

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต	6
2.1.1 หลักการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต	6
2.1.2 โหมดการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต	10
2.1.3 ผลของค่าความเหนี่ยวนำรั่วในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	12
2.1.4 กระบวนการเกิดครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	14
2.2. แบบจำลองการวิเคราะห์พฤติกรรมครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต	17
2.2.1 แบบจำลองการวิเคราะห์ครอสเรกกูเลชันชนิด 2 เอาต์พุต	17
2.2.2 แบบจำลอง Cantilever	24
2.2.3 แบบจำลอง N-port	26
2.2.4 การแปลงค่าระหว่างแบบจำลอง Cantilever และแบบจำลอง N-port	28
2.2.5 แบบจำลองครอสเรกกูเลชันชนิดหลายเอาต์พุต	30
2.3 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	37
2.3.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกน (Core loss)	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง (Copper loss)	39
2.3.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)	40
2.3.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity effect)	41
2.3.5 ค่าความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance)	42
3. การออกแบบวงจรและหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	43
3.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	44
3.1.1 ภาคเรกติไฟล์และฟิลเตอร์	45
3.1.2 ภาคอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	46
3.1.3 ภาคชุดควบคุมวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	47
3.2 ขั้นตอนการออกแบบชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	48
3.2.1 การเลือกขนาดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	48
3.2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากแกนEI,ETD และ แกนPot	52
3.3 ขั้นตอนการออกแบบวิธีการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	56
3.3.1 การออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	58
3.3.2 การออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	60
3.3.3 การออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave	63
4. การออกแบบการทดลอง	66
4.1 การทดสอบชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต่อการเกิดครอสเรกกูเลชัน	66
4.1.1 การทดสอบวัดค่าอัตราส่วนชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	67
4.1.2 วิธีการวัดความเหนี่ยวนำรั่วของชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	71
4.1.3 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้า ความถี่สูง	73
4.1.4 ผลการจำลองโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง N-port	76
4.1.5 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเรชันของแกนหม้อแปลงไฟฟ้า ความถี่สูงในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	80
4.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	83

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	83
4.2.2 ผลการจำลองโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	87
4.2.3 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	91
4.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	95
4.3.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	95
4.3.2 ผลการจำลองโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	100
4.3.3 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	105
4.4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave	109
4.4.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave	109
4.4.2 ผลการจำลองโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave	114
4.4.3 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	118
5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	122
5.1 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองครอสเรกกูเลชันจากแกนหม้อแปลงแต่ละชนิด	122
5.1.1 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างของชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	122
5.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าครอสเรกกูเลชันชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	124
5.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	126

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพัน แบบ Stack	126
5.2.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพัน แบบ Sandwich	129
5.2.3 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากการพัน แบบ Interleave	133
5.3 แนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงครอสเรกกูเลชัน ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิดหลายเอาต์พุต	135
5.3.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงครอสเรกกูเลชัน ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	135
5.3.2 ผลการเปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อ ปรับปรุงครอสเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	138
6. บทสรุป	143
6.1 บทสรุป	143
6.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา	144
6.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป	144
บรรณานุกรม	145
ภาคผนวก	146
ก คุณสมบัติของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	147
ข บทความทางวิชาการ	160
ประวัติผู้เขียน	171

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2-1	ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ผิวตัวนำที่ระดับความถี่ต่างๆ	40
3-1	คุณสมบัติของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุท	44
3-2	การเปรียบเทียบคุณลักษณะ โครงสร้างแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด EI	48
3-3	การเปรียบเทียบคุณลักษณะ โครงสร้างแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด ETD	48
3-4	การเปรียบเทียบคุณลักษณะ โครงสร้างแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด Pot	49
4-1	ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI40	73
4-2	ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน ETD39	74
4-3	ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน Pot36	75
4-4	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI 40 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	80
4-5	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน ETD 39 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	80
4-6	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน Pot36วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	81
4-7	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack1	83
4-8	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack2	84
4-9	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack3	85
4-10	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4	86
4-11	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack1 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	91
4-12	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack2 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	91
4-13	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack3 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	92
4-14	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	92
4-15	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich1	95
4-16	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich2	96
4-17	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich3	97
4-18	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich4	98
4-19	ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich 5	99
4-20	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich1 ในวงจรฟลายแบค คอนเวอร์เตอร์	105

## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4-21 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich2 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	105
4-22 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich 3 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	106
4-23 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich 4 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	106
4-24 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich 5ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	110
4-25 ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1	111
4-26 ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave2	111
4-27 ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave3	112
4-28 ค่าการทดสอบพารามิเตอร์จากออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave4	113
4-29 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	118
4-30 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave2 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	118
4-31 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave3 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	119
4-32 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave 4 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	119
5-1 คุณสมบัติของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	122
5-2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของชนิดแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	123
5-3 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	127
5-4 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	130
5-5 ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave	134
5-6 ค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในการปรับปรุงครอสเรกกูเลชัน	138
5-7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	141

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1-1 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	1
2-1 วงจรบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์	6
2-2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	8
2-3 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เมื่อมอสเฟต $Q_1$ นำกระแส	8
2-4 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เมื่อมอสเฟต $Q_1$ ไม่นำกระแส	9
2-5 คลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	10
2-6 คลื่นสัญญาณกระแสในสถานะโหมดการทำงาน	11
2-7 แบบจำลองหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวดและค่าความเหนี่ยวนำรั่ว	12
2-8 วงจรการวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำรั่ว	13
2-9 คลื่นกระแส และแรงดันเอาต์พุตของมอสเฟต	13
2-10 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุตในทางปฏิบัติ	14
2-11 กระแสทางขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ	15
2-12 แบบจำลองวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 2 เอาต์พุต	17
2-13 คลื่นแรงดันในวงจรสมมูล และคลื่นกระแส ใน 1 คาบเวลา	18
2-14 วงจรสมมูลในช่วงเวลา $T_1$	19
2-15 วงจรสมมูลในช่วงเวลา $T_2$	20
2-16 วงจรสมมูลในช่วงเวลา $T_3$	21
2-17 แบบจำลองหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวดแบบ T แบบ Pi และแบบ Cantilever	23
2-18 แบบจำลอง Cantilever ของหม้อแปลงจำนวน $n$ ขดลวด	24
2-19 การวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่ว $L_{24}$ ในหม้อแปลงความถี่สูง	25
2-20 แบบจำลองแบบ Cantilever และแบบจำลองแบบ N-port	26
2-21 วงจรสมมูลของแบบจำลอง N-port ชนิด 2 ขดลวด	27
2-22 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุตและวงจรสับเบอร์	30
2-23 สถานะการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	33
2-24 วงรอบฮีสเตอร์รีซิส	37
2-25 ผลของกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่ผิวตัวนำทองแดง	39
2-26 กระแสวนภายในตัวนำทองแดงเนื่องจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง	40

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-27 ผลของปรากฏการณ์ความถี่เคียงต่อความหนาแน่นของกระแส	41
2-28 เส้นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กไว้	42
3-1 บล็อกการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	43
3-2 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาท์พุทและวงจรควบคุม	47
3-3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงชุดควบคุม	47
3-4 คุณลักษณะของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด EI40	50
3-5 คุณลักษณะของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด ETD39	50
3-6 คุณลักษณะของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิด Pot 36	51
3-7 โครงสร้างแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง EI40, ETD39 และแบบ Pot36	51
3-8 การวางขดลวดในแกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง EI40, ETD39 และ Pot36	54
3-9 ตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง EI40, ETD39 และแบบ Pot36	55
3-10 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI40, ETD39 และ Pot 36 ที่ใช้ในการทดสอบ	55
3-11 แกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิดETD49 ที่ใช้การวางตำแหน่งขดลวด	57
3-12 แบบการพันขดลวดแบบ Stack แบบที่ 1	57
3-13 แบบการพันขดลวดแบบ Stack แบบที่ 2	58
3-14 แบบการพันขดลวดแบบ Stack แบบที่ 3	58
3-15 แบบการพันขดลวดแบบ Stack แบบที่ 4	59
3-16 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack ที่ใช้ในการทดสอบ	59
3-17 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 1	60
3-18 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 2	60
3-19 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 3	61
3-20 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 4	61
3-21 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 5	62
3-22 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich ที่ใช้ในการทดสอบ	62
3-23 แบบการพันขดลวดแบบ Interleave แบบที่ 1	63
3-24 แบบการพันขดลวดแบบ Interleave แบบที่ 2	63
3-25 แบบการพันขดลวดแบบ Interleave แบบที่ 3	64



## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-26   แบบการพันขดลวดแบบ Interleave แบบที่ 4	64
3-27   หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave ที่ใช้ในการทดสอบ	65
4-1    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_2$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI 40	67
4-2    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_3$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI 40	67
4-3    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_4$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI 40	68
4-4    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_2$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน ETD 39	68
4-5    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_3$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน ETD39	69
4-6    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_4$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน ETD39	69
4-7    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_2$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน Pot 36	70
4-8    สัญญาณแรงดัน $N_1$ และ $N_3$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน Pot36	70
4-9    คลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสจากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรั่ว $I_{12}$	71
4-10   คลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสจากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรั่ว $I_{13}$	71
4-11   คลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสจากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรั่ว $I_{23}$	72
4-12   คลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสจากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรั่ว $I_{34}$	72
4-13   แบบจำลอง Extended Cantilever ในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI40	73
4-14   แบบจำลอง Extended Cantilever ในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน ETD39	74
4-15   แบบจำลอง Extended Cantilever ในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน ETD39	75
4-16   แบบจำลอง N-port ในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI40	76
4-17   แบบจำลอง N-port ในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน ETD39	77
4-18   แบบจำลอง N-port ในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน Pot36	77
4-19   แบบจำลองวงจร N-port ชนิด 4 ขดลวดในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSpice	78
4-20   คลื่นสัญญาณแรงดัน $V_{ds}$ และกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงแกน EI40	78
4-21   คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน ETD39	79
4-22   คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน Pot36	79
4-23   คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน EI40	81
4-24   คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแกน ETD39	82
4-25   คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกน Pot36	82

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-26 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack1	83
4-27 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack2	84
4-28 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack3	85
4-29 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4	86
4-30 แบบจำลอง N-port หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack1	87
4-31 แบบจำลอง N-port หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack2	87
4-32 แบบจำลอง N-port หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack3	88
4-33 แบบจำลอง N-port หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4	88
4-34 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Stack1	89
4-35 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Stack2	89
4-36 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Stack3	90
4-37 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Stack4	90
4-38 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack1	91
4-39 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack2	91
4-40 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack3	94
4-41 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4	94
4-42 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich1	95
4-43 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich2	96
4-44 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich3	97
4-45 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich4	98
4-46 แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich5	99
4-47 แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich1	100
4-48 แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich2	100
4-49 แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich3	101
4-50 แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich4	101
4-51 แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich5	102
4-52 คลื่นสัญญาณกระแสดำที่พุดจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Sandwich1	102

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4-53	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Sandwich2	103
4-54	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Sandwich3	103
4-55	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Sandwich4	104
4-56	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Sandwich 5	104
4-57	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich1	107
4-58	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich2	107
4-59	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich3	108
4-60	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich4	108
4-61	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich5	109
4-62	แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1	110
4-63	แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave2	111
4-64	แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave3	112
4-65	แบบจำลอง Extended Cantilever หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave4	113
4-66	แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1	114
4-67	แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave2	114
4-68	แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave3	115
4-69	แบบจำลอง N-port ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave4	115
4-70	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Interleave1	116
4-71	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Interleave2	116
4-72	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Interleave3	117
4-73	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตจากโปรแกรมการวิเคราะห์ Interleave4	117
4-74	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave1	120
4-75	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave2	120
4-76	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave3	121
4-77	คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave4	121
5-1	แกนหม้อแปลงความถี่สูงแกน EI40, ETD39 และ Pot36	122
5-2	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงครอสเรกทูล์แกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	123

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-3 การเปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	126
5-4 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันจากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack	127
5-5 การเปรียบเทียบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	129
5-6 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich	131
5-7 การเปรียบเทียบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave	133
5-8 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แบบ Interleave	134
5-9 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 6	136
5-10 แบบการพันขดลวดแบบ Sandwich แบบที่ 7	137
5-11 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich6 และ Sandwich7 เพื่อปรับปรุง ครอสเรกกูเลชันในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	137
5-12 ผลการทดสอบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave6 และ Interleave7 ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ชนิด 3 เอาต์พุต	139
5-13 ผลการทดสอบค่าครอสเรกกูเลชันจากการออกแบบการพันหม้อแปลง ความถี่สูงในแต่ละแบบ	140
5-14 คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Stack4	141
5-15 คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Sandwich7	142
5-16 คลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบ Interleave4	142