

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เทคนิคการออกแบบสำหรับวงจรกรองความถี่ใน โหมดผลรวมและโหมดผลต่าง
นักศึกษา	นายปฏิวัติ บุญมา
รหัสนักศึกษา	45061008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเกี่ยวกับ การวิเคราะห์เทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ปริมาตรเท่ากับขนาดของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมเพียงตัวเดียวเท่านั้น สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโหมดผลรวม และโหมดผลต่างมี สาม รูปแบบ ได้แก่ การพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป ในที่นี้เรียกว่าการพันแบบ CM แบบที่สอง คือ การพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM ในที่นี้เรียกว่าการพันแบบ ICM และแบบที่สาม คือ การพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM ในที่นี้เรียกว่าการพันแบบ PICM โดยจะทำการวิเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง และนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งอธิบายการเกิดและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยแยกเป็นโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง และตัวเหนี่ยวนำแบบใหม่ที่เสนอสามารถนำไปใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีผลการจำลองและทดลองยืนยันความสอดคล้องกัน

Thesis Title	The Analysis of Integrated Inductor Technique for Common Mode and Differential Mode of EMI Filter Design
Student	Mr. Patiwat Boonma
Student ID.	45061008
Degree	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This thesis presents the analysis technique to integrate the common-mode inductor with the differential-mode inductor. The volume of proposed integrated inductor is designed to achieve the equaled volume of that common mode inductor. There are three types of EMI filter based on winding patterns. Winding technique are the conventional common-mode choke (CM), integrated common-mode choke (ICM) and proposed integrated common-mode choke (PICM). The electromagnetic interference of those differential-mode inductor and common-mode inductor are analyzed. The proposed integrated inductor can be applied to the new EMI filter. The result can be proved by both simulation and experiment.

คำสำคัญของวิทยานิพนธ์

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง

การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป

การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM

การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM

Keywords

electromagnetic interference filter

common mode choke

differential mode choke

conventional common mode choke

integrated common mode choke

proposed integrated common mode choke

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี จากคำแนะนำ จาก รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ทั้งโอกาสและความรู้รวมถึงประสบการณ์ในหลายๆ ด้าน ที่ได้จากอาจารย์รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ที่มีคุณค่าทั้งในด้านวิชาการและในด้านการดำเนินชีวิต สำหรับอาจารย์ที่ปรึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ และคุณชนเทพ มณีนพผลที่คอยให้คำแนะนำ และแนวความคิดที่เป็นประโยชน์เสมอมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทุกๆ คน ที่เคยร่วมทุกข์ร่วมสุขกันมา ทำให้ผมได้เห็นซึ่งความสามัคคีเมื่อยามที่ร่วมมือกันทำงานที่หนักให้สำเร็จด้วยดี

ขอบคุณทุกท่านที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือ ซึ่งไม่อาจกล่าวถึงได้หมดในที่นี้

สุดท้ายนี้ผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณยิ่ง ผู้ให้กำลังใจ สนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ความเชื่อใจและเข้าใจ รวมถึงทุกๆ คนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและเข้าใจผมตลอดมา

ปฐวิติ บุญมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
คำสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 เพราะเหตุใดปัญหานี้ถึงน่าสนใจ.....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.2 รูปแบบการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	11
2.3 มาตรฐานและการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	13
2.3.1 ตัวอย่างมาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.3.2 วิธีการวัดและทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	15
2.3.3 การจัดวางอุปกรณ์ (ตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 ข้อ 8.4).....	20
2.4 การวัดและเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
2.5 สรุปภาพรวมทฤษฎีพื้นฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
บทที่ 3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
3.1 หลักการทั่วไปของเทคนิคต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.....	25
3.1.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
3.1.2 กระแสรั่วไหลลงดิน.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 การวัดค่าเหนี่ยวนำและการวัดค่าเหนี่ยวนำรั่วไหล.....	28
3.1.4 วงจรกรองความถี่แบบทั่วไป.....	29
3.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	37
3.3 สรุปภาพรวมวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	43
 บทที่ 4 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	44
4.1 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	44
4.2 การคำนวณค่าการออกแบบและส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	70
4.2.1 การคำนวณค่าการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	70
4.2.2 การคำนวณหาจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง.....	79
4.2.3 ตรวจสอบการทำงานของแกนแม่เหล็กที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง.....	80
4.3 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง.....	82
4.4 สรุปการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	86
 บทที่ 5 การทดลอง.....	88
5.1 วัตถุประสงค์.....	88
5.2 ขอบเขตของการทดลอง.....	88
5.3 รูปแบบที่ทำการทดลอง.....	89
5.3.1 การจำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	89
5.3.2 รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง.....	91
5.3.3 โครงสร้างการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง.....	93
5.3.4 การทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	93
5.3.5 เงื่อนไขในการทดสอบ.....	94
 บทที่ 6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	97
6.1 การทดลองด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1.1 ผลการทดสอบวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของ วงจรชุดคอนเวอร์เตอร์.....	98
6.1.2 ผลการทดสอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง ทั้ง 3 แบบการพัน.....	99
6.1.3 ผลการจำลองและทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้ง 3 แบบ.....	102
6.1.3.1 การทดสอบที่ 1 ที่จุดเปลี่ยนความถี่ (cut-off frequency) เดียวกัน.....	102
6.1.3.2 การทดสอบที่ 2: กำหนดค่ากระแสรั่วไหลสูงสุด ($C_Y = 3300 \text{ pF}$).....	117
6.1.3.3 การทดสอบที่ 3: กำหนดค่า C_X ให้มีค่าเท่ากับการออกแบบ ($C_X = 0.68 \text{ }\mu\text{F}$).....	131
6.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	143
6.2.1 การเปรียบเทียบรูปแบบการพันและโครงสร้างของ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	143
6.2.2 การเปรียบเทียบอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจร กรองสัญญาณรบกวนขณะใส่กับไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน.....	144
6.3 สรุปผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	145
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	146
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	146
7.1.1 สรุปผลการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง.....	146
7.1.2 สรุปผลในเงื่อนไขการทดสอบ.....	147
7.1.2.1 ที่จุดเปลี่ยนความถี่ (cut-off frequency) เดียวกัน.....	147
7.1.2.2 กำหนดค่ากระแสรั่วไหลสูงสุด ($C_Y = 3300 \text{ pF}$).....	148
7.1.2.3 กำหนดค่า C_X ให้มีค่าเท่ากับการออกแบบ ($C_X = 0.68 \text{ }\mu\text{F}$).....	148
7.1.3 การสรุปงานวิจัยในด้านอื่นๆ.....	149
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	150
บรรณานุกรม.....	152

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	คุณลักษณะของแกนแม่เหล็กความถี่สูงและตัวเก็บประจุและการ ตรวจสอบการอิมตัวของแกนแม่เหล็ก	154
ภาคผนวก ข	ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	167

ประวัติผู้เขียน	218
-----------------------	-----

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 พิกัดของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
1.2 พิกัดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
3.1 จีตจำกัดกระแสรั่วไหลลงดินสำหรับมาตรฐานความปลอดภัยของอุปกรณ์.....	28
4.1 พิกัดของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Cúk converter).....	49
4.2 สรุปการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	87
5.1 สรุปค่าส่วนประกอบต่างๆของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	92
5.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างการพันตัวเหนี่ยวนำ ทั้ง 3 แบบการพัน.....	93
6.1 ผลการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดต่างๆ ในเงื่อนไขการทดสอบที่ 1...	113
6.2 ผลการจำลองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดต่างๆในเงื่อนไขการทดสอบที่ 1...	115
6.3 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดเปลี่ยนความถี่ทั้ง 3 แบบ.....	116
6.4 เปรียบเทียบผลการทำสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ.....	116
6.5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบการพันต่างๆ ในเงื่อนไขการทดสอบที่ 2.....	128
6.4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบการพันต่างๆ.....	140
7.1 โครงสร้างการพันและวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	147
7.2 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของการพันทั้ง 3 แบบ.....	149

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การรวมตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่าง.....	3
1.2 การรวมตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างแบบใหม่.....	3
1.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	8
2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.3 เส้นทางของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	11
2.4 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัดและย่านความถี่ของมาตรฐานที่มาตามสายตัวนำ.....	14
2.5 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ LISN.....	15
2.6 วงจรของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR.....	16
2.7 อิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR.....	16
2.8 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้โพรบกระแส.....	16
2.9 การวัดโดยใช้โพรบกระแส.....	17
2.10 การวัดกระแสไฟฟ้าโหมคต่างๆ โดยใช้โพรบกระแส.....	18
2.11 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบนโต๊ะ.....	21
2.12 การต่อวงจร เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	22
2.13 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	23
3.1 วงจรไฟฟ้าขณะที่ไม่ได้และไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน.....	26
3.2 การวัดค่าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ.....	28
3.3 การวัดค่าเหนี่ยวนำรีวไหลที่ขดลวดปฐมภูมิ.....	29
3.4 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ.....	30
3.5 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ.....	32
3.6 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบ LC.....	34
3.7 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบ π	35
3.8 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่แบบ T.....	36
3.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	37
3.10 ทิศทางกระแสโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า.....	39
3.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมคผลร่วม.....	39
3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมคผลต่าง.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง.....	40
3.14 คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	41
3.15 เทคนิคการพันขดลวดทั้งสี่แบบ.....	42
3.16 ตัวเก็บประจุ C_Y ที่ใช้จริง.....	43
3.17 ตัวเก็บประจุ C_X	43
4.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ.....	45
4.2 แบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM.....	46
4.3 แบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM.....	47
4.4 ขั้นตอนการออกแบบ.....	48
4.5 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์.....	49
4.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ที่จุดต่างๆ.....	51
4.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป.....	52
4.8 วงจรสมมูลย์ของคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนที่โหมดต่างๆ.....	53
4.9 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	56
4.10 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	57
4.11 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM.....	58
4.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM.....	59
4.13 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	61
4.14 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	62
4.15 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง แบบ PICM.....	63
4.16 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	74
4.17 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	66
4.18 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	67
4.19 ตัวอย่างการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่.....	68
4.20 การออกแบบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	70
4.21 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ได้จากการวัด.....	71
4.22 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างที่ได้จากการวัด.....	71
4.23 การลดทอนสัญญาณรบกวน และค่าจุดเปลี่ยนความถี่โหมดผลรวม $f_{r,CM}$	72
4.24 การลดทอนสัญญาณรบกวน และค่าจุดเปลี่ยนความถี่โหมดผลต่าง $f_{r,DM}$	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป.....
4.26	ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM.....
4.27	ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM.....
4.28	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ที่มีการพันแบบ CM.....
4.29	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ที่มีการพันแบบ ICM.....
4.30	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ที่มีการพันแบบ PICM.....
5.1	วิธีการจำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....
5.2	รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ CM.....
5.3	รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM.....
5.4	รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM.....
5.5	การติดตั้งเพื่อทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....
5.6	เงื่อนไขในการทดสอบ.....
5.7	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดสอบ.....
6.1	เส้นขีดจำกัดมาตรฐานของ CISPR 22 Class B.....
6.2	สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม ขณะที่ไม่ได้วงจรกรอง.....
6.3	สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ขณะที่ไม่ได้วงจรกรอง.....
6.4	สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม ขณะที่ไม่ได้วงจรกรอง.....
6.5	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและ โหมดผลต่างทั้ง 3 แบบที่ได้จากการจำลองการทำงาน.....
6.6	เปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนของ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างทั้ง 3 แบบ.....
6.7	คุณสมบัติของแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์.....
6.8	คุณสมบัติของแกนเหล็กชนิดผงโลหะ.....
6.9	จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ CM.....
6.10	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมสำหรับการพันแบบ CM.....
6.11	อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ CM.....	103
6.13 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ ICM.....	105
6.14 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ ICM.....	105
6.15 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	105
6.16 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ ICM.....	106
6.17 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ PICM.....	107
6.18 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ PICM.....	107
6.19 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	107
6.20 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ PICM.....	117
6.21 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมของการพันทั้ง 3 แบบ.....	109
6.22 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	110
6.23 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างของการพันทั้ง 3 แบบ.....	111
6.24 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	111
6.25 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมของการพันทั้ง 3 แบบ.....	112
6.26 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	112
6.27 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบการจำลอง.....	113
6.28 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมขณะมีวงจกรองกับไม่มีวงจกรอง.....	114
6.29 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างขณะมีวงจกรองกับไม่มีวงจกรอง.....	114
6.30 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมขณะมีวงจกรองกับไม่มีวงจกรอง.....	114
6.31 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ CM.....	118
6.32 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	118
6.33 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ CM.....	119
6.34 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ ICM.....	120
6.35 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	120
6.36 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ ICM.....	121
6.37 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ PICM.....	122
6.38 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	122
6.39 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ PICM.....	123
6.40 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมของการพันทั้ง 3 แบบ.....	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.41 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม.....	125
6.42 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างของการพันทั้ง 3 แบบ.....	125
6.43 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	126
6.44 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมของการพันทั้ง 3 แบบ.....	127
6.45 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	127
6.46 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมของการจำลองทั้ง 3 แบบ.....	128
6.47 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมขณะมีวงจรกรองกับไม่มีวงจรกรอง.....	129
6.48 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างขณะมีวงจรกรองกับไม่มีวงจรกรอง.....	129
6.49 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมขณะมีวงจรกรองกับไม่มีวงจรกรอง.....	129
6.50 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ CM.....	131
6.51 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	131
6.52 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ CM.....	132
6.53 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ ICM.....	133
6.54 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	133
6.55 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ ICM.....	134
6.56 จำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่มีการพันแบบ PICM.....	135
6.57 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ความถี่ต่างๆ.....	135
6.58 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่มีการพันแบบ ICM.....	136
6.59 สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมของการพันทั้ง 3 แบบ.....	137
6.60 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม.....	137
6.61 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างของการพันทั้ง 3 แบบ.....	138
6.62 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง.....	138
6.63 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมของการพันทั้ง 3 แบบ.....	139
6.64 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม.....	139
6.65 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมทั้ง 3 แบบการจำลอง.....	140
6.66 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมขณะมีวงจรกรองกับไม่มีวงจรกรอง.....	141
6.67 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างขณะมีวงจรกรองกับไม่มีวงจรกรอง.....	141
6.68 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมขณะมีวงจรกรองกับไม่มีวงจรกรอง.....	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.69 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ.....	143
6.70 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์และฟิวส์ที่ทรานส์ฟอर्मของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์....	144
6.71 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของวงจรชดเชยคอนเวอร์เตอร์.....	144
6.72 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน กับไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน.....	145
7.1 การเปรียบเทียบค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก สมการที่ 4.37 และ 4.43.....	148
7.2 การวัดอุณหภูมิของขดลวดที่เกิดจากพันแบบ PICM.....	150
7.3 รูปแบบการวิเคราะห์ห้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	151
7.4 รูปแบบการวิเคราะห์ห้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	151
7.5 การเชื่อมโยงของฟลักซ์ของตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุของวงจรสัญญาณรบกวน.....	151