

วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ แบบ 3 เฟส 3 ระดับ ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์

และกระแสศูนย์ โดยใช้การควบคุมพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟส

A Three-Phase Three-Level DC-DC Converter with ZVZCS Using
Phase-Shifted PWM Strategy



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 137842
ในเดือนปี 16 ค.ศ. 2558

รายงานฉบับนี้เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ภายใต้การสนับสนุนด้วยเงินรายได้

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สามเฟสสามระดับแบบใหม่ซึ่งใช้เทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์เพื่อลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการเริ่มนำและหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยใช้สัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มแบบที่มีการเลื่อนเฟสซึ่งสร้างสัญญาณผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอนี้จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบกรับภาระแรงดันเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันขาเข้าในช่วงหยุดนำกระแสและยังช่วยในการลดค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ของแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแบบสองระดับโดยทั่วไป อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำภายในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์โดยอาศัยพลังงานของตัวเหนี่ยวนำรีวไหลและตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง นอกจากนี้ในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำก็ยังสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขของซอฟต์แวร์สวิตช์ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยหลักการของความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส วงจรที่ได้นำเสนอได้ถูกทำการออกแบบและทำการทดสอบการทำงานโดยมีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อยู่ที 3.5 กิโลวัตต์แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 530 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาออก 110 โวลต์ ความถี่ของการสวิตช์ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยจากการทดสอบพบว่าวงจรมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 92.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ABSTRACT

This report presents a novel three-phase three-level DC/DC converter using zero-voltage zero-current switching (ZVZCS) method, in order to reduce switching losses during the start of turning on and turning off in semiconductor devices, by using phase-shifted pulse width modulation (PSPWM) signals which are generated from a 16 bit microcontroller. This proposed converter consists of three-level inverters that have some advantages. Not only does the voltage stress of semiconductor devices decrease to half of the input dc voltage at the turning-off time, but the total harmonics voltage distortions (THDv) of the output inverter also decrease when being compared to the two-level inverters. The semiconductor devices within this circuit can operate under zero-voltage (ZVS) and zero-current (ZCS) conditions by using the energy of leakage inductances and dc blocking capacitors. However, the devices still can completely achieve soft switching conditions without the need of dc blocking capacitor being used in circuit. This can be explained by the balanced current's principle of three-phase transformer. The proposed converter has been designed and tested at 3.5 kW rated power, input dc voltage of 530 V, output dc voltage of 110 V at the switching frequency of 50 kHz. It was found that the converter has maximum efficiency of 92.52 %.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

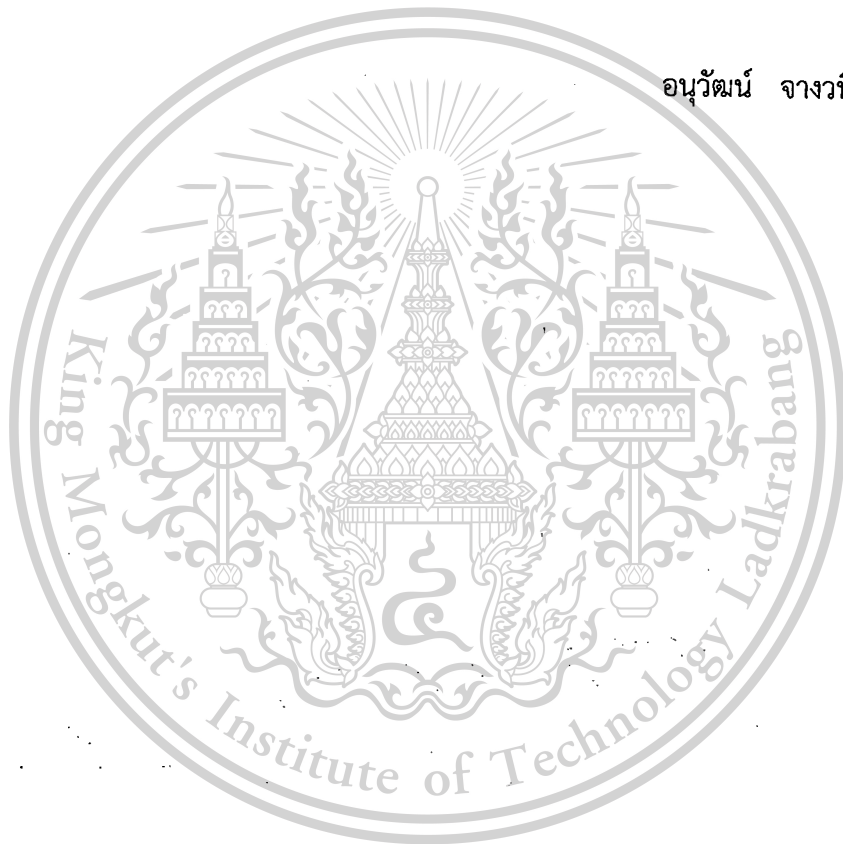
กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นายวทัณญ มีศรีสุข และนาย
ธรรมฉัตร กงวิรัตน์ และลูกศิษย์ในกลุ่มโครงการทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการประกอบวงจร
และจำลองระบบ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีโดยตลอดจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้
เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ดำเนินการเบิกใบเสร็จ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ต้องขอขอบคุณทุกท่าน ที่เป็นบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนาม และทำให้งานนี้ลุล่วง

อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ (Neutral-Point Clamped Inverter).....	6
2.2 ทฤษฎีการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ.....	10
2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบชอฟต์สวิตซ์.....	11
2.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิค การสวิตช์แบบZVS.....	12
2.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิค การสวิตช์แบบZVZCS.....	13
2.3.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ Auxillary switch.....	14
2.3.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบZVZCS โดยใช้ passive clamping.....	16
2.3.2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor.....	18
2.3.2.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็ก.....	24
2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
2.4.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณพื้นที่.....	25
2.4.3 ตัวเหนี่ยวนำ.....	28
2.5 LC ฟิลเตอร์.....	28
2.6 วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ.....	29
2.7 สรุป.....	31
บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบวงจร.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 หลักการทำงานของวงจร.....	34
3.3 ลักษณะโครงสร้างของวงจร.....	34
3.4 โหมดการทำงาน.....	35
3.5 การออกแบบและสร้างวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์.....	49
3.5.1 โครงสร้างของวงจร.....	49
3.5.2 ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต.....	50
3.5.3 ส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}	50
3.5.4 ส่วนของภาคกำลังอินเวอร์เตอร์.....	51
3.5.5 ส่วนของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง $C_{bc1} - C_{bc3}$	52
3.5.6 ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส.....	53
3.5.7 ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาต์พุต.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.8 ส่วนของ LC ฟิลเตอร์.....	57
3.5.9 ส่วนของวงจรขับเคลื่อน.....	60
3.5.10 ส่วนของตัวสร้างสัญญาณไมโครคอนโทรลเลอร์dsPIC33e.....	61
3.6 สรุป.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	63
4.1 บทนำ.....	63
4.2 การวิเคราะห์การเกิดการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ ในสวิตช์แต่ละตัว	64
4.2.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการจำลอง.....	65
4.3 การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรถิซ-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ.....	71
4.3.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{AN}) และกระแสเฟส (i_A).....	72
4.3.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{BN}) และกระแสเฟส (i_B).....	74
4.3.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{CN}) และกระแสเฟส (i_C).....	76
4.3.4 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A).....	77
4.3.5 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{BC}) และกระแสไลน์ (i_B).....	80
4.3.6 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{CA}) และกระแสไลน์ (i_C).....	82
4.4 การทดสอบปรับกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟส.....	83
4.5 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร.....	87
4.6 ผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งต่อช่วงเวลารีเซ็ท.....	88
4.6.1 กรณีใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่ง.....	88
4.6.2 กรณีไม่ใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่ง.....	90
4.7 ภาพรวมการทำงานของวงจร.....	91
4.8 สรุป.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	96



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ.....	3
1.2 วงจรกำลังทั้งหมด.....	3
1.3 ลักษณะการเกิดการทำงานแบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์.....	4
2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ.....	8
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสองระดับ.....	8
2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ.....	9
2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบสามระดับ.....	9
2.5 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ของสวิตช์.....	9
2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบซอฟต์แวร์.....	11
2.7 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์.....	11
2.8 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ.....	12
2.9 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ทำงานแบบ ZVS.....	13
2.10 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค active clamping.....	14
2.11 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ active clamping.....	15
2.12 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค passive clamping.....	16
2.13 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ passive clamping.....	17
2.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor.....	18
2.15 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor.....	19
2.16 วงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor.....	21
2.17 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor.....	23
2.18 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
2.19 วงจรฮิสเตอร์ซิสสำหรับทำแม่เหล็กถาวรและสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.20 ตัวอย่างพื้นที่ A_c และ A_w สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่างๆ.....	26
2.21 วงจร LC ฟิลเตอร์.....	29
2.22 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มมูเลชั่นเฟสต่างๆ (ก) มมูเลชั่นเฟส 0 องศา (ข) มมูเลชั่นเฟส 60 องศา (ค) มมูเลชั่นเฟส 90 องศา.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 หลักการทำงานของวงจร.....	34
3.2 วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามารถับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์.....	35
3.3 ไตอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร.....	36
3.4 โหมดการทำงานที่ 1 – 12	42
3.5 โครงสร้างของวงจรจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น.....	49
3.6 วงจรภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต.....	50
3.7 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}	50
3.8 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2} ที่ใช้งานจริง	51
3.9 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ.....	51
3.10 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่ใช้จริงในวงจร.....	52
3.11 ลักษณะการเกิด ZCS	52
3.12 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส.....	54
3.13 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสที่ใช้จริง.....	56
3.14 ภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาต์พุต.....	57
3.15 วงจร LC ฟิลเตอร์ด้านเอาต์พุต.....	57
3.16 วงจรขับเคลื่อน.....	60
3.17 สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มจากวงจรขับเคลื่อน (ก) มุมเลื่อนเฟส 30 องศา (ข) มุมเลื่อนเฟส 90 องศา	60
3.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512mu810.....	61
4.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S1 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	65
4.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S2 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	65
4.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S3 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	66
4.4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S4 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	66
4.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S5 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 IX
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S6 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	67
4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S7 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	68
4.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S8 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	68
4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S9 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	69
4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S10 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	69
4.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S11 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	70
4.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S12 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	70
4.13 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{AN}) และกระแสเฟส (i_A) , (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	72
4.14 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันเฟส (V_{AN}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	73
4.15 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส (i_A) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	73
4.16 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{BN}) และกระแสเฟส (i_B) , (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	74
4.17 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันเฟส (V_{BN}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	74
4.18 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส (i_B) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	75
4.19 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{CN}) และกระแสเฟส (i_C) , (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันเฟส (V_{CN}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	76
4.21 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส (i_C) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	77
4.22 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A) , (400V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	78
4.23 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันไลน์ (V_{AB}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	78
4.24 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสไลน์ (i_A) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	79
4.25 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{BC}) และกระแสไลน์ (i_B) , (400V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	79
4.26 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันไลน์ (V_{BC}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	80
4.27 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสไลน์ (i_B) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	81
4.28 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{CA}) และกระแสไลน์ (i_C) , (400V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	81
4.29 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันไลน์ (V_{CA}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	82
4.30 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสไลน์ (i_C) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์ (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	82
4.31 แรงดันไลน์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ถูกเรียงให้เป็นกระแสตรง.....	83
4.32 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A) ที่มุมเลื่อนเฟส 15 องศา (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	85
4.33 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A) ที่มุมเลื่อนเฟส 45 องศา (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	85
4.34 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A) ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 XI
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับมุมเลื่อนเฟส.....	86
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสโหลด.....	88
4.37 ช่วงเวลารีเซ็ตเมื่อ $C_{bc} = 1.5 \mu F$, (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	89
4.38 ช่วงเวลารีเซ็ตเมื่อ $C_{bc} = 0.5 \mu F$, (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	90
4.39 ผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งที่มีต่อช่วงเวลารีเซ็ต.....	90
4.40 ช่วงเวลารีเซ็ตเมื่อไม่มีตัวเก็บประจุลือกิ่ง, (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	91
4.41 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุตของวงจร, (200V/div, 5A/div).....	92
4.42 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์, (400V/div, 5A/div).....	92
4.43 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของวงจร, (50V/div, 20A/div).....	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบสองระดับกับวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ.....	7
2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ แบบฮาร์ดสวิตช์ , ZVS และ ZVZCS	20
2.3 การเปรียบเทียบข้อบกพร่อง ZVZCS แต่ละแบบ.....	20
4.1 การเกิด ZVZCS ใน switch แต่ละตัว.....	64
4.2 ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮามอนิกส์ของแรงดันเฟสและกระแสเฟส.....	77
4.3 ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮามอนิกส์ของแรงดันไลน์และกระแสไลน์.....	84
4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออกเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเลื่อนเฟส.....	86
4.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออกกับประสิทธิภาพการทำงานของวงจร.....	87
4.6 ผลของค่าตัวเก็บประจุล้อยกถึงต่อช่วงเวลารีเซต.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
XIII
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กันส่วนใหญ่ในแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิ่งมักจะเกิดปัญหาในเรื่องของความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตซ์ (Switching losses) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการกำลังงานไฟฟ้าสูงและความถี่สูงก็จะต้องยังทำความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตซ์นั้นมีความเพิ่มมากขึ้นไปอีก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรมีค่าลดลง เพื่อที่จะเป็นการลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตซ์ดังกล่าวจึงได้มีการนำเสนอเทคนิคการสวิตซ์แบบซอฟต์สวิตซ์ (Soft switching) คือการสวิตซ์แบบแรงดันศูนย์ [1], [2] (Zero - voltage switching : ZVS) ซึ่งเป็นการลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn - on) แต่ก็ยังคงมีปัญหาในเรื่องความสูญเสียจากกระแสไหลวนในวงจรและความสูญเสียในช่วงของการหยุดนำกระแส (Turn - off) จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการสวิตซ์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ [3]-[5] (Zero - voltage zero - current switching : ZVZCS) ขึ้นซึ่งสามารถลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้ทั้งในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn - on) และในช่วงระหว่างการหยุดนำกระแส (Turn - off) โดยได้มีการนำเทคนิค ZVZCS มาใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ประเภทกึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ แต่ทั้งสองวงจรมีข้อจำกัดคือยังไม่สามารถตอบสนองได้ดีต่องานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ เช่นระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่ (HVDC) เป็นต้น ดังนั้นวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับแบบใหม่ที่สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์จึงได้ถูกนำมาทำการศึกษาค้นคว้าในงานวิจัยนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในลักษณะการสวิตซ์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์

1.2.2 เพื่อให้สามารถเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้อย่างเหมาะสม เช่น การเลือกใช้อุปกรณ์สวิตซ์, การเลือกใช้ตัวเก็บประจุความถี่สูงในวงจร, การเลือกวัสดุในการทำหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณควบคุมที่ระดับลิวเอ็ม

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลารีเซ็ตตัวของกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุลือกัก

1.2.5 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้น

1.2.6 เพื่อศึกษาและประยุกต์นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตช์โดยใช้สัญญาณที่ระดับลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสจำนวน 12 สัญญาณ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 สามารถเข้าใจและอธิบายหลักการเกิดการทำงานภายใต้แรงดันศูนย์ได้โดยอาศัยหลักการเลื่อนเฟสของสัญญาณควบคุมและพลังงานภายในตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล การทำงานภายใต้กระแสศูนย์เกิดได้โดยใช้หลักการความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกัก

1.3.2 สามารถเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้อย่างเหมาะสมกับพิกัดการทำงานของวงจร

1.3.3 สามารถเข้าใจและอธิบายได้ถึงการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ระดับลิวเอ็มโดยมุมเลื่อนเฟสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันและกระแสต้านเอาท์พุทของวงจร หากมุมเลื่อนเฟสมากขึ้นก็จะทำให้แรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้ามี่ค่าน้อยลง

1.3.4 สามารถเข้าใจและอธิบายได้ถึงการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลารีเซ็ตตัวของกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ว่าขนาดของตัวเก็บประจุลือกักมีความสัมพันธ์ที่ทำให้ช่วงเวลารีเซ็ตมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

1.3.5 สามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรได้โดยประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ไม่น้อยกว่า 90 %

1.3.6 สามารถสร้างสัญญาณควบคุมที่ระดับลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสในการควบคุมสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC และสามารถปรับมุมเลื่อนเฟสจากภายนอกได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

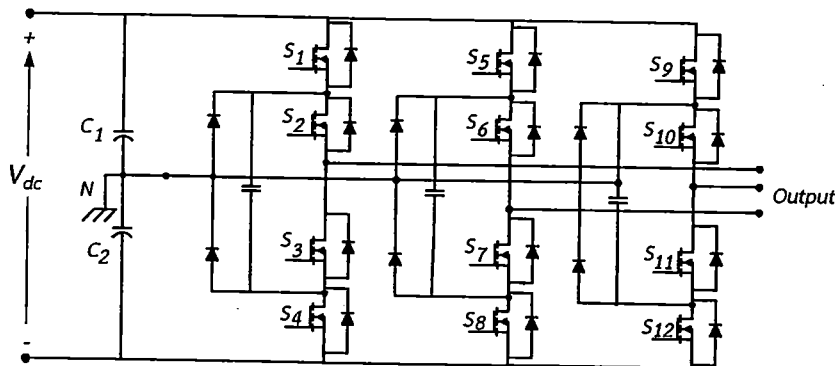
แนวคิดที่ใช้ในการวิจัยนี้คือการสร้างวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์โดยการนำวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ NPC (Neutral Point Clamped) [5] ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

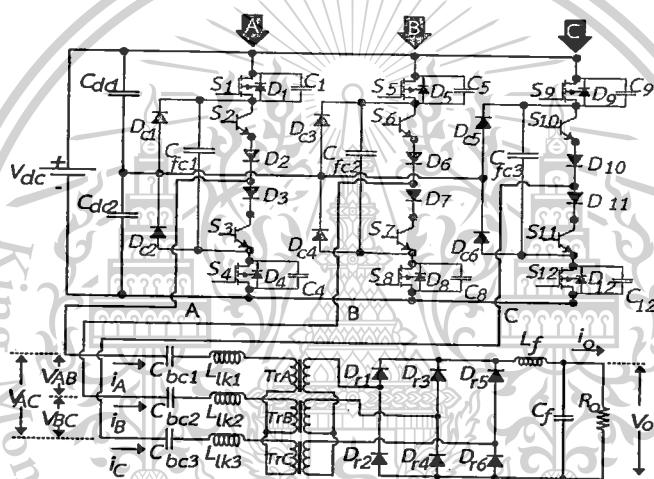
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3 กิ่งมาต่อกันเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ [6]-[8] เพื่อเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

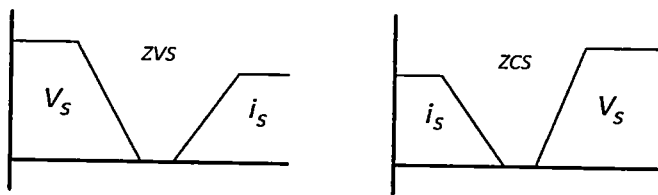


รูปที่ 1.2 วงจรกำลังทั้งหมด

จากนั้นเอาท์พุทที่ได้จากวงจรในรูป 1.1 จะถูกลดระดับแรงดันและเพิ่มขนาดกระแสโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสจากนั้นจะได้รับการแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้งโดยผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อจ่ายยังโหลดต่อไป โดยมีการใช้ตัวเก็บประจุลือกักกึ่งในการช่วยเร่งให้เกิดการรีเซ็ตตัวของกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้า [9] จะทำให้ได้วงจรที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 1.2

ซึ่งการควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 12 ตัวจะใช้สัญญาณพัลส์บิตวเอ็มแบบที่มีการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณสวิตช์วงนอกและสวิตช์วงในเพื่อให้เกิดการเหลื่อมกันระหว่างกระแสและแรงดันของสวิตช์วงนอกจึงเกิดการ ทำงานภายใต้แรงดันเป็นศูนย์ได้นอกจากนี้ยังต้องอาศัยพลังงานของตัวเหนี่ยวนำรั้วไหลในการกำจัดประจุตกค้างภายในสวิตช์วงนอกก่อนที่กระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ส่วนการเกิดการทำงานภายใต้กระแสศูนย์ของสวิตช์วงในนั้นจะใช้หลักการของความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสทำให้การเพิ่มขึ้นของกระแสเฟสหนึ่งจะส่งผลทำให้กระแสอีกเฟสมีค่า

ลดลงจนเป็นศูนย์นอกจากนี้การใช้ตัวเก็บประจุบล็อกก็จะเป็นการช่วยเร่งให้เกิดการลดลงได้รวดเร็วขึ้นซึ่งลักษณะการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ลักษณะการเกิดการ ทำงานแบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการสร้างโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบการทำงานโดยทำการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อสร้างสัญญาณโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นทำการทดสอบการทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 3.5 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 530 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาออก 110 โวลต์และความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิรตซ์ และใช้การปรับกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการมมูเลชั่นเฟสของสัญญาณพีดับลิวเอ็ม หลังจากนั้นเป็นการเก็บบันทึก ผลการทดลองและคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรโดยรวมพร้อมทั้งสรุปผลและข้อเสนอแนะ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับลำดับขั้นตอนของการทำงานวิจัยขั้นนี้ได้เริ่มการศึกษาในเรื่องที่จะทำวิจัยอย่างเป็นทางการ โดยมีแหล่งข้อมูลรวมทั้งวิธีการค้นหาจุดเด่นของงานที่จะนำเสนอ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนี้ก็จะประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

1. ทำการเริ่มสืบค้นผลงานวิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่ใช้เทคนิคการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์แบบต่างๆ ทั้งจากบทความ วารสาร หนังสือ วิทยานิพนธ์ งานวิจัย งานประชุมวิชาการและทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทั้งภาษาไทยและภาษาต่างประเทศเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและถูกต้องในการทำงานวิจัย
2. ศึกษาในรายละเอียดของข้อมูลที่ได้อ่านว่ามาจากข้อ 1 นั้นเพื่อหาประเด็นหรือจุดเด่นที่จะนำมาใช้ในการทำงานวิจัย โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคอยแนะนำ
3. นำหัวข้อหรือประเด็นที่ได้นำมาใช้ศึกษาทำงานวิจัยมาวางแผนงานและจัดทำขอบเขตระยะเวลาการดำเนินงานให้ชัดเจน
4. เลือกเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีจำนวนพอร์ตโมดูลพีดับลิวเอ็มรองรับการใช้งานกับงานวิจัยที่ต้องการใช้งานจำนวน 12 พอร์ตได้ โดยได้ทำการเลือกเบอร์ dsPIC33ep512mu810 ของบริษัท Microship จากนั้นได้ทำการศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5. ขั้นตอนของการสร้างโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ที่จะใช้ในการวิจัย ซึ่งจะต้องจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ มาประกอบขึ้นเป็นวงจรกำลังรวมไปถึงวงจรควบคุม จากนั้นทำการเชื่อมต่อระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง
6. ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์ส่วนต่างๆ วงจรกำลังและวงจรควบคุมที่ได้สร้างขึ้น รวมทั้งทดสอบโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นด้วย
7. ขั้นตอนการทดลองและเก็บบันทึกผลการทดลอง รวมไปถึงวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองรวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยวงจรตีซี-ตีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ และกระแสศูนย์นั้น จำเป็นที่จะต้องให้หลักการทฤษฎีในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายๆด้านประกอบเข้าด้วยกัน อันได้แก่ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ เทคนิคการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำ LC ฟิลเตอร์ นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม (Phase shift pulse width modulation) อีกด้วย ซึ่งหลักการดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเข้าใจเนื่องจากจำเป็นต้องใช้ความเข้าใจเหล่านี้ในการออกแบบและสร้างวงจรที่ได้นำเสนอ

2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ (Neutral-Point Clamped Inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ [5] หรือที่เรียกว่าอินเวอร์เตอร์แบบ NPC (Neutral-Point Clamped) นั้นจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับคือ อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half-bridge inverter) อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (Full-bridge Inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส (Three-phase Inverter) ในกรณีอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ ในกึ่งสวิตช์จะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัวแต่ในกรณีของอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับในกึ่งสวิตช์จะประกอบไปด้วยสวิตช์ 2 ตัวเท่านั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับจะมีตัวเก็บประจุสองตัวซึ่งมีขนาดเท่ากันต่ออนุกรมและต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้ากับอินเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุทั้งสองตัวนี้จะถูกเรียกว่า “ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน” เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน คือ $V_{dc}/2$ ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{dc}) ซึ่งจะส่งผลต่อสวิตช์ภายในวงจรอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากในวงจรแบบสามระดับนั้นสวิตช์ในวงจรจะแบกรับภาระแรงดันในช่วงของการหยุดนำกระแสเพียงครึ่งเดียวของแรงดันขาเข้าทำให้สามารถลดความเสียหายที่จะเกิดกับสวิตช์ได้และสามารถลดพิกัดของสวิตช์ลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแบบสองระดับ [8] นอกจากนั้นการใช้งานวงจรแบบสามระดับจะทำให้แรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์มีความเป็นสามระดับของแรงดันส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน (THD_v : Total harmonics distortion) ตีขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวงจรแบบสองระดับซึ่งจะพบว่าในกรณีวงจรแบบสองระดับจะมีค่า THD_v เท่ากับ 43.8 % [14] ส่วนกรณีวงจรแบบสามระดับค่า THD_v จะน้อยกว่า 43.8%

ในวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับนั้นจะประกอบไปด้วยกิ่งสวิตช์เพียงกิ่งเดียวและมีสวิตช์จำนวน 4 อยู่ภายในกิ่งนั้น ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับนั้นจะประกอบไปด้วยกิ่งสวิตช์สองกิ่งคือ leading-leg และ lagging-leg ซึ่งแต่ละกิ่งจะประกอบด้วยสวิตช์กิ่งละ 4 ตัว เช่นเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์นั้นจะพบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบกึ่งบริดจ์ 2 เท่า จึงมีความเหมาะสมที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลตสูงขึ้น ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรให้สูงขึ้น สามารถกระทำได้โดยนำอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับหรืออินเวอร์เตอร์แบบ NPC ต่อขนานกันให้มีลักษณะเป็นวงจรแบบเต็มบริดจ์หรือวงจรแบบสามเฟสดังรูปที่ 2.4

เงื่อนไขสำคัญที่สำคัญอีกประการหนึ่งของอินเวอร์เตอร์นั้นคือการทำงานของสวิตช์ในกิ่งเดียวกันจะต้องไม่ทำงานพร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกัน มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกและบัสลบ ในทางอุดมคติเวลาการสวิตช์ของคู่สวิตช์จะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีเวลาที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่าช่วงเวลาเดดไทม์ (dead time) โดยเดดไทม์จะอยู่ในช่วงเวลาก่อนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์จากการนำกระแสเป็นช่วงในการไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแสซึ่งวงจรแบบสามระดับที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะมีการเผื่อช่วงเวลาเดดไทม์ของคู่สวิตช์ S_1 กับ S_4 และคู่สวิตช์ S_2 กับ S_3 ดังรูปที่ 2.5

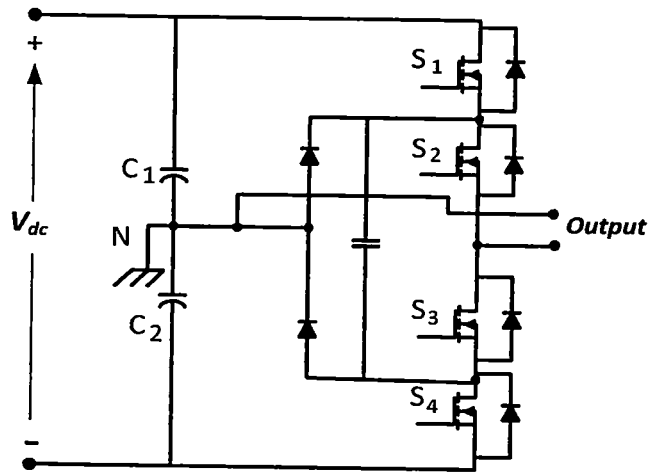
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบสองระดับ	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบสามระดับ
1. แรงดันตกคร่อมสวิตช์ ในช่วงของการหยุดนำกระแส	มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า	มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เพียงครึ่งเดียวแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
2. รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์มีเพียงสองระดับ (V_{dc} , $-V_{dc}$) ซึ่ง THDv เท่ากับ 48.3%	แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์มีสามระดับ ($V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$, 0) ซึ่ง THDv เท่ากับ 30%
3. จำนวนสวิตช์ที่ใช้ใน 1 สวิตช์	ใช้สวิตช์จำนวน 2 ตัว	ใช้สวิตช์จำนวน 4 ตัว
4. ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน	สูญเสียกำลังน้อยกว่าเนื่องจากจำนวนอุปกรณ์น้อยกว่า	สูญเสียกำลังมากกว่าเนื่องจากจำนวนอุปกรณ์มากกว่า

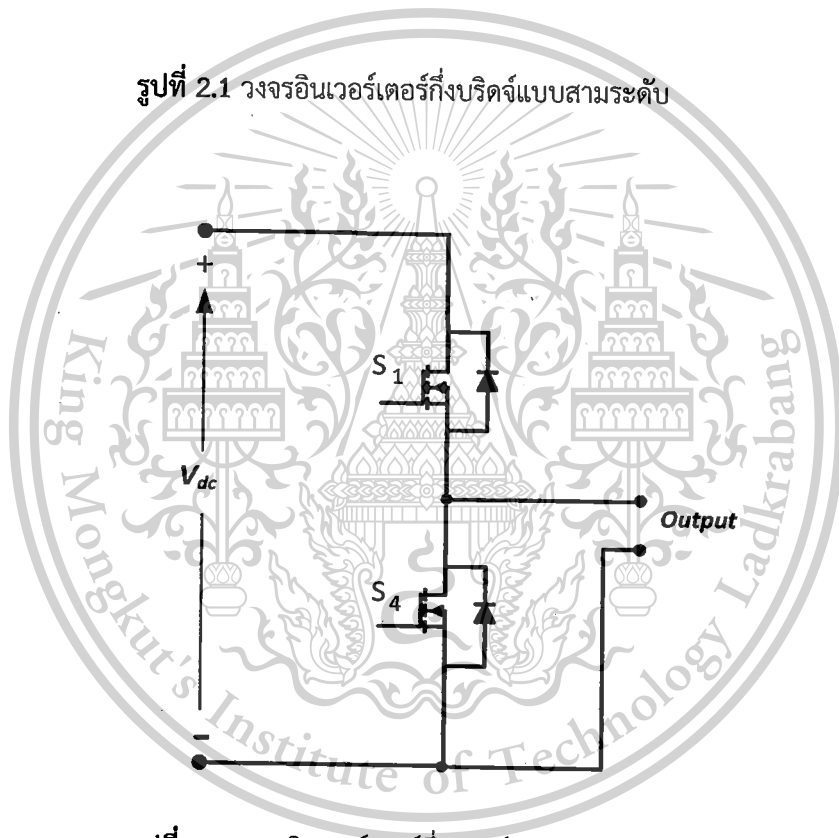
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ

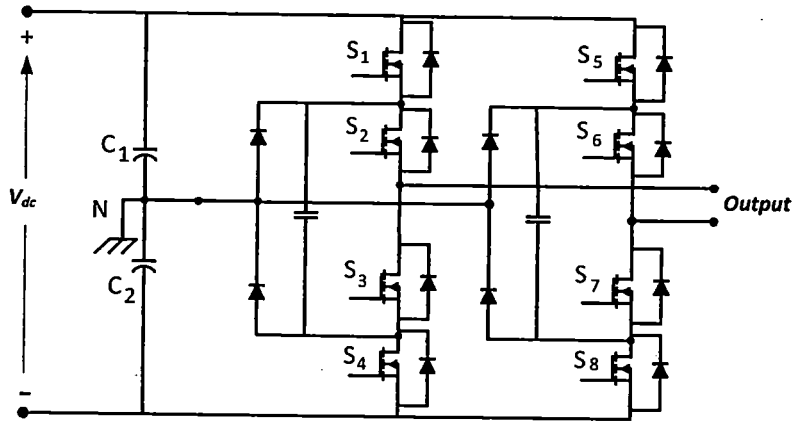


รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสองระดับ

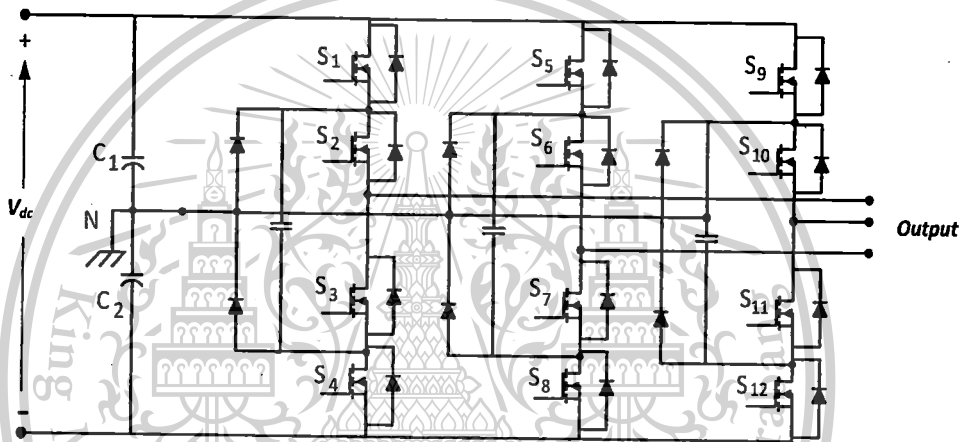
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

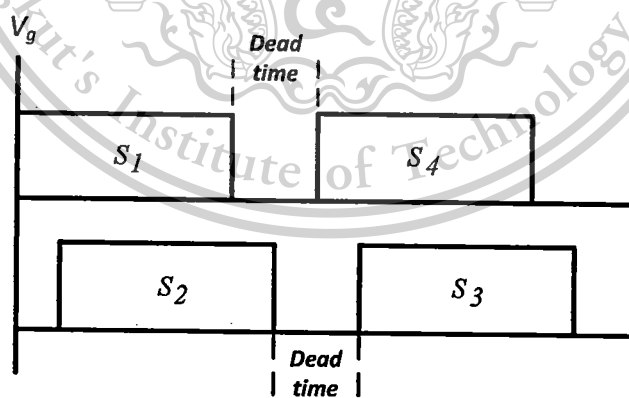
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ



รูปที่ 2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบสามระดับ

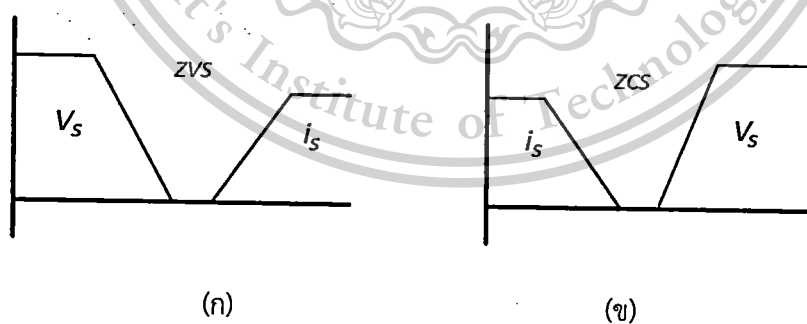


รูปที่ 2.5 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ของสวิตช์

2.2 ทฤษฎีการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ

ในปัจจุบันนี้ได้มีเทคนิคการสวิตช์หลายวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดกำลังสูงนั้นมักจะเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงระหว่างการสวิตช์ (Switching losses) ซึ่งจะเรียกการสวิตช์ในลักษณะนี้ว่าการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์ (Hard switching) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์เพื่อที่จะลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการสวิตช์และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเรียกว่าเทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ (Soft switching) ยกตัวอย่างเช่นการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero-voltage switching : ZVS) , การสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (Zero-current switching : ZCS) และการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (Zero-voltage zero-current switching : ZVZCS) เป็นต้น โดยลักษณะของการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างการเริ่มนำกระแส (Turn on) สามารถสังเกตได้เมื่อทำการวัดรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะกระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ดังรูปที่ 2.6 (ก) ทำให้ไม่เกิดการช้อนทับกันระหว่างแรงดันและกระแสดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงของการเริ่มนำกระแส ส่วนลักษณะของการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (ZCS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างการหยุดนำกระแส (Turn off) โดยรูปคลื่นกระแสจะลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์เกิดขึ้นดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงของการหยุดนำกระแสซึ่งแสดงได้รูปที่ 2.6 (ข)

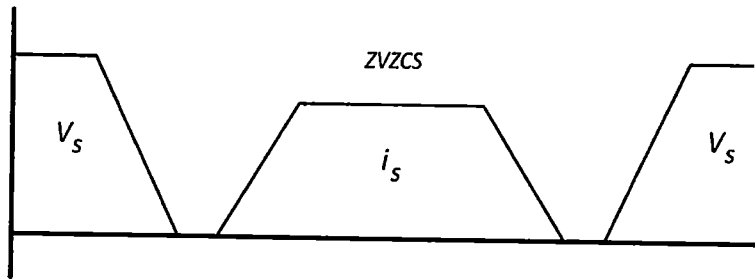
การสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (ZVZCS) เป็นการนำเทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) และแบบกระแสศูนย์ (ZCS) รวมเข้าด้วยกันดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn on) และในช่วงของการหยุดนำกระแส (Turn off) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6 (ค) ส่วนในรูปที่ 2.7 คือลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

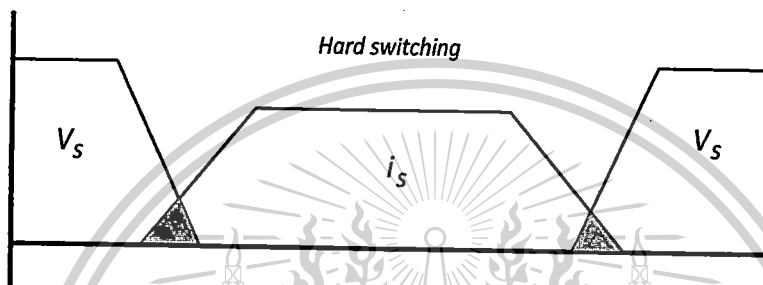
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ค)

รูปที่ 2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์



รูปที่ 2.7 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์

2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์

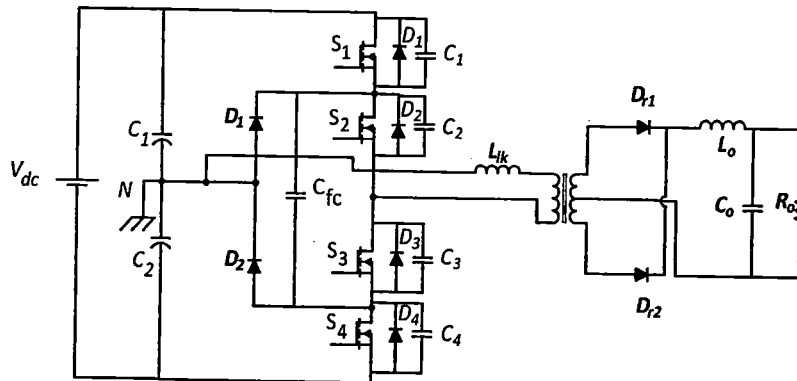
เทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ได้มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหัวข้อนี้จะได้ทำการนำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะช่วยทำให้วงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นทำงานได้ที่ความถี่สูงและกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่จะได้กล่าวถึงนั้นจะใช้สัญญาณควบคุมสวิตช์พีดับบลิวเอ็มแบบที่มีการเลื่อนเฟส (Phase-shift Pulse width modulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ ZVS



รูปที่ 2.8 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ

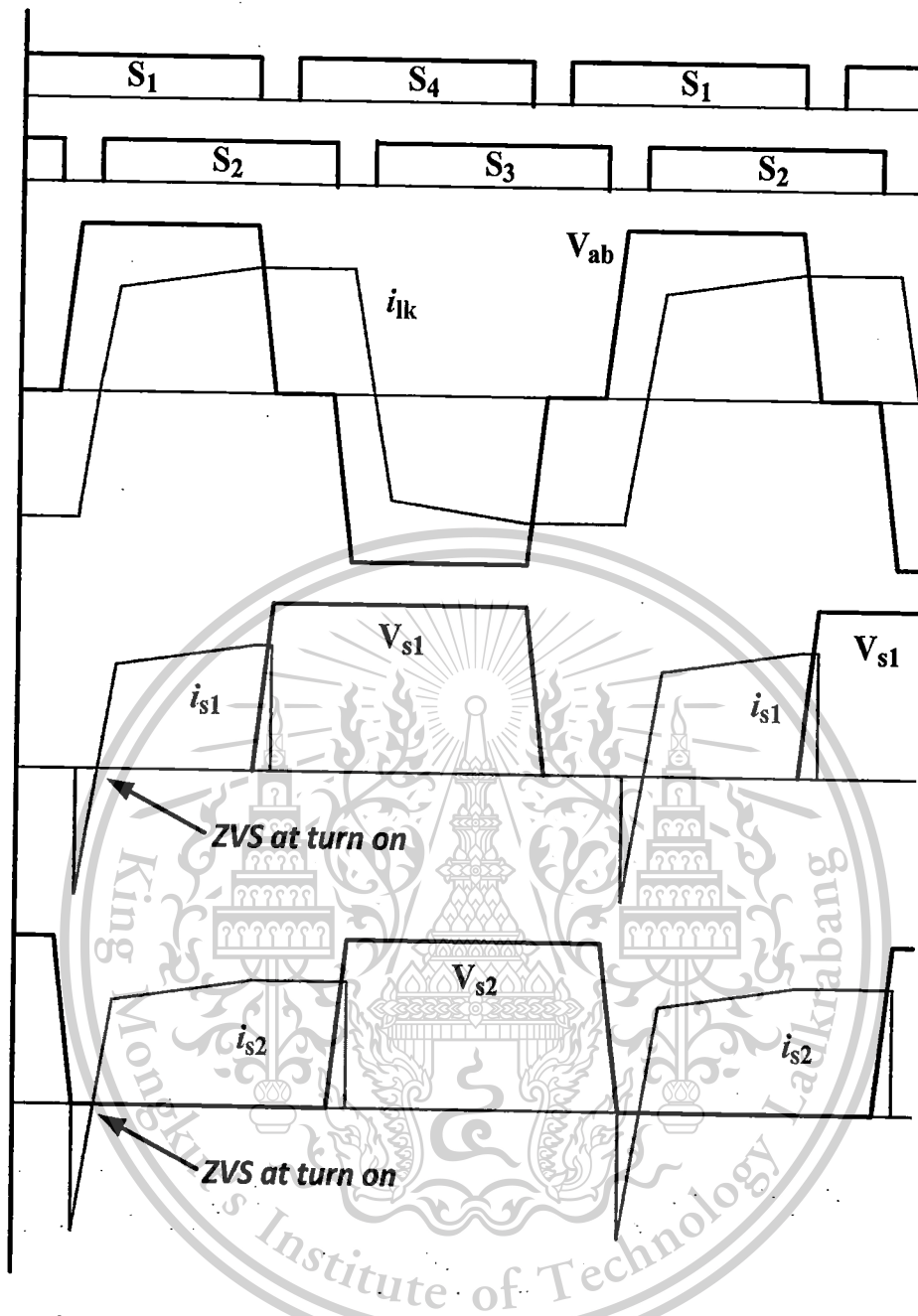
วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์สามระดับแบบ ZVS สามารถแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบนี้จะทำงานโดยใช้สัญญาณควบคุม PWM แบบเลื่อนเฟส และเกิดการทํางานแบบ ZVS ในขณะ turn on โดยใช้พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance : L_{lk}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ในการติสซาร์จตัวเก็บประจุภายในสวิตช์และซาร์จสวิตช์อีกตัวที่เป็นคู่สวิตช์ของมันและกัน (S_1 คู่กับ S_4 และ S_2 คู่กับ S_3) ผ่านทางตัวเก็บประจุปลายอิ่ง C_{fc} โดยการติสซาร์จนี้จะเกิดในช่วงการฟรีวิล กระแสและแรงดันในด้านปฐมภูมิจะแสดงดังรูปที่ 2.9 สวิตช์ S_2 และไดโอด D_1 จะนำกระแสหลังจากที่สวิตช์ S_1 turn off ภายใต้อาการฮาร์ดสวิตชิง โดยจะเกิดความสูญเสียปริมาณเล็กน้อย เนื่องจาก C_1 จะประพุดิตัวคล้ายกับ turn off snubber ต่อมาสวิตช์ S_2 จะถูก turn off ในลักษณะคล้ายกับสวิตช์ S_1 โดยกระแสปฐมภูมิซาร์จประจุเข้าสู่ C_2 และจะติสซาร์จประจุ C_3 จากนั้นจะเกิดการฟรีวิลลิ่งของไดโอด D_{11} และ D_{12} หลังจากสิ้นสุดโหมดของการฟรีวิลลิ่ง สวิตช์ S_3, S_4 จะสามารถ turn on ได้ภายใต้เงื่อนไขการทํางานแบบ ZVS ได้ อย่างไรก็ตามสวิตช์ S_3, S_4 จะสามารถ turn on ในภายใต้เงื่อนไขการทํางานแบบ ZVS ได้เมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ใน leakage inductance มากกว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ C_3 และ C_4 ดังนั้น C_3 และ C_4 จะต้องทำการติสซาร์จอย่างสมบูรณ์ ก่อนที่สวิตช์ S_3 และ S_4 จะเริ่มนำกระแส

ข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ ZVS นั่นคือ จะเกิดกระแสไหลวนในอุปกรณ์สวิตช์และหม้อแปลงในช่วงฟรีวิลลิ่ง ทำให้มีการสูญเสียเกิดขึ้นในวงจรคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ทำงานแบบ ZVS

2.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ ZVZCS

จากหัวข้อที่ 2.3.1 พบว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ทำงานแบบ ZVS นั้น ยังมีข้อเสียบางประการเช่นเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการหยุดนำกระแสของอุปกรณ์ สวิตช์ในวงจรและยังมีความสูญเสียกำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสไหลวนเป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะ ต้องการลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์แบบ ZVZCS โดย หลักการทำงานจะมีลักษณะคล้ายกันกับวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVS แต่จะแตกต่างกันที่

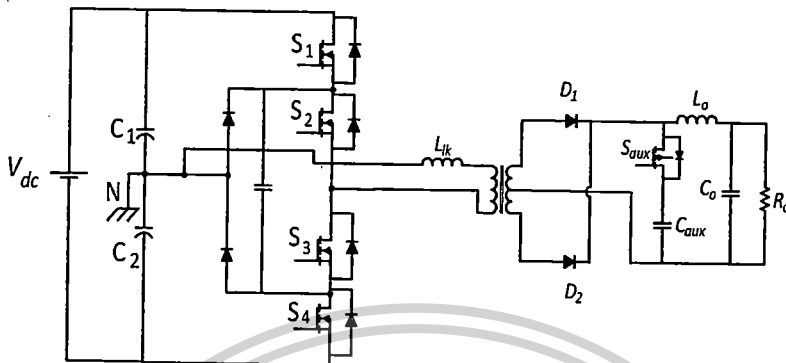
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะมีการลดช่วงเวลาในการพรีวีลของกระแสปฐมภูมิลง ซึ่งเทคนิคที่ได้นำมาใช้นี้มีด้วยกันหลายเทคนิค ซึ่งจะได้ทำการนำเสนอ ดังนี้

2.3.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ Auxilaty switch



รูปที่ 2.10 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค active clamping

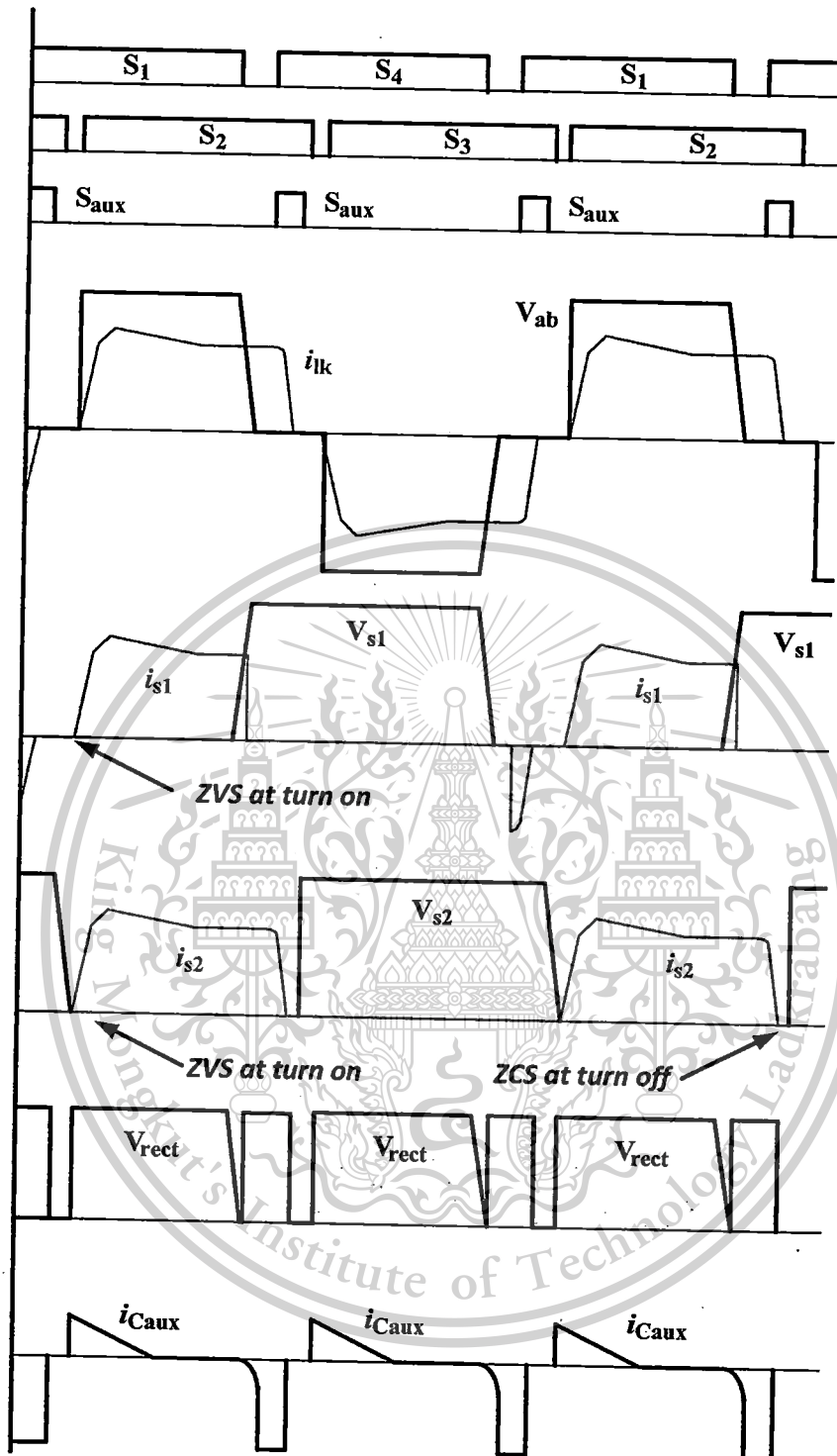
วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค active clamping [10] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ด้านทุติยภูมิมีการต่อสวิตช์ และตัวเก็บประจุ (C_{aux}) ซึ่งเรียกรวมกันว่า active clamping ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) กับสวิตช์ช่วงใน (S_2, S_3) ได้ โดยในช่วงโหมดของการพรีวีลของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้น สวิตช์ (S_{aux}) จะถูกสั่งให้เกิดการทำงาน (Turn on) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C_{aux}) ส่งผลต่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk}) ของหม้อแปลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เทคนิคนี้ช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์ช่วงในและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนได้ แต่อย่างไรก็ตามที่สวิตช์ช่วงนอก (S_1, S_4) ยังเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสอยู่และทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบ ZVS เพียงอย่างเดียวเท่านั้นต่างจากสวิตช์ช่วงในที่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ZVZCS ดังนั้นสวิตช์ช่วงใน (S_2, S_3) จึงไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ โดยรูปคลื่นต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

ข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบนี้คือ จำเป็นต้องมีการใช้สวิตช์เพิ่มและต้องมีชุดควบคุมเพิ่มเพื่อใช้กับชุด Active clamping จึงทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



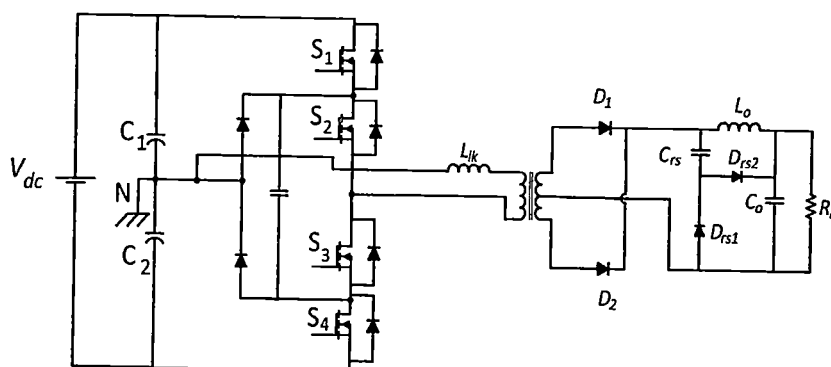
รูปที่ 2.11 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ active clamping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

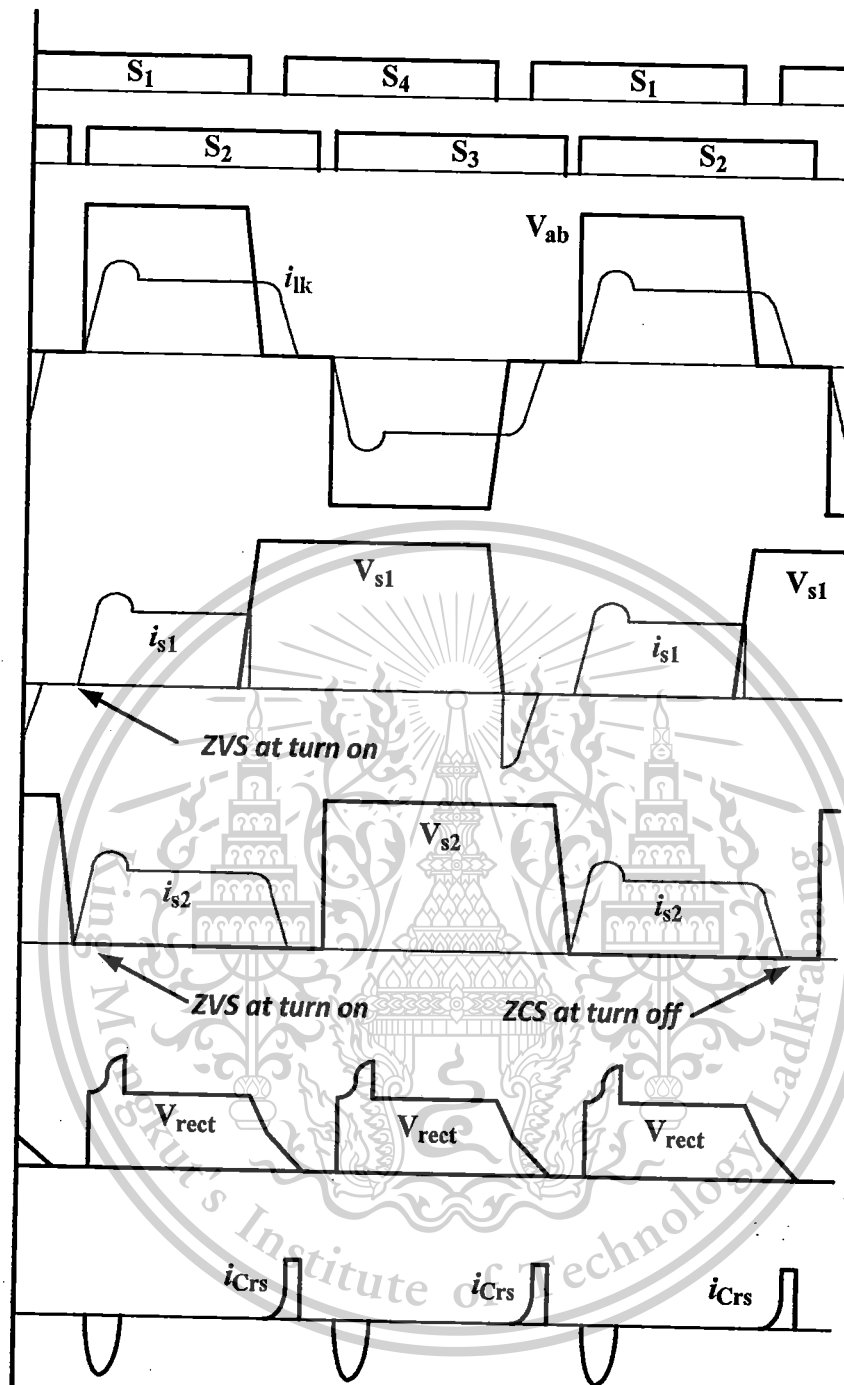
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ passive clamping



รูปที่ 2.12 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค passive clamping

วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค passive clamping [11] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อไดโอด D_{rs1} , D_{rs2} และตัวเก็บประจุ C_{rs} ซึ่งจะเรียกอุปกรณ์เหล่านี้รวมกันว่า passive clamping ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) กับสวิตช์ช่วงใน (S_2 , S_3) ได้ โดยในช่วงโหมดของการฟรีวิลของกระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้น ไดโอด (D_{rs1}) จะถูกไบอัสให้เกิดการทำงาน (Turn on) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C_{rs}) ส่งผลต่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk}) ของหม้อแปลง กล่าวคือตัวเก็บประจุ (C_{rs}) จะส่งผลทำให้แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าแรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองฝั่งของหม้อแปลง ความแตกต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนี้จะตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เทคนิคนี้ช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์ช่วงในและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนได้ แต่อย่างไรก็ตามที่สวิตช์ช่วงนอก (S_1 , S_4) ยังเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสอยู่และทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบ ZVS เพียงอย่างเดียวเท่านั้นต่างจากสวิตช์ช่วงในที่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ZVZCS ดังนั้นสวิตช์ช่วงใน (S_2 , S_3) จึงไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ โดยรูปคลื่นต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 แต่ยังคงมีข้อเสียคือจะเกิดแรงดันเกินและแรงดันเกิน (Overshoot) ที่ไดโอดเรียงกระแสอันเนื่องมาจากการรีโซแนนซ์ของพารามิเตอร์ที่ต่อเข้าไปในวงจร



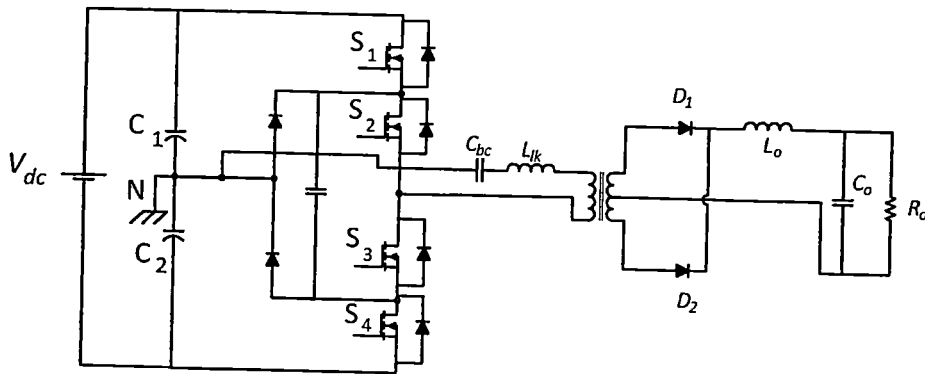
รูปที่ 2.13 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ passive clamping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content of the document when use.

2.3.2.3 วงจรกึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor



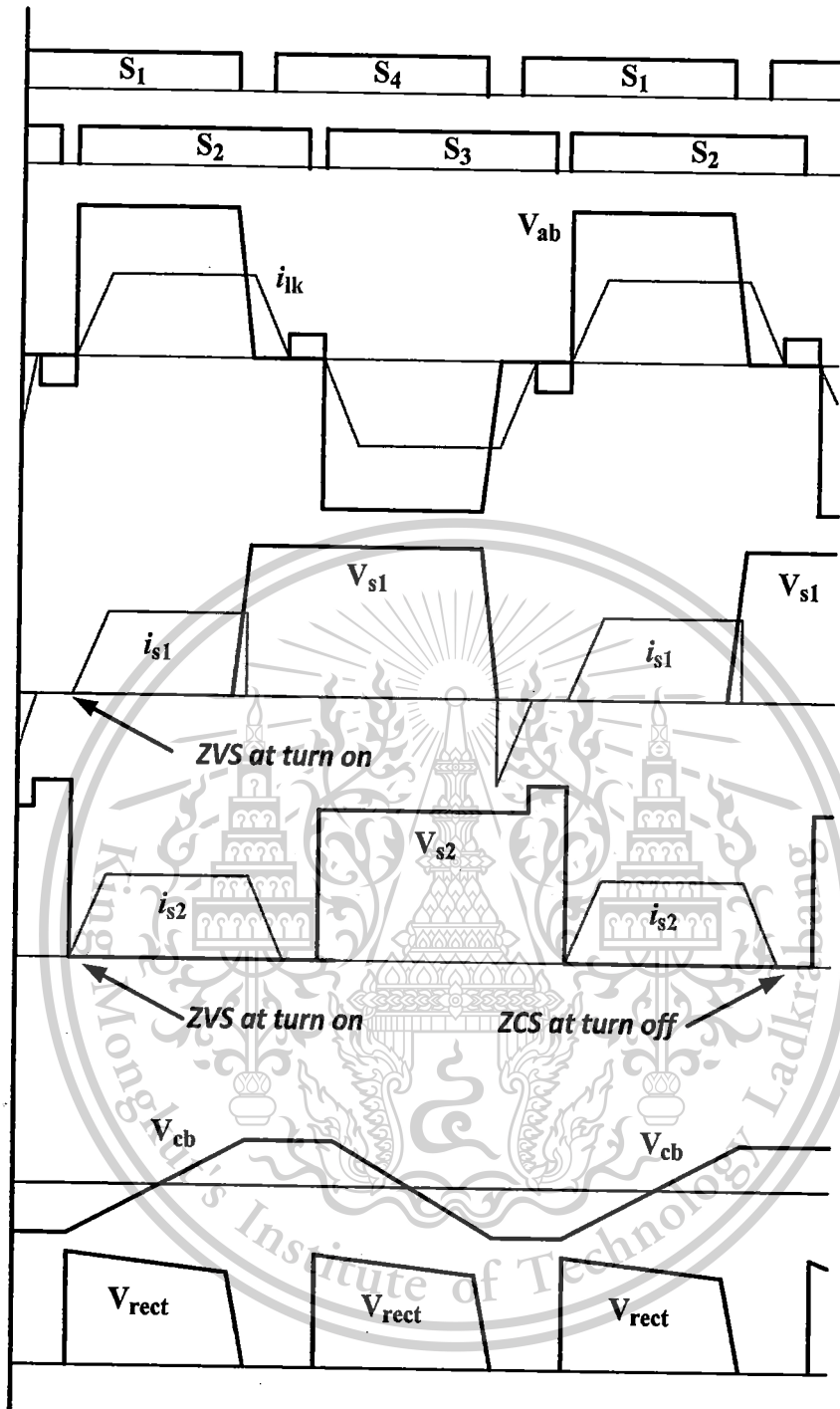
รูปที่ 2.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor

วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor [12] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (C_{bc}) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) กับสวิตช์ช่วงใน (S_2, S_3) ได้เช่นเดียวกับกับเทคนิคที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยในช่วงโหมดของการ พรีวิลของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้น แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (C_{bc}) ส่งผลต่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk}) ของหม้อแปลง กล่าวคือแรงดันของตัวเก็บประจุ (C_{bc}) จะตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เทคนิคนี้ช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์ช่วงในและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนได้ แต่สวิตช์ช่วงนอก (S_1, S_4) ยังคงเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสอยู่และทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบ ZVS เพียงอย่างเดียวเท่านั้นต่างจากสวิตช์ช่วงในที่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ZVZCS ดังนั้นสวิตช์ช่วงใน (S_2, S_3) จึงไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ โดยรูปคลื่นต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ข้อดีของเทคนิคนี้คือมีความง่ายในการออกแบบประหยัดต้นทุน เพราะไม่จำเป็นต้องใช้ชุดคอนโทรลเพิ่มเติม แต่ก็ยังมีข้อเสียบางประการคือ การใช้ DC-blocking capacitor จะทำให้เกิด voltage drop ขึ้นที่ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งทำให้แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงจึงทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ แบบฮาร์ดสวิตช์ , ZVS และ ZVZCS

เทคนิคการสวิตช์	ข้อดี	ข้อเสีย
ฮาร์ดสวิตช์	1. ได้พิกัดกำลังเอาต์พุตมาก	1. เกิดกำลังการสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์ 2. อุปกรณ์ต้องทนพิกัดสูง 3. ส่วนการระบายความร้อนมีขนาดใหญ่
ZVS	1. ลดกำลังการสูญเสียขณะ turn on สวิตช์ได้ 2. ราคาต้นทุนต่ำกว่าแบบฮาร์ดสวิตช์	1. ไม่สามารถลดกำลังขณะสูญเสีย turn off ได้ 2. กระแสไหลวนในอุปกรณ์สวิตช์และหม้อแปลงในช่วงฟรีวิลลิ่งจะมีค่าสูง
ZVZCS	1. ลดกำลังขณะสูญเสียได้ทั้ง turn on และ turn off ทำให้ประสิทธิภาพสูง 2. ส่วนระบายความร้อนมีขนาดเล็ก 3. มีเทคนิคการสวิตช์หลายรูปแบบให้เลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน	1. วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น

วงจร ZVZCS แบบต่างๆ จะมีข้อดีที่คล้ายคลึงกันดังตารางที่ 2.2 แต่จะมีข้อบกพร่องที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อบกพร่อง ZVZCS แต่ละแบบ

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบที่มี active clamping ด้านทุติยภูมิ	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบที่มี passive clamping ด้านทุติยภูมิ	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบมี DC-blocking capacitor และ ตัวเหนี่ยวนำแบบอิมิตัว
1. มีการใช้สวิตช์เพิ่มและต้องมีชุดควบคุมเพิ่มเพื่อใช้กับชุด active clamping จึงทำให้ต้นทุนสูงขึ้น 2. ต้องใช้ Caux ที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะจ่ายกระแสให้ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ได้เพียงพอ	1. ต้องมีการเพิ่มไดโอดและตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรด้านทุติยภูมิแต่ต้นทุนต่ำกว่าแบบ active clamping 2. แรงดันเค้นและแรงดันเกินมีค่าสูงที่ไดโอดเรียงกระแสเป็นผลมาจากการรีโซแนนซ์	1. มีการใช้ตัวเก็บประจุ DC-blocking capacitor ทำให้เกิด voltage drop ที่ตัวเก็บประจุ

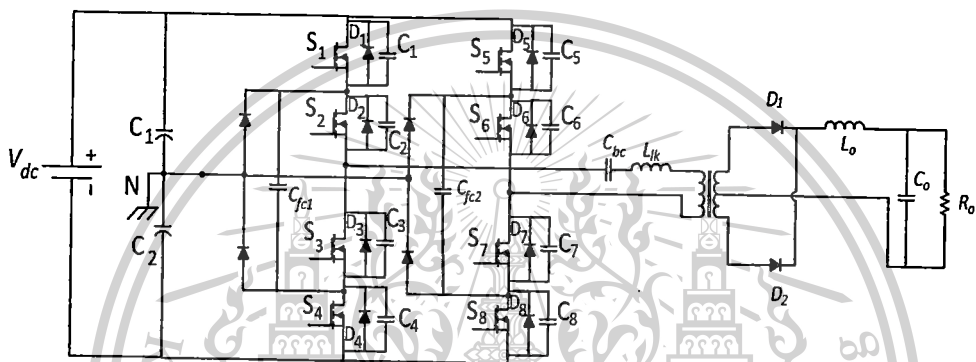
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 2.3 ข้างต้นจะพบว่ามียุทธศาสตร์หลายแบบที่ทำให้เกิดการดำเนินงานของสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (ZVZCS) โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกใช้เทคนิคของ DC-Blocking capacitor ในการทำให้เกิดการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ เนื่องจากมีความง่ายต่อการออกแบบและค่าของ DC-Blocking capacitor ยังมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการลดลงของกระแสประจุหรือที่เรียกว่าช่วงเวลารีเซ็ต “Reset time” ซึ่งมีความน่าสนใจต่อการทำงานวิจัย แต่เนื่องจากวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ได้ยกตัวอย่างนั้น ยังไม่สามารถตอบสนองต่อลักษณะงานที่ต้องการกำลังงานไฟฟ้าที่สูงได้ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้วงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ที่พิกัดกำลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น จึงได้มีการนำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับที่ใช้การสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ขึ้น

2.3.2.4 วงจรเต็มบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor



รูปที่ 2.16 วงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor

วงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ [13] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าจะประกอบด้วยกึ่งสวิตช์สองกึ่งคือกึ่งสวิตช์หน้า (leading switches) และกึ่งสวิตช์หลัง (lagging switches) ซึ่งทั้งสองกึ่งจะมีลักษณะคล้ายกันโดยประกอบไปด้วยสวิตช์กึ่งละ 4 ตัวคือ S1-S4 สำหรับสวิตช์กึ่งหน้าและ S5-S8 สำหรับสวิตช์กึ่งหลัง ซึ่งลักษณะการทำงานของวงจรเต็มบริดจ์นี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับวงจรแบบกึ่งบริดจ์แต่จะสามารถทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเป็นสองเท่า โดยเทคนิคที่ใช้ทำให้เกิดการทำงานภายใต้เงื่อนไข ZVZCS คือการใช้ DC-blocking capacitor โดยลักษณะรูปคลื่นของการทำงานของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าช่วงเวลารีเซ็ต “Reset time” ของกระแสด้านประจุประจุลือกกึ่ง (DC-blocking capacitor) ซึ่งสามารถที่จะหาค่าของช่วงเวลารีเซ็ตได้จากสมการที่ 2.1 หากค่าตัวเก็บประจุลือกกึ่ง (C_{bc}) มีค่ามากทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกกึ่ง (V_{bc}) มีค่าน้อยเมื่อค่าแรงดัน V_{bc} มีค่าน้อยก็จะทำให้กระแสประจุประจุลือกกึ่ง (C_{bc}) มีค่าน้อยลงก็จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกกึ่ง (V_{bc}) มีค่ามากขึ้นเมื่อค่าแรงดัน V_{bc} มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้กระแสประจุประจุลือกกึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หมายความว่าเวลารีเซ็ตจะมีค่าน้อยลง ซึ่งช่วงเวลารีเซ็ตของกระแสปฐมภูมินั้นส่งผลต่อความสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์, ไดโอดและหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเนื่องจากถ้าหากช่วงเวลารีเซ็ตมีค่ามากกระแสปฐมภูมินั้นก็จะไหลวนผ่านอุปกรณ์ภายในวงจรมากทำให้มีความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงฟรีวิลมากตามไปด้วย แต่ถ้าหากช่วงเวลารีเซ็ตมีค่าน้อยทำให้มีความสูญเสียในช่วงฟรีวิลน้อยลง การที่ใช้ค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (C_{bc}) น้อยนั้นมีข้อดีตรงที่ทำให้ความสูญเสียในช่วงฟรีวิลน้อยลงแต่ก็มีข้อเสียตรงที่แรงดันที่ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (C_{bc}) จะมามีค่ามากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าหม้อแปลงมีค่าต่ำลงทำให้ส่งผลถึงประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้วย ดังนั้นการออกแบบเพื่อค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งนั้นควรจะมีเหมาะสมเนื่องจากต้องพิจารณาในเรื่องแรงดัน voltage drop ภายในตัวเก็บประจุด้วย

$$T_{reset} = \frac{L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{cbP}} \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า L_{lk} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้า

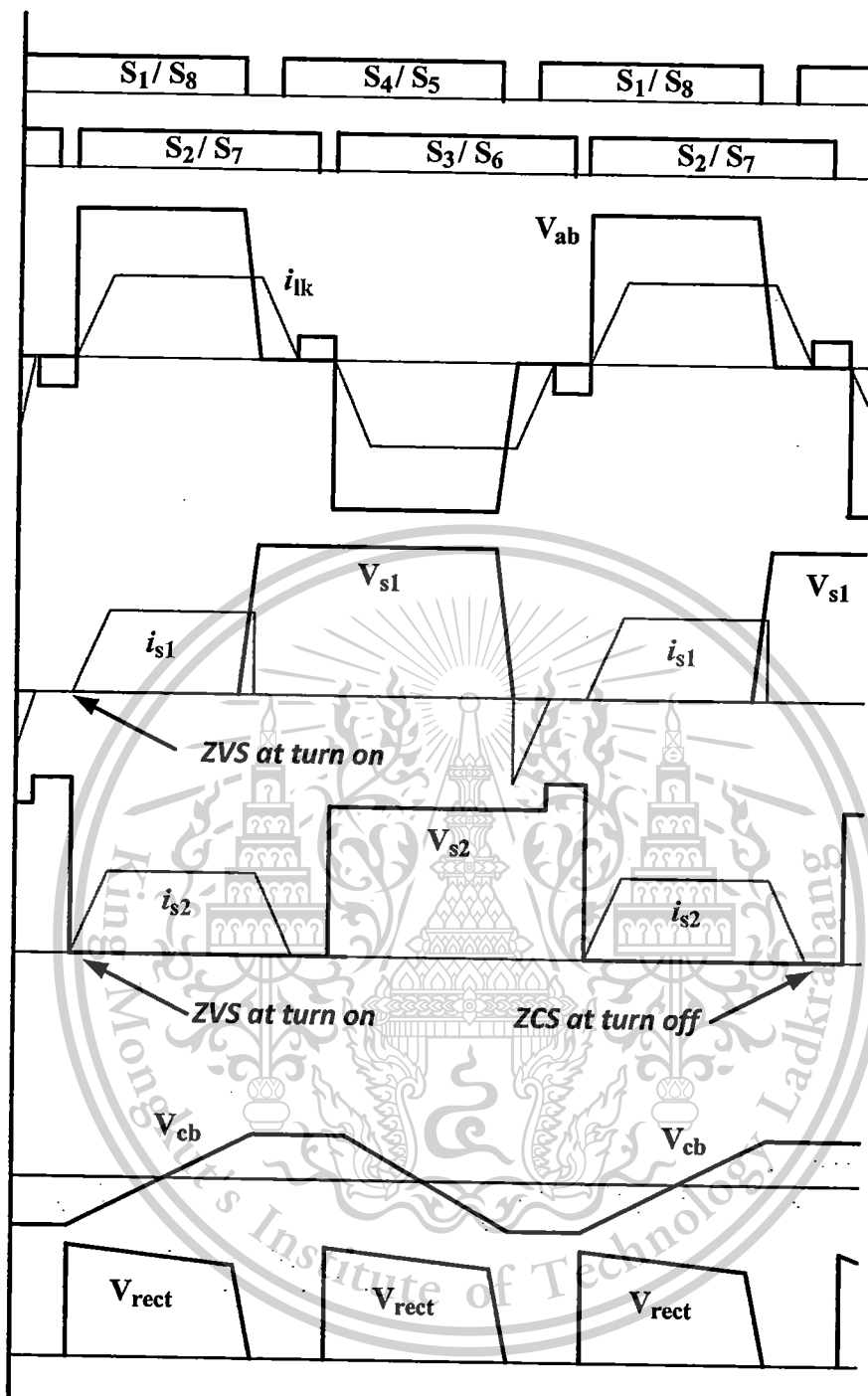
V_{cbP} คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

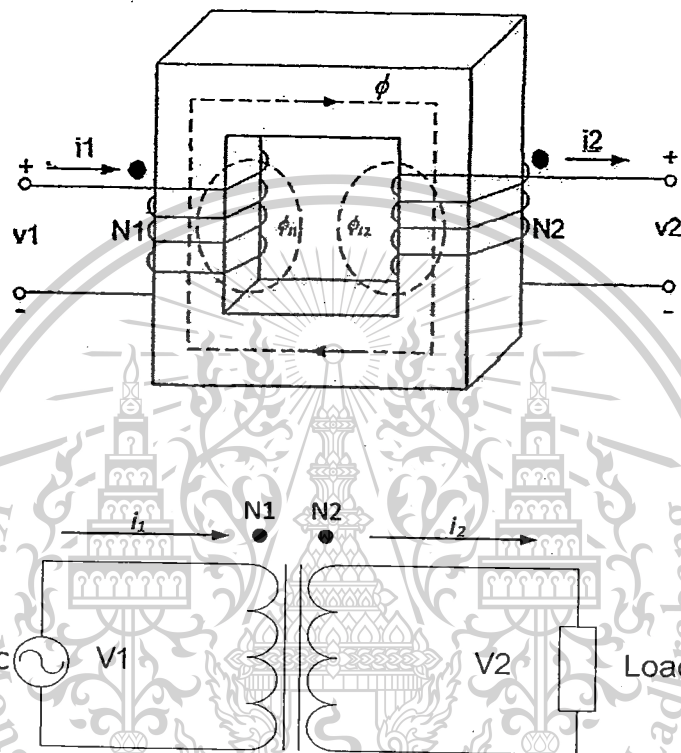
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4 หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็ก

อุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (high frequency transformer) และตัวเหนี่ยวนำ (inductor) ซึ่งแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า



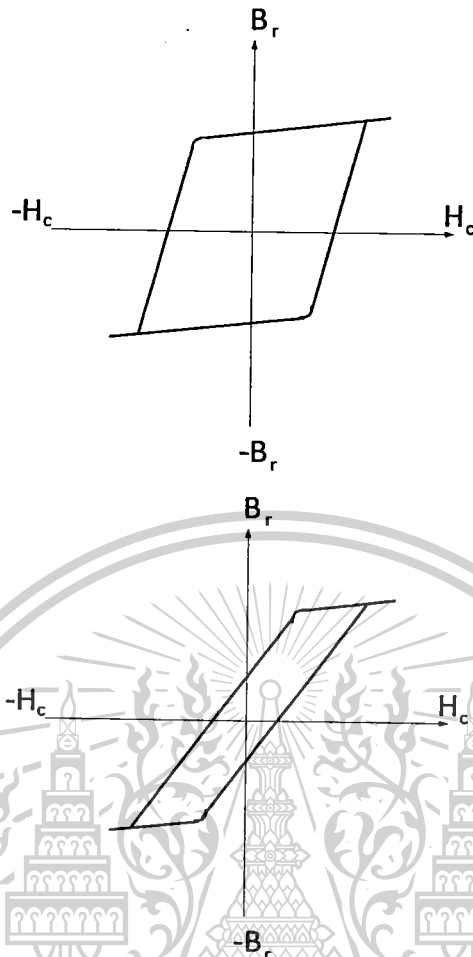
รูปที่ 2.18 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าก็คือ จะต้องมีความซึมซาบได้สูง เพื่อลดค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และเพื่อให้ค่ากระแสทำแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะต้องมีค่าต่ำ โดยที่สารแม่เหล็กที่นิยมใช้ทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (B-H curve) ให้มีลักษณะแคบเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากวงจรฮิสเตอร์ซิสติคแสดงในรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.19 วงรอบฮิสเตอร์ซิสสำหรับทำแม่เหล็กถาวรและสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า

2.4.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (High-Frequency Transformer Design Using Area Product Design)

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิ่ง เป็นต้น สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงโดยเฉพาะสำหรับแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิ่ง และด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับงานอื่นๆได้ วงจรพื้นฐานที่ใช้ในแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิ่งจะได้แก่

- (ก) วงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
- (ข) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์และวงจรเต็มบริดจ์ (Half-Bridge and Full-Bridge Converter)
- (ค) วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push Pull Converter)
- (ง) วงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ (Fly Back Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

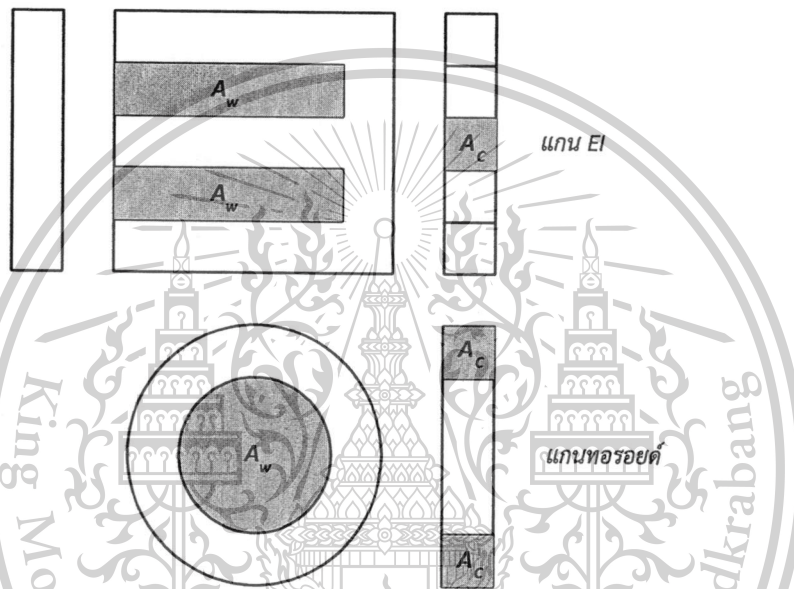
โดยทั่วไปแล้ว ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะนิยมใช้วิธีผลคูณพื้นที่ [14] (Area Product) ซึ่งนิยามไว้ในสมการดังนี้

$$A_p = \text{area product} = \text{core cross section } (A_c) \times \text{window area } (A_w) \quad (2.2)$$

เมื่อ A_c หมายถึงพื้นที่หน้าตัดแกน (core area)

A_w หมายถึงพื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (window area)

เมื่อ A_c และ A_w เป็นพื้นที่ของแกนเหล็กเฟอร์ไรต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างพื้นที่ A_c และ A_w สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่างๆ

จากสมการแรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$E_{rms} = K_f \cdot E_{av} = 4K_f \cdot f \cdot B_m \cdot A_c \quad (2.3)$$

โดยที่ K_f มีค่า 1 สำหรับกรณีรูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม

K_f มีค่า 1.11 สำหรับกรณีรูปคลื่นแรงดันไซน์

N หมายถึง จำนวนรอบขดลวด

f หมายถึงความถี่ (Hz)

B_m หมายถึงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (wb/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A_c หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของแกน (m^2)

จะได้ค่าจำนวนรอบด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.4)$$

$$N_2 = \frac{E_2}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.5)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีค่าเท่ากับ

$$I = J \cdot a_{wire} \quad (2.6)$$

โดยที่ J หมายถึง ความหนาแน่นกระแส (A/m^2)

a_{wire} หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของตัวนำซึ่งกระแสไหลผ่าน (m^2)

กำหนดให้ขดลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ (N_1) มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ a_1 และขดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ (N_2) มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ a_2 ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ $N_1 a_1 + N_2 a_2$ โดยปกติแล้วพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดควรจะพอดีกับพื้นที่หน้าต่าง ($Window\ area : K_w$) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วขดลวดไม่ได้ประกอบด้วยตัวนำเท่านั้น แต่จะประกอบด้วยอย่างอื่นอีก เช่น ฉนวนของขดลวดกระดาษฉนวนระหว่างขดลวดและช่องว่างอากาศเพื่อระบายความร้อน เป็นต้น ดังนั้นถ้า K_w หมายถึง Window utilization ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่ใช้ในการขดเซมพลดงกล่าวและโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K_w \cdot A_w = N_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2 \quad (2.7)$$

เมื่อแทนค่า $a_{wire} = I/J$ ลงในสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$K_w \cdot A_w \cdot J = N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 \quad (2.8)$$

โดยที่ I_1 หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสปฐมภูมิ (A)

I_2 หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสทุติยภูมิ (A)

N_1 หมายถึง จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_2 หมายถึง จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

แทนค่า N_1 และ N_2 ในสมการที่ (2.4), (2.5) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$K_w \cdot A_w \cdot J = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.9)$$

$$A_p = A_c \cdot A_w = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{4K_f \cdot K_w \cdot J \cdot B_m \cdot f} \quad (2.10)$$

K_f หมายถึง Form factor (มีค่าเท่ากับ 1.11 สำหรับรูปคลื่นสัญญาณไซน์และเท่ากับ 1 สำหรับรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม)

K_w หมายถึง Window utilization factor

โดยทั่วไปทางปฏิบัติจะกำหนดให้ K_w มีค่าประมาณเท่ากับ 0.3-0.4 และค่าความหนาแน่นกระแส (J) จะมีค่าประมาณเท่ากับ 3 - 5 A/mm²

ในการเลือกแกนแม่เหล็กที่มีใช้อยู่ทั่วไปให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำได้โดยการคำนวณหา ค่า A_p จากสมการที่ (2.10) เพื่อเปรียบเทียบกับค่า A_p ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตแกนจากนั้นทำการเลือกแกนเหล็กขนาดที่มีค่า A_p ให้มากกว่า A_p ที่ได้จากการคำนวณ

2.4.3 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำมีหน้าที่เก็บสะสมพลังงานในวงจรไฟฟ้า คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ดีนั้นคือ กราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความซึมสนามแม่เหล็กต้องมีความเป็นเชิงเส้น (linearity) อย่างไรก็ตามสารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นแต่มีค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กสูง ในขณะที่แกนอากาศหรือแกนที่ทำจากสารที่ไม่ใช่เฟอร์โรแมกเนติก ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กมีค่า $\mu = \mu_0$ ซึ่งจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นสูง แต่จะทำให้ได้ค่าเหนี่ยวนำต่ำ และด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงทำให้เป็นการยากในทางปฏิบัติที่จะออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงได้ อย่างไรก็ตามวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวในทางปฏิบัติก็คือเพิ่มช่องอากาศในแกนแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้แกนแม่เหล็กที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกให้ค่าความซึมซาบได้ที่สูง ในขณะที่ช่องอากาศจะมีผลทำให้ค่าความซึมซาบมีค่าคงที่โดยที่ช่องอากาศที่เพิ่มเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์ นอกจากจะใช้ในการสะสมพลังงานแม่เหล็กเท่านั้น แต่ยังทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความเป็นเชิงเส้นอีกด้วย นอกจากสารเฟอร์โรแมกเนติกแล้ว ยังมีสารแกนโลหะแบบผง (powder metal core) ซึ่งมีสารแม่เหล็กที่มีช่องอากาศกระจายอยู่ภายใน ซึ่งจะให้ผลเหมือนกับการเพิ่มช่องอากาศเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์นั่นเอง

2.5 วงจรกรอง LC ฟิลเตอร์

การแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรเรียงกระแส แรงดันที่ผ่านการเรียงกระแสแล้วนั้นจะไม่เรียบเหมือนแรงดันไฟตรงที่ได้จากแบตเตอรี่ จากจะเกิดการกระเพื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

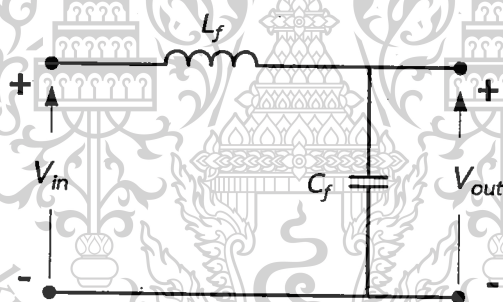
เป็นช่วงๆตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อนำไปใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเกิดการรบกวนของส่วนกระเพื่อมเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน ดังนั้นแรงดันไฟตรงที่ต้องการจะต้องเป็นไฟตรงเรียบใกล้เคียงแรงดันจากแบตเตอรี่ ดังนั้นแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วจึงต้องผ่านวงจรฟิลเตอร์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้แรงดันที่ได้เป็นแรงดันไฟตรงเรียบ อุปกรณ์ที่นำมาทำวงจรฟิลเตอร์มีตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ การต่อวงจรฟิลเตอร์จะมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับเอาต์พุต ทำหน้าที่เสริมแรงดันให้มีขนาดใกล้เคียงกันตลอดเวลา และมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับเอาต์พุตทำหน้าที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสให้ไหลผ่านเอาต์พุตมีระดับคงที่มากขึ้น ซึ่งวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 โดยสามารถคำนวณหาค่าความถี่คัทออฟได้ดังสมการ (2.11)

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (2.11)$$

โดยที่ f_c คือ ความถี่คัทออฟ

L_f คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์

C_f คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุฟิลเตอร์



รูปที่ 2.21 วงจร LC ฟิลเตอร์

2.6 วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์นั้นสามารถทำได้โดยการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม ซึ่งการปรับมุมเลื่อนเฟส (Phase shift angle) ระหว่างสวิตซ์วงในและสวิตซ์วงนอกนี้จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสนั้นเปลี่ยนแปลงไปทำให้กระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้กำลังไฟฟ้านำเข้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณมีค่าเป็นศูนย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22(ก) และเมื่อทำการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณให้มีค่ามากขึ้นเป็น 60 องศาและ 90 องศาดังรูปที่ 2.22(ข) และ 2.22(ค) ตามลำดับก็จะทำ

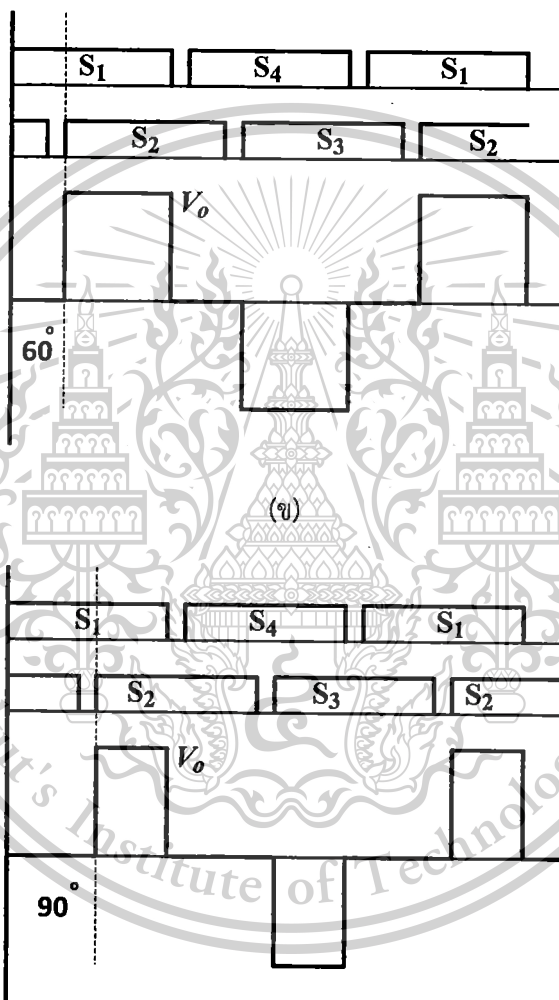
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ให้ได้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ลดน้อยลงทำให้กระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์น้อยลงไปด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงมีค่าน้อยลงเมื่อทำการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณมีค่ามากขึ้น

(ก)



(ค)

รูปที่ 2.22 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ (ก) มุมเลื่อนเฟส 0 องศา (ข) มุมเลื่อนเฟส 60 องศา (ค) มุมเลื่อนเฟส 90 องศา

2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยได้อธิบายเกี่ยวกับความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับนั้นจะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ที่มีค่าน้อยกว่าแบบสองระดับและนอกจากนั้นสวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมในช่วงของการหยุดนำกระแสเพียงครึ่งเดียวของแรงดันขาเข้าซึ่งทำให้มีความปลอดภัยต่อสวิตช์มากกว่าแบบสองระดับ จากนั้นได้กล่าวถึงเทคนิคการสวิตช์แบบ ZVS และแบบ ZVZCS โดยวิธีต่างๆรวมทั้งข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี โดยในงานวิจัยได้เลือกวิธีการใช้ตัวเก็บประจุลือกกึ่งเนื่องจากมีความง่ายต่อการออกแบบ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในวงจร เช่นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น อีกทั้งยังอธิบายถึงการปรับกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

หลักการงานและการออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงหลักการงานและการออกแบบของวงจรตีซี-ตีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ โดยที่วงจรที่จะได้ทำการนำเสนอ นั้นจะประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ (NCP : Neutral clamp point inverter) จำนวน 3 กิ่ง แต่ละกิ่งจะประกอบไปด้วยสวิตช์จำนวน 4 สวิตช์ โดยที่สวิตช์วงนอกอันได้แก่ S_1, S_4, S_5, S_8, S_9 และ S_{12} จะใช้มอสเฟต (MOSFETs) ในการสวิตช์ โดยมอสเฟตที่ใช้นั้นจะต้องมีไดโอดและตัวเก็บประจุแฝงอยู่ภายในเพื่อใช้ในการลดค่ากระแสสุดท้ายภายในตัวสวิตช์และสวิตช์วงนอกจะทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ส่วนสวิตช์วงนอกอันได้แก่ $S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$ และ S_{11} จะใช้ ไอจีบีที (IGBTs) ในการสวิตช์โดยจะมีการต่อไดโอดอนุกรมกับไอจีบีทีเพื่อช่วยให้ไอจีบีทีสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วไอจีบีทีจะมีแรงดันเบรกดาวน์ย้อนกลับ (Reverse breakdown voltage) ที่ค่อนข้างต่ำการต่อไดโอดอนุกรมเข้าไปจึงเป็นการช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายของสวิตช์ไอจีบีที ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์จะมีตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (C_{dc1} และ C_{dc2}) เพื่อทำให้เกิดความเป็นสามระดับของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังมีการต่อตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง ($C_{bc1} - C_{bc3}$) ก่อนหน้าหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส เพื่อใช้ช่วยในการลดค่ากระแสรีฟลักของกระแสด้านปฐมภูมิ ที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟสเดียวจำนวนสามตัวต่อกันเป็นสามเฟสโดยทำการต่อกันแบบสตาร์ - สตาร์ (Y - Y) ทางด้านหุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต่ออยู่กับไดโอดเรียงกระแสสามเฟสเพื่อแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นจะมีวงจร LC ฟิลเตอร์เพื่อใช้ในการกรองฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุต

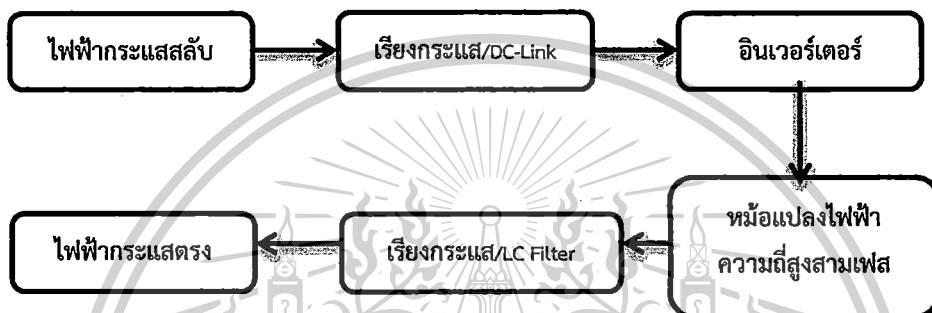
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 หลักการทำงานของวงจรถูก

หลักการทำงานของวงจรถูกตีซี-ตีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ นั้นจะเป็นการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแบ่งแรงดันเป็นสามระดับด้วยตัวเก็บประจุสองตัว (C_{dc1} และ C_{dc2}) ที่ต่ออนุกรมกันจากนั้นรูปคลื่นที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งด้วยวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ รูปคลื่นเอาท์พุทที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะถูกลดทอนระดับแรงดันลงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสจากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้งโดยวงจรถูกเรียงกระแสแบบสามเฟสและกรองโดยผ่าน LC ฟิลเตอร์ เพื่อทำการจ่ายโหลดต่อไป



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของวงจรถูก

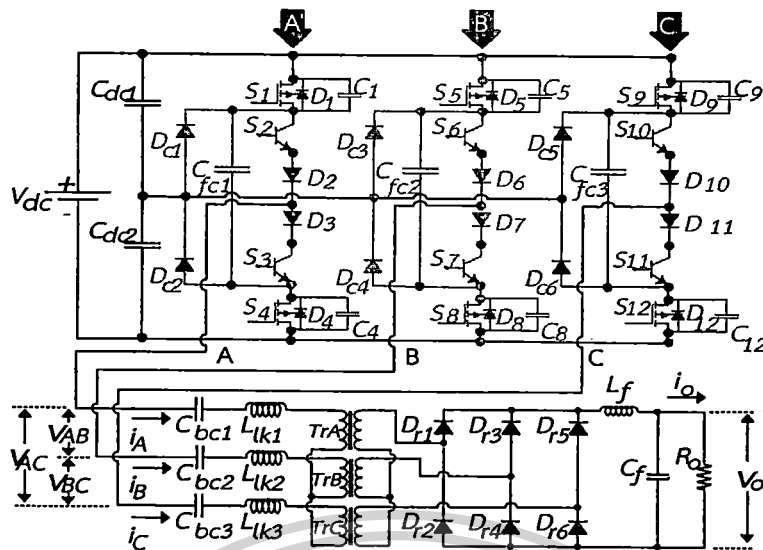
3.3 ลักษณะโครงสร้างของวงจรถูก

ตามรูปที่ 3.2 แสดงถึงลักษณะและโครงสร้างของวงจรถูกตีซี-ตีซีคอนเวอร์เตอร์ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ โดยวงจรถูกกำลังนั้นจะประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับจำนวน 3 กิ่งอันได้แก่เฟส A เฟส B และเฟส C แต่ละกิ่งจะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัวโดยสวิตช์วงนอกได้แก่ S_1, S_4, S_5, S_8, S_9 และ S_{12} จะใช้โมสเฟต (MOSFETs) ในการสวิตช์โดยพิจารณาว่ามีไดโอดและตัวเก็บประจุแฝงอยู่ในตัวโมสเฟตด้วย ส่วนสวิตช์วงในได้แก่ $S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$ และ S_{11} จะใช้ไอจีบีที (IGBTs) ในการสวิตช์โดยจะมีการต่อไดโอดอนุกรมกับไอจีบีทีเพื่อช่วยให้ไอจีบีทีสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบที่เป็นฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ($C_{fc1} - C_{fc3}$) และแคปซิมป์ไดโอด ($D_{c1} - D_{c6}$) ที่ต่อขนานคร่อมสวิตช์วงในของแต่ละกิ่ง ด้านเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จะมีการต่อตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง ($C_{bc1} - C_{bc3}$) จากนั้นเป็นส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส ($T_{rA} - T_{rC}$) โดยในการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรถูกจะทำการพิจารณาว่ามีตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ($L_{lk1} - L_{lk3}$) ต่ออนุกรมอยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะต่ออยู่กับวงจรถูกเรียงกระแสสามเฟสเพื่อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นจะถูกกรองด้วย LC ฟิลเตอร์และจ่ายสู่โหลด R ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์

3.4 โหมดการทำงานของวงจร

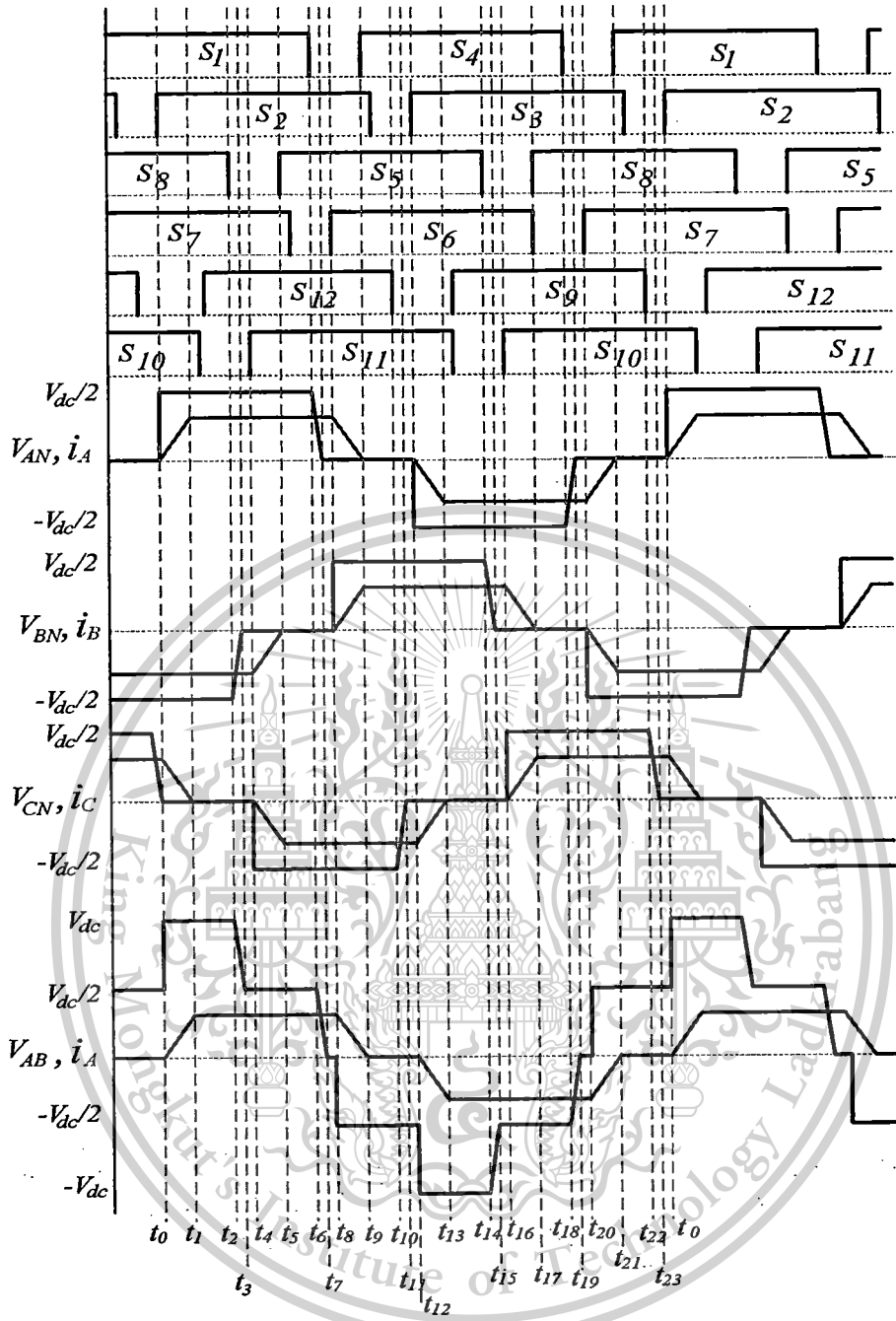
สำหรับโหมดการทำงานของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์นั้นจะสามารถแบ่งได้ทั้งหมดเป็น 24 โหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 3.3 ในการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สามเฟสสามระดับแบบใหม่ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์นั้นจะวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. สวิตช์วงนอกจะพิจารณาว่ามีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) อยู่ภายในตัวเพื่อที่จะวิเคราะห์การเกิด ZVS
2. ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดเป็นอุดมคติ
3. ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2} จะต้องมีความจุใหญ่พอที่จะรักษาระดับแรงดันไว้ที่ค่า $V_{dc}/2$
4. ตัวเก็บประจุฟลายอิง $C_{fc1} - C_{fc3}$ จะต้องมีความจุใหญ่พอที่จะรักษาระดับแรงดันไว้ที่ $V_{dc}/2$
5. ตัวเหนี่ยวนำแมกนีโตคิงของหม้อแปลงความถี่สูงสามเฟสจะไม่ถูกพิจารณา จะพิจารณาแต่เพียงตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

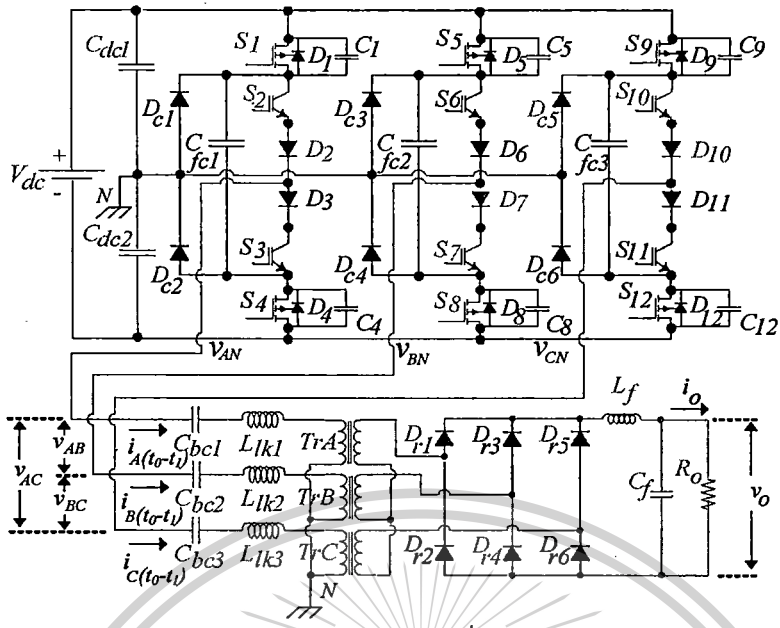
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

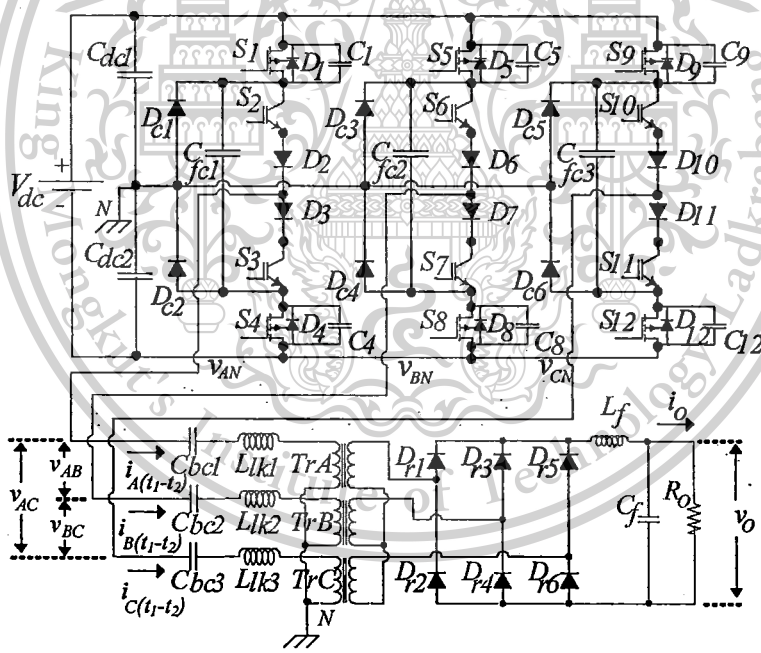


รูปที่ 3.3 ไตอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



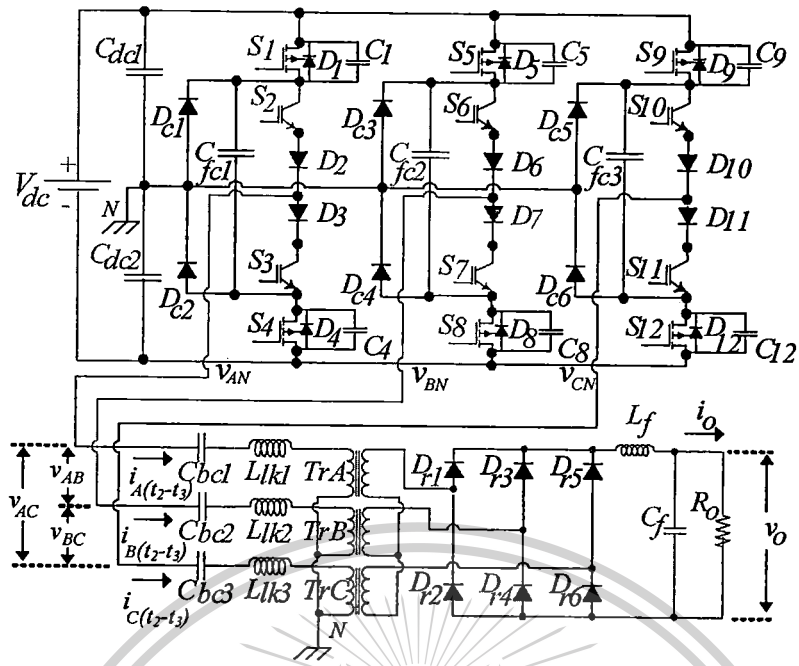
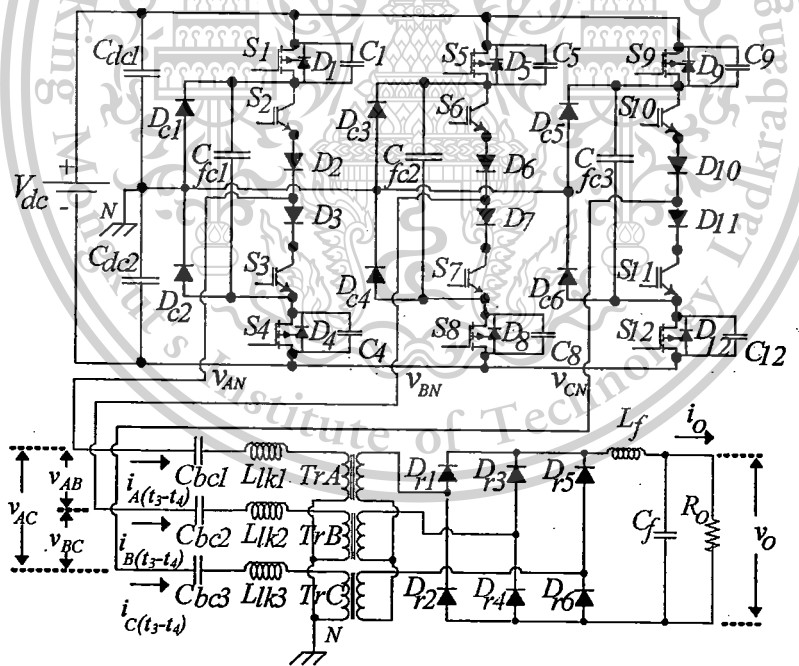
(ก) โหมดการทำงานที่ 1 ($t_0 - t_1$)



(ข) โหมดการทำงานที่ 2 ($t_1 - t_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

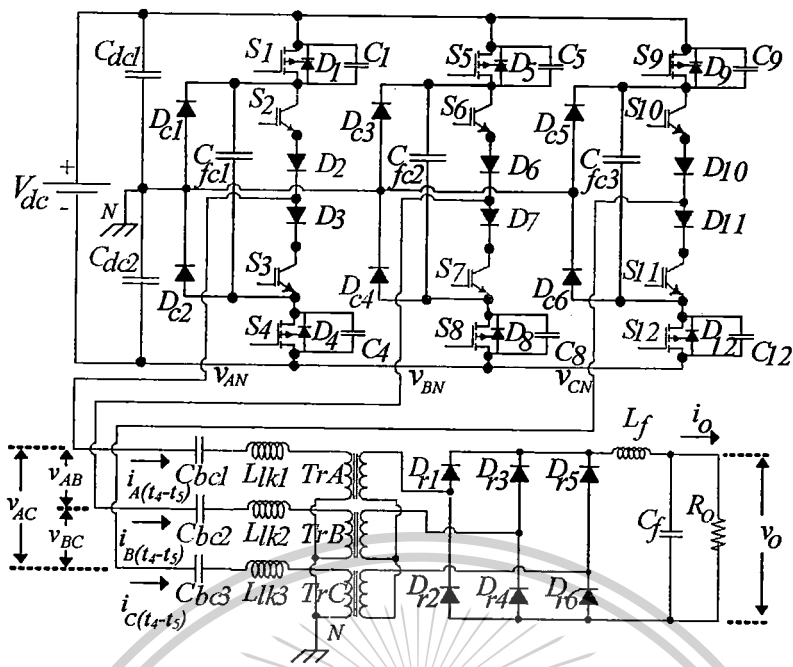
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ค) โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)(ง) โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)

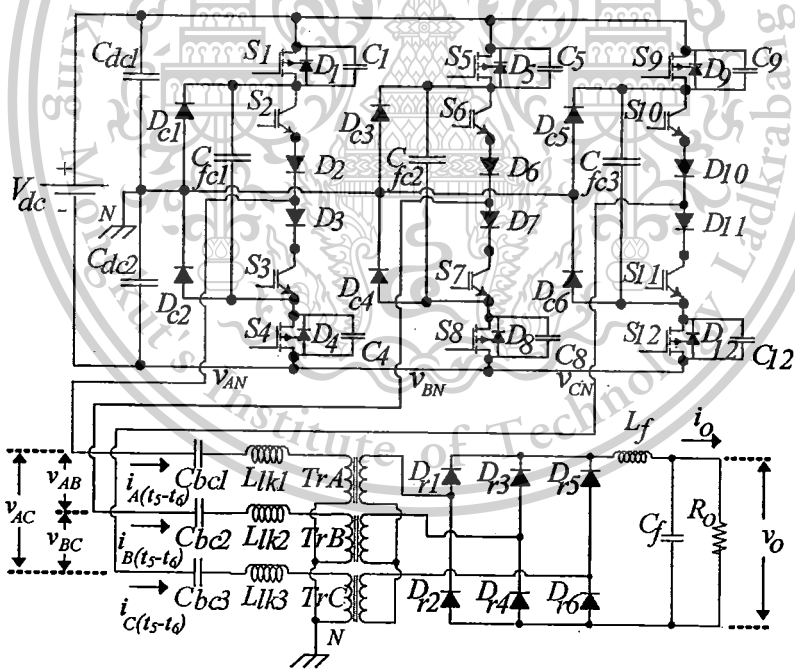
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

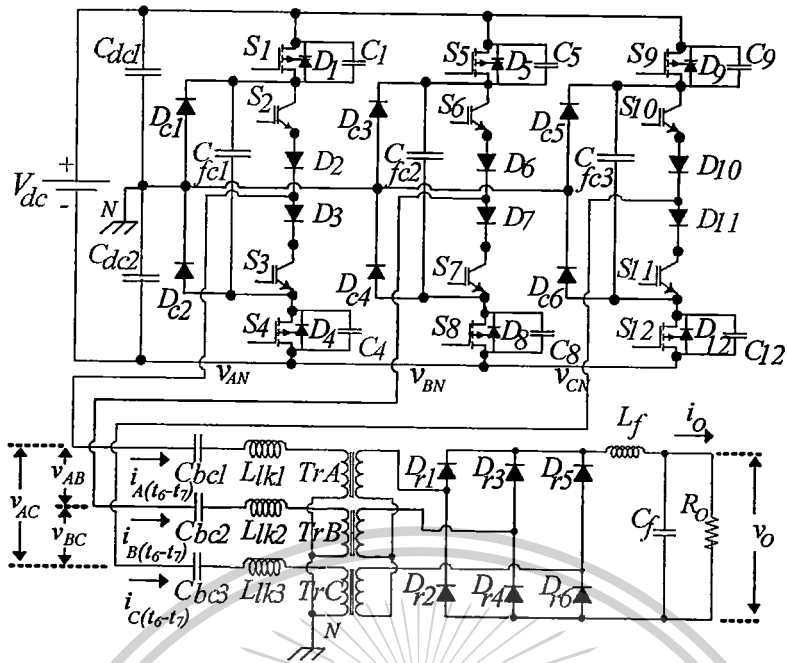
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



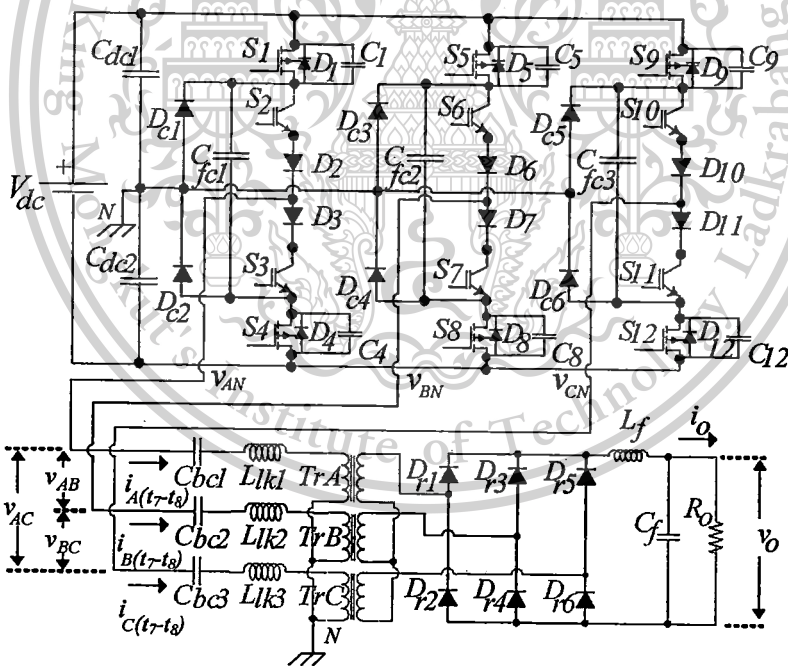
(จ) โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)



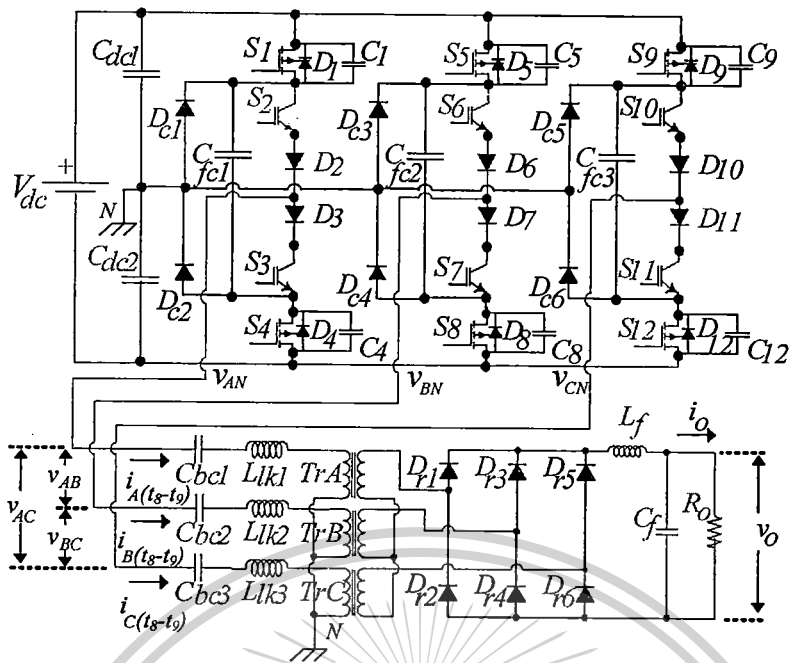
(ข) โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)



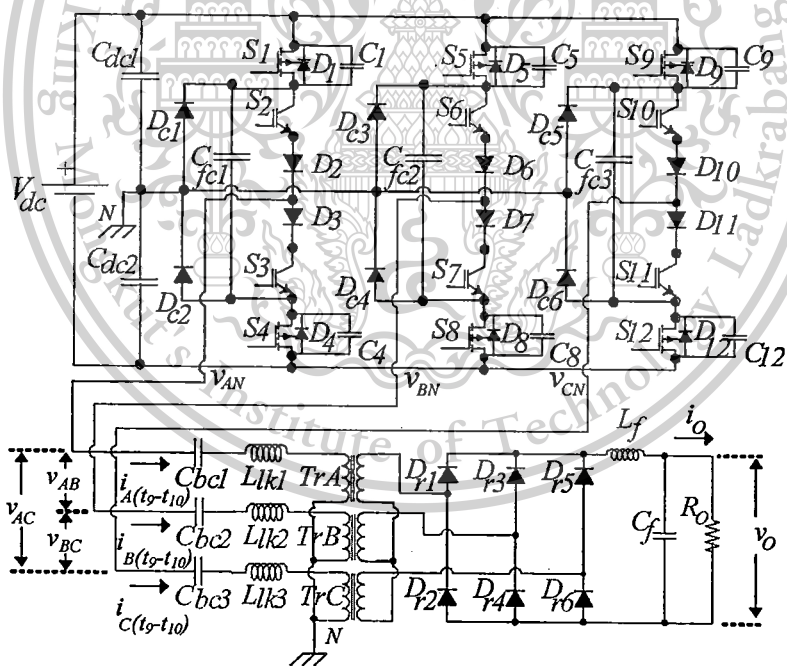
(ข) โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)



(ข) โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)



(ฉ) โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)

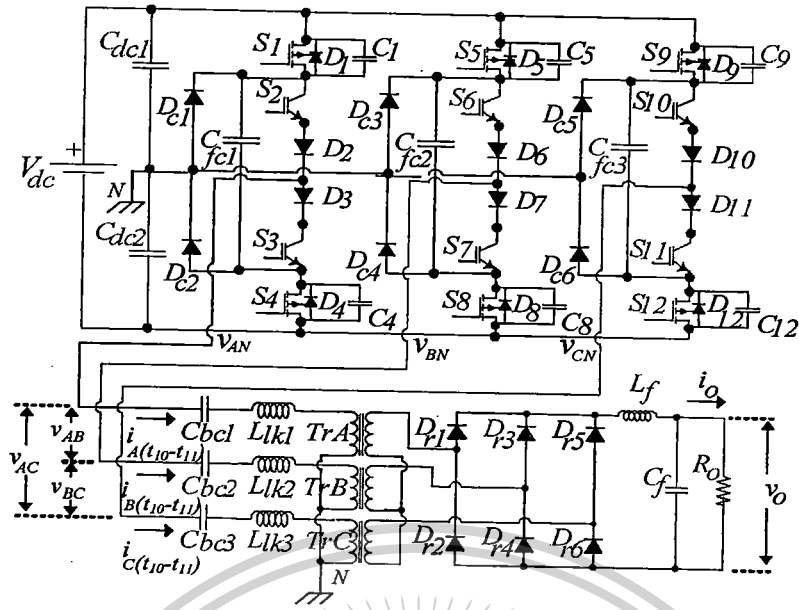


(จ) โหมดการทำงานที่ 10 ($t_9 - t_{10}$)

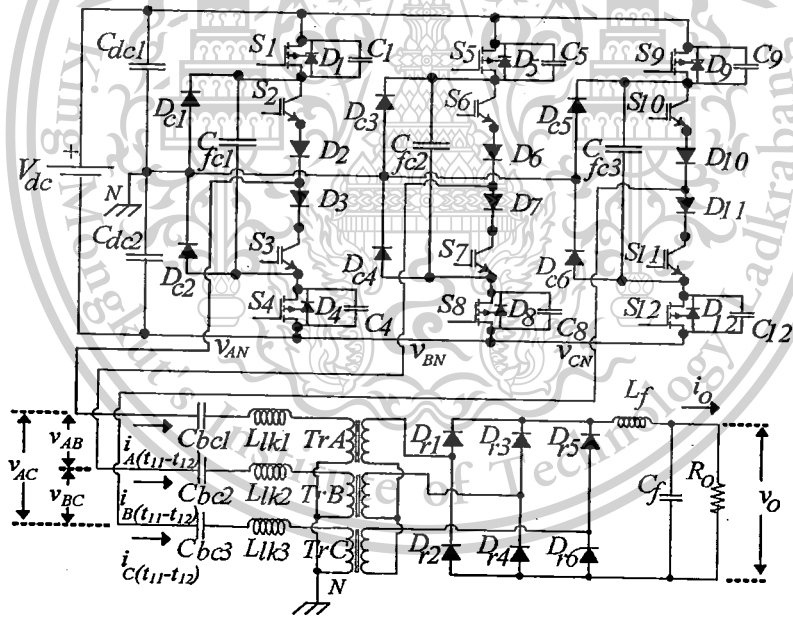
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ฉ) โหมดการทำงานที่ 11 ($t_{10} - t_{11}$)



(จ) โหมดการทำงานที่ 12 ($t_{11} - t_{12}$)

รูปที่ 3.4 โหมดการทำงานที่ 1 - 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โหมตการทำงานที่ 1($t_0 - t_1$)

ก่อนเวลา t_0 สวิตช์ S_1 , S_7 , S_8 และ S_{10} ได้รับสัญญาณเกตให้ ON ค้างไว้ ทันทีที่เวลา t_0 สวิตช์ S_2 จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ ON ทำให้กระแส i_A เริ่มไหลผ่านสวิตช์ S_1 และ S_2 เข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟส A ตามสมการที่ (3.1) และขาร้จตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc1} ซึ่งเวลานี้เราสามารถพิจารณาได้ว่า S_1 จะนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์ S_2 จะสามารถพิจารณาว่านำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk1}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A ในช่วงเวลาเดียวกันนั้นเมื่อกระแส i_A เริ่มไหลผ่านสวิตช์ก็จะส่งผลให้กระแส i_C เริ่มมีขนาดลดลงโดยไหลผ่านทางแคปซิมป์ไดโอด D_{c5} และสวิตช์ S_{10} ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งผลรวมของกระแสในสายนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ $i_N = 0$ แสดงได้ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3) ซึ่งโหมตนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแส i_C ลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์นี้ว่า “เวลารีเซ็ต (Reset Time)” ตามสมการที่ (3.4) นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวประจุบล็อกกิ้งจะส่งผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตของกระแส i_C อีกด้วย ส่วนทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส D_{r1}, D_{r4} และ D_{r5} จะนำกระแสด้านพฤติกรรมไปยังโหลด

$$i_A = \left[\frac{V_{dc} + 2V_{cbp}}{2 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_0) \quad (3.1)$$

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ $i_B = -i_{Peak}$ นำสมการที่ (3.1) แทนใน (3.2) จะได้

$$i_C = i_{Peak} - \left[\frac{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbp}}{4 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_0) \quad (3.3)$$

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbp}} \quad (3.4)$$

เมื่อ $L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}$

และ V_{cbp} คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โหมดการทำงานที่ 2 ($t_1 - t_2$)

ที่เวลา t_1 กระแส i_A จะมีค่าเท่ากับกระแสสูงสุด ขณะกระแส i_C จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น สวิตช์ S_{10} จึงสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขกระแสเป็นศูนย์ (ZCS) ได้ภายหลังจากนี้ แรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีค่าเหมือนกันกับโหมดก่อนหน้านี้ ส่วนทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จะมีเพียงไดโอดเรียงกระแส D_{r1} และ D_{r4} เท่านั้นที่นำกระแสทฤษฎีไปยังโหลด

$$V_{AN} = -V_{BN} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.5)$$

$$V_{CN} = 0 \quad (3.6)$$

โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)

ที่เวลา t_2 สวิตช์ S_8 จะได้รับสัญญาณเกิดสั่งให้ OFF กระแส i_B จะทำการชาร์จประจุ C_8 ภายในสวิตช์ S_8 และทำการคายประจุ C_5 ภายในสวิตช์ S_5 ผ่านทางตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc2} แรงดันตกคร่อม C_8 จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.7) และแรงดันตกคร่อม C_5 จะลดลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.8) ตามลำดับ ทำให้แรงดันเฟส V_B จะลดขนาดลงอย่างเป็นเส้นตรงในโหมดนี้ ส่วนแรงดันเฟส V_{AN} และ V_{CN} ยังคงมีขนาดเท่ากับโหมดที่ 2 กระแส i_A และ i_B ยังคงไหลในทิศทางเดิม ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ V_{BN} มีค่าเท่ากับ 0 ด้านทฤษฎีของหม้อแปลง ไดโอด D_{r1} และ D_{r4} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 2

$$V_{C8} = \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r} (t - t_2) \quad (3.7)$$

$$V_{C5} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r} (t - t_2) \quad (3.8)$$

เมื่อ $C_5 = C_8 = C_r$

โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)

ที่เวลา t_3 เมื่อมีการขนถ่ายประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว S_5 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ซึ่งจะทำให้สวิตช์ S_5 จะสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ได้หลังจากนี้ ในโหมดการทำงานนี้แรงดันเฟส V_{BN} จะมีค่าเป็น 0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc2} จะถูกกระแส i_B ชาร์จจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-V_{cbp}$ ภายในโหมดนี้ โดยกระแส i_B จะไหลผ่านทางแค้มป์ไบโอด D_{c4} และสวิตช์ S_7 ในโหมดนี้ ส่วนทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอด D_1 และ D_4 ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 3 โดยในโหมดนี้แรงดันไลน์ V_{AB} จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$V_{AB} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.9)$$

โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)

ที่เวลา t_4 สวิตช์ S_{11} จะได้รับสัญญาณเกิดสั่งให้ ON ทำให้กระแส i_C เริ่มไหลผ่านสวิตช์ S_{11} และ S_{12} ในทิศไหลออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟส C ตามสมการที่ (3.10) และซาร์จตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc3} ซึ่งเวลานี้สามารถพิจารณาได้ว่า S_{11} เริ่มนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์ S_2 จะสามารถพิจารณาว่านำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_{lk3} ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส C โดยในช่วงเวลาเดียวกันที่กระแส i_C เริ่มไหลผ่านสวิตช์ก็จะส่งผลให้กระแส i_B เริ่มมีขนาดลดลงโดยไหลผ่านทางแคสแคดไดโอด D_{c4} และสวิตช์ S_7 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส คือผลรวมของกระแสในสายนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ $i_N = 0$ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.11) และ (3.12) ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแส i_B มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกช่วงเวลารีเซ็ตเป็นไปตามสมการที่ (3.13) ซึ่งจะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวประจุบล็อกกิ้งจะส่งผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตของกระแส i_B ส่วนทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส D_{r1} , D_{r4} และ D_{r6} จะนำกระแสด้านทฤษฎีไปยังโหลด

$$i_C = - \left[\frac{V_{dc} + 2V_{cbP}}{2 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_4) \quad (3.10)$$

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0 \quad (3.11)$$

เมื่อ $i_A = i_{peak}$ นำสมการที่ (3.10) แทนใน (3.11) จะได้

$$i_B = -i_{peak} + \left[\frac{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}}{4 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_4) \quad (3.12)$$

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{peak}}{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}} \quad (3.13)$$

เมื่อ $L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}$

และ V_{cbP} คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)

ที่เวลา t_5 กระแส i_C จะมีขนาดเท่ากับกระแสสูงสุดในทิศไหลออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงขณะที่กระแส i_B จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสวิตช์ S_7 จึงสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นศูนย์ (ZCS) ได้ภายหลังจากนี้ แรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีค่าเหมือนกันกับโหมดก่อนหน้านี ส่วนทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จะมีเพียงไดโอดเรียงกระแส D_{r1} และ D_{r6} เท่านั้นที่นำกระแสทุติยภูมิไปยังโหลด

$$V_{AN} = -V_{CN} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.14)$$

$$V_{BN} = 0 \quad (3.15)$$

โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)

ที่เวลา t_6 สวิตช์ S_1 จะได้รับสัญญาณเกิดสั่งให้ OFF กระแส i_A จะทำการชาร์จประจุ C_1 ภายในสวิตช์ S_1 และทำการคายประจุ C_4 ภายในสวิตช์ S_4 ผ่านทางตัวเก็บประจุพลาวยิ่ง C_{fc1} ทำให้แรงดันตกคร่อม C_1 จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.16) และแรงดันตกคร่อม C_4 จะลดลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.17) ตามลำดับ แรงดันเฟส V_{AN} จะลดขนาดลงอย่างเป็นเส้นตรงในโหมดนี้ ส่วนแรงดันเฟส V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีขนาดเท่ากับโหมดที่ 6 กระแส i_A และ i_C ยังคงไหลในทิศทางเดิม ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ V_{AN} มีค่าเท่ากับ 0 ด้านพฤติกรรมของหม้อแปลง ไดโอด D_{r1} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 6

$$V_{C1} = \frac{i_{peak}}{2 \cdot C_r} (t - t_6) \quad (3.16)$$

$$V_{C4} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{i_{peak}}{2 \cdot C_r} (t - t_6) \quad (3.17)$$

เมื่อ $C_1 = C_4 = C_r$

โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)

เมื่อมีการขนถ่ายประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว S_4 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ดังนั้นสวิตช์ S_4 จึงสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ภายหลังจากนี้ ในโหมดการทำงานนี้ แรงดันเฟส V_{AN} จะมีค่าเป็น 0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc1} จะถูกกระแส i_A ชาร์จจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_{cbp} ภายในโหมดนี้ โดยกระแส i_A จะไหลผ่านทางแค้มป์ไดโอด D_{c1} และสวิตช์ S_2 ในโหมดนี้ ส่วนทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอด D_{r1} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 7 โดยในโหมดนี้แรงดันไลน์ V_{AB} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{AB} = -\frac{V_{dc}}{2} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)

ที่เวลา t_8 สวิตช์ S_6 จะได้รับสัญญาณเกิดสั่งให้ ON ทำให้กระแส i_B เริ่มไหลผ่านสวิตช์ S_5 และ S_6 ในทิศไหลเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟส B ตามสมการที่ (3.19) และขารัจตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc2} ซึ่งเวลานี้สามารถพิจารณาได้ว่า S_5 เริ่มนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์ S_6 จะสามารถพิจารณาว่านำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_{lk2} ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B โดยในช่วงเวลาเดียวกันที่กระแส i_B เริ่มไหลผ่านสวิตช์ก็จะส่งผลให้กระแส i_A เริ่มมีขนาดลดลงโดยไหลผ่านทางแคปซิบ์ไดโอด D_{C1} และสวิตช์ S_2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส คือผลรวมของกระแสในสายนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ $i_N = 0$ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.20) และ (3.21) ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแส i_A มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกช่วงเวลาที่รีเซ็ตเป็นไปตามสมการที่ (3.22) ซึ่งจะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวประจุบล็อกกิ้งจะส่งผลต่อช่วงเวลาที่รีเซ็ตของกระแส i_A ด้วย ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส D_{r1} , D_{r3} และ D_{r6} จะนำกระแสด้านทุติยภูมิไปยังโหลด

$$i_B = \left[\frac{V_{dc} + 2V_{cbP}}{2 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_8) \quad (3.19)$$

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0 \quad (3.20)$$

เมื่อ $i_C = -i_{Peak}$ นำสมการที่ (3.19) แทนใน (3.20) จะได้

$$i_A = i_{Peak} - \left[\frac{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}}{4 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_8) \quad (3.21)$$

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}} \quad (3.22)$$

เมื่อ $L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}$

และ V_{cbP} คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

โหมดการทำงานที่ 10 ($t_9 - t_{10}$)

ที่เวลา t_9 กระแส i_B จะเท่ากับกระแสสูงสุดในทิศไหลเข้าสู่จากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ขณะกระแส i_A จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสวิตช์ S_2 จึงสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นศูนย์ (ZCS) ได้ภายหลังจากนี้ แรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีค่าเหมือนกันกับโหมดก่อนหน้า ส่วนทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จะมีเพียงไดโอดเรียงกระแส D_{r3} และ D_{r6} เท่านั้นที่นำกระแสฟลักซ์ไปยังโหลด

$$V_{BN} = -V_{CN} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.23)$$

$$V_{AN} = 0 \quad (3.24)$$

โหมดการทำงานที่ 11 ($t_{10} - t_{11}$)

ที่เวลา t_{10} สวิตช์ S_{12} จะได้รับสัญญาณเกิดสั่งให้ OFF กระแส i_C จะทำการชาร์จประจุ C_{12} ภายในสวิตช์ S_{12} และทำการคายประจุ C_9 ภายในสวิตช์ S_9 ผ่านทางตัวเก็บประจุพลาวยิ่ง C_{fc3} ทำให้แรงดันตกคร่อม C_{12} จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.25) และแรงดันตกคร่อม C_9 จะลดลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.26) ตามลำดับ แรงดันเฟส V_{CN} จะลดขนาดลงอย่างเป็นเส้นตรงในโหมดนี้ ส่วนแรงดันเฟส V_{AN} และ V_{BN} ยังคงมีขนาดเท่ากับโหมดที่ 10 กระแส i_B และ i_C ยังคงไหลในทิศทางเดิม ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ V_{CN} มีค่าเท่ากับ 0 ด้านพฤติกรรมของหม้อแปลง ไดโอด D_{r3} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 10

$$V_{C12} = \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r} (t - t_{10}) \quad (3.25)$$

$$V_{C9} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r} (t - t_{10}) \quad (3.26)$$

เมื่อ $C_9 = C_{12} = C_r$

โหมดการทำงานที่ 12 ($t_{11} - t_{12}$)

เมื่อมีการขนถ่ายประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว S_9 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ดังนั้นสวิตช์ S_9 จึงสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ภายหลังจากนี้ ในโหมดการทำงานนี้ แรงดันเฟส V_{CN} จะมีค่าเป็น 0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc3} จะถูกกระแส i_C ชาร์จจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-V_{cbp}$ ภายในโหมดนี้ โดยกระแส i_C จะไหลผ่านทางแคลัมป์ไดโอด D_{c6} และสวิตช์ S_{11} ในโหมดนี้ ส่วนทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอด D_{r3} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 11 โดยในโหมดนี้แรงดันไลน์ V_{AB} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{AB} = -V_{dc} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

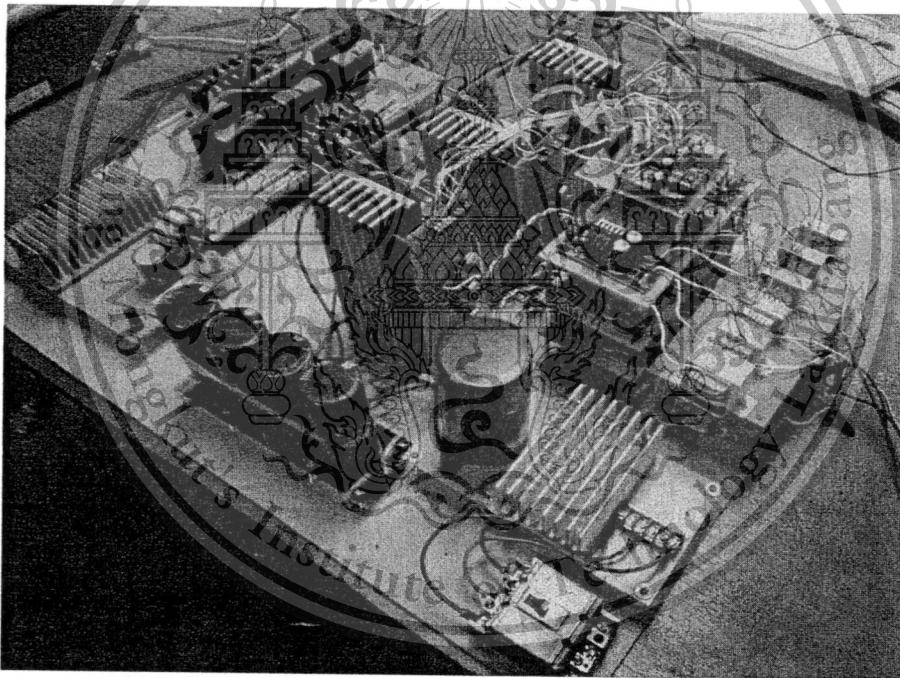
โหมดการทำงานที่ 13 - 24 กระแส i_A จะไหลสวนทิศทางกันกับโหมดการทำงานที่ 1 - 12 และจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับที่กล่าวมา กระแส i_A , i_B , i_C จะมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา เช่นเดียวกันกับแรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} และแรงดันไลน์ V_{AB} , V_{BC} , V_{CA}

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในการทำงานของวงจรจะเกิด ZVS ที่ S_1 , S_5 , S_9 , S_4 , S_8 และ S_{12} และจะเกิด ZVZCS ที่ S_2 , S_3 , S_6 , S_7 , S_{10} และ S_{11}

3.5 การออกแบบและสร้างวงจรตีซี-ตีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์

3.5.1 โครงสร้างของวงจร

สำหรับวงจรที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นจริงนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5 รายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบรวมทั้งวิธีการออกแบบและแนวคิดในการสร้างของแต่ละส่วนจะได้อธิบายให้เห็นเป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของวงจรจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น

จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างทั้งหมดของวงจรที่ถูกสร้างขึ้นจริงเพื่อทำการทดสอบในรายงานฉบับนี้โดยในแต่ละส่วนจะประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

1. ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต
2. ส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}

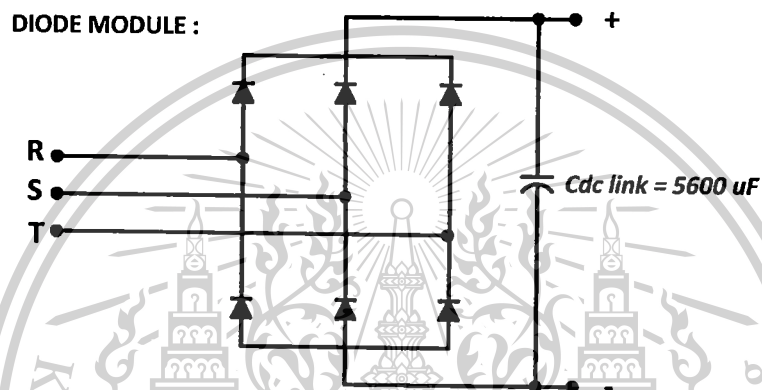
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. ส่วนของภาคกำลังอินเวอร์เตอร์
4. ส่วนของตัวเก็บประจุลือกัก $C_{bc1} - C_{bc3}$
5. ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส
6. ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาต์พุต
7. ส่วนของ LC ฟิลเตอร์
8. ส่วนของวงจรขับเคลื่อน
9. ส่วนของตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512u810

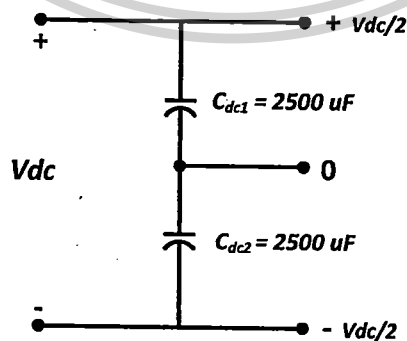
3.5.2 ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต



รูปที่ 3.6 วงจรภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต

วงจรที่ใช้ในการทดสอบจะใช้แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 380 V_{L-L} 3 เฟส นำมาผ่านวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไดโอดเรียงกระแสแบบโมดูล และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกทำให้เป็นไฟตรงเรียงด้วยตัวเก็บประจุ $C_{dc-link}$ เพื่อที่จะนำไปใช้งานเป็นอินพุตของภาคส่วนอินเวอร์เตอร์

3.5.3 ส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}



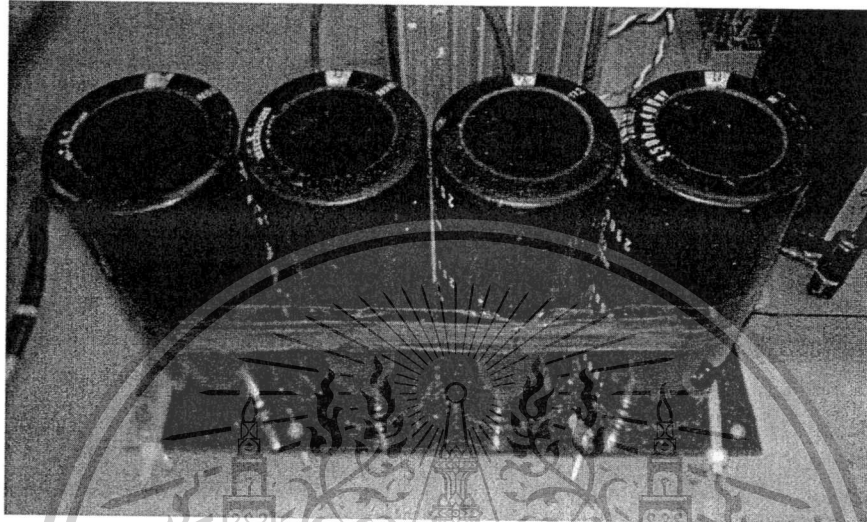
รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

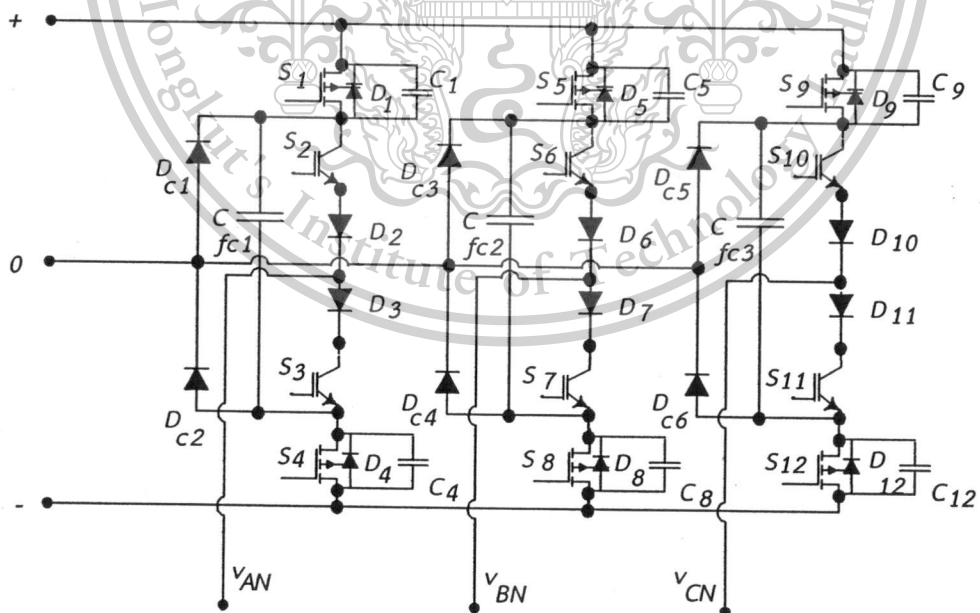
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 3.7 เป็นส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันซึ่งจะถูกต่ออยู่ด้านหน้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันทั้งสองตัวนี้จะทำหน้าที่แบ่งแรงดันขาเข้าให้เหลือเพียงครึ่งเดียวและทำให้เกิดความเป็นสามระดับของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยการติดตั้งใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2} ที่ใช้งานจริง

3.5.4 ส่วนของภาคกำลังอินเวอร์เตอร์



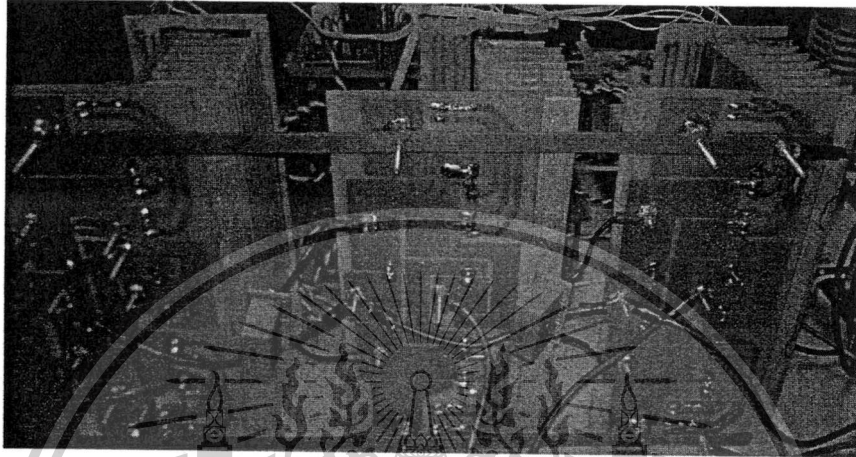
รูปที่ 3.9 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

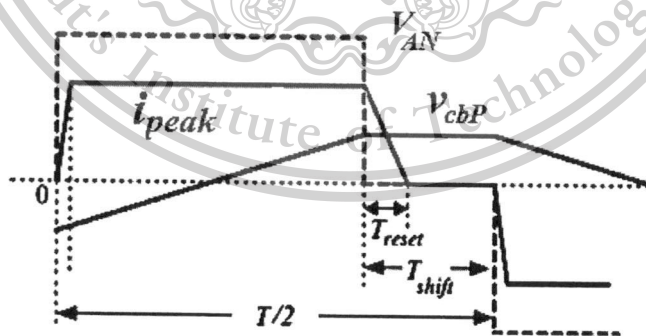
ในรูปที่ 3.9 เป็นส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ ซึ่งการใช้วงจรแบบสามระดับนี้จะทำให้อุปกรณ์สวิตช์นั้นแบกรับภาระแรงดันในช่วงของการหยุดนำกระแสเพียงครึ่งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่านั้น และรูปที่ 3.10 เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์จริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยสวิตช์วงนอกเลือกใช้ออสเฟต (SPW47N60C3) และสวิตช์วงในเลือกใช้อิจีบีที (IRG4PC50U) บล็อกกิ้งไดโอด (D_1-D_6) และแคปป์ไดโอด ($D_{c1}-D_{c6}$) เลือกใช้เบอร์ MUR1560 และตัวเก็บประจุฟลายอิง ($C_{fc1} - C_{fc3}$) ใช้ขนาด 1 ไมโครฟารัด



รูปที่ 3.10 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่ใช้จริงในวงจร

3.5.5 ส่วนของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง $C_{bc1} - C_{bc3}$

ในการออกแบบตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งนั้นสามารถกระทำได้โดยพิจารณาในรูปที่ 3.11 ซึ่งการที่จะทำให้สวิตช์วงในสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้สภาวะกระแสเป็นศูนย์นั้น ช่วงเวลารีเซ็ต (T_{reset}) จะต้องมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาเลื่อนเฟส (T_{shift}) เนื่องจากกระแสต้องลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 ลักษณะการเกิด ZCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การที่จะทำให้กระแสตกลงเป็นศูนย์ได้รวดเร็วมากขึ้นนั้นสามารถกระทำได้โดยใช้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกิ่งหากค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกิ่งมีค่ามากก็จะทำให้กระแสตกลงได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกิ่งนั้นสามารถหาได้จาก

$$V_{cbP} = \left(\frac{i_{peak}}{2 \cdot C_{bc}} \right) \cdot \left(\frac{T}{2} - T_{shift} \right) \quad (3.28)$$

เมื่อนำสมการที่ 3.28 แทนลงในสมการที่ 3.4 จะได้

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot I_{lk} \cdot i_{peak}}{V_{dc} + 4 \cdot \left[\left(\frac{i_{peak}}{2 \cdot C_{bc}} \right) \cdot \left(\frac{T}{2} - T_{shift} \right) \right]} \quad (3.29)$$

ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งสามารถหาได้จาก

$$C_{bc} = \frac{i_{peak} \cdot \left(\frac{T}{2} - T_{shift} \right)}{\left(\frac{2 \cdot I_{lk} \cdot i_{peak}}{T_{reset}} - \frac{V_{dc}}{2} \right)} \quad (3.30)$$

การใช้ตัวเก็บประจุลือกิ่งช่วยทำให้กระแสตกลงจนมีค่าเป็นศูนย์นั้นมีข้อดีคือง่ายต่อการออกแบบแต่ก็มีข้อเสียคือการเกิดแรงดันดริบขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียกำลังงานก่อนเข้าหม้อแปลง ดังนั้นทำให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าหม้อแปลงมีค่าลดลง เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงดันดริบของตัวเก็บประจุลือกิ่งให้มีความเหมาะสมด้วย

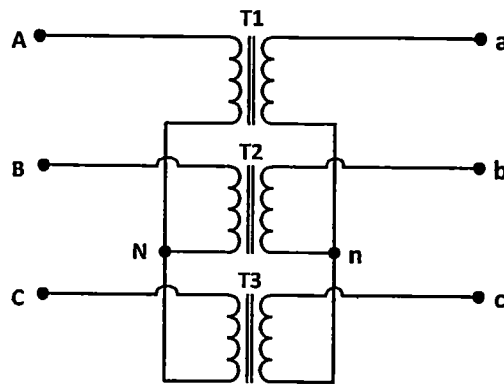
3.5.6 ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสนั้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบหนึ่งเฟสจำนวน 3 ตัวต่อกันแบบสตาร์-สตาร์ (Y-Y) ในลักษณะดังรูปที่ 3.12 โดยหม้อแปลงแต่ละตัวนั้นจะทำการเลือกใช้แกน EE-80 ในการสร้าง โดยการออกแบบจะใช้วิธีผลคูณพื้นที่ซึ่งจะทำการกำหนดตัวแปรดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.12 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส

กำหนดให้

$$V_1 = 300 \text{ V}$$

$$V_2 = 75 \text{ V}$$

$$f_s = 50 \text{ kHz}$$

$$B_m = 0.3 \text{ Tesla}$$

$$K_w = 0.4$$

$$i_{in} = 10 \text{ A}$$

$$i_{out} = 40 \text{ A}$$

$$J = 4 \text{ A/mm}^2$$

วิธีการออกแบบ

ก) คำนวณค่า A_p จากสมการที่ 2.10

$$A_p = \frac{300 \times 10 + 75 \times 40}{4 \times 0.3 \times 4 \times 10^6 \times 0.3 \times 50 \times 10^3} \text{ m}^4$$

$$A_p = 8.33 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

เมื่อทำการคำนวณ ได้ค่า A_p มาแล้วทำการเลือกแกนให้มีขนาดค่า A_p ให้มีขนาดมากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงเลือกแกน EE80 ซึ่งจากตารางข้อมูลของผู้ผลิตจะพบว่า

$$A_c = 400 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$A_w = 1100 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2$$

ดังนั้นค่า A_p ของแกน EE80 ที่ได้ทำการเลือกจึงมีค่าเป็น

$$A_p = A_c \cdot A_w = 44 \times 10^{-8} \quad \text{m}^4$$

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แกน EE80 ในการทำวิจัยได้

ข) หาจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิได้จากสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$N_1 = \frac{300}{4 \times 400 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 50 \times 10^3} \quad \text{รอบ}$$

$$N_1 = 12.5 \quad \text{รอบ}$$

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิได้จากสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$N_2 = \frac{75}{4 \times 400 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 50 \times 10^3} \quad \text{รอบ}$$

$$N_2 = 3.125 \quad \text{รอบ}$$

จะได้อัตราส่วนของหม้อแปลง (turn ratio) คือ 4

ดังนั้นทำการเลือก

$$N_1 = 28 \quad \text{รอบ}$$

$$N_2 = 7 \quad \text{รอบ}$$

ค) คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของขดลวดจากสมการที่ 2.6 ดังนี้

จะได้

$$a_1 = \frac{i_{in}}{J} \quad \text{และ} \quad a_2 = \frac{i_{out}}{J}$$

แทนค่าพารามิเตอร์โดยเลือกค่าความหนาแน่นของกระแส $J = 4 \text{ A/mm}^2$

$$a_1 = \frac{10}{4 \times 10^6} = 2.5 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2$$

$$a_2 = \frac{40}{4 \times 10^6} = 10 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกขนาดของตัวนำที่ใช้น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ทำการเลือกขดลวดตัวนำเบอร์ SWG28 ซึ่งมีขนาด 0.1134 mm^2 ดังนั้นด้านปฐมภูมิจะใช้ลวดตีเกลียวเป็นจำนวนเท่ากับ $\frac{2.5 \times 10^{-6}}{0.1134 \times 10^{-6}} = 22.0458$ เส้น ดังนั้นด้านปฐมภูมิจึงเลือก 23 เส้น ดังนั้นด้านทุติยภูมิจะใช้ลวดตีเกลียวเป็นจำนวนเท่ากับ $\frac{10 \times 10^{-6}}{0.1134 \times 10^{-6}} = 88.1834$ เส้น ดังนั้นด้านทุติยภูมิจึงเลือก 89 เส้น

ง) ตรวจสอบความถูกต้อง

ตรวจสอบความเป็นไปได้ของการออกแบบดังสมการที่ (3.31)

$$A_w \cdot K_w \geq \sum_{i=1}^n (a_i \cdot N_i) \quad (3.31)$$

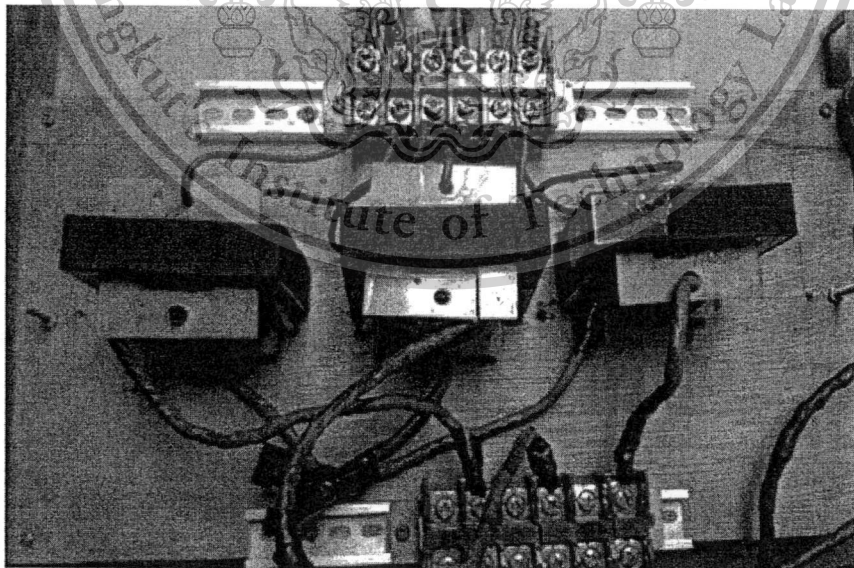
เมื่อ n คือจำนวนขดลวดของหม้อแปลง

ดังนั้นจากแทนที่ได้ทำการเลือกก่อนหน้านี้พบว่า $A_w \cdot K_w = 1100 \times 10^{-6} \times 0.4 = 440 \text{ mm}^2$

และจากการคำนวณก่อนหน้านี้จะได้ว่า

$$\begin{aligned} a_1 \cdot N_1 + a_2 \cdot N_2 &= (2.5 \times 10^{-6} \cdot 28) + (10 \times 10^{-6} \cdot 7) \\ &= 140 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

จะพบว่าค่าที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (3.31) ซึ่งแสดงว่าการออกแบบมีความเป็นไปได้ จึงได้ทำการสร้างหม้อแปลงทั้งสามลูกจากนั้นนำมาต่อกับแบบสตาร์-สตาร์ (Y-Y) ดังรูปที่ 3.13



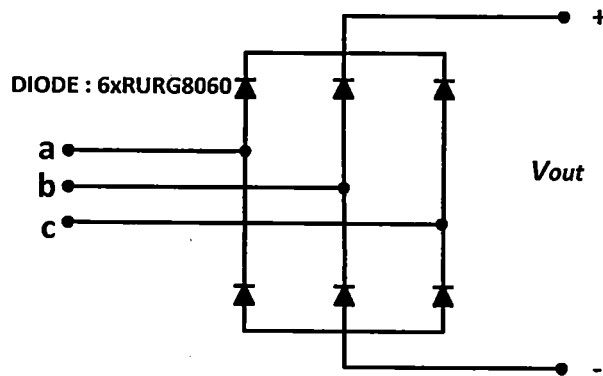
รูปที่ 3.13 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสที่ใช้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.5.7 ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาต์พุต

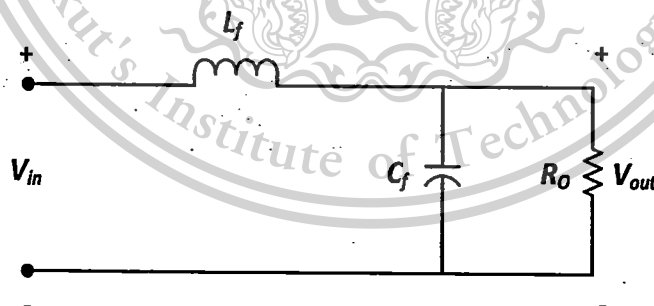


รูปที่ 3.14 ภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาต์พุต

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่เชื่อมต่ออยู่กับด้านทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส เพื่อที่จะทำการเรียงไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้ง โดยการออกแบบจะเลือกใช้ไดโอดแบบ fast recovery ที่ทนกระแสได้สูง (RURG8060) จำนวน 6 ตัว นำมาต่อกันเป็นวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

3.5.8 ส่วนของ LC ฟิลเตอร์

วงจร LC ฟิลเตอร์ด้านเอาต์พุตจะประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ (L_f) ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ (C_f) และตัวต้านทานโหลด (R_o) ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจร LC ฟิลเตอร์ด้านเอาต์พุต

วงจรฟิลเตอร์จะสามารถลดผลขององค์ประกอบโพสลับที่ความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency) ซึ่งความถี่คัตออฟของวงจรฟิลเตอร์จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$ เพื่อที่จะทำให้ผล

ของอัตราส่วนแรงดัน V_{out}/V_{in} มีค่าน้อยลง สำหรับอัตราส่วน V_{out}/V_{in} จะสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{f}{f_o})^2)^2 + ((\frac{1}{R_o}) \cdot \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \cdot (\frac{f}{f_o}))^2}} \quad (3.32)$$

โดยค่า V_{out}/V_{in} จะขึ้นอยู่กับ Q (Quality factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $Q = \frac{R_o}{\sqrt{C_f/L_f}}$ ที่ความถี่คัตออฟ (f_o) ในขณะที่ $f = f_o$ อัตราส่วน V_{out}/V_{in} จะมีค่าเท่ากับ Q แต่ในการออกแบบนี้จะเลือกอัตราส่วน V_{out}/V_{in} ให้มีค่าน้อยกว่า 1 เพราะจะสามารถทำให้ลดองค์ประกอบของไฟสลับของวงจรเรียงกระแสซึ่งจะส่งผลทำให้รีปเปิ้ลของแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง โดยจะทำการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์มีค่าเท่ากับ $20 \mu\text{H}$ และค่าตัวเก็บประจุฟิลเตอร์มีค่าเท่ากับ $680 \mu\text{F}$ โดยค่าความต้านทานที่พิกัดเป็น 3.2Ω

วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์

กำหนดให้

$$L_f = 20 \mu\text{H}$$

$$f_s = 50 \text{ kHz}$$

$$B_m = 0.3 \text{ Tesla}$$

$$K_w = 0.6$$

$$i_o = 40 \text{ A}$$

$$\Delta i = 1 \text{ A}$$

$$J = 4 \text{ A/mm}^2$$

ก) คำนวณหาผลคูณพื้นที่ (A_p)

เริ่มจากการคำนวณพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_m^2 \quad (3.33)$$

โดย

$$i_m = i_o + \frac{\Delta i}{2} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการจะได้

$$E = 16.4 \times 10^{-3} \quad \text{J}$$

คำนวณหา (A_p) จาก

$$A_p = A_w \cdot A_c = \frac{2 \cdot E}{K_w \cdot K_c \cdot J \cdot B_m} \quad (3.35)$$

$$A_p = 4.56 \times 10^{-8} \quad \text{m}^4$$

ทำการเลือกขนาดแกนแม่เหล็กโดยเลือกให้มีค่าให้มากกว่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงทำการเลือกแกน Powder core (55906A2) ซึ่งมีค่า $A_p = 40.8 \times 10^{-8} \text{ m}^4$, $A_w = 17.99 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $A_c = 2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้

ข) คำนวณหาจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N = \frac{L_f \cdot i_m}{A_c \cdot B_m} \quad (3.36)$$

เมื่อทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการที่ 3.36 จะได้ $N = 12$ รอบ

ค) คำนวณหาขนาดลวดตัวนำ

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{i_o}{J} \quad (3.37)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการจะได้ $a = 10 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2$

ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ลวดตัวนำตีเกลียวเพื่อให้ได้พื้นที่หน้า $10 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2$ ดังนั้นจึงทำการเลือก ลวดทองแดงเบอร์ SWG28 ซึ่งมีขนาด $0.1134 \quad \text{mm}^2$ ดังนั้นใช้ลวดตีเกลียวเป็นจำนวนเท่ากับ

$$\frac{10 \times 10^{-6}}{0.1134 \times 10^{-6}} = 88.1834 \text{ เส้น} \quad \text{ดังนั้นจึงเลือกตีเกลียว 89 เส้น}$$

ง) ตรวจสอบการออกแบบ

ตรวจสอบการออกแบบจากเงื่อนไข

$$A_w \cdot K_w \geq a \cdot N \quad (3.38)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$A_w \cdot K_w = 17.99 \times 10^{-4} \times 0.6 = 10.794 \times 10^{-4} \quad \text{m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

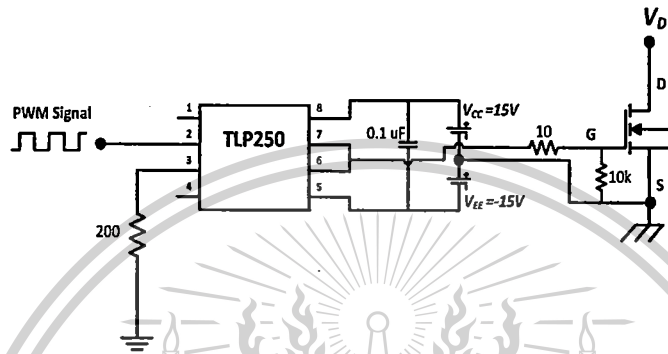
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$a \cdot N = 10 \times 10^{-6} \times 12 = 1.2 \times 10^{-4}$$

m²

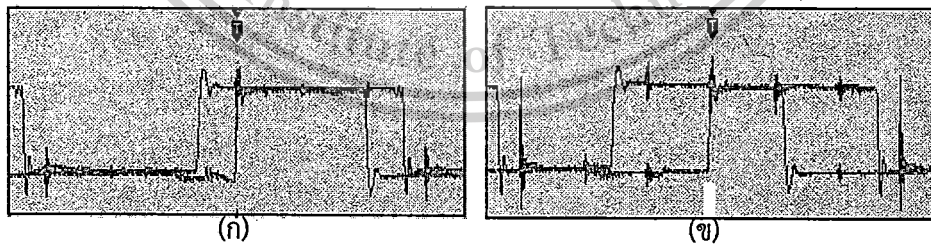
จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งหมายความว่าสามารถผันขดลวดลงในพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ทำการเลือกได้

3.5.9 ส่วนของวงจรขับเคลื่อน



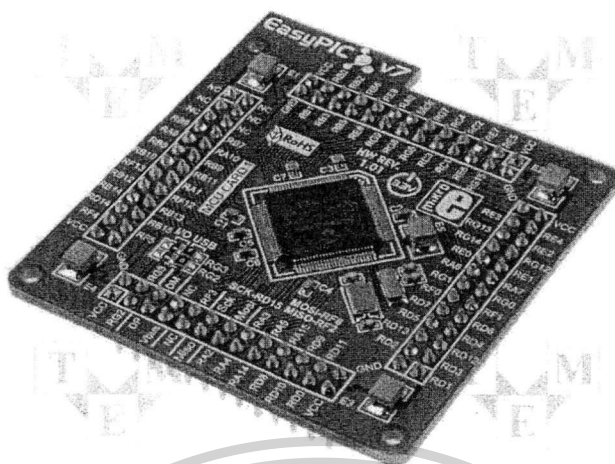
รูปที่ 3.16 วงจรขับเคลื่อน

จากรูปที่ 3.16 เป็นวงจรขับเคลื่อนสวิตช์มอเตอร์และไอจีบี โดยจะทำการแยกโดดสัญญาณระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลังด้วยการแยกโดดทางแสงโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 จำนวน 12 ชุด สำหรับสวิตช์ทั้งหมด 12 ตัว สัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512u810 จะถูกต่อเข้ากับขาที่ 2 ของ TLP250 จะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของ TLP250 ออกที่ขา 6 โดยในวงจรนี้จะใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงกลมโดยจะต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง +15 V เข้าที่ขา 8 และ -15V เข้าที่ขา 5 ของ TLP250 เพื่อให้สวิตช์มอเตอร์สามารถหยุดนำกระแสได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 3.17 สัญญาณพีดับลิวเอ็มจากวงจรขับเคลื่อน (ก) มุมเลื่อนเฟส 30 องศา
(ข) มุมเลื่อนเฟส 90 องศา

3.5.10 ส่วนของตัวสร้างสัญญาณไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33e



รูปที่ 3.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512mu810

การสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มเพื่อใช้ขับสวิทซ์ทั้ง 12 ตัว โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC33ep512mu810 ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณได้ทั้งหมด 12 สัญญาณ โดยที่แต่ละสัญญาณจะมีค่าตัวตัดไซ้ใกล้เคียงประมาณ 50 % โดยตั้งค่าที่รีจิสเตอร์ PDCx โดยสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มที่มีความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซึ่งสามารถตั้งค่าได้ที่รีจิสเตอร์ PTPER จากนั้นจำเป็นต้องมีการตั้งค่าเวลาเดดไทม์ระหว่างคู่สัญญาณสวิทซ์ซึ่งสามารถเช็คค่าได้ที่รีจิสเตอร์ DTRx และ ALTDTRx ภายในโมดูลสร้างสัญญาณ PWM ของไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนั้นยังได้ออกแบบโปรแกรมให้มีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับลิวเอ็มโดยรับค่าผ่านทางโมดูล A/D (Analog to Digital Converter)

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทํางานและวิเคราะห์โหมดการทํางานของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิทซ์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์โดยได้อธิบายถึงการเกิดการทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ของสวิทซ์วงนอกและการทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ของสวิทซ์วงใน นอกจากนั้นได้กล่าวถึงออกแบบวงจรกำลังในภาคส่วนต่างๆ อันได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟส ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน วงจรอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสและวงจร LC ฟิลเตอร์ที่ใช้จริงในวงจร รวมไปถึงส่วนของวงจรควบคุม อันได้แก่วงจรชั้บเกิด และไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512mu810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นผลการทดลองเพื่อทำการทดสอบการทำงานของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสพีดับบลิวเอ็ม ที่ได้ทำการสร้างขึ้นโดยจะทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวงจร การเกิดการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ และกระแสศูนย์ของสวิตช์แต่ละตัว การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนรวมทางฮามอนิกส์ การปรับกำลังไฟฟ้าโดยการปรับมุมเลื่อนเฟสและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลารีเซ็ทของกระแสด้านปฐมภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุลือกิ่ง โดยจะได้ทำการทดสอบโดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

4.2 การวิเคราะห์การเกิดการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ในสวิตช์แต่ละตัว

เพื่อทดสอบว่าสวิตช์ทุกตัวในวงจรมีลักษณะของการเกิดการสวิตช์แบบนุ่มนวลจริง จึงได้ทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์แต่ละตัวและทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Psim และทำการทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 3.5 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 530 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาออก 110 โวลต์และความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเกิด ZVZCS ใน switch แต่ละตัว

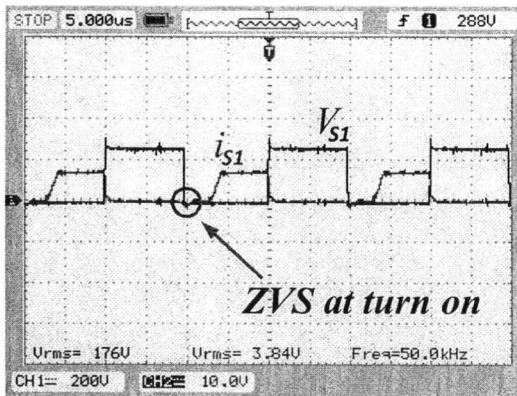
สวิตช์	ZVS at turn on	ZCS at turn off
S1	✓	-
S2	✓	✓
S3	✓	✓
S4	✓	-
S5	✓	-
S6	✓	✓
S7	✓	✓
S8	✓	-
S9	✓	-
S10	✓	✓
S11	✓	✓
S12	✓	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

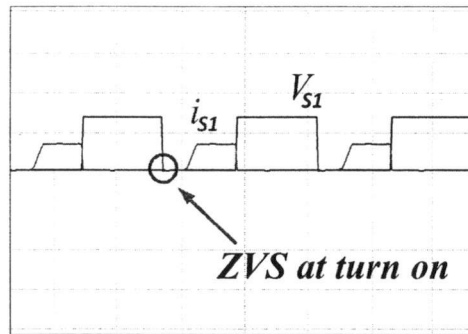
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการจำลอง

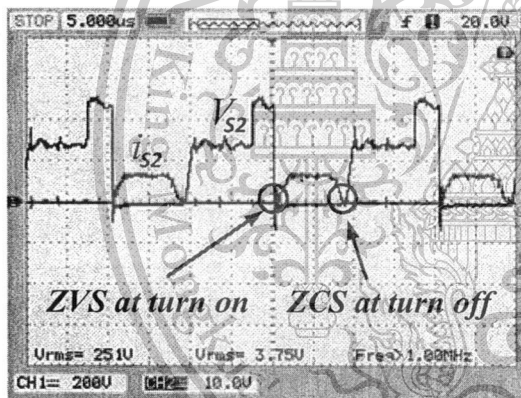


(ก)

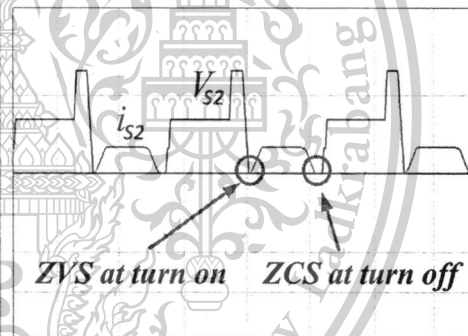


(ข)

รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S1 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

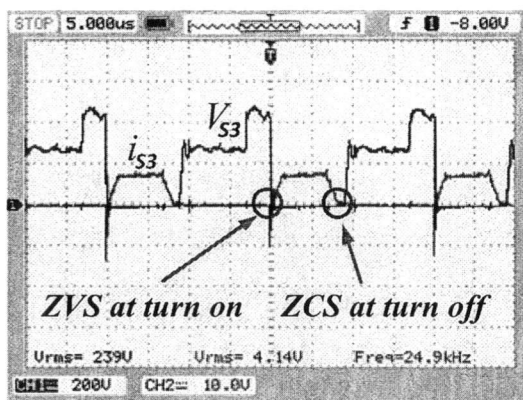


(ก)

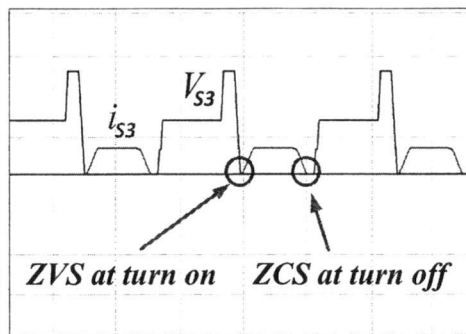


(ข)

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S2 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

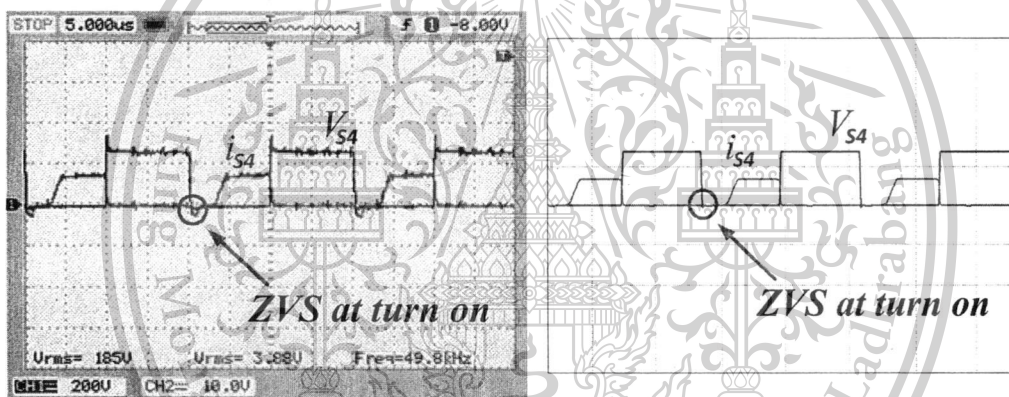


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S3 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)

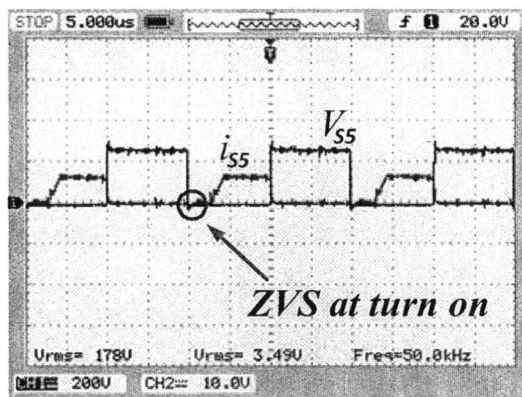
(ข)

รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S4 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

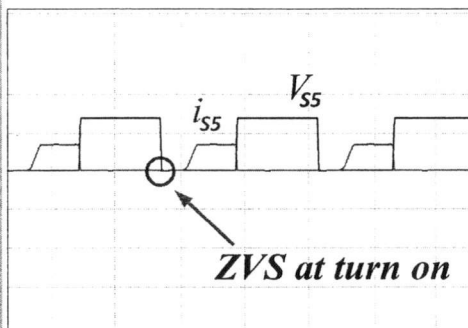
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

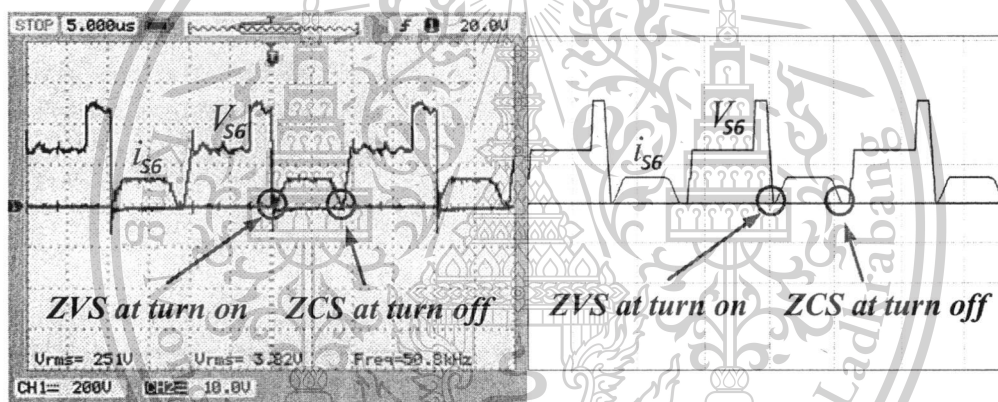


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S5 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)

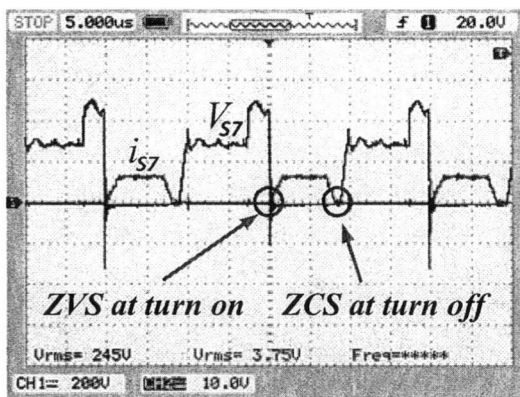
(ข)

รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S6 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

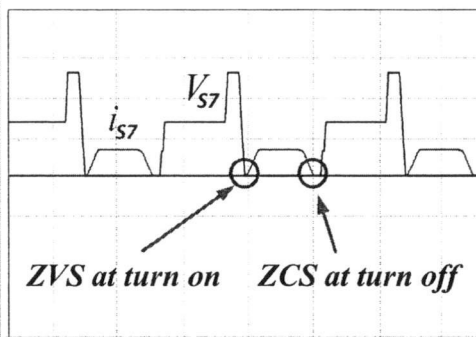
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

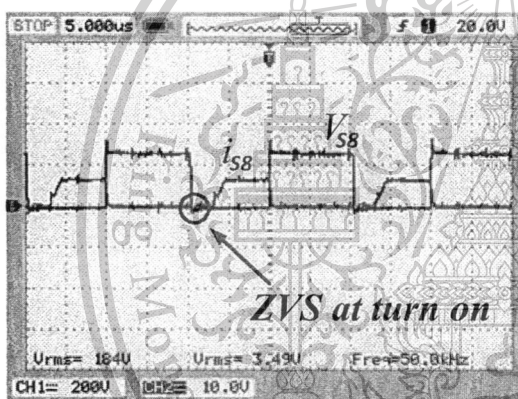


(ก)

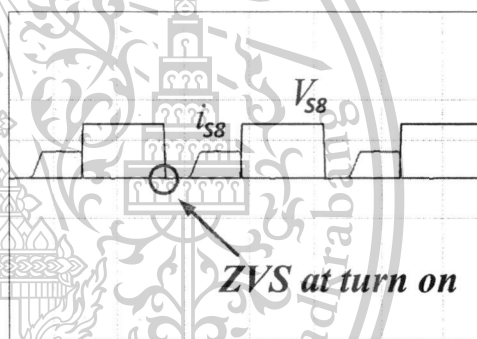


(ข)

รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S7 (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)



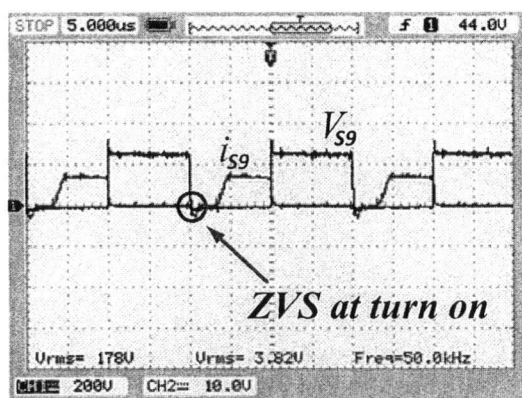
(ข)

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S8 (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

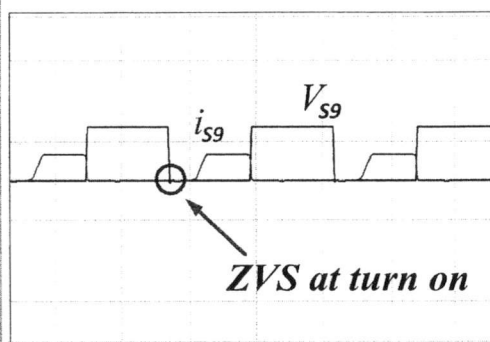
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

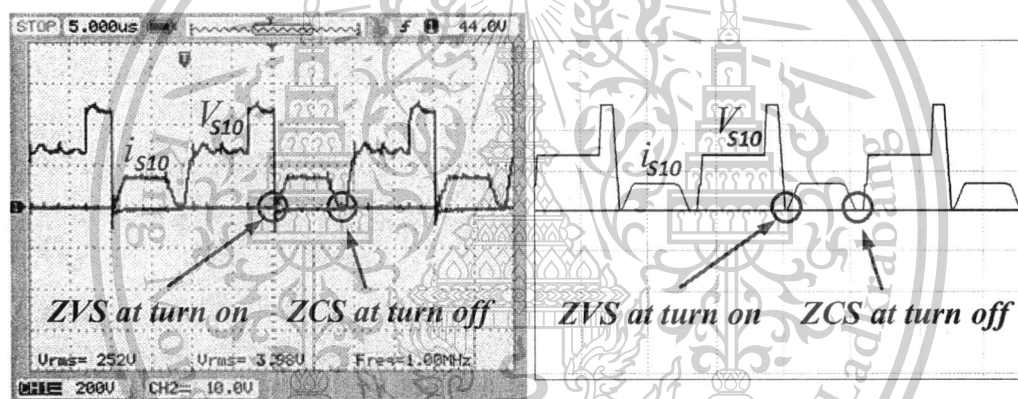


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S9 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)

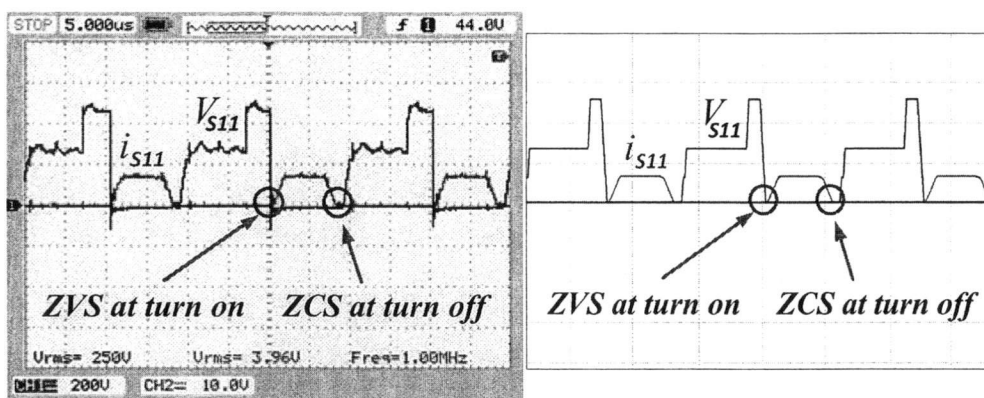
(ข)

รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S10 (200V/div , 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

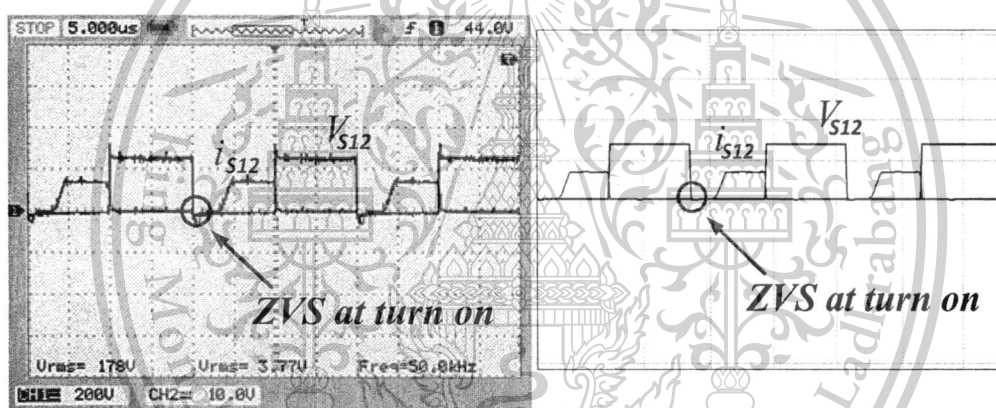
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S11 (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S12 (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ถึง 4.12 เป็นการตรวจสอบการเกิดลักษณะการทำงานแบบชอฟต์สวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัวในวงจร ซึ่งพบว่าสวิตช์ทุกตัวในวงจร (S1 – S12) เกิดการทำงานแบบชอฟต์สวิตช์ทุกตัว โดยสวิตช์ช่วงในอันได้แก่ (S1, S4, S5, S8, S9, S12) เกิดการทำงานแบบสวิตช์ด้วยแรงดันเป็นศูนย์ (Zero – voltage switching : ZVS) โดยจากรูปผลการทดลองและผลการจำลองจะพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ทำให้เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการเริ่มนำกระแส แต่ในช่วงของการหยุดนำกระแสจะพบว่ายังเกิดการซ้อนทับกันของรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ ทำให้เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการหยุดนำกระแสดังที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1, 4.4, 4.5, 4.8, 4.9 และ 4.12 ตามลำดับ ส่วนสวิตช์ช่วงในอันได้แก่ (S2, S3, S6, S7, S10, S11) จะเกิดการทำงานแบบสวิตช์ด้วยแรงดันเป็นศูนย์และกระแสเป็นศูนย์ (Zero – voltage zero – current switching : ZVZCS) โดยจากรูปผลการทดลองและผลการจำลองจะพบว่าในช่วงของการเริ่มนำกระแสจะเกิดลักษณะการทำงานแบบสวิตช์ด้วยแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) โดยแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ และในช่วงของการหยุดนำกระแสจะพบการเกิดการทำงานแบบสวิตช์ด้วยกระแสเป็นศูนย์ (ZCS) โดยจะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์นั้นลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์เกิดขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสวิตช์ช่วงในอันไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ทั้งในช่วงของการเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแส ตามที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์แต่ละตัวนั้นมีค่าเพียงครั้งเดียวจากแรงดันขาเข้าเท่านั้นอันเนื่องมาจากการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

4.3 การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

เพื่อศึกษาความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันและกระแส (THD_v และ THD_i) ของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้น เนื่องจากเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับดังนั้นรูปคลื่นแรงดันจะมีความเป็นขั้นบันไดมากกว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองระดับ จึงจะได้ทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแส จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ (Total Harmonics Distortion) และเนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ภายในคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส จึงจะทำการวิเคราะห์ทั้งในส่วนองแรงดันเฟส (V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}) และแรงดันไลน์ (V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการ (4.1)และ(4.2)

$$THD_v (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} \times 100 \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

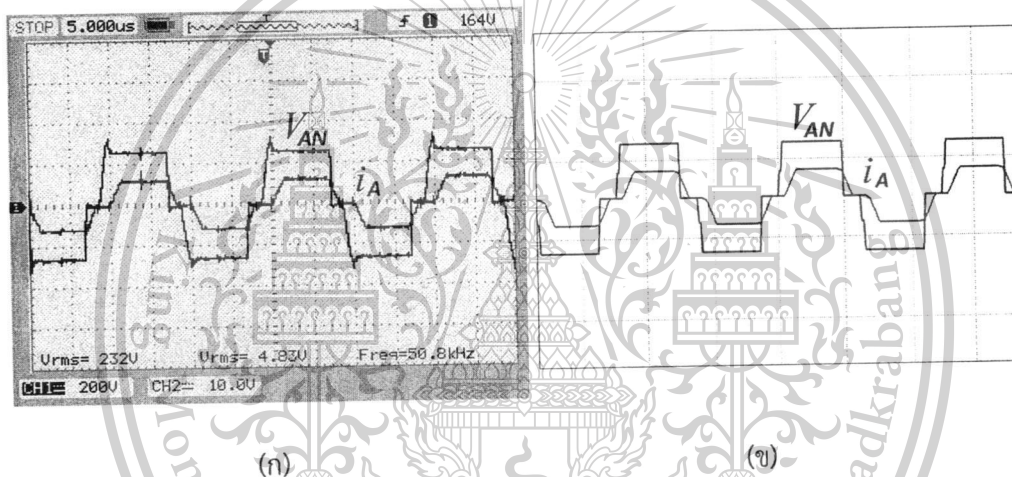
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

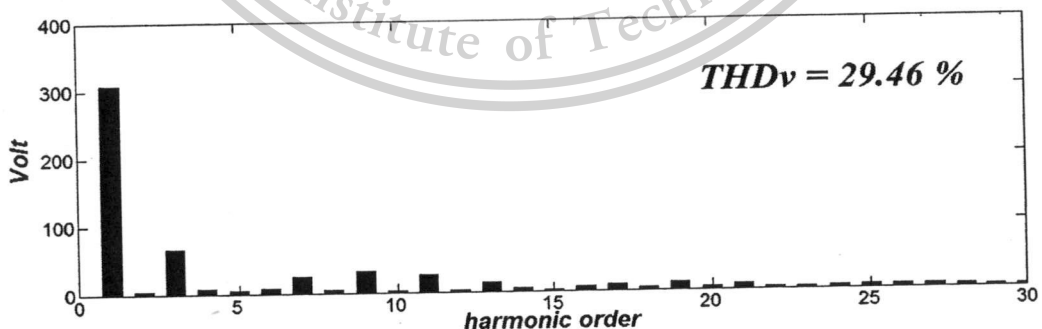
$$THD_i (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_{h,rms}^2}}{i_{1,rms}} \times 100 \quad (4.2)$$

โดยที่ค่า THD_v คือ ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน
 THD_i คือ ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของกระแส
 h คือ อันดับของฮาร์โมนิกส์
 V_1 คือ องค์กรประกอบหลักมูลของแรงดัน
 i_1 คือ องค์กรประกอบหลักมูลของกระแส

4.3.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{AN}) และกระแสเฟส (i_A)



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{AN}) และกระแสเฟส (i_A), (200V/div, 10A/div)
 (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

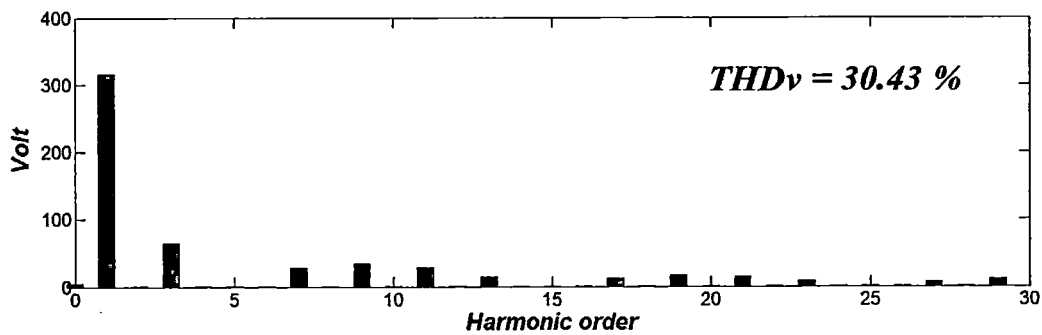


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

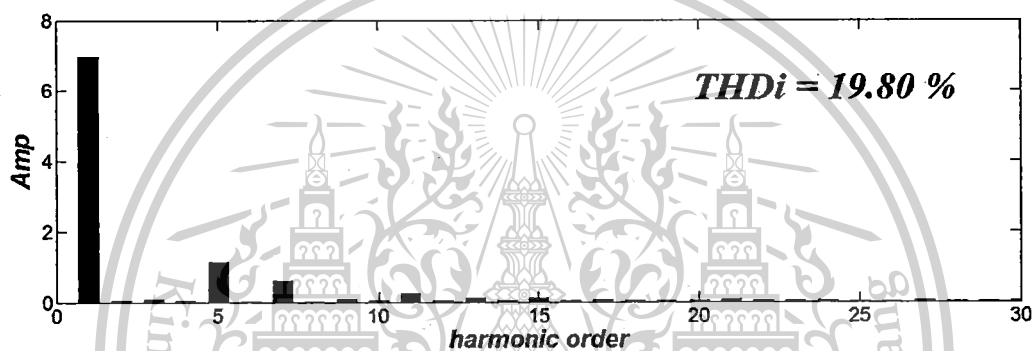
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

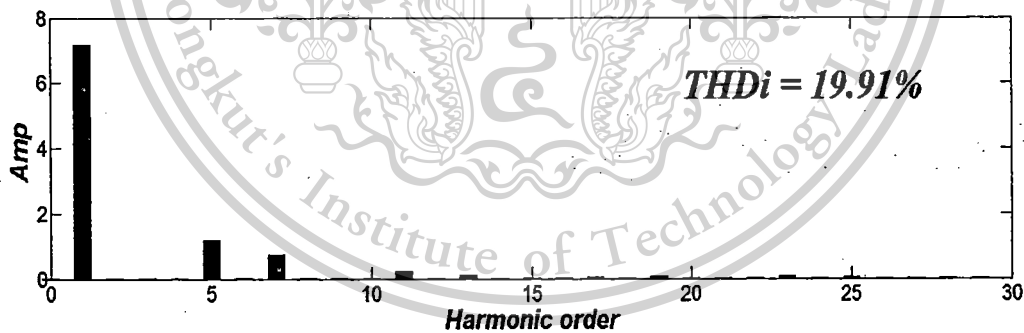


(ข)

รูปที่ 4.14 ฮามอนิกส์เปกตรัมของแรงดันเฟส (V_{AN}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)



(ข)

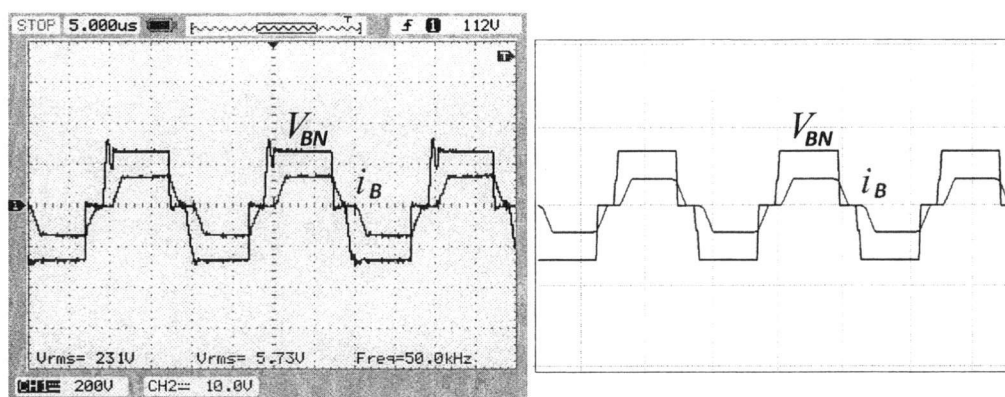
รูปที่ 4.15 ฮามอนิกส์เปกตรัมของกระแสเฟส (i_A) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{BN}) และกระแสเฟส (i_B)

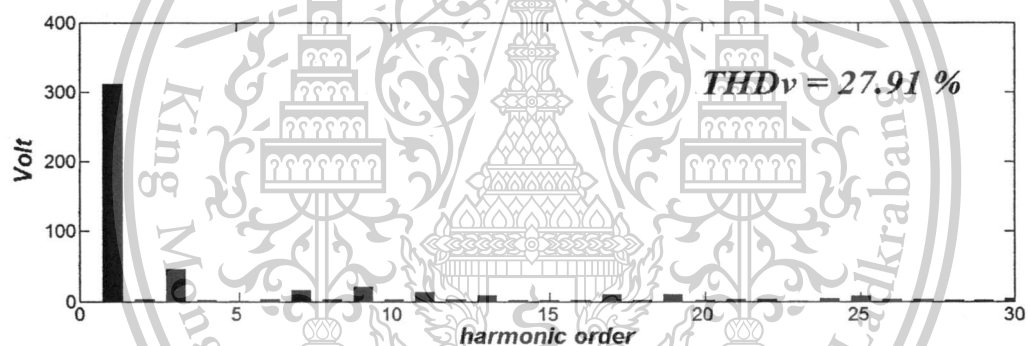


(ก)

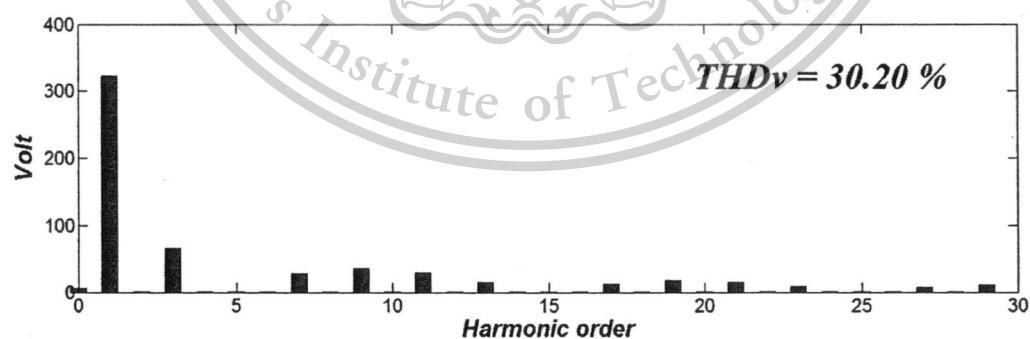
(ข)

รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{BN}) และกระแสเฟส (i_B), (200V/div, 10A/div)

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)



(ข)

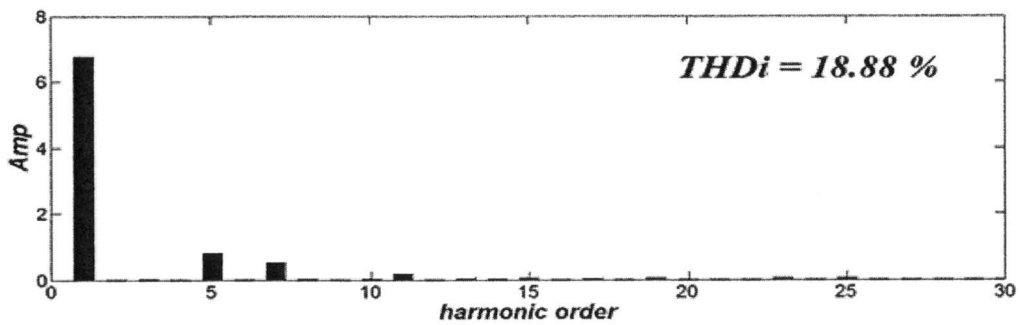
รูปที่ 4.17 ฮาร์โมนิกส์เปกตรัมของแรงดันเฟส (V_{BN}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

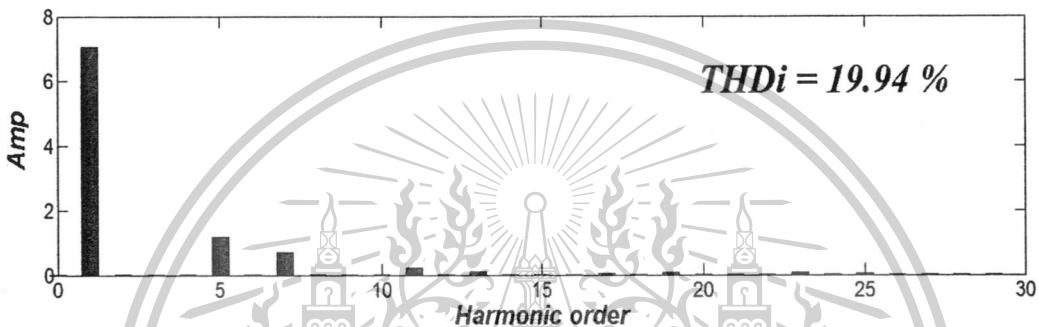
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



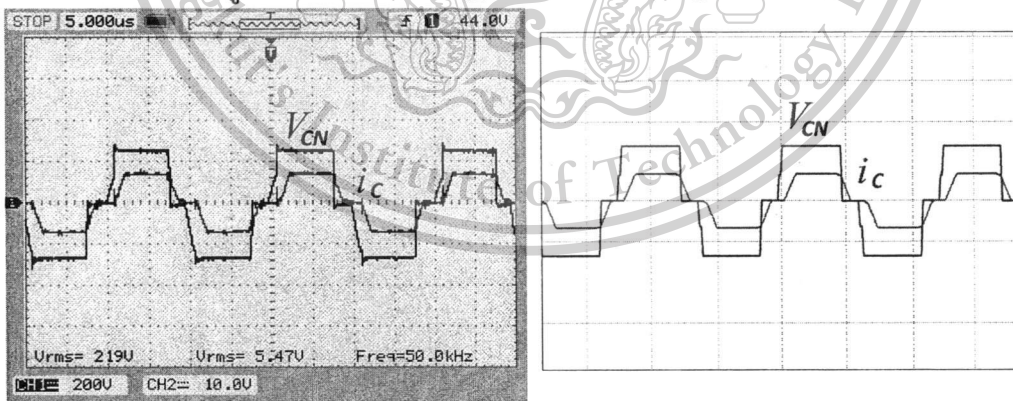
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 ฮาร์มอนิกส์เบคตรัมของกระแสเฟส (i_B) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

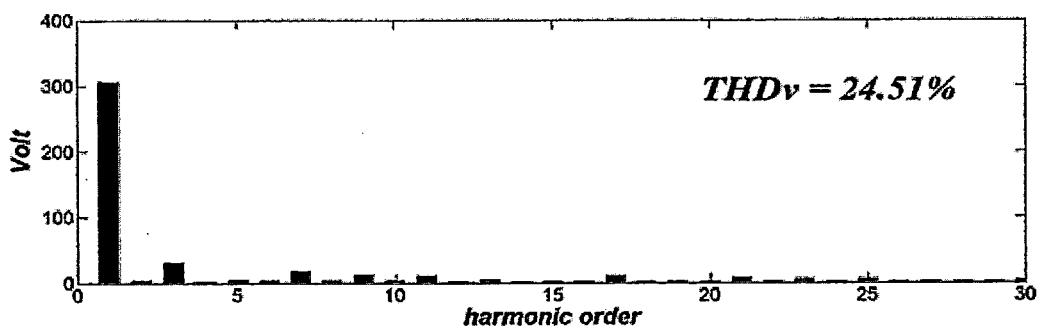
4.3.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{CN}) และกระแสเฟส (i_C)



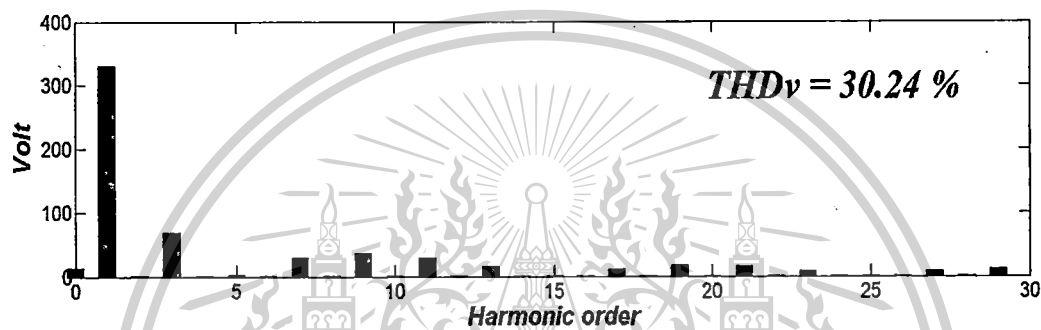
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{CN}) และกระแสเฟส (i_C) , (200V/div , 10A/div)
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



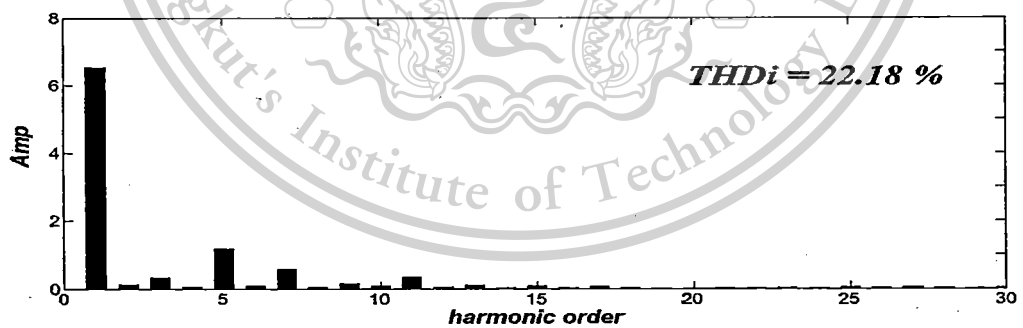
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันเฟส (V_{CN}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

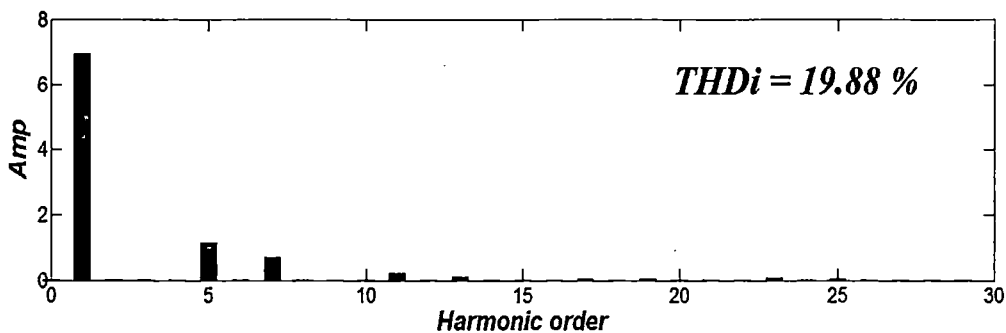


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ข)

รูปที่ 4.21 ฮาร์โมนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส (i_C) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

ตารางที่ 4.2 ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดันเฟสและกระแสเฟส

	Total Harmonics Distortion	ผลการทดลองจริง	ผลการจำลอง
แรงดันเฟส V_{AN}	THD _v	29.46 %	30.43 %
กระแสเฟส i_A	THD _i	19.80 %	19.91 %
แรงดันเฟส V_{BN}	THD _v	27.91 %	30.20 %
กระแสเฟส i_B	THD _i	18.88 %	19.94 %
แรงดันเฟส V_{CN}	THD _v	24.51 %	30.24 %
กระแสเฟส i_C	THD _i	22.18 %	19.88 %

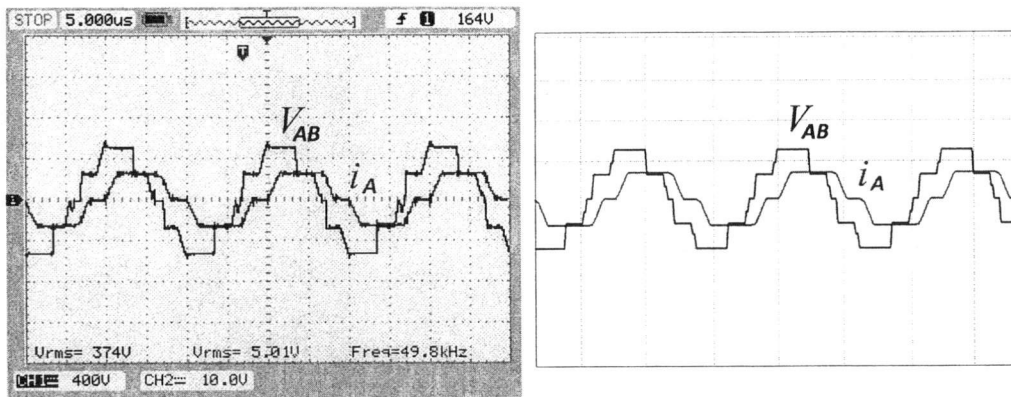
จากผลการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันเฟส และกระแสเฟส ที่ระดับแรงดันอินพุตเท่ากับ 530 โวลต์ พบว่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดันเฟสในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ มีค่าดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าค่าความผิดเพี้ยนรวมฮาร์โมนิกส์ของแรงดันเฟสของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองระดับโดยทั่วไป เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันมีลักษณะความเป็นขั้นบันไดมากกว่า ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นการเลือกใช้งานคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับจึงสามารถช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.4 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A)

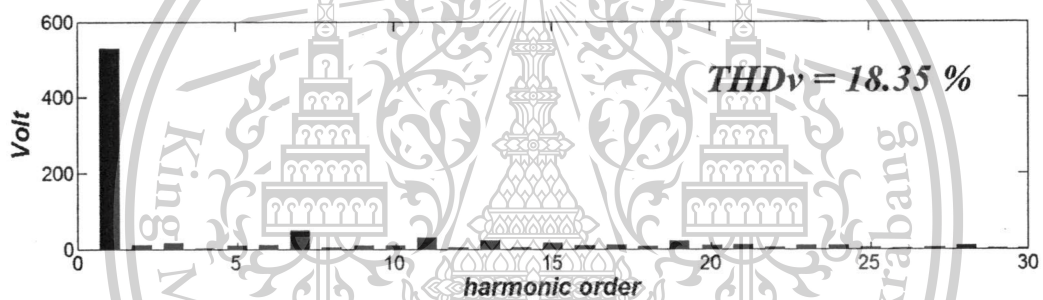


(ก)

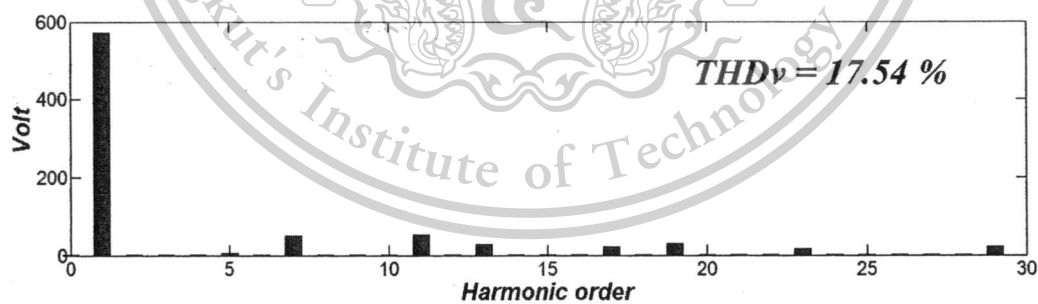
(ข)

รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{AB}) และกระแสไลน์ (i_A), (400V/div, 10A/div)

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)



(ข)

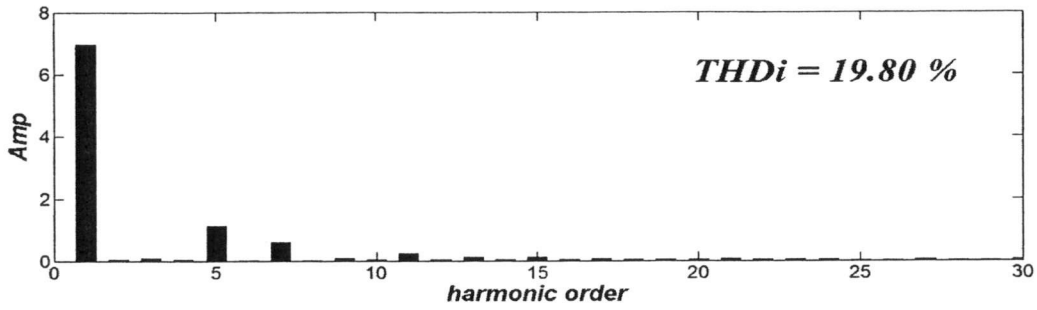
รูปที่ 4.23 ฮาร์โมนิกส์เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไลน์ (V_{AB}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

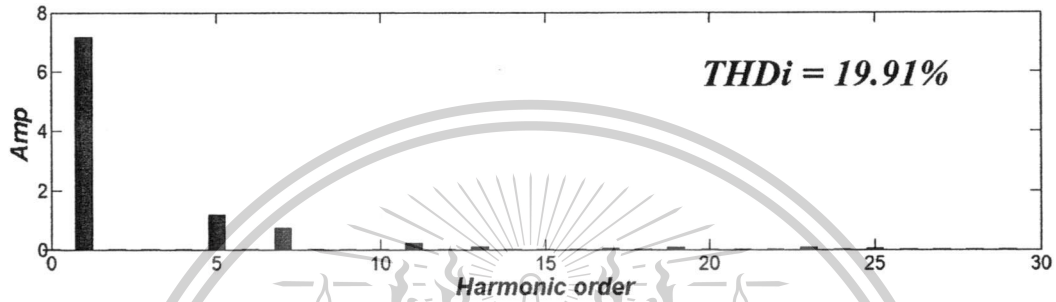
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



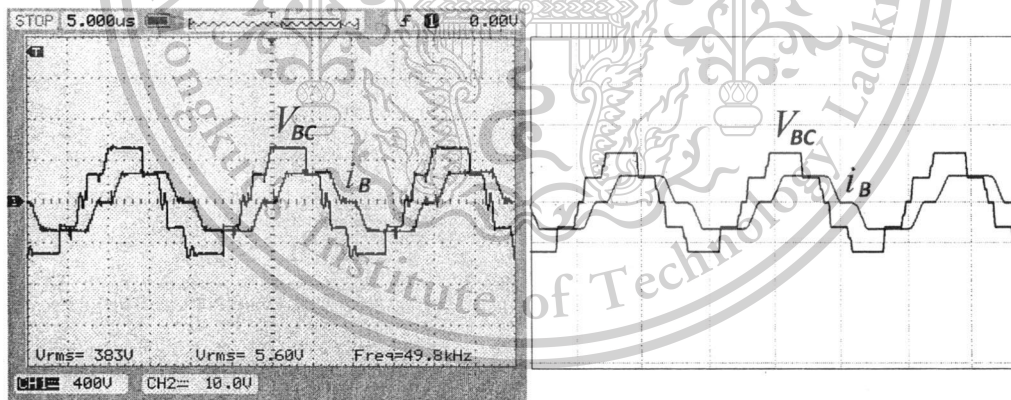
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสไลน์ (i_B) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

4.3.5 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{BC}) และกระแสไลน์ (i_B)



(ก)

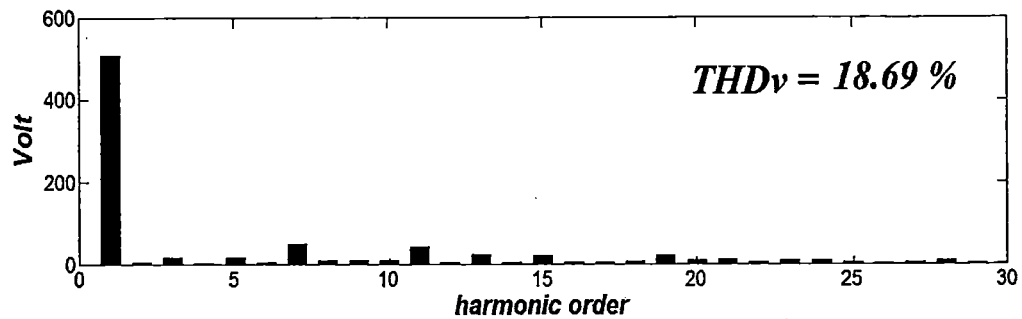
(ข)

รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{BC}) และกระแสไลน์ (i_B) , (400V/div , 10A/div)
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

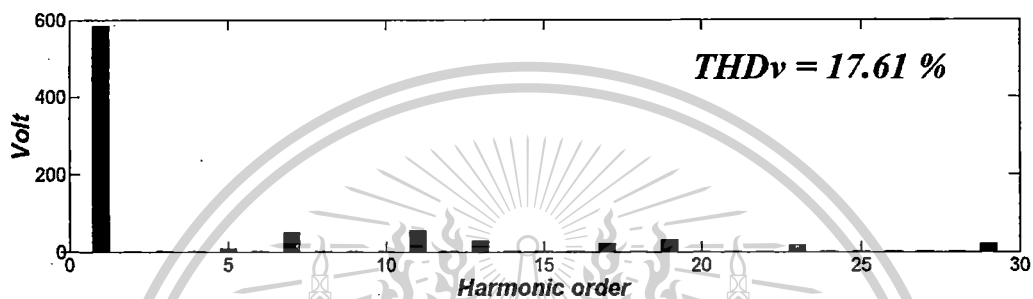
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

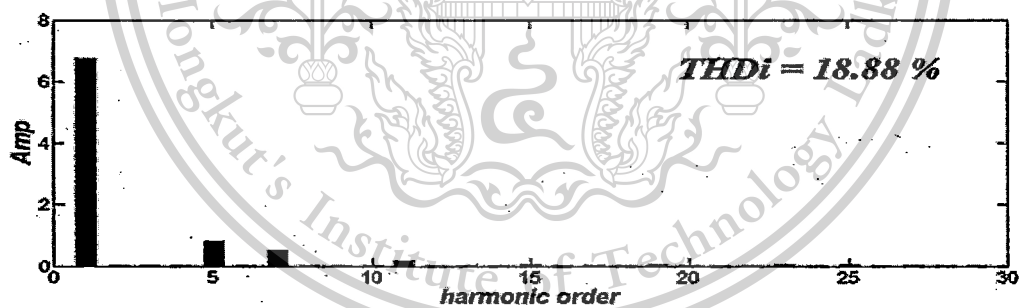


(ก)

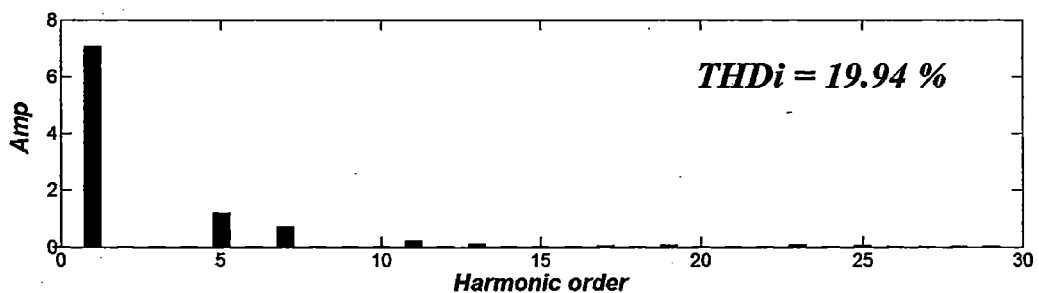


(ข)

รูปที่ 4.26 ฮาร์โมนิกส์สเปกตรัมของแรงดันไลน์ (V_{BC}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

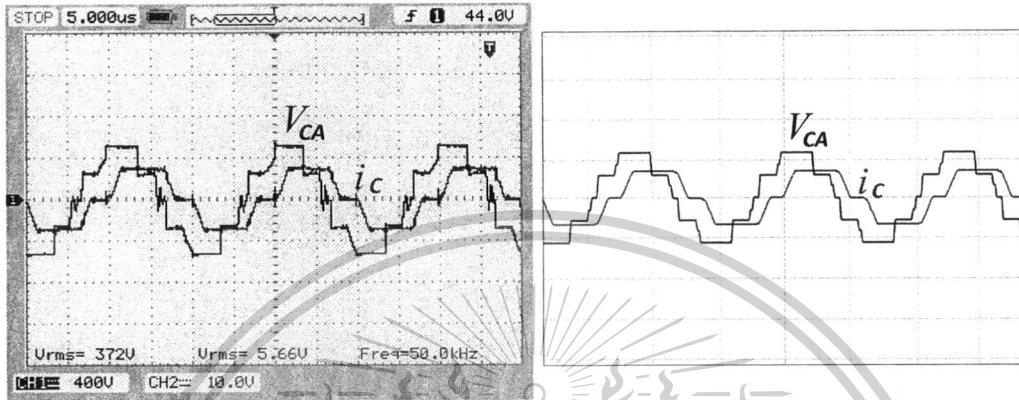
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ข)

รูปที่ 4.27 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสไลน์ (i_b) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

4.3.6 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{CA}) และกระแสไลน์ (i_C)



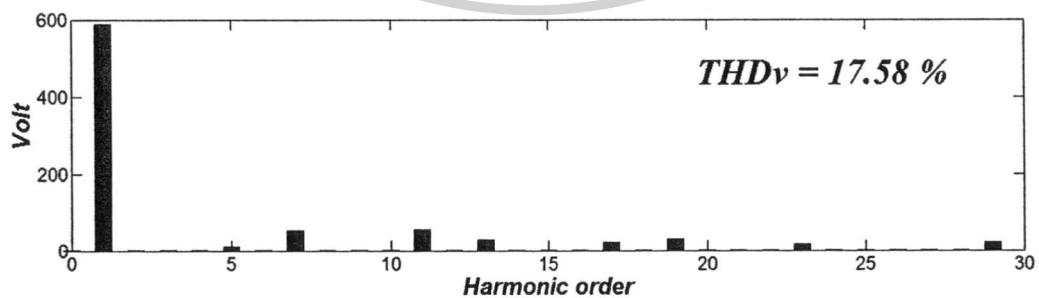
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{CA}) และกระแสไลน์ (i_C) , (400V/div, 10A/div)
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)



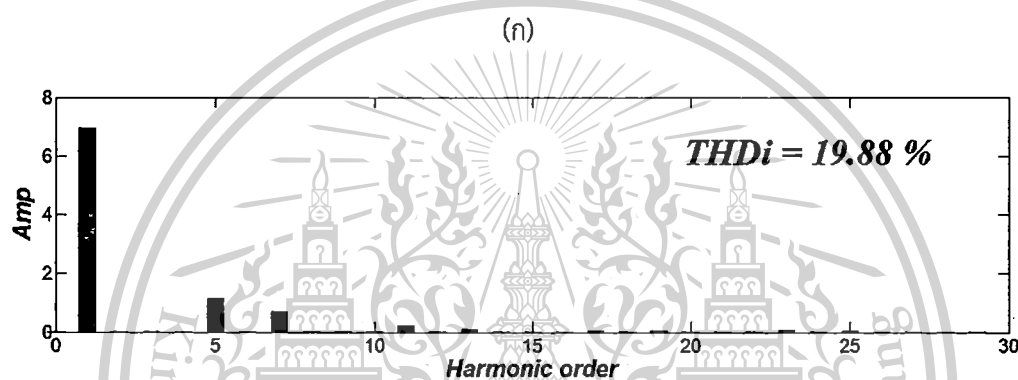
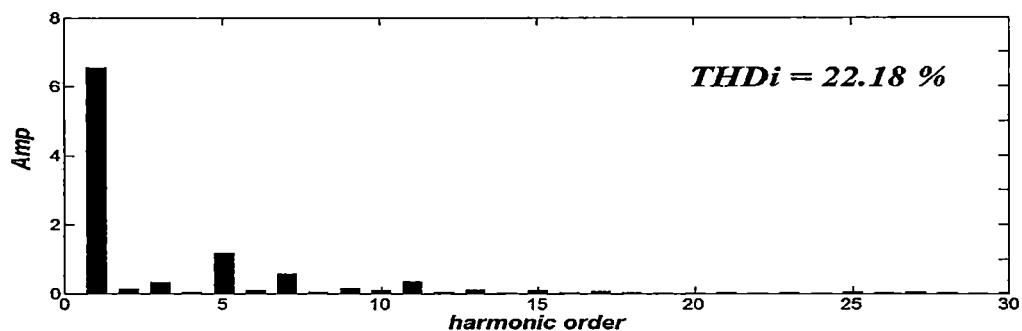
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 4.29 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของแรงดันไลน์ (V_{CA}) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



รูปที่ 4.30 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสไลน์ (i_C) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลต์
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

ตารางที่ 4.3 ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮามอนิกส์ของแรงดันไลน์และกระแสไลน์

	Total Harmonics Distortion	ผลการทดลองจริง	ผลการจำลอง
แรงดันไลน์ V_{AB}	THD_v	18.35 %	17.54 %
กระแสไลน์ i_A	THD_i	19.80 %	19.91 %
แรงดันไลน์ V_{BC}	THD_v	18.69 %	17.61 %
กระแสไลน์ i_B	THD_i	18.88 %	19.94 %
แรงดันไลน์ V_{CA}	THD_v	18.06 %	17.58 %
กระแสไลน์ i_C	THD_i	22.18 %	19.88 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

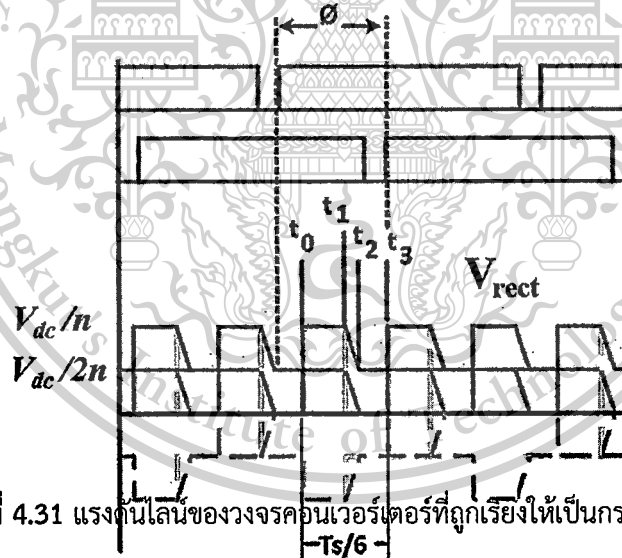
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันโวลต์และกระแสโวลต์ ที่ระดับแรงดันอินพุต เท่ากับ 530 โวลต์ พบว่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ของแรงดันโวลต์ มีค่าดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะ พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความผิดเพี้ยนรวมฮาร์มอนิกส์ของแรงดันเฟส(ตารางที่ 4.2) เนื่องจากรูปคลื่น ของแรงดันโวลต์มีลักษณะความเป็นขั้นบันไดมากกว่าแรงดันเฟส จากผลการทดลองพบว่าระดับ แรงดันโวลต์มีถึงห้าระดับทำให้รูปคลื่นมีลักษณะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากขึ้น

4.4 การทดสอบปรับกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟส

การทดสอบปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้จะทำการทดสอบ โดยใช้การปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณควบคุมที่ระดับลิวเอมระหว่างสวิตซ์วงในและสวิตซ์วงนอก โดยการปรับเปลี่ยนมุมเลื่อนเฟสนี้จะเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์ เปลี่ยนแปลงไปทำให้กระแสเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อทั้งแรงดันเอาต์พุตและกระแส เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงเป็นสาเหตุให้กำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งแรงดัน เอาต์พุตของวงจรที่ได้นำเสนอสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.31 แรงดันโวลต์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ถูกเรียงให้เป็นกระแสตรง

กำหนดให้ $t_2 - t_1 = t_d$ และ $t_3 - t_2 = \beta$ จากรูปจะได้ว่า $2\beta + (t_1 - t_0) + t_d = \phi$ และ

$(t_1 - t_0) + t_d + \beta = \frac{T_s}{6}$ สามารถหาแรงดันเฉลี่ยของวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้จากสมการที่ 4.3

$$V_{out} = \frac{6}{T_s} \cdot \left[\frac{V_{dc}}{n} \cdot \left(\frac{T_s}{3} - \phi - t_d \right) + \left(\frac{V_{dc}}{2n} \right) t_d + \frac{V_{dc}}{2n} \cdot \left(\phi - \frac{T_s}{6} \right) \right] \quad (4.3)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ 4.3 จะได้สมการที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$V_{out} = \frac{6}{T_s} \cdot \left[\frac{V_{dc}}{n} \cdot \left(\frac{T_s}{4} - \frac{\phi}{2} - \frac{t_d}{2} \right) \right] \quad (4.4)$$

โดย ϕ คือ มุมเลื่อนเฟสของสัญญาณควบคุม (Phase shift angle)

t_d คือ ช่วงเวลาเดดไทม์ของสัญญาณควบคุม

n คือ อัตราส่วนของหม้อแปลงความถี่สูง

T_s คือ คาบเวลาของสัญญาณควบคุม

เมื่อกำหนดให้ R_L คือความต้านทานของโหลด ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (4.5)$$

นำสมการที่ 4.4 แทนค่าในสมการที่ 4.5 จะได้

$$P_{out} = \frac{\left[\frac{6}{T_s} \cdot \left[\frac{V_{dc}}{n} \cdot \left(\frac{T_s}{4} - \frac{\phi}{2} - \frac{t_d}{2} \right) \right] \right]^2}{R_L} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออกเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเลื่อนเฟส

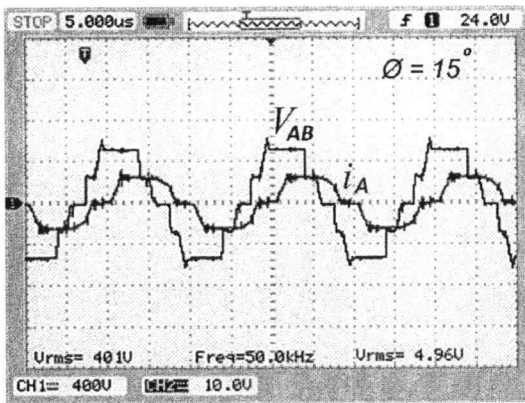
V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	ϕ (degree)
529.6	6.54	3463.58	111.8	28.18	3206.88	15
529.8	6.40	3390.72	111.0	28.10	3119.1	30
530.5	5.97	3167.09	105.2	27.32	2874.06	45
529.8	4.78	2532.44	90.8	25.19	2287.25	60
529.7	3.73	1975.78	76.2	23.00	1752.60	75
530.3	2.78	1474.23	62.1	20.66	1282.99	90

ตารางที่ 4.4 เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้าขาเข้ารวมไปถึงแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเลื่อนเฟสจาก 15 องศาถึง 90 องศาโดยทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 530 โวลต์ พบว่าเมื่อปรับมุมเลื่อนเฟสให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์มีค่าน้อยลง

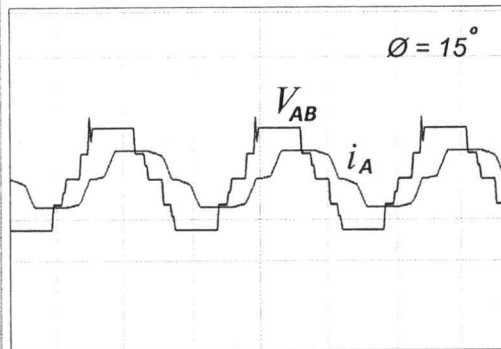
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



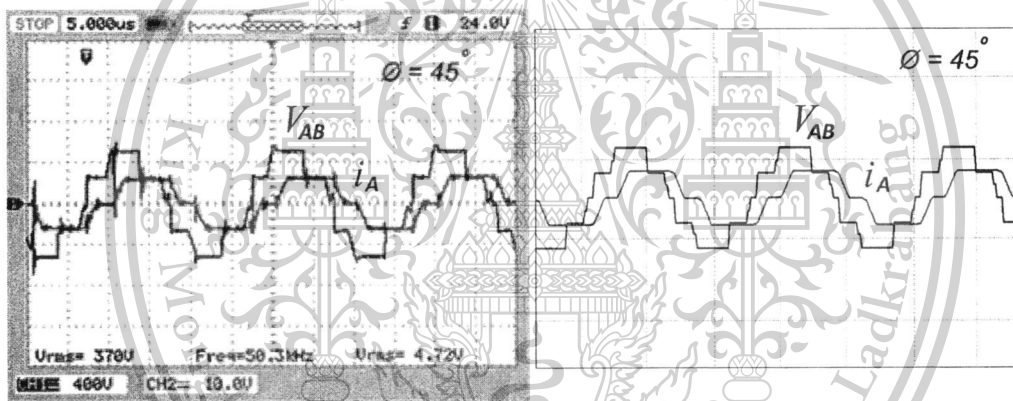
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.32 รูปคลื่นแรงดันไลน์ V_{AB} และกระแสไลน์ i_A ที่มุมเลื่อนเฟส 15 องศา

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



(ก)

(ข)

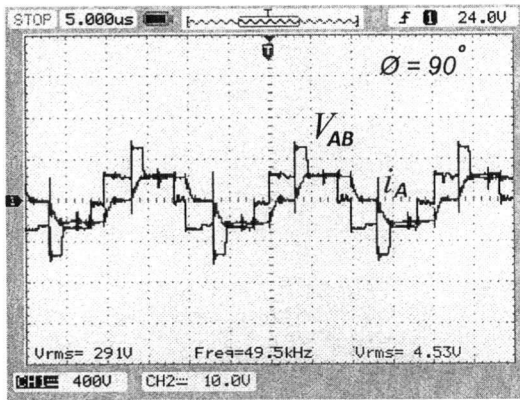
รูปที่ 4.33 รูปคลื่นแรงดันไลน์ V_{AB} และกระแสไลน์ i_A ที่มุมเลื่อนเฟส 45 องศา

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

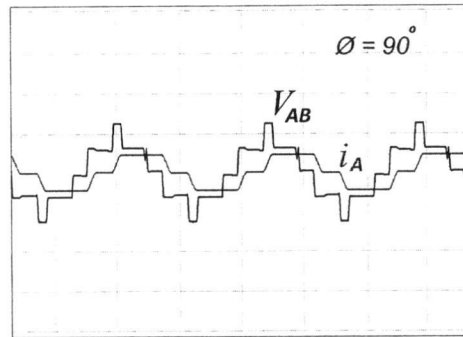
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)

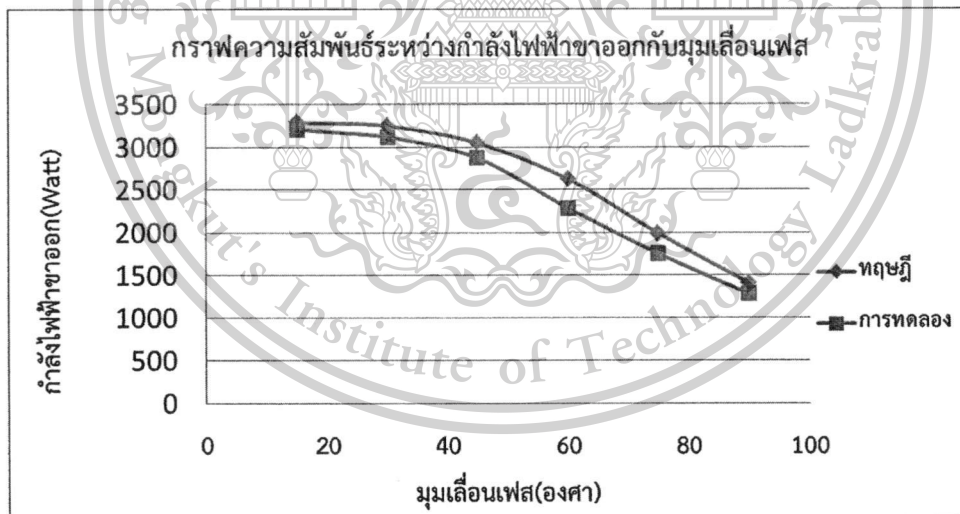


(ข)

รูปที่ 4.34 รูปคลื่นแรงดันโวลต์ V_{AB} และกระแสโวลต์ i_A ที่มุมเลื่อนเฟส 90 องศา

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

จากรูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.34 แสดงรูปคลื่นแรงดันโวลต์ V_{AB} และกระแสโวลต์ i_A ที่มุมเลื่อนเฟส 15, 45 และ 90 องศาตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าเมื่อมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณควบคุมมีค่ามากขึ้น แรงดันโวลต์ V_{AB} และกระแสโวลต์ i_A ก็จะมีค่าน้อยลงสังเกตได้จากเนื้อแรงดันส่วนบนของรูปคลื่น แรงดันโวลต์มีค่าแคบลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มมุมเลื่อนเฟสขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์มีค่าน้อยลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับมุมเลื่อนเฟส

จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเลื่อนเฟสโดยได้ทำการพล็อตผลที่วัดได้จากทางทฤษฎีเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกันคือเมื่อมุมเฟสเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้ามูลง แต่ยังคงพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างโดยเฉพาะในช่วงมุมเลื่อนเฟส 15 องศา ซึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนอาจเกิดมาจากการทดลองจริงที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ ทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้พารามิเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปนอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์แฝงในวงจรด้วย

4.5 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร

การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้น ได้ทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 530 โวลต์และแรงดันไฟฟ้าขาออก 110 โวลต์ที่ความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำการทดสอบโดยเพิ่มโหลดทีละสเต็ปแล้วทำการวัดกระแสขาเข้าและกระแสขาออกของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกจากนั้นนำมาหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของวงจรถัดสมการที่ 4.7

$$\varepsilon = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \cdot i_{out}}{V_{in} \cdot i_{in}} \quad (4.7)$$

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออกกับประสิทธิภาพการทำงานของวงจร

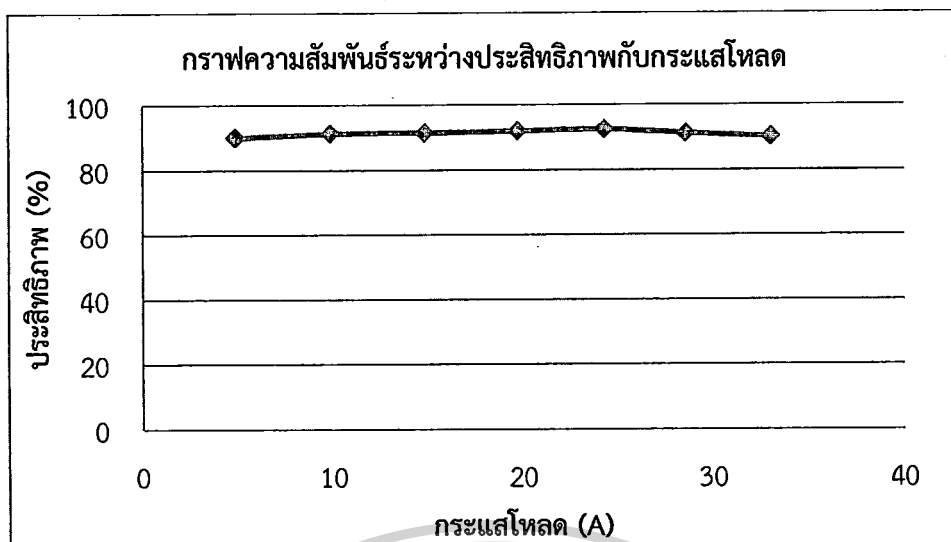
V_{in} (V)	i_{in} (A)	V_{out} (V)	i_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efficiency(%)
529.6	1.12	110.3	4.84	593.15	534.01	90.03
530.4	2.25	110.6	9.87	1193.40	1092.96	91.26
530.5	3.37	109.9	14.83	1787.79	1630.07	91.51
530.5	4.46	109.7	19.73	2366.03	2164.44	91.98
530.8	5.46	110.6	24.31	2898.17	2688.68	92.52
530.6	6.51	110.1	28.59	3454.21	3148.32	91.31
529.9	7.62	110.8	32.99	4037.84	3655.39	90.12

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 เมื่อนำค่าที่ได้มาพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตที่โหลดของวงจรคอนเวอร์เตอร์จะได้กราฟดังรูปที่ 4.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสไหลต

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 4.5 และกราฟประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสไหลตพบว่าวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 92.52 % ที่กำลังไฟฟ้า 2.7 กิโลวัตต์และนอกจากนี้แล้ววงจรมีประสิทธิภาพการทำงานที่พิกัดกำลังงานไฟฟ้า 3.5 กิโลวัตต์แต่พบว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงเหลือเพียง 90.12 % อันเนื่องมาจากที่พิกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงๆ นั้นวงจรจะเกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการนำกระแสของอุปกรณ์และลวดตัวนำภายในวงจร (Conduction losses) อีกสาเหตุหนึ่งมาจากสภาวะอิ่มตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสภายในวงจรทำให้หม้อแปลงไม่สามารถส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6 ผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งต่อช่วงเวลารีเซ็ต

การทดสอบเพื่อการศึกษาผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งที่มีต่อช่วงเวลารีเซ็ต (Reset time) ซึ่งจะทำให้การแบ่งการทดสอบเป็นสองกรณีได้แก่ กรณีที่ใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่งและกรณีที่ไม่มี การใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่ง โดยทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 530 โวลต์

4.6.1 กรณีใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่ง

กรณีที่มีการใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่งนั้นช่วงเวลารีเซ็ตของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะเป็นไปตามสมการ

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{peak}}{V_{dc} + 4 \cdot \left[\left(\frac{i_{peak}}{2 \cdot C_{bc}} \right) \cdot \left(\frac{T}{2} - T_{shift} \right) \right]} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดย L_{lk} คือ ตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล

i_{Peak} คือ ค่ากระแสสูงสุดด้านปฐมภูมิ

C_{bc} คือ ค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง

T คือ คาบเวลาของสัญญาณควบคุม

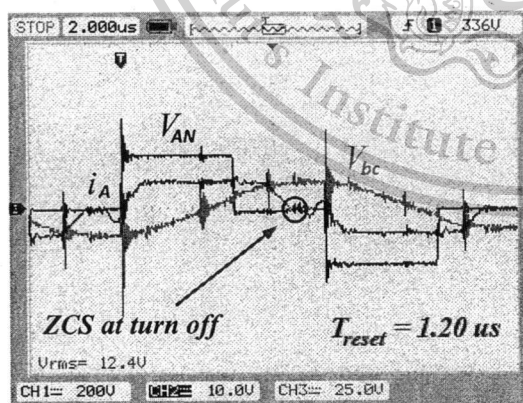
T_{shift} คือ ช่วงเวลาเลื่อนเฟสระหว่างสวิตช์วงนอกและสวิตช์วงใน

V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

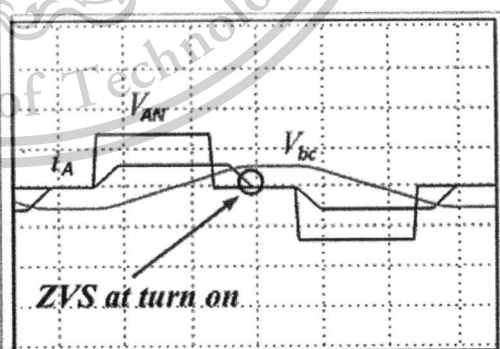
ดังนั้นเพื่อที่จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งที่ส่งผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตจึงได้ทำการวัดค่าเวลารีเซ็ตของกระแสด้านปฐมภูมิเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งจำนวน 4 ค่าเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ (4.8) เมื่อค่า $i_{Peak} = 6.4 \text{ A}$, $T = 20 \mu\text{s}$, $T_{shift} = 2.5 \mu\text{s}$, $V_{dc} = 530 \text{ V}$ และ $L_{lk} = 26.51 \mu\text{H}$ (แสดงการวัดค่าในภาคผนวก จ.) ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ผลของค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งต่อช่วงเวลารีเซ็ต

ค่าบล็อกกิ้งคาปาซิเตอร์	เวลารีเซ็ต(ทดลอง)	เวลารีเซ็ต(ทฤษฎี)
1.5 μF	1.200 μs	1.143 μs
1 μF	1.160 μs	1.084 μs
0.75 μF	1.130 μs	1.031 μs
0.5 μF	0.980 μs	0.940 μs



(ก)



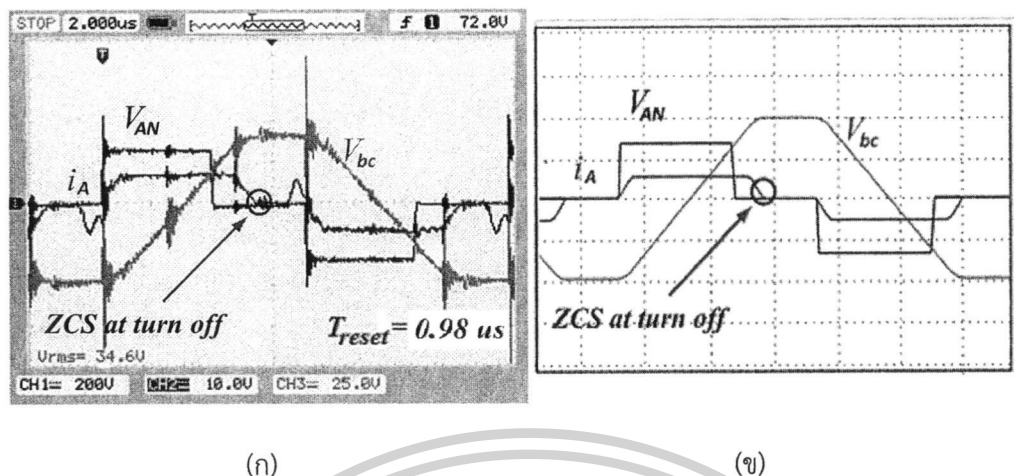
(ข)

รูปที่ 4.37 ช่วงเวลารีเซ็ตเมื่อ $C_{bc} = 1.5 \mu\text{F}$, (200V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

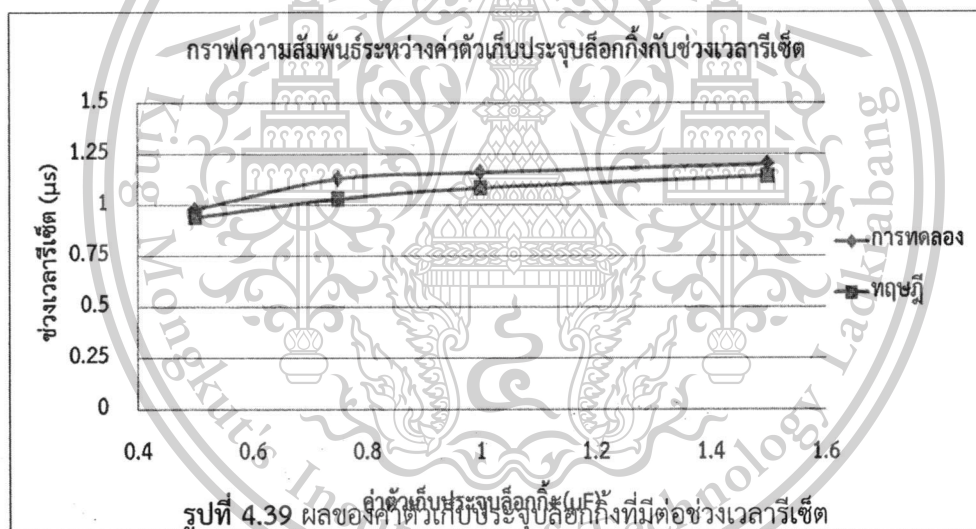
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.38 ช่วงเวลารีเซ็ตเมื่อ $C_{bc} = 0.5 \mu F$, (400V/div, 10A/div) (ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง



รูปที่ 4.39 ผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งที่มีต่อช่วงเวลารีเซ็ต

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อทำการลดค่าของตัวเก็บประจุลือกิ่งลงจะทำให้ช่วงเวลารีเซ็ตมีค่าน้อยลงตามไปด้วย เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งมีค่าน้อยลงแรงดันตกคร่อมของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากทำให้สามารถช่วยดึงกระแสต้านปฏิกิริยาให้ลดลงเป็นศูนย์ได้อย่างรวดเร็ว

4.6.2 กรณีไม่ใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่ง

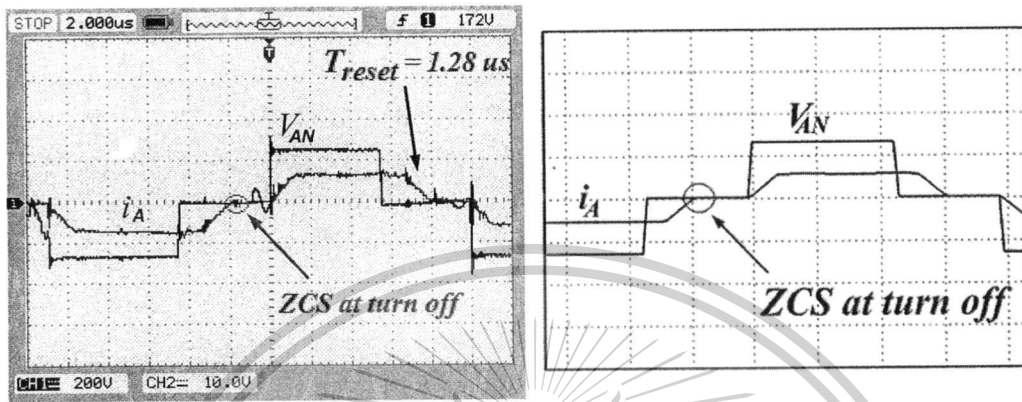
ในกรณีที่ไม่มีกรใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่งนั้น จะไม่มีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกิ่ง ดังนั้นกระแสต้านปฏิกิริยาในเฟสใดๆจะลดลงด้วยผลของการเพิ่มขึ้นของกระแสปฏิกิริยาของอีกเฟสหนึ่ง จากหลักของความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส ซึ่งกระแสในสายนิวทรัลจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นศูนย์ ($I_N=0$) เท่านั้นซึ่งต่างจากในกรณีที่มีการใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่งซึ่งจะมีผลของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกิ่งร่วมอยู่ด้วยดังนั้นช่วงเวลาที่รีเซ็ตในกรณีนี้จึงมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นดังนี้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.40 ช่วงเวลาที่รีเซ็ตเมื่อไม่มีตัวเก็บประจุลือกิ่ง (400V/div, 10A/div)

(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง

จากผลการทดสอบผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งต่อช่วงเวลาที่รีเซ็ตของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ในกรณีที่มีการใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่งนั้น หากค่าของตัวเก็บประจุน้อยค่าลงจะส่งผลทำให้ช่วงเวลาที่รีเซ็ตมีค่าสั้นลงด้วยเนื่องจากเมื่อค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งมีค่าน้อยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ามากจึงส่งผลให้กระแสตัวลงได้อย่างรวดเร็ว แต่ในกรณีที่ไม่มีการใส่ตัวเก็บประจุลือกิ่งนั้นจะทำให้ช่วงเวลาที่รีเซ็ตมีค่ามากที่สุดเนื่องจากไม่มีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลือกิ่งในการช่วยทำให้กระแสมีค่าลดลงนั่นเอง

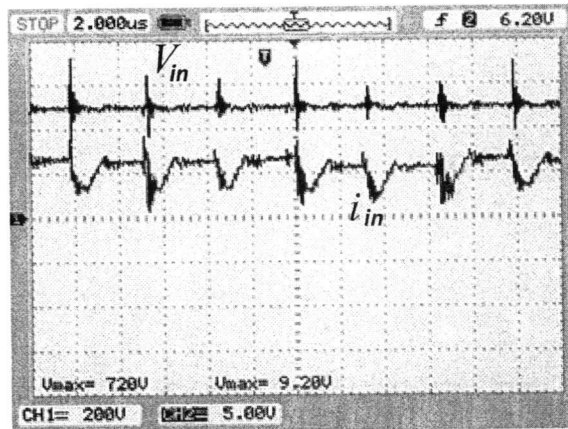
4.7 ภาพรวมการทำงานของวงจร

จากการที่ได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นพบว่า รูปคลื่นแรงดันอินพุตและกระแสอินพุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.41 ซึ่งจะสังเกตเห็นลักษณะของกระแสเฟืองซึ่งเกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟส หลังจากผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามารถดับแล้วจะพบว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะเป็นไปตามรูปที่ 4.42 หลังจากนั้นรูปคลื่นที่ได้จะถูกลดระดับแรงดันลงโดยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสและถูกเรียงให้เป็นกระแสดรตรงอีกครั้งโดยผ่านวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสด้านเอาต์พุต หลังจากนั้นจะถูกกรองด้วยวงจร LC ฟิลเตอร์ทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเป็นไปตามรูปที่ 4.43

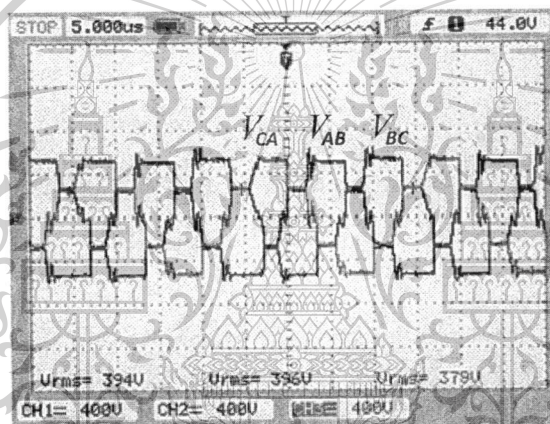
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

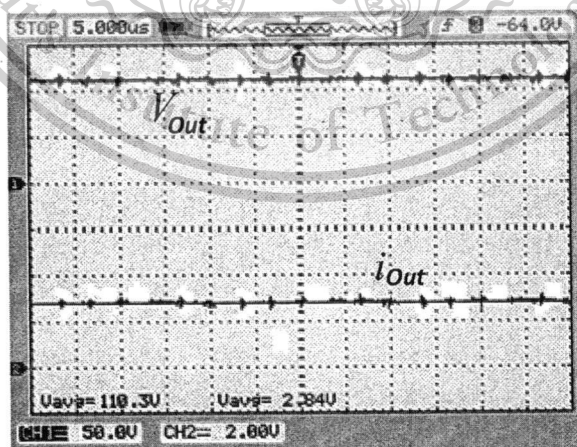
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.41 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุตของวงจร ,(200V/div , 5A/div)



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ,(400V/div , 5A/div)



รูปที่ 4.43 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของวงจร ,(50V/div , 20A/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.8 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานจริงของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ซึ่งการทดสอบนั้นได้แสดงให้เห็นลักษณะการเกิดการทำงานด้วยสภาวะแรงดันเป็นศูนย์ของสวิตช์วงนอกและเกิดการทำงานด้วยสภาวะแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ของสวิตช์วงใน นอกจากนี้ยังได้แสดงการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดรวมทางฮามอนิกส์ของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ จากนั้นได้ทำการทดสอบการปรับกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ดับลิวเอ็มซึ่งพบว่าเมื่อมุมเลื่อนเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าของวงจรมีค่าน้อยลง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบเพื่อประสิทธิภาพการทำงานของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นซึ่งพบว่ามีค่าสูงสุดที่ประมาณ 92.52 % รวมไปถึงพฤติกรรมของค่าตัวเก็บประจุลือกักที่มีผลต่อช่วงเวลารีเซ็ทของกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

พิกัดกำลังไฟฟ้า	3.5 kW
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	530 Vdc
แรงดันไฟฟ้าขาออก	110 Vdc
กระแสไฟฟ้าขาเข้า	7.6 A
กระแสไฟฟ้าขาออก	33 A
ความถี่สวิตช์	50 kHz
ประสิทธิภาพสูงสุด	92.52 %

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นพบว่าสวิตช์ทุกตัวในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะแบบชอฟต์สวิตช์ โดยสวิตช์วงนอกทำงานภายใต้สภาวะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์วงในทำงานภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ (ZVZCS) และวงจรสามารถทำงานได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 92.52 % ที่กำลังไฟฟ้าประมาณ 2.7 กิโลวัตต์ ซึ่งวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้สามารถทำงานได้ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 3.5 กิโลวัตต์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับซึ่งจะมีข้อดีต่ออุปกรณ์สวิตช์คือ ในช่วงของการหยุดนำกระแสสวิตช์จะแบกรับภาระแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียงครั้งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งทำให้เกิดความปลอดภัยต่ออุปกรณ์สวิตช์ รวมทั้งค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน (THD_v) ก็จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองระดับอีกด้วย นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้สวิตช์มอสเฟต (MOSFETs) กับสวิตช์ไอจีบีที (IGBTs) ร่วมกันนั้นเนื่องจากไอจีบีทีนั้นมีค่าความต้านทานภายในค่อนข้างต่ำจึงทำให้ความสูญเสียอันเนื่องมาจากการนำกระแสของไอจีบีทีมีค่าน้อยและโดยทั่วไปแล้วไอจีบีทีนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานกับความถี่สวิตช์ที่สูงระดับ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ เพราะอาจเกิดอันตรายต่อไอจีบีทีได้ แต่เมื่อมีการใช้เทคนิคชอฟต์สวิตช์กับไอจีบีทีแล้วพบว่าสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้เป็นอย่างดีเนื่องจากไม่เกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิตช์ของไอจีบีทีนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เทคนิคซอฟต์แวร์สวิตช์แบบ ZVZCS ที่นำมาใช้นั้นได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (DC Blocking capacitor) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ออกแบบได้ค่อนข้างง่ายและค่าของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งก็ยังมีผลต่อช่วงเวลารีเซ็ต (Reset time) ของกระแสต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสโดยถ้าค่าของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งมีค่าน้อยช่วงเวลารีเซ็ตก็จะมีค่าน้อยเช่นกันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งมีค่ามากกระแสปฏิกิริยาจึงถูกบังคับให้ลดลงเร็ว การที่ช่วงเวลารีเซ็ตมีค่าน้อยนั้นมีข้อดีคือทำให้ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนมีค่าน้อยลงแต่ก็มีข้อเสียตรงที่จะเกิดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งมากทำให้แรงดันต้านปฏิกิริยาของหม้อแปลงลดลงนั่นเอง ดังนั้นการออกแบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นนี้ด้วย นอกจากนี้แล้วยังสามารถปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นโดยใช้วิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งจะช่วยให้สามารถตอบสนองความต้องการกำลังงานไฟฟ้าได้ทั้งกำลังงานไฟฟ้าที่ต่ำและสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้มีมีการใช้ไดโอดบล็อกกิ้งเพื่อช่วยให้โอจีบีทีสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อโอจีบีที แต่มีข้อเสียตรงที่ทำให้เกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการนำกระแสของไดโอด ซึ่งถ้าหากสามารถหาโอจีบีทีที่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูงๆแล้วก็ไม่จำเป็นต้องใส่ไดโอดบล็อกกิ้งก็จะสามารถทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของวงจรได้มากขึ้นไปอีก
2. ในงานวิจัยนี้ยังเป็นเพียงงานวิจัยเริ่มต้นโดยยังไม่ได้มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบและในเรื่องของระบบป้องกันความสูญเสียที่เกิดกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งถ้าหากมีศึกษาวิจัยต่อก็จะทำให้งานวิจัยต่อยอดมีความสมบูรณ์มากขึ้น
3. เนื่องจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้มีจำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมากจึงทำให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เหมาะกับงานที่กำลังไฟฟ้าต่ำๆจนถึงสูงถึงค่าพิกัดเท่านั้น ซึ่งถ้าหากนำวงจรนี้ไปใช้กับงานที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงมากกว่านี้จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงความสูญเสียอันเนื่องมาจากการนำกระแสของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งถ้าหากกระแสในวงจรมีค่าสูงมากๆก็ทำให้มีความสูญเสียมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Canales F., Barbosa P., Burdio J., and Lee F. C., 2000. "A zero voltage switching three-level DC/DC converter." *Proceeding of the IEEE International Telecommunications Energy Conference*. pp. 512-517.
- [2] Jang Y. and Jovanovic M. M., 2005. "A new three-level soft-switched converter." *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 20, no. 1, pp. 75-81.
- [3] Ruan X. and Yan Y., 2001. "A novel zero-voltage and zero-current-switching PWM full-bridge converter using two diodes in series with the lagging leg." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 48, no. 4, pp. 777-785.
- [4] Jangwanitlert A. and Songboonkaew J., 2005. "A comparison of zero-voltage and zero-current switching phase-shifted PWM dc-dc converter." *Proceeding of the IEEE Power Electronics and Drives System*. pp. 95-100.
- [5] Ruan X. and Yan Y., 2000. "Soft-Switching Techniques for PWM Three-Level Converters." *Proceeding of the IEEE Power Electronics and Motion Control Conference*. vol.1, pp. 417 - 423.
- [6] Ziogas P. D., Prasad A. R., and Manias S., 1988. "Analysis and design of a three phase off-line DC/DC converter with high frequency isolation." *Proceeding of the IEEE Industrial Application Society Annual Meeting*. pp. 813-820.
- [7] Oliveira D. S. and Barbi I., 2003. "A three-phase ZVS PWM DC/DC converter with asymmetrical duty cycle for high power applications." *Proceeding of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*. vol. 2, pp. 616-621.
- [8] Ghodke D. V. , Chatterjee K., and Fernandes B. G., 2008. "Three-Phase Three Level, Soft Switched, Phase Shifted PWM DC-DC Converter for High Power Applications." *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 23, no. 3, pp. 1214-1227.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A Novel Three - Phase Three - Level ZVZCS DC-DC Converter Using Phase-Shift PWM Strategy

Thammachat Kongwirat
 Department of Electrical Engineering,
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
 Email: thammachat.k@egat.co.th

Anuwat Jangwanitlert
 Department of Electrical Engineering,
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
 Email: kjanuwat@kmitl.ac.th

Abstract— A 3-Phase 3-Level DC-DC Converter is used for high electric applications. In this paper, all power semiconductor switches are operated under Soft-Switching conditions. The outer-switches are operated within ZVS conditions by using charge transfer through flying capacitors, while the inner-switches are operated within ZVZCS conditions by using leakage inductances and blocking capacitors. Also, this paper describes the operation modes under ZVS and ZCS conditions. In addition, the practical and experimental results are compared. The simulation test is at 5.5 kW rated power and efficiency of 93.40%.

Keywords—Soft-Switching, 3-Phase 3-Level, Blocking capacitors

I. INTRODUCTION

Recently, DC-DC Converter is applied in various industries by using semiconductor devices, such as MOSFET and IGBT to solve problems. To make these devices operate in high electric applications and increase efficiency of the circuits by reduction of loss in switches is provided. This paper presents the Zero- Voltage Zero-Current Switching (ZVZCS) [1], [2]. For example, a half bridge DC-DC Converter [3] and a full bridge DC-DC Converter [4], [5] by using blocking capacitors to achieve ZVZCS condition were presented. According to the example mentioned, notice that it is unable to use the circuit in high electric applications under the load condition requiring high electrical power due to the limitation of voltage and current of semiconductor devices. Thus, this paper presents operation modes and ZVZCS by using blocking capacitors in a Three - Phase Three - Level ZVZCS DC-DC converter [6] using phase-shift PWM (Pulse Width Modulation) strategy.

II. A THREE - PHASE THREE - LEVEL ZVZCS DC-DC CONVERTER

A Three - Phase Three - Level ZVZCS DC-DC converter is the circuit converting direct current electrical power into direct current electricity. It consists of a three - phase inverter with three - branch switches; for example, the first branch comprises 4 switches including upper outer switch S_1 and lower outer switch S_4 using MOSFETs as switching devices, upper inner switch S_2 and lower inner switch S_3 using IGBTs as switching devices as well, 2 clamping diodes D_{c1} and D_{c2} , 2 Rectifiers D_2 and D_3 , 1 flying capacitor C_{fc1} which obtains voltage V_{dc} through capacitor C_{dc1} and C_{dc3} as shown in Fig. 1. In addition, the primary side of transformers consists of blocking capacitors (C_{bc1-3}), leakage inductances (L_{lk1-3}). The secondary side of

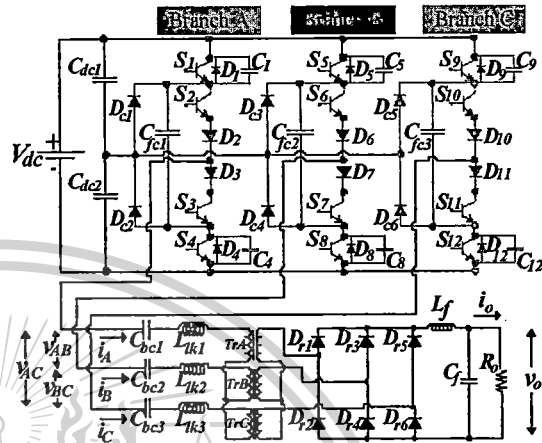


Fig. 1. Three - Phase Three - Level ZVZCS DC-DC Converter. the transformers consists of Rectifiers (D_{r1-3}), LC filters (L_f) and (C_f) by using resistance (R_l) as a load of the output side.

III. THE ANALYSIS OF OPERATION MODES OF THE CIRCUIT UNDER ZVZCS CONDITIONS

The operation modes of Three - Phase Three - Level DC-DC Converter can be divided into 24 modes per cycle as shown in Fig.2. The analysis of ZVZCS conditions in this paper will be presented only the mode to achieve ZVZCS condition in S_1 and S_2 because other switches have similar way to be under ZVZCS condition.

A. The Operation Modes Under ZVS Condition

According to Fig.3., the operation of the circuit under Zero-Voltage Switching (ZVS) condition of switch S_1 can be analyzed by the principle of electric charge transfer from capacitor C_1 of S_1 to capacitor C_4 of S_4 in branch A, as depicted in Fig.3(a), which has to complete transferring before S_1 operate at t_0 . When S_4 is ordered to be OFF at t_{21} , electric charge in C_1 of S_1 will start transferring the charge to C_4 of S_4 through flying capacitor C_{fc1} . The current i_A and the voltage V_{AN} will decrease as shown in Fig 3(d), until i_A reaches 0 as shown in Fig 3(c). Then, S_1 will be ready to conduct the current under ZVS condition. That is to say, charge transfer from C_1 to C_4 must be completed before switch signal of S_1 comes to be ON. Therefore, in mode 1 ($t_0 - t_1$), S_1 can be achieved under ZVS condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรเผยแพร่ทั้งต้นฉบับหรือสิ่งพิมพ์ใดๆโดยเด็ดขาด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

978-1-4799-2993-1/14/\$31.00 ©2014 IEEE

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

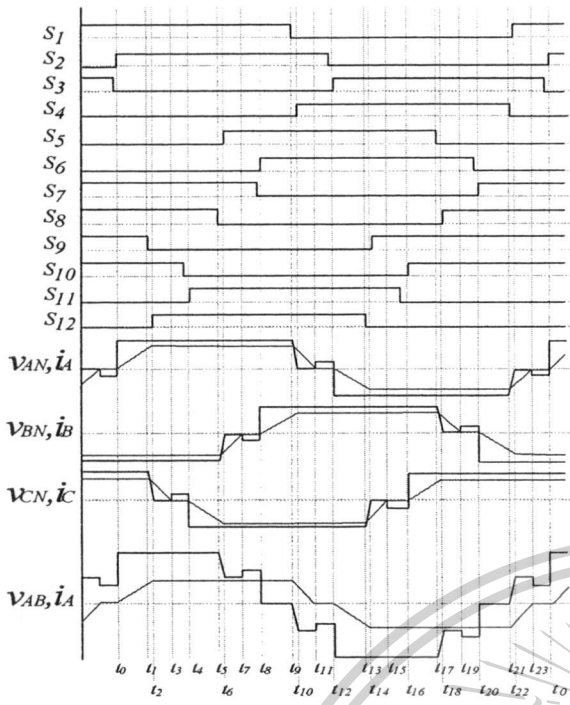
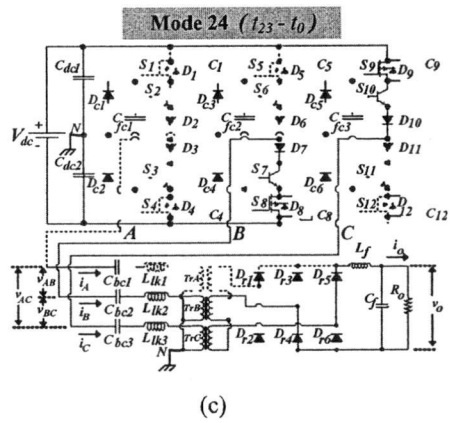
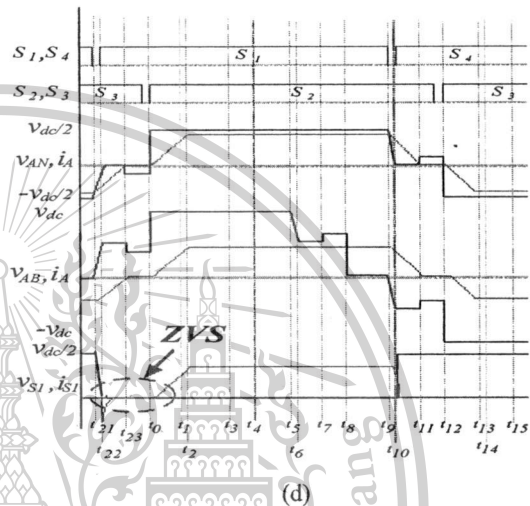


Fig.2. Time diagram of operation modes.

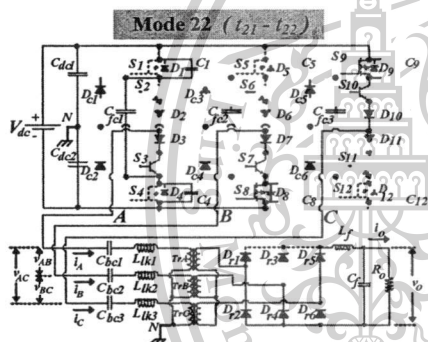


(c)

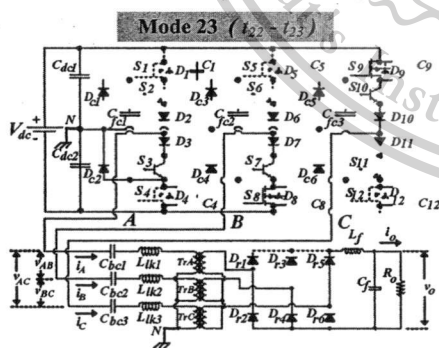


(d)

Fig.3 (a) Mode 22, (b) Mode 23, (c) Mode 24 and (d) Timing diagram of operation mode under ZVS condition in S_1 .



(a)



(b)

B. The Operation Mode of The Circuit Under ZCS Condition

According to Fig.4., the Zero-Current Switching (ZCS) condition in S_2 can be analyzed by starting at mode 10, as shown in Fig.4(a). At the time t_0 , S_1 gets the signal to be OFF. The current i_A and voltage V_{AN} will decrease until V_{AN} reaches to 0 at the time t_{10} . The voltage across the blocking capacitor C_{bc1} will affect the current i_A to decrease linearly by freewheeling through the diode D_{c1} , as depicted in Fig.4 (b) until it reaches to 0 at the time t_{11} . This achieves ZCS condition in S_2 . That is to say, the voltage across the blocking capacitor will affect the current i_A to decrease and reach to be 0 before S_2 gets the signal to be OFF. Moreover, S_2 can be obtained to ZVS condition during the beginning of current conduction because of leakage inductances L_{lk-1} which makes the current cannot flow through the switch immediately after the switch is turned ON [7].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The proposed converter is simulated by MATLAB^R Simulink software and is tested for the operation of the circuit. The results from simulation and experiment are compared each other as shown in Figs. 5, 6, 7 and 8. The results reveal that the waveforms of voltage and current from the experiment are similar to those from the simulation. It indicates that S_1 is obviously operated under Zero-Voltage Switching condition. That means the voltage across S_1 reaches 0 before i_{S_1} current flows the switch, as shown in Fig.5. This prevents losses in circuit during the beginning of current conduction. This process will occur in switches S_1 , S_4 , S_5 , S_8 , S_9 and S_{12} . The switch S_2 is achieved under ZCS condition. That is to say, the current i_{S_2} reaches 0 before voltage across switch S_2 , as shown in Fig.6. This is due to the voltage from blocking capacitors which prevents losses during the end of current conduction. Moreover, there is also ZVS condition occurred at the beginning of current conduction due to leakage inductances. This process can be found at switches S_2 , S_3 , S_6 , S_7 , S_{10} and S_{11} . Fig.7. shows the waveforms of phase voltage V_{AN} and phase current i_A and Fig.8. shows the waveforms of line to line voltage V_{AB} and line current i_A from the test by using 540 V_{dc} input voltage, 110 V_{dc} output voltage, 50 A average output current at the switch frequency of 50 kHz. Found that, the converter has maximum efficiency of 93.40 % (5.5 kW rated power). Moreover, it is able to adjust electric power of the converter by adjusting the angle of phase shift whose results shown in Fig.9. When increasing phase shift angle of PWM signal, average input and output electric power of the converter will decline because when phase shift angle increases, output voltage of Three-Phase converter decline. This causes average output voltage and average output current decline and is the reason why average output electric power declines when phase shift angle increases.

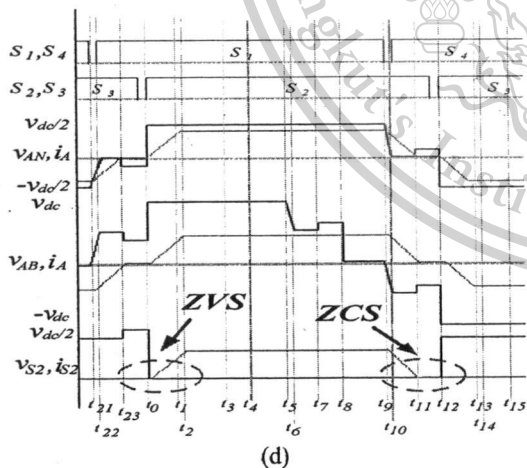
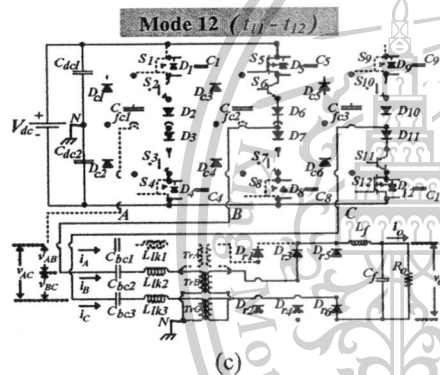
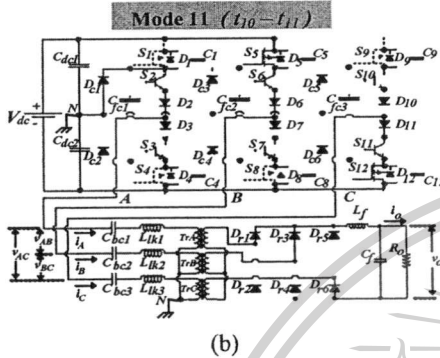
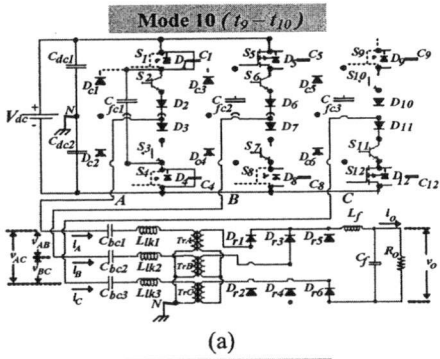


Fig.4 (a) Mode 10, (b) Mode 11, (c) Mode 12 and (d) Timing diagram of the operation mode under ZCS condition in S_2 .

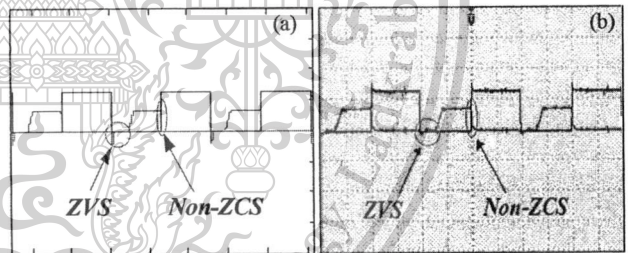


Fig.5 (a) Voltage and current waveform of S_1 (simulation), (b) Voltage and current waveform of S_1 (experiment).

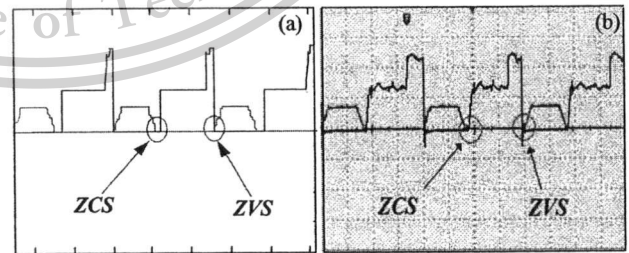


Fig.6 (a) Voltage and current waveform of S_2 (simulation), (b) Voltage and current waveform of S_2 (experiment).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

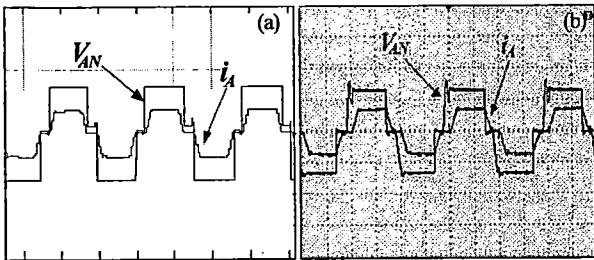


Fig.7 (a) Waveforms voltage phase V_{AN} and current phase i_A (simulation), (b) Waveforms of voltage phase V_{AN} and current phase i_A (experiment).

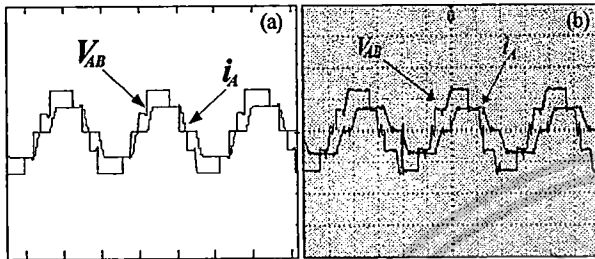


Fig.8 (a) Waveforms of voltage line V_{AB} and current line i_A (experiment), (b) Waveforms of voltage line V_{AB} and current line i_A (simulation).

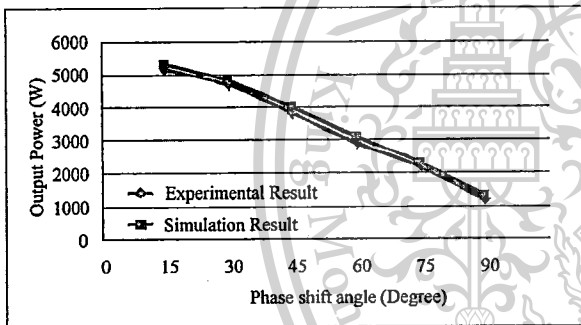


Fig.9. Output power vs. phase shift angle.

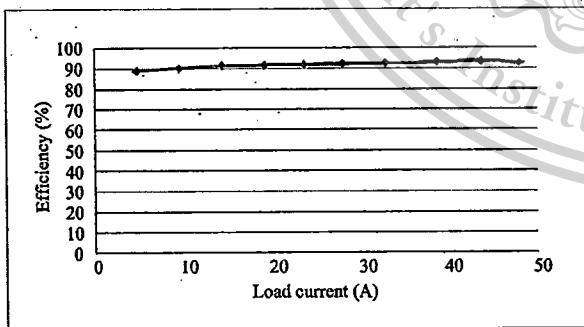


Fig.10. Efficiency versus load current.

Table I: Parameters and devices used in the circuit

AC Input Line Voltage (V_{ac})	380 V
Input voltage (V_{dc})	540 V
Capacitor (DC Link (C_{dc1} and C_{dc2}))	4,700 μF
S_1, S_4, S_5, S_8, S_9 and S_{12}	MOSFETs
$S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$ and S_{11}	IGBTs
Flying Capacitor (C_{fc})	10 μF
Leakage inductance (L_{lk})	4 μF
Blocking Capacitor (C_{bc})	1.5 μF
Transformer Cores, Turn ratio(n)	EE80, 5:1
Capacitor Filter (C_f)	680 μF
Inductance Filter (L_f)	30 μH
Switching Frequency (f)	50 kHz

V. CONCLUSION

A Three-Phase Three-Level DC-DC Converter by using soft-switching used in the circuit is described. The outer-switches are operated under Zero-Voltage Switching condition (ZVS) by using charge transfer through flying capacitors and inner-switches are operated under Zero-Voltage Zero-Current Switching conditions (ZVZCS) by using leakage inductances and voltage across blocking capacitor. The results show losses in the circuit to be reduced and the converter has efficiency of 93.40%. Moreover, it is able to adjust electric power of the converter by using Phase Shifted PWM Strategy. The experimental results are compared to simulation results, which are very similar to each other and simulation results are simulated by program MATLAB[®] Simulink software.

REFERENCE

- [1] W. Xin, X. Yibo, and F. Huajing, "Study on an Improved dc-dc converter based on ZVZCS PWM three-level," Proc. IEEE EBISS, 2010, pp.1-3.
- [2] A.Jangwanitert, K.J.Olejniczak, J.C.Balda "An improved zero-voltage and zero-current-switching PWM full-bridge DC-DC Converter", Proc. IEEE IEECON, 2003, Vol.2, pp.1685 - 1690.
- [3] X. Ruan and Y. Yan, "Soft-Switching Techniques for PWM Three-Level Converters," Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. vol.1, pp. 417 - 423.
- [4] J. X. Carr, B. Rowden and J. C. Balda "A Three-Level Full-Bridge Zero-Voltage Zero-Current Switching Converter with a Simplified Switching Scheme", IEEE Transaction on Power Electronics, no. 2, vol. 24, pp.329-338, February 2009.
- [5] X. Ruan, Z. Chen, and W. Chen, "Zero-voltage-switching PWM hybrid full-bridge three-level converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 2, pp. 395-404, Mar. 2005.
- [6] D. V. Ghodke, K. Chatterjee, and B. G. Fernandes, "Three-phase three-level, soft switched, phase shifted PWM dc-dc converter for high power applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 3, pp. 1214-1227, May 2008.
- [7] X. Ruan and B. Li, "Zero-voltage and zero-current-switching PWM hybrid full-bridge three-level converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 2, pp. 213-220, Feb. 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.