

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 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบซอฟต์แวร์.....	11
2.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิค การสวิตช์แบบZVS.....	12
2.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิค การสวิตช์แบบZVZCS.....	13
2.3.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ Auxilaly 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

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-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์.....	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

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 การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางฮามอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรดีซี-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 ผลของค่าตัวเก็บประจุล้อยกถึงต่อช่วงเวลารีเซ็ต.....	88
4.6.1 กรณีใส่ตัวเก็บประจุล้อยกถึง.....	88
4.6.2 กรณีไม่ใส่ตัวเก็บประจุล้อยกถึง.....	90
4.7 ภาพรวมการทำงานของวงจร.....	91
4.8 สรุป.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94

สารบัญ(ต่อ)

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

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 ลักษณะการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์.....	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 วงรอบฮิสเทอรีซิสสำหรับทำแม่เหล็กถาวรและสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.20 ตัวอย่างพื้นที่ A_c และ A_w สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่างๆ.....	26
2.21 วงจร LC ฟิลเตอร์.....	29
2.22 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มมูเลชันเฟสต่างๆ (ก) มมูเลชันเฟส 0 องศา (ข) มมูเลชันเฟส 60 องศา (ค) มมูเลชันเฟส 90 องศา.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 หลักการทำงานของวงจร.....	34
3.2 วงจรตีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์.....	35
3.3 ไดอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร.....	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 วงจรขับเกต.....	60
3.17 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากวงจรขับสวิตช์ (ก) มุมเล็อนเฟส 30 องศา (ข) มุมเล็อนเฟส 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

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 โวลท์	
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	73
4.15 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส (i_A) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์	
(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 โวลท์	
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	74
4.18 ฮามอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส (i_B) ที่แรงดันอินพุต 530 โวลท์	
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	75
4.19 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{CN}) และกระแสเฟส (i_C) , (200V/div , 10A/div)	
(ก) จากผลการทดลอง (ข) จากการจำลอง.....	75

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

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับมุมเลื่อนเฟส.....	86
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสไหลด.....	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 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ , (400V/div , 5A/div).....	92
4.43 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาท์พุตของวงจร , (50V/div , 20A/div).....	92

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 ค่าความผิดพลาดรวมทางฮามอนิกส์ของแรงดันเฟสและกระแสเฟส.....	77
4.3 ค่าความผิดพลาดรวมทางฮามอนิกส์ของแรงดันไลน์และกระแสไลน์.....	84
4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออก เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเลื่อนเฟส.....	86
4.5 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออก กับประสิทธิภาพการทำงานของวงจร.....	87
4.6 ผลของค่าตัวเก็บประจุลือกิ่งต่อช่วงเวลารีเซ็ต.....	89