี่สวิตช์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ลดน้อยลงที่ความถี่สวิตช์สูงขึ้น วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือการใช้วงจรควอซีเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ซึ่งอาศัยการต่อตัวเหนี่ยวนำ ( $L_r$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C_r$ ) เพิ่มเข้าไปในวงจร ดีซี-ดีซี บัคคอนเวอร์เตอร์ปกติ ทำให้เกิดเรโซแนนท์ (resonant) ได้แรงดันมีค่าเป็นศูนย์ในขณะที่สวิตช์นำกระแสและหยุดนำกระแส ดังรูปที่ 2.1(ข)

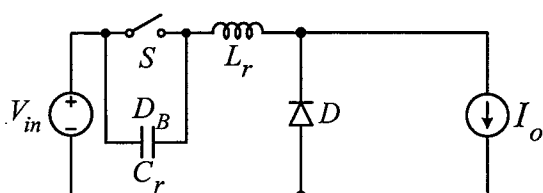
## 2.3 หลักการทำงานของวงจร

วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ แสดงดังรูปที่ 2.3  $D_B$  เป็นไดโอดแผ่นระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สของมอสเฟต  $L_r$  และ  $C_r$  คือตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดเรโซแนนท์ในวงจรทำให้แรงดันคร่อมสวิตช์ ขณะเริ่มหยุดนำกระแส (turn off) และเริ่มนำกระแส (turn on) มีค่าเป็นศูนย์ ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจร จะกำหนดให้ (1) อุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรเป็นอุดมคติ (2) มอสเฟตถูกแทนด้วยสวิตช์อุดมคติ  $S$  (3) ตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  มีขนาดใหญ่ นั่นคือกระแสรีเปลของ  $L_r$  มีค่าน้อยมาก ทำให้กระแสของ  $L_r$  มีค่าคงที่เท่ากับ  $I_o$  จากสมมติฐานข้างต้น วงจรในรูปที่ 2.3 สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.4



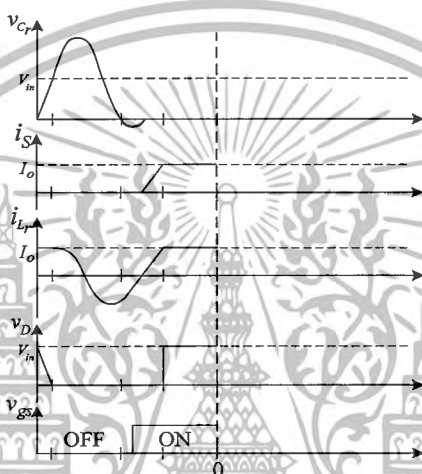
**รูปที่ 2.3** วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



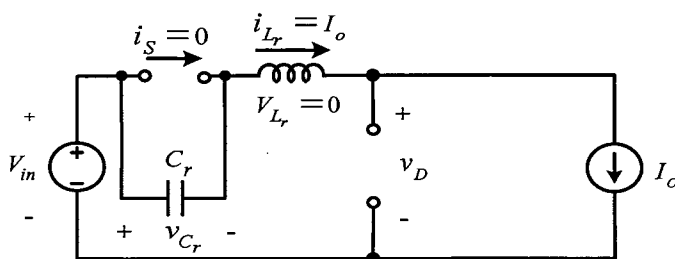
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.3

การทำงานของวงจรในรูปที่ 2.4 แบ่งออกเป็น 4 ช่วงเวลา ดังนี้



รูปที่ 2.5 คลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ ( $v_{C_r}$ ) กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ ( $i_S$ ) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ( $i_{L_r}$ ) แรงดันคร่อม ( $v_D$ ) และแรงดันขับเกตมอสเฟต ( $v_{gs}$ ) แสดงเวลาเริ่มต้น

(1) ช่วงเวลา  $0 < t < t_1$  เริ่มต้นพิจารณาจากที่เวลา 0 ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งในขณะนี้สวิตช์  $S$  ยังคงนำกระแส  $I_o$  อยู่ เมื่อสั่งให้สวิตช์  $S$  หยุดนำกระแส จะได้วงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.6 ตัวเก็บประจุ  $C_r$  ถูกชาร์จด้วยกระแส  $I_o$  เนื่องจาก  $I_o$  มีค่าคงที่ แรงดันคร่อม  $L_r$  จึงมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันคร่อม  $C_r$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ดังสมการ



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา  $0 < t < t_1$  ของวงจรรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{C_r} = i_{L_r} = I_o \quad (2.1)$$

$$v_{C_r} = \frac{1}{C_r} \int_0^t i_{C_r} dt = \frac{I_o}{C_r} t \quad (2.2)$$

ในขณะที่เดียวกันแรงดันคร่อม  $D$  จะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น ดังสมการ

$$v_D = V_{in} - v_{C_r} = V_{in} - \frac{I_o}{C_r} t \quad (2.3)$$

การทำงานจะสิ้นสุดลงที่เวลา  $t_1$  เมื่อแรงดัน  $v_{C_r}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{in}$  และแรงดัน  $v_D$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ช่วงเวลา 0 ถึง  $t_1$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) โดยให้  $v_D = 0$  จะได้

$$0 = V_{in} - \frac{I_o}{C_r} t_{01} \quad (2.4)$$

$$t_{01} = \frac{V_{in} C_r}{I_o} \quad (2.5)$$

สมการที่ (2.3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

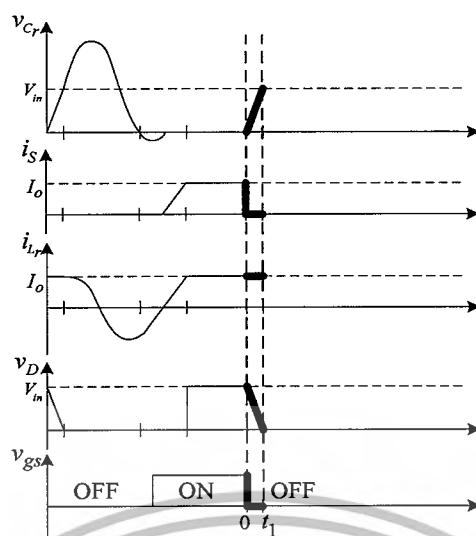
$$v_D = V_{in} \left(1 - \frac{t}{t_{01}}\right) \quad (2.6)$$

เนื่องจากในสภาวะนี้สวิตช์หยุดนำกระแส ดังนั้น

$$i_s = 0 \quad (2.7)$$

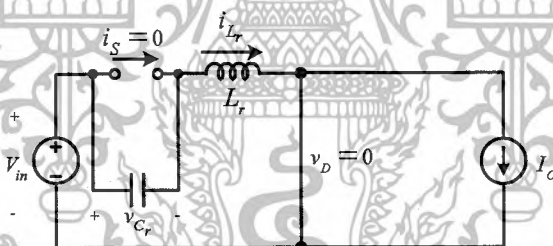
รูปคลื่น  $v_{C_r}$ ,  $i_s$ ,  $i_{L_r}$ ,  $v_D$  และแรงดันขั้วเกตมอสเฟต ( $v_{gs}$ ) ในช่วงเวลา  $0 < t < t_1$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 คลื่น  $v_{Cr}$ ,  $i_S$ ,  $i_{Lr}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $0 < t < t_1$

(2) ช่วงเวลา  $t_1 < t < t_2$  ไดโอด  $D$  นำกระแส จะได้วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.8 ในสถานะนี้จะเกิดการเรโซแนนซ์ระหว่าง  $L_r$  กับ  $C_r$  สมการของแรงดันคร่อม  $C_r$  และกระแสที่ไหลผ่าน  $L_r$  สามารถเขียนได้ดังนี้ (รายละเอียดการได้มาซึ่งสมการ ดูได้จาก ภาคผนวก ก.1)



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลแสดงการทำงานในช่วงเวลา  $t_1 < t < t_2$  ของวงจรรูปที่ 2.4

$$v_{Cr} = V_{in} + I_o Z_0 \sin \omega_0 t \tag{2.8}$$

$$i_{Lr} = I_o \cos \omega_0 t \tag{2.9}$$

เมื่อ  $Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$  และ  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$

การทำงานจะสิ้นสุดลงที่เวลา  $t_2$  เมื่อแรงดัน  $v_{Cr}$  ตกลงเป็นศูนย์ ช่วงเวลาจาก  $t_1$  ถึง  $t_2$  สามารถหา

ได้จากสมการที่ (2.8) โดยให้  $v_{Cr} = 0$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = V_{in} + I_o Z_o \sin \omega_0 t_{12} \quad (2.10)$$

$$t_{12} = \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in}}{I_o Z_o} \right) \right] \quad (2.11)$$

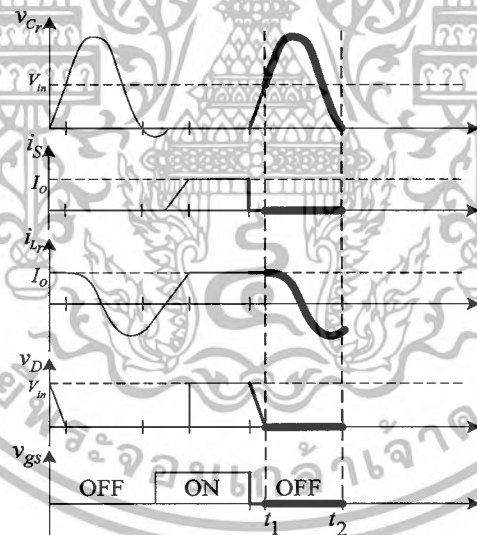
ในสภาวะนี้ เนื่องจาก  $D$  นำกระแส ดังนั้น

$$v_D = 0 \quad (2.12)$$

เนื่องจากสวิตช์ยังคงไม่นำกระแส ดังนั้น

$$i_s = 0 \quad (2.13)$$

รูปคลื่น  $v_{Cr}$ ,  $i_s$ ,  $i_{Lr}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $t_1 < t < t_2$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.9

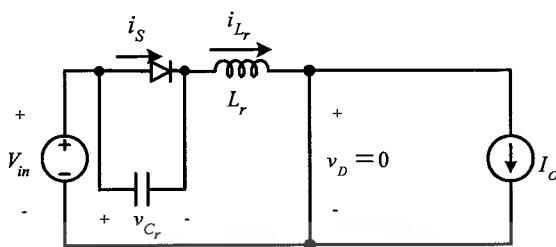


**รูปที่ 2.9** คลื่น  $v_{Cr}$ ,  $i_s$ ,  $i_{Lr}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $t_1 < t < t_2$

(3) ช่วงเวลา  $t_2 < t < t_3$  แรงดัน  $v_{Cr}$  มีค่าเป็นศูนย์ทำให้แรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน ไดโอดเฟือง  $D_B$  นำกระแส จะได้วงจรสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 2.10 แรงดันขั้วเกตจะสั่งให้สวิตช์  $S$  ทำงานในช่วงเวลานี้ ในสภาวะนี้แรงดันคร่อม  $L_r$  จะเท่ากับ  $V_{in}$  กระแสไหลผ่าน  $L_r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น สมการของแรงดันคร่อม  $C_r$  และกระแสที่ไหลผ่าน  $L_r$  สามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา  $t_2 < t < t_3$  ของวงจรรูปที่ 2.4

$$v_{C_r} = 0 \quad (2.14)$$

$$i_{L_r} = \frac{1}{L_r} \int_{t_2}^t V_{in} dt \quad (2.15)$$

$$i_{L_r} = \frac{V_{in}}{L_r} t + i_{L_r}(t_2) \quad (2.16)$$

$$i_{L_r} = \frac{V_{in}}{L_r} t + I_o \cos \omega_0 t_{12} \quad (2.17)$$

การทำงานจะสิ้นสุดลงที่เวลา  $t_3$  เมื่อกระแสไหลผ่าน  $L_r$  เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $I_o$  ช่วงเวลาจาก  $t_2$  ถึง  $t_3$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17) โดยให้  $i_{L_r} = I_o$  จะได้

$$I_o = \frac{V_{in}}{L_r} t_{23} + I_o \cos \omega_0 t_{12} \quad (2.18)$$

$$t_{23} = \frac{L_r I_o (1 - \cos \omega_0 t_{12})}{V_{in}} \quad (2.19)$$

ในสถานะนี้เนื่องจาก  $D$  ยังคงนำกระแส ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_D = 0 \quad (2.20)$$

ที่เวลา  $t_2$ ,  $i_{L_r}$  เริ่มไหลกลับทิศ จะเปลี่ยนจากไหลผ่าน  $D_B$  ไปยัง  $S$  ทำให้  $i_S$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตาม  $i_{L_r}$  ดังสมการที่ (2.21)

$$i_S = \frac{V_{in}}{L_r} t + i_{L_r}(t_2) = \frac{V_{in}}{L_r} t \quad (2.21)$$

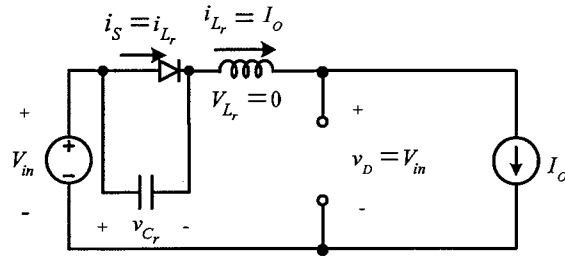
รูปคลื่น  $v_{C_r}$ ,  $i_S$ ,  $i_{L_r}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $t_2 < t < t_3$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 คลื่น  $v_{C_r}$ ,  $i_S$ ,  $i_{L_r}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $t_2 < t < t_3$

(4) ช่วงเวลา  $t_3 < t < T_s$ ,  $i_{L_r}$  มีค่าเท่ากับ  $I_o$ ,  $D$  หยุดนำกระแส จะได้วงจรสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 2.12 สถานะนี้จะเป็นอยู่ไปจนกระทั่งสวิทซ์  $S$  หยุดนำกระแสอีกครั้งหนึ่ง สมการของกระแสที่ไหลผ่าน  $L_r$  และแรงดันคร่อม  $C_r$  สามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลแสดงการทำงานในช่วงเวลา  $t_3 < t < T_s$  ของวงจรรูปที่ 2.4

$$i_{L_r} = I_o \quad (2.22)$$

$$v_{C_r} = 0 \quad (2.23)$$

ช่วงเวลาจาก  $t_3$  ถึง  $T_s$  สามารถหาได้ดังนี้

$$t_{3s} = T_s - t_{01} - t_{12} - t_{23} \quad (2.24)$$

ในสถานะนี้  $D$  ไม่นำกระแส ดังนั้น

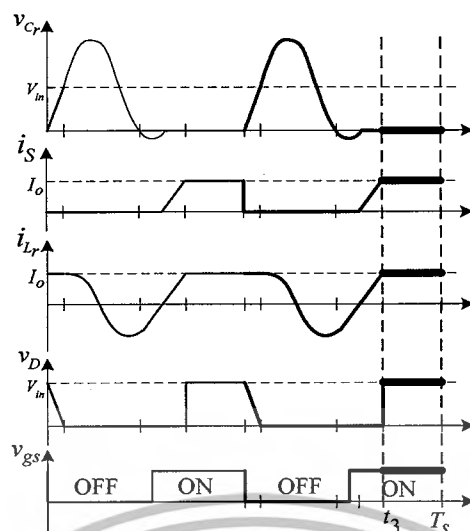
$$v_D = V_{in} \quad (2.25)$$

เนื่องจากสวิตช์ยังคงนำกระแสอยู่ ดังนั้น

$$i_s = i_{L_r} = I_o \quad (2.26)$$

รูปคลื่น  $v_{C_r}$ ,  $i_s$ ,  $i_{L_r}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $t_3 < t < T_s$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

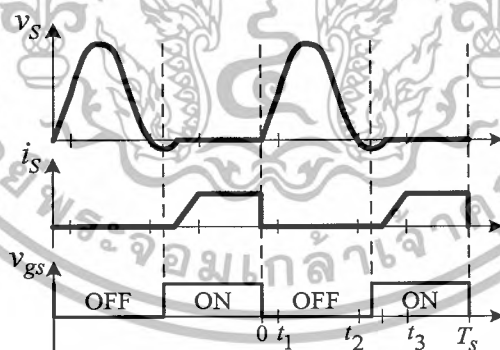
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 คลื่น  $v_{Cr}$ ,  $i_S$ ,  $i_{Lr}$ ,  $v_D$  และ  $v_{gs}$  ในช่วงเวลา  $t_3 < t < T_s$

หลังจากนี้ การทำงานของวงจรจะวนกลับไปในช่วงเวลา  $0 < t < t_1$  ใหม่

เมื่อพิจารณาเฉพาะรูปคลื่นกระแสสวิตช์  $i_S$  และแรงดันกัอมสวิตช์  $v_S$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $v_{Cr}$  จะพบว่าไม่เกิดการคาบเกี่ยวกันในระหว่างการสวิตช์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทำให้ไม่เกิด switching loss นอกจากนี้การที่สวิตช์นำกระแสที่แรงดันศูนย์ ยังทำให้ไม่เกิด turn-on loss อีกด้วย

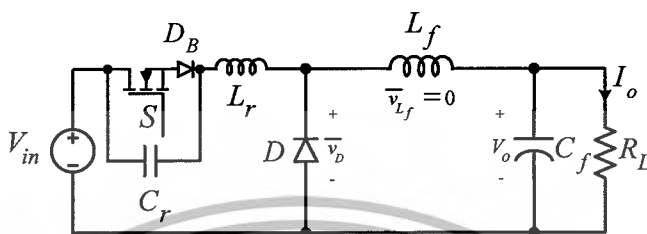


รูปที่ 2.14 คลื่น  $v_S$ ,  $i_S$  และ  $v_{gs}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4 แรงดันเอาต์พุตของวงจร

จากรูปที่ 2.15 ที่สภาวะคงตัว แรงดันเฉลี่ยคร่อม  $L_f$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับแรงดันเฉลี่ยของไดโอด  $D$  ซึ่งหาได้จากการหาค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นในรูปที่ 2.16



**รูปที่ 2.15** วงจรควอซีเรโซแนนซ์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันศูนย์ แสดงค่าแรงดันเฉลี่ยของ  $D$  แรงดันเฉลี่ยของ  $L_f$  และ  $V_o$



**รูปที่ 2.16** คลื่น  $v_D$  และค่าเฉลี่ยของ  $v_D$

$$V_o = \overline{v_D} \tag{2.27}$$

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_D dt \tag{2.28}$$

$$V_o = \frac{1}{T_s} \left[ \int_0^{t_1} V_{in} \left(1 - \frac{t}{t_{01}}\right) dt + \int_{t_3}^{T_s} V_{in} dt \right] \tag{2.29}$$

$$V_o = \frac{V_{in}}{T_s} \left[ \left( t - \frac{t^2}{2t_{01}} \right) \Big|_0^{t_1} + t \Big|_{t_3}^{T_s} \right] \tag{2.30}$$

$$V_o = \frac{V_{in}}{T_s} \left[ \left( t_{01} - \frac{(t_{01})^2}{2t_{01}} \right) + t_{3s} \right] \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{V_{in}}{T_s} \left[ \left( t_{01} - \frac{t_{01}}{2} \right) + (T_s - t_{01} - t_{12} - t_{23}) \right] \quad (2.32)$$

$$V_o = V_{in} \left[ \frac{1}{T_s} \frac{t_{01}}{2} + \frac{T_s}{T_s} - \frac{t_{01}}{T_s} - \frac{t_{12}}{T_s} - \frac{t_{23}}{T_s} \right] \quad (2.33)$$

$$V_o = V_{in} \left[ \frac{T_s}{T_s} + \frac{1}{T_s} \left( -\frac{t_{01}}{2} - t_{12} - t_{23} \right) \right] \quad (2.34)$$

$$V_o = V_{in} \left[ 1 - f_s \left( \frac{t_{01}}{2} + t_{12} + t_{23} \right) \right] \quad (2.35)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{1}{T_s} = f_s$$

จากสมการที่ (2.35) จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต ( $V_{in}$ ) กระแสไหลค (I<sub>o</sub>) (ค่า  $t_{01}$   $t_{12}$   $t_{23}$  ขึ้นอยู่กับกระแสไหลค) และความถี่สวิตช์ของวงจร ( $f_s$ )

แทนค่า  $t_{01}$   $t_{12}$  และ  $t_{23}$  จากสมการที่ (2.5) (2.11) (2.19) ลงในสมการที่ (2.35) จะได้

$$V_o = V_{in} \left[ 1 - f_s \left( \frac{\frac{V_{in} C_r}{2I_o} + \frac{1}{\omega_0} (2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in}}{I_o Z_o} \right)) + \frac{L_r I_o}{V_{in}} (1 - \cos \omega_0 \left( \frac{1}{\omega_0} (2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in}}{I_o Z_o} \right)) \right)) \right) \right] \quad (2.36)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 1 - \frac{f_s}{\omega_0} \left( \frac{\omega_0 \frac{R_L Z_o V_{in} C_r}{R_L Z_o 2I_o} + (2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in} R_L}{I_o Z_o R_L} \right)) + \frac{L_r I_o R_L Z_o}{V_{in} R_L Z_o} (1 - \cos(2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in} R_L}{I_o Z_o R_L} \right))) \right) \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 1 - \frac{f_s}{2\pi f_r} \left( \begin{aligned} &\omega_0 \frac{C_r Z_0 V_{in} R_L}{2 V_o Z_0} + (2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in} R_L}{V_o Z_0} \right)) \\ &+ \omega_0 \frac{L_r V_o Z_0}{Z_0 V_{in} R_L} (1 - \cos(2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in} R_L}{V_o Z_0} \right))) \end{aligned} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ  $\omega_0 = 2\pi f_r$

กำหนดให้  $M = V_o / V_{in}$   $r = R_L / Z_0$   $F = f_s / f_r$  และ  $\alpha = 2\pi - \sin^{-1}(r/M)$  สมการที่ (2.38) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \omega_0 C_r Z_0 \frac{r}{2M} + \alpha + \omega_0 \frac{L_r M}{Z_0 r} (1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.39)$$

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} C_r Z_0 \frac{r}{2M} + \alpha + \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \frac{L_r M}{Z_0 r} (1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.40)$$

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \sqrt{\left( \frac{C_r}{\sqrt{L_r C_r}} \right)^2} \frac{Z_0 r}{2M} + \alpha + \sqrt{\left( \frac{L_r}{\sqrt{L_r C_r}} \right)^2} \frac{M}{Z_0 r} (1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.41)$$

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \sqrt{\frac{C_r^2}{L_r C_r}} \frac{Z_0 r}{2M} + \alpha + \sqrt{\frac{L_r^2}{L_r C_r}} \frac{M}{Z_0 r} (1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.42)$$

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \frac{Z_0 r}{2M} + \alpha + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \frac{M}{Z_0 r} (1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.43)$$

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \frac{1}{Z_0} \frac{Z_0 r}{2M} + \alpha + Z_0 \frac{M}{Z_0 r} (1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = 1 - \frac{F}{2\pi} \left( \frac{r}{2M} + \alpha + \frac{M}{r}(1 - \cos \alpha) \right) \quad (2.45)$$

จากสมการที่ (2.45) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $M$  (Normalized output voltage) และ  $F$  (Normalized switching frequency) ที่  $r$  (Normalized load resistance) ค่าต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $M$  และ  $F$  ที่  $r$  ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 2.17 เมื่อกำหนดให้  $M$  มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่  $M_{\min} (=V_o/V_{in,max})$  ถึง  $M_{\max} (=V_o/V_{in,min})$  และ  $r$  มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่  $r_{\min} (=R_{L,min}/Z_0)$  ถึง  $r_{\max} (=R_{L,max}/Z_0)$

ขอบเขตของ  $M$  และ  $r$  จะพบว่า  $F_{\min} (f_{S,min})$  เกิดขึ้นที่  $r_{\min} (R_{L,min})$  และ  $M_{\max} (V_{in,min})$  ขณะที่  $F_{\max} (f_{S,max})$  เกิดขึ้นที่  $r_{\max} (R_{L,max})$  และ  $M_{\min} (V_{in,max})$  ซึ่งทั้งสองสภาวะนี้เป็นขอบของระบบ นั่นคือหาก  $R_L$  มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง  $R_{L,min}$  ถึง  $R_{L,max}$  และ  $V_{in}$  มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง  $V_{in,min}$  ถึง  $V_{in,max}$  ค่าความถี่ ( $f_S$ ) ที่ใช้ในการสวิตช์เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ จะอยู่ในย่าน  $f_{S,min}$  ถึง  $f_{S,max}$

ถ้ากระแสไหลและแรงดันอินพุตมีย่านใช้งานที่กว้าง ก็จะทำให้ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์นั้นมีย่านที่กว้างขึ้นด้วย

## 2.5 เงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์จะเกิดขึ้นได้นั้น ต้องอาศัยการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสม จากสภาวะเรโซแนนซ์

$$X_{L_r} = X_{C_r} \quad (2.46)$$

$$2\pi f_r L_r = \frac{1}{2\pi f_r C_r} \quad (2.47)$$

จะได้ความถี่เรโซแนนซ์ดังสมการที่ (2.48)

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.47) จัดสมการเพื่อหา  $C_r$  ได้ดังนี้

$$L_r = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_r} \quad (2.49)$$

$$C_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L_r} \quad (2.50)$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r \sqrt{L_r}} \quad (2.51)$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r Z_0} \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.47) จัดสมการเพื่อหา  $L_r$  ได้ดังนี้

$$L_r = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_r} L_r \quad (2.53)$$

$$L_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_r} L_r \quad (2.54)$$

$$L_r = \frac{1}{2\pi f_r} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2.55)$$

$$L_r = \frac{Z_0}{2\pi f_r} \quad (2.56)$$

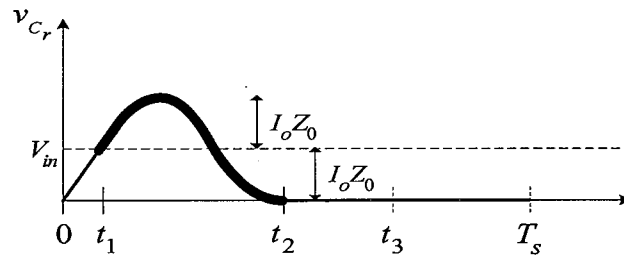
จากสมการที่ (2.52) และ (2.56) จะเห็นได้ว่าค่า  $C_r$  และ  $L_r$  ที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ในวงจร จะขึ้นอยู่กับค่า  $f_r$  และ  $Z_0$  ในการออกแบบวงจรควอดรีเรโซแนนซ์บักคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ค่า  $f_r$  และ  $Z_0$  จะต้องเลือกอย่างเหมาะสม

### 2.5.1 การเลือกค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance, $Z_0$ )

ผลกระทบของค่า  $Z_0$  ที่มีต่อวงจร พิจารณาได้จากสมการที่ (2.8)

$$v_{C_r} = V_{in} + I_o Z_0 \sin \omega_0 t \quad (2.57)$$

จะเห็นว่า ถ้า  $Z_0$  มีค่าเพิ่มขึ้น  $v_{C_r}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น และในทำนองเดียวกันหาก  $Z_0$  มีค่าลดลง  $v_{C_r}$  จะมีค่าลดลง นั่นคือค่า  $Z_0$  จะมีผลต่อแรงดันคร่อมสวิตช์ ดังนั้น เพื่อให้แรงดันคร่อมสวิตช์ไม่สูงมาก ค่า  $Z_0$  จึงควรมีค่าน้อย ในที่นี้ การเลือก  $Z_0$  จะพิจารณาบนพื้นฐานที่ว่า วงจรต้องสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (2.57) และรูปคลื่น  $v_{C_r}$  ในรูปที่ 2.18



**รูปที่ 2.18** คลื่นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_r$  แสดงลักษณะรูปคลื่นในช่วงเวลา  $t_1 < t < t_2$  [4]

จากรูปที่ 2.18 และสมการที่ (2.57) จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นเรโซแนนท์เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่  $t_1$  ถึง  $t_2$  มีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ  $V_{in}$  และมีแอมพลิจูดสูงสุดทั้งขาขึ้นและขาลงเท่ากับ  $I_o Z_0$  ดังนั้น การที่จะทำให้รูปคลื่นของแรงดันนี้ตกลงเป็นศูนย์ ผลคูณของ  $I_o$  และ  $Z_0$  จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $V_{in}$

$$I_o Z_0 \geq V_{in} \quad (2.58)$$

$$\frac{V_o}{R_L} Z_0 \geq V_{in} \quad (2.59)$$

นั่นคือเมื่อ  $V_{in}$  มีค่าสูงสุดและ  $I_o$  มีค่าต่ำสุด ( $R_L$  มีค่าสูงสุด) สมการที่ (2.59) ยังต้องเป็นจริง จะได้

$$\left( \frac{V_o}{R_{L,max}} \right) Z_0 \geq V_{in,max} \quad (2.60)$$

$$Z_0 \geq \frac{R_{L,max}}{M_{min}} \quad (2.61)$$

$Z_0$  ที่ได้จากสมการที่ (2.61) จะทำให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ตลอดย่านของ  $I_o$  และ  $V_{in}$

## 2.5.2 การเลือกค่าความถี่เรโซแนนท์ (resonant frequency, $f_r$ )

การพิจารณาความถี่เรโซแนนท์สามารถพิจารณาได้จากสมการ (2.45) ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{f_s}{f_r} = \frac{2\pi(1-M)}{\alpha + \frac{r}{2M} + \frac{M}{r}(1-\cos\alpha)} \quad (2.62)$$

ความถี่ในการสวิตช์สูงสุด  $f_{s,\max}$  จะเกิดขึ้นที่  $R_{L,\max}$  ( $I_{o,\min}$ ) และ  $V_{in,\max}$  จะได้

$$M = \frac{V_o}{V_{in,\max}} = M_{\min} \quad (2.63)$$

$$\frac{r}{M} = \frac{Z_0}{M_{\min}} = \frac{R_{L,\max}}{M_{\min}} = 1 \quad (2.64)$$

$$\frac{M}{r} = \frac{M_{\min}}{R_{L,\max}} = \frac{M_{\min}}{R_{L,\max}} = 1 \quad (2.65)$$

$$\alpha = 2\pi \sin^{-1}\left(\frac{M}{r}\right) = \frac{3\pi}{2} \quad (2.66)$$

แทนค่า  $M = \frac{r}{M}$  และ  $\alpha$  จากสมการที่ (2.63) - (2.66) ลงในสมการที่ (2.62) จะได้

$$\frac{f_{s,\max}}{f_r} = \frac{2\pi(1-M_{\min})}{\frac{3\pi}{2} + \frac{1}{2}(1) + (1)(1 - \cos\frac{3\pi}{2})} \quad (2.67)$$

จะได้สมการความถี่สวิตช์สูงสุดดังสมการที่ (2.68)

$$\frac{f_{s,\max}}{f_r} = \frac{4\pi(1-M_{\min})}{3(\pi+1)} \quad (2.68)$$

ความถี่ในการสวิตช์ต่ำสุด  $f_{s,\min}$  จะเกิดขึ้นที่  $R_{L,\min}$  ( $I_{o,\max}$ ) และ  $V_{in,\min}$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = \frac{V_o}{V_{in,min}} = M_{max} \quad (2.69)$$

$$\frac{r}{M} = \frac{\frac{R_{L,min}}{Z_0}}{M_{max}} = \frac{\frac{R_{L,min}}{(R_{L,max}/M_{min})}}{M_{max}} = \frac{R_{L,min} M_{min}}{R_{L,max} M_{max}} \quad (2.70)$$

$$\frac{M}{r} = \frac{M_{max}}{\frac{R_{L,min}}{Z_0}} = \frac{M_{max}}{\frac{R_{L,min}}{(R_{L,max}/M_{min})}} = \frac{R_{L,max} M_{max}}{R_{L,min} M_{min}} \quad (2.71)$$

$$\alpha = 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{R_{L,max} M_{max}}{R_{L,min} M_{min}} \right) \quad (2.72)$$

แทนค่า  $M \frac{r}{M} = \frac{M}{r}$  และ  $\alpha$  จากสมการที่ (2.69) - (2.72) ลงในสมการที่ (2.62) จะได้สมการความถี่สวิตช์ต่ำสุดดังสมการที่ (2.73)

$$\frac{f_{S,min}}{f_r} = \frac{2\pi(1 - M_{max})}{\left( 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{R_{L,max} M_{max}}{R_{L,min} M_{min}} \right) + \frac{1}{2} \frac{R_{L,min} M_{min}}{R_{L,max} M_{max}} + \frac{R_{L,max} M_{max}}{R_{L,min} M_{min}} \left( 1 - \cos \left( 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{R_{L,max} M_{max}}{R_{L,min} M_{min}} \right) \right) \right) \right)} \quad (2.73)$$

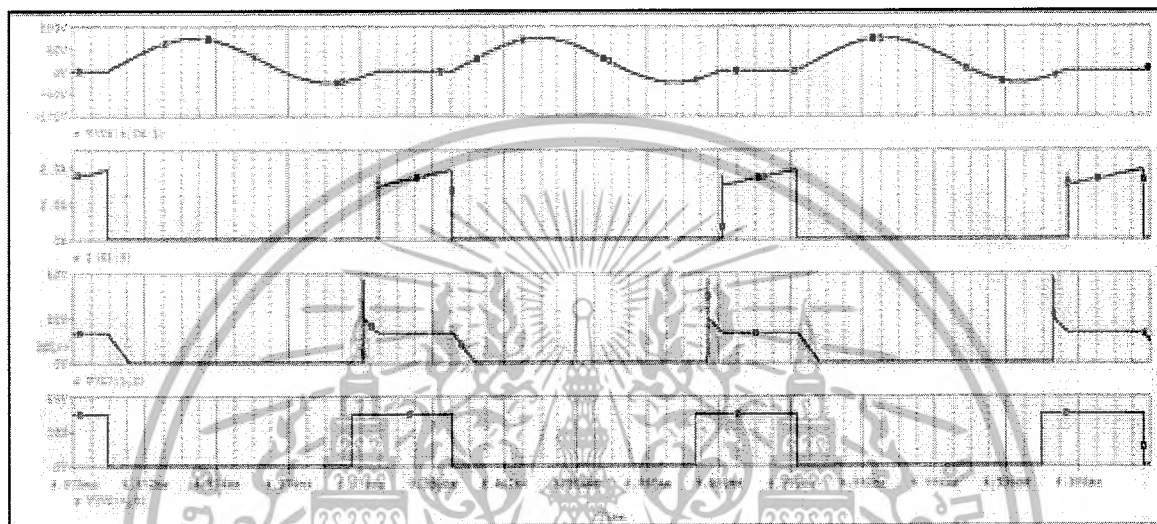
โดยปกติ  $f_{S,min}$  จะเป็นค่าที่กำหนดขึ้น ดังนั้นสามารถหาค่า  $f_r$  ได้จากสมการที่ (2.73) และค่าความถี่โชนแทนที่ได้นี้ จะถูกนำไปใช้หา  $f_{S,max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $f_{s,min}$  และ  $f_{s,max}$  ที่ได้คือย่านความถี่สวิตช์ที่ใช้ในวงจรเพื่อให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์และได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการตลอดย่านของ  $I_o$  และ  $V_{in}$  ที่พิจารณา

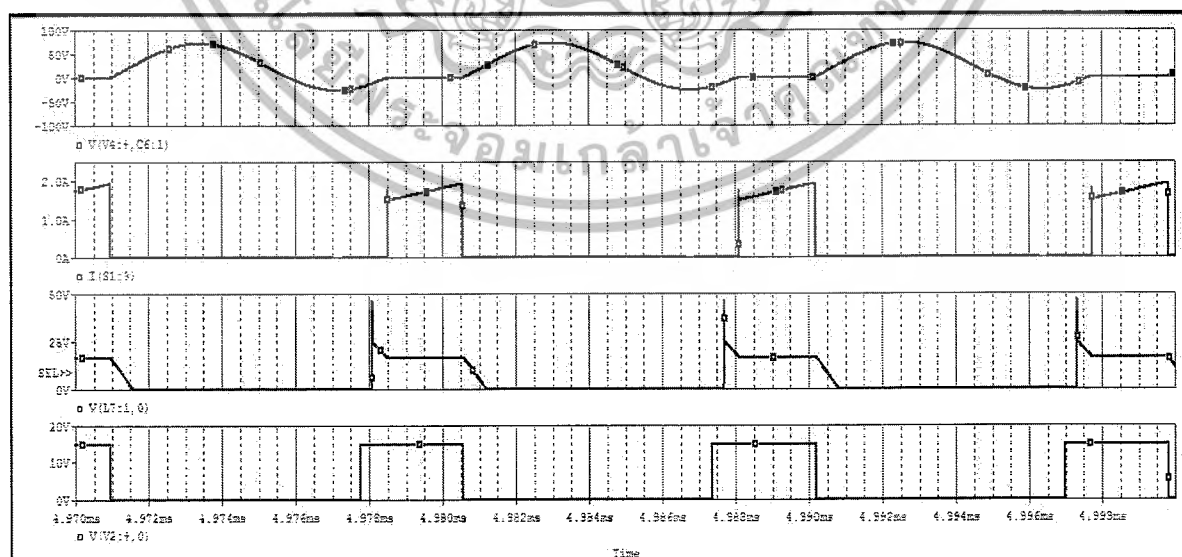
## 2.6 ผลการซิมมูลชัน

$$F_{max} = 108kHz \quad V_{in} = 25V \quad R_{L,min} = 5\Omega$$



รูปที่ 2.19 ผลการซิมมูลชันที่ขอบเขตของระ  $F_{max} = 108kHz$   $V_{in} = 25V$   $R_{L,min} = 5\Omega$

$$F_{mid} = 104kHz \quad V_{in} = 23V \quad R_{L,min} = 3\Omega$$



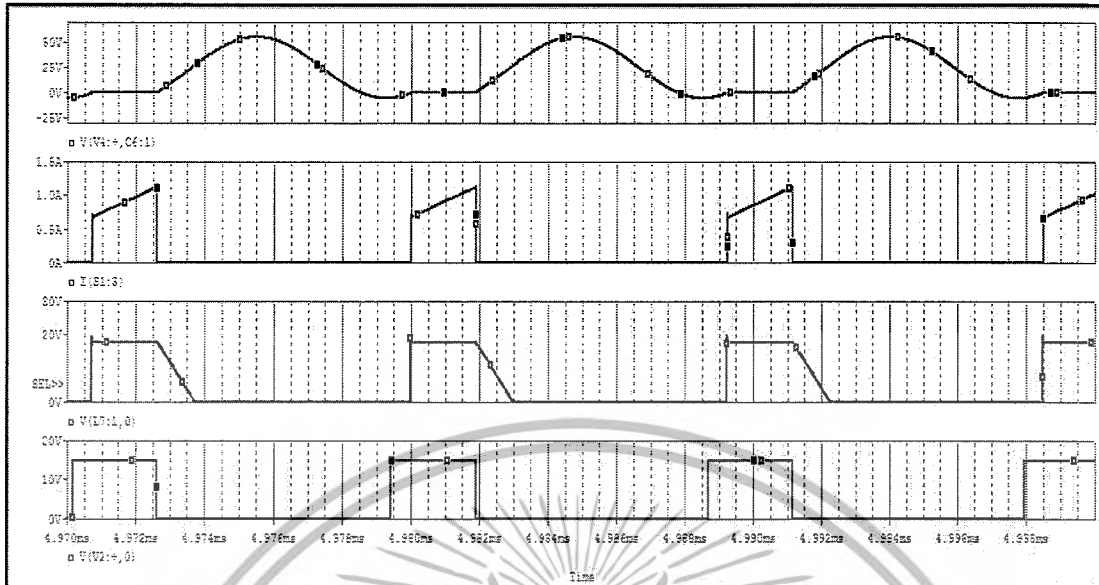
รูปที่ 2.20 ผลการซิมมูลชันที่ขอบเขตของระบบ  $F_{mid} = 104kHz$   $V_{in} = 23V$   $R_{L,min} = 3\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{\max} = 108\text{kHz}$$

$$V_{in} = 25\text{V}$$

$$R_{L,\min} = 5\Omega$$



รูปที่ 2.21 ผลการซิมมูลชันที่ขอบเขตของระบบ  $F_{\max} = 108\text{kHz}$   $V_{in} = 25\text{V}$   $R_{L,\min} = 5\Omega$

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ ส่วนแรกได้กล่าวถึงหลักการการทำงานของวงจรควิเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ลักษณะรูปคลื่นของกระแสไหลผ่านสวิตช์และแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงาน (รูปที่ 2.14) แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการคาบเกี่ยวกันในระหว่างการสวิตช์ ทำให้ไม่เกิด switching loss และสวิตช์ยังนำกระแสที่แรงดันศูนย์ ทำให้ไม่เกิด turn-on loss อีกด้วย นอกจากนี้สมการการทำงานในแต่ละช่วงเวลายังถูกนำมาใช้ในการหาสมการแรงดันเอาต์พุต (สมการที่ (2.35)) จากสมการพบว่าในการรักษาแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) ให้คงที่ เมื่อแรงดันอินพุต ( $V_{in}$ ) และกระแสโหลด ( $I_o$ ) เปลี่ยนไป ต้องปรับความถี่สวิตช์ ( $f_s$ ) โดยความถี่สวิตช์มีค่าสูงสุด ( $f_{S,\max}$ ) ที่แรงดันอินพุตสูงสุด ( $V_{in,\max}$ ) กระแสโหลดต่ำสุด ( $I_{o,\min}$ ) และความถี่สวิตช์มีค่าต่ำสุด ( $f_{S,\min}$ ) ที่แรงดันอินพุตต่ำสุด  $V_{in,\min}$  กระแสโหลดสูงสุด ( $I_{o,\max}$ ) ซึ่งทั้งสองสภาวะนี้เป็นขอบของระบบ (รูปที่ 2.17) ที่จะถูกนำไปใช้พิจารณาเงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์และการออกแบบวงจรต่อไป หลังจากนั้นเงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance,  $Z_0$ ) และความถี่เรโซแนนท์ (resonant frequency,  $f_r$ ) จะถูกนำมาพิจารณา เพื่อหาสมการที่ใช้ในการออกแบบตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ ( $C_r$ ) (สมการที่ (2.52)) และตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ( $L_r$ ) (สมการที่ (2.56))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบวงจรต้นแบบ

#### 3.1 บทนำ

บทที่สอง ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์การทำงาน และการจำลองแบบวงจรควอซีเรโซแนนท์ บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ไปแล้ว ในบทนี้ จะนำเอาสมการที่ได้ในบทเหล่านั้นมา ทำการออกแบบวงจรต้นแบบ โดยมีรายละเอียดในการออกแบบวงจรแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

#### 3.2 การออกแบบวงจรภาคกำลัง

กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical specification) และพารามิเตอร์ของวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ดังนี้  $V_m = 20-25V$   $V_o = 5V$   $I_o = 1-5A$  ( $R_L = 1-5\Omega$ ) ความถี่สวิตช์ต่ำสุด ( $f_{s,min}$ ) = 100kHz  $L_f = 55\mu H$  และ  $C_f = 200\mu F$  [3] ในการออกแบบจะเลือกค่า  $L_r$  และ  $C_r$  เพื่อที่จะทำให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ตลอดย่านการทำงานของวงจร นอกจากนี้จะทำการคำนวณค่าแรงดันและกระแสที่มอสเฟตและไดโอดต้องทน เพื่อเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์

##### 3.2.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์และตัวเก็บประจุเรโซแนนท์

จากเงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ที่ได้วิเคราะห์ในบทที่สอง ค่าของตัวเก็บประจุเรโซแนนท์และตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ หาได้จากสมการที่ (2.52) และ (2.56) ตามลำดับ ดังนี้

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r Z_0} \quad (3.1)$$

$$L_r = \frac{Z_0}{2\pi f_r} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$Z_0 = \frac{R_{L,max}}{M_{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_r = \frac{f_{S,\min} \left[ \alpha_{\min} + \frac{R_{L,\min} M_{\min}}{2R_{L,\max} M_{\max}} + \frac{R_{L,\max} M_{\max}}{R_{L,\min} M_{\min}} (1 - \cos \alpha_{\min}) \right]}{2\pi(1 - M_{\max})}$$

แทนค่า  $f_{S,\min} = 100\text{kHz}$   $R_{L,\min} = 1\ \Omega$   $R_{L,\max} = 5\ \Omega$   $M_{\min} = \frac{V_o}{V_{in,\max}} = \frac{5}{25} = 0.2$   $M_{\max} =$

$$\frac{V_o}{V_{in,\min}} = \frac{5}{20} = 0.25 \text{ และ } \alpha_{\min} = 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{M_{\min} R_{L,\min}}{M_{\max} R_{L,\max}} \right) = 6.122 \text{ จะได้}$$

$$Z_0 = 25 \quad (3.3)$$

$$f_r = 133371\text{Hz} \quad (3.4)$$

แทนค่าสมการที่ (3.3) และ (3.4) ในสมการที่ (3.1) และ (3.2) จะได้ค่าของตัวเก็บประจุรีโซแนนซ์ และตัวเหนี่ยวนำรีโซแนนซ์ ดังนี้

$$C_r = 47.75\text{nF} \quad (3.6)$$

$$L_r = 30\ \mu\text{H} \quad (3.7)$$

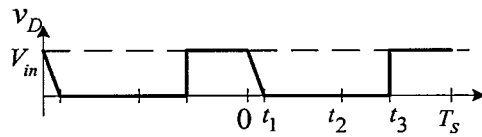
$L_r$  สร้างโดยใช้แกนเฟอร์ไรต์แบบ EER25 พันด้วยลวดทองแดงเบอร์ AWG20 4 เส้น จำนวน 15 รอบ (รายละเอียดการสร้าง  $L_r$  ดูได้ในภาคผนวก ข) และ  $C_r$  ใช้ตัวเก็บจุชนิดไมลาร์ขนาด 47nF จำนวน 1 ตัว และขนาด 0.75nF จำนวน 1 ตัว ต่อขนานกัน

### 3.2.2 การเลือกพิกัดกระแสและแรงดันของไดโอดและมอสเฟต

ก. แรงดันย้อนกลับสูงสุดของไดโอด

แรงดันย้อนกลับสูงสุดของไดโอด ( $V_{D,\max}$ ) พิจารณาได้จากรูปคลื่นแรงดันคร่อมไดโอดซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 คลื่นแรงดันคร่อมไดโอด

จะเห็นว่าค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด มีค่าเท่ากับค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่าย ( $V_{in,max}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25V

### ข. กระแสเฉลี่ยของไดโอด

กระแสเฉลี่ยของไดโอดสามารถหาได้จากภาคผนวก ก

$$I_D = \frac{I_o}{\omega_0 T_s} \left[ \alpha + \frac{r}{2M} + \frac{M}{r} [1 - \cos \alpha] \right] \quad (3.8)$$

ในการคำนวณจะพิจารณาที่สภาวะขอบของระบบ คือ  $V_{in,min}$ ,  $I_{o,max}$ ,  $f_{min}$  และ  $V_{in,max}$ ,  $I_{o,min}$ ,  $f_{max}$

ที่  $V_{in,min} = 20V$ ,  $I_{o,max} = 5A$  และ  $f_{min} = 100kHz$  จะได้

$$M = \frac{V_o}{V_{in,min}} = \frac{5}{20} = 0.25 \quad (3.9)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_r = 2\pi \times 133371 = 837994 \text{ rad/sec} \quad (3.10)$$

$$r = \frac{R_{L,min}}{Z_0} = \frac{1}{25} = 0.04 \quad (3.11)$$

$$T_s = \frac{1}{f_{s,min}} = \frac{1}{100 \times 10^3} \quad (3.12)$$

$$\alpha = 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in,min}}{I_{o,max} Z_0} \right) = 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{20}{5 \times 25} \right) = 6.123 \text{ rad} \quad (3.13)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการนี้ลงในสมการที่ (3.8) จะได้  $I_D = 3.75A$   
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $V_{in,max} = 25V$   $I_{o,min} = 1A$  และ  $f_{max} = 108kHz$  จะได้

$$M = \frac{V_o}{V_{in,max}} = \frac{5}{25} = 0.2 \quad (3.14)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_r = 2\pi \times 133371 = 837994 \text{ rad/sec} \quad (3.15)$$

$$r = \frac{R_{L,max}}{Z_0} = \frac{5}{25} = 0.2 \quad (3.16)$$

$$T_s = \frac{1}{f_{s,min}} = \frac{1}{108 \times 10^3} \quad (3.17)$$

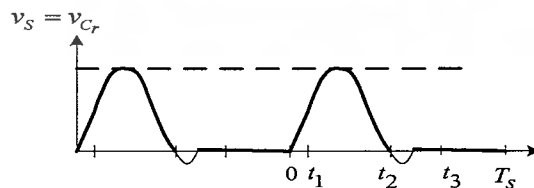
$$\alpha = 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in,max}}{I_{o,min} Z_0} \right) = 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{25}{1 \times 25} \right) = 5.442 \text{ rad} \quad (3.18)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการนี้ลงในสมการที่ (3.8) จะได้  $I_D = 0.80A$

จากสองสภาวะข้างต้นพบว่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าเท่ากับ 3.75A

ค. แรงดันแตรนซอร์สสูงสุดของมอสเฟต

แรงดันแตรนซอร์สสูงสุดของมอสเฟต ( $V_{S,max}$ ) พิจารณาได้จากรูปคลื่นแรงดันคร่อม  $C_r$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 คลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์

จากสมการที่ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

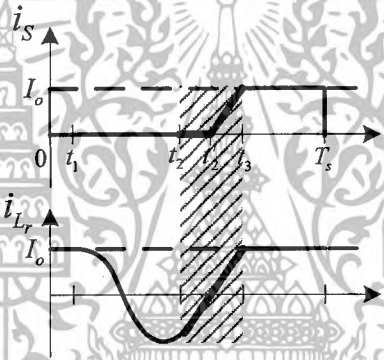
จะได้

$$V_{S,\max} = V_{C_r,\max} = V_{in,\max} + I_{O,\max} Z_0 \quad (3.20)$$

แทนค่า  $V_{in,\max} = 25V$   $I_{O,\max} = 5A$  และ  $Z_0 = 25$  ลงในสมการที่ (3.20) จะได้ค่าแรงดันครนชอร์สสูงสุดของมอสเฟตเท่ากับ 150V

### ง. กระแสเฉลี่ยของมอสเฟต

กระแสเฉลี่ยของมอสเฟตสามารถหาได้จากการเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นกระแสของมอสเฟตในหนึ่งคาบเวลา จากรูปที่ 3.3 ช่วงเวลาที่ใช้ในการหากระแสเฉลี่ยของมอสเฟตคือ  $t'_2$  ถึง  $T_s$  ในการคำนวณจะต้องทราบค่าเวลา  $t'_2$  ก่อน



**รูปที่ 3.3** คลื่นกระแสสวิตช์ ( $i_S$ ) และ คลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $i_{L_r}$ ) แสดงความสัมพันธ์กันในช่วงเวลา  $t_2 < t < t_3$

$t'_2$  หาได้จากสมการ (2.15) ซึ่งเป็นสมการของ  $i_{L_r}$  ในช่วงเวลา  $t_2 < t < t_3$

$$i_{L_r} = \frac{1}{L_r} \int_{t_2}^t V_{in} dt \quad (3.21)$$

$$i_{L_r} = \frac{1}{L_r} \int_{t_2}^t V_{in} dt \quad (3.22)$$

ที่เวลา  $t'_2$  กระแส  $i_{L_r}$  มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = \frac{V_{in}}{L_r}(t'_2 - t_2) + I_o \cos \omega_0 t_{12} \quad (3.23)$$

$$t'_2 = t_2 - \frac{L_r}{V_{in}}(I_o \cos \omega_0 t_{12}) \quad (3.24)$$

เมื่อ

$$t_{12} = \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in}}{I_o Z_0} \right) \right]$$

$$t_2 = t_{01} + t_{12} = \frac{V_{in} C_r}{I_o} + \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in}}{I_o Z_0} \right) \right]$$

ที่  $V_{in,min} = 20V$   $I_{o,max} = 5A$  และ  $f_{min} = 100kHz$  จะได้

$$\omega_0 = 2\pi f_r = 2\pi \times 133371 = 837994 \text{ rad/sec} \quad (3.25)$$

$$t_{12} = \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in,min}}{I_{o,max} Z_0} \right) \right] = \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{20}{5 \times 25} \right) \right] = 7.306 \mu s \quad (3.26)$$

$$t_2 = \frac{V_{in,min} C_r}{I_{o,max}} + 7.306 \times 10^{-6} = \frac{20 \times 47.7 \times 10^{-9}}{5} + 7.306 \times 10^{-6} = 7.497 \mu s \quad (3.27)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการนี้ลงในสมการที่ (3.24) จะได้  $t'_2 = 0.0945 \mu s$

ที่  $V_{in,max} = 25V$   $I_{o,min} = 1A$  และ  $f_{max} = 108kHz$  จะได้

$$\omega_0 = 2\pi f_r = 2\pi \times 133371 = 837994 \text{ rad/sec} \quad (3.28)$$

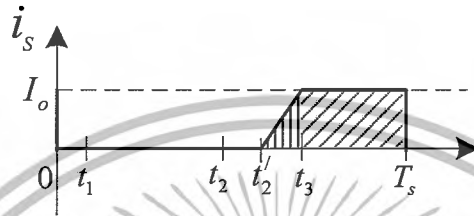
$$t_{12} = \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in,max}}{I_{o,min} Z_0} \right) \right] = \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{25}{1 \times 25} \right) \right] = 5.623 \mu s \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าและไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3.30)

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสถานะนี้ลงในสมการที่ (3.24) จะได้  $t'_2 = 0.0945 \mu\text{s}$

เมื่อทราบค่าเวลา  $t'_2$  ของแต่ละสถานะแล้ว จากรูปที่ 3.4 สามารถหาค่ากระแสเฉลี่ยของมอสเฟตได้ดังสมการที่ (3.31)



รูปที่ 3.4 แสดงการหาพื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นกระแสสวิทช์

$$\bar{i}_s = \frac{\left[ \left( \frac{1}{2} (t_3 - t'_2) (I_o) \right) + (T_s - t_3) (I_o) \right]}{T_s} \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$t_3 = t_2 + t_{23} = \frac{V_{in} C_r}{I_o} + \frac{1}{\omega_0} \left[ 2\pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{in}}{I_o Z_0} \right) \right] + \frac{L_r I_o (1 - \cos \omega_0 t_{12})}{V_{in}}$$

ที่  $V_{in, \min} = 20\text{V}$   $I_{o, \max} = 5\text{A}$  และ  $f_{\min} = 100\text{kHz}$  จะได้

$$\omega_0 = 2\pi f_r = 2\pi \times 133371 = 837994 \text{ rad/sec} \quad (3.32)$$

$$t'_2 = 0.0945 \mu\text{s} \quad (3.33)$$

$$T_s = \frac{1}{f_{s, \min}} = \frac{1}{100 \times 10^3} \quad (3.34)$$

$$t_3 = 7.497 \times 10^{-6} + \frac{L_r I_{o, \max} (1 - \cos \omega_0 t_{12})}{V_{in, \min}} \quad (3.35)$$

$$= 7.497 \times 10^{-6} + \frac{(30 \times 10^{-6} \times 5) (1 - \cos(837994 \times 7.306 \times 10^{-6}))}{20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
= 7.595  $\mu\text{s}$

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการนี้ลงในสมการที่ (3.31) จะได้  $I_s = 3.0776A$

ที่  $V_{in,max} = 25V$   $I_{o,min} = 1A$  และ  $f_{max} = 108kHz$  จะได้

$$\omega_0 = 2\pi f_r = 2\pi \times 133371 = 837994 \text{ rad/sec} \quad (3.36)$$

$$t'_2 = 6.816 \mu s \quad (3.37)$$

$$T_s = \frac{1}{f_{s,max}} = \frac{1}{108 \times 10^3} \quad (3.38)$$

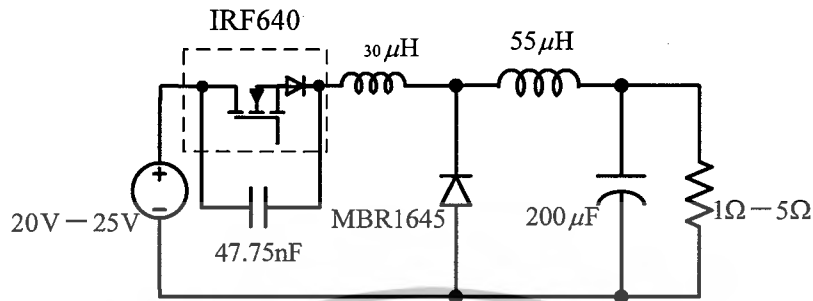
$$\begin{aligned} t_3 &= 6.816 \times 10^{-6} + \frac{L_r I_{o,min} (1 - \cos \omega_0 t'_{12})}{V_{in,max}} \quad (3.39) \\ &= 6.816 \times 10^{-6} + \frac{(30 \times 10^{-6} \times 1) (1 - \cos(837994 \times 5.623 \times 10^{-6}))}{25} \\ &= 8.015 \mu s \end{aligned}$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการนี้ลงในสมการที่ (3.31) จะได้  $I_s = 0.199A$

จากสองสถานะข้างต้นพบว่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่าเท่ากับ 3.0776A

สรุป จากค่าแรงดันและกระแสของมอสเฟตและไดโอดที่หาได้ จะต้องเลือกอุปกรณ์ที่สามารถทนแรงดันและกระแสได้มากกว่า ในที่นี้ เลือกใช้มอสเฟตเบอร์ IRF640 ซึ่งมีพิทักแรงดันเดรน-ซอร์สสูงสุด 200V และกระแสเดรนเฉลี่ย 18A และเลือกไดโอดกำลังชนิดชอตต์กีเบอร์ MBR1645 ซึ่งมีพิทักแรงดันย้อนกลับสูงสุด 45V และกระแสไปหน้าเฉลี่ย 16A

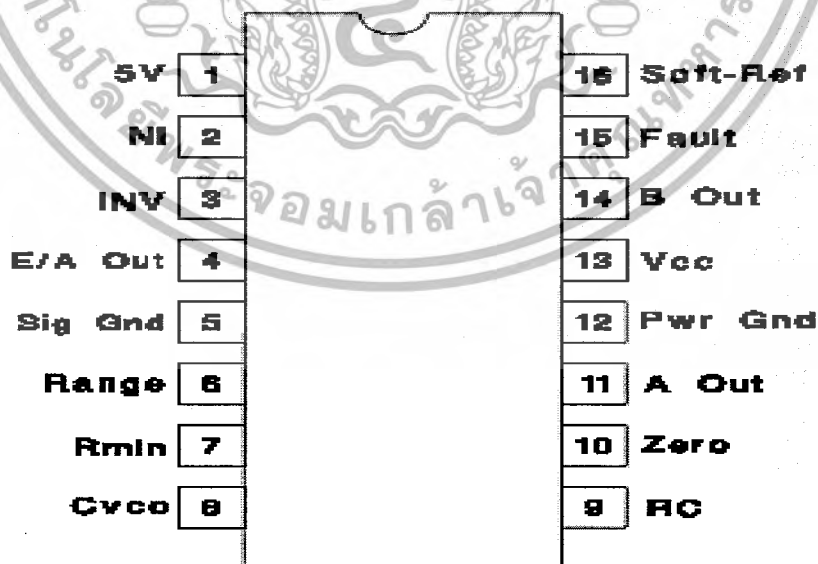
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันศูนย์ที่ได้ ออกแบบ



รูปที่ 3.5 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันศูนย์ต้นแบบ

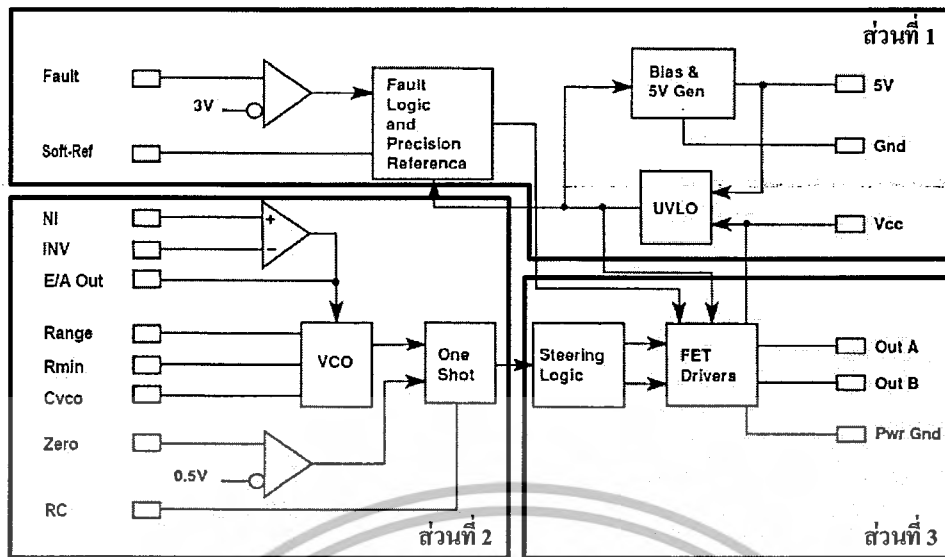
### 3.3 การออกแบบวงจรภาคควบคุม

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรควอซีเรโซแนนท์ บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันศูนย์ เลือกใช้ไอซี UC3864 [2] ซึ่งภายในประกอบไปด้วย วงจรขยายความผิดพลาด วงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่ วงจรกำหนดช่วงเวลายุคนำกระแส วงจรสร้างแรงดันอ้างอิง ฯลฯ แรงดันเอาต์พุตของวงจรจะถูกป้อนกลับมาที่ขา 2 ของไอซี ซึ่งเป็นขา non inverting input ของ EA สัญญาณขั้วมอสเฟตที่สร้างจาก UC3864 จะออกมาที่ขา 11 ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่ความถี่เปลี่ยนไปโดยมี off-time คงที่ รายละเอียดการทำงานของไอซี อธิบายอยู่ในภาคผนวก ค



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



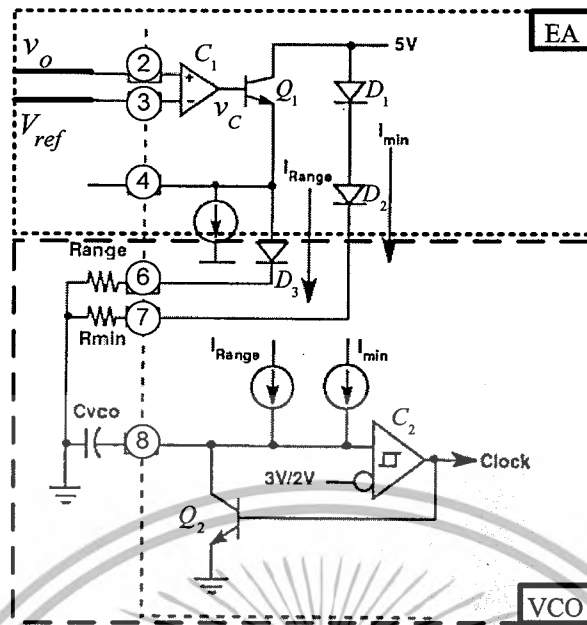
(ก)

รูปที่ 3.6 (ก) ไอซี UC3844 (ก) โครงสร้างภายในไอซี

ไอซี UC3844 และบล็อกไดอะแกรม วงจรภายในแสดงดังรูปที่ (3.6) แบ่งได้เป็น 3 ส่วน [2] คือ

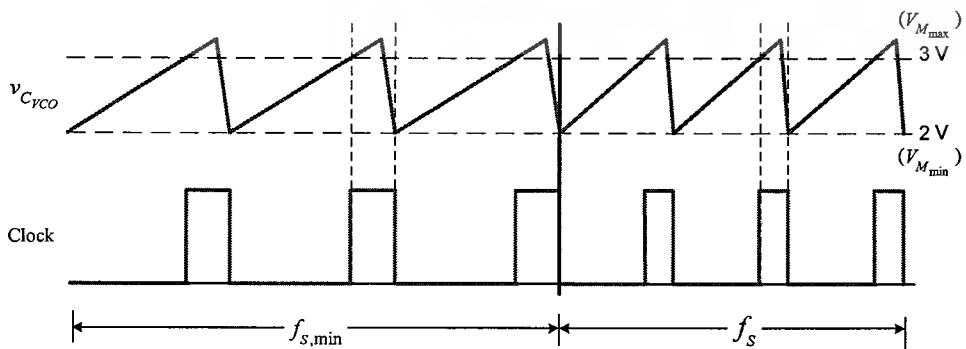
- ส่วนที่ 1 ทำหน้าที่สร้างไฟเลี้ยงให้กับวงจรภายใน สร้างแรงดันอ้างอิง ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับไอซี
- ส่วนที่ 2 เป็นวงจรควบคุมแรงดันเอาต์พุต ซึ่งประกอบด้วย วงจรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier, EA) วงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่ (Voltage Control Oscillator, VCO) และวงจรกำหนดช่วงเวลาหยุดนำกระแส (One Shot Timer, OST)
- ส่วนที่ 3 เป็นวงจรภาคเอาต์พุตสำหรับขับเกตมอสเฟต

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะถึงการทำงานของส่วนควบคุมแรงดันเอาต์พุต



**รูปที่ 3.7** โครงสร้างภายในวงจรขยายความผิดพลาด (EA) และวงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่ (VCO)

จากรูปที่ 3.7 เริ่มพิจารณาที่ขา 7 ของไอซีก่อนซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดความถี่สวิตช์ต่ำสุด ( $f_{s,min}$ ) ที่ใช้ในวงจร เมื่อมีตัวต้านทาน  $R_{min}$  มาต่อที่ขา 7 จะทำให้  $D_1$  และ  $D_2$  นำกระแสและมีแรงดัน 5V คร่อม  $R_{min}$  ทำให้เกิดกระแส  $I_{min}$  ไปชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{VCO}$  ซึ่งต่ออยู่ที่ขา 8 แรงดัน  $v_{C_{VCO}}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 3V เอาต์พุตที่ได้จากคอมพาราเตอ์ก็จะเปลี่ยนเป็นสถานะสูง (high state) ไปสั่งสวิตช์  $Q_2$  นำกระแสทำให้  $C_{VCO}$  คายประจุ ส่งผลให้  $v_{C_{VCO}}$  ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2V เอาต์พุตที่ได้จากคอมพาราเตอ์ก็จะเปลี่ยนเป็นสถานะต่ำ (low state) ทำให้  $Q_2$  หยุดนำกระแส จากนั้น  $I_{min}$  ก็จะเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{VCO}$  อีกครั้งหนึ่ง การทำงานที่กล่าวมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



**รูปที่ 3.8** การเปรียบเทียบสัญญาณ  $v_{C_{VCO}}$  กับ  $V_{Mmax}$  และ  $V_{Mmin}$  ที่ความถี่  $f_{s,min}$  และ  $f_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สัญญาณ clock ต่ำสุด ( $f_{s,\min}$ ) หาได้จาก [2]

$$f_{s,\min} = \frac{3.6}{R_{\min} C_{VCO}} \quad (3.40)$$

ในงานวิจัยนี้กำหนด  $f_{s,\min} = 100\text{kHz}$  และเลือก  $R_{\min} = 18\text{k}\Omega$  จะได้

$$C_{VCO} = \frac{3.6}{(100 \times 10^3)(18 \times 10^3)} = 2\text{nF} \quad (3.41)$$

เมื่อมีแรงดันเอาต์พุต ( $v_o$ ) ป้อนกลับมาจากขา 2(NI) ในรูปที่ 3.7 วงจรขยายความผิดพลาด ( $C_1$ ) จะขยายค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันเอาต์พุต ( $v_o$ ) กับแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) คงที่ 5V (แรงดันนี้ได้จากขา 16 (Soft-Ref)) ที่ขา 3(INV) ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันควบคุม ( $v_c$ ) แรงดัน  $v_c$  ถูกป้อนมาที่ขา base ของ  $Q_1$  ทำให้  $Q_1$  นำกระแส และแรงดัน  $v_c$  นี้จะคร่อม  $R_{range}$  ที่ขา 6 ทำให้เกิดกระแส  $I_{range}$  ไปรวมกับ  $I_{\min}$  เพื่อไปชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{VCO}$  ทำให้  $v_{C_{VCO}}$  เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นในอัตราที่เร็วขึ้นดังแสดงในด้านขวามือของรูปที่ 3.8 นั่นคือความถี่ของสัญญาณ clock ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตาม  $I_{range}$  ซึ่งแปรผันตามค่า  $V_c$  นั้นเอง โดยความถี่สูงสุด ( $f_{s,\max}$ ) จะถูกกำหนดโดย  $R_{range}$  ซึ่งหาได้จากสมการ [2]

$$f_{s,\max} = \frac{3.6}{\left( \frac{R_{\min} R_{range}}{R_{\min} + R_{range}} \right) C_{VCO}} \quad (3.42)$$

$$R_{range} = \frac{f_{\max} C_{VCO}}{1 - \frac{3.6}{f_{\max} C_{VCO} R_{VCO,\min}}} \quad (3.43)$$

แทนค่า  $R_{\min} = 18\text{k}\Omega$   $C_{VCO} = 2\text{nF}$   $f_{\min} = 100\text{kHz}$  และ  $f_{\max} = 108\text{kHz}$  จะได้  $R_{range} = 22.49\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์กลางตลอดย่านของโหลดและแรงดันอินพุตของวงจร ค่าเวลาในการหยุดนำกระแส ( $t_{off}$ ) จะต้องอยู่ในช่วง  $t_{02} < t_{off} < t_{02'}$  ที่  $f_{s,max}$   $I_{o,min}$   $V_{in,max}$  ซึ่งจากผลการซิมมูลิชั่นของวงจรที่  $f_{s,max}$   $I_{o,min}$   $V_{in,max}$  รูปที่ (2.18-2.20) พบว่าค่าเวลา  $t_{02} = 6.6 \mu s$  และ  $t_{02'} = 7.3 \mu s$  ดังนั้น  $t_{off}$  จะต้องมียู่ระหว่างสองค่านี้ ในที่นี้เลือก  $t_{off} = 7.00 \mu s$

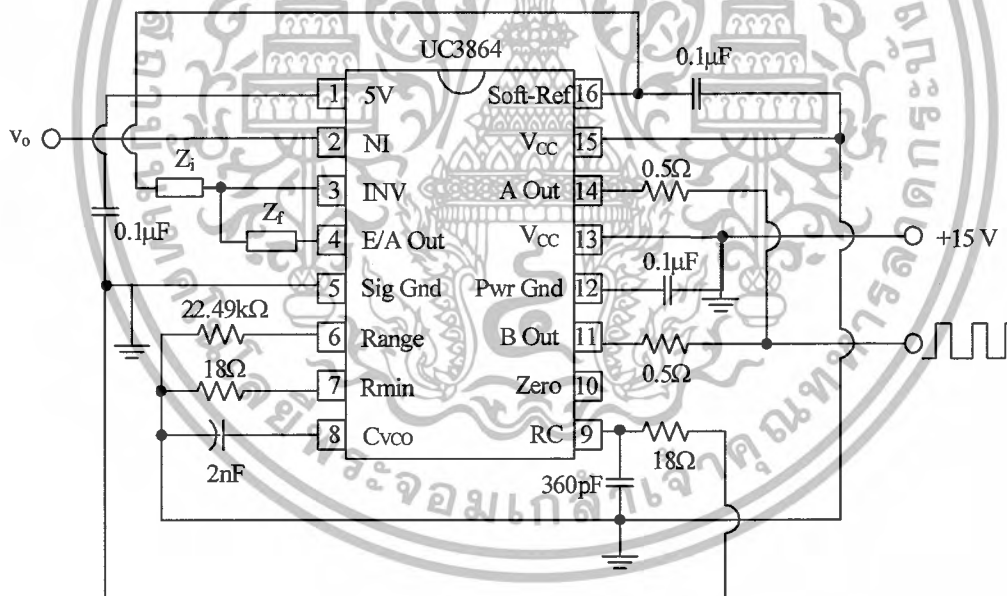
การกำหนดช่วงเวลาหยุดนำกระแส ทำได้โดยการเลือกตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาต่อที่ขา 9(RC) ของไอซี ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (3.44) [2]

$$t_{off} = R_T C_T \quad (3.44)$$

กำหนดให้  $C_T = 360 \text{ pF}$  จะได้

$$R_T = \frac{7 \times 10^{-6}}{360 \times 10^{-12}} = 18 \text{ k}\Omega \quad (3.45)$$

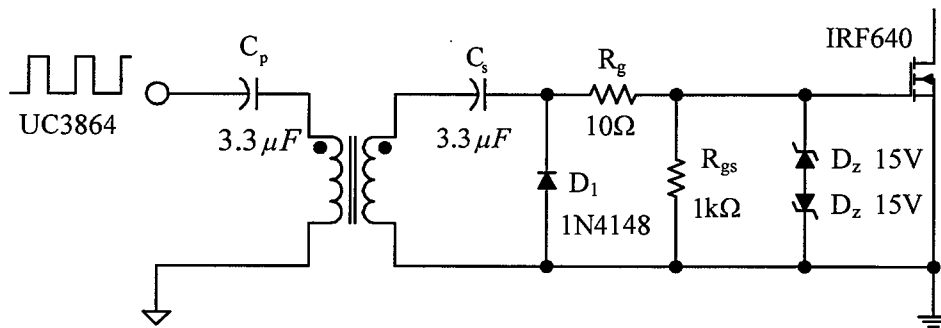
การต่อขาต่าง ๆ ของ UC3864 แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 รายละเอียดการเลือกอุปกรณ์ที่นำมาต่อให้กับขาอื่นๆของไอซี นอกเหนือจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ ดูได้จาก application Note ของไอซี UC3864 [2]



รูปที่ 3.9 การต่อขาต่าง ๆ ของ UC3864

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์



**รูปที่ 3.10** วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้สำหรับวงจรควอเตอร์โซเลนอยด์ที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันสูง

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับวงจรควอเตอร์โซเลนอยด์ที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันสูงจำเป็นต้องสร้างวงจรขับเคลื่อนที่มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง โดยวงจรขับเคลื่อนที่เลือกใช้เป็นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 [1] การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าง่ายๆสามารถใช้แกนขนาดเล็กได้เนื่องจากส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจำนวนน้อย จึงเลือกแกนเฟอร์ไรต์แบบ EI-19 ( $A_c = 23.3 \text{ mm}^2$   $A_w = 51.7 \text{ mm}^2$   $A_p = 1204.61 \text{ mm}^4$ ) จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ (3.46)

$$N_p = \frac{V_{pri, pk} D_{max}}{A_c B_{max} f_s} \quad (3.46)$$

โดยที่

$N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

$V_{pri, pk}$  คือ แรงดันสูงสุดทางด้านปฐมภูมิ

เมื่อ  $V_{pri, pk} = 15\text{V}$   $D_{max} = 0.25$  และ  $B_{max} = 0.2 \text{ T}$  จะได้  $N_p = 9$  รอบ และเลือกจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $N_s$ ) ให้เท่ากับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ คือ  $N_s = N_p = 9$  รอบ โดยลวดทองแดงที่ใช้พัน คือ ลวดทองแดงเบอร์ AWG28

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ  $C_p$  ป้องกันกระแสดีซีไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากสัญญาณขับเคลื่อนจาก UC3864 เป็นสัญญาณพัลส์บวกที่มีระดับอ้างอิงเป็นศูนย์ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$  ต้องเลือกค่าที่ทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (series resonance) เนื่องจากตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$  และตัวเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า  $L_p$  น้อยกว่าความถี่ในการสวิตช์อย่างมาก เมื่อเลือกความถี่เรโซแนนซ์เป็น 0.1 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความถี่ในการสวิตช์ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$  คำนวณได้จากสมการที่ (3.47) [1]

$$C_p = \frac{100}{4\pi^2 f_s^2 L_p} \quad (3.47)$$

โดยที่

- $C_p$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$   
 $L_p$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำทางด้าน primary ของหม้อแปลง

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ  $C_s$  ไดโอดเรียงกระแส  $D_1$  ตัวต้านทาน  $R_g$  และ  $R_{gs}$  ต่อกันเป็นวงจรคลอมป์ (clamping circuit) ชนิดที่แรงดันคร่อมไดโอด  $D_1$  เป็นสัญญาณพัลส์บวกที่มีระดับอ้างอิงเป็นศูนย์ ค่าคงตัวของวงจรคลอมป์ต้องมากกว่าคาบเวลาในการสวิตช์อย่างมาก เพื่อรักษาให้ขนาดของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_s$  คงที่ เมื่อเลือกค่าคงตัวของวงจรคลอมป์มากกว่า 10 เท่าของคาบเวลาในการสวิตช์ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_s$  คำนวณได้จากสมการที่ (3.48) [1]

$$C_s \geq \frac{10T_s}{R_g + R_{gs}} \quad (3.48)$$

โดยที่

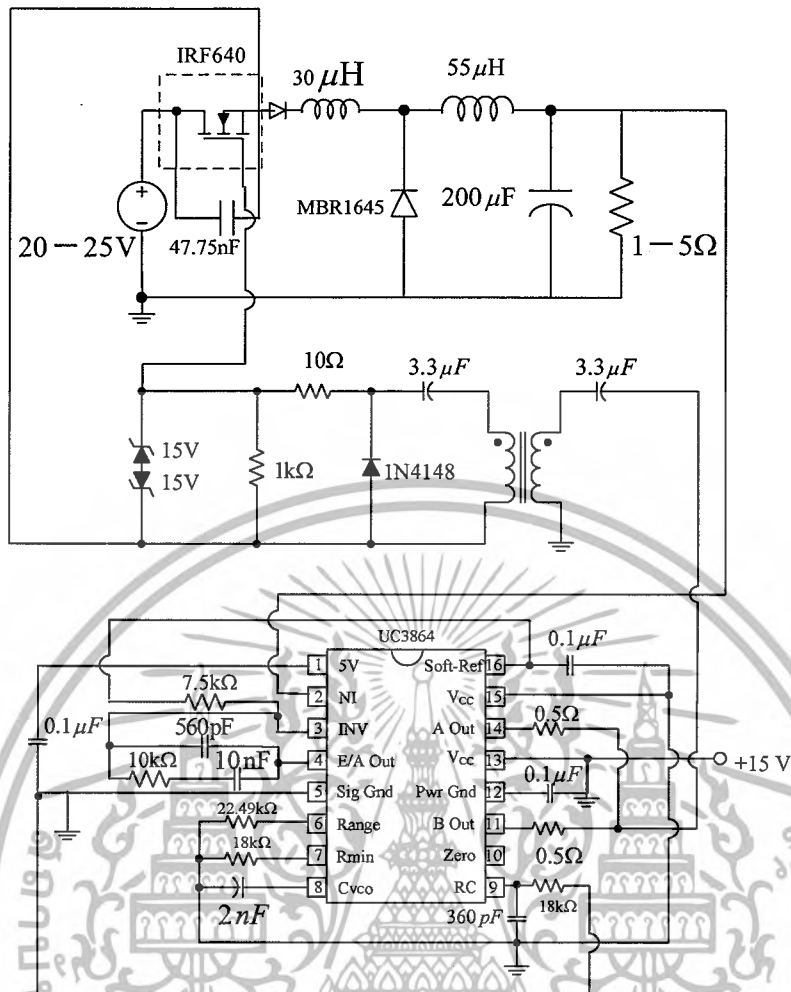
- $C_s$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_s$   
 $R_g$  คือ ความต้านทานของตัวต้านทาน  $R_g$   
 $R_{gs}$  คือ ความต้านทานของตัวต้านทาน  $R_{gs}$

ตัวต้านทาน  $R_g$  ต่อกันเพื่อป้องกันการออสซิลเลชันของพาราซิติค (parasitic oscillation) ที่ความถี่สูง การออสซิลเลชันสามารถเกิดขึ้นได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้าเกต-ซอร์สภายในมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำปรสิติกที่เกิดจากความยาวของสายนำสัญญาณในวงจรจับเกต นอกจากนี้  $R_g$  ยังใช้กำหนดช่วงเวลาดำเนิน (rise time) ของแรงดันเกต-ซอร์ส เลือก  $R_g = 10 \Omega$  เพื่อให้ช่วงเวลาดำเนินของแรงดันเกต-ซอร์สสั้นทำให้มอสเฟตกำลังทำการสวิตช์ด้วยความเร็วสูง ตัวต้านทาน  $R_{gs}$  ต่อกันเพื่อเป็นเส้นทางนำประจุไฟฟ้าออกจากเกตขณะมอสเฟตกำลังหยุดนำกระแส ซิเนอร์ไดโอด  $D_2$  ต่อกันแบบอานโตร่วมเพื่อจำกัดขนาดของแรงดันสไปก์ (spike) ที่คร่อมเกต-ซอร์สไม่ให้เกินพิกัดแรงดันเกต-ซอร์สของมอสเฟตกำลัง

วงจรควอเตอร์ โชนแนนท์ บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ที่ออกแบบแสดงในรูปแบบที่

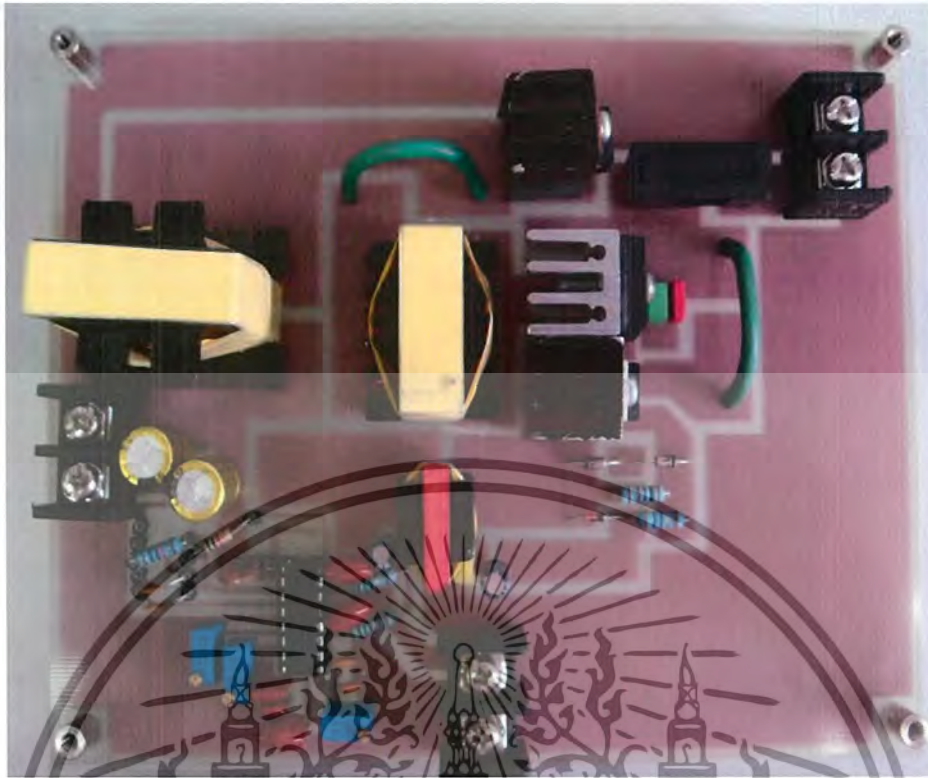
### 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.11** วงจรควอซีเรโซแนนซ์ที่ขับเคลื่อนด้วยสวิตช์ที่แรงดันศูนย์แบบพร้อมวงจรป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันศูนย์ต้นแบบ

### 3.4 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการออกแบบวงจรต้นแบบควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ที่แรงดันศูนย์ ในการออกแบบวงจรต้นแบบ จะแบ่งเป็นสามส่วนคือ การออกแบบวงจรภาคกำลัง การออกแบบสร้างวงจรควบคุม และการออกแบบสร้างวงจรขับเคลื่อนมอสเฟตกำลัง

ภาคกำลังได้นำเอาสมการที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรในบทที่สองมาใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ และคำนวณพิกัดแรงดันและกระแสของไดโอดและมอสเฟต

ภาคควบคุมเลือกใช้ไอซี UC3864 มาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรเพื่อเลือกตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาต่อที่ขา 9 ของ IC

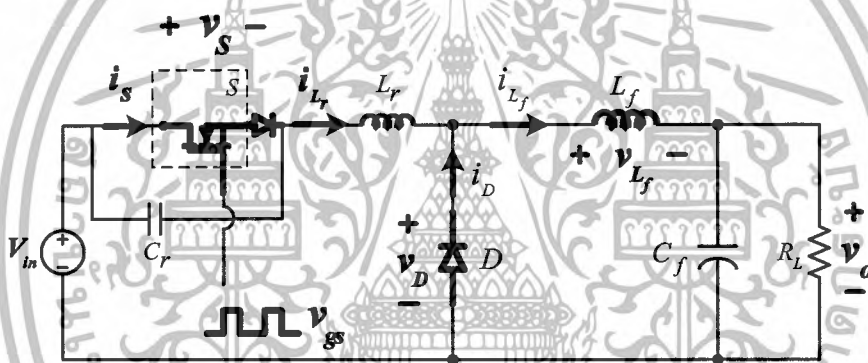
การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอสเฟตเลือกใช้เป็นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง และได้นำสมการการออกแบบหม้อแปลงมาออกแบบ รวมถึงวิเคราะห์ค่าของตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับวงจรนี้อีกด้วย

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ต้นแบบ ถูกนำมาทดสอบเพื่อคุณลักษณะของรูปคลื่นกระแสและแรงดันในวงจร ได้แก่ แรงดันคร่อมมอสเฟต ( $v_S$ ) กระแสไหลผ่านมอสเฟต ( $i_S$ ) กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ( $i_{L_r}$ ) แรงดันคร่อมไดโอด ( $v_D$ ) กระแสไหลผ่านไดโอด ( $i_D$ ) กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_{L_f}$ ) รีปเปิลของแรงดันเอาต์พุต ( $\Delta v_o$ ) และแรงดันซับเจกต์มอสเฟต ( $v_{gs}$ ) ดังรูปที่ 4.1



**รูปที่ 4.1** วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ แสดงกระแสและแรงดันที่ต้องการวัด

นอกจากนี้ยังทดสอบความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และประสิทธิภาพของวงจร โดยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ ได้แก่

1. Digital Oscilloscope ของ Yokogawa รุ่น DL1520 จำนวน 1 เครื่อง
2. DC Power Supply ของ Kikusui รุ่น PAD35-10L จำนวน 1 เครื่อง
3. DC Power Supply ของ Analab รุ่น APS-1 จำนวน 1 เครื่อง
4. Digital Oscilloscope ของ Tektronix รุ่น TDS754D จำนวน 1 เครื่อง

## 4.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.2
2. จ่ายแรงดัน 15 V จาก DC Power Supply รุ่น APS-1 ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 20 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตและความถี่สวิตช์ที่กระแสโหลด 1A ถึง 5A
5. จ่ายแรงดัน 25 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลังแล้ว

ทำการทดลองตามข้อที่ 4.



รูปที่ 4.2 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่กระแสโหลดและแรงดันอินพุตค่าต่างๆ

$V_{in}$ (V)	$V_o$ (V)				
	$I_o = 1A$	$I_o = 2A$	$I_o = 3A$	$I_o = 4A$	$I_o = 5A$
20	5.000	4.998	4.989	4.981	4.920
25	5.005	4.995	4.983	4.972	4.960

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** ผลการวัดค่าความถี่สวิตช์ของวงจรที่กระแสไหลคและแรงดันอินพุตค่าต่างๆ

$V_{in}$ (V)	$f_s$ (kHz)				
	$I_o = 1A$	$I_o = 2A$	$I_o = 3A$	$I_o = 4A$	$I_o = 5A$
20	95	92	89	82	80
25	104	101	98	95	88

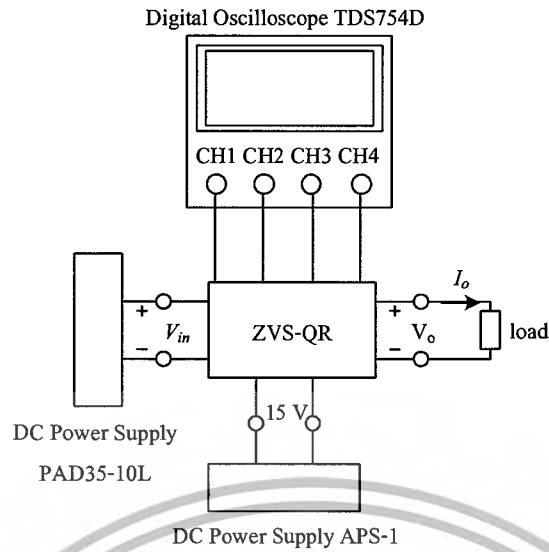
จากผลการวัดแรงดันเอาต์พุตและความถี่สวิตช์ของวงจรต้นแบบที่แรงดันอินพุตและกระแสไหลคค่าต่างๆ ในตารางที่ จะเห็นว่าวงจรต้นแบบสามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตได้คงที่ที่ประมาณ 5V ตลอดย่านการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ และมีย่านความถี่ในการสวิตช์จาก 80kHz ถึง 104kHz ซึ่งใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้คือ  $f_{min} = 100kHz$  และ  $f_{max} = 108kHz$  โดยความถี่สวิตช์ต่ำสุดเกิดขึ้นที่  $V_{in,min} = 20V$   $I_{o,max} = 5A$  และความถี่สวิตช์สูงสุดเกิดขึ้นที่  $V_{in,max} = 25V$   $I_{o,min} = 1A$

#### 4.3 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันในวงจร

วิธีการทดลอง

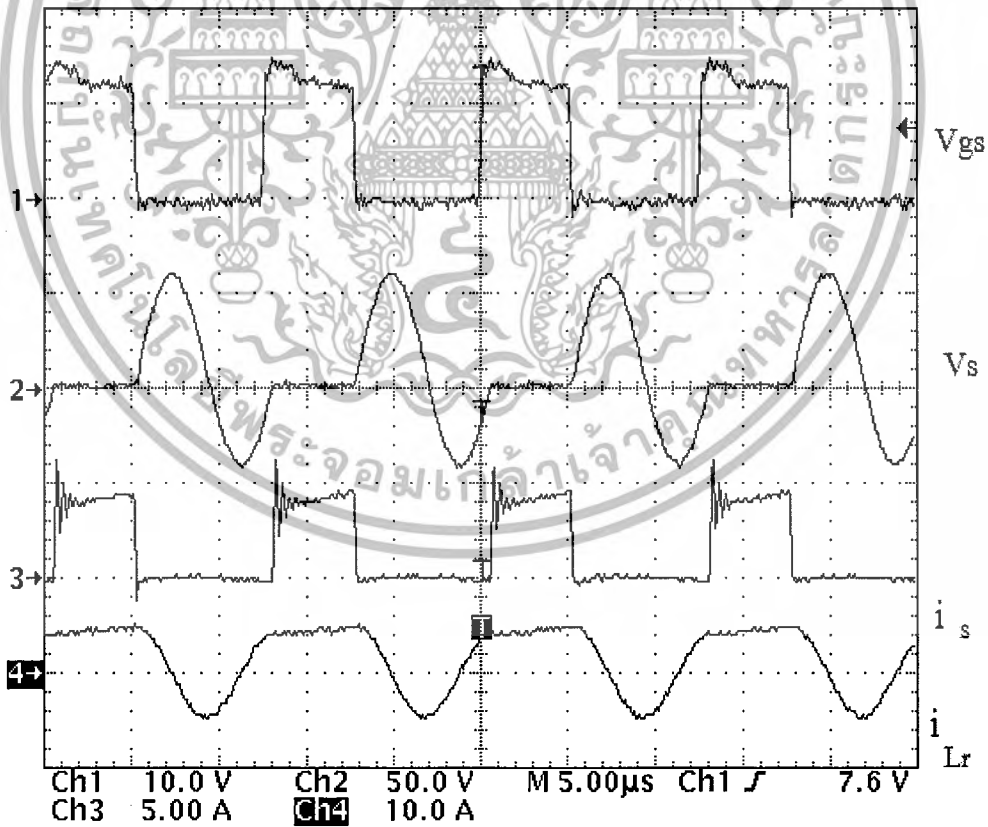
1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.3
2. จ่ายแรงดัน 15 V จาก DC Power Supply รุ่น APS-1 ให้กับวงจรควบคุม
3. บันทึกรูปคลื่น  $v_s$   $i_s$   $i_{Lr}$   $v_D$   $i_D$   $i_{L_f}$   $\Delta v_o$  และ  $v_{gs}$  ที่สภาวะขอบของระบบคือ ที่

$V_{in,min} = 20V$   $I_{o,max} = 5A$  และ  $V_{in,max} = 25V$   $I_{o,min} = 1A$



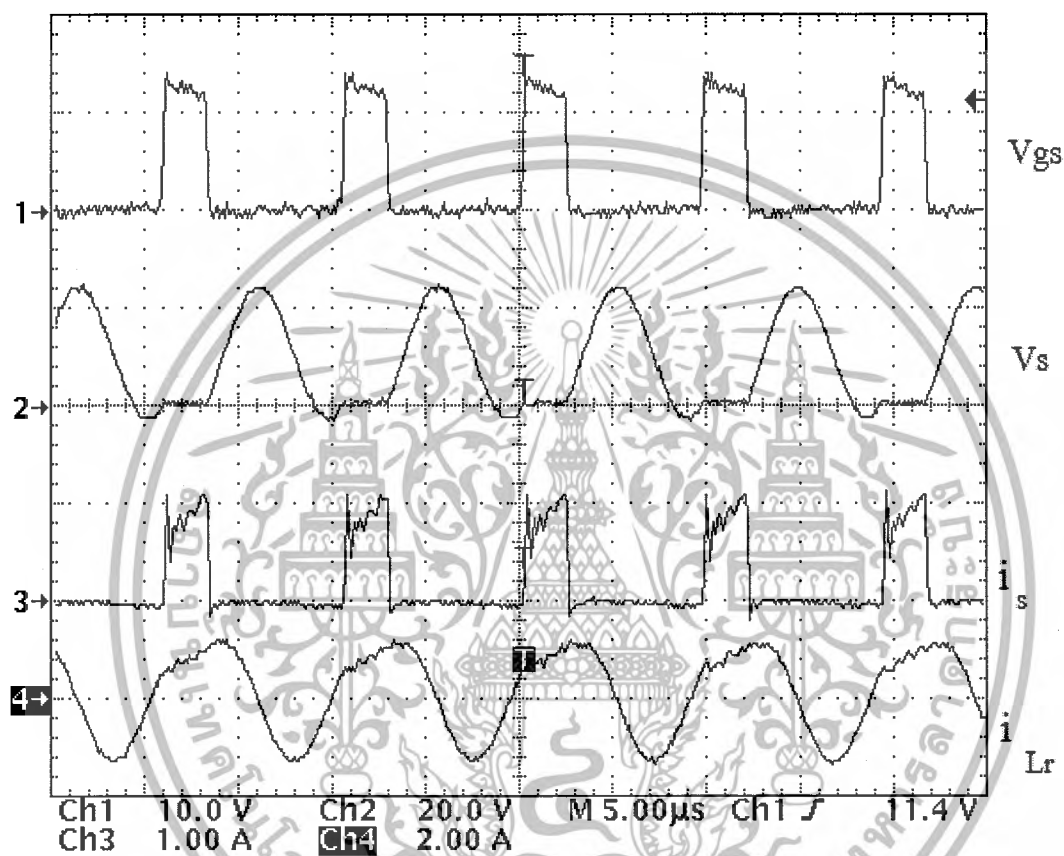
รูปที่ 4.3 การจับจุดทดลองสำหรับการวัดรูปคลื่น

ผลการทดลอง



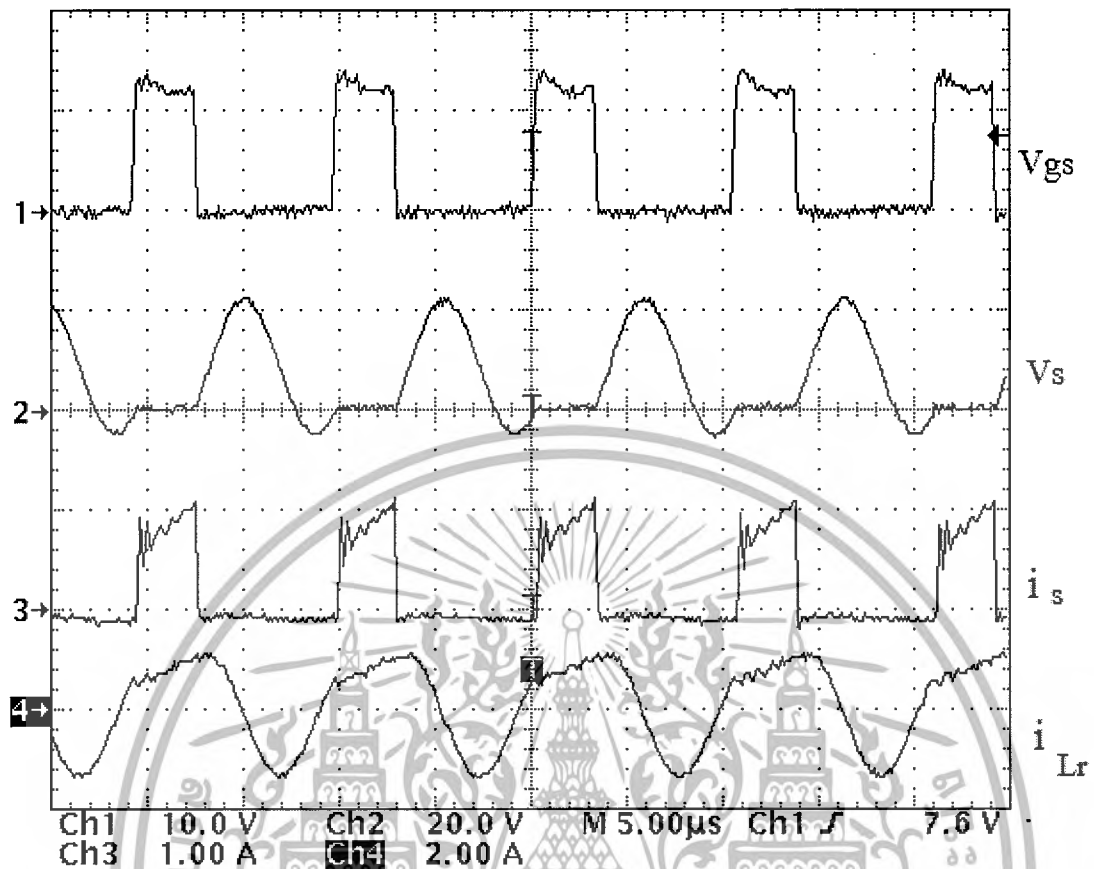
รูปที่ 4.4 คลื่นของ  $v_{gs}$ ,  $v_s$ ,  $i_s$  และ  $i_{Lr}$  ที่  $V_{in,min} = 20V$ ,  $I_{o,max} = 5A$ ,  $f_{min} = 80kHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



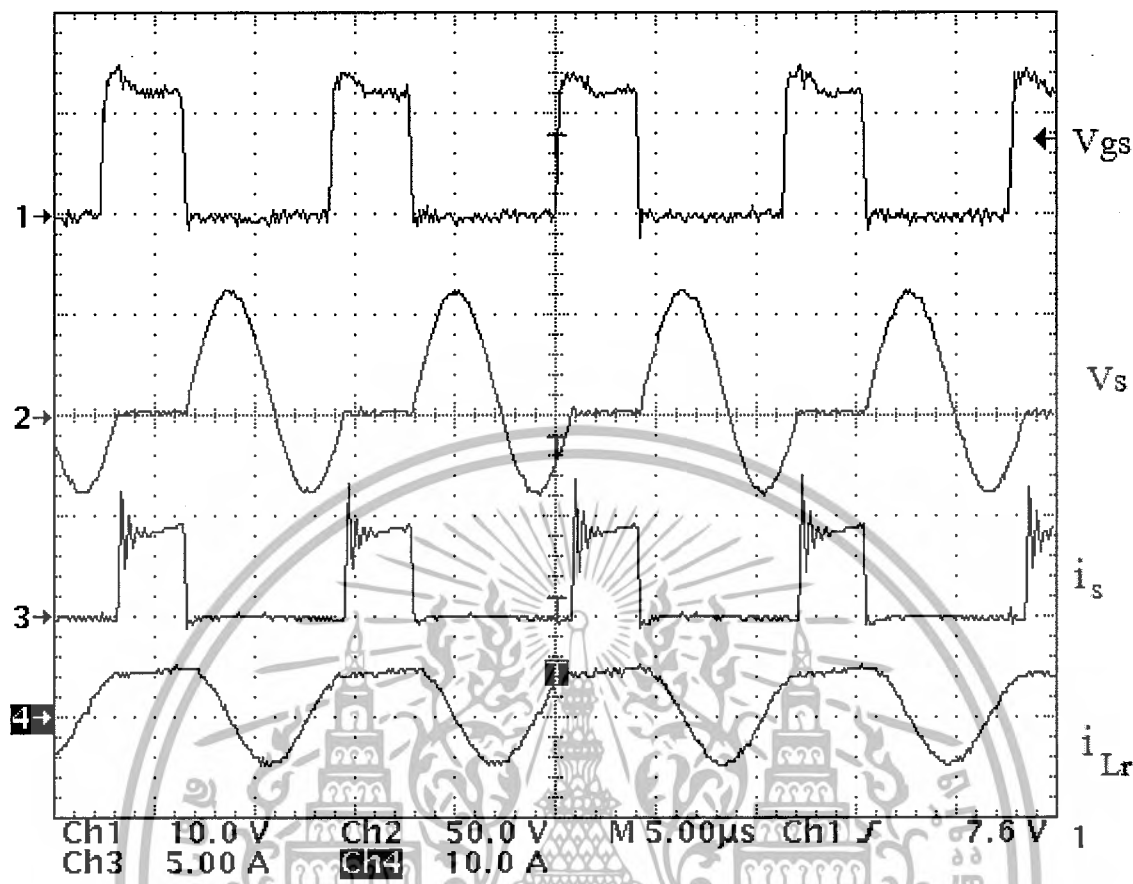
รูปที่ 4.5 คลื่นของ  $v_{gs}$ ,  $v_s$ ,  $i_s$  และ  $i_{Lr}$  ที่  $V_{in,max} = 25V$ ,  $I_{o,min} = 1A$ ,  $f_{max} = 104kHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 คลื่นของ  $v_{gs}$ ,  $v_s$ ,  $i_s$  และ  $i_{Lr}$  ที่  $V_{in,min} = 20V$ ,  $I_{o,max} = 3A$ ,  $f_{max} = 95kHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 คลื่นของ  $v_{gs}$ ,  $v_s$ ,  $i_s$  และ  $i_{Lr}$  ที่  $V_{in,max} = 25V$ ,  $I_{o,min} = 1A$ ,  $f_{min} = 88kHz$

ผลการวัดรูปคลื่น  $v_{gs}$ ,  $v_s$ ,  $i_s$  และ  $i_{Lr}$  กรณีที่  $V_{in,min} = 20V$ ,  $I_{o,max} = 5A$  และกรณี  $V_{in,max} = 25V$ ,  $I_{o,min} = 1A$  ในรูปที่ 4.4 - 4.7 พบว่ากระแส  $i_s$  มีช่วงที่มีค่าเป็นลบซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการนำกระแสของไดโอดแฝงภายในมอสเฟต จากผลการทดลองจะเห็นว่า กรณี  $V_{in,min} = 20V$ ,  $I_{o,max} = 5A$  (รูปที่ 4.4, 4.6) แรงดัน  $v_s$  มีค่าเป็นศูนย์ ทั้งขณะมอสเฟตเริ่มนำกระแสและขณะมอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส นั่นคือไม่เกิดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์นี้จะเกิดขึ้นตลอดย่านแรงดันอินพุตและกระแสโหลด มีเพียงกรณีที่  $V_{in,max} = 25V$ ,  $I_{o,min} = 1A$  (รูปที่ 4.5, 4.7) เท่านั้นที่ แรงดัน  $v_s$  อาจจะมีช่วงไม่เป็นศูนย์ขณะมอสเฟตเริ่มนำกระแส ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดขึ้นเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรต้นแบบและค่าพาราซิติค (parasitic) แฝงต่างๆในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ห่ออกแบบและทดสอบวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ สามารถได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

#### 5.1 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.1.1 จากความไม่เป็นอุดมคติ ของอุปกรณ์ในวงจร อาทิ เช่น พารามิเตอร์ค่า R ที่แฝงอยู่ใน L หรือ C ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ส่งผลทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้

5.1.2 วงจรไม่สามารถทำงานได้ตามต้องการ เนื่องจากไม่ได้ออกแบบ คอนเวอร์เตอร์ เพื่อค่ากำลังสูญเสียไว้ ซึ่งในการออกแบบวงจรนั้น เราจะต้องกำหนดประสิทธิภาพของวงจร การออกแบบ และการเลือกใช้อุปกรณ์ จำเป็นต้องกำหนดค่าการสูญเสียในแต่ละตัวอุปกรณ์มีค่ากำลังสูญเสียไม่เกินกำหนด เช่นการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และการเลือกใช้สวิตช์ เป็นต้น

5.1.3 ปัญหาจากสัญญาณรบกวนต่างๆ ซึ่งทำให้วงจรทำงานเพี้ยนไป

5.1.4 การออกแบบลายวงจร(PCB) การวางตำแหน่งตัวอุปกรณ์ มีผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ตำแหน่งจุดวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เส้นลายวงจรที่เชื่อมต่อกับจุดวัด ต้องมีขนาดใหญ่และสั้นที่สุด เพราะจะช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นได้

#### 5.2 แนวทางการพัฒนา

วงจรเรโซแนนท์ คอนเวอร์เตอร์ที่ได้นั้นประสิทธิภาพของวงจรต้องสูง จะขึ้นอยู่กับการใช้เทคนิคของการเรโซแนนท์ ซึ่งมีส่วนประกอบคือ ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งผลของค่าความต้านทานแฝงที่อยู่ในตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงและความจุแฝงที่อยู่ในวงจรจะมีผลต่อการทำงานของวงจรเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ วิธีการพันลวดเส้นขนานในอุปกรณ์แม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของค่า ความต้านทานที่แฝงอยู่ได้ และการลดลงของการสูญเสียที่อุปกรณ์แม่เหล็ก

#### 5.3 บทสรุป

ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์และการออกแบบวงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ โดยแสดงการวิเคราะห์การทำงานของวงจรสมการออกแบบ ขั้นตอนในการออกแบบ ผลการจำลองแบบสามารถยืนยันได้ว่าวงจรที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบไว้สามารถทำงานได้จริงตามทฤษฎี และผลการทดลองยังยืนยันได้ว่า วงจรทำงานแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ที่กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์กลางตลอดช่วงการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] L. Umanand, S. R. Bhat, **“Design of Magnetic Components for Switched Mode Power Converters”**, Wiley Eastern Limited, 1992.
- [2] L. Wofford, **“A New Family of Integrated Circuits Controls Resonant Mode Power Converters”**, Application Note (U-122), Unitrode Integrated Circuits Corporation.
- [3] กันติชา กิตติพิรัชล. **“การออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์”**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [4] ศิระ เอกสุวรรณ. **“การวิเคราะห์และออกแบบวงจรเรโซแนนท์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่แรงดันศูนย์”**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [5] D. W. Hart, **“Introduction to Power Electronics”**, Prentice-Hall International, 1997.
- [6] R. W. Erickson, D. Maksimovic, **“Fundamental of Power Electronics”**, 2nd edition, Kluwer Academic, 2001.



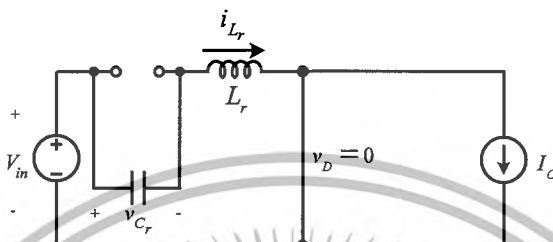
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การหาสมการของแรงดันคร่อม $C_r$ และกระแสไหลผ่าน $L_r$

จากวงจรสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 2.8 รายละเอียดการหาสมการของแรงดันที่คร่อม  $C_r$  และกระแสไหลผ่าน  $L_r$  แสดงได้ดังนี้



รูปที่ ก.1 วงจรสมมูลย์แสดงการทำงานในช่วงเวลา  $t_1 < t < t_2$

$$-V_{in} + v_{L_r} + v_{C_r} = 0 \quad (ก.1)$$

$$L_r \frac{d^2 i_{L_r}}{dt^2} + v_{C_r} = V_{in} \quad (ก.2)$$

$$L_r \frac{d^2 i_{L_r}}{dt^2} + \frac{dv_{C_r}}{dt} = 0 \quad (ก.3)$$

เมื่อ  $\frac{dv_{C_r}}{dt} = \frac{i_{C_r}}{C_r} = \frac{i_{L_r}}{C_r}$  จะได้

$$L_r \frac{d^2 i_{L_r}}{dt^2} + \frac{i_{L_r}}{C_r} = 0 \quad (ก.4)$$

$$\frac{d^2 i_{L_r}}{dt^2} + \frac{i_{L_r}}{L_r C_r} = 0 \quad (ก.5)$$

ทำลาปลาซ (Laplace) สมการที่ (ก.5) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s^2 I_{L_r}(s) - s i_{L_r}(0) - i'_{L_r}(0) + \frac{I_{L_r}(s)}{L_r C_r} = 0 \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ  $i_{L_r}(0) = I_o$  และ  $i'_{L_r}(0) = 0$  จะได้

$$I_{L_r}(s) \left( s^2 + \frac{1}{L_r C_r} \right) - s I_o = 0 \quad (\text{ก.7})$$

$$I_{L_r}(s) = I_o \frac{s}{s^2 + \frac{1}{L_r C_r}} \quad (\text{ก.8})$$

ทำอินเวอร์ซลาปลาซ (Inverse Laplace) สมการที่ (ก.8) จะได้สมการของกระแสไหลผ่าน  $L_r$

$$i_{L_r} = I_o \cos \omega_0 t \quad (\text{ก.9})$$

เนื่องจาก  $i_{C_r} = i_{L_r}$  จะได้  $i_{C_r} = I_o \cos \omega_0 t$

จาก

$$v_{C_r} = \frac{1}{C_r} \int i_{C_r} dt \quad (\text{ก.10})$$

จะได้

$$v_{C_r} = v_{C_r}(t_1) + \frac{1}{C_r} \int_{t_1}^t i_{C_r} dt \quad (\text{ก.11})$$

$$v_{C_r} = V_{in} + \frac{1}{C_r} \int_{t_1}^t I_o \cos \omega_0 t dt \quad (\text{ก.12})$$

$$v_{C_r} = V_{in} + \frac{I_o}{\omega_0 C_r} \sin \omega_0 t \quad (\text{ก.13})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\omega_0 C_r = \sqrt{((1/\sqrt{L_r C_r})(C_r))^2} = \sqrt{(C_r^2/L_r C_r)} = \sqrt{(C_r/L_r)} = 1/Z_0$  จะได้สมการของแรงดันที่คร่อม  $C_r$

$$v_{C_r} = V_{in} + I_0 Z_0 \sin \omega_0 t \quad (\text{ก.14})$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ ตัวเหนี่ยวนำจะต้องไม่อิ่มตัว แม้ในขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าสูงสุด โดยวิธีการออกแบบที่ใช้คือ วิธีการกำหนดขนาดของแกน ด้วยค่าผลคูณพื้นที่ (area product,  $A_p$ ) ระหว่างพื้นที่ที่ตัดขวางของแกน (core cross section area,  $A_c$ ) กับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด (window area,  $A_w$ ) ซึ่งค่าผลคูณพื้นที่ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (ข.1) [1]

$$A_p = A_c A_w = \frac{2E}{k_w k_c J B_{\max}} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่

$A_p$	คือ ค่าผลคูณพื้นที่ระหว่างพื้นที่ที่ตัดขวางของแกนกับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$A_c$	คือ พื้นที่ที่ตัดขวางของแกน
$A_w$	คือ พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$E$	คือ พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ
$k_w$	คือ ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$k_c$	คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดกับกระแสอาร์เอ็มเอสของตัวเหนี่ยวนำ (crest factor)
$J$	คือ ความหนาแน่นกระแสในเส้นลวดทองแดง
$B_{\max}$	คือ ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด

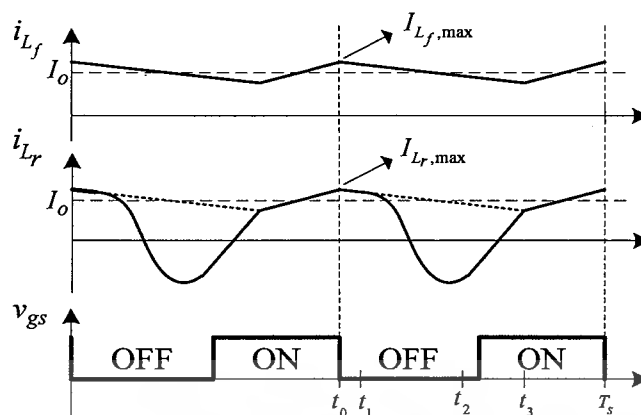
พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำคำนวณได้จากสมการที่ (ข.2) [1]

$$E = \frac{1}{2} L I_{L,\max}^2 \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่

$I_{L,\max}$  คือกระแสสูงสุดไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 รูปคลื่น  $i_{L_f}$ ,  $i_{L_r}$  และ  $v_{gs}$

จากรูปที่ ข.1 พิจารณากระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_{L_f}$ ) และกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เรโซแนนท์ ( $i_{L_r}$ ) ในทางปฏิบัติ ซึ่งคำนึงถึงผลของระลอกคลื่น (ripple) จะเห็นได้ว่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองมีค่าเท่ากัน หาได้จากสมการที่ (ข.3) ซึ่งเป็นสมการกระแสสูงสุดไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์นั่นเอง

$$I_{L_f, \max} = \bar{i}_{L_f} + \frac{\Delta I_{L_f}}{2} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่

$I_{L_f, \max}$  คือ กระแสสูงสุดของตัวเหนี่ยวนำบัคคอนเวอร์เตอร์

$\bar{i}_{L_f}$  คือ กระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำบัคคอนเวอร์เตอร์

$\Delta I_{L_f}$  คือ ริปเปิลของกระแสตัวเหนี่ยวนำบัคคอนเวอร์เตอร์

พิจารณาที่กระแสเอาต์พุตของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มีค่าสูงสุด  $\bar{i}_{L_f} = I_o = 5\text{A}$  และกำหนดให้  $\Delta I_{L_f} = 10\% \bar{i}_{L_f}$  จะได้  $I_{L_f, \max} = 5.25\text{A}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสไหลที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์สูงสุด  $I_{L_r, \max} = I_{L_f, \max} = 5.25\text{A}$  จะได้  $E = 4.13 \times 10^4 \text{ J}$  นำไปแทนในสมการที่ (ข.1) โดยกำหนดให้  $k_w = 0.6$ ,  $k_c = 1$ ,  $J = 3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  และ  $B_{\max} = 0.2\text{T}$  ทำให้ได้  $A_p = 2296\text{mm}^4$  จึงเลือกแกนเฟอร์ไรต์แบบ EER25 ( $A_c = 55\text{mm}^2$ ,  $A_w = 87\text{mm}^2$ ,  $A_p = 4875\text{mm}^4$ ) ซึ่งมีค่าผลคูณพื้นที่  $A_p$  มากกว่าค่าที่คำนวณได้

จำนวนรอบของลวดทองแดงที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำคำนวณได้จากสมการที่ (ข.4) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{L_r I_{L_r, \max}}{A_c B_{\max}} \quad (ข.4)$$

โดยที่

$N$  คือ จำนวนรอบของลวดทองแดงที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำ

จะได้  $N = 4$  รอบ ระยะของช่องอากาศ (air gap) ที่ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ คำนวณได้จากสมการที่ (ข.5) [1]

$$l_g = \frac{4\pi \times 10^{-7} N^2 A_c}{L_r} \quad (ข.5)$$

โดยที่

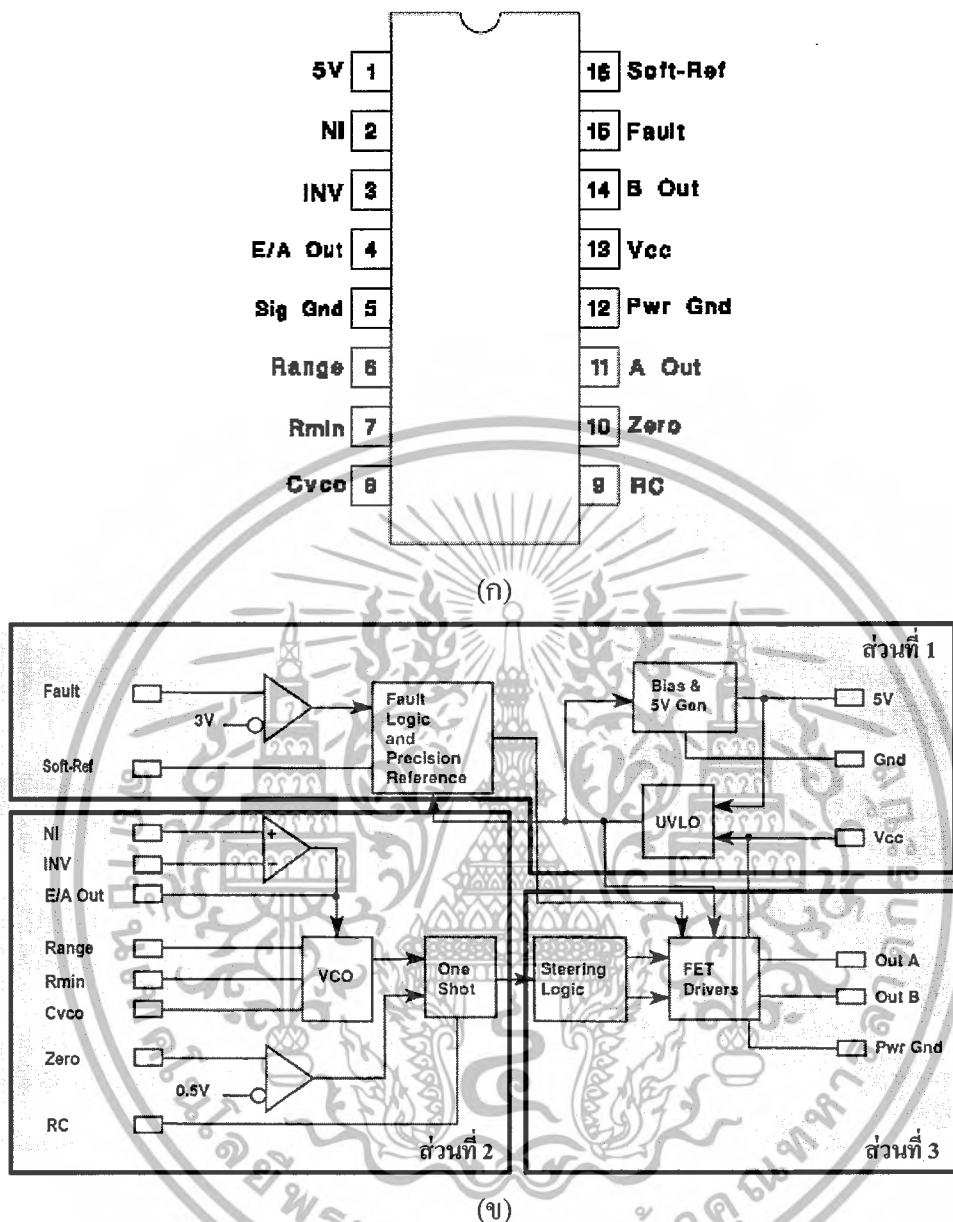
$l_g$

คือ ความยาวของช่องอากาศ

$l_g = 0.518$  mm สำหรับตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 (ก) ไอซี UC3864 (ข) โครงสร้างภายในไอซี

ไอซี UC3864 และบล็อกไดอะแกรม วงจรภายในแสดงดังรูปที่ (ค.1) แบ่งได้เป็น 3 ส่วน [2] คือ

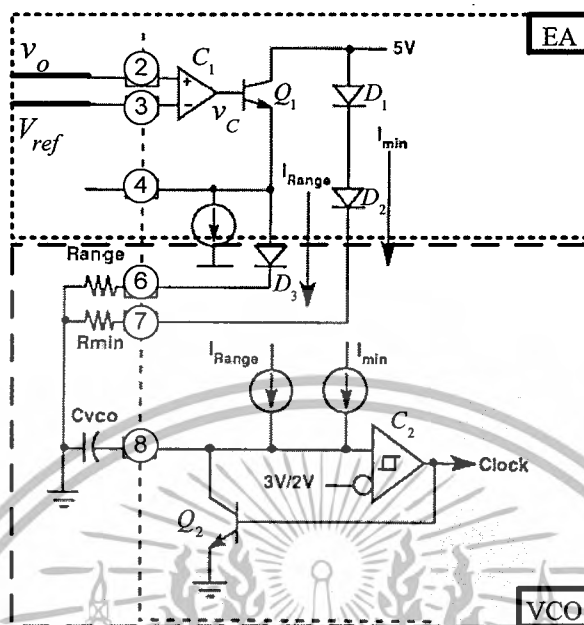
- ส่วนที่ 1 ทำหน้าที่สร้างไฟเลี้ยงให้กับวงจรภายใน สร้างแรงดันอ้างอิง ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับไอซี

- ส่วนที่ 2 เป็นวงจรควบคุมแรงดันเอาต์พุต ซึ่งประกอบด้วย วงจรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier, EA) วงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่ (Voltage Control Oscillator, VCO) และวงจรกำหนดช่วงเวลาหยุดนำกระแส (One Shot Timer, OST)

- ส่วนที่ 3 เป็นวงจรภาคเอาต์พุตสำหรับขับเกตมอสเฟต

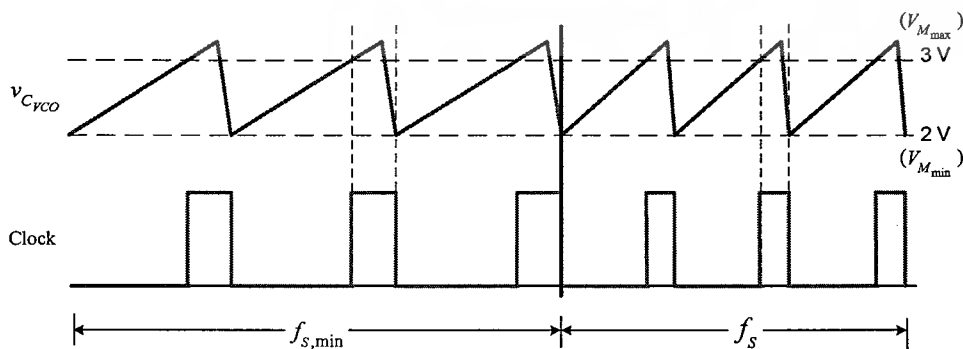
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะถึงการทำงานของส่วนควบคุมแรงดันเอาต์พุต



**รูปที่ ค.2** โครงสร้างภายในวงจรขยายความผิดพลาด (EA) และวงจรเปลี่ยนแรงดันควบคุมเป็นความถี่ (VCO)

จากรูปที่ ค.2 เริ่มพิจารณาที่ขา 7 ของไอซีก่อนซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดความถี่สวิตช์ต่ำสุด ( $f_{s,min}$ ) ที่ใช้ในวงจร เมื่อมีตัวต้านทาน  $R_{min}$  มาต่อที่ขา 7 จะทำให้  $D_1$  และ  $D_2$  นำกระแส และมีแรงดัน 5V คร่อม  $R_{min}$  ทำให้เกิดกระแส  $I_{min}$  ไปชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{vco}$  ซึ่งต่ออยู่ที่ขา 8 แรงดัน  $v_{C_{vco}}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 3V เอาต์พุตที่ได้จากคอมพาราเตอ์ก็จะเปลี่ยนเป็นสถานะสูง (high state) ไปสั่งสวิตช์  $Q_2$  นำกระแส ทำให้  $C_{vco}$  คายประจุ ส่งผลให้  $v_{C_{vco}}$  ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2V เอาต์พุตที่ได้จากคอมพาราเตอ์ก็จะเปลี่ยนเป็นสถานะต่ำ (low state) ทำให้  $Q_2$  หยุดนำกระแส จากนั้น  $I_{min}$  ก็จะเริ่มชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{vco}$  อีกครั้งหนึ่ง การทำงานที่กล่าวมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค.3



**รูปที่ ค.3** การเปรียบเทียบสัญญาณ  $v_{C_{vco}}$  กับ  $V_{M_{max}}$  และ  $V_{M_{min}}$  ที่ความถี่  $f_{s,min}$  และ  $f_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สัญญาณ clock ต่ำสุด ( $f_{s,\min}$ ) หาได้จาก [2]

$$f_{s,\min} = \frac{3.6}{R_{\min} C_{vco}} \quad (ค.1)$$

ในงานวิจัยนี้กำหนด  $f_{s,\min} = 100\text{kHz}$  และเลือก  $R_{\min} = 8\text{k}\Omega$  จะได้

$$C_{vco} = \frac{3.6}{(100 \times 10^3)(18 \times 10^3)} = 2\text{nF} \quad (ค.2)$$

เมื่อมีแรงดันเอาต์พุต ( $v_o$ ) ป้อนกลับมาที่ขา 2(IN) ในรูปที่ ค.2 วงจรขยายความผิดพลาด ( $C_1$ ) จะขยายค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันเอาต์พุต ( $v_o$ ) กับแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) คงที่ 5V (แรงดันนี้ได้จากขา 16 (Soft-Ref)) ที่ขา 3(INV) ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันควบคุม ( $v_c$ ) แรงดัน  $v_c$  ถูกป้อนมาที่ขา base ของ  $Q_1$  ทำให้  $Q_1$  นำกระแส และแรงดัน  $v_c$  นี้จะคร่อม  $R_{range}$  ที่ขา 6 ทำให้เกิดกระแส  $I_{range}$  ไปรวมกับ  $I_{\min}$  เพื่อไปชาร์จตัวเก็บประจุ  $C_{vco}$  ทำให้  $v_{C_{vco}}$  เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นในอัตราที่เร็วขึ้นดังแสดงในด้านขวามือของรูปที่ ค.3 นั่นคือความถี่ของสัญญาณ clock ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตาม  $I_{range}$  ซึ่งแปรผันตามค่า  $v_c$  นั่นเอง โดยความถี่สูงสุด ( $f_{s,\max}$ ) จะถูกกำหนดโดย  $R_{range}$  ซึ่งหาได้จากสมการ [2]

$$f_{s,\max} = \frac{3.6}{\left( \frac{R_{\min} R_{range}}{R_{\min} + R_{range}} \right) C_{vco}} \quad (ค.3)$$

$$R_{range} = \frac{f_{\max} C_{vco}}{1 - \frac{3.6}{f_{\max} C_{vco} R_{vco,\min}}} \quad (ค.4)$$

แทนค่า  $R_{\min} = 18\text{k}\Omega$   $C_{vco} = 2\text{nF}$   $f_{\min} = 100\text{kHz}$  และ  $f_{\max} = 108\text{kHz}$  จะได้  $R_{range} = 22.49\text{k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์กลางตลอดย่านของโหลดและแรงดันอินพุตของวงจร ค่าเวลาในการหยุดนำกระแส ( $t_{off}$ ) จะต้องอยู่ในช่วง  $t_{o2} < t_{off} < t_{o2}'$  ที่  $f_{s,max} I_{o,min} V_{in,max}$  ซึ่งจากผลการชิมมูเลชันของวงจรที่  $f_{s,max} I_{o,min} V_{in,max}$  รูปที่ (2.21) พบว่าค่าเวลา  $t_{o2} = 6.6 \mu s$  และ  $t_{o2}' = 7.3 \mu s$  ดังนั้น  $t_{off}$  จะต้องมียุ่ระหว่างสองค่านี้ ในที่นี้เลือก  $t_{off} = 7.00 \mu s$

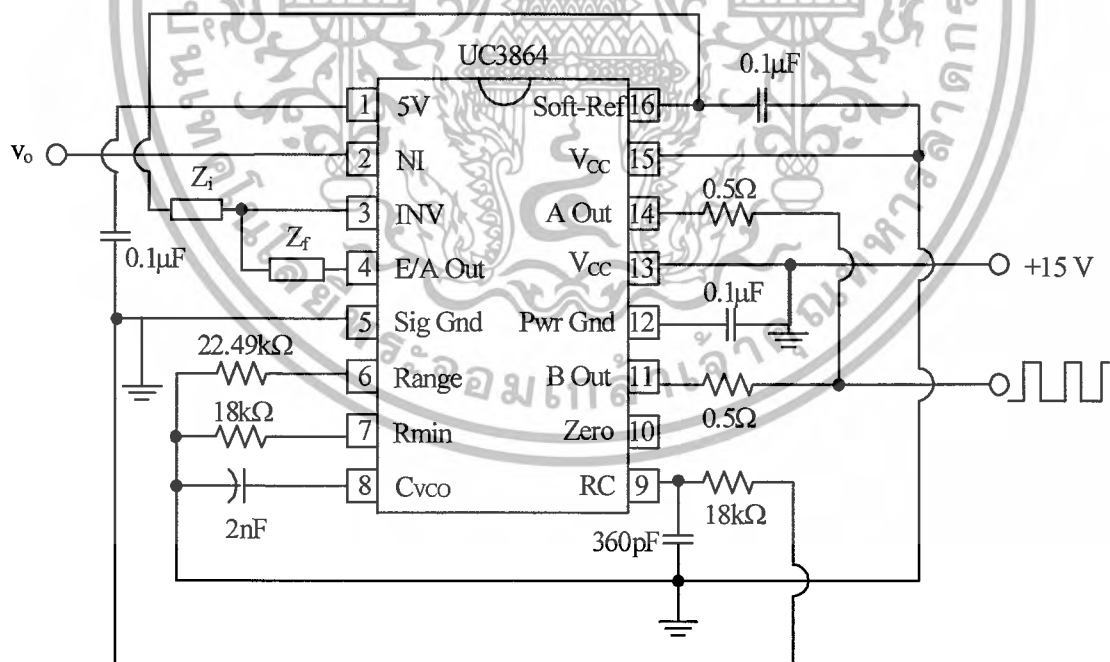
การกำหนดช่วงเวลาหยุดนำกระแส ทำได้โดยการเลือกตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาต่อที่ขา 9(RC) ของไอซี ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (ค.5) [2]

$$t_{off} = R_T C_T \quad (\text{ค.5})$$

กำหนดให้  $C_T = 360 \text{ pF}$  จะได้

$$R_T = \frac{6.4 \times 10^{-6}}{360 \times 10^{-12}} = 18 \text{ k}\Omega \quad (\text{ค.6})$$

การต่อขาต่าง ๆ ของ UC3864 แสดงได้ดังรูปที่ ค.4 รายละเอียดการเลือกอุปกรณ์ที่นำมาต่อให้กับขาอื่นๆของไอซี นอกเหนือจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ ดูได้จาก application Note ของไอซี UC3864 [2]

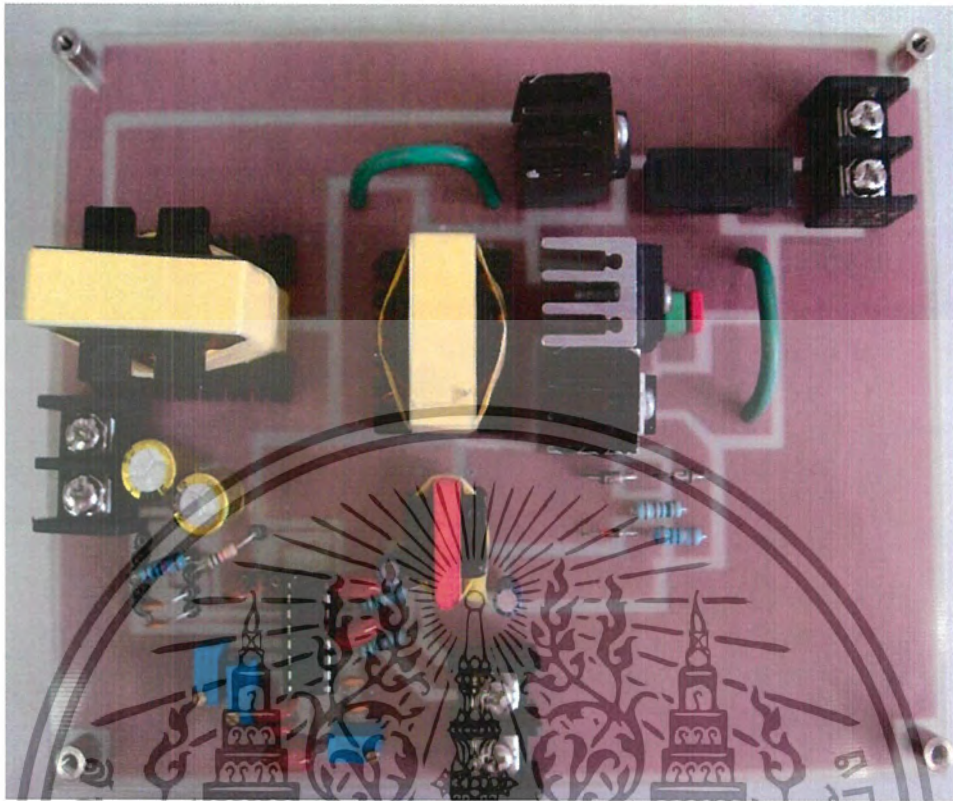


รูปที่ ค.4 การต่อขาต่าง ๆ ของ UC3864

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.1 วงจรควอซีเรโซแนนท์บัคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์ที่แรงดันศูนย์คั่นแบบ



รูปที่ ง.2 วงจรโหลดที่ใช้ทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยบริษัท อีทีเอส จำกัด ขอสงวนสิทธิ์ในไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้