

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาหุงต้มเหนียวนำแบบกึ่งบริดจ์ขนาดเล็ก  
Small Size Half-Bridge Induction Cooking

โดย

น.ส. นมัสพร รัตนประภา รหัส 46010338  
น.ส. อัจฉรา พิเชฐจำเริญ รหัส 46010951  
น.ส. อาภาพรรณ บุญโสภากา รหัส 46010970

รฟ.  
26 109 ๓  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

73005

27 ส.ย. 2550

117 2 6250  
b.....  
i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาหุงต้มเหนียวนำแบบกึ่งบริดจ์ขนาดเล็ก  
Small Size Half-Bridge Induction Cooking

โดย

น.ส. นมัสพร รัตน์ประภา รหัส 46010338

น.ส. อัจฉรา พิเชฐจำเริญ รหัส 46010951

น.ส. อาภาพรรณ บุญโสภาก รหัส 46010970

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง เตาหุงต้มเหนียวนำแบบกึ่งบริดจ์ขนาดเล็ก

ผู้จัดทำ

1. น.ส. นมัสพร รัตนประภา รหัส 46010338
2. น.ส. อัจฉรา พิเชฐจำเริญ รหัส 46010951
3. น.ส. อาภาพรรณ บุญโสภณ รหัส 46010970



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เดาหุงต้มเหนียวนำแบบกึ่งบริดจ์ขนาดเล็ก

น.ส. นมัสพร            รัตนประภา    รหัส 46010338  
 น.ส. อัจฉรา            พิเชษฐจำเริญ   รหัส 46010951  
 น.ส. อาภาพรรณ    บุญโสภณา    รหัส 46010970

รศ.ดร. วิริยะ    พิเชษฐจำเริญ    อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงกาต้มน้ำความถี่สูงที่มีขนาดเล็กโดยใช้วงจร Half Bridge Series Resonant RLC ที่มี Induction Coil ทำหน้าที่เป็น RL สมมูล โดยในขั้นตอนแรกได้ทำการคำนวณ วิเคราะห์คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุทโดยใช้ Program PSpice จากกระแสด้านเอาต์พุทที่ได้นี้สามารถคำนวณย้อนกลับ เพื่อคำนวณหากระแสตามจุดต่างๆ ในวงจร จนได้กระแสด้านอินพุทที่แหล่งจ่ายแรงดันเอซี 50 Hz ที่มีลักษณะของคลื่นใกล้เคียงไซน์โดยใช้ LC – Filter ขนาดเล็กแทน C Filter ขนาดใหญ่ เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงประมาณ 30 kHz ที่ปนมากับความถี่ 50 Hz ทั้ง ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก และ Power Factor ทางด้านอินพุทมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง โดยกาต้มน้ำที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีกำลังไฟฟ้า 700 Watt สามารถต้มน้ำได้เดือดภายใน 4 นาที และมีประสิทธิภาพของส่วนไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจร Rectifier และ Inverter รวมเท่ากับ 95 % โดยมีค่า Power Factor ด้านอินพุทเกือบเป็นหนึ่ง

## Small Size Half-Bridge Induction Cooking

Namassaporn Ratanaprapa

Achara Pichetjamroen

Arpapun Boonsopa

Assoc. Prof. Dr. Viriya Pichetjamroen Advisor

2006

### ABSTRACT

This thesis presents a small size induction cooker using a half-bridge RLC series resonant inverter with an induction coil working as an equivalent RL circuit. In the first step, the output voltage and current waveforms will be analyzed by simulation, using P-Spice program. The output current waveform can be further used to calculate other current waveforms in the reversed direction from output to input sides until finally the ac 50 Hz input supply current of nearly sinusoidal waveform is obtained under the condition that the bulky capacitor was removed and replaced by a small size LC-filter in order to by-pass the 30 kHz modulated carrier wave out from 50 Hz sinusoidal wave which results in a small size induction cooker with high input power factor, boiling time of 4 to 5 minutes and the rectifier-inverter efficiency around 95%.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาและวิจัยจาก รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณยงยุทธ นาราชภูริที่ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำทางด้านการเขียนโปรแกรมและปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ ตลอดจน พี่ๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือทั้งร่างกายแรงใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณที่เป็นผู้สนับสนุนและให้กำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นมัสพร รัตนประภา  
อัจฉรา พิเชฐจำเริญ  
อาภาพรรณ บุญโสภา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการเลือกวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้ในโครงงานวิจัย.....	5
2.2 พิจารณาแบ่งแรงดันไซน์เต็มคลื่นให้เป็นส่วนย่อย ๆ ในแต่ละช่วงเวลา ของการแบ่งด้วยระยะเวลาที่เท่า ๆ กัน.....	8
2.3 โหมดการทำงานของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์.....	9
2.4 วิเคราะห์แรงดันและกระแสที่ไหล.....	14
2.4.1 การคำนวณหาองค์ประกอบของคลื่นแรงดันสแควร์เอาท์พุทโดยวิธี อนุกรมฟูเรียร์.....	14
2.4.2 การคำนวณหากระแสในวงจร RLC เรโซแนนท์ จากองค์ประกอบ ของแรงดันฮาร์โมนิกต่าง ๆ.....	20
2.4.3 การคำนวณหาอัตราส่วนแรงดันฮาร์โมนิกต่าง ๆ เทียบกับแรงดัน พินดาเมนทอล ในรูป transfer function ของQuality factor (Q).....	22
2.4.4 การคำนวณหาแรงดันตกคร่อมตามจุดต่าง ๆ ในวงจร RLC เรโซแนนท์ : $V_L, V_C$ ในรูปของQuality factor (Q).....	23
2.4.5 การคำนวณหาขนาดของกระแสฮาร์โมนิกต่าง ๆ ในรูปของ แรงดันฮาร์โมนิกนั้นๆ.....	24
2.5 พินดาเมนทอล ขณะปรับความถี่ที่ค่าเรโซแนนท์ , ที่ค่ามากกว่า เรโซแนนท์และที่ค่ามาก ๆ กว่าเรโซแนนท์.....	26
2.6 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า R และ L ของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การออกแบบ.....	28
3.1 ขั้นตอนการคำนวณและออกแบบ.....	28
3.1.1 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า $R, L, C, f_{sw}, THD_i$ ของขดลวดเหนี่ยวนำ จากค่าวัตต์ ( $P_o$ ) , แรงดันสแควร์ ( $V_i$ ) , เอชท์พุทเพาเวอร์แฟกเตอร์ ( $\cos\theta_i$ ) , Quantity factor (Q) , ความถี่เรโซแนนท์ ( $f_r$ ) .....	28
3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบอินเวอร์เตอร์.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	39
4.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมและวงจรขับเกท.....	39
4.1.1 วงจร TL 494.....	40
4.1.2 Gate drive circuit.....	42
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการ simulation ที่ความถี่ค่าต่างๆจากโปรแกรม Pspice.....	43
4.3 ผลการทดลองและเปรียบเทียบกับผลการซิมูเลตคัลชันแรงดันและกระแส ตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30.5 kHz.....	45
4.4 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซิมูเลตคัลชันกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30.5 kHz , 31.5 kHz และ 32.5 kHz.....	61
4.4.2 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซิมูเลตคัลชันกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 31.5 kHz.....	64
4.4.3 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซิมูเลตคัลชันกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 32.5 kHz.....	67
บทที่ 5 สรุป.....	76
กิตติกรรมประกาศ.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	78

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์.....	5
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์แบบ C 2 ตัว และแบบ C ตัวเดียว.....	6
2.3 วงจร half bridge inverter ที่ทำงานด้วยแรงดันดีซีตรงเรียบและ วงจร half bridge inverter ที่ทำงานด้วยแรงดันดีซีฟูลเวฟ.....	7
2.4 หลักการให้ความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	7
2.5 ลักษณะค่าแรงดันเฉลี่ยในช่วงคาบสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ในช่วงไซเคิลของ แรงดันไซน์เต็มคลื่น.....	8
2.6 วงจรการทำงานของโหมด 1 Powering mode.....	9
2.7 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 1 Powering mode.....	9
2.8 วงจรการทำงานของโหมด 2 Free wheeling mode.....	10
2.9 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 2 Free wheeling mode.....	10
2.10 วงจรการทำงานของโหมด 3 Free wheeling mode.....	11
2.11 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 3 Free wheeling mode.....	11
2.12 วงจรการทำงานของโหมด 4 Regenerative mode.....	12
2.13 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 4 Regenerative mode.....	12
2.14 สรุปโหมดการทำงานของเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์.....	13
2.15 แรงดันเอาต์พุต.....	14
2.16 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต.....	19
2.17 วงจรการเกิดคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต.....	20
2.18 อธิบายกระแสที่ fundamental และ harmonic ต่าง ๆ.....	21
2.19 คลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่สวิตช์มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์.....	26
2.20 คลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่สวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	26
2.21 คลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่สวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	26
2.22 Flow chart แสดงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ R, L, C ของโหลด.....	27
3.1 Flow chart แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การออกแบบขดลวด เหนี่ยวนำความร้อน.....	30
3.2 Flow chart แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ การออกแบบขดลวด เหนี่ยวนำความร้อน โดยแสดงตัวเลขการคำนวณ.....	34

3.3 Block Diagram ของขั้นตอนการออกแบบอินเวอร์เตอร์.....	35
3.4 Bridge – Diode Rectifier and C Filter.....	35
3.5 Half - Bridge Inverter .....	36
3.6 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์.....	36
3.7 วงจรขับเกท .....	38
4.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมและวงจรขับเกท.....	39
4.2 วงจร TL 494.....	40
4.2.1 สัญญาณ Saw tooth ที่ขา 5 ของ TL 494.....	41
4.2.2 สัญญาณ $V_{cc}$ ที่ขา 12 ของ TL 494.....	41
4.2.3 สัญญาณ Output ที่ขา 9 ของ TL 494.....	41
4.2.4 สัญญาณ Output ที่ขา 10 ของ TL 494.....	41
4.3 Gate drive circuit.....	42
4.4 คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทจากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์ เท่ากับ 30.5 kHz.....	45
4.5 คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทจากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	46
4.6 คลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ $S_1$ จากการทดลองที่ความถี่ในการ สวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	47
4.7 คลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ $S_1$ จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	48
4.8 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์และกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์จากการ ทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	49
4.9 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์และกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ จากการซิมูเลต ด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	50
4.10 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจากการ ทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	51
4.11 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจากการ ซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	52
4.12 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์และกระแสดีซีเอาท์พุทของบริดจ์ไดโอดจากการ ทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	53
4.13 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์และกระแสดีซีเอาท์พุทของบริดจ์ไดโอดจากการ ซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	54
4.14 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและกระแสเอซีอินพุทของบริดจ์ไดโอด จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15	คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	56
4.16	คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	57
4.17	คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	58
4.18	คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจากการทดลองที่ความถี่ใน การสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	59
4.19	คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	60
4.20	คลื่นกระแสเอาต์พุทและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ที่ความถี่ในการสวิตช์ เท่ากับ 30.5 Hz.....	61
4.21	คลื่นกระแสเอาต์พุทและกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ในการ สวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	61
4.22	คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	62
4.23	คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์และกระแสดีซีเอาต์พุทของบริดจ์ไดโอด ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	62
4.24	คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ฟิลเตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	63
4.25	คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอดและกระแสอินพุทจากแหล่งจ่ายการ ไฟฟ้าที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ.....	63
4.26	คลื่นกระแสเอาต์พุทและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ที่ความถี่ในการสวิตช์ เท่ากับ 31.5 KHZ.....	64
4.27	คลื่นกระแสเอาต์พุทและกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ใน การสวิตช์เท่ากับ 31.5 KHZ.....	64
4.28	คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 KHZ.....	65
4.29	คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์และกระแสดีซีเอาต์พุทของบริดจ์ไดโอด ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 KHZ.....	65
4.30	คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ฟิลเตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 KHZ.....	66
4.31	คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอดและกระแสอินพุทจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 KHZ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.32	คลื่นกระแสเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz.....	67
4.33	คลื่นกระแสเอาต์พุตและกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz.....	67
4.34	คลื่นกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz.....	68
4.35	คลื่นกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์และกระแสซีเอาต์พุตของบริดจ์ไดโอดที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz.....	68
4.36	คลื่นกระแสเอซีอินพุตของบริดจ์ไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz.....	69
4.37	คลื่นกระแสเอซีอินพุตของบริดจ์ไดโอดและกระแสอินพุตจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz.....	69
4.38	กราฟของค่า rms ของกระแสเอาต์พุตและความถี่.....	71
4.39	กราฟของค่า rms ของกระแสอินพุตและความถี่.....	71
4.40	กราฟของค่า Total Harmonic Distortion (THD,) และความถี่.....	72
4.41	กราฟของค่า Power Output และความถี่.....	72
4.42	กราฟของค่า Power Input และความถี่.....	73
4.43	กราฟของค่าประสิทธิภาพ และความถี่.....	73
4.44	กราฟของค่าเวลาในการเดือดของน้ำ และความถี่.....	74
4.45	กราฟของค่า Power Factor และความถี่.....	74
4.46	Flow Chart แสดงการปรับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการปรับความถี่.....	75

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการพิจารณา $b$ .....	17
2.2 การคำนวณหาค่า $b$ .....	18
4.1 ตารางสรุปค่าตัวแปรต่างๆที่มีความสัมพันธ์กับคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจร.....	70



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงมากขึ้น ดังเช่น เครื่องหลอมโลหะเหนี่ยวนำความถี่สูง เครื่องชุบผิวแข็งเหนี่ยวนำความถี่สูง และเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง เป็นต้น ซึ่งในโครงการที่กำลังศึกษานี้จะเน้นที่เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงขนาดเล็ก (กาต้มน้ำชา) ซึ่งเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบเดิมที่ทำกันมาจะเป็นหม้อต้มอาหารความถี่สูงซึ่งต้องการพื้นที่กันหม้อและตัวหม้อต้มขนาดใหญ่พอสมควร เพื่อใช้ประกอบปรุงอาหาร ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ก็จะต้องมากตามขนาดของหม้อด้วย กันหม้อที่มีบริเวณและขนาดกว้างใหญ่ต้องใช้ขดลวด cooking coil ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาก โดยสามารถใช้ขดลวดทองแดงชุบวานิชที่มีลักษณะดังนี้คือ :

- ( 1 ) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ ( เบอร์เล็ก )
- ( 2 ) จำนวนเส้นลวดที่ใช้ดีเกลียวมาก ( เพื่อให้ปริมาณกระแสไหลผ่านได้มาก )
- ( 3 ) จำนวนรอบของขดลวดดีเกลียวที่นำมาขดเป็นขดลวดแบนมีจำนวนรอบมากได้ ( เนื่องจากกันหม้อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาก )

จะเห็นได้ว่าลักษณะโดยรวมของขดลวด รวมทั้งตัวหม้อและวงจร Inverter ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ขดขดลวดและหม้อต้มนี้จะต้องมีขนาดใหญ่ไปตามตัวภาชนะ แต่ในกรณีกาต้มน้ำชาความถี่สูงนี้จะมีลักษณะต่างๆที่ต้องออกแบบใหม่ให้ตรงข้ามจากเดิมโดยสิ้นเชิงโดยสามารถใช้ขดลวดทองแดงชุบวานิชที่มีลักษณะดังนี้คือ :

- ( 1 ) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ( เบอร์ใหญ่ )
- ( 2 ) จำนวนเส้นของลวดที่ใช้ดีเกลือน้อย ( เพื่อให้ปริมาณกระแสไหลผ่านได้น้อย )
- ( 3 ) จำนวนรอบของขดลวดดีเกลียวที่นำมาขดเป็นขดลวดแบนยังคงมีจำนวนรอบมากได้ ( เนื่องจากกันหม้อแม้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยแต่จำนวนขดลวดดีเกลียวที่ใช้ในการขดเป็นขดลวดแบนจะมีจำนวนเส้นน้อยลงซึ่งผลที่ได้ก็คือขดลวดนี้ยังคงสามารถรับแรงดันในระดับ DC-link เท่าเดิมได้ )

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปัญหาที่น่าสนใจในโครงการนี้ก็คือ การพัฒนาให้เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงมีขนาดเล็กลง ซึ่งจากของเดิมจะใช้ตัวเก็บประจุ Resonant ที่ไหลดจำนวน 2 ตัว แต่จะลดลงเหลือเพียงตัวเดียว นอกจากการลดจำนวนตัวเก็บประจุแล้ว ยังมีการลดขนาดของขดลวด cooking coil ดังกล่าวแล้ว เพื่อลดปริมาณของกระแสที่ไหลในขดลวดและสามารถทำไหลลดปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่ไหลให้มีปริมาณต่ำลงได้โดยที่ยังป้อนแรงดัน DC-Link ในวงจร

ได้เท่าเดิม นอกจากนี้การใช้ตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวยังช่วยทำให้การวิเคราะห์วงจรที่ใช้ในโครงการนี้สามารถทำได้ง่ายขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อลดขนาดของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิด voltage source inverter ( VSI ) ให้เป็นเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของวงจรเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงขนาดเล็กที่มีตัวเก็บประจุ Resonant ที่ Load เพียงตัวเดียวต่อในลักษณะของวงจร Half-Bridge

1.2.3 สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า ตามจุดต่างๆของวงจรเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงขนาดเล็กได้ โดยการใช้โปรแกรม Pspice ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานของวงจรได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ในโครงการนี้จะทำการสร้างและพัฒนาภาควัตถุด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยมีขอบเขตและข้อกำหนดคือจะต้มน้ำปริมาตร 0.75 ลิตรให้เดือดภายใน 4 นาที และสามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าจากระดับสูงสุดจนถึงระดับต่ำสุดได้โดยใช้ภาควัตถุที่มีก้นภาชนะขนาด 15 cm และจะมีการเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองกับค่าที่ได้จากผลการ simulation ด้วยโปรแกรม Pspice

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงจากแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่นจาก paper IEEE ทางด้าน Electronics กำลัง จากวิทยานิพนธ์ที่มีในห้อง Lab ทั้งในระดับปริญญาตรีและโท จากรุ่นก่อนๆที่ทำได้ รวมทั้ง paper ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร ECON ภายในประเทศ และวารสารตีพิมพ์ระดับนานาชาติของห้อง Lab ( IPEC หรือ PCC ) ตลอดจน Text book ต่างๆ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในส่วนของเนื้อหาที่เกี่ยวกับวงจร Half-Bridge Inverter ที่มี Load RLC ต่อในลักษณะ Series Resonant โดยต้องศึกษาในเรื่องของลักษณะแรงดันและกระแสที่ได้ในจุดต่างๆของวงจรดังกล่าว ตลอดจนการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ทางด้าน output รวมทั้งในประเด็นของวงจร RLC ในสภาวะ Resonant และ overresonant ว่าลักษณะการทำงานของวงจรมีความแตกต่างกันอย่างไรและกำลังไฟฟ้า output ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเช่นใด เป็นต้น

1.4.2 ดำเนินการสร้างวงจรทดลองโดยมีส่วนประกอบต่างๆของวงจรดังนี้

1.4.2.1 วงจรสร้างสัญญาณให้กับชุดขับเกตของสวิตช์ MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2.1 (a) วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนเป็นสัญญาณ input ให้กับชุดขับเกดที่สามารถปรับความถี่ได้จาก 30kHz – 40kHz พร้อมชุด supply DC +15 V ที่สร้างจากชุด IC regulator

1.4.2.1 (b) วงจรสร้าง deadtime (  $T_d$  ) ให้กับสัญญาณที่ใช้ป้อนเป็นสัญญาณ input ให้กับชุดขับเกดด้วยค่า deadtime (  $T_d$  ) ในย่าน 900-1000 nsec

1.4.2.1.(c) ชุดสร้างสัญญาณขับเกดของสวิตช์ MOSFET ( gate drive circuit ) เพื่อขยายสัญญาณที่ส่งมาจาก ชุดสร้างสัญญาณพัลส์ขับเกด ผ่านชุดสร้าง deadtime (  $T_d$  ) จำนวน 2 ชุด โดยมีชุดสร้างสัญญาณขับเกดของสวิตช์ MOSFET จำนวน 2 ชุดและ output แต่ละชุดนำไปขับขาเกด MOSFET

1.4.2.2 วงจร POWER ประกอบด้วยวงจร Rectifier และวงจร Inverter ความถี่สูง

1.4.2.2 (a) เมื่อป้อนแรงดันการไฟฟ้าคลื่นไซน์ 220 V 50 Hz ผ่านวงจร rectifier พร้อมวงจร Filter กรองเรียบจะทำให้ได้แรงดัน dc ไฟตรงเรียบเพื่อเป็น input ให้กับวงจร inverter โดย ไฟ dc มีขนาด 310 Vdc

1.4.2.2 (b) วงจร Half-Bridge inverter ที่ใช้ในโครงงานนี้จะเป็นวงจรที่ประกอบด้วย switch MOSFET เพียงกิ่งเดียว มี MOSFET 2 ตัวต่ออนุกรมกันและรับแรงดัน dc แหล่งจ่าย 310 V โดยตรงและสวิตช์ทั้งสองจะทำงานสลับกัน ON และ OFF

1.4.2.2 (c) ในส่วนของโหลดจะประกอบด้วย RLC series resonant ซึ่งประกอบด้วย R และ L จากชุดขดลวดกาน้ำชาเห็นยวนำความถี่สูงและ C resonant เพียงตัวเดียวซึ่งทำให้การคำนวณวงจรง่ายขึ้นกว่ากรณี C 2 ตัว

1.4.2.3 จัดเก็บข้อมูลทางทฤษฎีและผลต่าง ๆ จากชุดทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4.2.4 ทำการ simulate ด้วยโปรแกรม PSpice และนำไปเปรียบเทียบกับ การทดลองเพื่อยืนยันความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของวงจรให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

1.4.2.5 นำข้อมูลทั้งหมดมารวบรวมเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และเตรียมการ presentation

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการของวงจร Resonant Inverter โดยเฉพาะในกรณีของวงจร Half-Bridge และสามารถนำไปสู่ความเข้าใจวงจรอื่นๆที่ใช้หลักการของ Resonant เดียวกันนี้เช่นวงจร Full-Bridge เป็นต้น

1.5.2 สามารถนำชุดต้นแบบไปใช้ประโยชน์เป็นกาดม้หน้าชาเหินยวนำความถี่สูงที่สามารถดม้หน้าปริมาตร 0.75 ลิตรให้เดือดได้ภายใน 4 นาที

1.5.3 สามารถนำชุดต้นแบบไปพัฒนารูปลักษณ์และขนาดเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการผลิตเพื่อจำหน่ายได้ในอนาคต

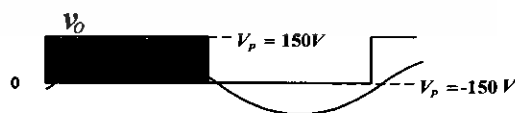
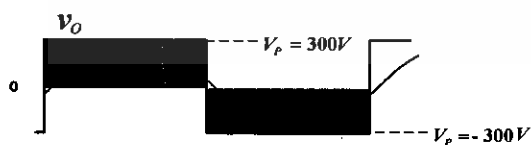
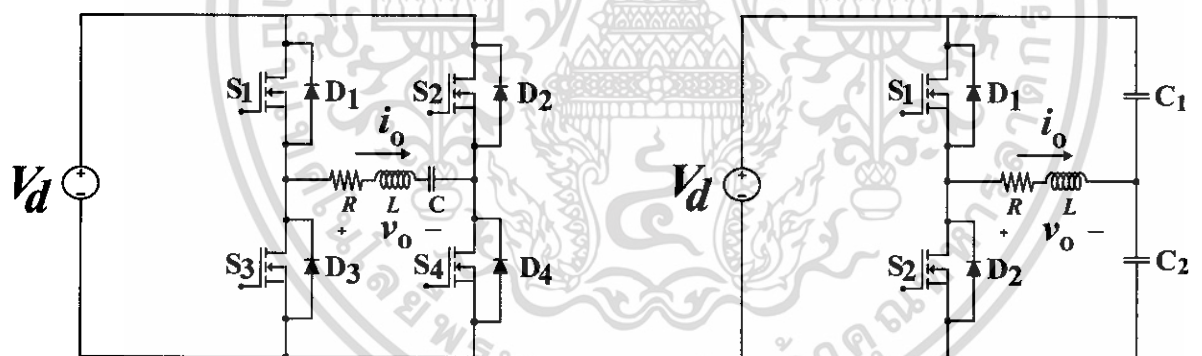


## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 หลักการเลือกวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้ในโครงงานวิจัย

ในโครงงานวิจัยเรื่องเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงขนาดเล็กนั้นเนื่องจากตัวกาคัดน้ำมีขนาดเล็กที่ใช้ตัดน้ำในปริมาณ 0.5 ลิตรนั้นบริเวณก้นกาซึ่งเป็นบริเวณที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นมีขนาดเล็กซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 14 เซนติเมตรเท่านั้น ตัวขดลวดซึ่งพันในลักษณะรูปก้นหอย โดยทั่วไปจะพันไว้ด้วยขนาดที่ให้อุณหภูมิของตัวกาคัดน้ำพอดี ซึ่งจำนวนรอบขดลวดที่พันลักษณะนี้จะมีจำนวนรอบไม่กี่รอบ ซึ่งโครงงานวิจัยนี้จะใช้ในช่วงประมาณ 75 รอบ ขดลวดซึ่งมีจำนวนไม่มากนักนี้ จะไม่สามารถรับแรงดันเอซีที่ป้อนเข้ามาขดลวดนี้ได้ไม่มากนัก แรงดันเอซีที่สร้างขึ้นเพื่อป้อนให้กับขดลวดดังกล่าวนี้จะมีระดับแรงดันไม่มากนัก ในกรณีที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ซึ่งมีอินพุตเป็นแรงดัน DC link + 300 V จะได้แรงดันเอซีสแควร์ทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันเอซี  $\pm 300V$  แต่ในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ จะได้แรงดันเอซีสแควร์ทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันเอซี  $\pm 150 V$  ดังนั้นในโครงงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์เพื่อป้อนแรงดันเอซี  $\pm 150 V$  ให้กับขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูงดังกล่าว



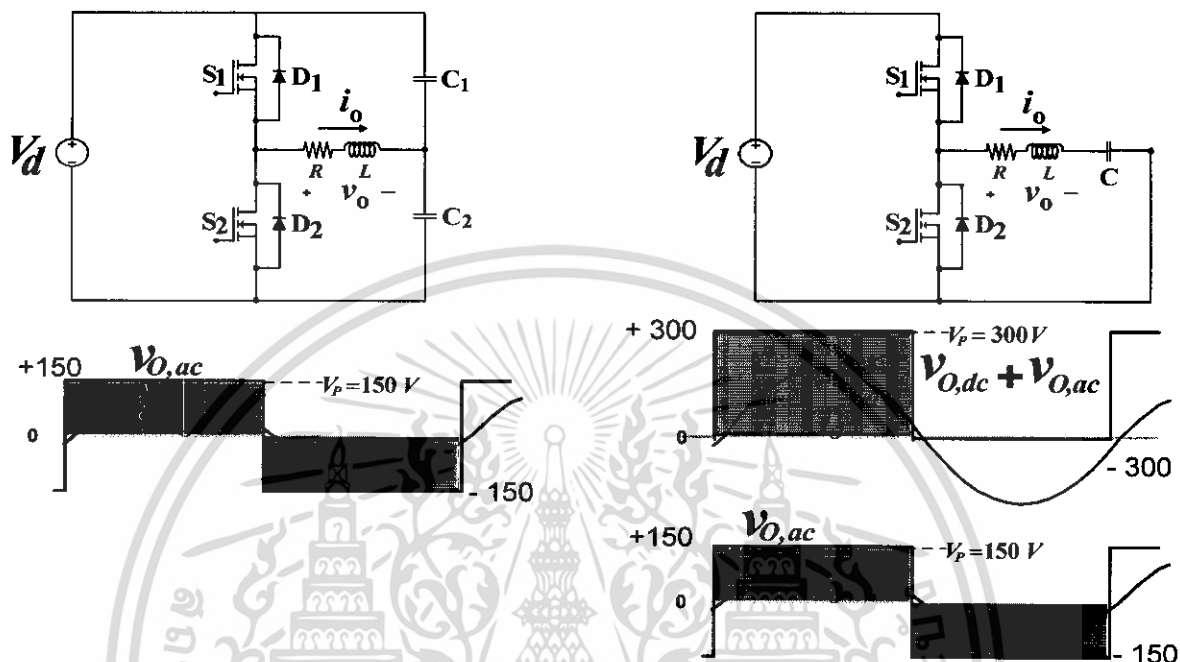
(ก) รูปวงจรกิจอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

(ข) รูปวงจรกิจอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

รูปที่ 2.1 วงจรกิจอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์และวงจรกิจอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

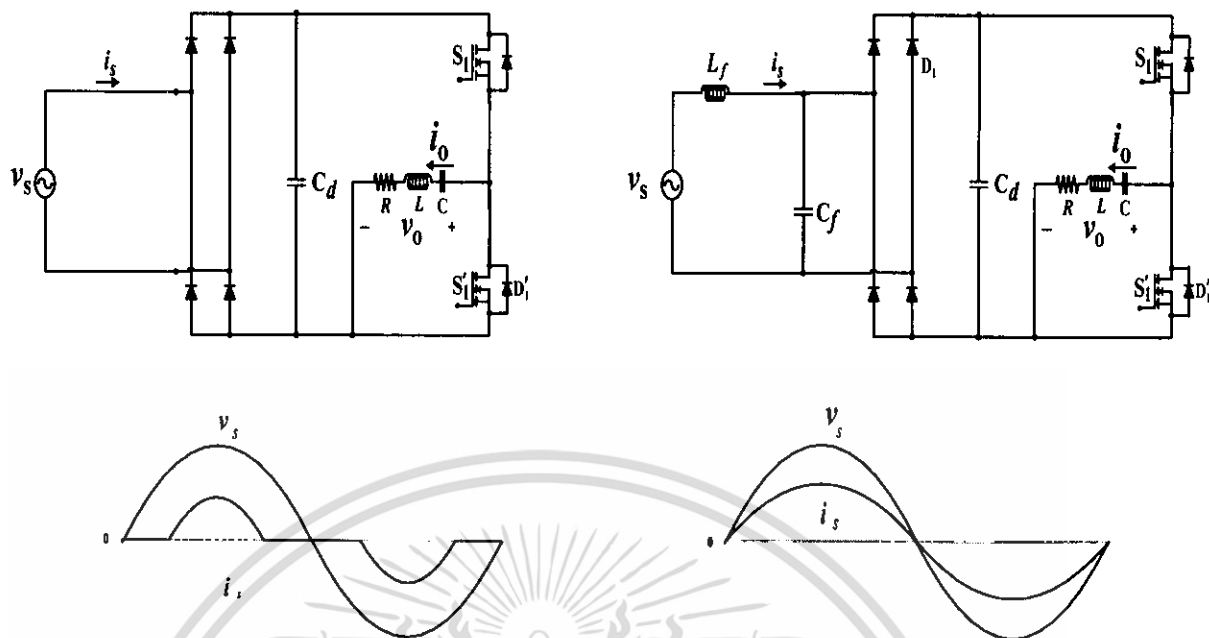
ในส่วนของวงจรกึ่งบริดจ์ที่ถูกนำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้ ก็ยังมี 2 ลักษณะคือวงจรกึ่งบริดจ์ที่มี C เรโซแนนท์ 2 ตัว และ C เรโซแนนท์เพียงตัวเดียว



(ก) รูปวงจรมอเตอร์แบบกึ่งบริดจ์แบบ C 2 ตัว (ข) รูปวงจรมอเตอร์แบบกึ่งบริดจ์แบบ C ตัวเดียว

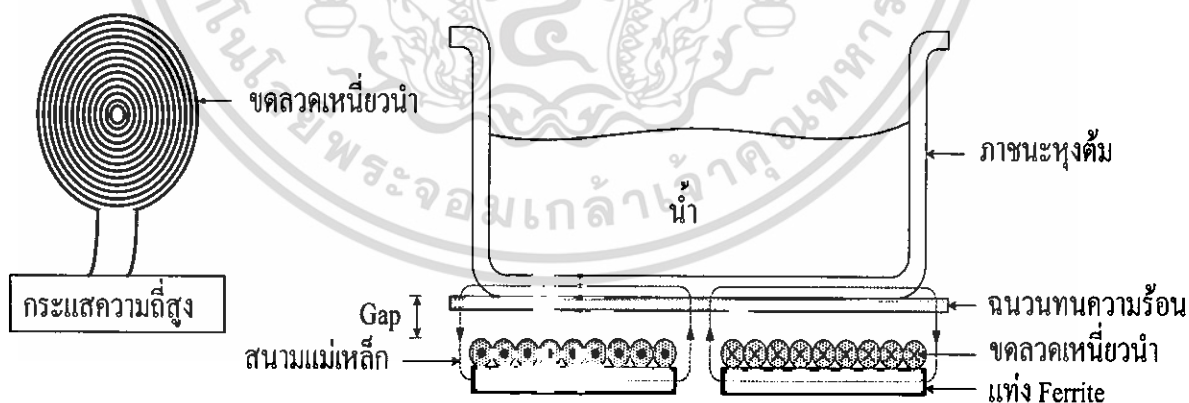
### รูปที่ 2.2 วงจรมอเตอร์แบบกึ่งบริดจ์แบบ C 2 ตัว และแบบ C ตัวเดียว

เนื่องจากอุปกรณ์การทำความถี่สูงที่ใช้ในโครงการนี้ต้องการขนาดเล็กจึงเลือกใช้วงจรกึ่งบริดจ์ที่มี C เรโซแนนท์เพียงตัวเดียว การพิจารณาวงจรมอเตอร์ที่เลือกใช้จนถึงขณะนี้ ซึ่งเป็นวงจรกึ่งบริดจ์และมี C เรโซแนนท์เพียงตัวเดียวนั้นก็ยังคงถือว่ายังมีขนาดเล็กเท่าที่ควร เนื่องจากยังมี C DC link อยู่ทางด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งยังทำให้อุปกรณ์กักตังน้ำยังมีขนาดใหญ่อยู่ ในโครงการวิจัยนี้จึงได้ตัดชุด C DC link ที่มีขนาดใหญ่นี้ออก และใส่ LC ฟิลเตอร์ซึ่งมีขนาดเล็ก เพื่อกรองความถี่สวิตซ์ซิ่ง ซึ่งเป็นความถี่สูงในระดับประมาณ 30 kHz ที่มาจากวงจรมอเตอร์ทั้ง เพื่อคงเหลือไว้แต่ความถี่ 50 Hz ของกระแสที่ดึงออกจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50 Hz



รูปที่ 2.3 วงจร half bridge inverter ที่ทำงานด้วยแรงดันดีซีตรงเรียบและ วงจร half bridge inverter ที่ทำงานด้วยแรงดันดีซีฟูลเวฟ

อันเป็นผลพลอยได้ทำให้แรงดันและกระแสเป็นคลื่นไซน์และอินเฟสกัน ทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50 Hz มีค่าเกือบเป็น 1 และทำให้สายไฟที่ต่อจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50 Hz เพื่อต่อเข้ายังชุดอุปกรณ์ภาคต้นน้ำเป็นสายไฟที่มีขนาดเล็กลง

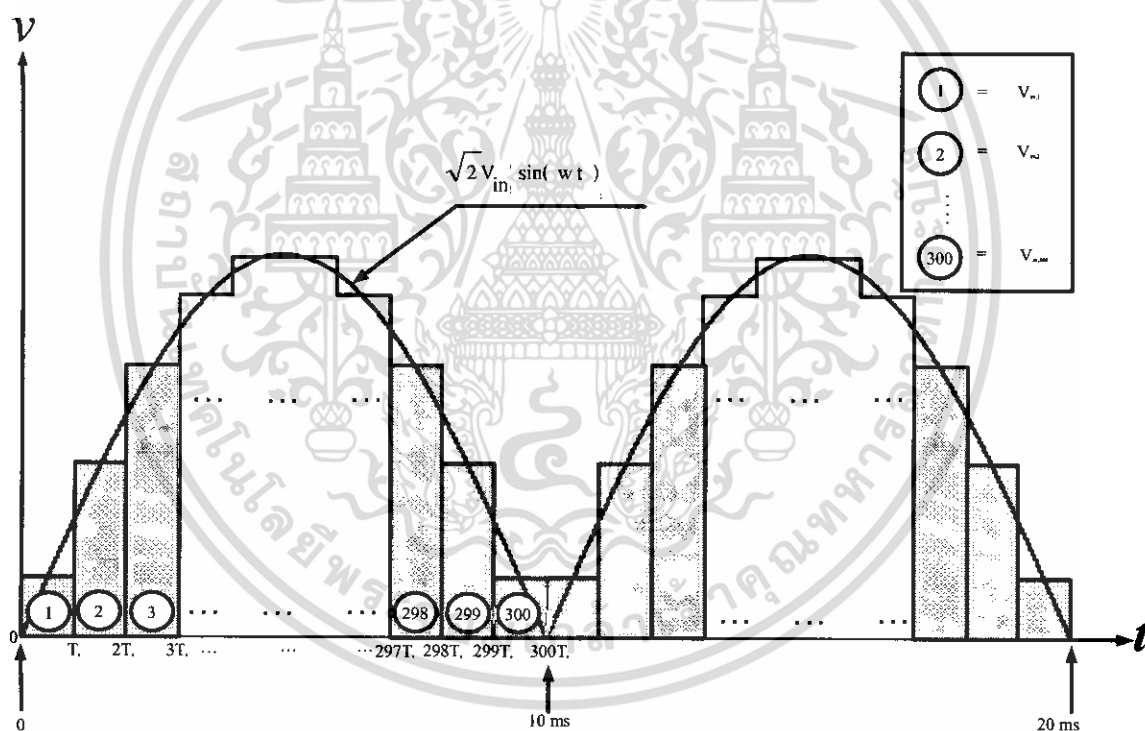


รูปที่ 2.4 หลักการให้ความร้อนของเตาหุ้มต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 พิจารณาแบ่งแรงดันไซน์เต็มคลื่นให้เป็นส่วนย่อย ๆ ในแต่ละช่วงเวลาของการแบ่ง ด้วยระยะเวลาที่เท่า ๆ กัน

แรงดันที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันรูปไซน์เต็มคลื่น ( $v_a$ ) ที่มีความถี่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับความถี่ของสวิตช์อินเวอร์เตอร์ เราจึงสามารถประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าในในแต่ละคาบเวลาสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ด้วยค่าระดับแรงดันที่คงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งได้จากการเฉลี่ยในช่วงเวลาสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็น **30kHz** และความถี่ของแรงดันรูปคลื่นไซน์เต็มคลื่นเป็น **100 kHz** จึงสามารถหาค่าระดับแรงดันเฉลี่ยในช่วงเวลาการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ได้ **300** ค่า ลักษณะค่าแรงดันเฉลี่ยในช่วงเวลาการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

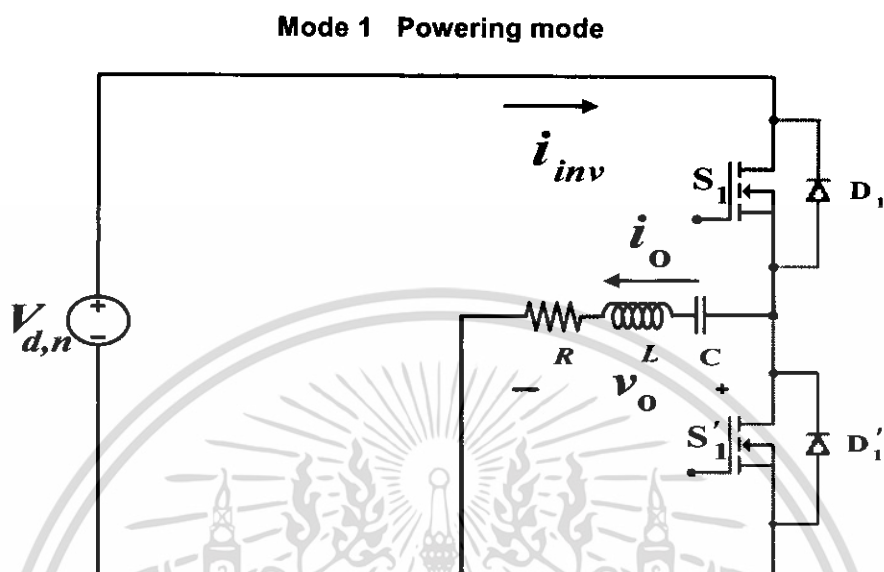


รูปที่ 2.5 ลักษณะค่าแรงดันเฉลี่ยในช่วงคาบสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ในช่วงไซเคิลของแรงดันไซน์เต็มคลื่น

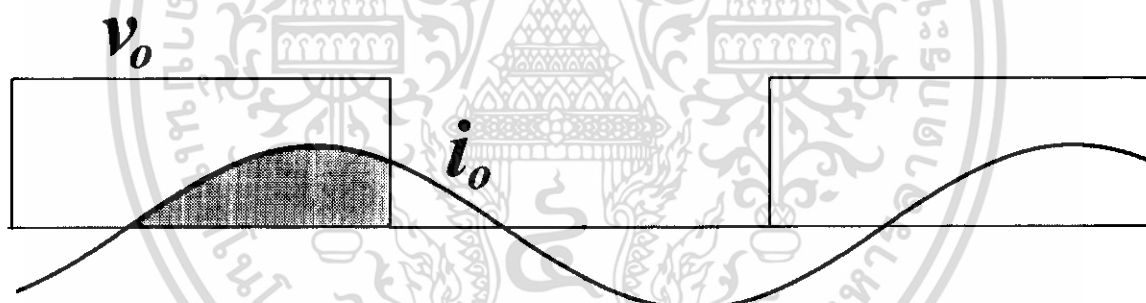
ซึ่งค่าแรงดันเฉลี่ยในช่วงเวลาสวิตช์แต่ละค่านั้นจะสามารถแบ่งโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ออกได้เป็น 4 โหมดการทำงาน

## 2.3 โหมดการทำงานของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

-โหมดการทำงานของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.6 วงจรการทำงานของโหมด 1 Powering mode



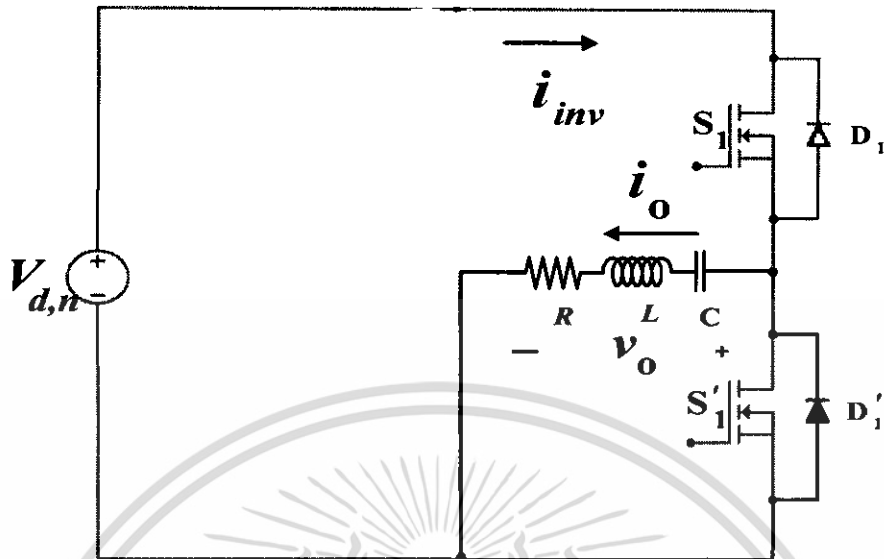
รูปที่ 2.7 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 1 Powering mode

### หลักการการทำงานของโหมด 1 Powering mode

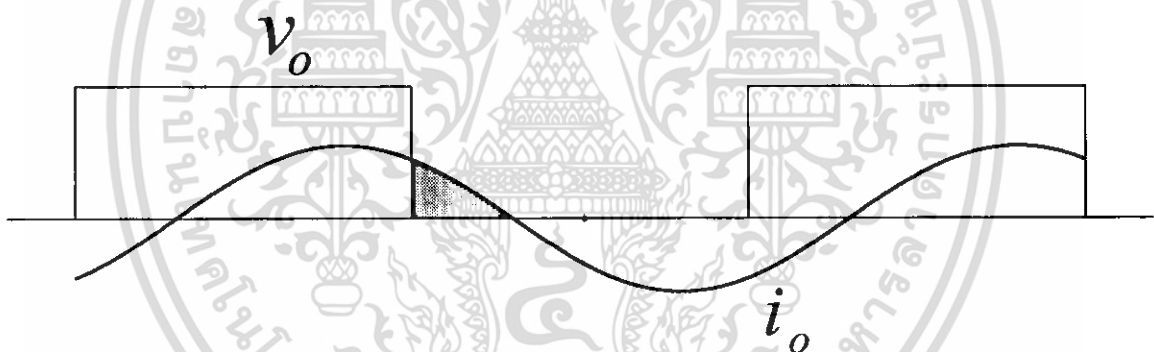
เมื่อ  $S_1$  ON ในขณะที่  $S_1'$  OFF ทิศทางกระแส ( $i_o$ ) จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟตรงหน้าอินเวอร์เตอร์ ( $+V_d$ ) ผ่าน  $S_1$  ไปยังโหลดกลับสู่แหล่งจ่ายไฟตรงหน้าอินเวอร์เตอร์ ( $-V_d$ )

ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลดเนื่องจากกระแส ( $i_o$ ) มีค่าเป็นบวกและแรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเป็นบวกจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงหน้าอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Powering mode**

### Mode 2 Free wheeling mode ( $D_1'$ ON)



รูปที่ 2.8 วงจรการทำงานของโหมด 2 Free wheeling mode



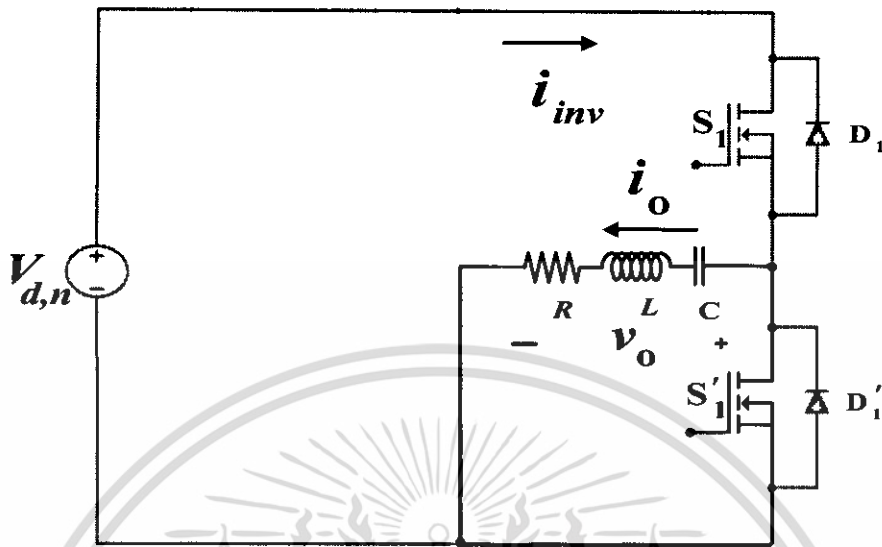
รูปที่ 2.9 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 2 Free wheeling mode

### หลักการการทำงานของโหมด 2 Free wheeling mode ( $D_1'$ ON)

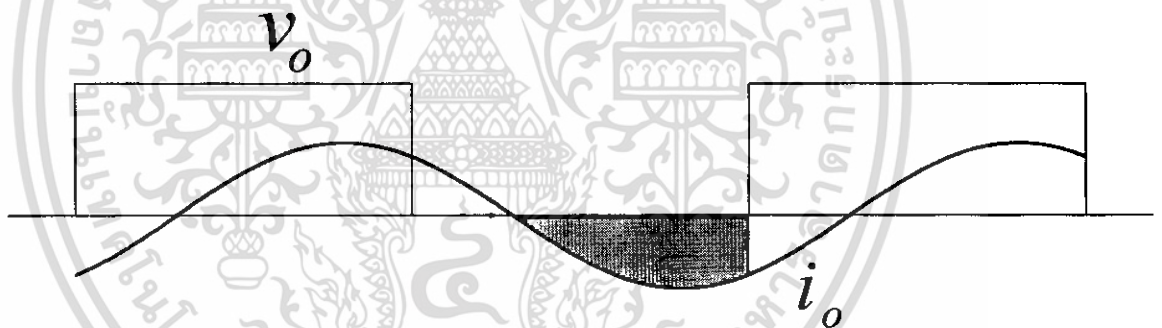
เมื่อ  $S_1$  OFF กระแส ( $i_o$ ) ยังคงไหลทิศทางเดิมมีค่าเป็นบวกโดยจะไหลวนผ่าน  $D_1'$  ถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรอยอยู่ที่ขาเกตของ  $S_1'$  แต่  $S_1'$  ยังไม่ ON เนื่องจาก  $D_1'$  ON ทำให้  $S_1'$  เป็น Reverse bias ขั้วของไหลตถูกลัดวงจรถึงกันด้วย  $D_1'$  ส่งผลทำให้แรงดันตกคร่อมไหลตมีค่าเท่ากับศูนย์

ในโหมดนี้ไหลตจะไม่รับพลังงานและไม่จ่ายพลังงานเนื่องจากกระแสมีค่าเป็นบวกและแรงดันตกคร่อมไหลตมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Free wheeling mode ( $D_1'$  ON)**

### Mode 3 Free wheeling mode ( $S_1'$ ON)



รูปที่ 2.10 วงจรการทำงานของโหมด 3 Free wheeling mode



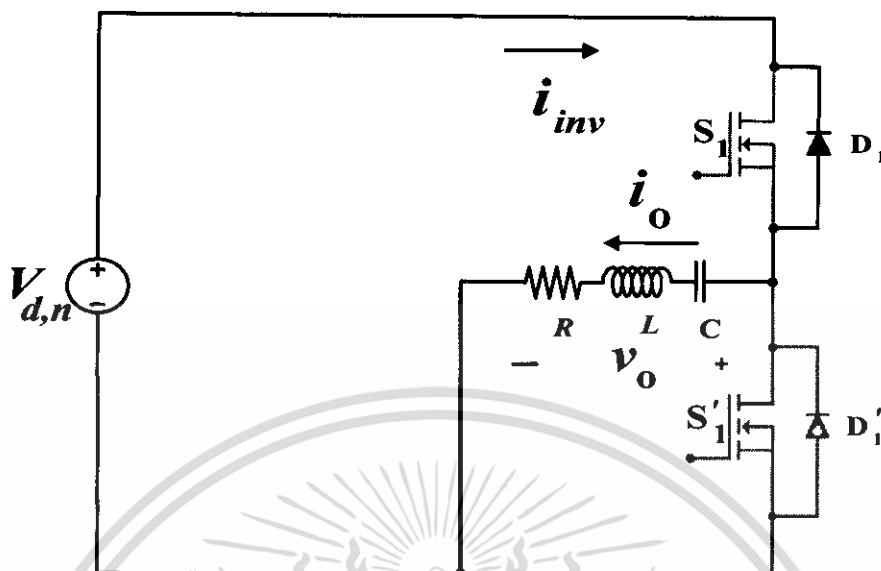
รูปที่ 2.11 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 3 Free wheeling mode

#### หลักการการทำงานของโหมด 3 Free wheeling mode ( $S_1'$ ON)

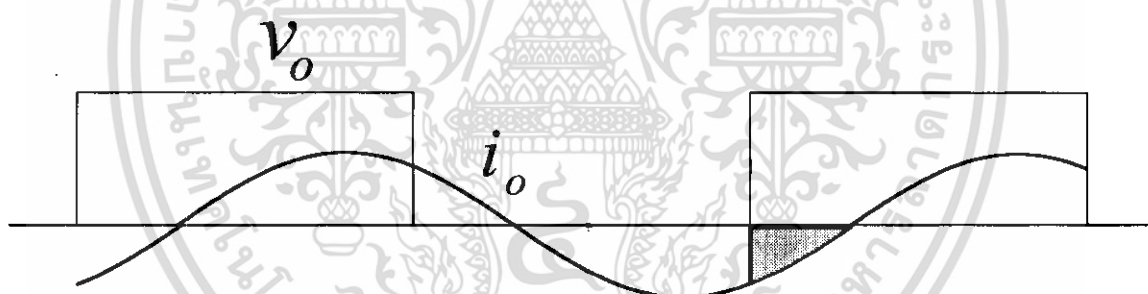
เมื่อ  $S_1'$  ON ในขณะที่  $S_1$  OFF ทิศทางกระแส ( $i_o$ ) จะไหลกลับทิศทางเดิมจึงมีค่าเป็นลบโดยจะไหลวนผ่าน  $S_1'$  ทำให้  $S_1'$  เป็น Forward bias ขั้วของไหลตถูกลัดวงจรถึงกันด้วย  $S_1'$  ส่งผลทำให้แรงดันตกคร่อมไหลตมีค่าเท่ากับศูนย์

ในโหมดนี้ไหลตจะไม่รับพลังงานและไม่จ่ายพลังงานเนื่องจากกระแสมีค่าเป็นลบและแรงดันตกคร่อมไหลตมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Free wheeling mode ( $S_1'$  ON)**

### Mode 4 Regenerative mode



รูปที่ 2.12 วงจรการทำงานของโหมด 4 Regenerative mode

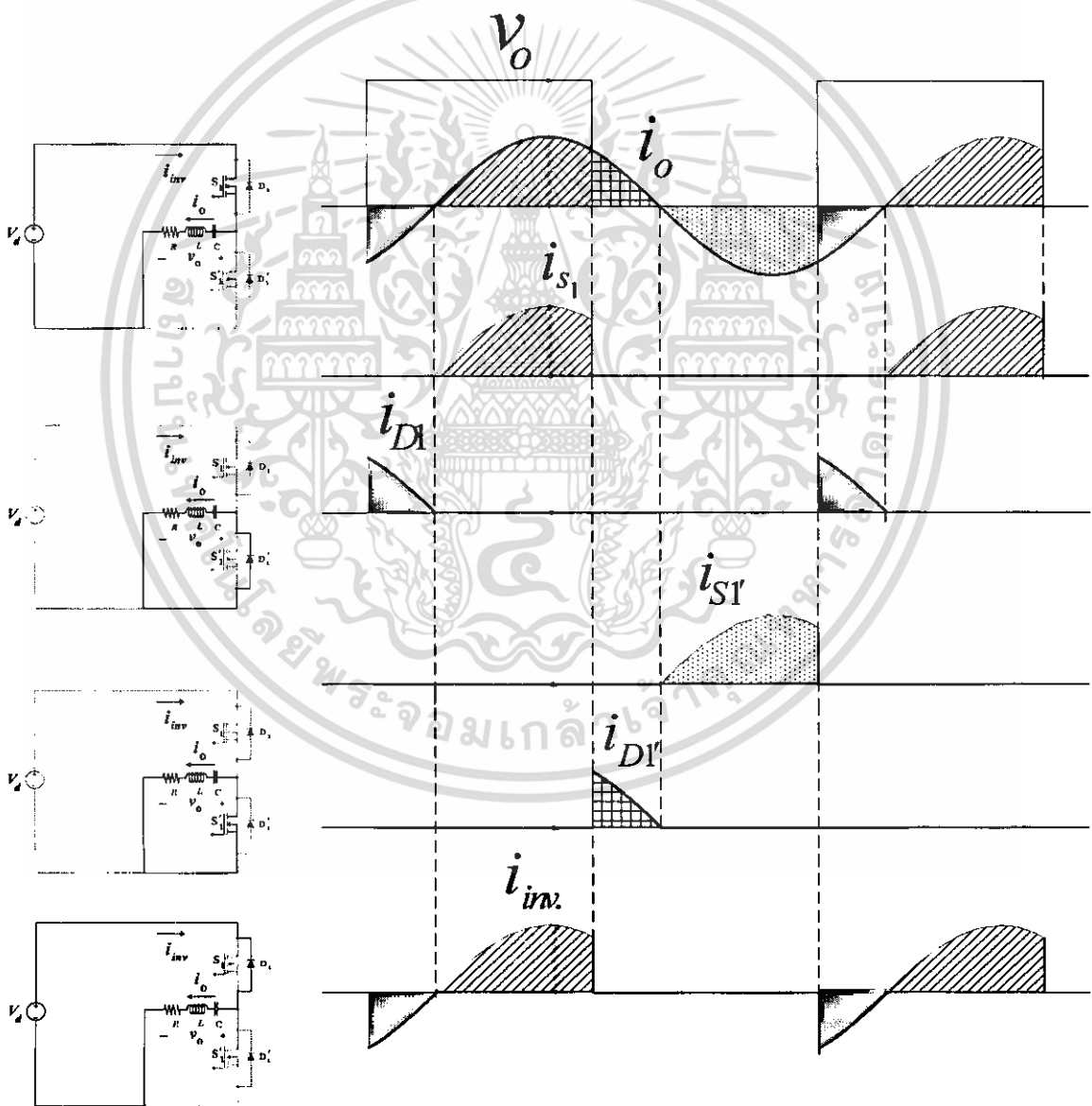
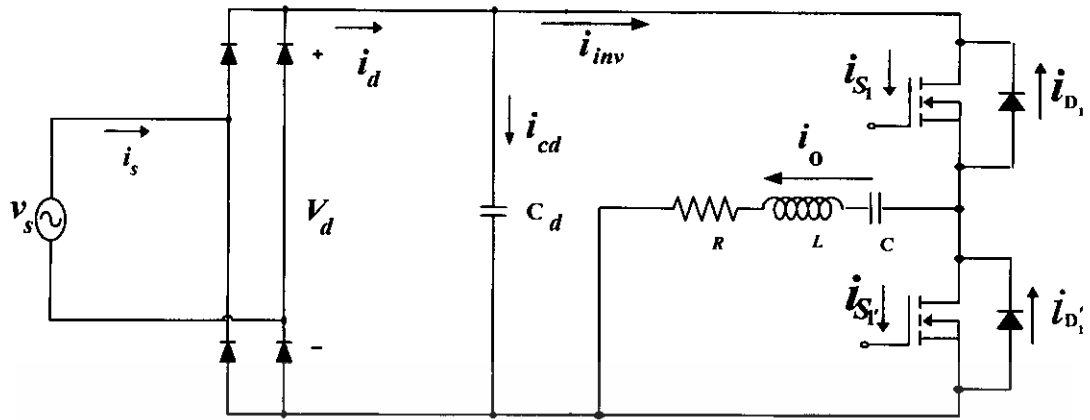


รูปที่ 2.13 คลื่นแรงดันและกระแสของโหมด 4 Regenerative mode

### หลักการการทำงานของโหมด 4 Regenerative mode

เมื่อ  $S_1'$  OFF กระแส ( $i_o$ ) ยังคงไหลทิศทางเดิมที่มีค่าเป็นลบโดยจะผ่าน  $D_1$  ไปยังแหล่งจ่ายไฟตรง ถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนอยู่ที่ขาเกตของ  $S_1$  แต่  $S_1$  ยังไม่ ON เนื่องจาก  $D_1$  ON ทำให้  $S_1$  เป็น Reverse bias  $D_1$  จะต่อเชื่อมไหลดกับแหล่งจ่าย ส่งผลทำให้แรงดันตกคร่อมไหลดมีค่าเป็นบวก

ในโหมดนี้ไหลดจะจ่ายพลังงานให้กับแหล่งจ่ายเนื่องจากกระแส ( $i_o$ ) มีค่าเป็นลบและแรงดันตกคร่อมไหลดมีค่าเป็นบวกจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรงหน้าอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า **Regenerative mode**

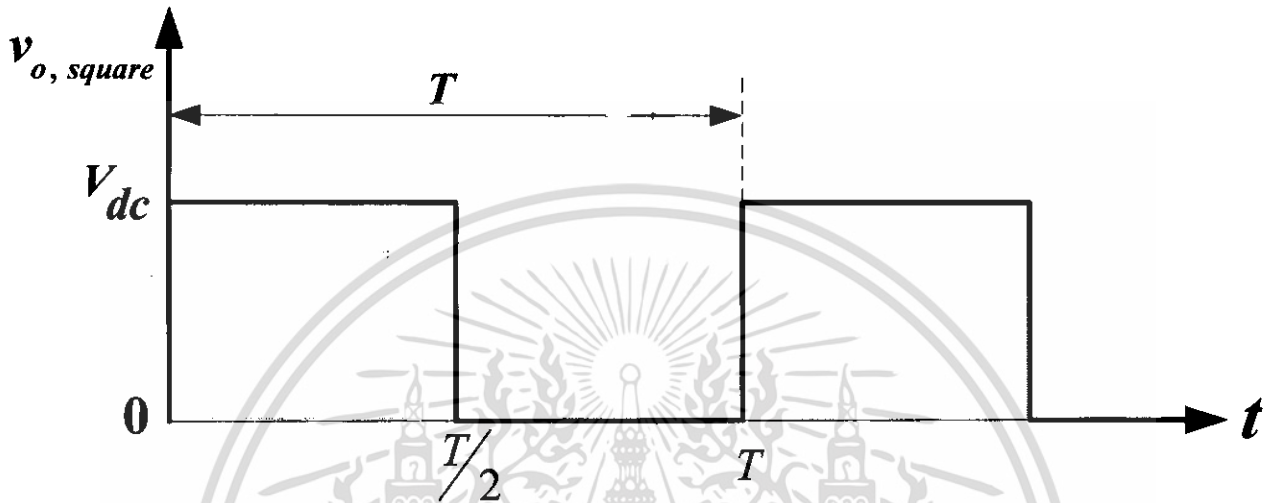


รูปที่ 2.14 รูปโหมดการทำงานของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วิเคราะห์แรงดันและกระแสที่โหลด

### 2.4.1 การคำนวณหาองค์ประกอบของคลื่นแรงดันสแควร์เอ๊าท์พุทโดยวิธีอนุกรมฟูเรียร์



รูปที่ 2.15 แรงดันเอ๊าท์พุท

โดยเริ่มวิเคราะห์จากแรงดันเอ๊าท์พุทที่มีลักษณะเป็น square wave ดังสมการ

$$v_{o, \text{square}} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$

เมื่อ 
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_{o, \text{square}} dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{dc} dt + \int_{T/2}^T 0 dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} V_{dc} t \Big|_0^{T/2}$$

$$a_0 = \frac{V_{dc}}{2}$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า  $a_0$  คือค่าเฉลี่ยของแรงดันหรือส่วนประกอบ DC

เมื่อ 
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_{o,square} \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{dc} \cos(n\omega_0 t) dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T (0) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{dc} \cos\left(n\left(\frac{2\pi}{T}\right)t\right) dt \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$a_n = \frac{2}{T(2n\pi/T)} \int_0^{T/2} V_{dc} \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt$$

$$a_n = \frac{1}{n\pi} V_{dc} \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \Big|_0^{T/2}$$

จะได้

$$a_n = 0$$

ดังนั้นจะได้ค่าในเทอม  $a_n \cos(n\omega_0 t)$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ 
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_{o,square} \sin(n\omega_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{dc} \sin(n\omega_0 t) dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T (0) \sin(n\omega_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{dc} \sin\left(n\left(\frac{2\pi}{T}\right)t\right) dt \quad ; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$b_n = \frac{2}{T(2n\pi/T)} \int_0^{T/2} V_{dc} \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt$$

$$b_n = \left(-\frac{1}{n\pi}\right) V_{dc} \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \Big|_0^{T/2}$$

$$b_n = \left(-\frac{V_{dc}}{n\pi}\right) [\cos(n\pi) - 1]$$

$$b_n = \left(\frac{V_{dc}}{n\pi}\right) [1 - \cos(n\pi)]$$

จะได้

$$b_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} [1 - (-1)^n]$$

ซึ่งเราสามารถพิจารณา  $b_n$  ที่ค่า  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  ได้ดังตารางคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา $b_n = \left(\frac{V_{dc}}{n\pi}\right)[1 - (-1)^n]$			n
$\left(\frac{V_{dc}}{1\pi}\right)[1 - (-1)^1]$	$\left(\frac{V_{dc}}{\pi}\right)[1+1]$	$\left(\frac{V_{dc}}{\pi}\right)[2]$	1
$\left(\frac{V_{dc}}{2\pi}\right)[1 - (-1)^2]$	$\left(\frac{V_{dc}}{2\pi}\right)[1-1]$	$\left(\frac{V_{dc}}{2\pi}\right)[0]$	2
$\left(\frac{V_{dc}}{3\pi}\right)[1 - (-1)^3]$	$\left(\frac{V_{dc}}{3\pi}\right)[1+1]$	$\left(\frac{V_{dc}}{3\pi}\right)[2]$	3
$\left(\frac{V_{dc}}{4\pi}\right)[1 - (-1)^4]$	$\left(\frac{V_{dc}}{4\pi}\right)[1-1]$	$\left(\frac{V_{dc}}{4\pi}\right)[0]$	4
$\left(\frac{V_{dc}}{5\pi}\right)[1 - (-1)^5]$	$\left(\frac{V_{dc}}{5\pi}\right)[1+1]$	$\left(\frac{V_{dc}}{5\pi}\right)[2]$	5

ตารางที่ 2.1 แสดงการพิจารณา  $b_n$

จากตารางข้างต้นสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

**73005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$b_n$	n
$\frac{1}{1} \left( \frac{2V_{dc}}{\pi} \right)$	1
0	2
$\frac{1}{3} \left( \frac{2V_{dc}}{\pi} \right)$	3
0	4
$\frac{1}{5} \left( \frac{2V_{dc}}{\pi} \right)$	5

ตารางที่ 2.2 การคำนวณหาค่า  $b_n$

เพราะฉะนั้นเราจะได้สมการ

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_o t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{2V_{dc}}{\pi} \right) \left( \frac{1}{n} \right) \sin(n\pi t) \right]$$

จากค่า  $a_0, a_n, b_n$  ที่หาค่าได้ทำให้เราได้  $v_{o,square}$  ดังสมการต่อไปนี้

$$v_{o,square} = \frac{V_{dc}}{2} + \left( \frac{2V_{dc}}{\pi} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} \sin(n\pi t) \right] \quad (1)$$

เมื่อ  $n=2k-1$  ;  $k=1,2,3,\dots$

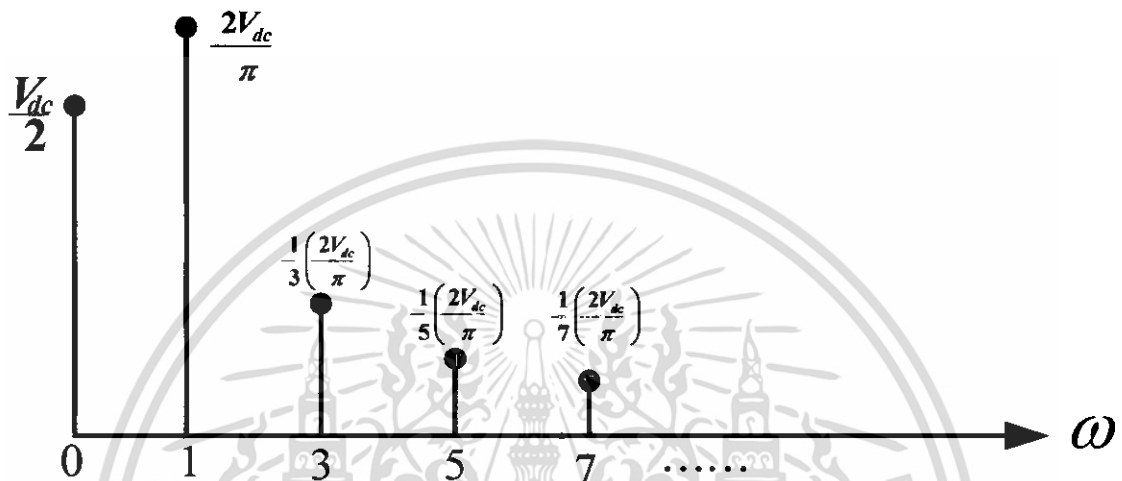
(n เป็นจำนวนคี่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตที่มีลักษณะเป็น square wave นั้นประกอบไปด้วยแรงดันดีซีและแรงดันแอสซีที่ fundamental และที่ harmonic ต่างๆ(harmonic ที่ 3,5,7,9,...) รวมกัน

เมื่อนำ  $v_{o,square}$  จากสมการที่ (1) ได้มาแตกสเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตจะได้

ดังรูป

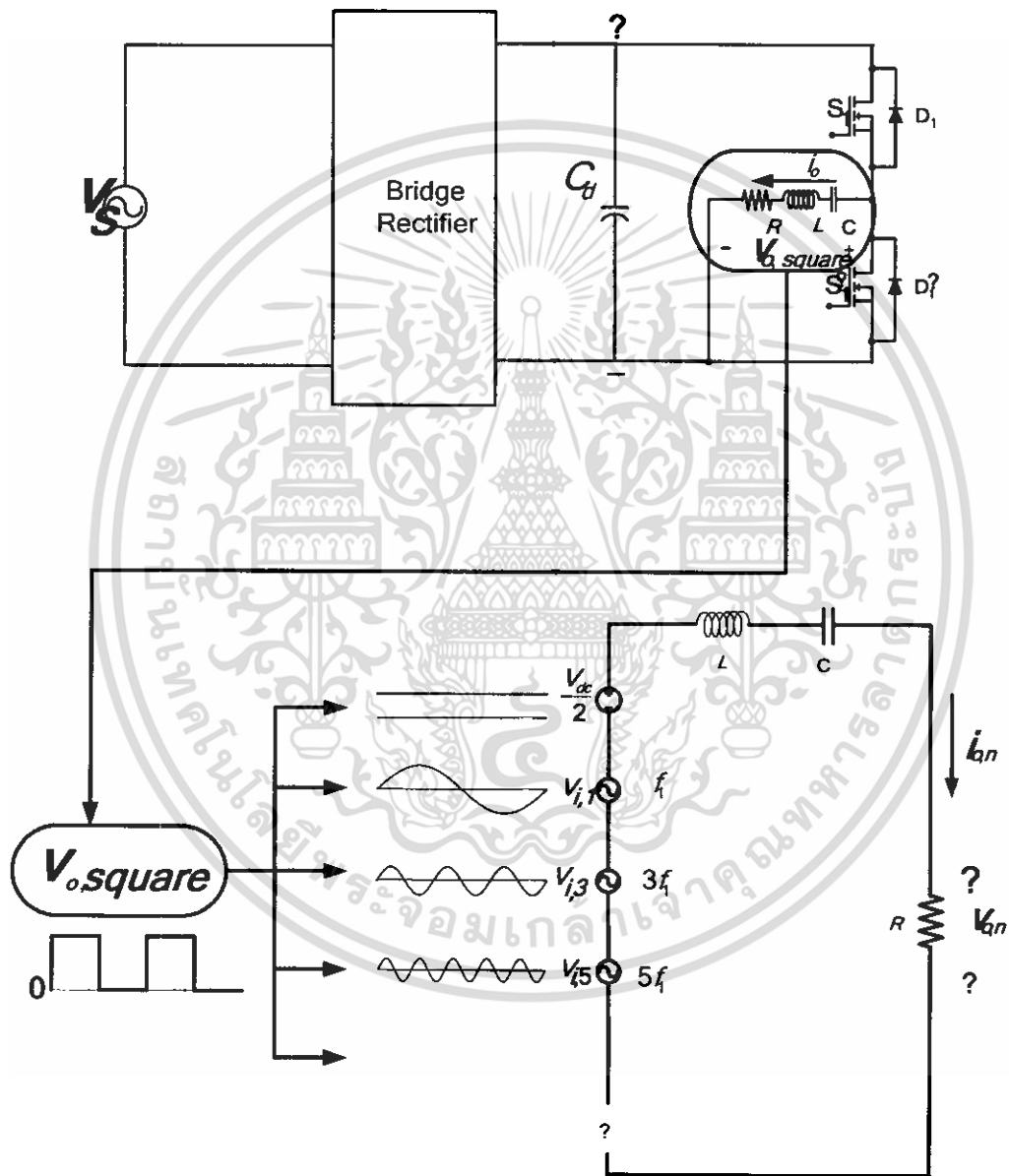


รูปที่ 2.16 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 การคำนวณหากระแสในวงจร RLC เรโซแนนท์ จากองค์ประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกต่าง ๆ

เมื่อเรานำสมการแรงดันเอาต์พุต(1) มาวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ super position เพื่อนำมาพิจารณากระแสเอาต์พุต คือเมื่อมีแรงดันเอาต์พุตคกรวมโพลต์ RLC ดังรูปที่ 2.17



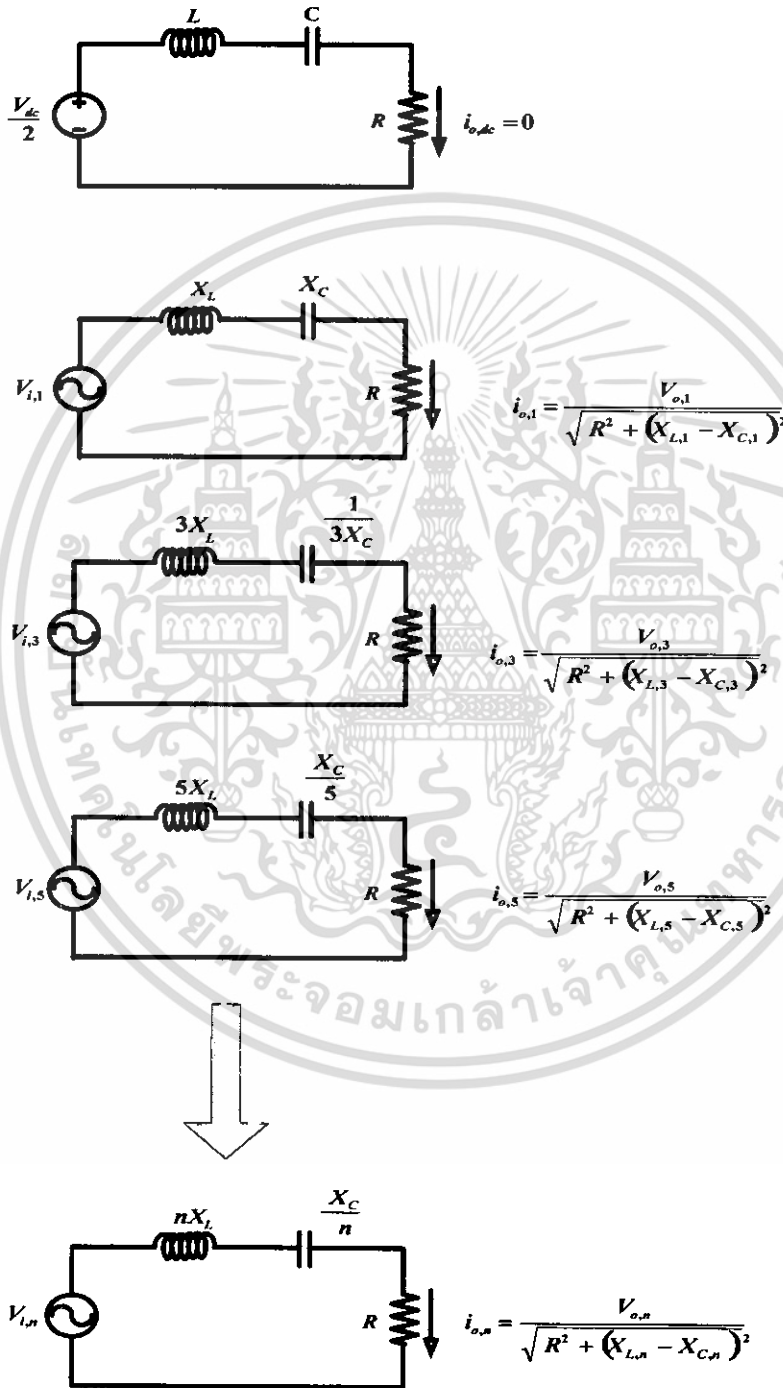
รูปที่ 2.17 วงจรการเกิดคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้ว่าที่แรงดันดีซีค่ากระแสมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากเกิด open circuit ที่ C (เมื่อความถี่เป็นศูนย์)

ที่แรงดันเอซี fundamental ค่ากระแสจะมีค่ามากที่สุดเพราะอิมพีแดนซ์รวมมีค่าต่ำที่สุดและแรงดันมีค่ามากที่สุด

ที่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,5,7,... จะมีค่ากระแสลดลงตามลำดับเนื่องจาก  $x_{L,n}$  มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.18 อธิบายกระแสที่ fundamental และ harmonic ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย 
$$v_{o,square} = \frac{V_{dc}}{2} + v_{i,1} + v_{i,3} + v_{i,5} + v_{i,7} + \dots$$

$$v_{o,square} = \frac{V_{dc}}{2} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{i,n}$$



$$\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{i,n} = v_{o,1} + v_{o,3} + v_{o,5} + v_{o,7} + \dots$$

$$v_{o,AC} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{o,n}$$

### 2.4.3 การคำนวณหาอัตราส่วนแรงดันฮาร์โมนิกต่างๆ เทียบกับแรงดันพินดาเมนทอล ในรูป transfer function ของ Quality factor (Q)

สมการแรงดันที่โหลด ( $v_o$ ) สามารถหาโดยใช้หลักการ voltage divider จากวงจรรูปที่ 2.17 ได้ดังนี้

$$V_{o,n} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + [X_{L,n} - X_{C,n}]^2}} (V_{i,n}) \quad (2)$$

จะได้ Transfer function

$$\frac{V_{o,n}}{V_{i,n}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left[ n\omega L - \frac{1}{n\omega C} \right]^2}} \quad (3)$$

$$\frac{V_{o,n}}{V_{i,n}} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left[ \left( \frac{n\omega L}{R} \right) \left( \frac{\omega_o}{\omega_o} \right) - \left( \frac{1}{n\omega CR} \right) \left( \frac{\omega_o}{\omega_o} \right) \right]^2}} \quad (4)$$

โดยวงจร RLC resonance มีค่า Quality factor (Q) ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o RC} \quad (5)$$

ดังนั้นสามารถเขียน Transfer function ที่อยู่ในรูปของค่า Quality factor ได้ดังสมการ

$$\frac{V_{o,n}}{V_{i,n}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ Q \frac{n\omega}{\omega_o} + Q \frac{\omega_o}{n\omega} \right]^2}} \quad (6)$$

$$\frac{V_{o,n}}{V_{i,n}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left[ \frac{n\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{n\omega} \right]^2}} \quad (7)$$

$$V_{o,n} = \frac{V_{i,n}}{\sqrt{1 + Q^2 \left[ \frac{n\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{n\omega} \right]^2}} \quad (8)$$

#### 2.4.4 การคำนวณหาแรงดันตกคร่อมตามจุดต่างๆ ในวงจร RLC เรโซแนนท์: $V_L, V_C$ ในรูปของ Quality factor (Q)

-พิจารณาแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

$$V_L = I_o \omega L \quad (9)$$

$$V_L = \frac{V_o}{R} \omega L \quad I_o = \frac{V_o}{R} \text{ เมื่อ}$$

$$V_L = \frac{V_o}{R} \omega L \left( \frac{\omega_o}{\omega_o} \right)$$

$$V_L = V_o Q \left( \frac{\omega}{\omega_o} \right) \quad (10)$$

จะเห็นว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำนั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับ Quality Factor

-พิจารณาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$$V_C = \frac{I_o}{\omega C} \quad (11)$$

$$V_C = \frac{V_o}{\omega CR} \quad \text{เมื่อ } I_o = \frac{V_o}{R}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_C = \frac{V_o}{\omega CR} \left( \frac{\omega_o}{\omega} \right)$$

$$V_C = V_o Q \left( \frac{\omega_o}{\omega} \right) \quad (12)$$

จะเห็นว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุนั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับ Quality Factor

#### 2.4.5 การคำนวณหาขนาดของกระแสฮาร์โมนิกต่าง ๆ ในรูปของแรงดันฮาร์โมนิกสัณฐาน

จาก  $V_{o,n}$  ในรูปของ Transfer function จากสมการที่ (2) เราสามารถคำนวณหาค่าของกระแส fundamental และองค์ประกอบ harmonic ที่ไหลได้ตั้งสมการ

$$I_{o,n} = \frac{V_{o,n}}{R} \quad (13)$$

$$I_{o,n} = \frac{V_{i,n}}{\sqrt{R^2 + R^2 Q^2 \left[ \frac{n\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{n\omega} \right]^2}} \quad (14)$$

โดยกระแสที่ไหลคือ  $i_o = i_{o,1} + i_{o,3} + i_{o,5} + i_{o,7} + \dots$

สามารถเขียนกระแสที่ไหลให้อยู่ในรูป Quality factor ได้คือ

$$I_{o,1} = \frac{V_{i,1}}{\sqrt{R^2 + R^2 Q^2 \left[ \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right]^2}} \quad (15)$$

$$I_{o,3} = \frac{V_{i,3}}{\sqrt{R^2 + R^2 Q^2 \left[ \frac{3\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{3\omega} \right]^2}} \quad (16)$$

$$I_{o,5} = \frac{V_{i,5}}{\sqrt{R^2 + R^2 Q^2 \left[ \frac{5\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{5\omega} \right]^2}} \quad (17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{o,7} = \frac{V_{i,7}}{\sqrt{R^2 + R^2 Q^2 \left[ \frac{7\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{7\omega} \right]^2}} \quad (18)$$

จากสมการที่ (14)-(18) เราสามารถเขียนในรูป  $X_{L,n}, X_{C,n}$  ได้โดยใช้สมการ  $V_{o,n} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + [X_{L,n} - X_{C,n}]^2}} (V_{i,n}$

เราจะได้

$$I_{o,n} = \frac{V_{i,n}}{\sqrt{R^2 + (X_{L,n} - X_{C,n})^2}} \quad (19)$$

$$I_{o,n} = \frac{V_{i,n}}{\sqrt{R^2 + \left( n\omega L - \frac{1}{n\omega C} \right)^2}} \quad (20)$$

$$I_{o,1} = \frac{V_{i,1}}{R} \quad (21)$$

$$I_{o,3} = \frac{V_{i,3}}{\sqrt{R^2 + \left( 3\omega L - \frac{1}{3\omega C} \right)^2}} \quad (22)$$

$$I_{o,5} = \frac{V_{i,5}}{\sqrt{R^2 + \left( 5\omega L - \frac{1}{5\omega C} \right)^2}} \quad (23)$$

$$I_{o,7} = \frac{V_{i,7}}{\sqrt{R^2 + \left( 7\omega L - \frac{1}{7\omega C} \right)^2}} \quad (24)$$

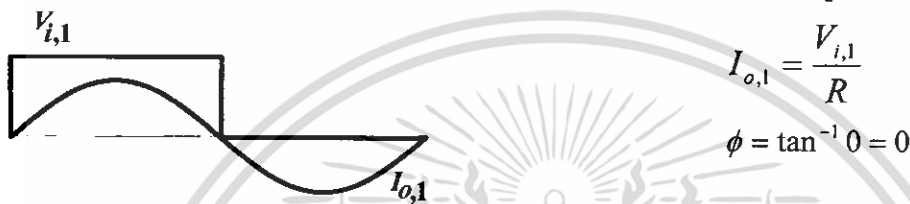
จะได้  $I_{o,1} \gg I_{o,3} \gg I_{o,5} \gg I_{o,7} \gg \dots$  ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลส่วนมากจะเกิดจากกระแส fundamental ส่วนกระแส harmonic นั้นจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสที่ไหลจึงมีลักษณะเป็น sine wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การคำนวณหาขนาดและมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสพินดาเมนทอลที่แรงดันพินดาเมนทอล ขณะปรับความถี่ที่ค่าเรโซแนนซ์, ที่ค่ามากกว่าเรโซแนนซ์และที่ค่ามาก ๆ กว่าเรโซแนนซ์

พิจารณาที่ความถี่สวิตช์มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์

- ที่  $f_s = f_r$
- จะได้  $X_L = X_C$  ดังนั้น  $X_L - X_C = 0$  จึงไม่มีผลจากค่า reactance ปรากฏ เหมือนว่าโหลดในขณะนี้มีแต่ค่า resistance เราจะได้ว่าค่ากระแสที่ไหลจะมีค่าสูงสุด และกระแสจะอินเฟสกับแรงดันที่ไหลเนื่องจากโหลด resistance เช่นกันดังรูป



รูปที่ 2.19 คลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่สวิตช์มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อพิจารณาที่ความถี่สวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์(over resonance)

- ที่  $f_s > f_r$
- จะได้ กระแส  $I_1$  มีค่าลดลงมากกว่า  $I_1$  ในกรณี  $f_s = f_r$  เนื่องจากมีผลของค่า reactance ปรากฏขึ้น

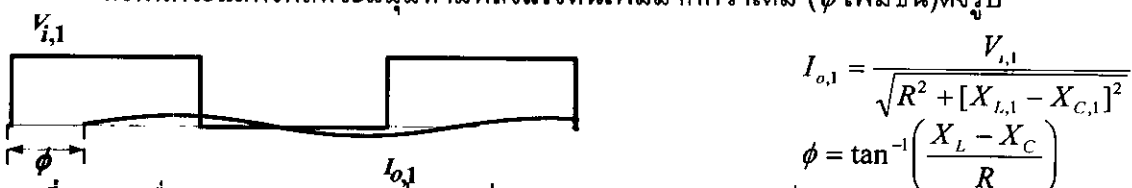
ที่ความถี่สูงจะส่งผลให้ค่า  $X_L$  จะมีค่ามาก (high impedance) ส่วนค่า  $X_C$  จะมีค่าน้อย (low impedance) ดังนั้น  $X_L > X_C$  ทำให้โหลดแสดงความเป็น RL ออกมาทำให้กระแสที่ไหล

ตามหลังแรงดันที่ไหลโดยมุมที่กระแสตามหลังแรงดันด้วยมุม  $\phi$  ดังรูป



รูปที่ 2.20 คลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่สวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์

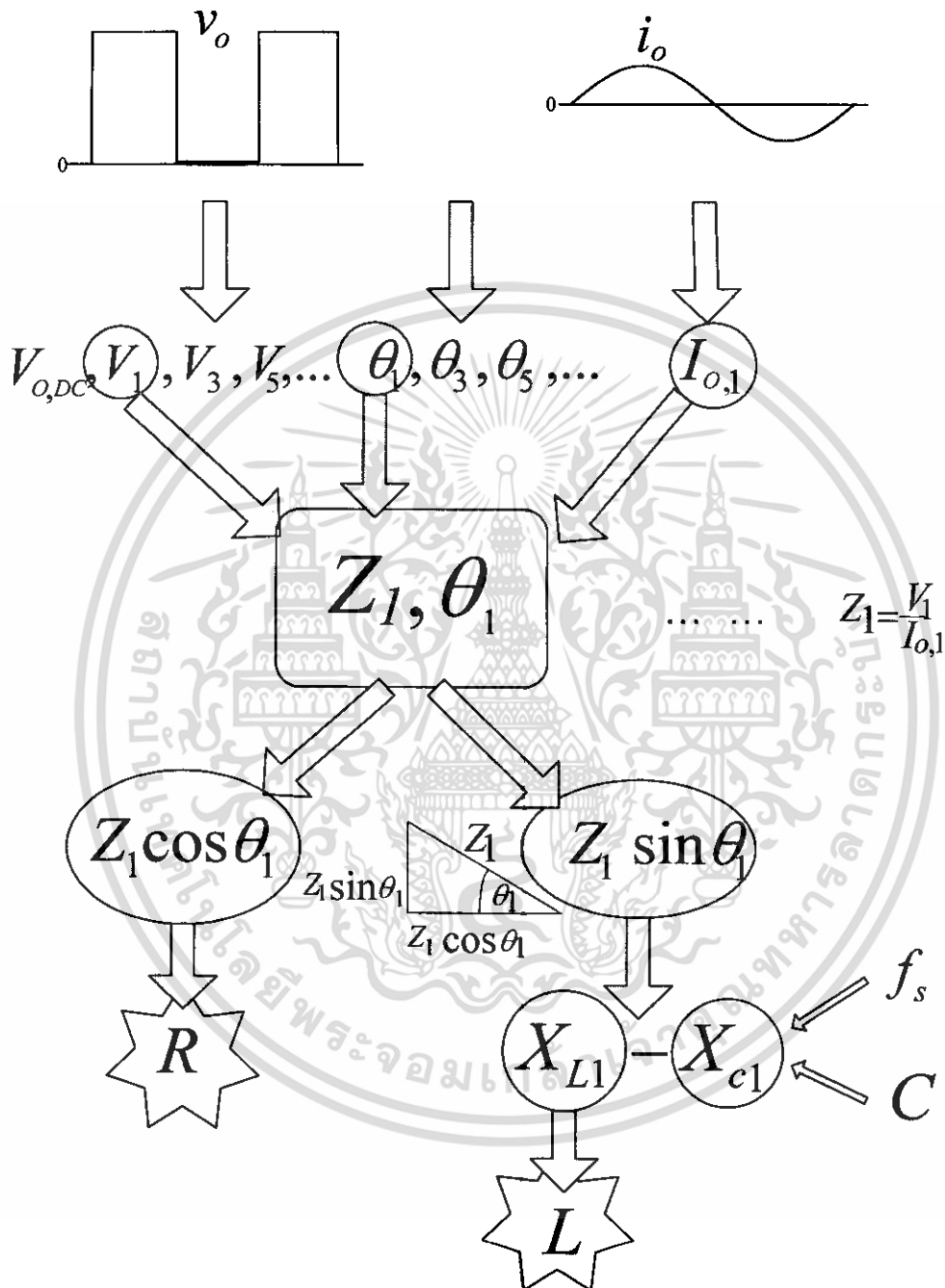
- ที่  $f_s \gg f_r$  จะได้ค่ากระแส  $I_1$  จะมีค่าลดลงมากกว่า  $I_1$  ในกรณี  $f_s > f_r$  เนื่องจากผลของค่า reactance ที่มีค่าเพิ่มขึ้นคือ  $X_L \gg X_C$  จะเห็นได้ว่าโหลดมีความเป็น RL เพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสที่ไหลจะมีมุมตามหลังแรงดันเพิ่มมากกว่าเดิม ( $\phi$  เพิ่มขึ้น) ดังรูป



รูปที่ 2.21 คลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่สวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า R และ L ของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 2.22 Flow chart แสดงขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ R, L, C ของโหลด

เราสามารถคำนวณค่า L และ R ของ Load ได้ดัง flow chart รูปที่ 2.22 โดยที่  
 วัดรูปคลื่น  $v_o, i_o$  แล้วนำมาแตกฟูเรียร์ เพื่อหาส่วนประกอบ fundamental พร้อมกับมุมต่างเฟส  
 $(\theta_1)$  ระหว่างแรงดันพินดาเมนทอล ( $V_1$ ) และกระแสพินดาเมนทอล ( $I_{o,1}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบ

#### 3.1 ขั้นตอนการคำนวณและออกแบบ

3.1.1 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า  $R, L, C, f_{sw}, THD_i$  ของขดลวดเหนี่ยวนำ จากค่าวัตต์ ( $P_o$ ), แรงดันสแควร์ ( $V_1$ ), เอาก์พุกเพาเวอร์แฟกเตอร์ ( $\cos \theta_1$ ), Quantity factor ( $Q$ ), ความถี่เรโซแนนท์ ( $f_r$ ) ที่กำหนดให้

1. กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าเอาก์พุกของอินเวอร์เตอร์,  $P$
2. ทำการหาค่า RMS Voltage จากสมการ,  $V_1$

$$V_1 = \frac{4 V_{dc}}{\pi} \frac{1}{2\sqrt{2}}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc}$$

V

3. กำหนดค่าตัวประกอบกำลัง p.f. ,  $\cos \theta_1$
4. สามารถหาค่า RMS Current  $I_1$  จากสมการ

$$P = V_1 I_{o,1} \cos \theta_1$$

W

โดยแทนค่า  $P =$  กำลังไฟฟ้าเอาก์พุกของอินเวอร์เตอร์ (จากข้อ 1)

$$V_1 = \text{Voltage (จากข้อ 2)}$$

$$\cos \theta_1 = p.f. \text{ (จากข้อ 3)}$$

จะได้

$$I_{o,1} = \frac{P}{V_1 \cos \theta_1}$$

A

5. สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์  $Z_1$  จากสมการ

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_{o,1}}$$

 $\Omega$ 

6. สามารถหาค่าตัวต้านทาน R จากสมการ

$$R = Z_1 \cos \theta_1$$

 $\Omega$ 

7. สามารถหาค่า  $X_{L,1} - X_{C,1}$  จากสมการ

$$X_{L,1} - X_{C,1} = Z_1 \sin \theta_1$$

 $\Omega$ 

8. กำหนดค่า Q และความถี่ resonant :  $\omega_o = 2\pi f_r$

9. สามารถหาค่า L ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \frac{\omega_o L}{R}$$

$$L = \frac{QR}{\omega_o}$$

$$L = \frac{QR}{2\pi f_r}$$

H

10. สามารถหาค่า C ได้จากสมการ

$$Q = \frac{1}{\omega_o RC}$$

$$C = \frac{1}{\omega_o RQ}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_r RQ}$$

F

11. หาค่า switching frequency ,  $f_{sw}$  จากสมการ

$$X_L - X_C = Z_1 \sin \theta_1$$

$$\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} = Z_1 \sin \theta_1$$

$$\frac{\omega_1^2 LC - 1}{\omega_1 C} = Z_1 \sin \theta_1$$

$$\omega_1^2 LC - (Z_1 \sin \theta_1) C \omega_1 - 1 = 0$$

$$f_{sw} = \frac{\omega_1}{2\pi}$$

Hz

12. หาค่า Harmonics ของ out current จากสมการ

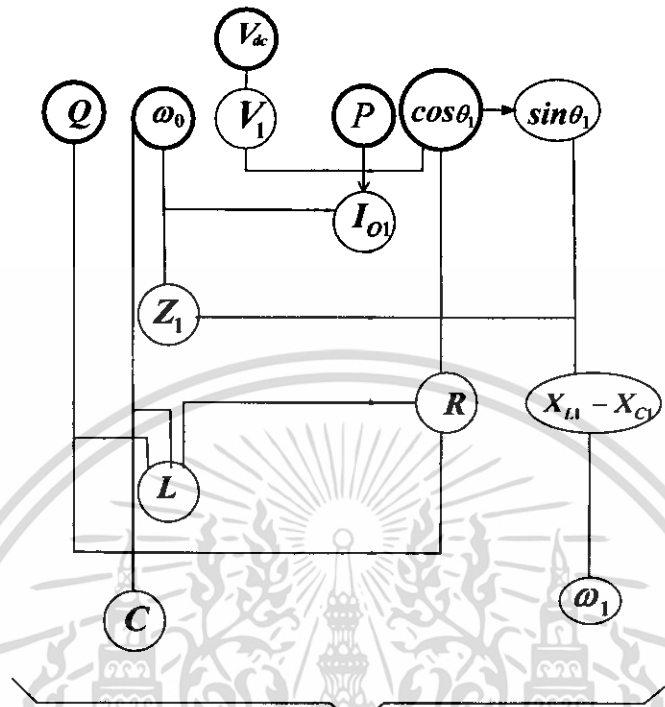
$$I_n = \frac{V_{i,n}}{R \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{n\omega_1}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{n\omega_1} \right)^2}} \quad A$$

13. หาค่า % THD<sub>i</sub> จากสมการ

$$\%THD_i \approx \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}}{I_1} \times 100\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายขึ้นได้โดยรูปภาพดังนี้



$$I_n = \frac{V_{i,n}}{R \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{n\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{n\omega_1} \right)^2}}$$

$$I_3, I_5, I_7, \dots$$

โดย

$$I_{o1} = \frac{P}{V_1 \cos \theta_1}$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_{o1}}$$

$$R = Z_1 \cos \theta_1$$

$$\frac{\omega_0 L}{R} = Q$$

$$\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} = Z_1 \sin \theta_1$$

$$\%THD_1 \approx \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}}{I_1} \times 100\%$$

รูปที่ 3.1 Flow chart แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การออกแบบขดลวด

เหนี่ยวนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนด parameter ต่างๆ ดังนี้

$P_{output} = 1500 \text{ W}$  ,  $V_{dc} = 310 \text{ V}$  , 0.8 p.f. lagging , ความถี่ resonant = 30 kHz ,  $Q = 4$

หาค่า voltage

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} (310) = 140 \text{ V}$$

หาค่า current

$$I_{o,1} = \frac{P}{V_1 \cos \theta_1}$$

$$I_{o,1} = \frac{1500}{140 \times 0.8} = 13.39 \text{ A}$$

หาค่า Z

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_{o,1}}$$

$$Z_1 = \frac{140}{13.39} = 10.45 \Omega$$

หาค่า R

$$R = Z_1 \cos \theta_1$$

$$R = (10.45)(0.8) = 8.36 \Omega$$

หาค่า  $X_L X_C$

$$Z_1 \sin \theta_1 = X_{L,1} - X_{C,1}$$

$$Z_1 \sin(\cos^{-1} 0.8) = X_{L,1} - X_{C,1}$$

$$10.45 \sin(\cos^{-1} 0.8) = X_{L,1} - X_{C,1}$$

$$4.56 \Omega = X_{L,1} - X_{C,1}$$

หาค่า L

$$\frac{\omega_0 L}{R} = Q$$

$$\frac{2\pi \times 30 \times 10^3 L}{8.36} = 4$$

$$L = 0.177 \text{ mH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า C

$$\frac{1}{\omega_0 RC} = Q$$

$$\frac{1}{2\pi \times 30 \times 10^3 \times 8.36 \times C} = 4$$

$$C = 0.16 \mu F$$

หาค่า  $f_1$

$$X_L - X_C = Z_1 \sin \theta_1$$

$$\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} = 4.56$$

$$\frac{\omega_1^2 LC - 1}{\omega_1 C} = 4.56$$

$$\omega_1^2 LC - 4.56 \omega_1 C - 1 = 0$$

$$\omega_1 = 200 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$$

$$f_1 = \frac{200 \times 10^3}{2\pi}$$

$$f_1 = 32 \text{ kHz}$$

หาค่า  $I_n$

$$I_n = \frac{V_{1,n}}{R \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{n\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{n\omega_1} \right)^2}}$$

$$I_3 = \frac{140/3}{8.36 \sqrt{1 + 4^2 \left( \frac{3(200 \times 10^3)}{2\pi(30 \times 10^3)} - \frac{2\pi(30 \times 10^3)}{3(200 \times 10^3)} \right)^2}}$$

$$I_3 = 0.485 \text{ A}$$

$$I_5 = \frac{140/5}{8.36 \sqrt{1 + 4^2 \left( \frac{5(200 \times 10^3)}{2\pi(30 \times 10^3)} - \frac{2\pi(30 \times 10^3)}{5(200 \times 10^3)} \right)^2}}$$

$$I_5 = 0.164 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_7 = \frac{140/7}{8.36 \sqrt{1 + 4^2 \left( \frac{7(200 \times 10^3)}{2 \pi (30 \times 10^3)} - \frac{2 \pi (30 \times 10^3)}{7(200 \times 10^3)} \right)^2}}$$

$$I_7 = 0.082 \text{ A}$$

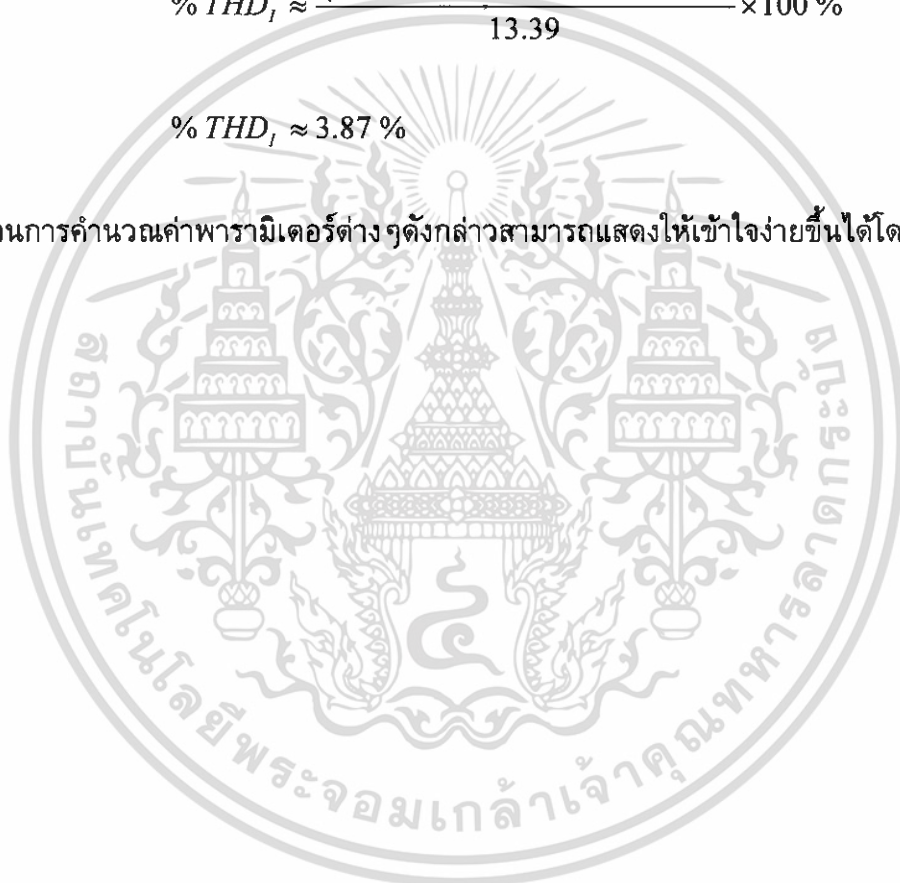
หาค่า %THD<sub>1</sub>

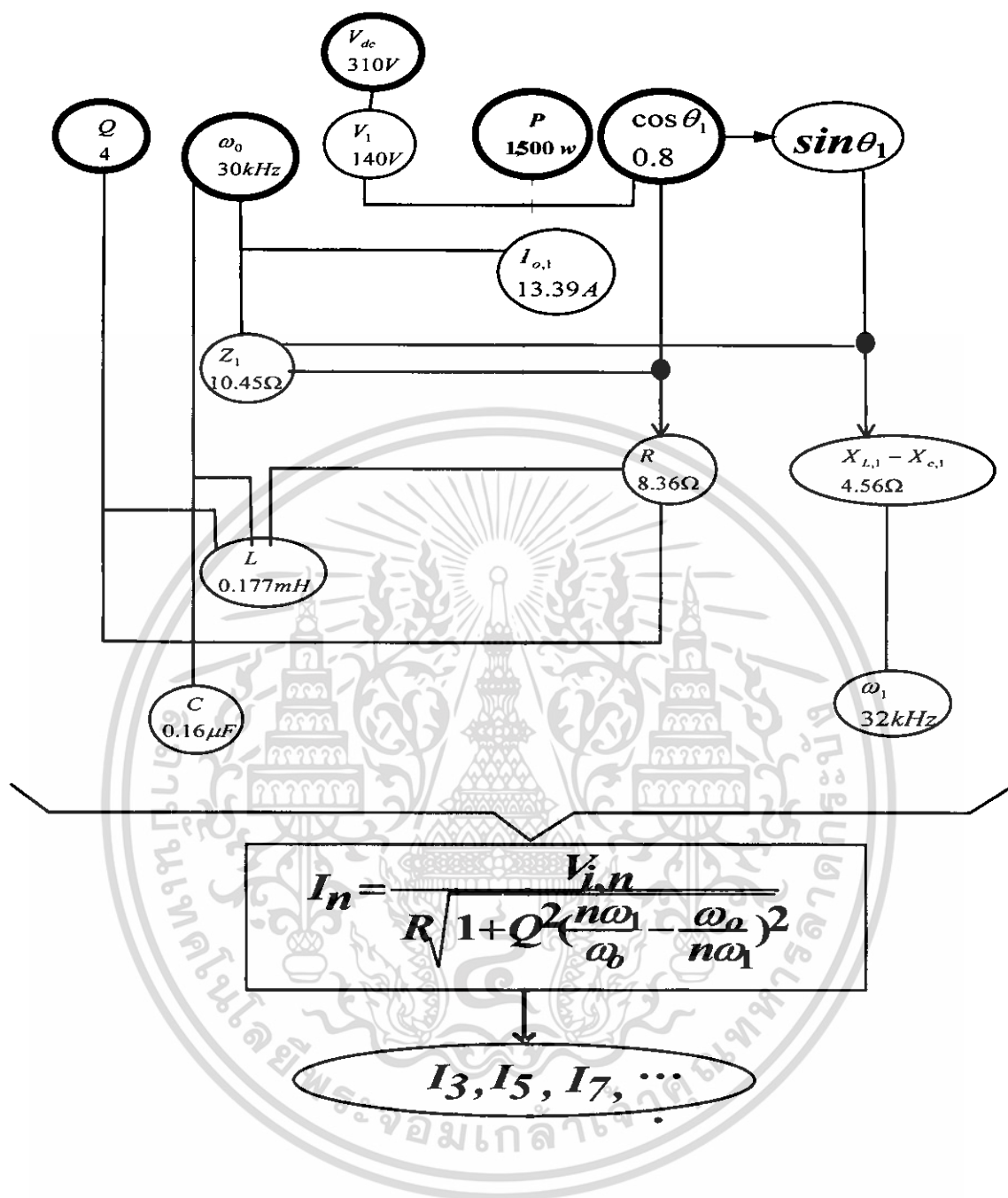
$$\% THD_1 \approx \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\% THD_1 \approx \frac{\sqrt{(0.485)^2 + (0.164)^2 + (0.082)^2}}{13.39} \times 100 \%$$

$$\% THD_1 \approx 3.87 \%$$

ซึ่งขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายขึ้นได้โดยรูปภาพดังนี้

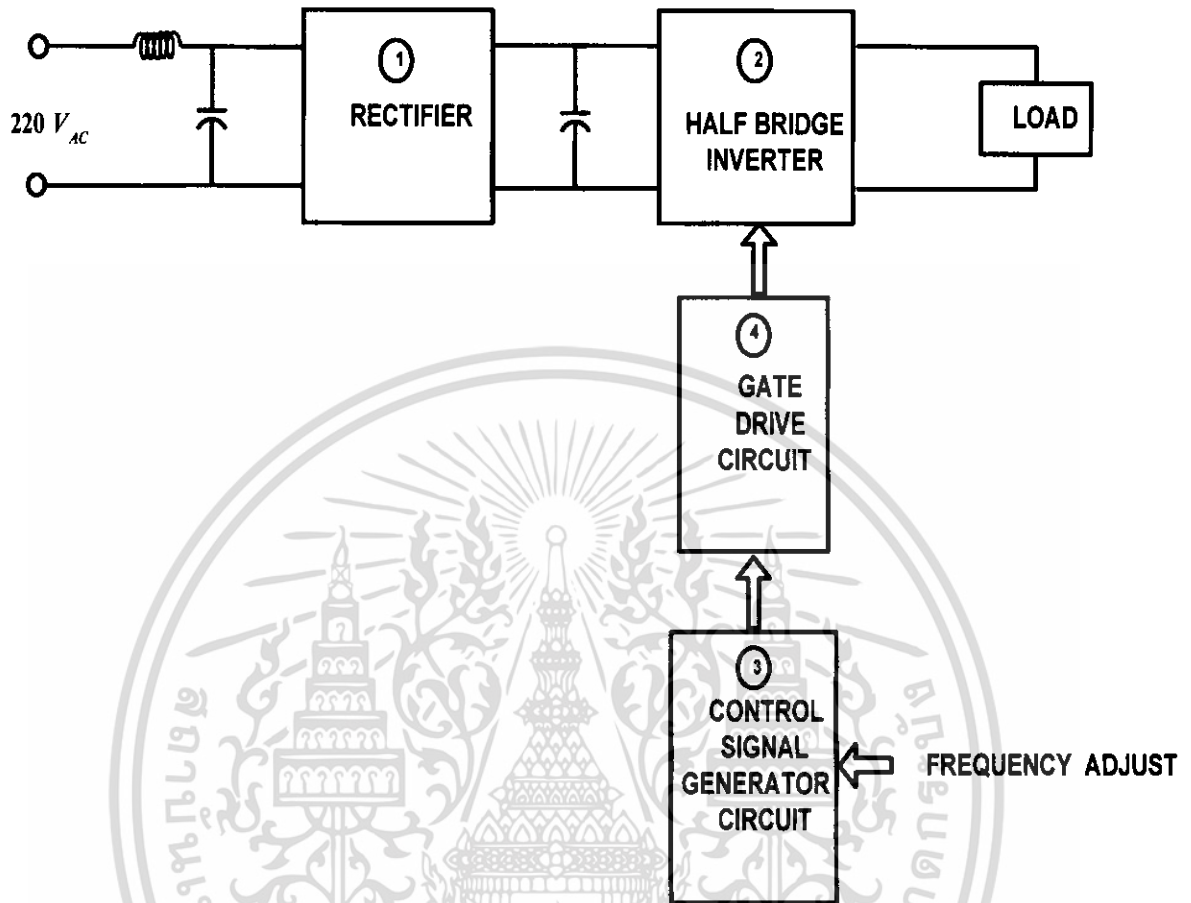




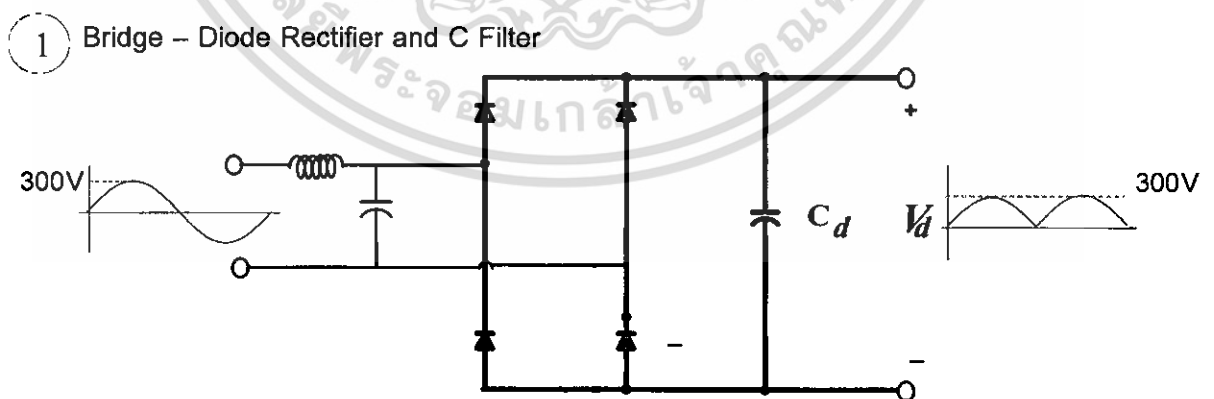
รูปที่ 3.2 Flow chart แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ การออกแบบขดลวด เหนี่ยวนำความร้อน โดยแสดงตัวเลขการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.3 Block Diagram ของขั้นตอนการออกแบบอินเวอร์เตอร์

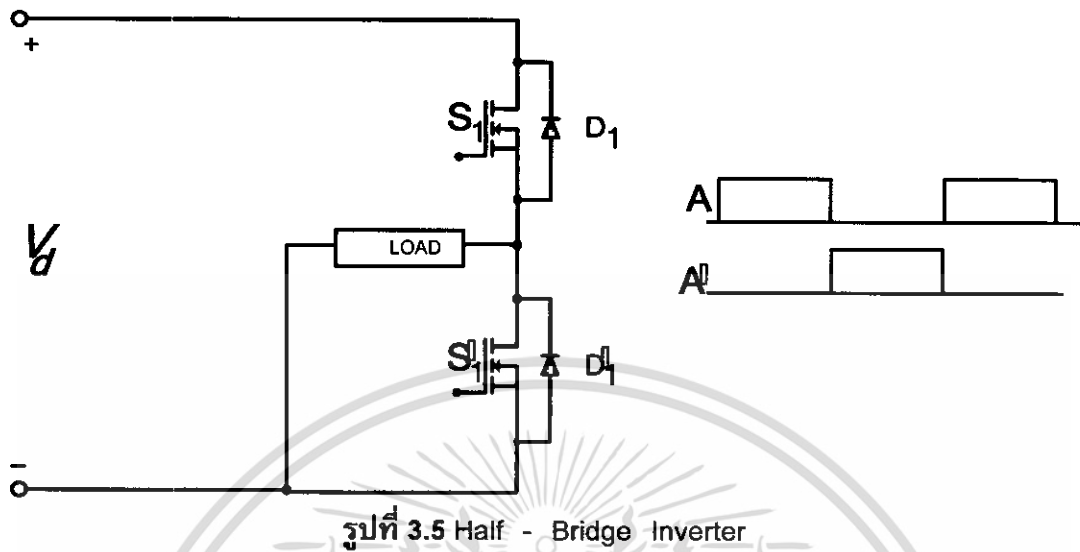


รูปที่ 3.4 Bridge – Diode Rectifier and C Filter

ส่วนที่ 1 เป็นส่วน input ของ inverter ใช้ bridge diode rectifier แปลงไฟ AC line 220 V เป็นไฟDC แล้วใช้  $C_d$  ที่มีค่ามากๆ กรองแรงดันให้เรียบในโครงการนี้ใช้ 2820

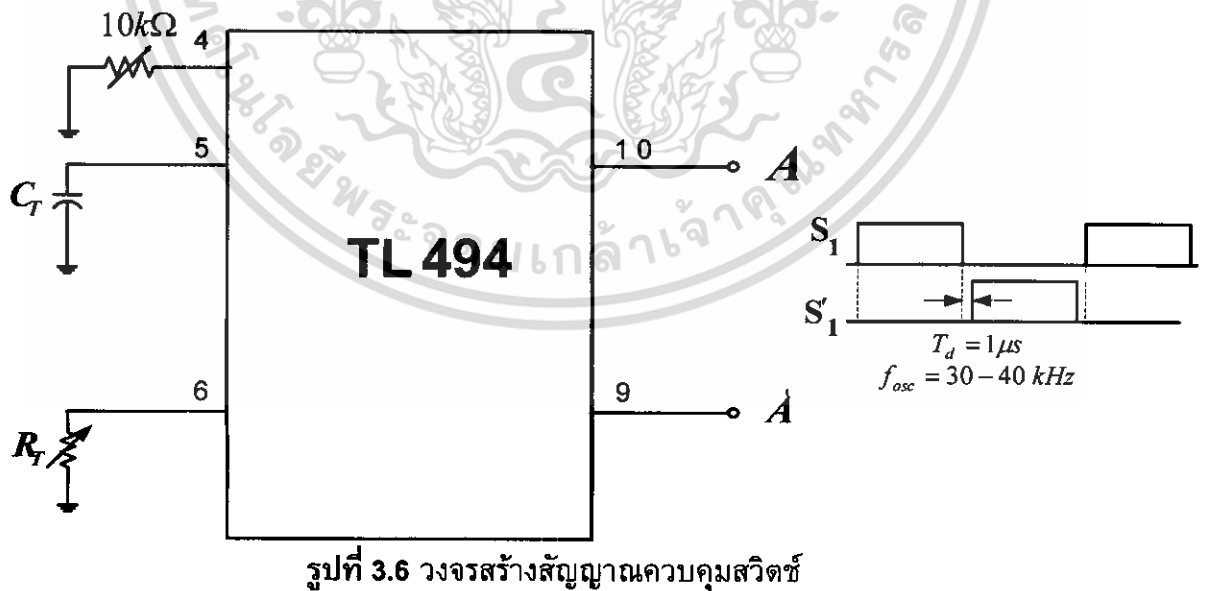
เอกส  $\mu F$  เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ (Half - Bridge Inverter )



ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนของ half - bridge inverter ซึ่งมี power mosfet เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยเลือกใช้ IRFP 460 ซึ่งมีพิ้งค์แรงดัน 500 V และพิ้งค์กระแส 50 A ก็สามารถจ่ายโหลดที่ได้ออกแบบขึ้นตามที่น่าเสนอไปแล้ว

3. วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ ( Control signal generator )



ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของวงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์  $S_1$  และ  $S_1'$  ในวงจร half - bridge inverter ในโครงงานนี้ใช้ IC เบอร์ TL 494 ซึ่งสามารถปรับความถี่ของสัญญาณตามที่ต้องการได้โดยการปรับ  $R_T$  และ  $C_T$  โดยความถี่ที่ปรับได้เป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยนี้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T C_T}$$

แต่ในที่นี้เราคงที่ค่า  $C_T$  ไว้เท่ากับ  $0.01 \mu F$  ส่วน  $R_T$  นั้นเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เนื่องจากเรากำหนดให้ความถี่ resonance เท่ากับ  $30 \text{ kHz}$  และตัวเก็บประจุ  $C_T$  มีค่าเท่ากับ  $0.01 \mu F$  เพราะเราจะหาค่า  $R_T$  จากสมการ

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T C_T}$$

$$30 \times 10^3 = \frac{1.1}{R_T (0.01 \times 10^{-6})}$$

$$R_T = 3.67 \text{ k}\Omega$$

ที่  $40 \text{ kHz}$  จะได้ค่า  $R_T$  จากสมการ

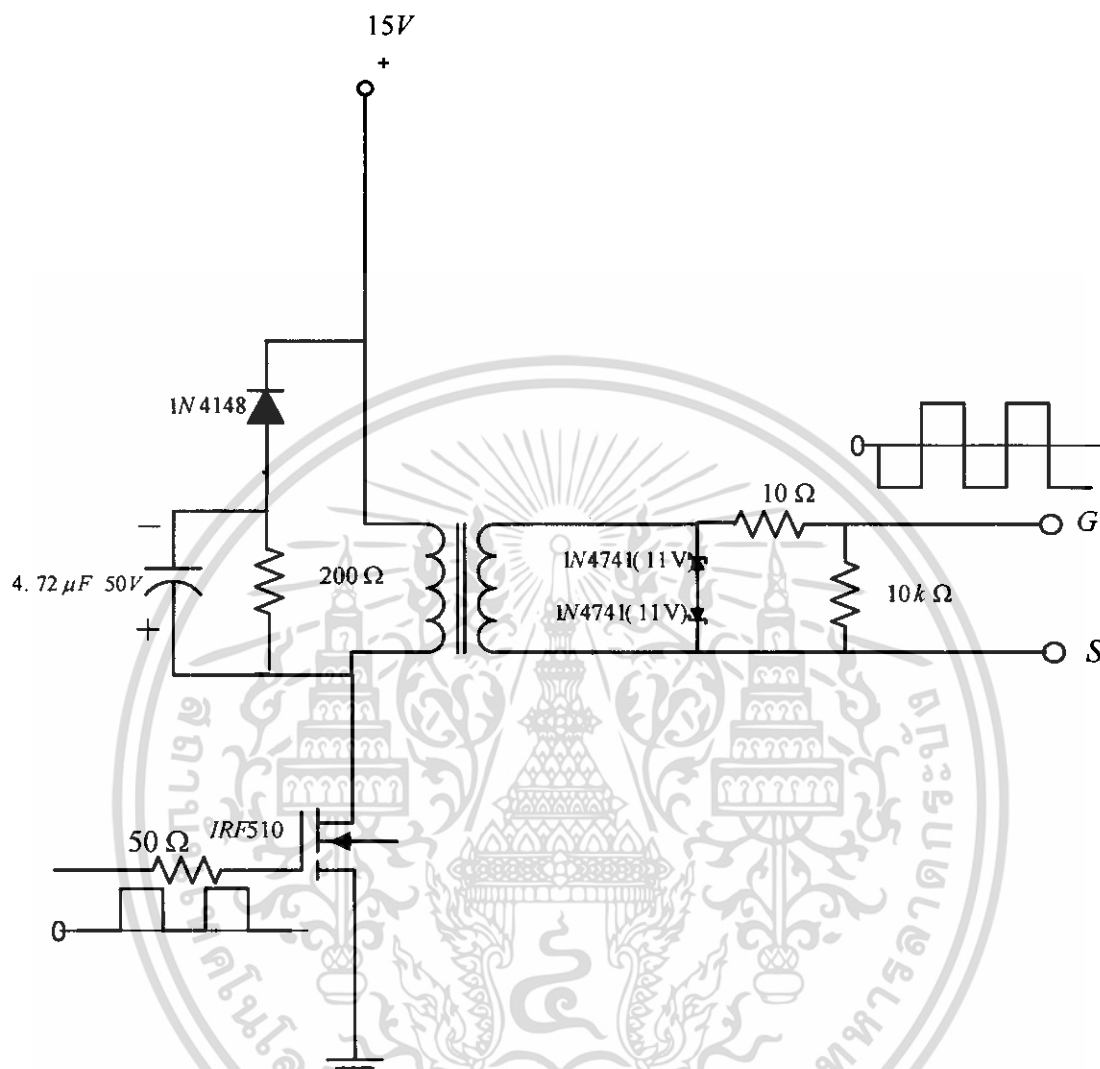
$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T C_T}$$

$$40 \times 10^3 = \frac{1.1}{R_T (0.01 \times 10^{-6})}$$

$$R_T = 2.75 \text{ k}\Omega$$

เมื่อเราใช้ความถี่อยู่ในย่าน  $30 - 40 \text{ kHz}$  เราจึงเลือกเป็น R ปรับค่าได้มีค่าความต้านทานเท่ากับ  $5 \text{ k}\Omega$

4. วงจรขับเกต ( gate drive circuit )



รูปที่ 3.7 วงจรขับเกต

ในส่วนที่ 5 เป็นส่วนของวงจรขับเกตซึ่งทำหน้าที่สองอย่างดังนี้

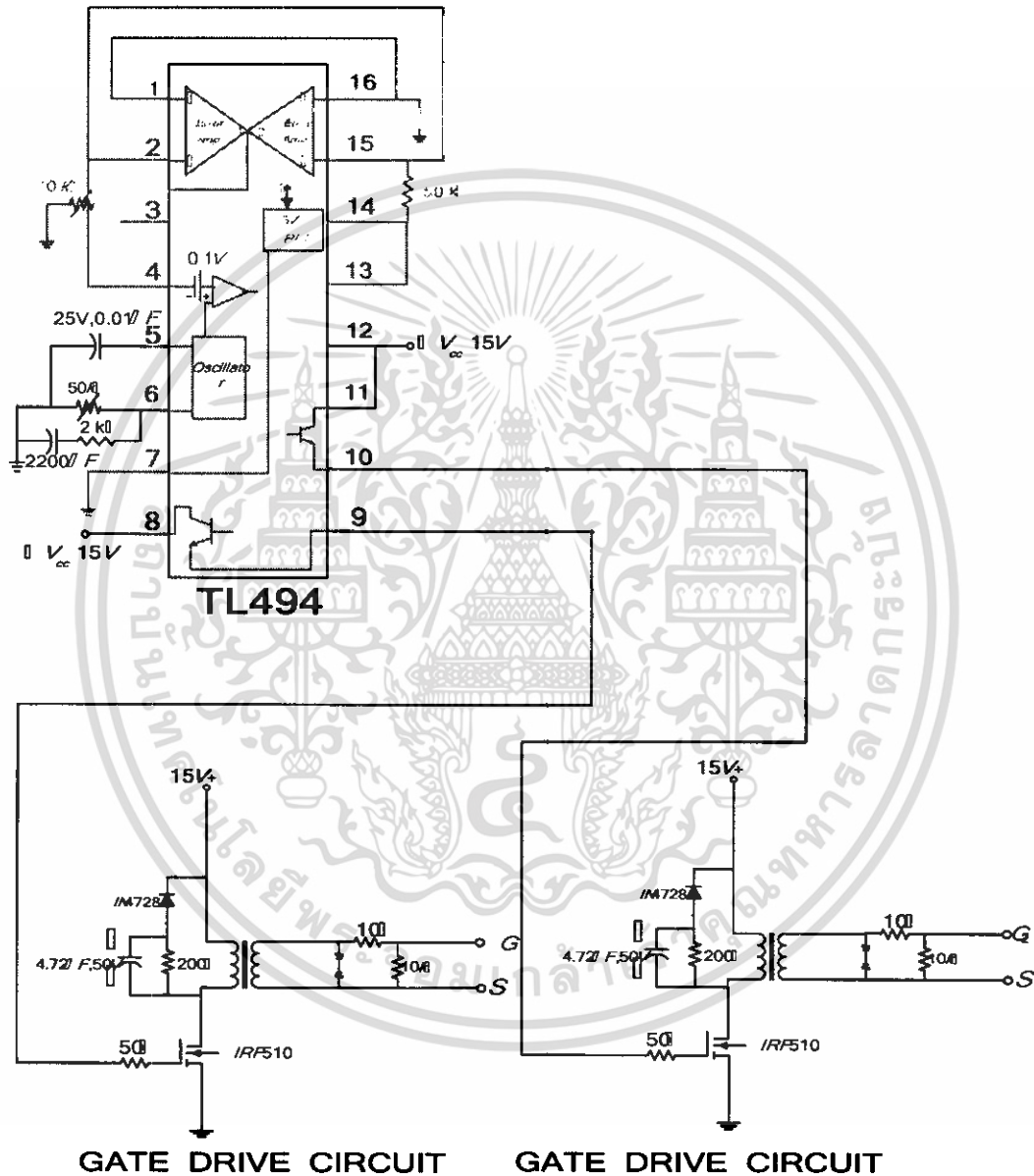
1. ทำหน้าที่แยกทางไฟฟ้าระหว่างส่วนของวงจรกำลังและวงจรส่วนสร้างสัญญาณ
2. สร้างสัญญาณบวก กับ ลบ เพื่อ ON และ OFF power mosfet จากสัญญาณอินพุตบวก กับ ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมและวงจรขับเกท

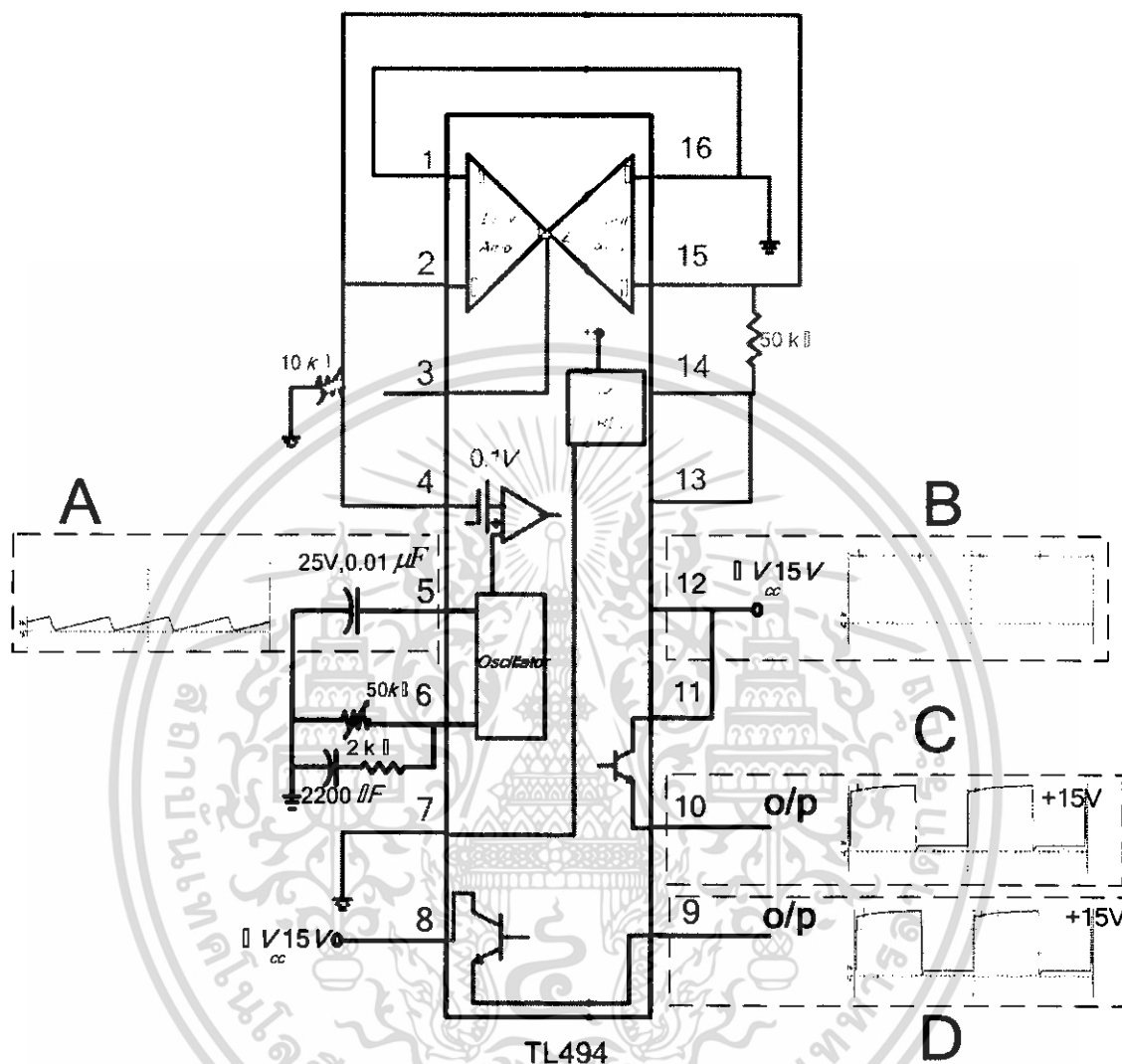


รูปที่ 4.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมและวงจรขับเกท

TL 494 เป็น IC อนาล็อก 16 ขาที่ใช้สร้างสัญญาณพัลส์สองสัญญาณที่อินเวอร์สกัน (ที่ขา 9 และ ขา 10) ที่สามารถปรับเดดไทม์ (โดยการปรับ R ที่ขา 4) และความถี่ (โดยการปรับ R ที่ขา 6) ได้

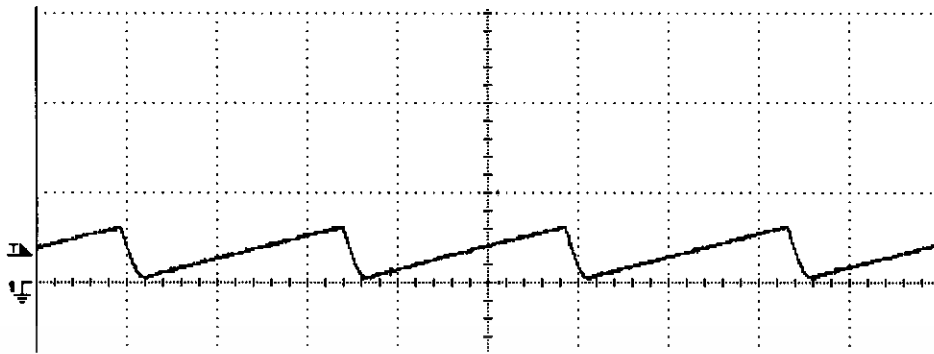
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.1 วงจร TL 494



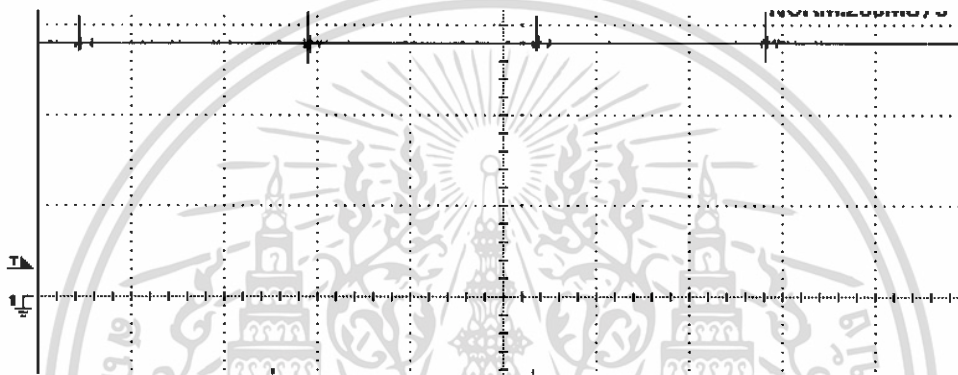
รูปที่ 4.2 วงจร TL 494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

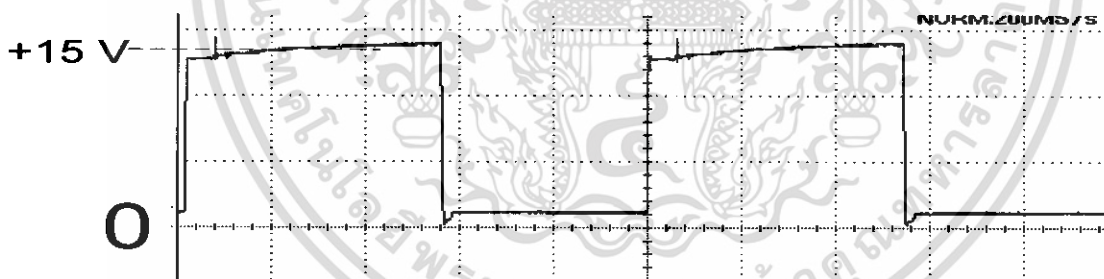


A

รูปที่ 4.2.1 สัญญาณ Saw tooth ที่ขา 5 ของ TL 494

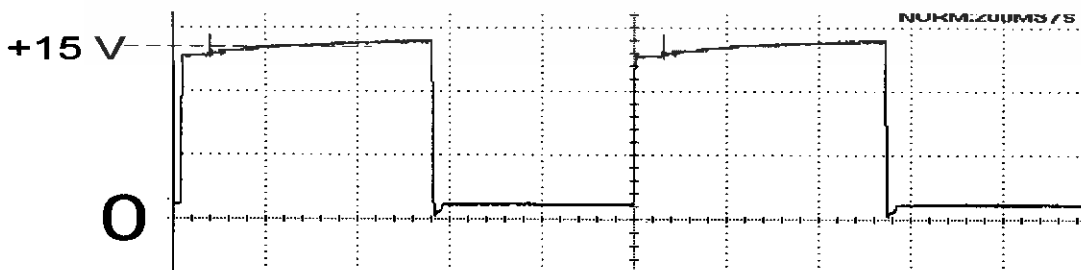


B

รูปที่ 4.2.2 สัญญาณ  $V_{\infty}$  ที่ขา 12 ของ TL 494

C

รูปที่ 4.2.3 สัญญาณ Output ที่ขา 9 ของ TL 494



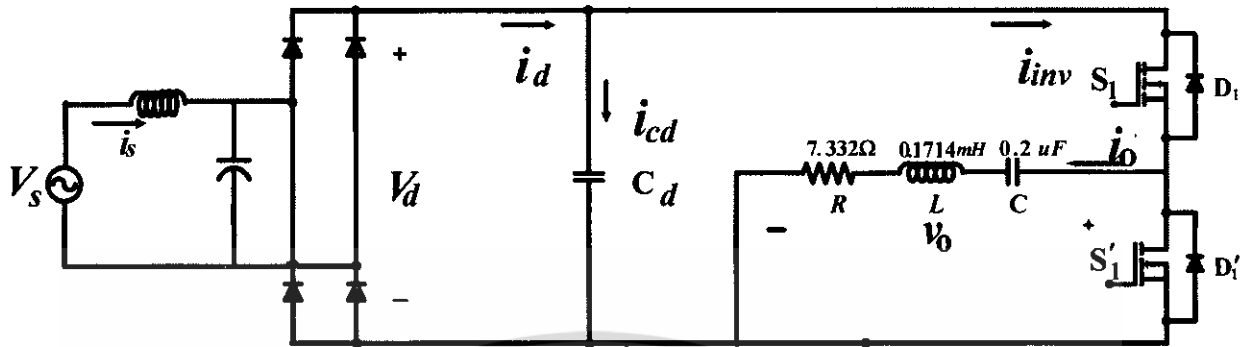
D

รูปที่ 4.2.4 สัญญาณ Output ที่ขา 10 ของ TL 494

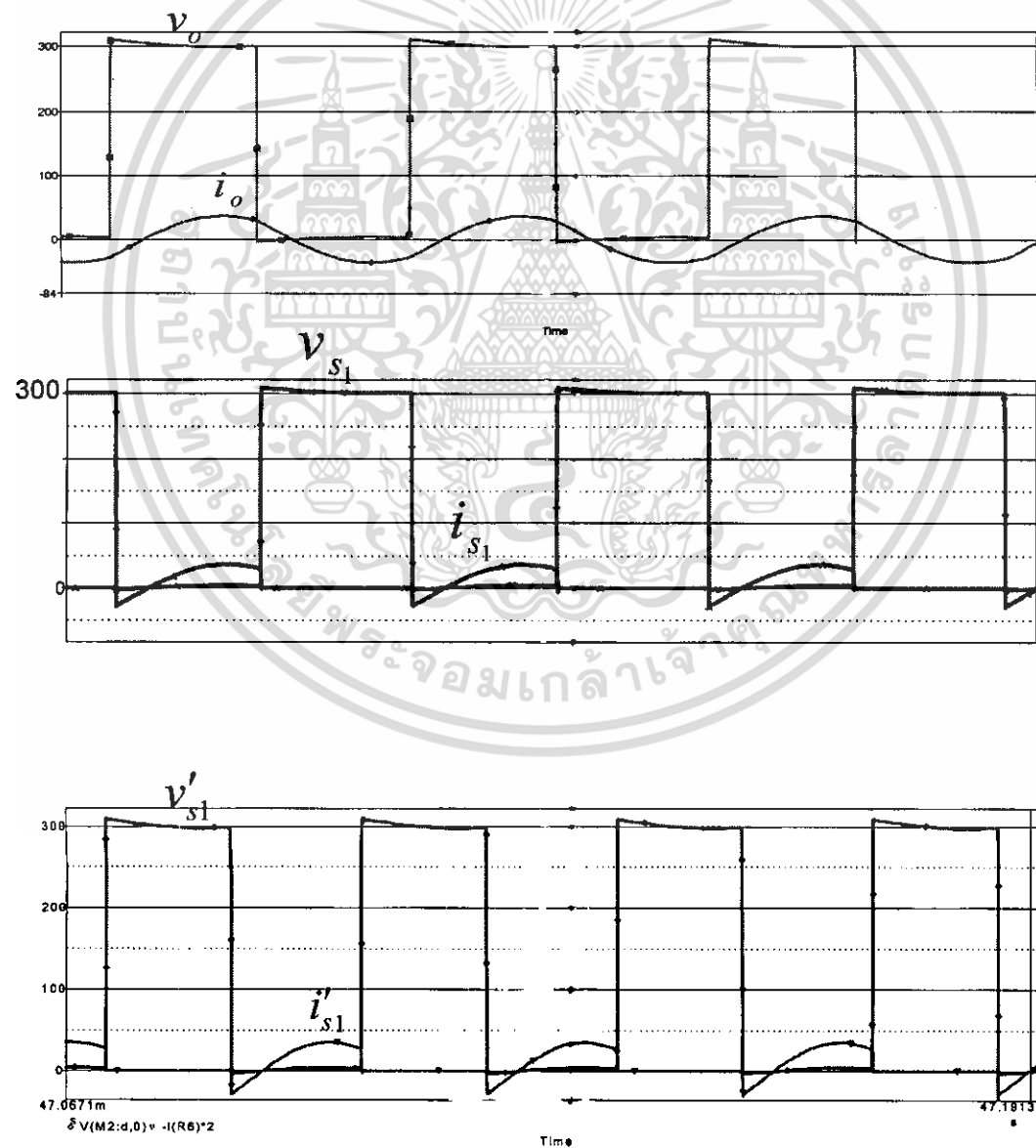
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



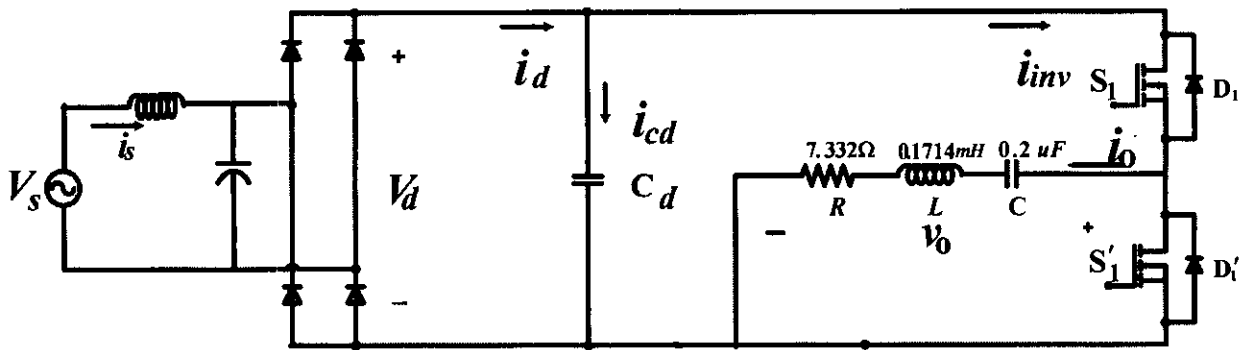
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการ simulation ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ จากโปรแกรม Pspice



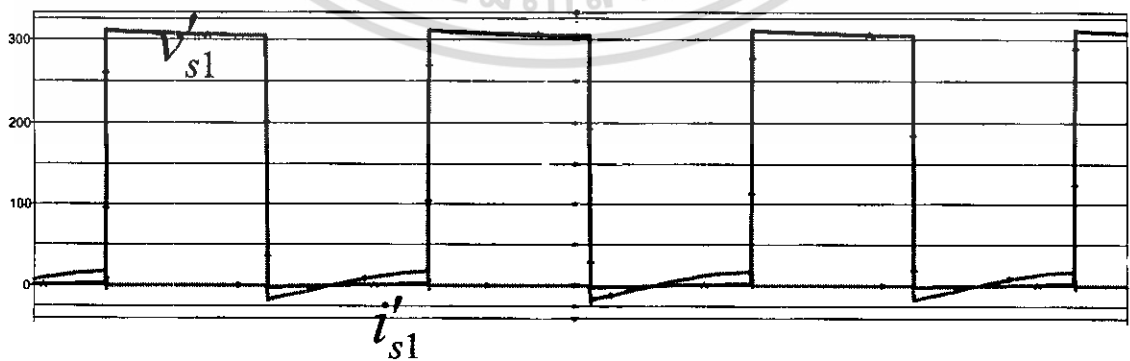
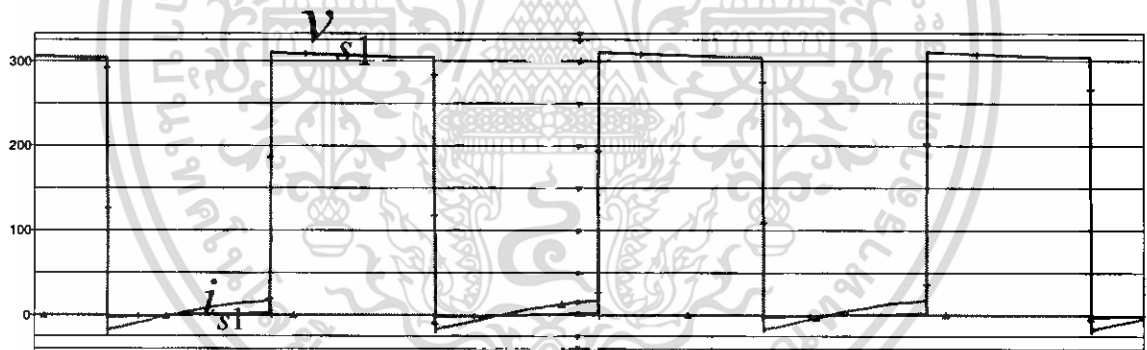
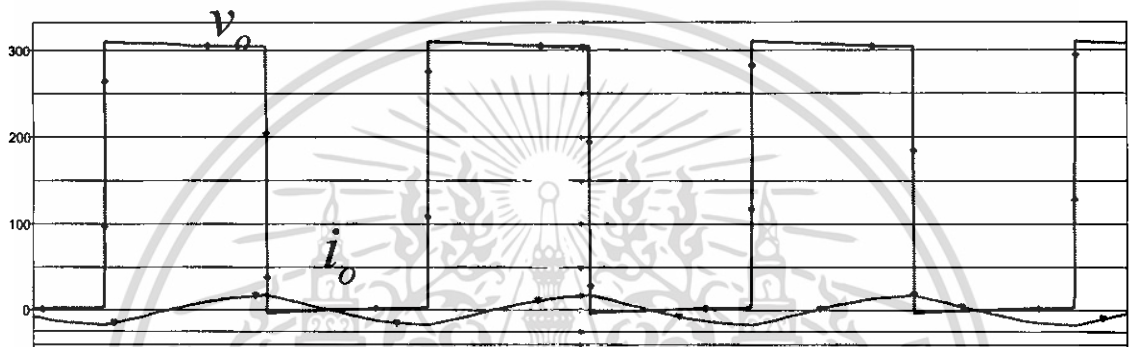
รูปความถี่ 30 kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

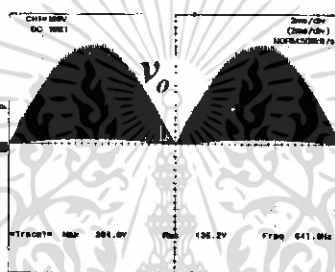
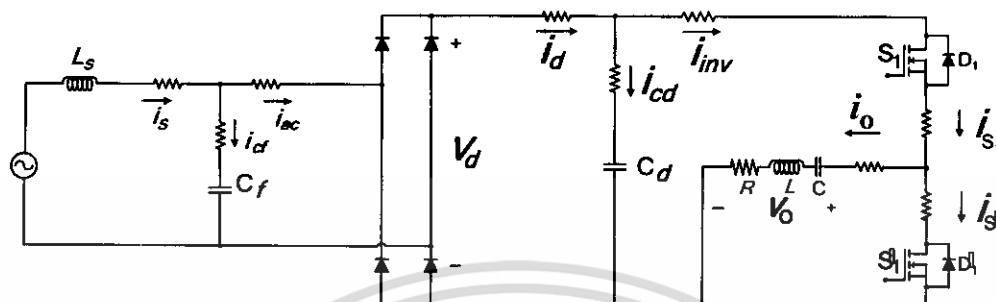


รูปความถี่ 40 kHz

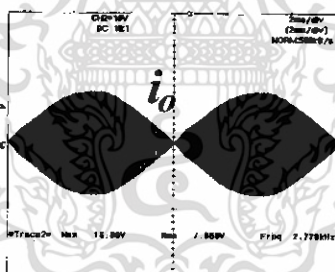


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

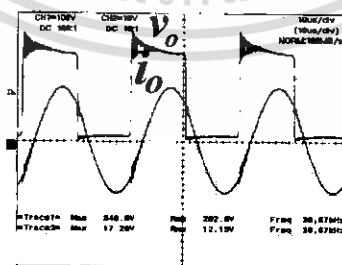
4.3 ผลการทดลองและเปรียบเทียบกับผลการซิมูเลตคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ  
ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30.5 kHz



(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



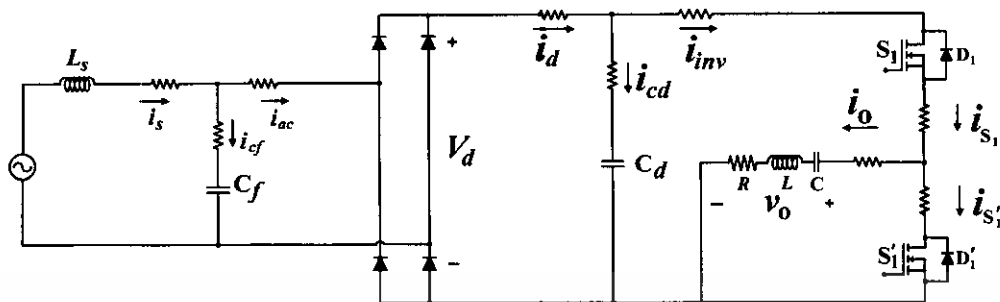
(ข) คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



(ค) คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต เมื่อ Time/Div = 10  $\mu$ s (ขยาย)

รูปที่ 4.4 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตจากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



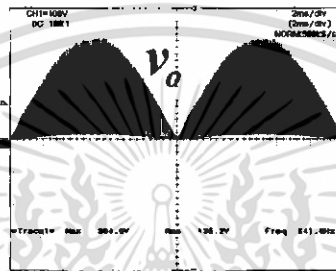
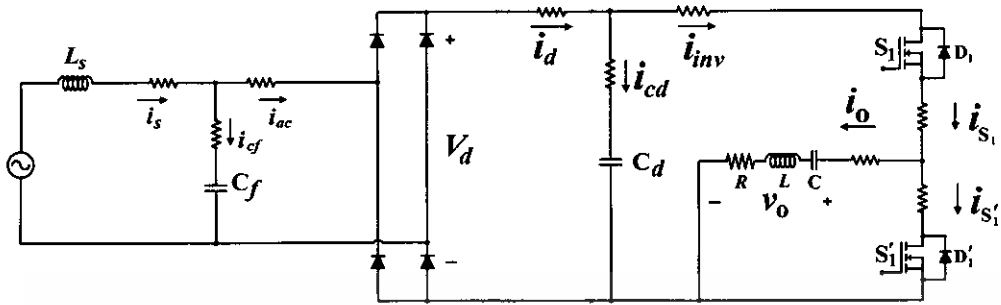
(ข) คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



(ค) คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

รูปที่ 4.5 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตจากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

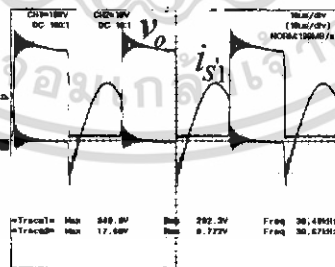
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

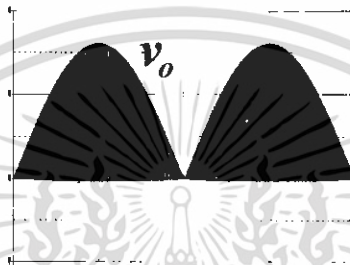
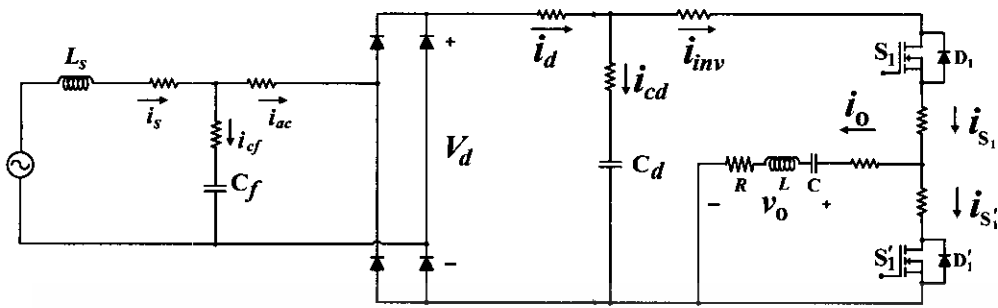


(ข) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1'$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

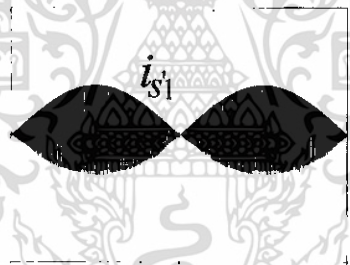


(ค) คลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1'$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)  
 รูปที่ 4.6 คลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1'$  จากการทดลองที่ความถี่ในการ  
 สวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

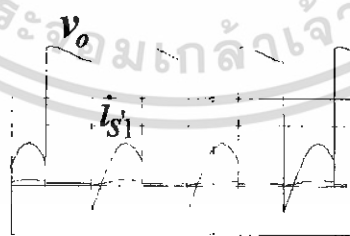
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

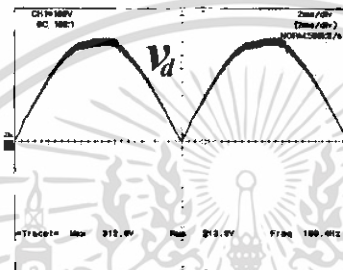
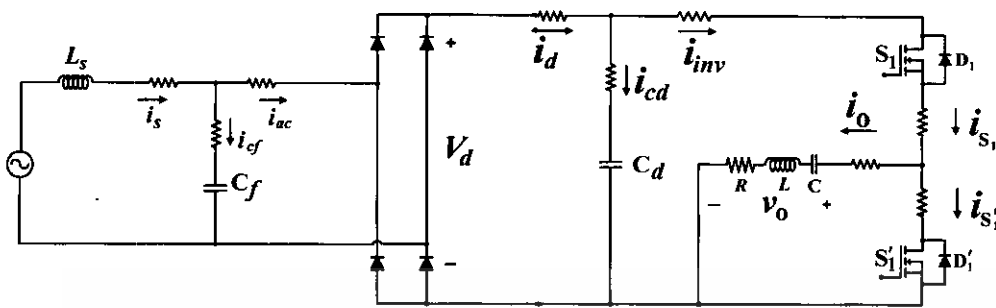


(ข) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

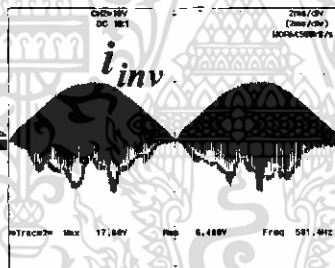


(ค) คลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)  
 รูปที่ 4.7 คลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1$  จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice  
 ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

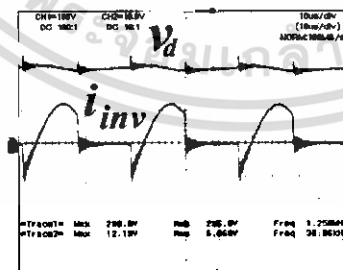
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  ในลักษณะเต็มคลื่น เมื่อ Time/Div = 2 ms



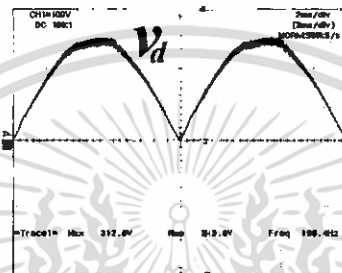
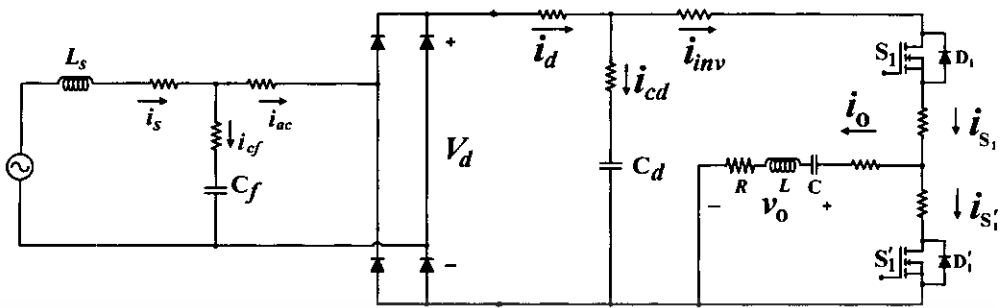
(ข) คลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



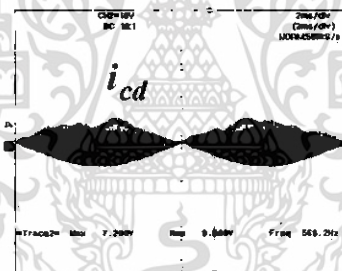
(ค) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสอินเวอร์เตอร์  
เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

รูปที่ 4.8 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

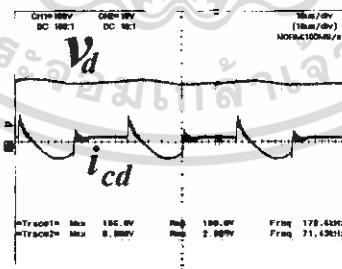




(ก) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  ในลักษณะเต็มคลื่น เมื่อ Time/Div = 2 ms



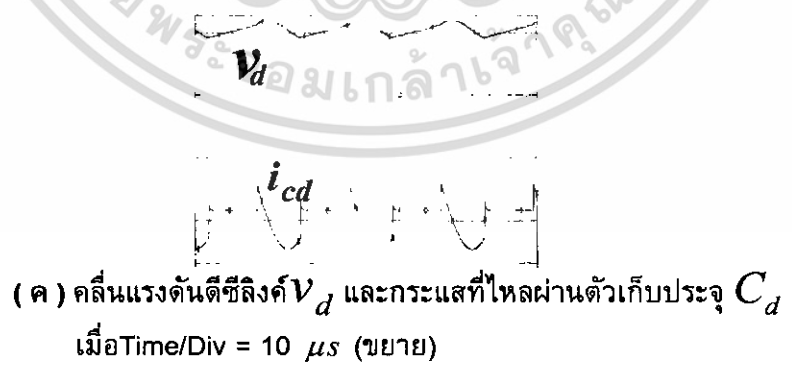
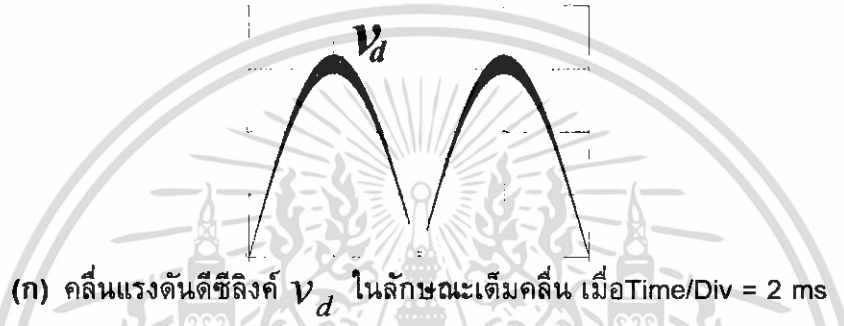
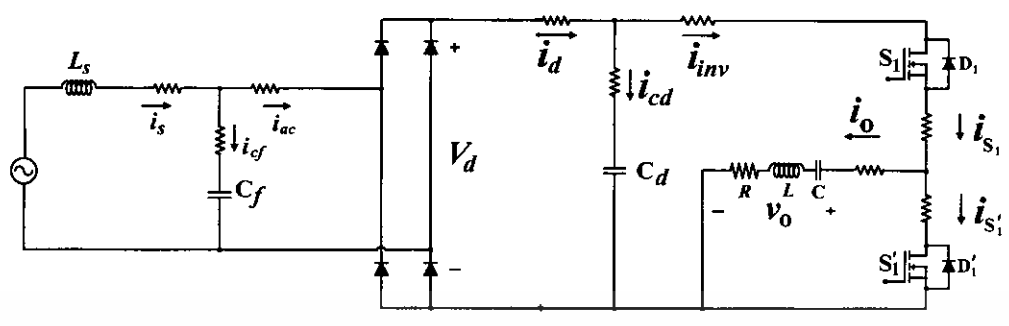
(ข) คลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d$ ,  $i_{cd}$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



(ค) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu$ s (ขยาย)

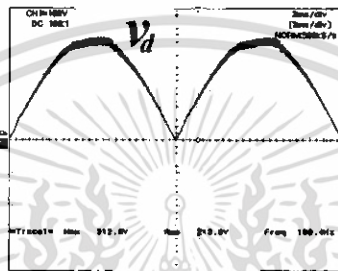
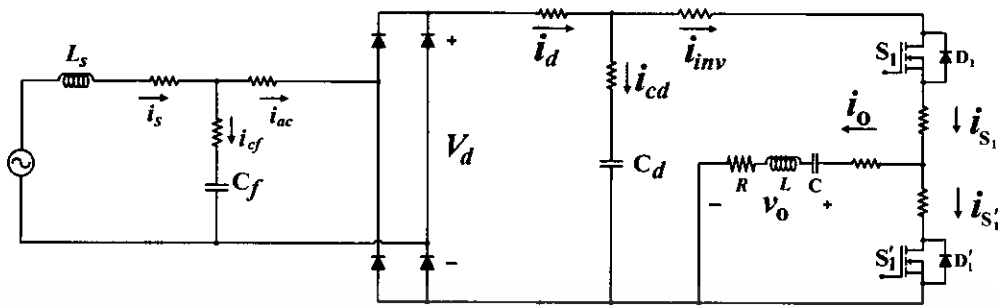
รูปที่ 4.10 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d$  จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 30.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

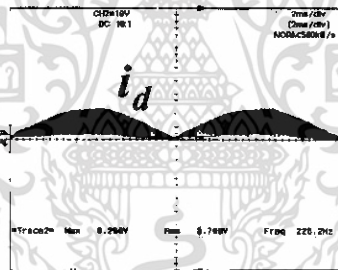


รูปที่ 4.11 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d$  จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

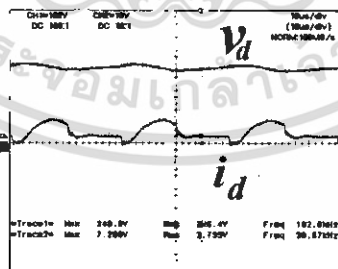
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  ในลักษณะเต็มคลื่น เมื่อ Time/Div = 2 ms



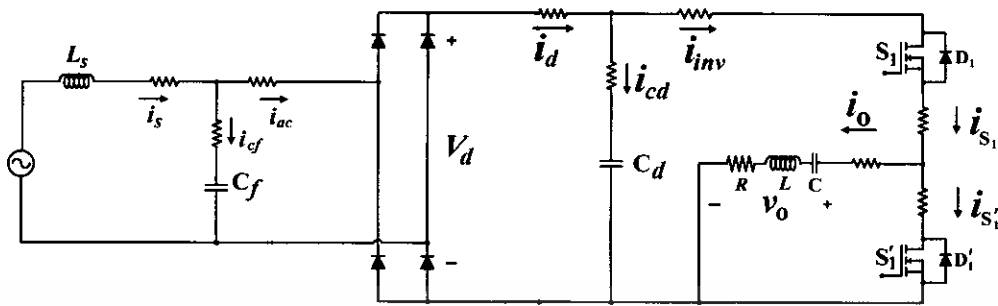
(ข) คลื่นกระแสดีซีเอ้าท์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



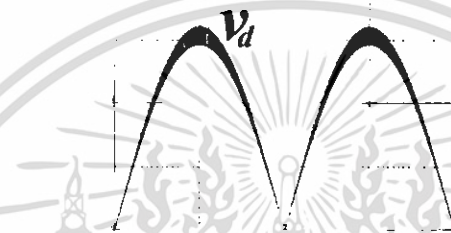
(ค) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสดีซีเอ้าท์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

รูปที่ 4.12 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสดีซีเอ้าท์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 30.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



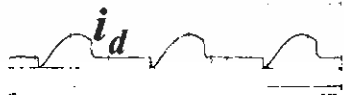
(ก) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  ในลักษณะเต็มคลื่น เมื่อ Time/Div = 2 ms



(ข) คลื่นกระแสดีซีเอ๊าท์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

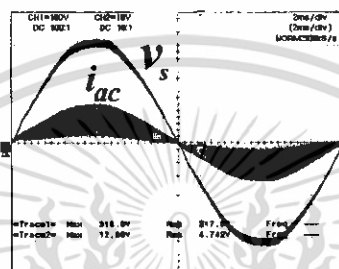
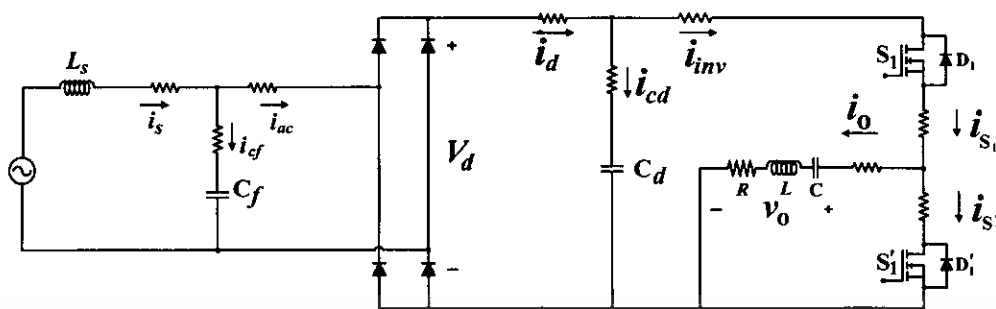


(ค) คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสดีซีเอ๊าท์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu$ s (ขยาย)

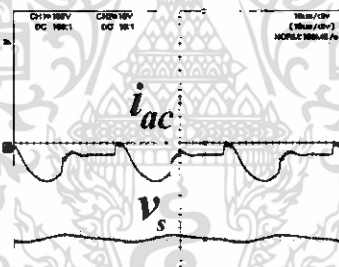


รูปที่ 4.13 คลื่นแรงดันดีซีลิงค์  $V_d$  และกระแสดีซีเอ๊าท์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

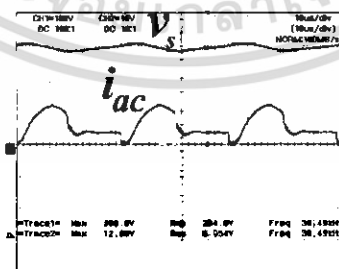
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



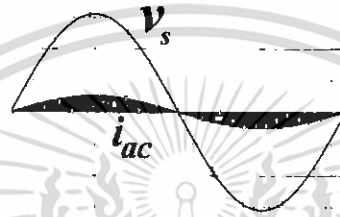
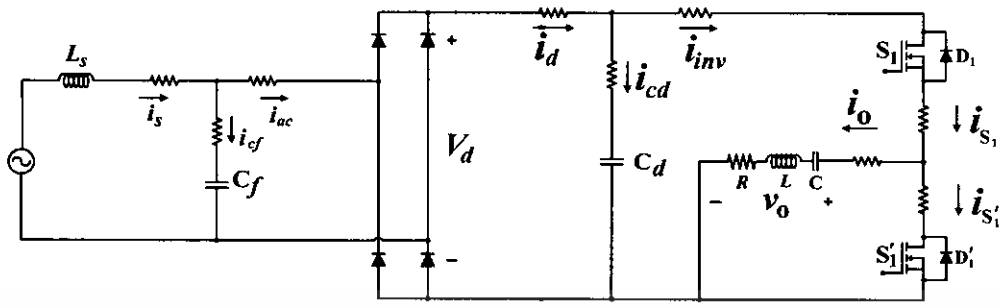
(ข) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  ในครึ่งไซเคิลลบของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)



(ค) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  ในครึ่งไซเคิลบวกของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

รูปที่ 4.14 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิทซ์เท่ากับ 30.5 KHZ

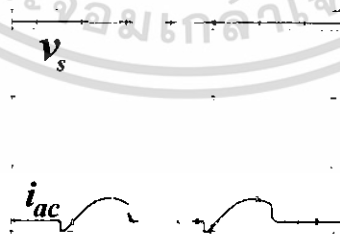
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสเอชอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

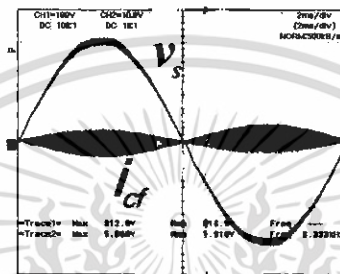
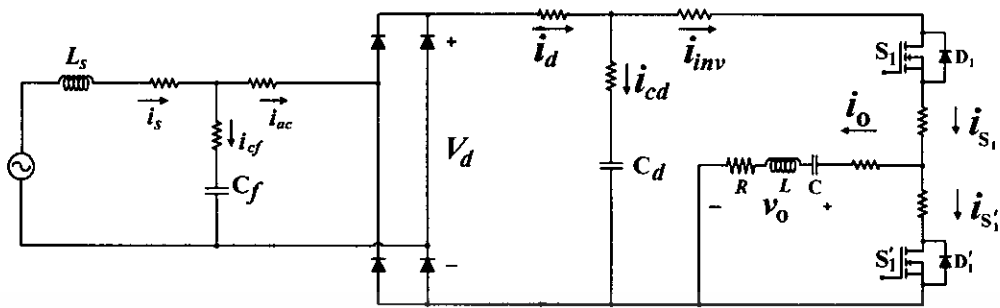


(ข) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสเอชอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  ในครึ่งไซเคิลลบของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)



(ค) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสเอชอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  ในครึ่งไซเคิลบวกของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

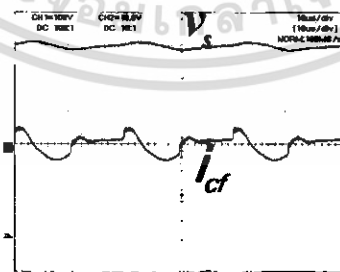
รูปที่ 4.15 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสเอชอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ



(ก) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์  $C_f$   $i_{cf}$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



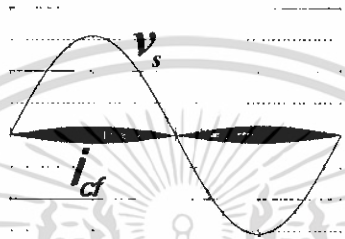
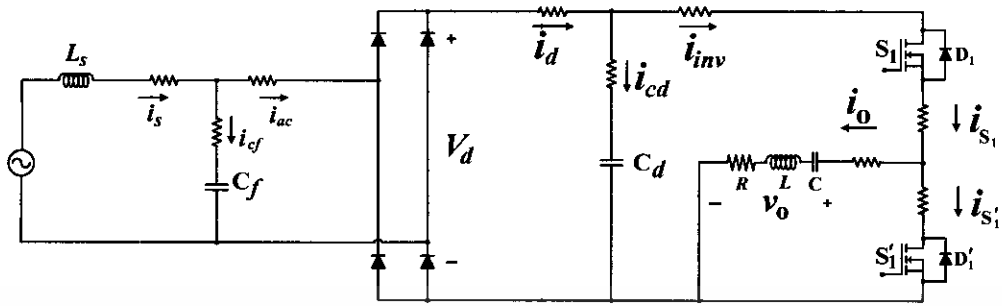
(ข) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์  $i_{cf}$  ในครึ่งไซเคิลลบของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)



(ค) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์  $i_{cf}$  ในครึ่งไซเคิลบวกของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

รูปที่ 4.16 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $i_{cf}$  จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 KHZ

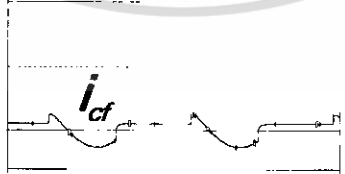
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_S$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์  $C_f, i_{cf}$  เมื่อ Time/Div = 2 ms

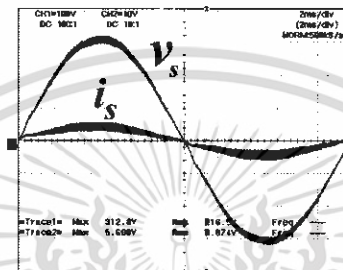
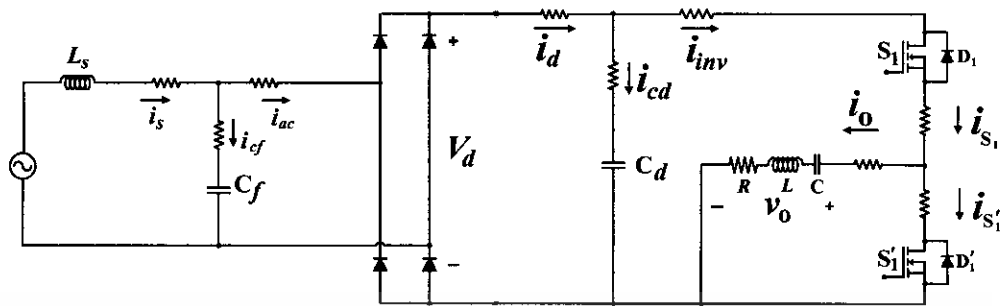


(ข) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_S$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์  $i_{cf}$  ในครึ่งไซเคิลลบของแรงดัน  $V_S$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

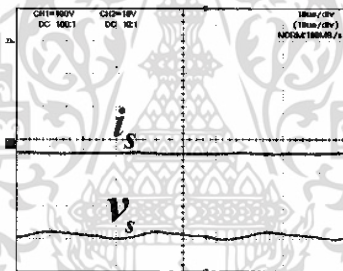


(ค) คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_S$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์  $i_{cf}$  ในครึ่งไซเคิลบวกของแรงดัน  $V_S$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

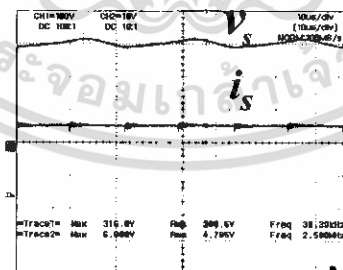
รูปที่ 4.17 คลื่นแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_S$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $i_{cf}$  จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



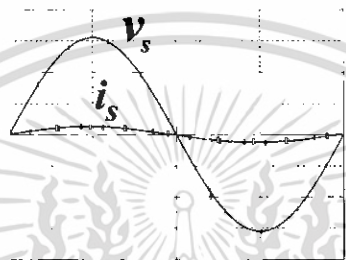
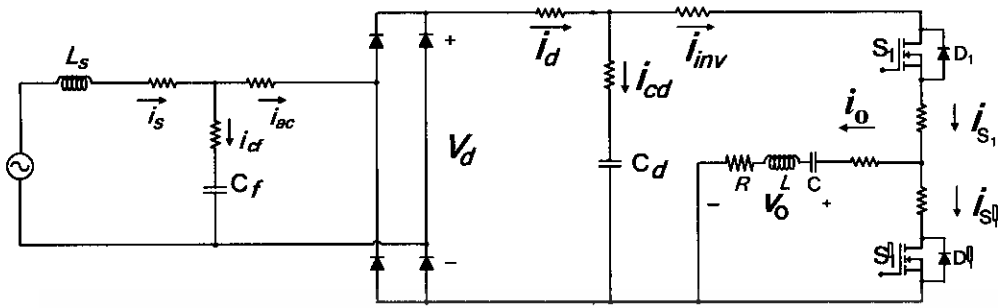
(ข) คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  ในครึ่งไซเคิลลบของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)



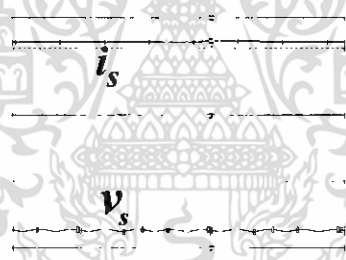
(ค) คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  ในครึ่งไซเคิลบวกของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

รูปที่ 4.18 คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  จากการทดลองที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

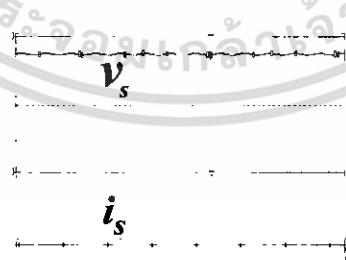
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  เมื่อ Time/Div = 2 ms



(ข) คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  ในครึ่งไซเคิลลบของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

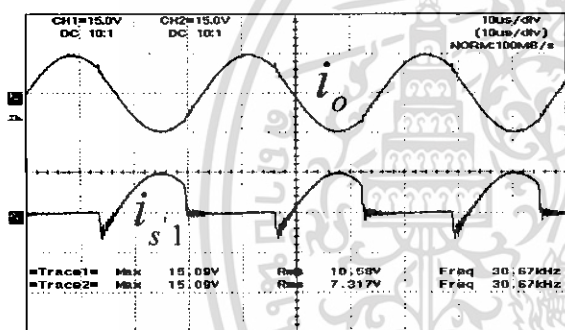
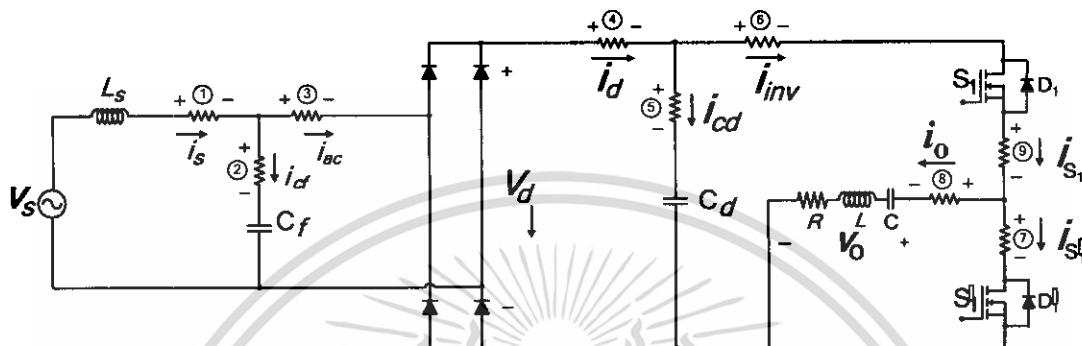


(ค) คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  ในครึ่งไซเคิลบวกของแรงดัน  $V_s$  เมื่อ Time/Div = 10  $\mu s$  (ขยาย)

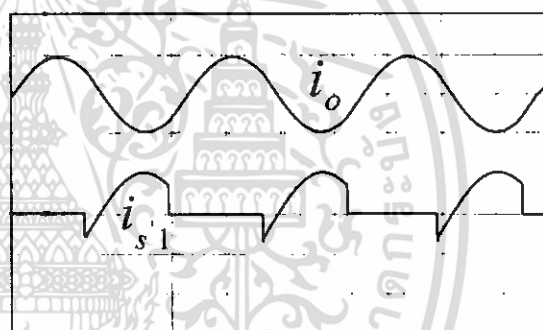
รูปที่ 4.19 คลื่นแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $V_s$ ,  $i_s$  จากการซิมูเลตด้วยโปรแกรม PSpice ที่ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 30.5 kHz

4.4 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซิมูเลตคลื่นกระแสตามจุดต่างๆในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30.5 kHz , 31.5 kHz และ 32.5 kHz

4.4.1 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซิมูเลตคลื่นกระแสตามจุดต่างๆในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30.5 kHz

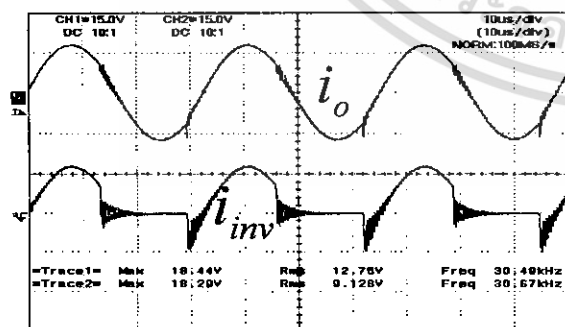


(ก) การทดลอง

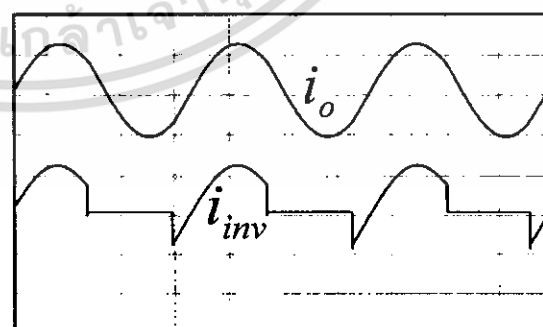


(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.20 คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $S_1$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz



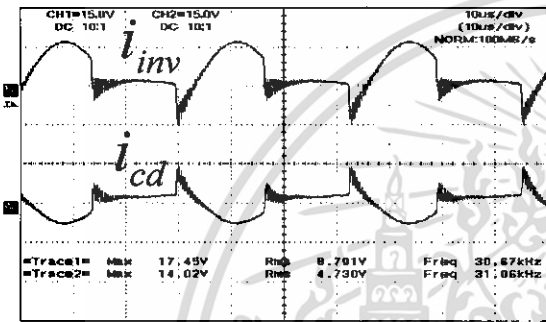
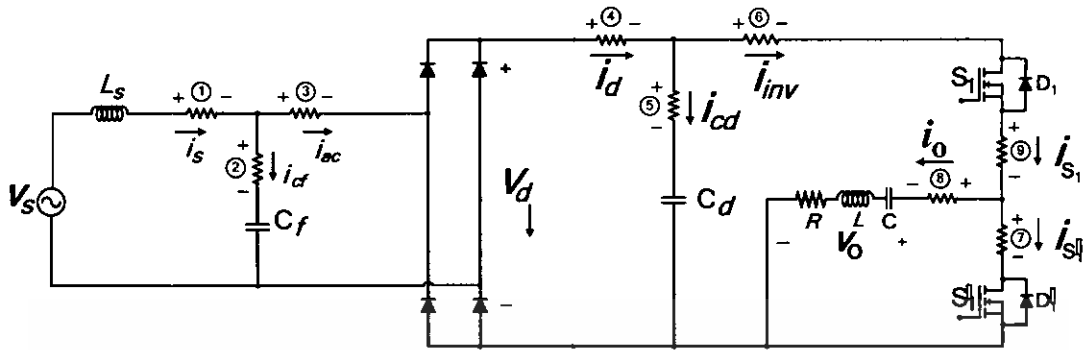
(ก) การทดลอง



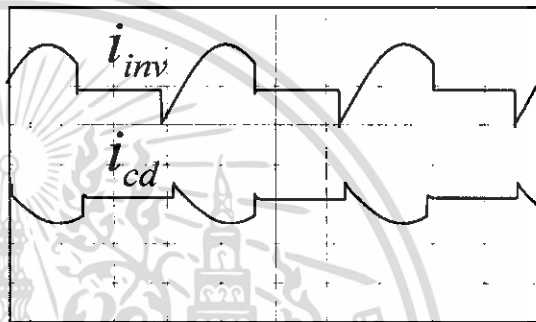
(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.21 คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

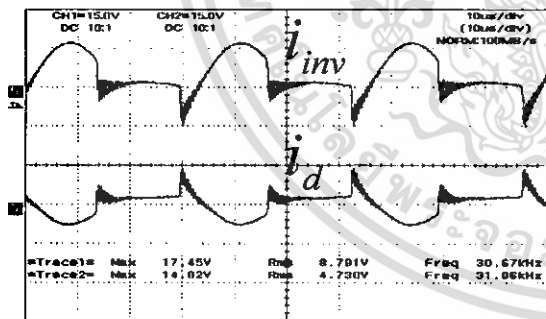


(ก) การทดลอง

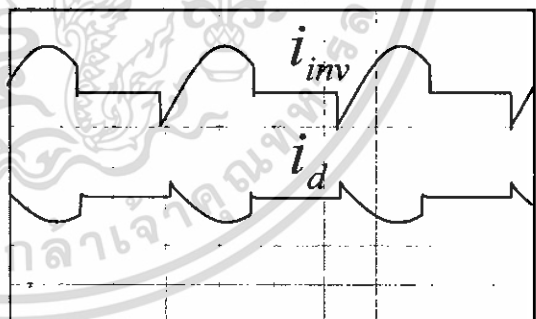


(ข) การซึ่มเลต

รูปที่ 4.22 คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d, i_{cd}$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz



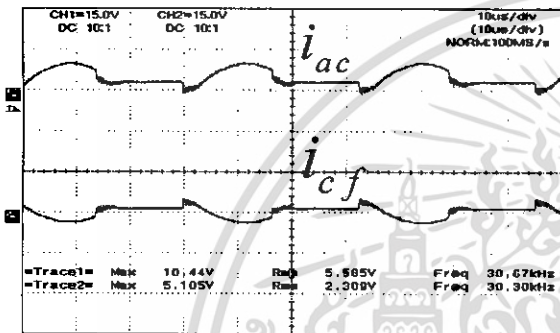
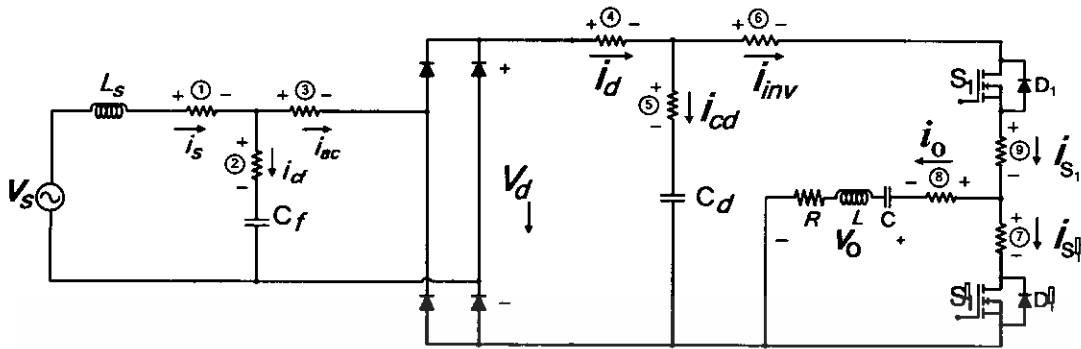
(ก) การทดลอง



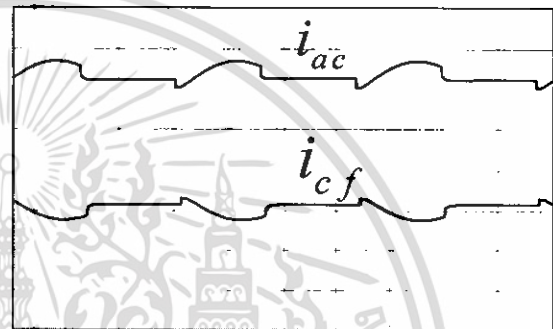
(ข) การซึ่มเลต

รูปที่ 4.23 คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  และกระแสดีซีเอาต์พุทของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

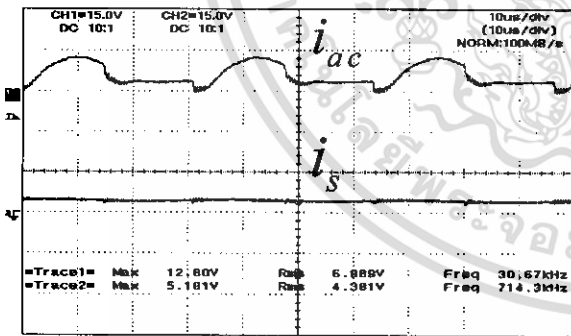


(ก) การทดลอง

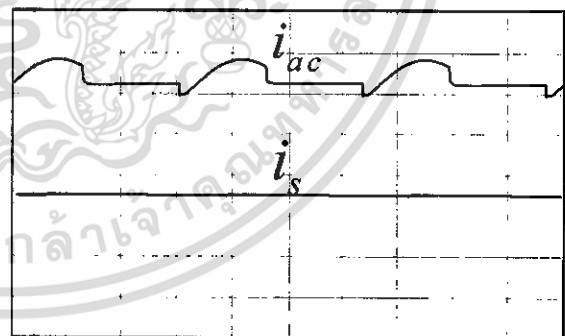


(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.24 คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $i_{cf}$  ฟิเตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz



(ก) การทดลอง

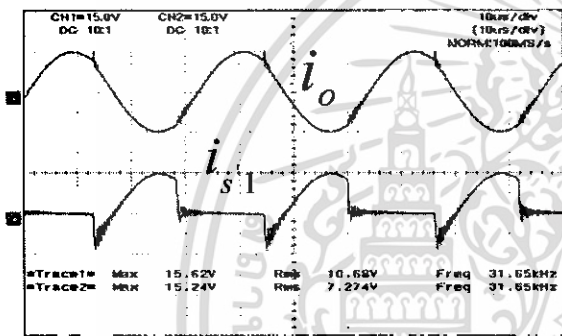
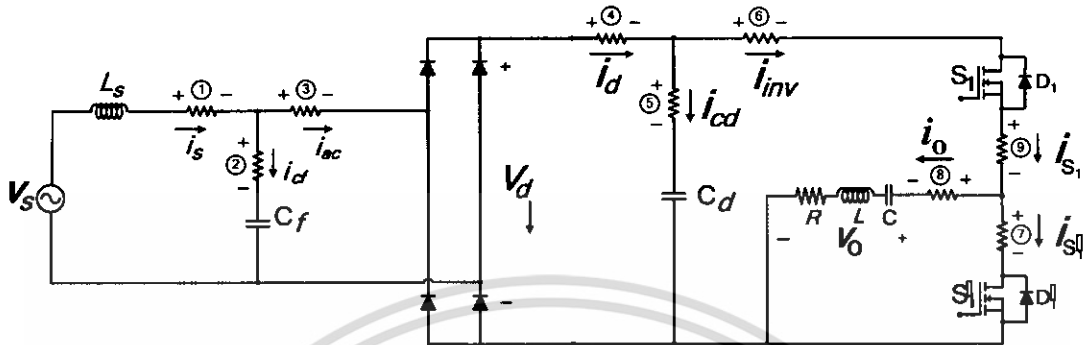


(ข) การซิมูเลต

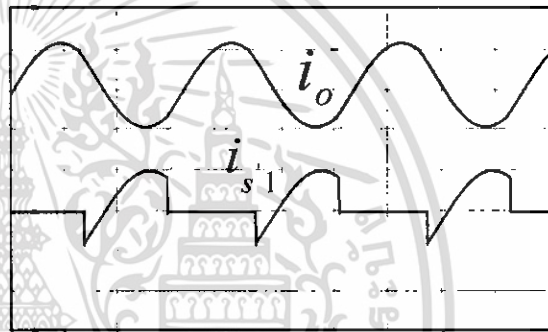
รูปที่ 4.25 คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  และกระแสอินพุทจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $i_s$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 30.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซิมูเลตคลื่นกระแสตามจุดต่างๆ  
ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 31.5 kHz

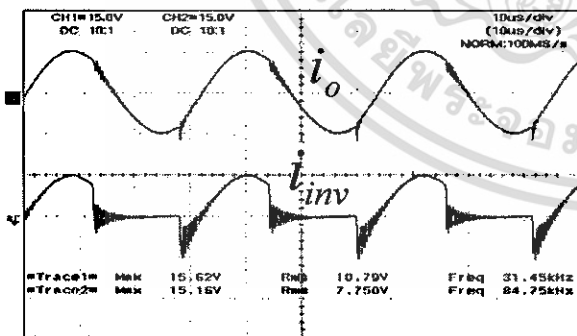


(ก) การทดลอง

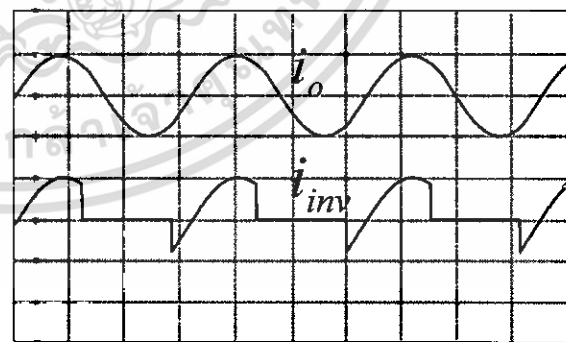


(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.26 คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $i_{s1}$  ที่ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 31.5 kHz



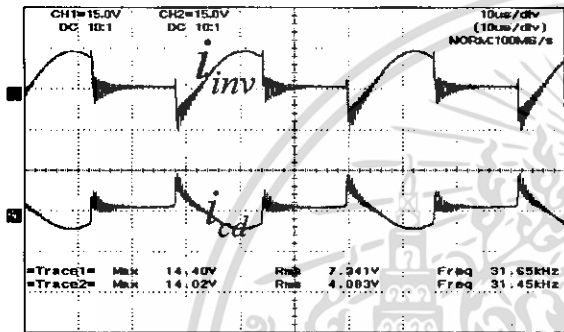
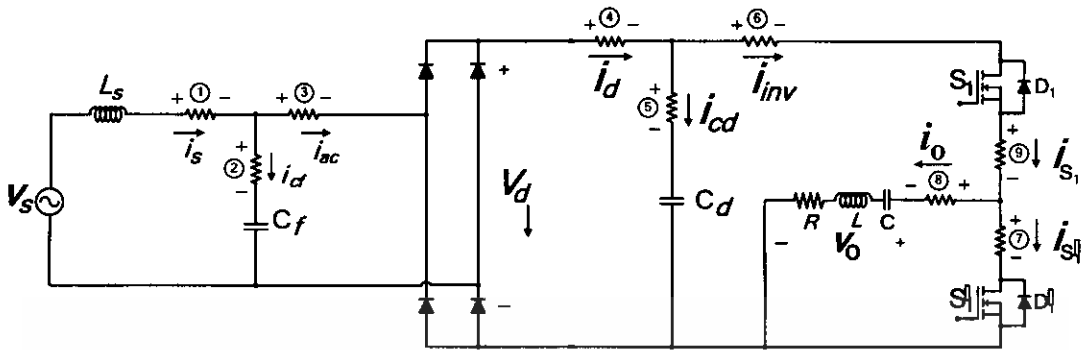
(ก) การทดลอง



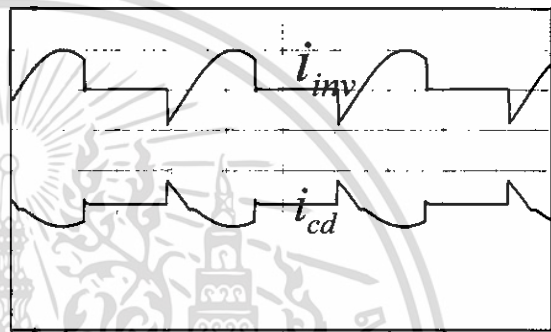
(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.27 คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  ที่ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 31.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

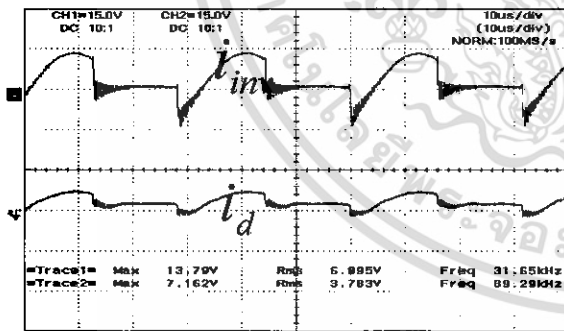


(ก) การทดลอง

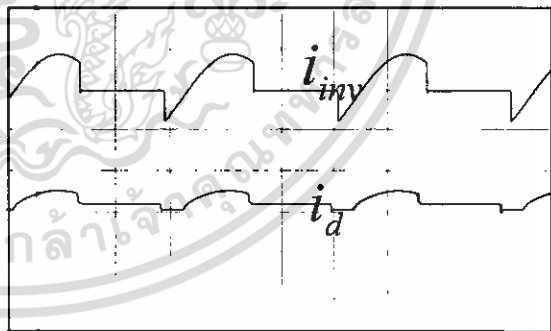


(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.28 คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d \cdot i_{cd}$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 kHz



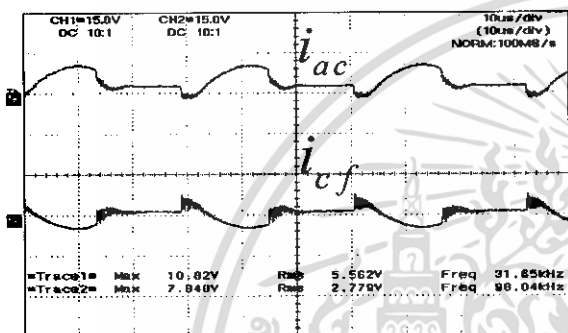
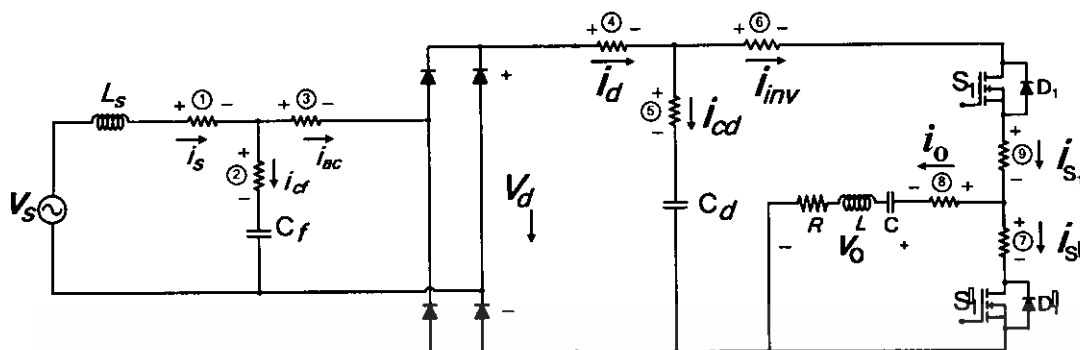
(ก) การทดลอง



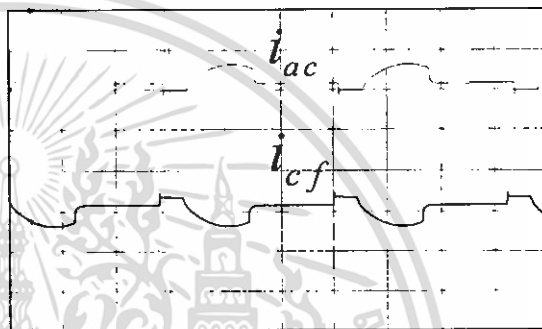
(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.29 คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  และกระแสไดโอดของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

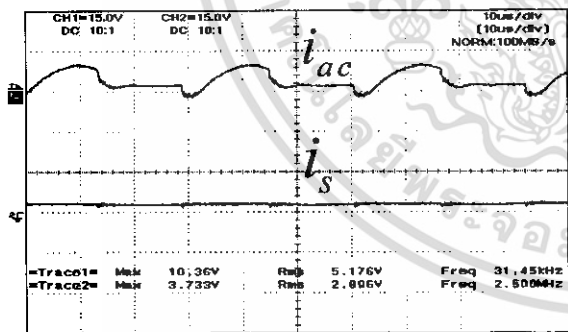


(ก) การทดลอง

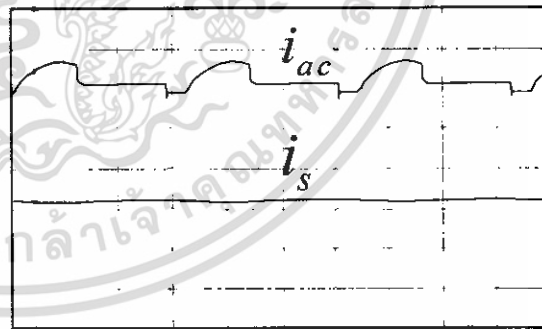


(ข) การขีมูลเต

รูปที่ 4.30 คลื่นกระแสเอชอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $i_{cf}$  ฟิเตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 kHz



(ก) การทดลอง

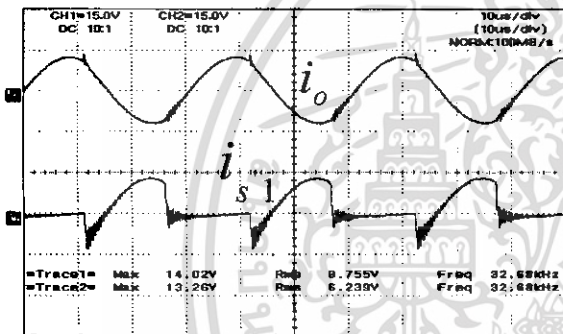
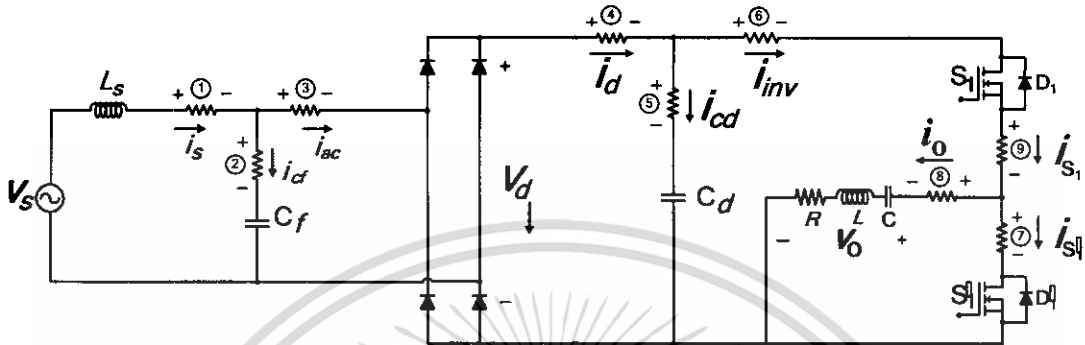


(ข) การขีมูลเต

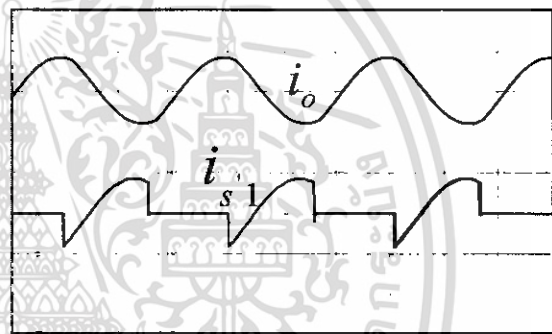
รูปที่ 4.31 คลื่นกระแสเอชอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  และกระแสอินพุทจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $I_s$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 31.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการซึ่มุเลตคลื่นกระแสตามจุดต่าง ๆ  
ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 32.5 kHz

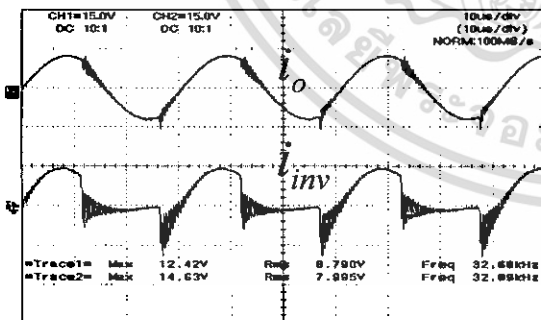


(ก) การทดลอง

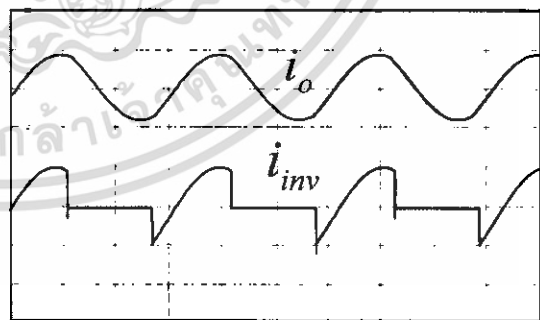


(ข) การซึ่มุเลต

รูปที่ 4.32 คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์  $i_{s1}$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz



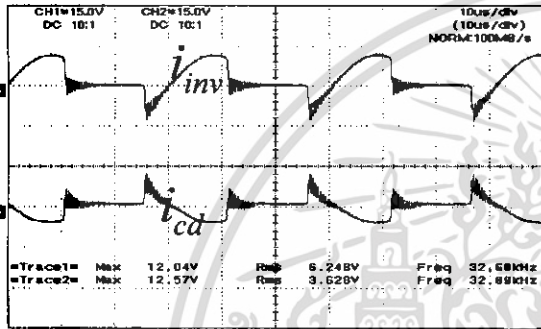
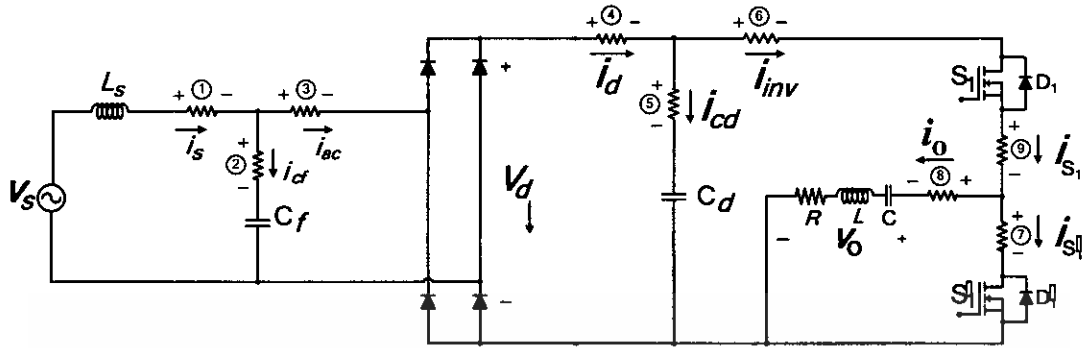
(ก) การทดลอง



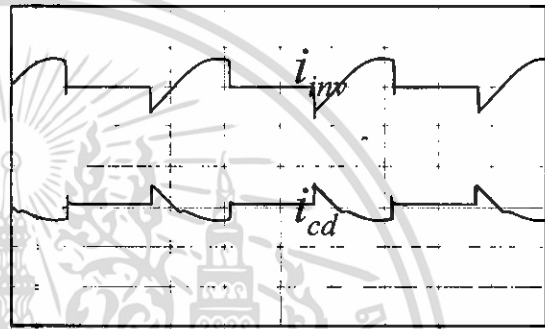
(ข) การซึ่มุเลต

รูปที่ 4.33 คลื่นกระแสเอาต์พุต  $i_o$  และกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

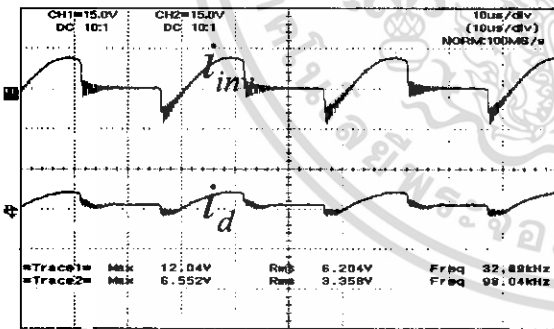


(ก) การทดลอง

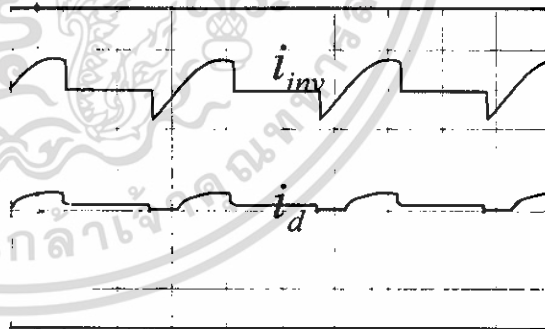


(ข) การจำลอง

รูปที่ 4.34 คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_d, i_{cd}$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz



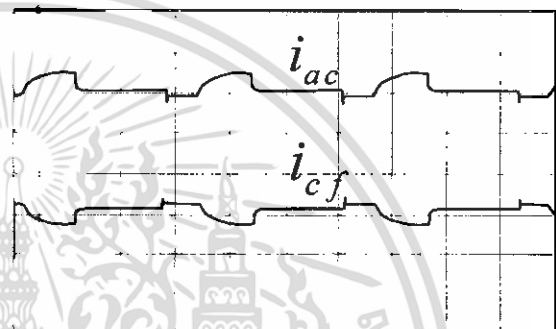
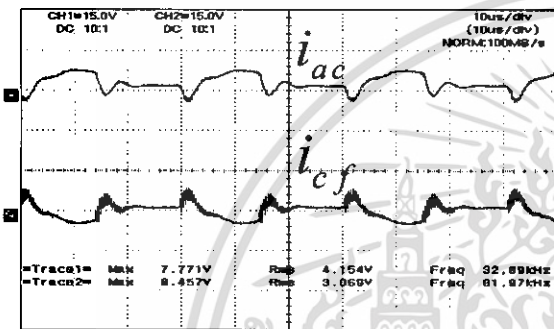
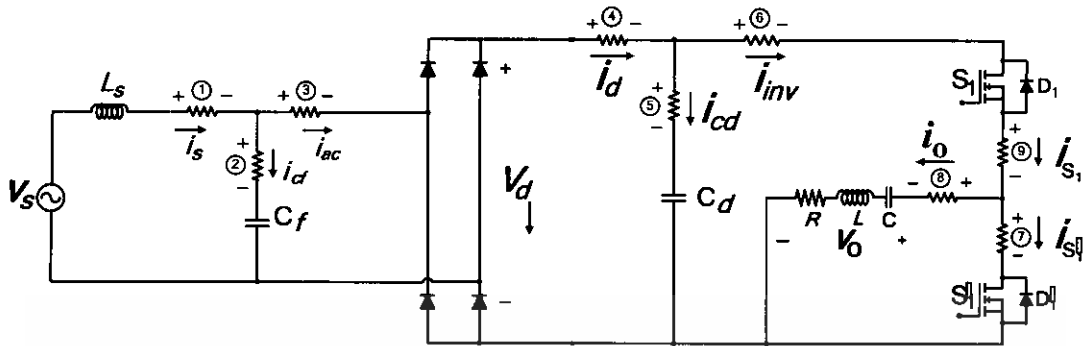
(ก) การทดลอง



(ข) การจำลอง

รูปที่ 4.35 คลื่นกระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์  $i_{inv}$  และกระแสดีไอโอด์พิกัดของบริดจ์ไดโอด  $i_d$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz

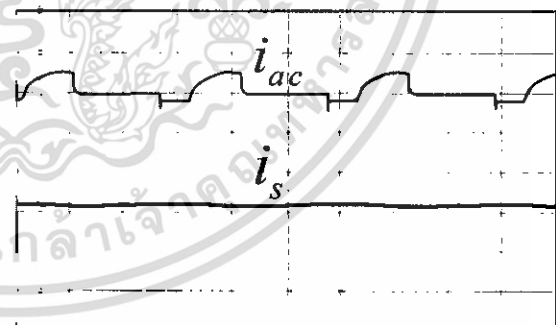
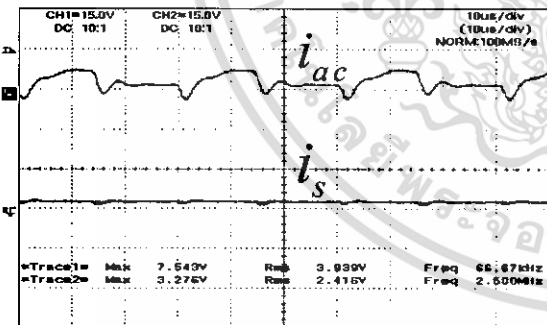
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดลอง

(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.36 คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $i_{cf}$  ฟิเตอร์ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz

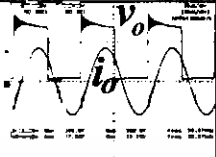
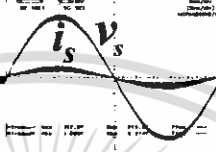
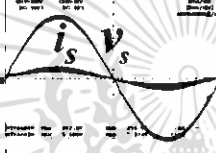
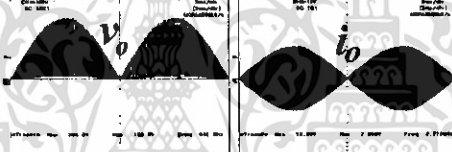

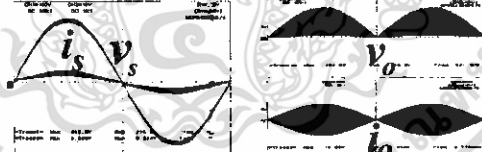
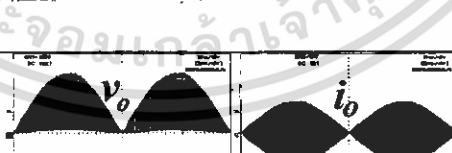
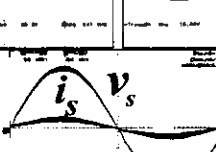


(ก) การทดลอง

(ข) การซิมูเลต

รูปที่ 4.37 คลื่นกระแสอินพุทของบริดจ์ไดโอด  $i_{ac}$  และกระแสอินพุทจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  $i_s$  ที่ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 32.5 kHz

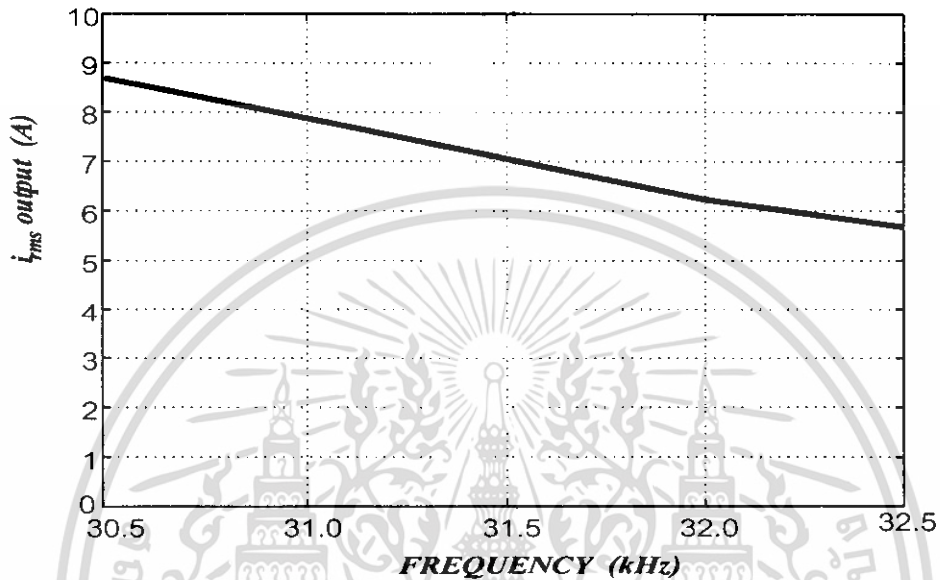
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่ใช้ ทดลอง	กราฟจาก การ ทดลอง	คลื่นที่ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติ	ดังแสดงตาม กราฟรูปที่
f = 30.5 kHz ถึง 32.5 kHz	$I_o$		กราฟรูปที่ 4.4 (ค)
	$I_{in}$		กราฟรูปที่ 4.18 (ก)
	THD $i_{in}$	 $\%THD_{i_{in}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$	กราฟรูปที่ 4.18 (ก)
	$P_o$		กราฟรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข)
	$P_{in}$		กราฟรูปที่ 4.18 (ค)
	$\eta$		กราฟรูปที่ 4.18 (ค) , 4.4 (ก) และ 4.4 (ข)
	$T_{Boil}$		กราฟรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข)
	PF		กราฟรูปที่ 4.18 (ค)

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปค่าตัวแปรต่างๆที่มีความสัมพันธ์กับคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจร

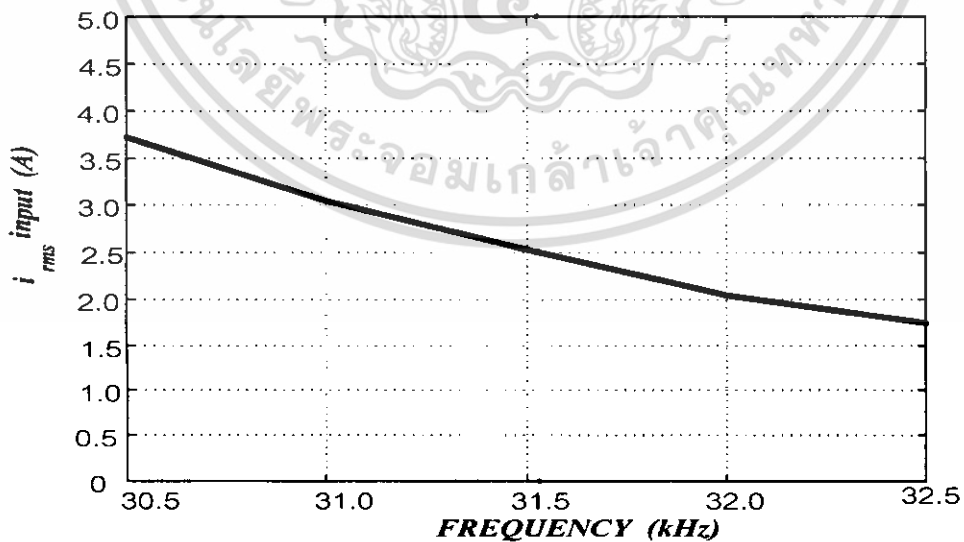
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.38 แสดงเส้นกราฟของค่า rms ของกระแสเอาต์พุตเมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า rms ของกระแสเอาต์พุตลดลง เนื่องจาก reactance สุทธิที่เกิดจากผลต่างระหว่าง  $X_L$  และ  $X_C$  มีค่าเพิ่มขึ้น



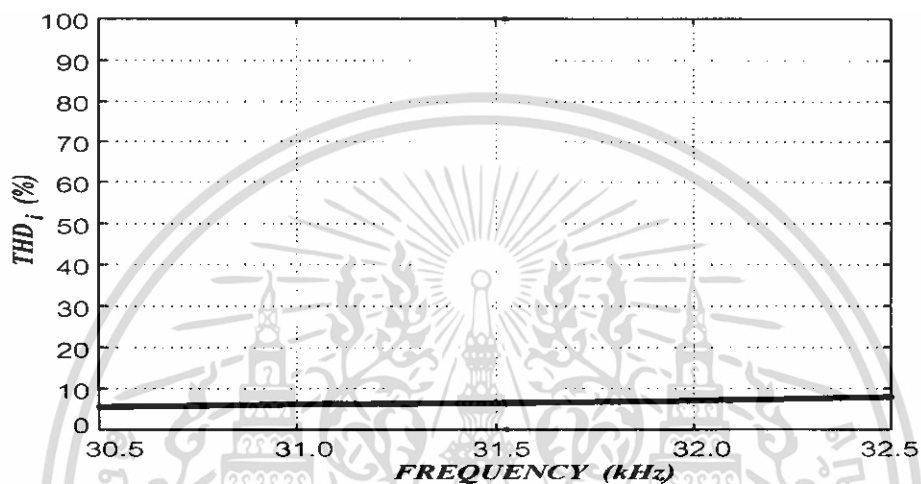
รูปที่ 4.38 กราฟของค่า rms ของกระแสเอาต์พุตและความถี่

รูปที่ 4.39 แสดงเส้นกราฟของค่า rms ของกระแสอินพุตเมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า rms ของกระแสอินพุตลดลง เนื่องจาก  $i_o$  ลดลง



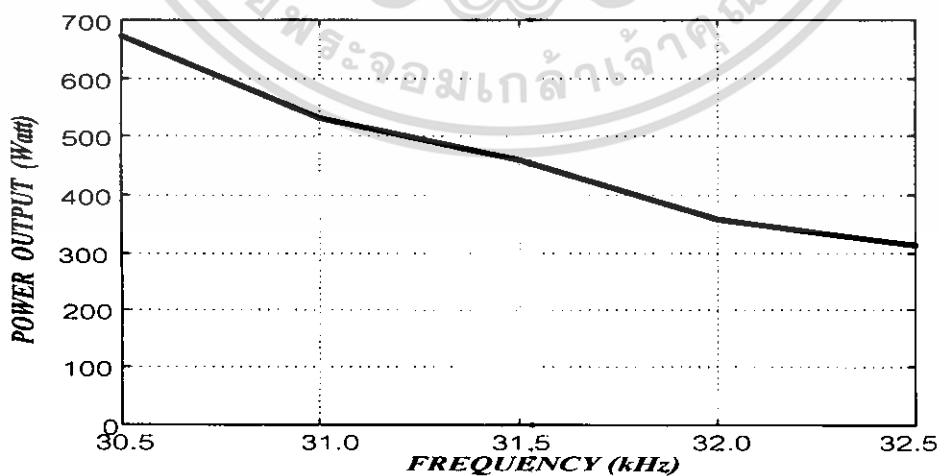
รูปที่ 4.39 กราฟของค่า rms ของกระแสอินพุตและความถี่

รูปที่ 4.40 แสดงเส้นกราฟของค่า Total Harmonic Distortion ( $THD_i$ ) เมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Total Harmonic Distortion ( $THD_i$ ) ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากย่านความถี่สูงที่ปรับอยู่ในย่านที่ไม่กว้างมากคือ 30.5 kHz – 32.5 kHz จึงไม่มีผลต่อการกรองของจร LC filter ทางด้านอินพุท (วงจร filter ยังสามารถกรองความถี่ได้เหมือนเดิม)



รูปที่ 4.40 กราฟของค่า Total Harmonic Distortion ( $THD_i$ ) และความถี่

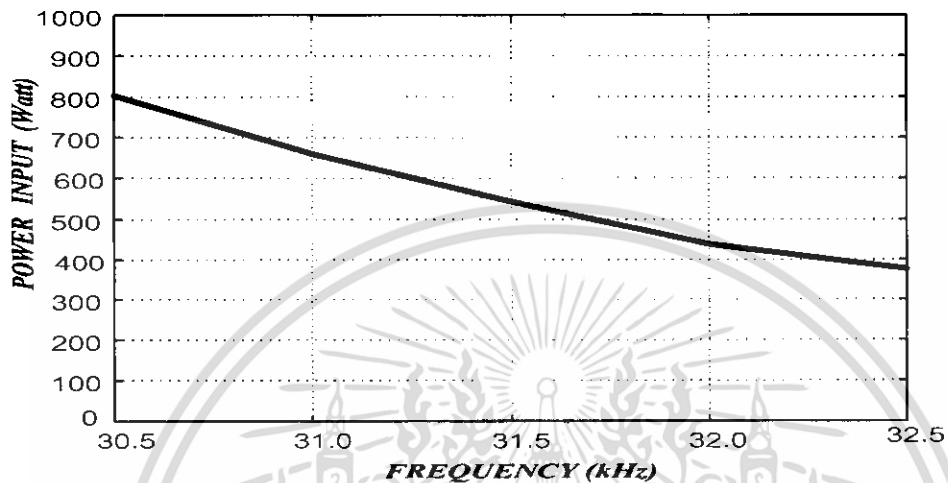
รูปที่ 4.41 แสดงเส้นกราฟของค่า Power Output เมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Power Output ลดลง เนื่องจากเมื่อความถี่สวิตช์สูงขึ้นมุมต่างเฟส  $V_{o,1}$ ,  $I_{o,1}$  มีค่ามากขึ้นและขนาดของกระแสมีค่าลดลงจาก 680 วัตต์ ประมาณครึ่งหนึ่งคือ ประมาณ 320 วัตต์



รูปที่ 4.41 กราฟของค่า Power Output และความถี่

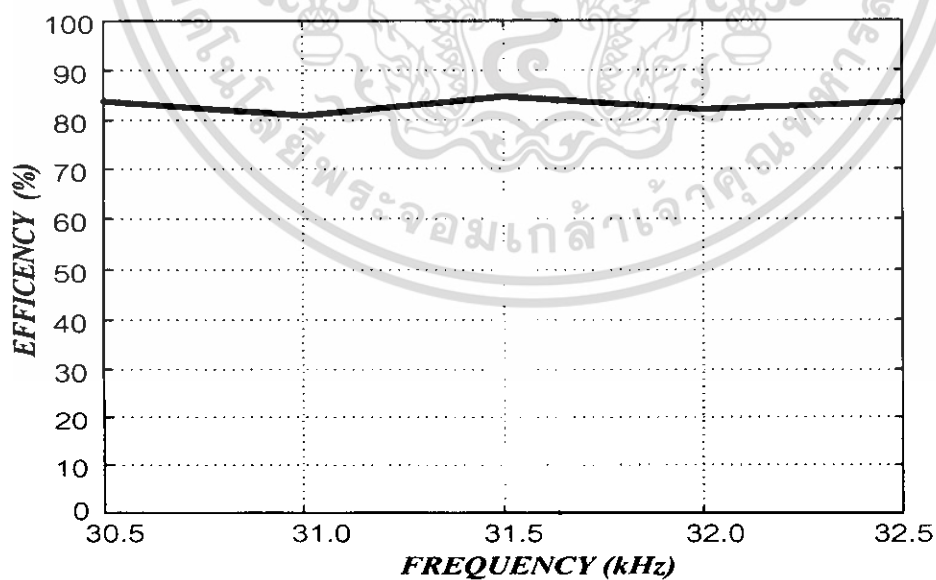
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.42 แสดงเส้นกราฟของค่า Power Input เมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Power Input ลดลง เนื่องจาก Power out ลดลง



รูปที่ 4.42 กราฟของค่า Power Input และความถี่

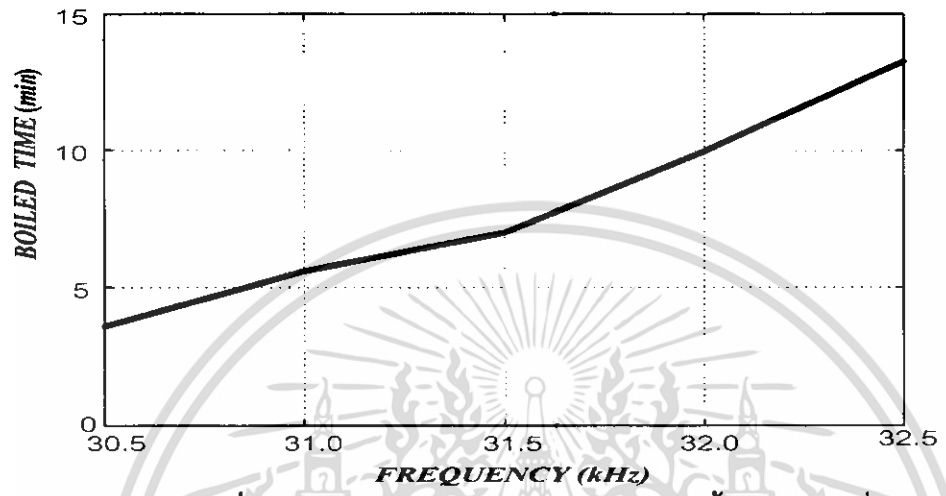
รูปที่ 4.43 แสดงเส้นกราฟของค่าประสิทธิภาพเมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ เนื่องจากย่านความถี่ที่ปรับอยู่ในย่านแคบคือ 30.5 kHz- 32.5 kHz



รูปที่ 4.43 กราฟของค่าประสิทธิภาพ และความถี่

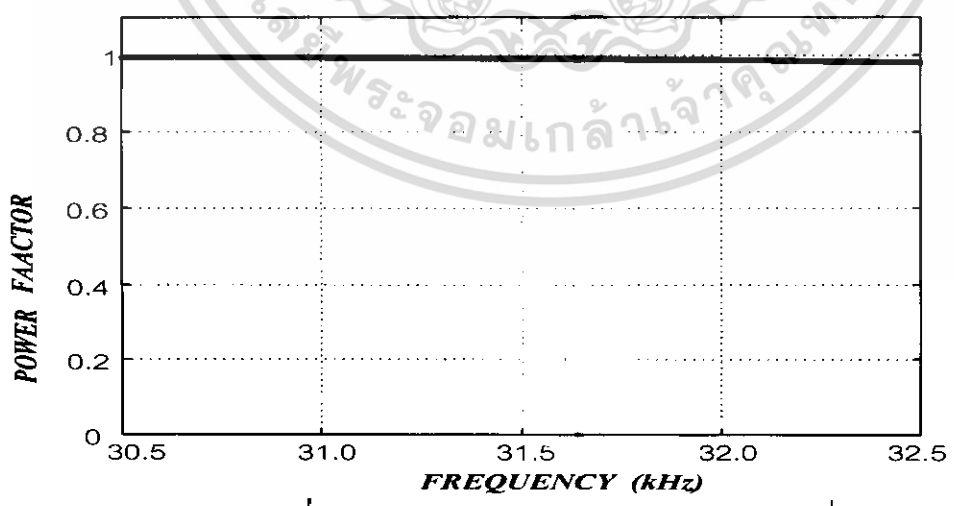
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.44 แสดงเส้นกราฟของเวลาในการเดือดของน้ำเมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งจะพบว่า เมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้นเวลาในการเดือดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทลดลงจาก 680 วัตต์เหลือ 320 วัตต์ดังรูปกราฟ  $P_o$  ที่

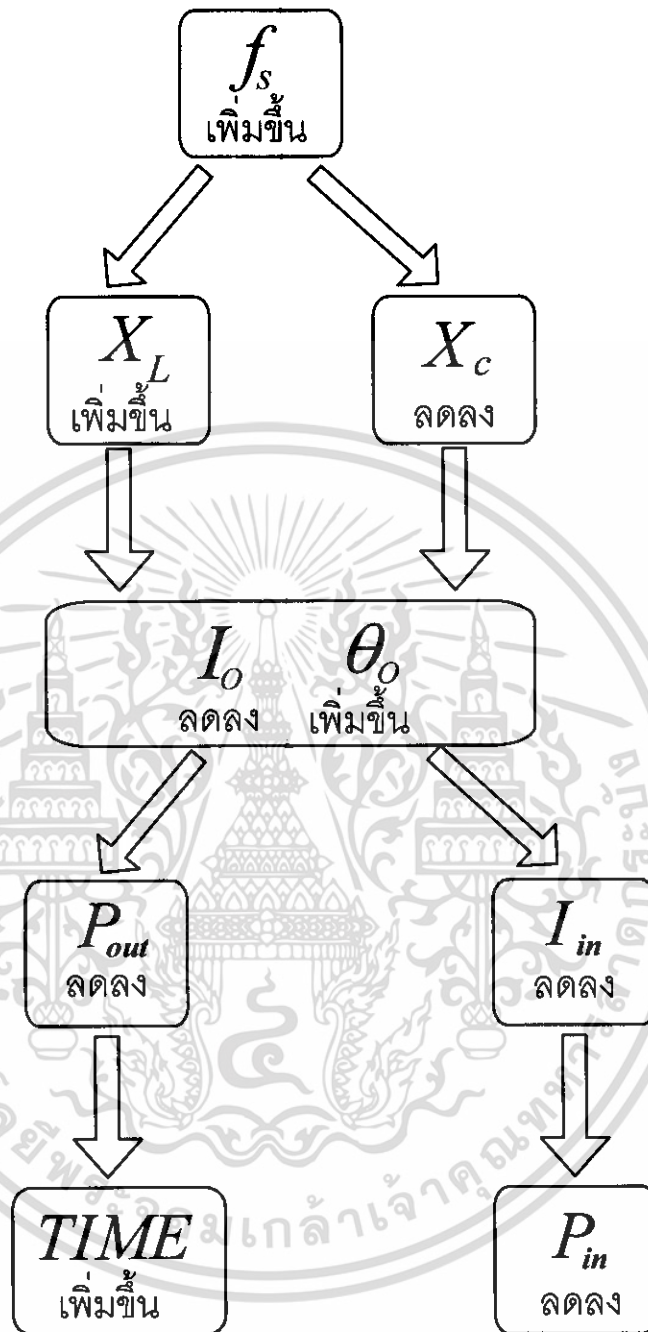


รูปที่ 4.44 กราฟของค่าเวลาในการเดือดของน้ำ และความถี่

รูปที่ 4.45 แสดงเส้นกราฟของค่าประสิทธิภาพเมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่เนื่องจากย่านความถี่ที่ปรับอยู่ในย่านแคบคือ 30.5 kHz - 32.5 kHz รูปที่ 8 แสดงเส้นกราฟของค่า Power Factor เมื่อปรับความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นในย่านที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Power Factor ค่อนข้างคงที่เนื่องจาก  $THD$ , ค่อนข้างคงที่



รูปที่ 4.45 กราฟของค่า Power Factor และความถี่



รูปที่ 4.46 Flow Chart แสดงการปรับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการปรับความถี่

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ที่แสดงรูปภาพข้างต้น ซึ่ง  
มี  $I_o, I_{in}, THD_i, P_o, P_{in}, \eta, T_{Boil}, P.F.$  สามารถอธิบายสาเหตุการเกิดได้โดยอาศัยความสัมพันธ์  
ระหว่างความถี่สวิตช์กับ  $X_{L1}, X_{C1}, I_o, \theta_o$  ได้ดัง Flow Chart ข้างต้นในรูปที่ 4.46

## บทที่ 5

### สรุป

จากโครงการชิ้นนี้ อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำขนาดเล็ก ส่วนที่ได้ดำเนินการไปแล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- จำลองการทำงานของรีโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่จ่ายโหลด R L C รีโซแนนท์แบบอนุกรม ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของโหลด induction cooking
- พิจารณาโหมดการทำงานของวงจรรีโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่จ่ายโหลด R L C รีโซแนนท์แบบอนุกรม
- ออกแบบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์โดยใช้ IC เบอร์ TL 494 ที่สามารถปรับความถี่ได้ในย่าน 30-40 kHz ตามที่โหลดต้องการ
- ออกแบบวงจรขับเคลื่อนที่สามารถให้สัญญาณเอาต์พุตบวก และลบ เพื่อขับเคลื่อนของสวิตช์มอสเฟต
- ออกแบบวงจรกำลังของรีโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่สามารถจ่ายโหลด induction cooking ได้
- จากความรู้ดังกล่าวทำให้เรานำไปสร้างฮาร์ดแวร์ได้ซึ่งตรงกับเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ข้าง โดยได้ผลการทดลองดังนี้ ความถี่สวิตช์ซึ่งเท่ากับ 30 kHz – 40 kHz ,Power Factor ทางด้านอินพุตใกล้เคียงหนึ่ง , กำลังไฟฟ้าประมาณ 700 Watt , สามารถต้มน้ำจนเดือดได้ภายในเวลา 4 นาที , ประสิทธิภาพของส่วนไฟฟ้าคือ 85%

#### ข้อเสนอแนะ

ในการทำโครงการชิ้นนี้ปัญหาหลักคือการระบายความร้อนและการออกแบบแผ่น PCB ให้มีขนาดเล็ก และเนื่องจากเหตุผลดังกล่าวทำให้จำเป็นต้องมีการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของตัวชิ้นงานให้ดีและต้องคำนึงถึงทางลมเข้าและออก, ฉนวนกันความร้อน, และอาจจะพัฒนาในเรื่องการปรับลดกำลังไฟฟ้าให้ง่ายต่อการใช้อย่างขึ้น

### บรรณานุกรม

- [1] Y.S. Kwon, S.B.Yoo and D.S. Hyun, " Half Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Application with Load Adaptive PFW control Strategy", IEEE-PESC Conf.Rec., 1999. pp. 575-581.
- [2] J. Davies and P. Simpson " Induction Heating Handbook " Mcgraw-Hill:London, 1979.
- [3] T.Tanaka, " A New Induction Cooking Range for Heating and Kind of Metal Vessels", IEEE Tran.Consumer Electronic, Vol.35, No.3, 1989. pp. 635-641.
- [4] P. Viriya and T. Thomas, " Power Transfer Characteristics of a Phase-shift Controlled ZVS Inverter for the Application Heating " IPEC-Tokyo(jpn) Conf.Rec., 2000...,pp
- [5] P.Viriya , S.Sittichok and K.Matsuse "Analysis of High-Frequency Induction Cooker with Variable Frequency Power Control " PCC-OSAKA Conf.Rec., 2002.,pp 1502-1507
- [6] สิทธิโชค สินรัตน์. "การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2545.
- [7] H. Calleja and R. Ordoñez , "Induction heating inverter with active power factor correction" INT.J.ELECTRONICS., Vol. 86 , No. 9 , 1999 , pp. 1113-1121
- [8] ชนนวรรธน์ หัวหาญ "การวิเคราะห์และออกแบบวงจรเรียงกระแสพร้อมบูสเตอร์ความถี่สูงที่มีการแก้ค่าตัวประกอบกำลังด้านอินพุท." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2545.
- [9] ศักดา พรหมเหมือน และ วิริยะ พิเชษฐจำเริญ "การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการปรับปรุงแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าสายไฟสลับให้เป็น 1 " การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26,2546,หน้า 823-828

- [10] ชนนวนรณห์ หัวหาญ และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ "การวิเคราะห์บูสท์คอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25,2545,หน้า 26-30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้