การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการพันแบบก้าวหน้า

CONDUCTED EMI REDUCTION ON A BOOST CONVERTER USING A PROGRESSIVE INDUCTOR WINDING TECHNIQUE

กฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ

KRITSADA SARITSIRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-020-044

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำใน บูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการพันแบบก้าวหน้า

CONDUCTED EMI REDUCTION ON A BOOST CONVERTER USING A PROGRESSIVE INDUCTOR WINDING TECHNIQUE

กฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ

KRITSADA SARITSIRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-020-044

CONDUCTED EMI REDUCTION ON A BOOST CONVERTER USING A PROGRESSIVE INDUCTOR WINDING TECHNIQUE

KRITSADA SARITSIRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2007

KMITL-2007-EN-M-020-044

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการพันแบบก้าวหน้า
นักศึกษา	นายกฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ
รหัสนักศึกษา	47060218
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน

บทคัดย่อ

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยปกติมีสาเหตุมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่สูงร่วมกับตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่สูงสามารถกระทำได้โดยการใช้เทคนิคซอฟต์สวิตชิ่งและการลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำด้วยเทคนิคการพันขดลวดแบบก้าวหน้าโดยทำการเปรียบเทียบกับการพันแบบทั่วไป โดยจะนำมาแสดงและแยกทดสอบทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและแบบกระแสต่อเนื่อง ผลการทดลองในรูปแบบของสเปคตรัมสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งการพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้าจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน โดยจะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 16 MHz ซึ่งมีค่าลดลง 18.5% ในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง และลดลง 14.1% ในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง เมื่อใช้เทคนิคการพันขดลวดแบบก้าวหน้า

Thesis Title	Conducted EMI Reduction on a Boost Converter Using a Progressive Inductor Winding Technique
Student	Mr.Kritsada Saritsiri
Student ID.	47060218
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr.Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

Electromagnetic interference (EMI) of a boost converter, normally caused by switching dv/dt rates and interacting with parasitic capacitance in the inductor for a boost converter. The reduction of high switching dv/dt can be used by such as soft-switching technique. On the other hand, parasitic capacitance in the inductor can be potentially reduced by winding techniques. In this thesis, parasitic capacitance in the inductor can be reduced by modified progressive winding technique. The EMI sources of the inductor normal winding and progressive winding are identified and measured with both of discontinuous and continuous current modes. Finally, the experimental EMI spectrum of both normal winding and progressive winding is compared to demonstrate the reduction of EMI spectrum at 16 MHz about 18.5% in discontinuous current mode and 14.1% in continuous current mode when using a progressive inductor winding technique.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษา รวมทั้งแรงผลักดันจาก รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ขันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัทไทยตาบูชิอีเล็คทริค จำกัด องค์กร JICA และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องวิจัยความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และบริษัทไทยตาบูชิอีเล็คทริค จำกัด ทุกๆคน ที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณกรรณิการ์ สฤษฎิ์ศิริ ผู้ที่เข้าใจ คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมาและตลอดไป

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................II

กิตติกรรมประกาศ....................III

สารบัญ....................IV

สารบัญตาราง....................VIII

สารบัญรูป....................IX

บทที่ 1 บทนำ....................1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา....................1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา....................1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา....................2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย....................2

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน....................2

1.6 ขอบเขตการวิจัย....................3

1.7 ขั้นตอนการศึกษา....................3

บทที่ 2 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง....................6

2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า นิยามและที่มาของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ....................6

2.1.1 การเปลี่ยนสถานะในการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิ่ง....................8

2.1.2 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์....................10

2.2 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ....................13

2.3 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและเครื่องมือวัด....................14

2.3.1 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม....................14

2.3.2 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)....................16

2.3.3 แผ่นกราวด์ (Ground Plan)....................17

2.3.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ....................18

2.3.5 การวัดและเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้....................19

2.4 บทสรุปและแนวทางการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การพันตัวเหนี่ยวนำเพื่อลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ....................23

3.1 บทนำ...23

3.2 ความแตกต่างของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า..........23

3.2.1 การพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป...24

3.2.2 การพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า..25

3.3 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า..27

3.3.1 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป.......................27

3.3.2 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า...................28

3.4 การวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า...28

3.4.1 ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไป................30

3.4.2 ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า............31

3.5 บทสรุป...35

บทที่ 4 การจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำและวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSPICE...36

4.1 บทนำ...36

4.2 การจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า.....36

4.2.1 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป..36

4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า...42

4.3 การจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์..46

4.3.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในทางอุดมคติ............46

4.3.2 การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง...50

4.3.3 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์........53

4.4 บทสรุป...54

บทที่ 5 วิธีการทดลอง...56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 วัตถุประสงค์..56

5.2 ขอบเขตของการทดลอง...56

5.3 รูปแบบต่างๆที่ใช้ทำการทดสอบ...56

5.3.1 การทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ................57

5.3.2 การทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า.............59

5.4 บทสรุป..60

บทที่ 6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์...62

6.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ...63

6.1.1 ตัวเหนี่ยวนำบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบทั่วไป.........................63

6.1.2 ตัวเหนี่ยวนำบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า......................64

6.1.3 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง..66

6.1.4 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าในโหมดกระแสต่อเนื่อง..67

6.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟต...68

6.2.1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง........................68

6.2.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง............................74

6.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ...80

6.3.1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง.....................80

6.3.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง.........................89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..........98

7.1 สรุปผลการวิจัย..........98

7.1.1 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า..........98

7.1.2 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ..........99

7.1.3 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า..........100

7.1.4 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพรวมของวงจรไฟฟ้า..........103

7.2 ข้อเสนอแนะ..........104

บรรณานุกรม..........105

ภาคผนวก..........107

ภาคผนวก ก. ข้อมูลแกนความถี่สูง ขดลวด และมอสเฟตกำลังที่ใช้..........108

ภาคผนวก ข. การหาค่า C_{tt} ระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน..........123

ภาคผนวก ค. การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์..........128

ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..........131

ประวัติผู้เขียน..........137

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 พิกัดของวงจรที่ทำการทดสอบ...3
3.1 เงื่อนไขที่กำหนดในการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า...23
4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป...44
4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.......................................45
6.1 สรุปหัวข้อของผลการทดลองและการวิเคราะห์...62
7.1 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบทั่วไปกับแบบก้าวหน้า.....100
7.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์................................103

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....4

2.1 แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....7

2.2 ช่วงความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....7

2.3 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูที่เกิดการแกว่งของสัญญาณ (Ringing).....9

2.4 สเปคตรัมในโดเมนความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู.....9

2.5 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า.....10

2.6 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....10

2.7 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....11

2.8 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....12

2.9 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....12

2.10 ตัวอย่างค่าเงื่อนไขขีดจำกัดของมาตรฐาน VDE, FCC และ EN.....14

2.11 การตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม.....15

2.12 วงจรภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....16

2.13 กราฟอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....17

2.14 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....18

2.15 การต่อวงจรและอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....19

2.16 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....21

3.1 การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป.....24

3.2 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบทั่วไป.....24

3.3 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป.....25

3.4 การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบก้าวหน้า.....26

3.5 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า.....26

3.6 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า.....26

3.7 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป.....27

3.8 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า.....28

3.9 การยุบรวมวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป.....30

3.10 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวม $C_{tt(17-18)}$ กับ $C_{tt(18-19)}$.....30

3.11 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวม C_a กับ $C_{tt(17-19)}$.....31

3.12 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปหลังยุบรวมค่าตัวเก็บประจุทั้งหมด.....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.13 การเปลี่ยนรูปวงจรแบบ " สตาร์-เดลต้า " (Star-Delta Transform) 32

3.14 การยุบรวมวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า................32

3.15 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์..........33

3.16 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวม C_{tt} ของขดลวดขดที่ 30 และ 32 กับ C_c 33

3.17 วงจรตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนจากแบบเดลต้าไปเป็นสตาร์ของ C_a , C_d และ $C_{tt(30-33)}$ 34

3.18 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวมค่าตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน......................34

3.19 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าหลังยุบรวมตัวเก็บประจุทั้งหมด.....34

4.1 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป.........37

4.2 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปที่เหมาะสมกับผลจากการวัด (ที่ความถี่ f_{r1}).........37

4.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.2..38

4.4 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปที่เหมาะสมกับผลจากการวัด (ที่ความถี่ f_{r2})..........39

4.5 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.4..40

4.6 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปที่เหมาะสมกับผลจากการวัดที่ทุกช่วงความถี่..........40

4.7 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.6..41

4.8 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.......42

4.9 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าที่เหมาะสมกับผลจากการวัดที่ทุกช่วงความถี่.......42

4.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.9..43

4.11 กราฟความแตกต่างระหว่างผลจากการวัดกับการจำลองของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป...........44

4.12 กราฟความแตกต่างระหว่างผลจากการวัดกับการจำลองของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า........45

4.13 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์..46

4.14 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์ปิดวงจร...47

4.15 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์เปิดวงจร...48

4.16 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของตัวเหนี่ยวนำขณะที่สวิตช์ปิดและเปิดวงจร.................49

4.17 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในโหมดการทำงานต่างๆของบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....51

4.18 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการจำลองในโหมดกระแสต่อเนื่อง.........................53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.19 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการจำลองในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง......................54

5.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ....58

5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า...60

5.3 แผนภูมิแสดงรูปแบบการทดสอบทั้งหมดในงานวิจัยนี้..61

6.1 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไปโดยทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง......63

6.2 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไปโดยทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง.........63

6.3 การเปรียบเทียบสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไประหว่างการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องกับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง..64

6.4 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าโดยวงจรมีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง..65

6.5 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าโดยวงจรมีการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง..65

6.6 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าระหว่างการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องกับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง..66

6.7 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับการพันแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง..67

6.8 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับการพันแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง..68

6.9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป..69

6.10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป..71

6.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า..72

6.12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า..73

6.13 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป..75

6.14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมด

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

กระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป.....77

6.15 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.....78

6.16 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.....79

6.17 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป.....82

6.18 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป.....84

6.19 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.....86

6.20 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.....87

6.21 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป.....91

6.22 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป.....92

6.23 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.....94

6.24 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า.....96

7.1 สาเหตุการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง.....101

7.2 สาเหตุการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง.....102

ข.1 ภาพตัดขวางของขดลวดแบบทรงกระบอกเพื่อแสดงลักษณะของฉนวนขดลวด.....124

ข.2 ภาพตัดขวางของขดลวดเพื่อแสดงค่ามุม θ และระยะทาง $x(\theta)$ ในส่วนของช่องอากาศ.....125

ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (ข.3) กับ (ข.5) ในการหาค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวด.....126

ค.1 การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ของค่าอิมพีแดนซ์ Z.....129

ค.2 การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ของค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า C.....129

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในตัวเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่างๆ เนื่องมาจากการที่แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนั้นมีประสิทธิภาพที่สูงและมีขนาดที่เล็ก แต่การทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนั้นจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น อันเนื่องมาจากการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น มอสเฟตกำลัง ที่ความถี่สูง โดยจะทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่สูง ซึ่งถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดหลักของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยในการศึกษาและวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งแบบไม่แยกกันทางไฟฟ้าชนิดยกระดับแรงดันหรือที่เรียกว่าบูสต์คอนเวอร์เตอร์

วิธีการที่จะใช้ในการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำให้น้อยลงนั้นในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี เช่น การนำอุปกรณ์กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Filter) มาต่อคั่นระหว่างวงจรที่ต้องการกรองสัญญาณรบกวนกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า แต่วิธีการดังกล่าวไม่ได้เป็นการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรให้น้อยลง เนื่องจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ายังคงเกิดขึ้นในวงจรและยังคงรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อื่นที่อยู่ภายในวงจร การแก้ปัญหาด้วยวิธีการนี้เป็นเพียงแค่การสกัดกั้นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแล้วไม่ให้ออกไปรบกวนวงจรอื่นๆภายนอกเท่านั้น ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุและยังทำให้วงจรมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ตลอดจนมีราคาเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ การใช้เทคนิคซอฟต์สวิตชิ่งของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำก็เป็นวิธีการที่จะลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำให้น้อยลงได้ วิธีการนี้เป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ โดยการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรให้น้อยลง แต่วิธีการดังกล่าวนี้ก็จำเป็นที่จะต้องใส่อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนตัวอื่นๆเพิ่มเติมเข้าไปในวงจร ซึ่งก็อาจมีผลทำให้วงจรมีขนาดและราคาเพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีการศึกษาและวิจัยวิธีการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยไม่จำเป็นต้องใส่อุปกรณ์ตัวอื่นๆเพิ่มเติมเข้าไปในวงจรขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อจะนำเสนอวิธีการหนึ่ง ที่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยไม่จำเป็นต้องใส่อุปกรณ์ตัวอื่นๆเพิ่มเติมเข้าไปในวงจร โดยใช้เทคนิควิธีการพันตัวเหนี่ยวนำที่เรียกว่า “เทคนิคการพันตัวเหนี่ยวแบบก้าวหน้า (Progressive

Inductor Winding Technique)” โดยจะนำวิธีการพันแบบดังกล่าวมาใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้มีการนำเอาตัวเหนี่ยวที่ใช้วิธีการพันแบบก้าวหน้ามาทดสอบและเปรียบเทียบกับตัวเหนี่ยวที่ใช้วิธีการพันแบบทั่วไป ทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและแบบกระแสต่อเนื่อง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยปรกติมีสาเหตุมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่สูง ร่วมกับค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่สูงอาศัยการใช้เทคนิคซอฟต์สวิตชิ่งและการลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง ก็จะส่งผลทำให้สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำลงได้ ก็จะทำให้สัญญาณรบกวนมีค่าลดลงตามไปด้วย จึงนำมาสู่การใช้เทคนิควิธีการพันตัวเหนี่ยวเพื่อลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยนี้ เริ่มต้นขึ้นจากแนวความคิดที่จะทำการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยไม่จำเป็นต้องใส่อุปกรณ์ตัวอื่นๆเพิ่มเติมเข้าไปในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จึงได้ทำการศึกษาสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ [2] – [4] ทำให้ทราบว่า ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่สูง ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าสามารถลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำลงได้ จึงสามารถที่จะทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำลดลงได้ โดยใช้เทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ก็เป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องใส่อุปกรณ์ตัวอื่นๆเพิ่มเติมเข้าไปในวงจร

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะเป็นการพันขดลวดในลักษณะเรียงสลับกันระหว่างขดลวดชั้นแรกกับขดลวดชั้นที่สอง ซึ่งการพันในลักษณะนี้จะทำให้ขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพันและขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพันอยู่ไกลจากกัน ทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป(แบบพื้นฐาน) ซึ่งจะเป็นการพันขดลวดในลักษณะเรียงชิดต่อ

กันไปจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายของอีกด้านหนึ่งเพื่อเป็นขดลวดชั้นแรก หลังจากนั้นจะทำการพันย้อนกลับมาบนขดลวดชั้นแรกเพื่อให้ได้จำนวนรอบของขดลวดตามที่ต้องการ ทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงเนื่องจากขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพันและขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพันอยู่ใกล้กัน

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป ทั้งในแง่ของการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำและผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและแบบกระแสต่อเนื่อง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปแบบการพันขดลวดในตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น โดยมีการกำหนดพิกัดของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยดังตารางที่ 1.1

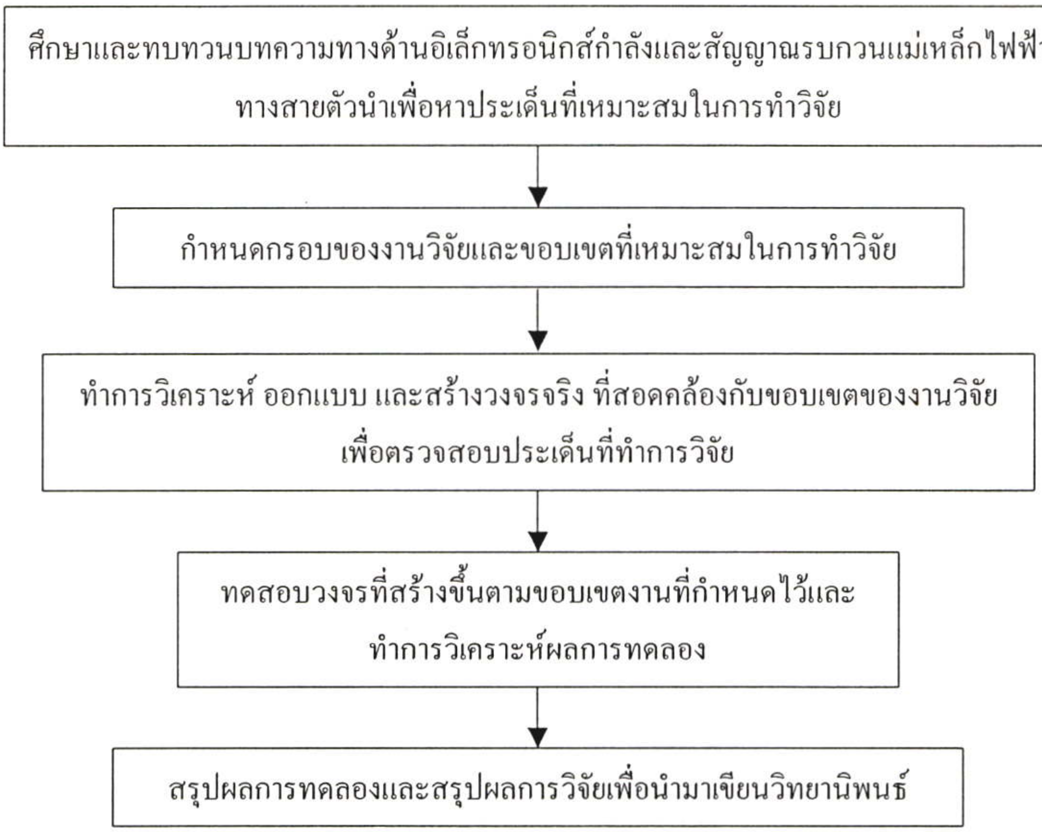
ตารางที่ 1.1 พิกัดของวงจรที่ทำการทดสอบ

ปริมาณทางไฟฟ้า	โหมดการทำงาน		หน่วยวัด
	กระแสไม่ต่อเนื่อง	กระแสต่อเนื่อง	
แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (V_I)	100	100	โวลต์ (V)
กำลังไฟฟ้าด้านเข้า (P_I)	70	140	วัตต์ (W)
แรงดันไฟฟ้าด้านออก (V_O)	204.8	204.5	โวลต์ (V)
กระแสไฟฟ้าด้านออก (I_O)	0.323	0.634	แอมแปร์(A)
กำลังไฟฟ้าด้านออก (P_O)	66.15	129.65	วัตต์ (W)
ดิวตี้เรโช (*Duty ratio*)	28.3	40.0	เปอร์เซ็นต์ (%)
ความถี่สวิตชิ่ง (f)	100	100	กิโลเฮิรตซ์ (kHz)

โดยภาระที่ด้านออกของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นชนิดตัวต้านทานเท่านั้น และไม่มีการนำอุปกรณ์กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Filter) มาต่อคั่นระหว่างวงจรกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังแผนภูมิในรูปที่ 1.1 โดยคลอบคลุมเนื้อหาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งมีทั้งหมด 7 บทด้วยกัน คือ



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง นิยามและที่มาของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เงื่อนไขขีดจำกัดสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เครื่องมือวัด และแนวทางแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการพันตัวเหนี่ยวนำเพื่อลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ความแตกต่างของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ ที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนวิธีการพัน หลังจากนั้นจึงนำไปจำลองในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 5 กล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตที่ทำการทดลอง โดยแบ่งเป็นการสรุปเงื่อนไขต่างๆที่จะทำการทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และการทดสอบทางด้านรูปคลื่นสัญญาณของตัวมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และทางด้านรูปคลื่นสัญญาณของตัวมอสเฟตและตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยมีการเปรียบเทียบกันระหว่างการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปกับการพันแบบก้าวหน้า

บทที่ 7 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

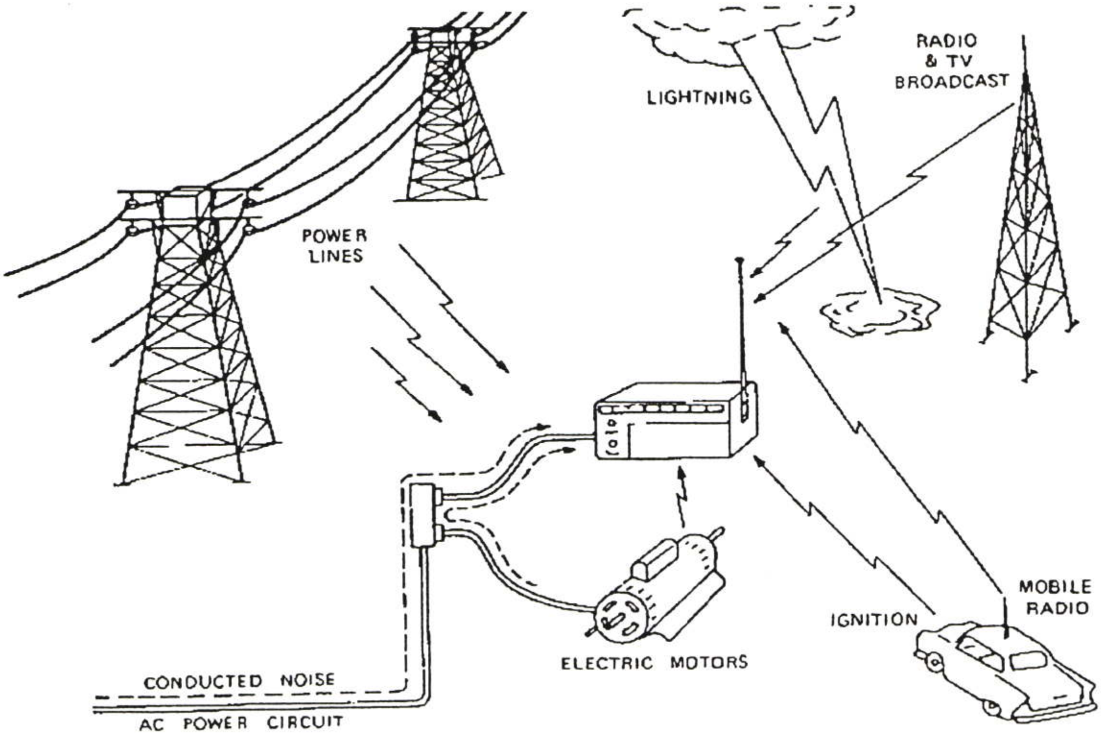
ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงนิยามของ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยจะอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็คทรอนิกส์กำลัง โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ หัวข้อที่ 2.1 จะกล่าวถึงรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า นิยามและที่มาของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ หัวข้อที่ 2.2 จะกล่าวถึงมาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ หัวข้อที่ 2.3 จะกล่าวถึงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและเครื่องมือวัด และหัวข้อที่ 2.4 จะกล่าวถึงบทสรุปและแนวทางการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า นิยามและที่มาของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) คือ ปรากฏการณ์ที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาแทรกสอดหรือปะปนกับคลื่นสัญญาณการทำงานของอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมและมีผลทำให้คลื่นสัญญาณการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวผิดเพี้ยนหรือผิดพลาดไปจากเดิมที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องในเรื่องของ การเกิดการรบกวนกัน (Interference) และความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Immunity) หรือความสามารถในการรับสัญญาณรบกวน (Susceptibility) ของระบบหรืออุปกรณ์ใดๆ ซึ่งการรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือระบบต่างๆของตัวเอง หรือตัวอื่นๆที่อยู่ใกล้เคียงโดยสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [5] คือ

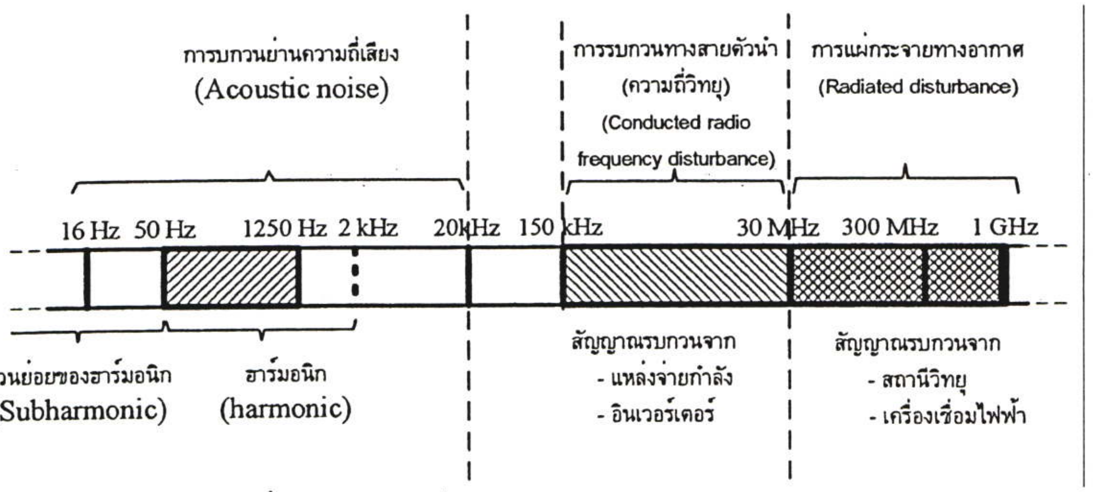
1. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนตามธรรมชาติ ได้แก่ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า การคายประจุไฟฟ้า คลื่นคอสมิก และคลื่นจากดวงอาทิตย์

2. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์หรือระบบที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ เครื่องเชื่อม สายส่งไฟฟ้าแรงดันสูง การสันดาปของเครื่องยนต์ เตาอบไมโครเวฟ ระบบการสื่อสาร มอเตอร์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ



รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีการจำแนกได้หลายรูปแบบ ซึ่งอาจจะใช้การแบ่งตามช่วงความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [1] โดยช่วงความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz และยังแบ่งแยกการพิจารณาช่วงความถี่ออกเป็นอีก 2 ช่วง คือ ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) และที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ซึ่งทั้งสองรูปแบบนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่เหมือนกัน



รูปที่ 2.2 ช่วงความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การที่จะเรียกว่ามีการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้นั้น จะต้องประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Electromagnetic Interference Source) เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวน (Coupling Path) และตัวรับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Receptor) ซึ่งตัวรับผลกระทบดังกล่าวอาจจะหมายถึง อุปกรณ์ เครื่องมือหรือระบบก็ได้ โดยเส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนนั้นเป็นตัวกลางที่สำคัญสำหรับการนำพาสัญญาณรบกวนออกไปสู่สภาพแวดล้อมภายนอก การส่งผ่านสัญญาณรบกวนของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอาจจะอยู่ในรูปของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในสายตัวนำ ในรูปของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่แผ่กระจายไปทางอากาศก็ได้ ซึ่งมีหลายทางเดินทั้งโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น ตัวอย่างเช่น พื้นดิน กลุ่มเมฆ สายไฟฟ้า สิ่งก่อสร้าง ตัวถังของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายสัญญาณบนแผ่น PWB เป็นต้น

ในการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้น โดยทั่วไปมีสาเหตุมาจาก 3 สาเหตุหลัก คือ การเปลี่ยนสถานะในการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิ่งอย่างทันทีทันใด การเรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบภายในวงจร และการเรโซแนนซ์ที่เป็นผลขององค์ประกอบแฝงที่เกิดขึ้นเนื่องจากลายวงจร [6]

2.1.1 การเปลี่ยนสถานะในการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิ่ง

การเปลี่ยนสถานะในการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิ่งอย่างทันทีทันใด เช่น มอสเฟตกำลังและไดโอด จากการนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส และจากการหยุดนำกระแสเป็นนำกระแส จะมีผลทำให้รูปคลื่นสัญญาณที่อุปกรณ์สวิตซิ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นความถี่ของการสวิตซิ่งจึงมีผลต่อระดับการปล่อยสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย จากความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นในโดเมนเวลาเปรียบเทียบกับโดเมนความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูที่เกิดการแกว่งของสัญญาณ (Ringing) เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะ ดังที่แสดงในรูป 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อรูปกราฟในโดเมนเวลามีการเปลี่ยนแปลงใดๆในช่วงสั้นๆ จะมีผลทำให้ความสูงของรูปคลื่นสัญญาณที่เกิดในโดเมนความถี่มีค่าสูงตามไปด้วย

ตามทฤษฎีรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่ตัวสวิตช์ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จะมีลักษณะเป็นพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม แต่ในความเป็นจริงรูปคลื่นดังกล่าวจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู กล่าวคือจะมีช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงเพิ่มขึ้นมา ความสัมพันธ์ของขนาดสเปคตรัมในโดเมนความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู จะสามารถอธิบายได้โดยใช้วิธีการของอนุกรมฟูริเยร์ช่วยในการวิเคราะห์ในแต่ละความถี่ของฮาร์โมนิกส์ n ลำดับ ตามสมการที่ (2.1) และสเปคตรัมที่ได้จะเป็นตามรูปที่ 2.4 [7]

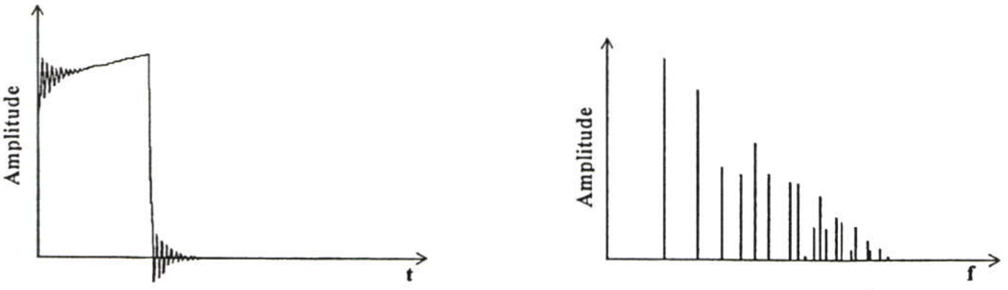
$$C_n = 2A \cdot \frac{d}{T} \cdot \frac{\sin[\pi \cdot n \cdot d / T]}{\pi \cdot n \cdot d / T} \cdot \frac{\sin[\pi \cdot n \cdot t_r / T]}{\pi \cdot n \cdot t_r / T} \tag{2.1}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ หน่วย เฮริตซ์ : Hz

d คือ ช่วงเวลาที่นำกระแส หน่วย วินาที : s

t_r คือ ช่วงเวลาขาขึ้น หน่วย วินาที : s

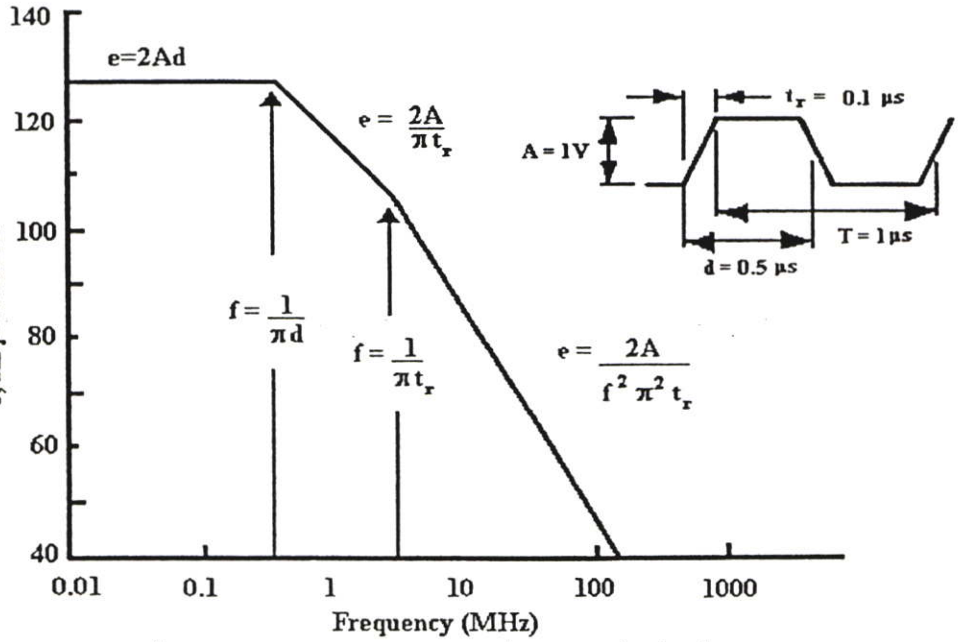
T คือ คาบเวลา หน่วย วินาที : s



(ก) โดเมนเวลา **(ข) โดเมนความถี่**

รูปที่ 2.3 รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูที่เกิดการแกว่งของสัญญาณ (Ringing)

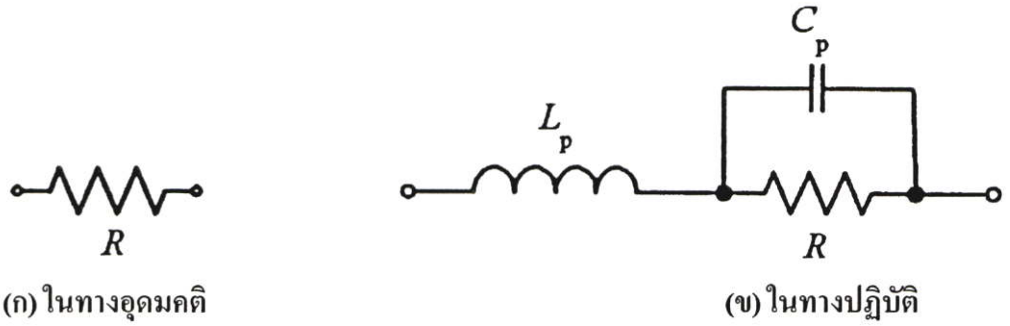
จากความสัมพันธ์ของสเปคตรัมในโดเมนความถี่กับรูปคลื่นในโดเมนเวลา จะพบว่าช่วงเวลาที่นำกระแสและช่วงเวลาขาขึ้นจะมีผลต่อขนาดของสเปคตรัม กล่าวคือถ้าช่วงเวลาดังกล่าวมีค่ามาก ก็จะทำให้สามารถลดขนาดของสเปคตรัมที่ความถี่สูงได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามช่วงเวลานำกระแสและช่วงเวลาขาขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน การออกแบบให้ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่ามากเกินไปก็จะมีผลต่อค่าช่วงเวลานำกระแส ดังนั้นการออกแบบค่าดังกล่าวต้องให้เหมาะสมกับความถี่ในการทำงานและต้องไม่มีค่ามากจนเกินไป



รูปที่ 2.4 สเปคตรัมในโดเมนความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู

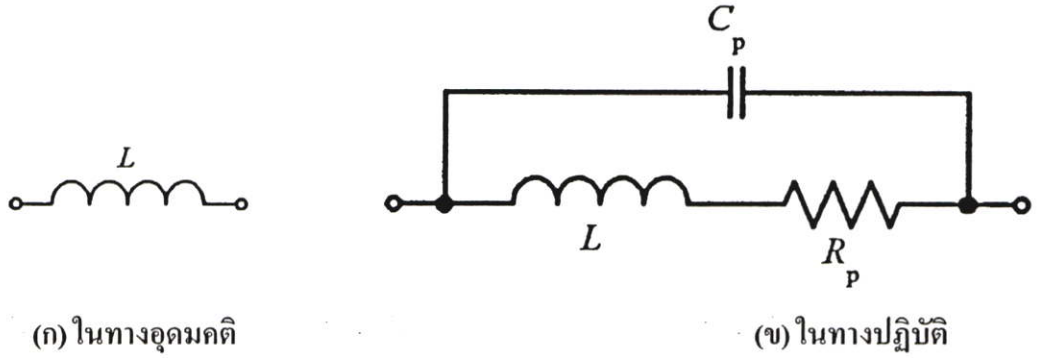
2.1.2 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์

ตัวต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะเกิดมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากขาและขั้วของตัวต้านทานไฟฟ้า โดยถ้าขาของตัวต้านทานไฟฟ้ายิ่งยาว ก็จะยิ่งทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบแฝงของตัวต้านทานไฟฟ้า

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ในทางปฏิบัติการทำงานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะปรากฏพฤติกรรมขององค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากระหว่างขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเสมือนเป็นตัวนำประกบกันอยู่ ซึ่งจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ และในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเกิดขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานของขดลวดที่นำมาพันเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้านั่นเอง โดยแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในทางอุดมคติและในทางปฏิบัติแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

โดยเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้น คุณสมบัติต่างๆของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและองค์ประกอบแฝงก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยอิมพีแดนซ์ในทางอุดมคติจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการทำงาน แต่ในทางปฏิบัติเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า

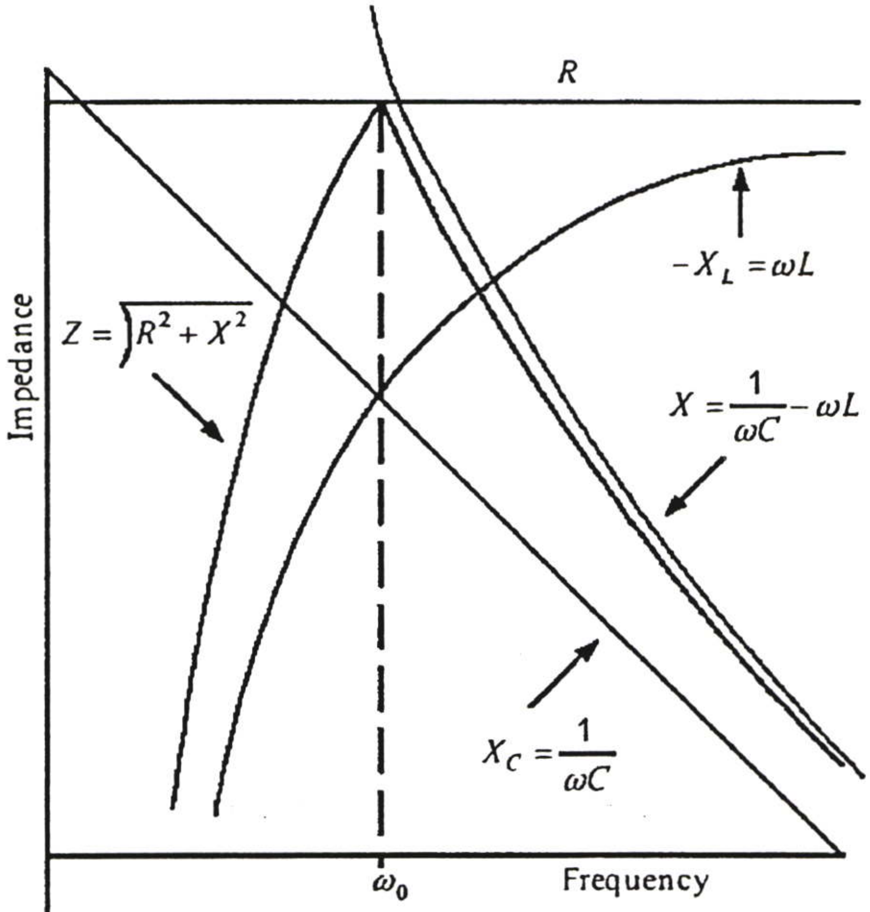
ความถี่เรโซแนนซ์ จะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อความถี่ในการทำงานยังคงเพิ่มขึ้นไปอีก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้านั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_P}} \tag{2.2}$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

C_P คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

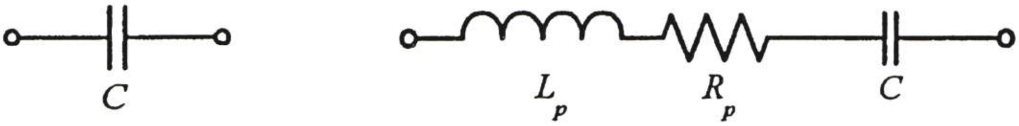
L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุไฟฟ้า จะมีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานไฟฟ้า คือขาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยแบบจำลองของตัว

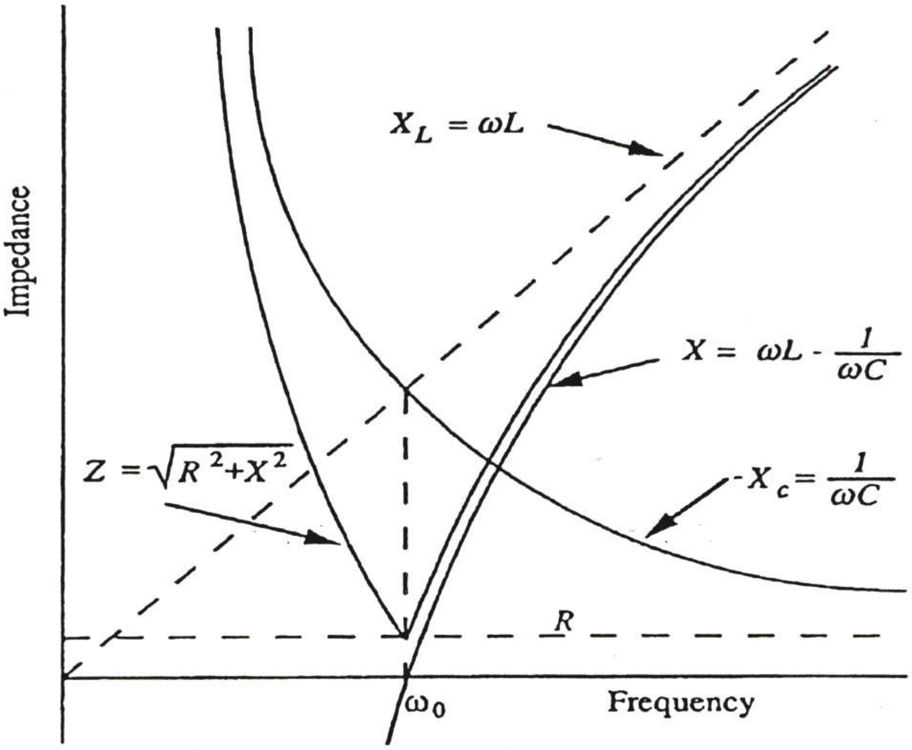
เก็บประจุไฟฟ้าในทางอุดมคติและในทางปฏิบัติแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแบบจำลองในลักษณะนี้จะเป็นแบบอย่างง่ายที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ EMI



(ก) ในทางอุดมคติ **(ข) ในทางปฏิบัติ**

รูปที่ 2.8 องค์ประกอบแฝงของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในทางอุดมคติจะมีอัตราการลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นจนถึงอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากผลของค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า และที่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากผลของค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงในตัวเก็บประจุไฟฟ้านั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.9 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_P C}} \tag{2.3}$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

L_P คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแฝงในตัวเก็บประจุไฟฟ้า

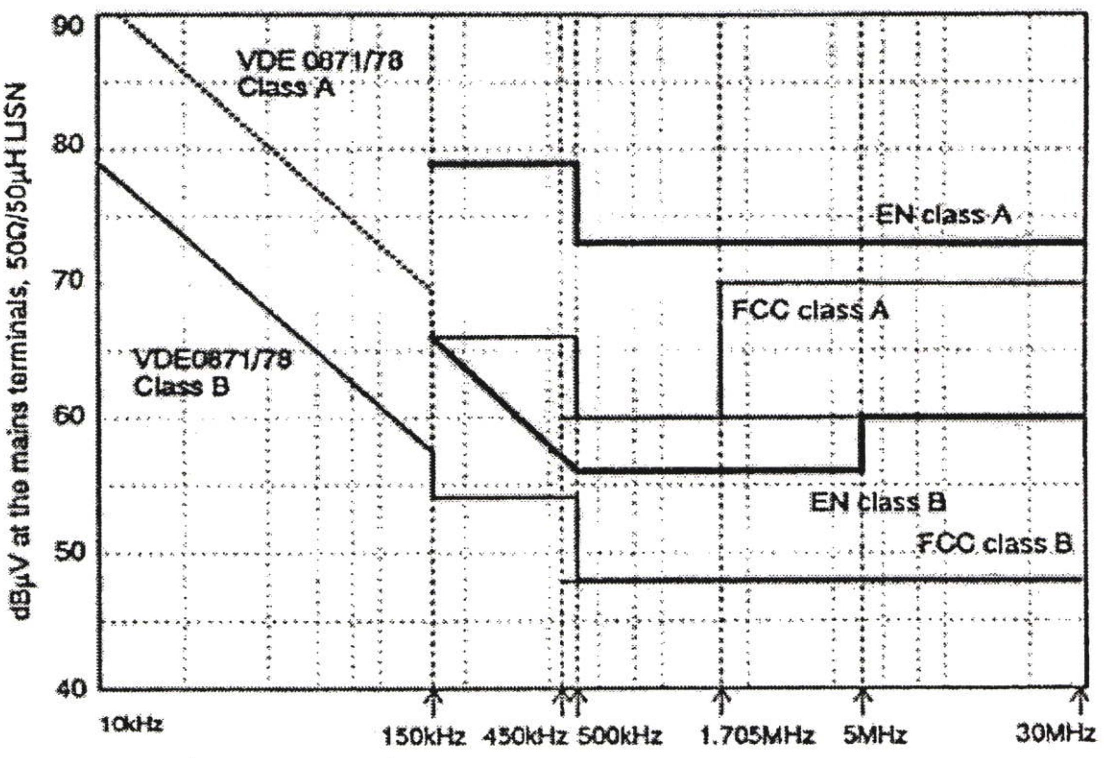
C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.2 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ในการวัดและทดสอบที่เกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นการรบกวนทางสายตัวนำหรือแพร่กระจายทางอากาศนั้น เป็นความต้องการเพื่อให้ทราบว่าอุปกรณ์หรือระบบนั้นยังสามารถทำงานอยู่ร่วมกันได้โดยไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดและทดสอบ รวมทั้งยังมีการกำหนดมาตรฐานสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการวัดและทดสอบอีกด้วย โดยจะมีอยู่ด้วยกันหลายมาตรฐาน ทั้งมาตรฐานนานาชาติ มาตรฐานของภูมิภาคหรือมาตรฐานของประเทศนั้นๆ [1], [5], [8] – [9] โดยมาตรฐานต่างๆนั้นมีความสำคัญต่อการนำผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าไปใช้ในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานนั้นไม่ได้หมายความว่าไม่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เพียงแต่เป็นการจำกัดขนาดของสัญญาณรบกวนให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานของประเทศนั้นๆเท่านั้น

มาตรฐานที่เกี่ยวกับการปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทางสายตัวนำ เป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละประเทศก็จะมีการกำหนดมาตรฐานตามความเหมาะสมของประเทศนั้นๆ ทั้งในส่วนของคุณภาพทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและกลไกทางเศรษฐศาสตร์ เช่น FCC เป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (Wire and Radio Communication), VDE เป็นมาตรฐานของประเทศเยอรมัน ซึ่งได้กำหนดไว้ว่าอุปกรณ์ที่มีความถี่ในการทำงานสูงกว่า 10 kHz จะต้องได้รับการรับรองมาตรฐานก่อนนำมาใช้, CISPR ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ไม่ได้บังคับใช้แต่จะกล่าวถึงวิธีการวัดและขีดจำกัดของสัญญาณรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวจะถูกดัดแปลงโดยรัฐบาลของแต่ละประเทศให้เป็นมาตรฐานบังคับใช้ภายในประเทศ จึงทำให้กลายเป็นมาตรฐานสากลไปโดยปริยาย, VCCI เป็นมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น, MIL-STD เป็นมาตรฐานทางทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่มาตรฐาน MIL-STD จะมีรายละเอียดที่มากกว่าและเข้มข้นกว่า FCC อีกทั้งย่านความถี่ที่พิจารณายังกว้างกว่าอีกด้วย และมาตรฐานของประเทศไทยได้แก่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

สำหรับการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเพื่อให้ผ่านมาตรฐานของแต่ละประเทศนั้น จะต้องทำการทดสอบทั้งแรงดันระหว่างไลน์กับกราวด์และแรงดันระหว่างนิวทรอลกับกราวด์ โดยสัญญาณที่วัดได้จะถูกแตกสัญญาณออกมาในโดเมนของความถี่ด้วยเครื่องวัด EMC Analyzer ซึ่งขนาดแอมปลิจูดของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขขีดจำกัดและจะต้องมีขนาดไม่สูงเกินกว่าค่าเงื่อนไขขีดจำกัดตลอดย่านความถี่ที่พิจารณา ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นตัวอย่างค่าเงื่อนไขขีดจำกัดของมาตรฐาน VDE, FCC และ EN



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างค่าเงื่อนไขขีดจำกัดของมาตรฐาน VDE, FCC และ EN

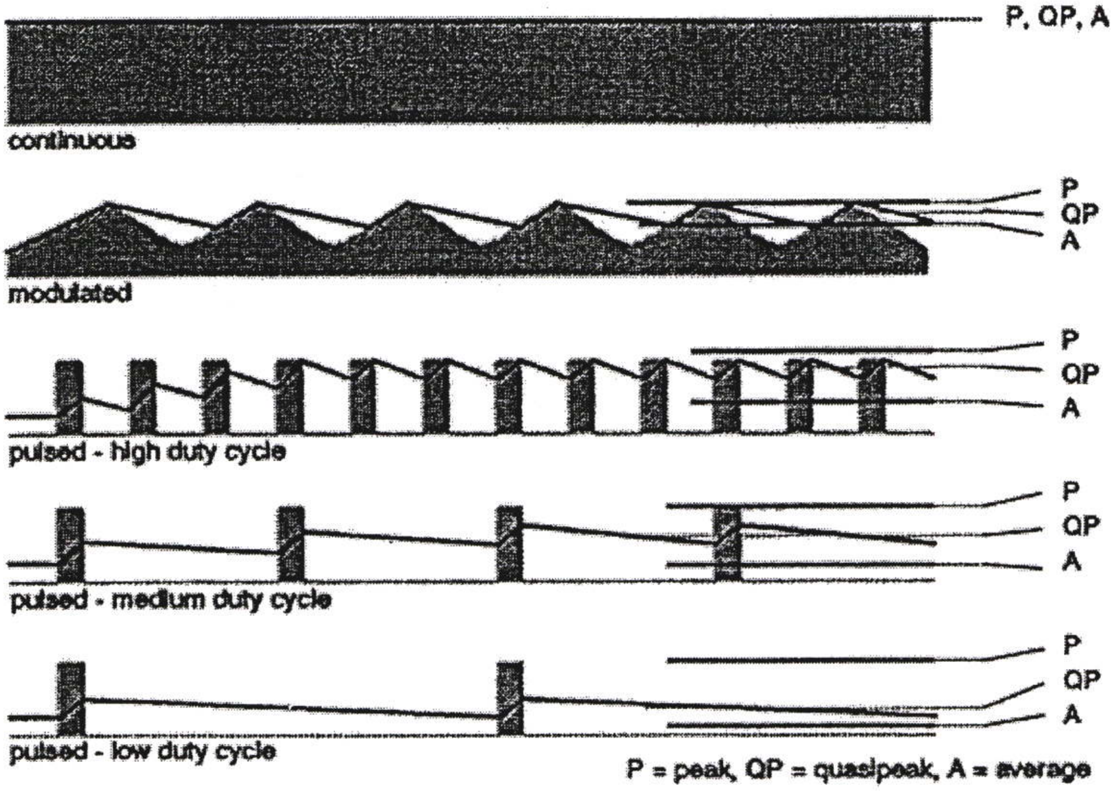
2.3 การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและเครื่องมือวัด

สำหรับวิธีการวัดและทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์และเครื่องมือในการวัดรวมถึงใช้วิธีการวัดที่ถูกต้อง โดยมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่วิทยุดังต่อไปนี้

2.3.1 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม

เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) หรือเครื่องรับสัญญาณรบกวน (EMI Receiver) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับจากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN: Line Impedance Stabilization Network) สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนจากทางสาย

ตัวนำหรือจากทางสายอากาศของการวัดสัญญาณรบกวนที่แพร่มาทางอากาศ โดยที่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมจะต้องมีความสามารถในการวัดสัญญาณในย่านความถี่ตั้งแต่ 9 kHz ถึง 1000 MHz และในการวัดสัญญาณรบกวนด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมจะมีการตรวจจับสัญญาณเพื่อการวัด (Detector Function) [5] ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอยู่ 3 รูปแบบ คือ Peak (P), Quasi Peak (QP) และ Average (A) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีการตรวจจับสัญญาณในรูปแบบที่ต่างกันดังรูปที่ 2.11 โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปเท่านั้น ส่วนรายละเอียดที่ครอบคลุมกว่านี้จะสามารถศึกษาได้จาก [5] และสรุปได้ดังนี้



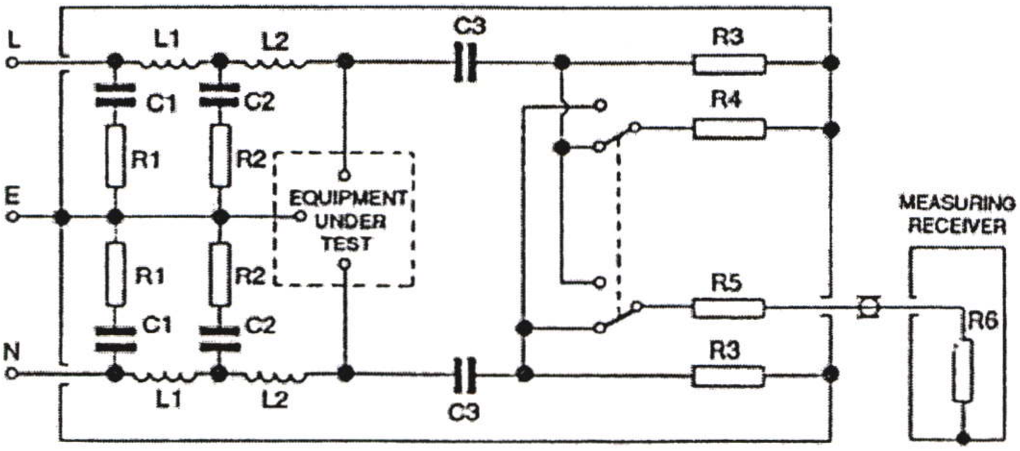
รูปที่ 2.11 การตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม [5]

การตรวจจับสัญญาณแบบ Peak หรือแบบ P ในรูปที่ 2.11 เป็นการตรวจจับค่าสูงสุดของสัญญาณ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.11 ว่าทุกกรณีที่ใช้การตรวจจับแบบ P จะตรวจจับค่าที่มากกว่าหรือสูงกว่าแบบ QP และแบบ A เสมอ ยกเว้นกรณีที่สัญญาณที่ตรวจจับเป็นลักษณะของสัญญาณที่มีค่าคงที่ และเมื่อตรวจจับแล้วเครื่องวัดก็จะปล่อยสัญญาณนั้นอย่างรวดเร็วเพื่อตรวจจับใหม่ ทำให้การวัดแบบนี้จะมีความเร็วในการวัดมากกว่าแบบ QP และแบบ A ในขณะที่แบบ A จะเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ส่วนแบบ QP จะตรวจจับสัญญาณโดยมีการเฉลี่ยสัญญาณในช่วงเวลาที่สัญญาณมีการ charge และ discharge หรือนำช่วงเวลาที่สัญญาณเพิ่มขึ้นและลดลงมาพิจารณาด้วย ทำให้การวัดแบบ QP และแบบ A จะใช้เวลามากกว่าแบบ P และจากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า ยิ่ง

สัญญาณมีค่า duty cycle มาก การวัดแบบ QP และแบบ A ก็จะยิ่งมีค่าสูงขึ้นและใกล้เคียงกับค่าสูงสุดมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัญญาณมีค่า duty cycle ต่ำ การวัดแบบ QP และแบบ A ก็จะมีค่าต่ำกว่าแบบ P อย่างชัดเจน

2.3.2 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)

ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้น จำเป็นจะต้องมีโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN: Line Impedance Stabilization Network) หรืออีกประเภทหนึ่งที่ทำหน้าที่คล้ายกันคือ Artificial Main Network (AMN) โดยเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการแยกสัญญาณรบกวนออกเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์หรือเครื่องมือนั้นๆอยู่ในระดับตามที่มาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งวงจรภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ตามมาตรฐานจะแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยตัวโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะมีหน้าที่หลักดังต่อไปนี้



COMPONENT VALUES FOR 50 ohm / 50μH NETWORK

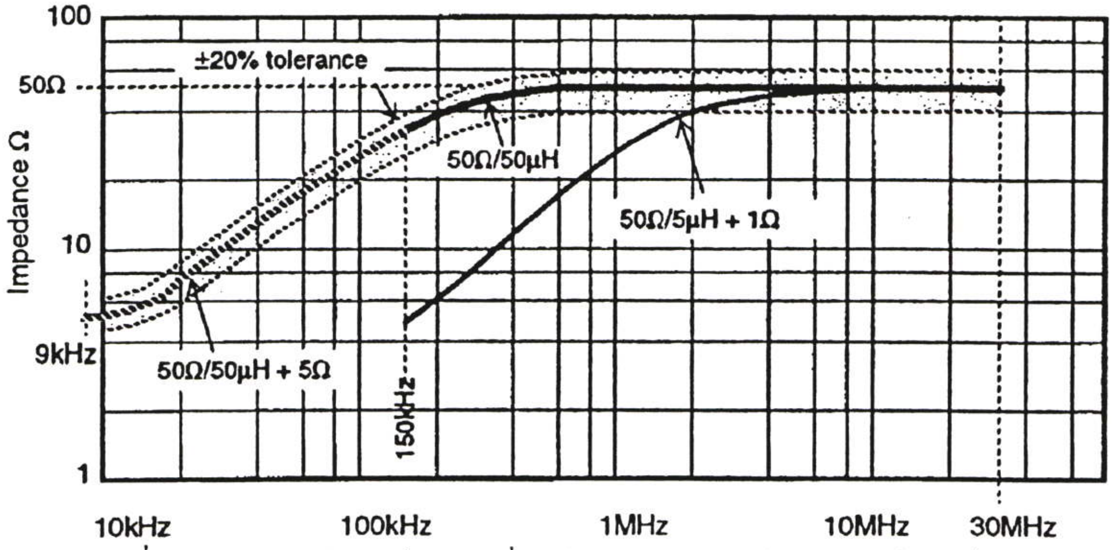
CONPONENT	VALUE	COMPONENT	VALUE
R1	10 ohms	C1	1.2μF
R2	5 ohms	C2	8μF
R3	1k ohm	C3	0.25μF
R4	50 ohm	L1	250μH
R5	(short)	L2	50μH
R6	50 ohms		

COMPONENT VALUES FOR 150 ohm NETWORK

COMPONENT	VALUE	COMPONENT	VALUE
R1	open	C1	open
R2	short	C2	0.25μF
R3	open	C3	0.1μF
R4	150 ohm	L1	short
R5	100 ohm	L2	short
R6	50 ohm		

รูปที่ 2.12 วงจรภายในของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ [5]

1. สามารถรักษาอิมพีแดนซ์ระหว่างสายแต่ละสายของแหล่งจ่ายกับจุดกราวด์อ้างอิงให้คงที่ที่ 50 Ω โดยมีตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 50 μH ขนานอยู่ด้วย ตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่ 50Ω/50μH + 5Ω ใช้สำหรับโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์แบบทั่วไป และ 50Ω/50μH + 1Ω ใช้สำหรับโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่ใช้ทดสอบในสภาวะกระแสสูงถึง 500 A



รูปที่ 2.13 กราฟอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ [5]

2. สามารถแยกสัญญาณรบกวนที่ปล่อยออกมาจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่อยู่ภายใต้การทดสอบ (EUT: Equipment Under Test) เพื่อนำสัญญาณเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม

3. สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนที่มากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักออกไปไม่ให้เข้าสู่ระบบที่กำลังวัดอยู่ได้ และเพื่อความปลอดภัยในการทดสอบควรมีการต่อจุดกราวด์อ้างอิงของตัวโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ลงดิน

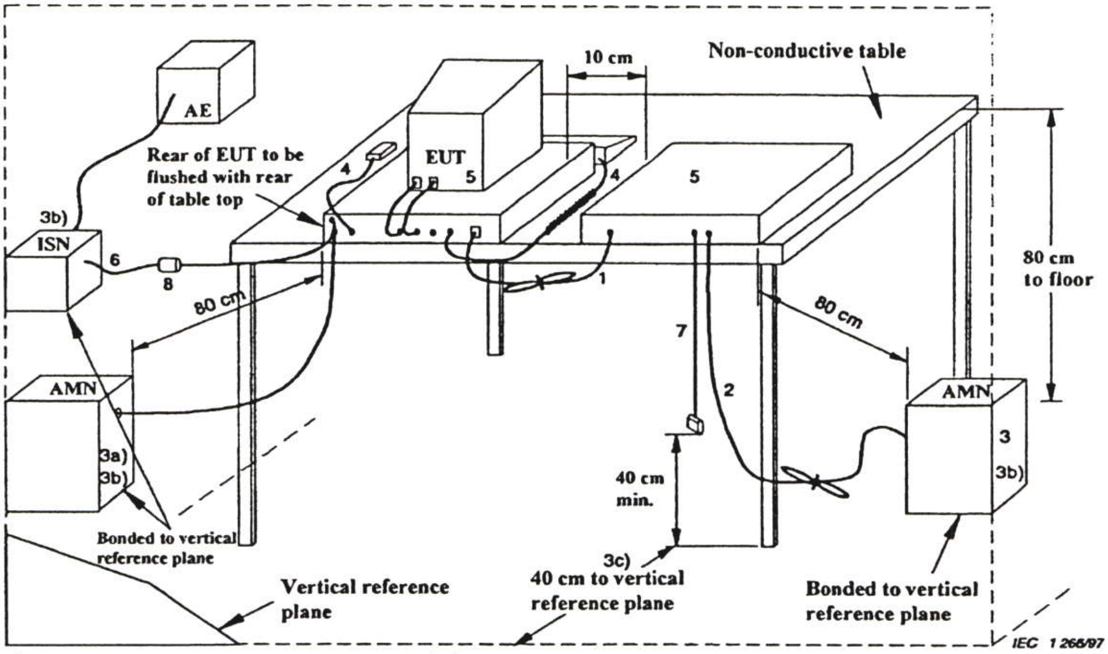
2.3.3 แผ่นกราวด์ (Ground Plane)

เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ (EUT) ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้อุปกรณ์ดังกล่าวสูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะดังกล่าวจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดสอบอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบบรรจุอยู่ในกล่องปิด ให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้วัดถึงตัววัสดุที่ใช้ทำกล่อง ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิด ให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวด์ภายในวงจร

แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบใต้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลอง และจะต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคงด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะ หรืออาจจะใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้ และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบของอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบไม่น้อยกว่า 0.5 เมตร และต้องมีขนาดอย่างน้อย 2 เมตร × 2 เมตร โดยจุดกราวด์อ้างอิงของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะต้องต่อกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำ ซึ่งสายของตัวนำที่ใช้จะต้องต่อให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

2.3.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

รูปที่ 2.14 จะเป็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ ซึ่งมีเงื่อนไขการติดตั้งดังต่อไปนี้



เมื่อ	AE	คือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
	EUT	คือ อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ
	ISN (LISN)	คือ โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

รูปที่ 2.14 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

1. ถ้าสายตัวนำซึ่งห้อยอยู่ต่ำกว่า 40 เซนติเมตร เหนือแนวระดับของแผ่นกราวด์และไม่สามารถทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินจะต้องม้วนทบให้เป็นมัดที่มีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร

2. สายไฟจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ยาวเกินต้องม้วนทบให้เป็นมัดที่กลางสายหรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสม

3. อุปกรณ์ที่ต้องการจะทดสอบจะต้องต่ออยู่กับ AMN/LISN 1 ตัว โดยที่ AMN/LISN และ ISN ทุกตัวจะต้องต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ที่อยู่ในแนวระดับ

ก) แหล่งจ่ายไฟทุกส่วนของระบบจะต้องต่อมาจาก AMN/LISN ตัวที่ 2 โดยสามารถติดตั้งให้มีปลายแบบใช้ได้หลายอุปกรณ์ได้

ข) AMN/LISN และ ISN ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องวางห่างจากอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ 80 เซนติเมตร และห่างจากอุปกรณ์และโลหะอื่นๆอย่างน้อย 80 เซนติเมตร

ค) สายไฟจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและสายสัญญาณ ควรวางให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และจะต้องอยู่สูงจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 40 เซนติเมตร

4. สายของเครื่องมือที่ใช้ร่วมกันในการวัด เช่น สายคีย์บอร์ด สายเมาส์ และอื่นๆ ต้องวางในลักษณะใช้งานปรกติ

5. อุปกรณ์รอบข้างต้องวางที่ระยะ 10 เซนติเมตรจากเครื่องอื่นๆและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งถ้ายอมรับได้ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการติดตั้ง ก็ให้วางบนตัวควบคุมโดยตรง

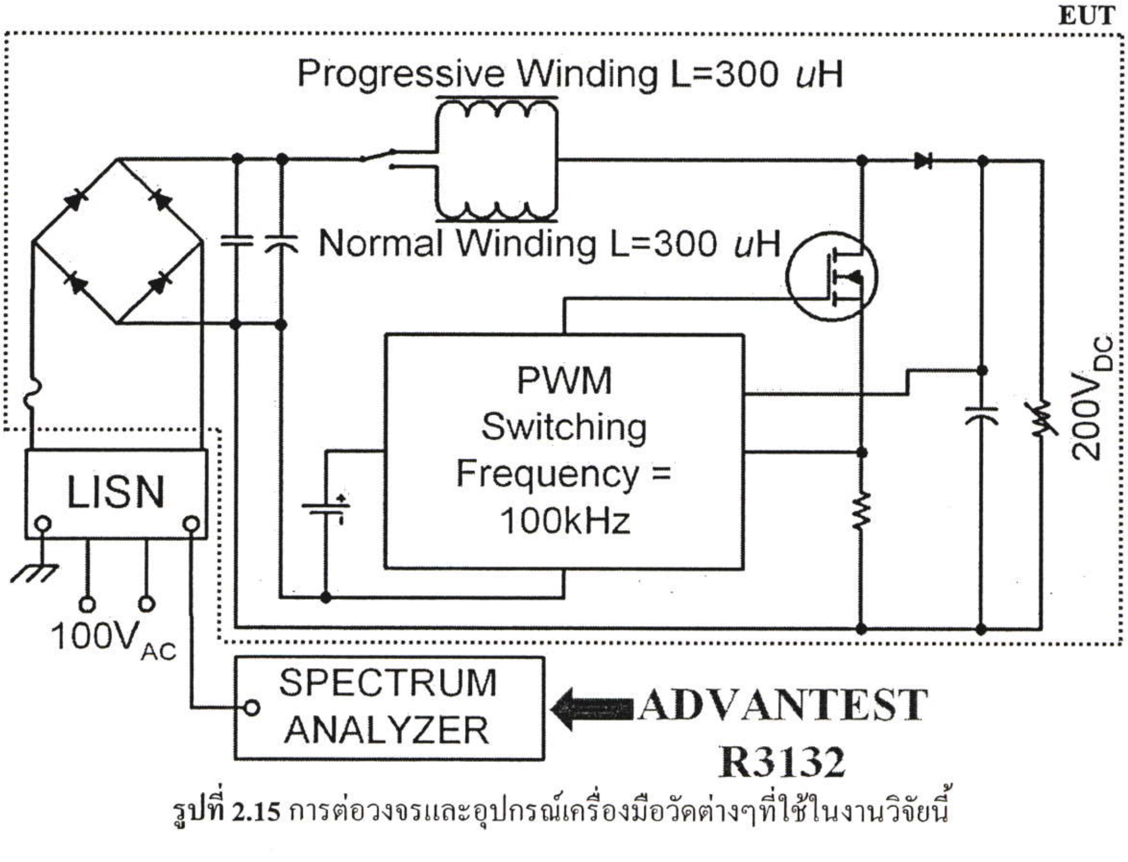
6. มีสายสัญญาณเข้า/ออกสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้า/ออก ซึ่งไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วย สามารถปล่อยลอยเอาไว้ได้หรืออาจต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้

8. ถ้าต้องใช้โพรบกระแส (Current Probe) ต้องวางห่างจากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ไม่น้อยกว่า 0.1 เมตร

2.3.5 การวัดและเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การต่อวงจรเพื่อทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ จำเป็นที่จะต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยรูปที่ 2.15 แสดงการต่อวงจรและอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้



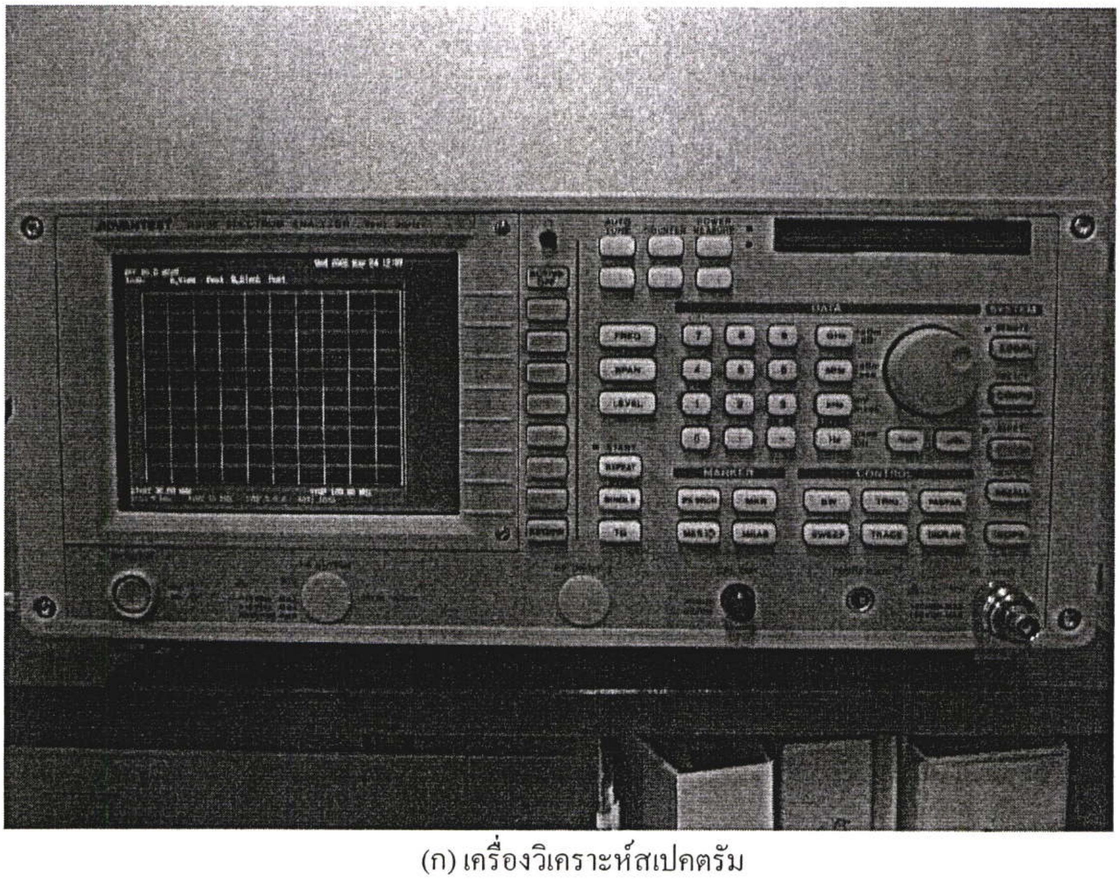
รูปที่ 2.15 การต่อวงจรและอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งถูกส่งผ่านโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์มายังเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม โดยจะใช้การตรวจจับสัญญาณรบกวนแบบ Peak (P) เนื่องจากสามารถวัดสัญญาณรบกวนได้อย่างรวดเร็วและเป็นการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ 150 kHz – 30 MHz โดยเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังนี้

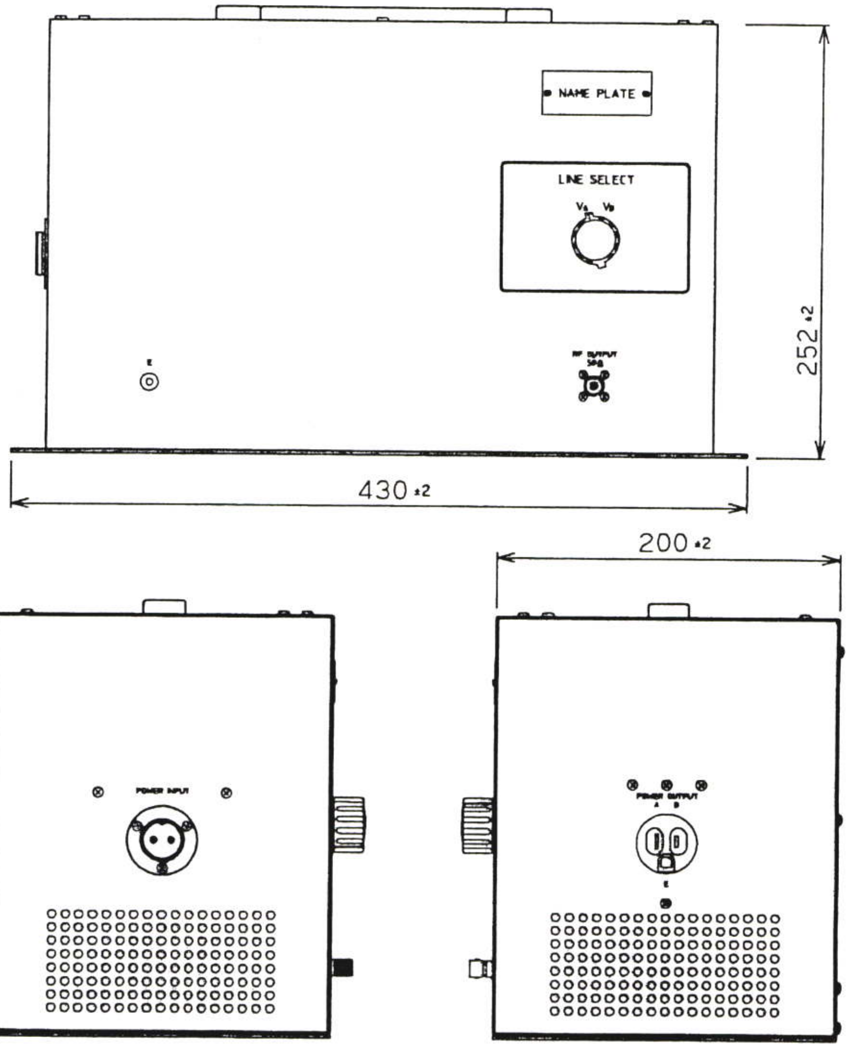
1. เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมของ Advantest รุ่น R3132 ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) ซึ่งจะทำหน้าที่วิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับจากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยย่านความถี่ที่สามารถวัดได้คือ 9 kHz – 3 GHz

2. โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ของ Kyoritsu รุ่น KNW-407 ย่านความถี่ 150 kHz – 30 MHz มีตัวต้านทาน 50Ω อยู่ภายใน 1 ตัว และมีช่องสำหรับต่อกับตัวต้านทาน 50Ω จากเครื่องวัดในตำแหน่งที่ทำการวัด และมีสวิตซ์สำหรับเลือกได้ว่าจะให้เครื่องวัดทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งไลน์กับกราวด์ หรือนิวทรอลกับกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)

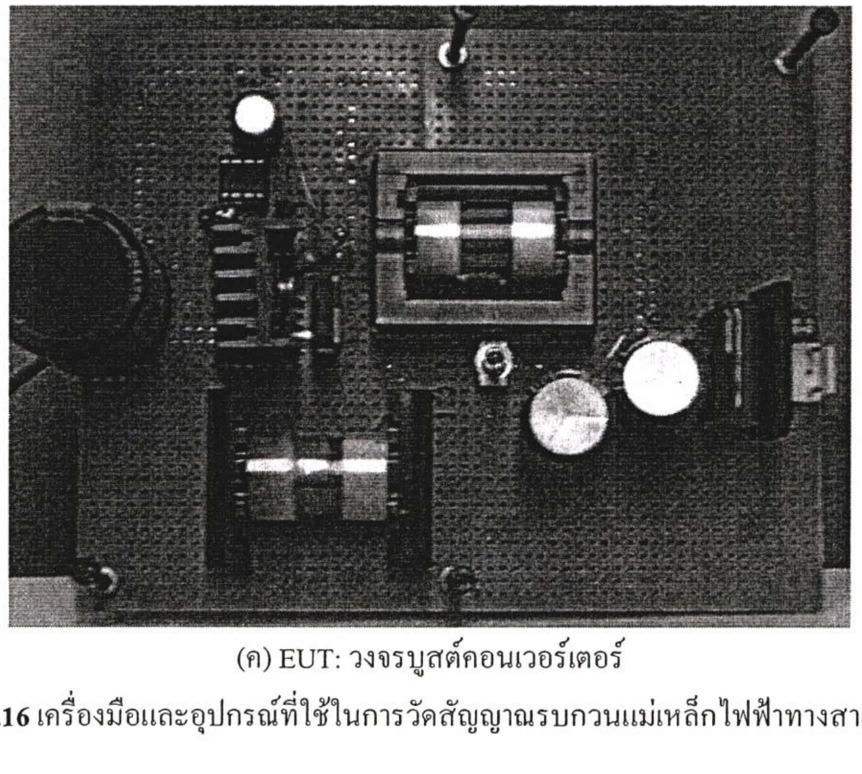
3. EUT คือ วงจรที่จะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ดังในรูปที่ 2.16 (ค) ซึ่งก็คือวงจรที่เป็นต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยในงานวิจัยนี้ EUT คือ วงจรแปลงผันกำลังไฟตรงเป็นไฟตรงชนิดบูสต์คอนเวอร์เตอร์



(ก) เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม



(ข) โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์



(ค) EUT: วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 2.16 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

2.4 บทสรุปและแนวทางการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

เนื้อหาในบทที่ 2 นี้ เป็นการแนะนำพื้นฐานและทำความเข้าใจเกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า มีการอธิบายถึงนิยามและที่มาของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ แนะนำถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการวัดและทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสังเขป และได้อธิบายถึงวิธีการวัดและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในงานวิจัยนี้ ซึ่งปัญหาของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำอาจพิจารณาได้เป็น 2 ประเด็นหลักตามเป้าหมายของการแก้ปัญหา โดยประเด็นแรก คือ การแก้ปัญหาของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่เกิดขึ้นแล้วส่งผลรบกวนต่อการทำงานของวงจรไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งถ้าไม่มีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวก็อาจจะส่งผลทำให้วงจรไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าอื่นๆทำงานผิดพลาดหรือได้รับความเสียหายได้ ส่วนประเด็นที่สอง คือ การแก้ปัญหาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าผ่านการทดสอบตามมาตรฐานของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีอยู่หลายวิธี ซึ่งวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันก็คือ การใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI Filter) [10] – [12] เหตุผลเนื่องมาจากวิธีการดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้ทั้งโหมดผลร่วม โหมดผลต่างและโหมดผลรวม อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วยวิธีอื่นๆอีก ซึ่งแต่ละวิธีก็อาจจะมีประโยชน์และความเหมาะสมแตกต่างกันออกไป โดยบางวิธีอาจมุ่งเน้นในการลดปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบางโหมดเท่านั้น ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับเป้าหมายในการแก้ปัญหาของแต่ละบุคคล

บทที่ 3
การพันตัวเหนี่ยวนำเพื่อลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการใช้เทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งจากการอธิบายในบทที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีผลต่อการเกิดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยถ้าค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าสูง ก็จะมีผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบางช่วงความถี่มีค่าสูงตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าลงได้ ก็จะมีผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบางช่วงความถี่มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

โดยเนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงความแตกต่างของการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของทั้งแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า และค่าตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า

3.2 ความแตกต่างของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงความแตกต่างของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า ซึ่งการพันทั้ง 2 แบบมีเงื่อนไขที่ถูกกำหนดดังตารางที่ 3.1

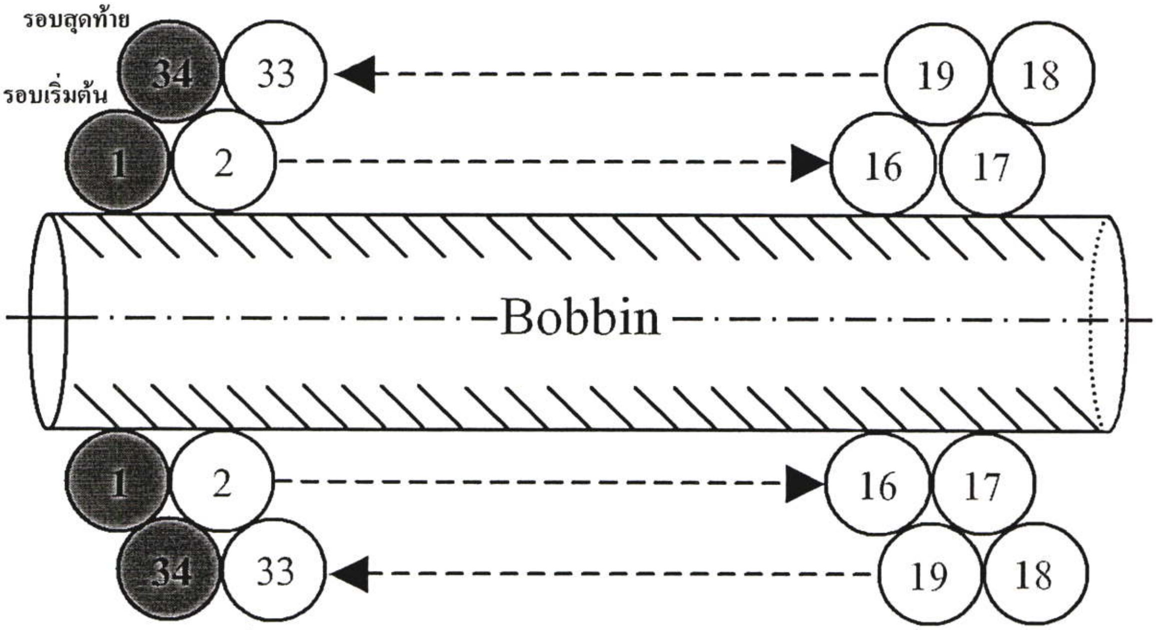
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่กำหนดในการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ข้อกำหนด	รายละเอียด
ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า	324 μH
จำนวนชั้นของขดลวด	2 ชั้น
จำนวนรอบต่อชั้นของขดลวด	17 รอบ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (รวมฉนวน)	0.56 มม.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (ไม่รวมฉนวน)	0.50 มม.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Bobbin	13.8 มม.

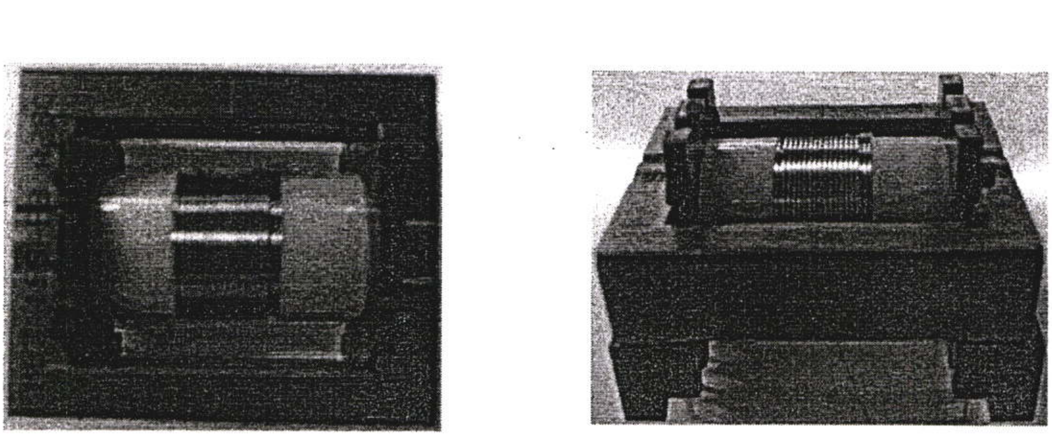
เงื่อนไขต่างๆในตารางที่ 3.1 จะเป็นการกำหนดโดยผู้ทำการวิจัยเอง โดยเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นนั้นไม่ได้นำประเด็นการออกแบบวงจรให้มีประสิทธิภาพสูงสุดมาเกี่ยวข้องด้วย แต่เงื่อนไขดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นมาจากลักษณะการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบกับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

3.2.1 การพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

การพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปจะเป็นการพันขดลวดในลักษณะเรียงชิดต่อกันไปจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายของอีกด้านหนึ่งเพื่อเป็นขดลวดชั้นแรก หลังจากนั้นจะทำการพันขดลวดชั้นต่อไป โดยพันย้อนกลับมาบนขดลวดชั้นแรกเพื่อให้ได้จำนวนรอบของขดลวดตามที่ต้องการ ซึ่งการพันในลักษณะนี้จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง เนื่องจากขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพันและขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพันอยู่ใกล้กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2

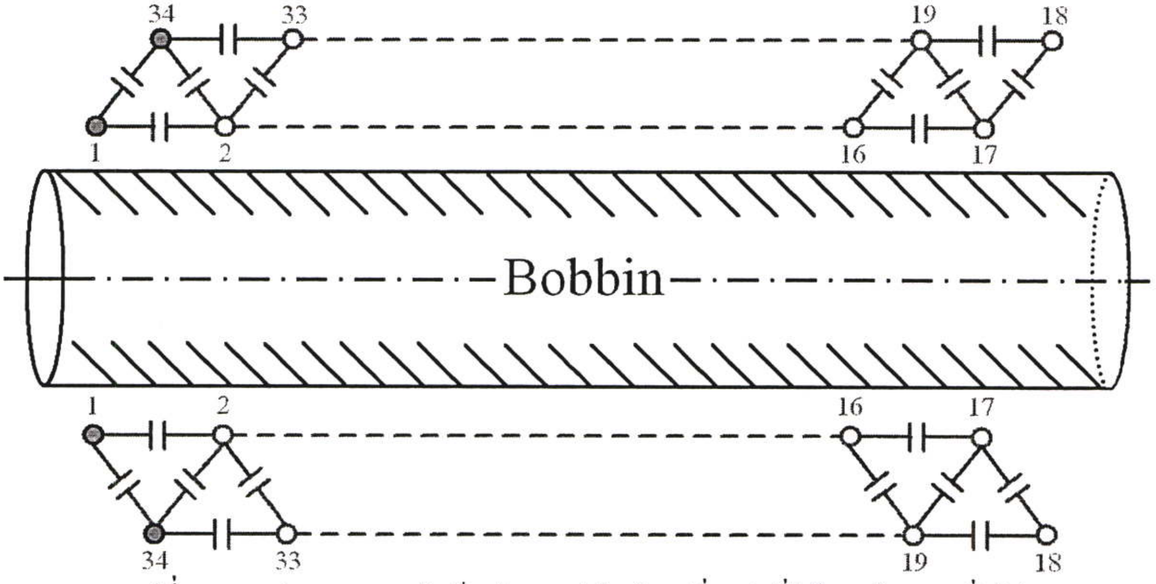


รูปที่ 3.1 การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป



รูปที่ 3.2 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบทั่วไป

จากรูปที่ 3.1 จะสังเกตได้ว่า ขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพัน ① (ขดลวดรอบที่ 1) และขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพัน ㉞ (ขดลวดรอบที่ 34) จะอยู่ติดกัน ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำการวัดค่าที่ขั้วของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าสูง โดยในรูปที่ 3.3 จะเป็นการแสดงลักษณะของการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไป ซึ่งจะสังเกตได้ว่าระหว่างรอบของขดลวดที่อยู่ติดกัน ไม่ว่าจะเป็นรอบของขดลวดที่อยู่ในชั้นการพันเดียวกันหรือระหว่างชั้นการพัน จะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงเกิดขึ้นระหว่างรอบของขดลวดที่อยู่ติดกันเสมอ [13] – [14]

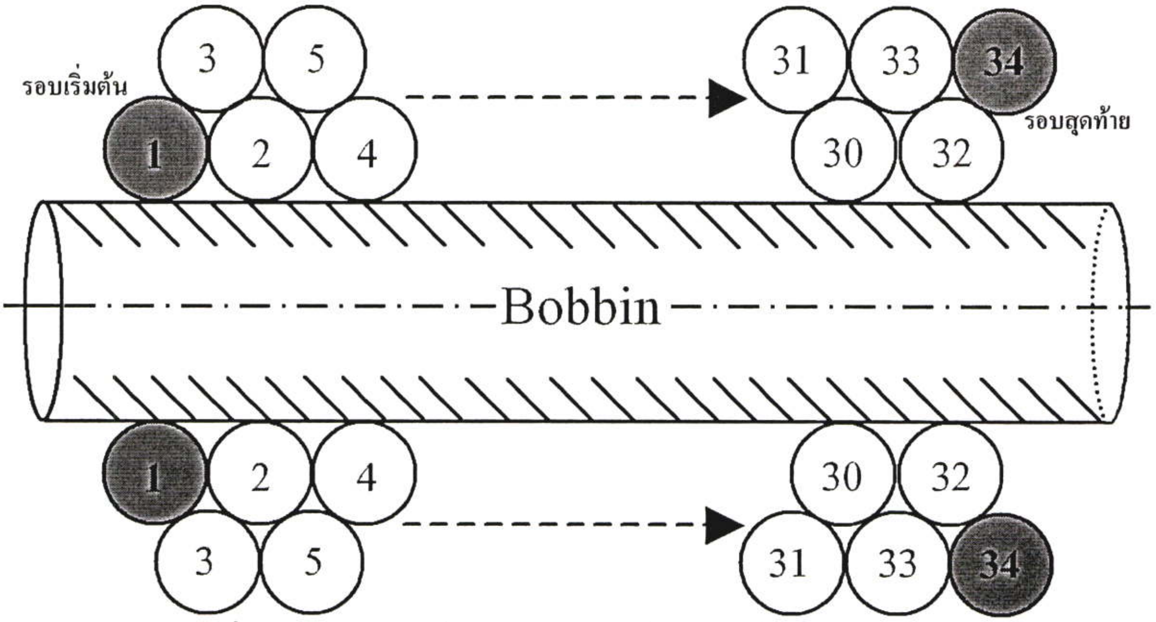


รูปที่ 3.3 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป

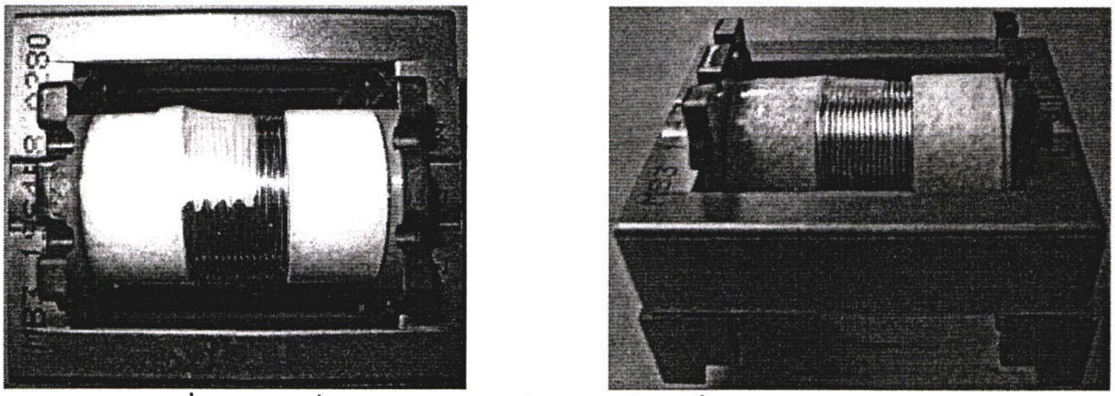
3.2.2 การพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

การพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะเป็นการพันขดลวดในลักษณะเรียงสลับกันระหว่างขดลวดชั้นแรกกับขดลวดชั้นที่ 2 ซึ่งการพันขดลวดในลักษณะนี้จะทำให้ขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพันและขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพันอยู่ไกลจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 มีผลทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าการพันแบบทั่วไป

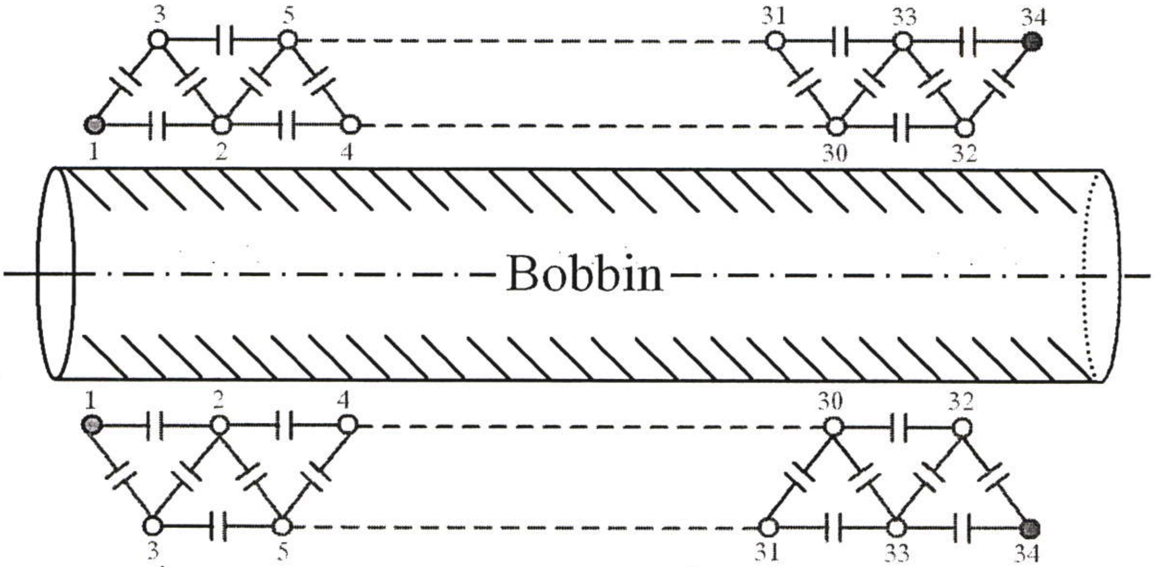
จากรูปที่ 3.4 จะสังเกตได้ว่า ขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพัน ① (ขดลวดรอบที่ 1) และขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพัน ㉞ (ขดลวดรอบที่ 34) จะอยู่ห่างกัน ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำการวัดค่าที่ขั้วของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไป ส่วนลักษณะของการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงจะมีลักษณะเหมือนกันกับการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบทั่วไป



รูปที่ 3.4 การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบก้าวหน้า



รูปที่ 3.5 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า



รูปที่ 3.6 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

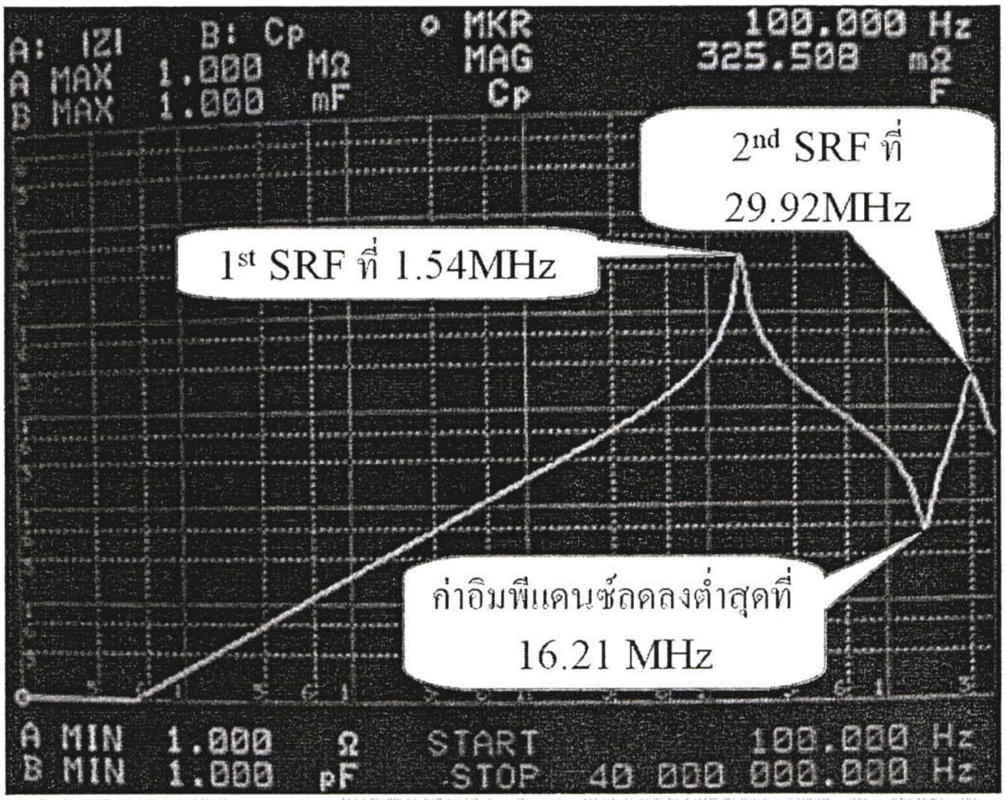
โดยจะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงเกิดขึ้นระหว่างรอบของขดลวดที่อยู่ติดกันเสมอ แต่ผลของค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมของการพันทั้งสองแบบจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งรายละเอียดจะมีการนำเสนอในหัวข้อต่อไป

3.3 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอและเปรียบเทียบการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า ซึ่งในการวัดผลการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของ Hewlett-Packard รุ่นHP4194A โดยทำการวัดในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 40 MHz

3.3.1 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป

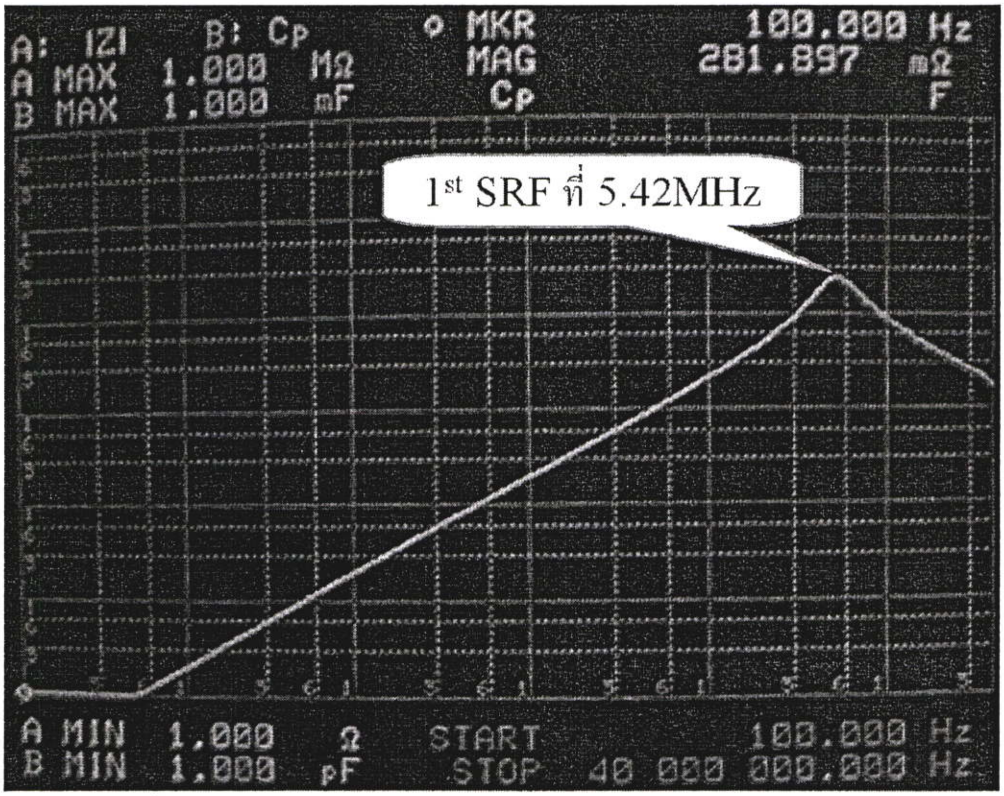
การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปแสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า จะมีการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำขึ้น 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 เกิดขึ้นที่ความถี่ 1.54 MHz และครั้งที่ 2 เกิดขึ้นที่ความถี่ 29.92 MHz ส่วนที่ความถี่ 16.21 MHz นั้น จะเป็นช่วงความถี่ที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำลดลงมาจนมีค่าต่ำที่สุด ก่อนที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 3.7 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป

3.3.2 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

สำหรับการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าแสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า จะมีการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำขึ้นเพียงครั้งเดียวคือที่ความถี่ 5.42 MHz



รูปที่ 3.8 การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

3.4 การวิเคราะห์ค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์และคำนวณค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า โดยเมื่อพิจารณาขดลวด 2 ขด ที่อยู่ติดกัน จะพบว่าค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน สามารถหาได้จากสมการพื้นฐานตามสมการที่ (3.1)

$$C = \varepsilon \frac{S}{x} \tag{3.1}$$

เมื่อ C คือ ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน

ε คือ ค่า Dielectric Constant ของตัวกลางที่อยู่ระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน

S คือ พื้นที่ผิวของขดลวดส่วนที่อยู่ติดกัน

x คือ ระยะห่างของขดลวด (ความหนาของตัวกลางที่อยู่ระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน)

โดยสมการที่ (3.1) เป็นสมการพื้นฐานในการหาค่าตัวเก็บประจุเท่านั้น ส่วนวิธีการคำนวณโดยละเอียดสามารถศึกษาได้จาก [13] – [14] ซึ่งสมการแบบละเอียดที่ใช้คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน แสดงดังสมการที่ (3.2) และ (3.3) [13] (รายละเอียดตามภาคผนวก ข.)

$$C_{tt} = \varepsilon_0 \ell_t \left[\frac{\varepsilon_r \theta^*}{\ln \frac{D_O}{D_C}} + \cot\left(\frac{\theta^*}{2}\right) - \cot\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] \tag{3.2}$$

โดยที่

$$\theta^* = \arccos\left(1 - \frac{\ln \frac{D_O}{D_C}}{\varepsilon_r} \right) \tag{3.3}$$

เมื่อ C_{tt} คือ ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน

ε_0 คือ ค่า Dielectric Constant ของอากาศ (8.85×10^{-12})

ε_r คือ ค่า Dielectric Constant ของฉนวนขดลวด (3.9)

ℓ_t คือ ความยาวของขดลวดในการพันขดลวด 1 รอบ

D_O คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (รวมฉนวน)

D_C คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (ไม่รวมฉนวน)

นำค่าต่างๆแทนลงในสมการที่ (3.3) จะได้ว่า

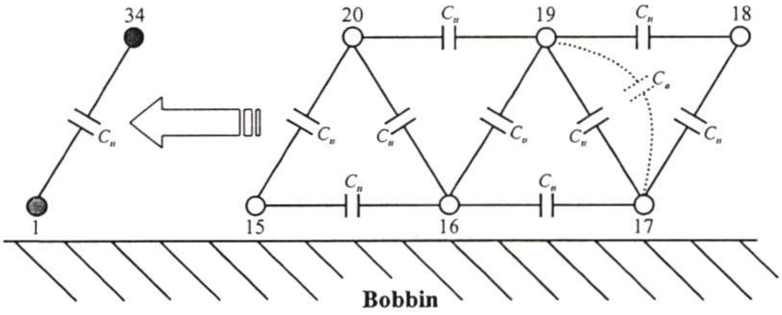
$$\theta^* = \arccos\left(1 - \frac{\ln \frac{0.56}{0.50}}{3.9} \right) = 13.85° = 0.242 \text{ Radius}$$

นำค่า θ^* และค่าอื่นๆแทนในสมการที่ (3.2) จะได้ว่า

$$C_{tt} = 8.85 \times 10^{-12} \times 2\pi \times 7.18 \times 10^{-3} \times \left[\frac{3.9 \times 0.242}{\ln \frac{0.56}{0.50}} + \cot\left(\frac{0.242}{2}\right) - \cot\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] = 5.118 \text{ pF}$$

3.4.1 ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไป

การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไปแสดงดังรูป 3.9 โดยให้ C_{tt} แทนค่าตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวดแต่ละขดที่อยู่ติดกัน และ C_a แทนค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจากการยุบรวมกันระหว่าง C_{tt} ของขดลวดขดที่ 17 และ 18 กับ C_{tt} ของขดลวดขดที่ 18 และ 19



รูปที่ 3.9 การยุบรวมวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป

$$C_a = \frac{C_{tt(17-18)} \times C_{tt(18-19)}}{C_{tt(17-18)} + C_{tt(18-19)}}$$

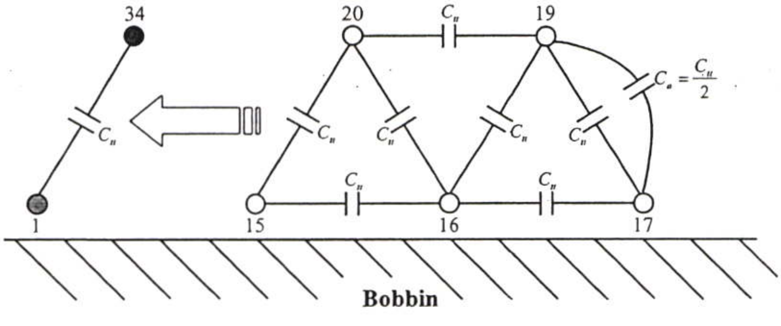
โดยที่

$$C_{tt(17-18)} = C_{tt(18-19)}$$

จะได้ว่า

$$C_a = \frac{C_{tt}}{2}$$

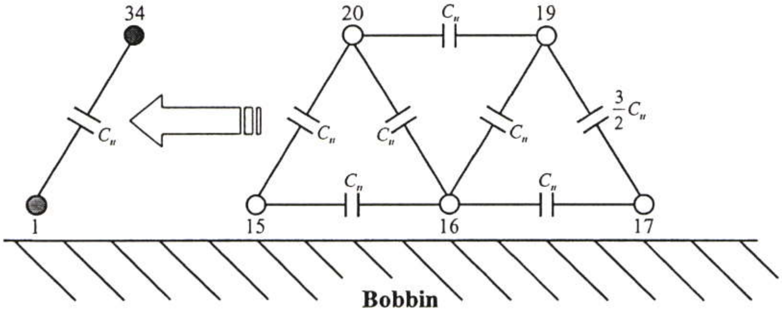
โดยรูปที่ 3.10 แสดงการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวมค่าตัวเก็บประจุระหว่าง C_{tt} ของขดลวดขดที่ 17 และ 18 กับ C_{tt} ของขดลวดขดที่ 18 และ 19 แล้ว หลังจากนั้นทำการยุบรวม C_a กับ C_{tt} ของขดลวดขดที่ 17 และ 19 จะได้วงจรดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวม $C_{tt(17-18)}$ กับ $C_{tt(18-19)}$

ทำการยุบรวม C_a กับ C_{tt} ของขดลวดขดที่ 17 และ 19 จะได้ว่า

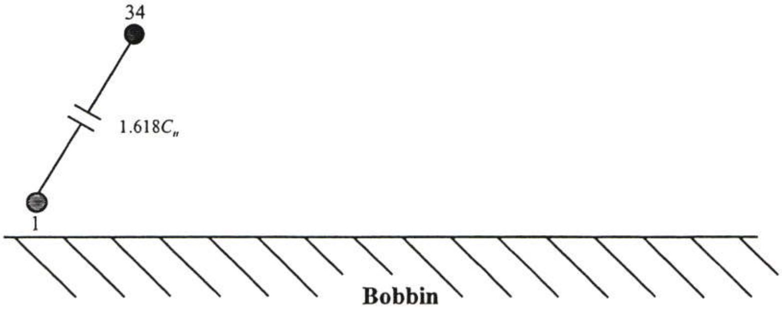
$$C_{(17-19)} = C_{tt} + C_a = C_{tt} + \frac{C_{tt}}{2} = \frac{3C_{tt}}{2}$$



รูปที่ 3.11 การต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวม C_a กับ $C_{tt(17-19)}$

จากนั้นทำการยุบรวมค่าตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวดแต่ละขดที่อยู่ติดกัน จนกระทั่งเหลือแต่ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดขดที่ 1 กับ 34 โดยแสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดขดที่ 1 กับ 34 แสดงดังสมการที่ (3.4)

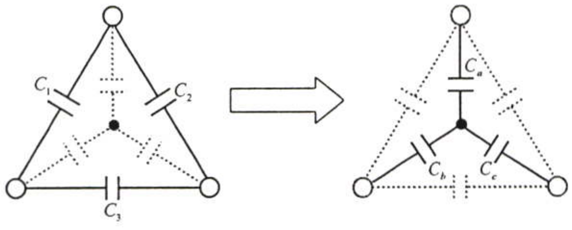
$$C_{(1-34)} = 1.618C_{tt} \tag{3.4}$$



รูปที่ 3.12 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปหลังยุบรวมค่าตัวเก็บประจุทั้งหมด

3.4.2 ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

ในการหาค่าตัวเก็บประจุแฝงของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบก้าวหน้านั้น จำเป็นต้องใช้หลักการเปลี่ยนรูปวงจรแบบ " สตาร์-เดลต้า " (Star-Delta Transform) โดยการต่อวงจรแบบสตาร์-เดลต้า แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะอธิบายวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนรูปวงจรแบบ " สตาร์-เดลต้า " (Star-Delta Transform)

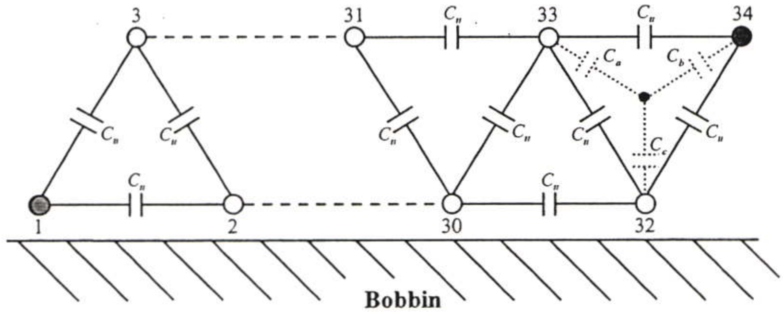
โดยรูปที่ 3.13 เป็นการเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ ซึ่งค่า C_a , C_b และ C_c สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.5), (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ (รายละเอียดตามภาคผนวก ค.)

$$C_a = \frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_1}\times\frac{1}{C_2}} \tag{3.5}$$

$$C_b = \frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_1}\times\frac{1}{C_3}} \tag{3.6}$$

$$C_c = \frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_2}\times\frac{1}{C_3}} \tag{3.7}$$

สำหรับการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า แสดงดังรูป 3.14 โดยให้ C_{tt} แทนค่าตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวดแต่ละขดที่อยู่ติดกัน

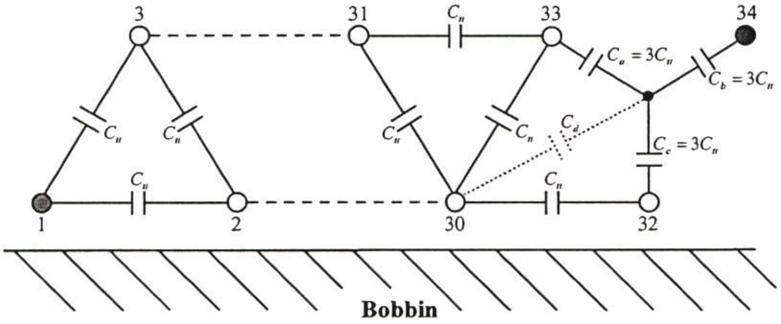


รูปที่ 3.14 การยุบรวมวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ที่ขดลวดขดที่ 32, 33 และ 34 โดยแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (3.5), (3.6) และ (3.7) จะได้ค่า C_a , C_b และ C_c ดังต่อไปนี้

$$C_a = C_b = C_c = \frac{\frac{1}{C_{tt}} + \frac{1}{C_{tt}} + \frac{1}{C_{tt}}}{\frac{1}{C_{tt}} \times \frac{1}{C_{tt}}} = \frac{\frac{3}{C_{tt}}}{\frac{1}{C_{tt}^{\ 2}}} = 3C_{tt} \qquad (3.8)$$

นำค่า C_a , C_b และ C_c ที่ได้จากสมการ (3.8) แทนลงในวงจรในรูปที่ 3.14 จะได้รูปวงจรใหม่ตามรูปที่ 3.15

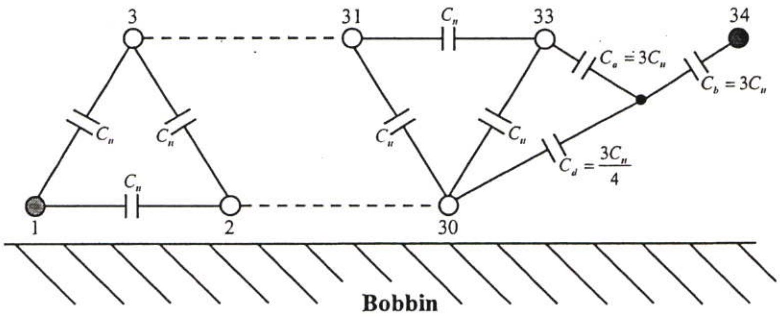


รูปที่ 3.15 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์

จากนั้นทำการยุบรวมวงจรของตัวเก็บประจุแฝงระหว่าง C_{tt} ของขดลวดขดที่ 30 และ 32 กับ C_c จะได้ค่าของ C_d ในวงจรตามรูปที่ 3.15

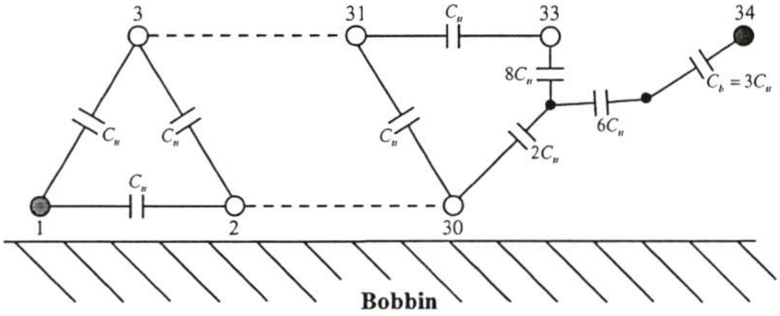
$$C_d = \frac{C_{tt(30-32)} \times C_c}{C_{tt(30-32)} + C_c} = \frac{C_{tt} \times 3C_{tt}}{C_{tt} + 3C_{tt}} = \frac{3C_{tt}^{\ 2}}{4C_{tt}} = \frac{3C_{tt}}{4}$$

นำค่า C_d ที่ได้แทนลงในวงจรรูปที่ 3.15 จะได้รูปการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำใหม่ตามรูปที่ 3.16



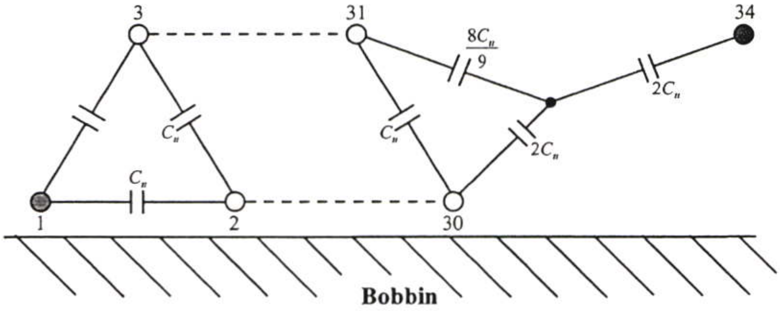
รูปที่ 3.16 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวม C_{tt} ของขดลวดขดที่ 30 และ 32 กับ C_c

จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ของค่าตัวเก็บประจุ C_a , C_d และ C_{tt} ระหว่างขดลวดขดที่ 30 กับ 33 จะได้รูปการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำใหม่ตามรูปที่ 3.17



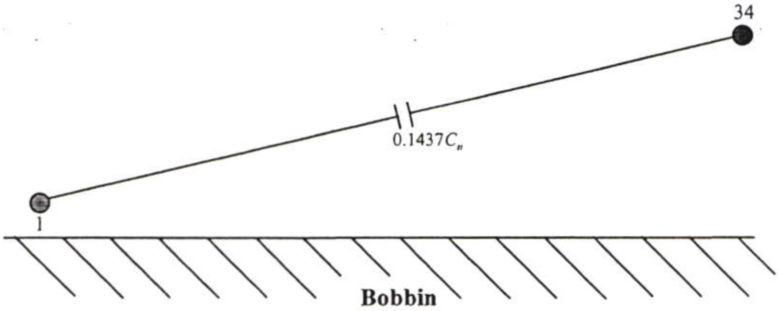
รูปที่ 3.17 วงจรตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนจากแบบเดลต้าไปเป็นสตาร์ของ C_a, C_d และ $C_{tt(30-33)}$

จากนั้นทำการยุบรวมวงจรของตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออนุกรมกันตามในรูปที่ 3.17 จะได้รูปการต่อวงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำใหม่ตามรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงหลังจากยุบรวมค่าตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน

จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปการต่อวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ และยุบรวมค่าตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน จนกระทั่งเหลือแต่ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดขดที่ 1 กับ 34 ซึ่งจะได้วงจรดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรของตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าหลังยุบรวมตัวเก็บประจุทั้งหมด

โดยค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดขดที่ 1 กับ 34 จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

$$C_{(1-34)} = 0.1437C_{tt} \tag{3.9}$$

3.5 บทสรุป

จากหัวข้อข้างต้นทำให้เราทราบค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวด 2 ขด ที่อยู่ติดกัน (C_{tt}) และทราบสมการสำหรับใช้ในการหาค่าตัวเก็บประจุแฝงรวม ($C_{(1-34)}$) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยในงานวิจัยนี้ค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวด 2 ขด ที่อยู่ติดกันจะมีค่าเท่ากับ 5.118 pF

โดยตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปจะสามารถหาค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมได้จากสมการที่ (3.4) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$C_{(1-34)} = 1.618C_{tt} = 1.618 \times 5.118 = 8.281 \text{ pF}$$

ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าจะสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมได้จากสมการที่ (3.9) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$C_{(1-34)} = 0.1437C_{tt} = 0.1437 \times 5.118 = 0.735 \text{ pF}$$

จากนั้นนำค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้าไปคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (2.2) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการคำนวณได้มาจากการวัดค่าโดยใช้วิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของ Hewlett-Packard รุ่นHP4194A โดยใช้โหมดการวัดแบบ $|Z|$ กับ L_s ที่ความถี่เท่ากับ 1.54 MHz โดยสาเหตุที่เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่นี้เนื่องมาจากค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเปลี่ยนแปลงของความถี่ [15] - [18] ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่เท่ากับ 1.54 MHz ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ 1.2 mH

จะได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบทั่วไปเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{(1-34)}C_{(1-34)}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.2\times10^{-3}\times8.281\times10^{-12}}} = 1.597 \text{ MHz}$$

และได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{(1-34)}C_{(1-34)}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.2\times10^{-3}\times0.735\times10^{-12}}} = 5.359 \text{ MHz}$$

ซึ่งค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลของการวัดกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ในหัวข้อที่ 3.3

บทที่ 4
การจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำและวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSPICE

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการจำลองวงจรโดยอาศัยการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป OrCAD Pspice เพื่อทำการเปรียบเทียบผลระหว่างจากการวัดโดยอุปกรณ์เครื่องมือวัดกับการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในหัวข้อ 4.2 จะเป็นการจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า ซึ่งจะใช้โปรแกรม OrCAD Pspice จำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันทั้ง 2 แบบ เพื่อหาวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่มีกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์เหมือนกับผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์

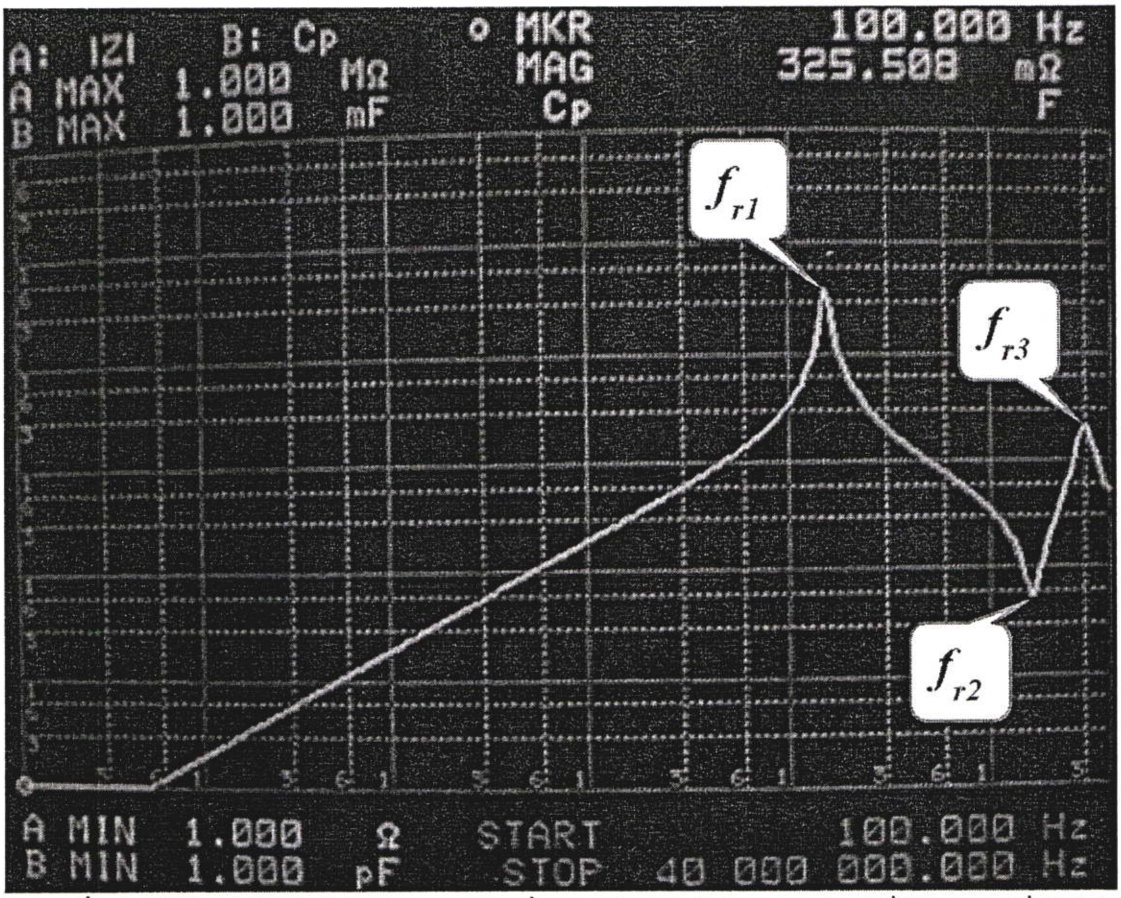
ส่วนในหัวข้อ 4.3 จะเป็นการอธิบายถึงวิธีการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยนำวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่หาได้จากหัวข้อที่ 4.2 มาใช้ในการจำลอง เพื่อเปรียบเทียบผลของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้มาจากการวัดโดยเครื่องมือวัด ส่วนในหัวข้อที่ 4.4 จะเป็นส่วนของบทสรุปในบทที่ 4

4.2 การจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีการนำมาใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะมีหน้าที่ในการจัดเก็บและคายพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวิธีการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำและกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำทั้งที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า ได้ทำการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ส่วนในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายวิธีการในการหาวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้งแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า

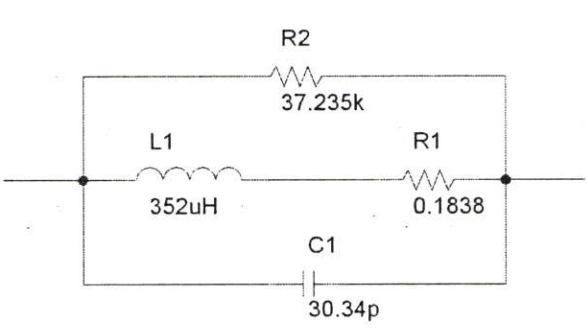
4.2.1 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป

กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่ายอดเกิดขึ้นที่ความถี่ f_{r1} และ f_{r3} ส่วนที่ความถี่ f_{r2} จะเป็นจุดที่ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงต่ำสุดก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 4.1 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

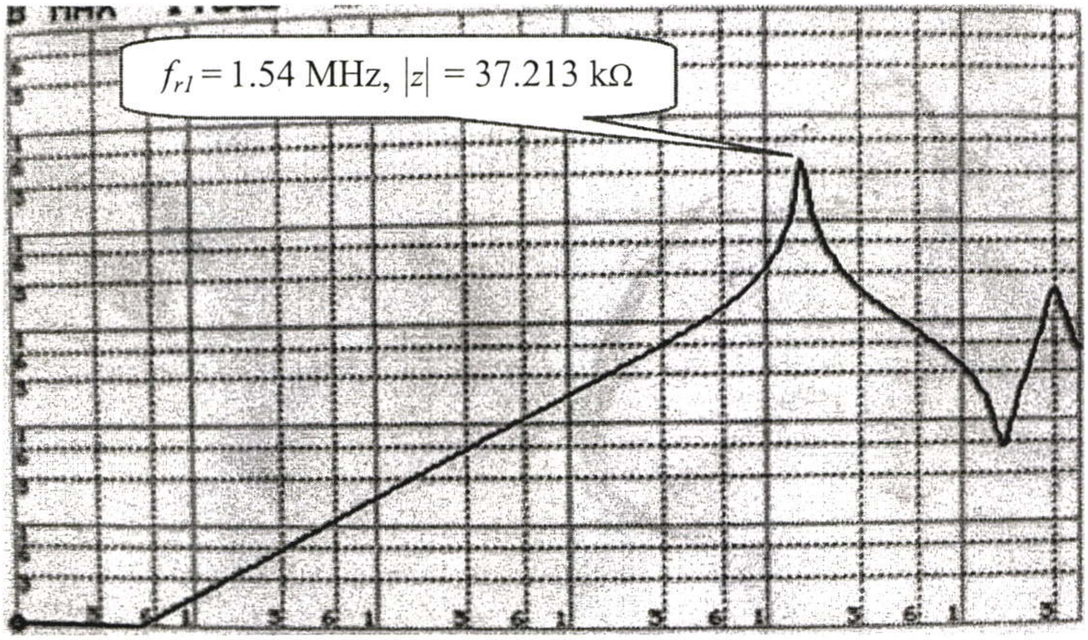
โดยวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดในช่วงความถี่ต่ำกว่า 10 MHz แสดงดังรูปที่ 4.2 และกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป OrCAD Pspice แสดงดังรูปที่ 4.3



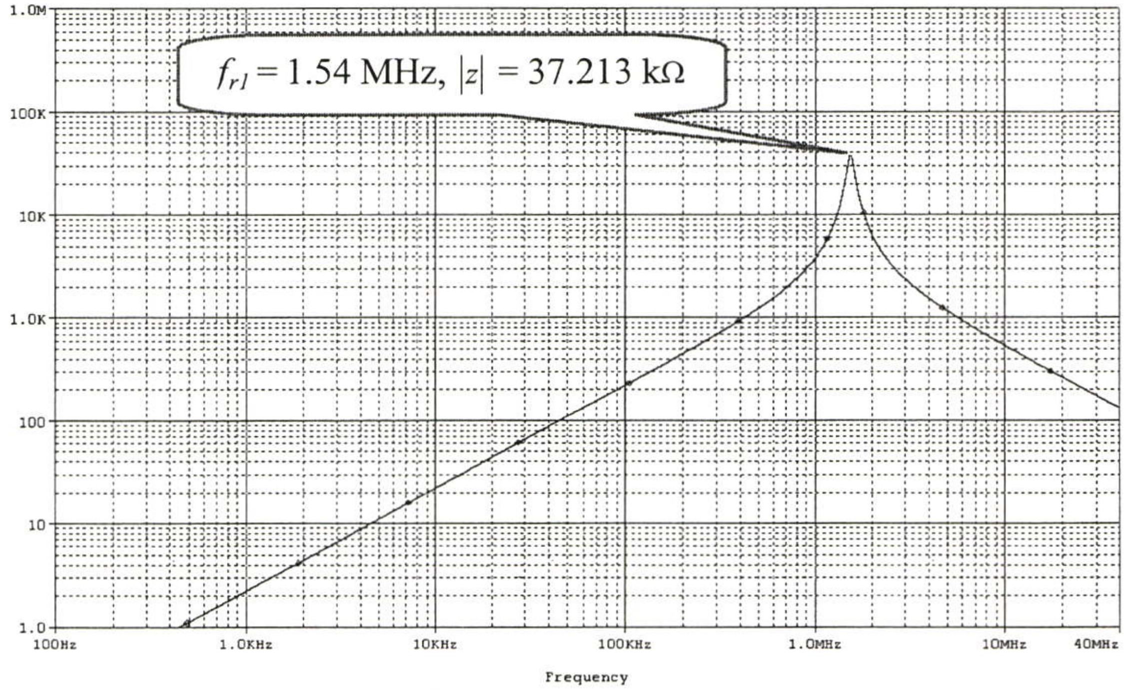
รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปที่เหมาะสมกับผลจากการวัด (ที่ความถี่ f_{r1})

ซึ่งวงจรสมมูลตามรูปที่ 4.2 จะประกอบไปด้วย C1, L1, R1 และ R2 โดยตัวต้านทาน R1 ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L1 ใช้สำหรับปรับค่าอิมพีแดนซ์ของกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ได้จาก

การจำลองให้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดในช่วงความถี่ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความถี่ 100 Hz ส่วนตัวต้านทาน R2 ใช้สำหรับปรับค่าอิมพีแดนซ์ของกราฟคุณลักษณะเฉพาะในช่วงความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 (f_{r1}) ซึ่งเป็นการเรโซแนนซ์กันแบบขนานของ L1 และ C1



(ก) ผลจากการวัด

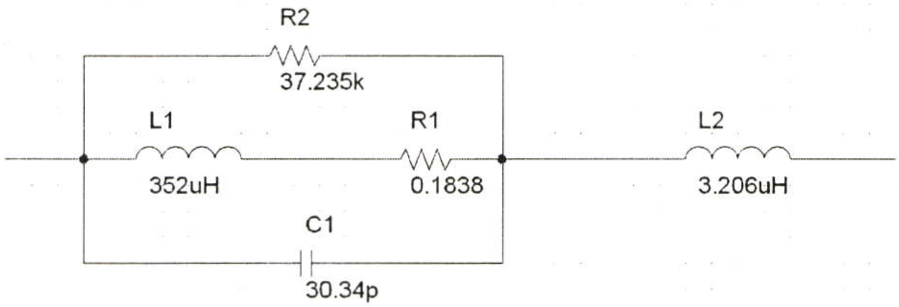


(ข) ผลจากการจำลอง

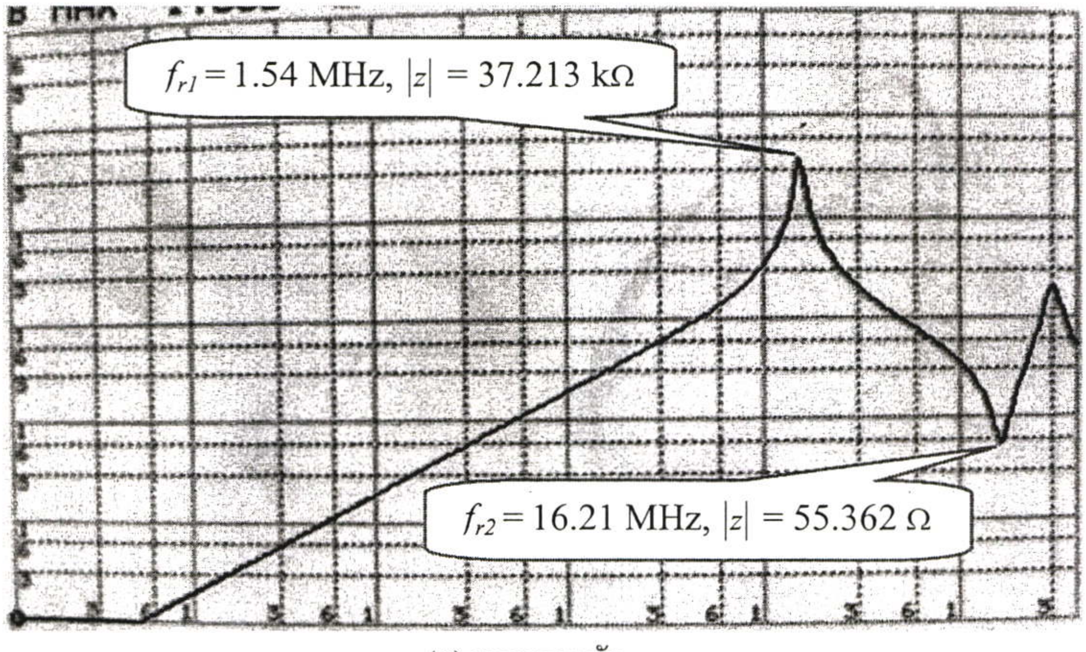
รูปที่ 4.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป และการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.2

จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองดังรูปที่ 4.3 พบว่า กราฟคุณลักษณะเฉพาะในช่วงความถี่ f_{r2} ยังไม่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัด ดังนั้นวงจรสมมูลตามรูปที่ 4.2 จึงยังไม่ใช่วงจรสมมูลที่เหมาะสมของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป จึงทำการใส่ตัวเหนี่ยวนำ L2 เพิ่มเข้าไปในวงจรสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์กันแบบอนุกรมระหว่าง L2 และ C1 ที่ความถี่ f_{r2} ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำ L2 สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.2) เนื่องจากทราบค่า C1 เรียบร้อยแล้ว

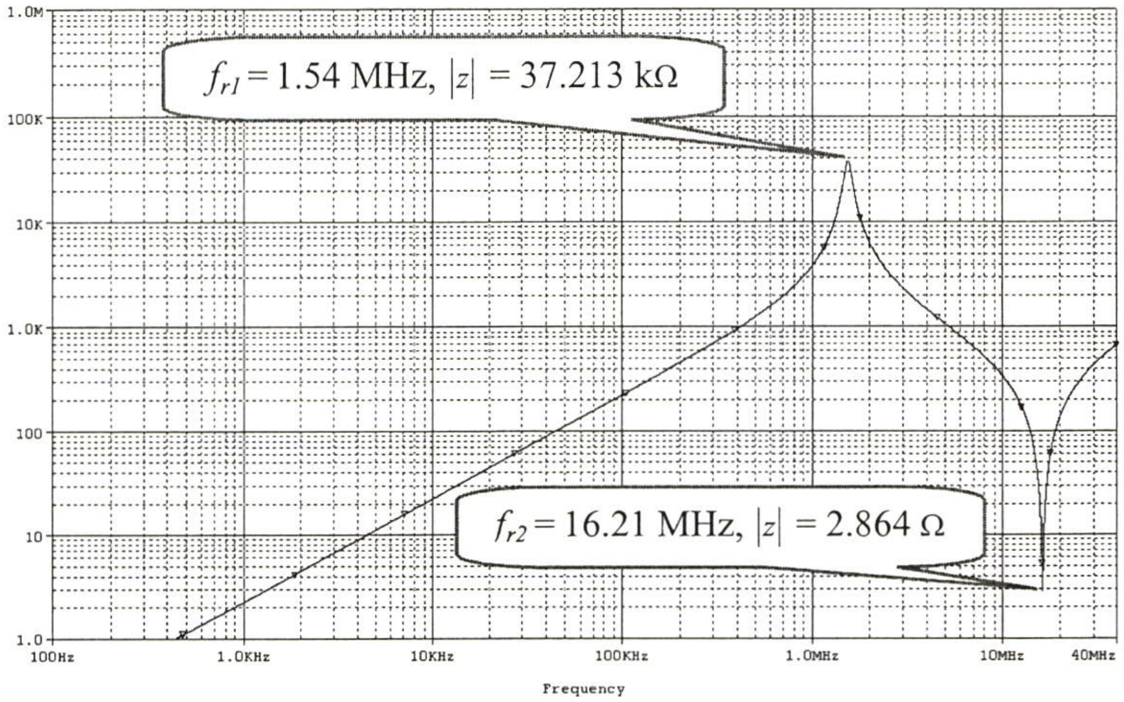
โดยรูปที่ 4.5 จะเป็นกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์จากการจำลองวงจรสมมูลในรูปที่ 4.4 จะพบว่าที่ความถี่ f_{r2} ผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ผลที่ได้ก็ยังไม่ใกล้เคียงกันในช่วงความถี่สูงที่ประมาณ 30 MHz



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปที่เหมาะสมกับผลจากการวัด (ที่ความถี่ f_{r2})



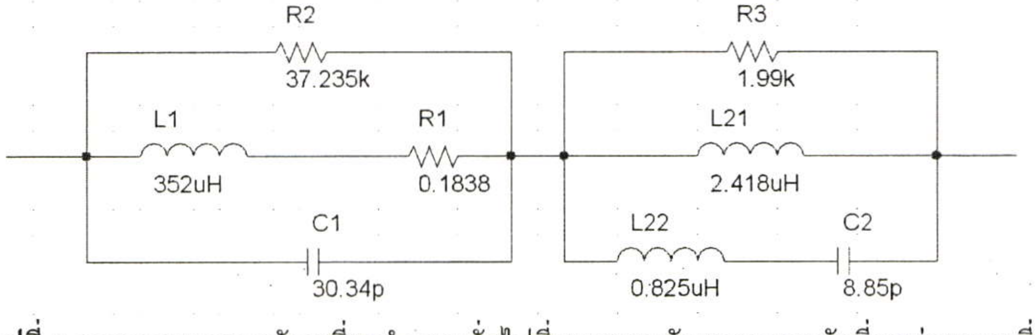
(ก) ผลจากการวัด



(ข) ผลจากการจำลอง

รูปที่ 4.5 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป และการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.4

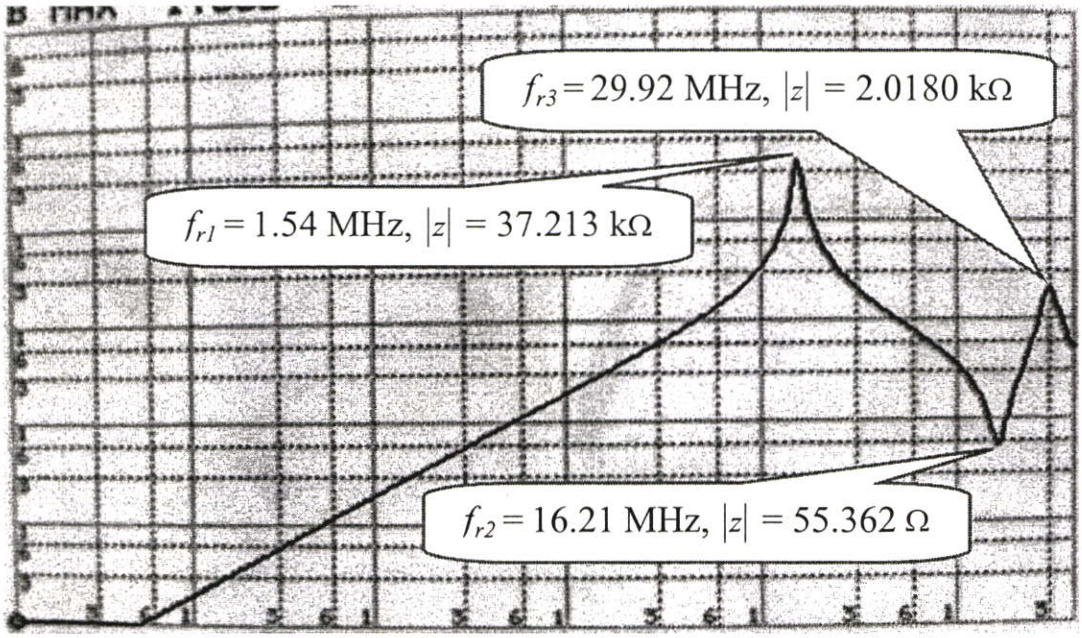
ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ f_{r3} จะได้มาจากการใส่ตัวเก็บประจุ C2 เพิ่มเข้าไปในวงจรสมมูล เพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์กันแบบขนานครั้งที่ 2 แต่เนื่องมาจากความถี่ f_{r2} และ f_{r3} มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการใส่ตัวเก็บประจุ C2 จะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ f_{r2} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม



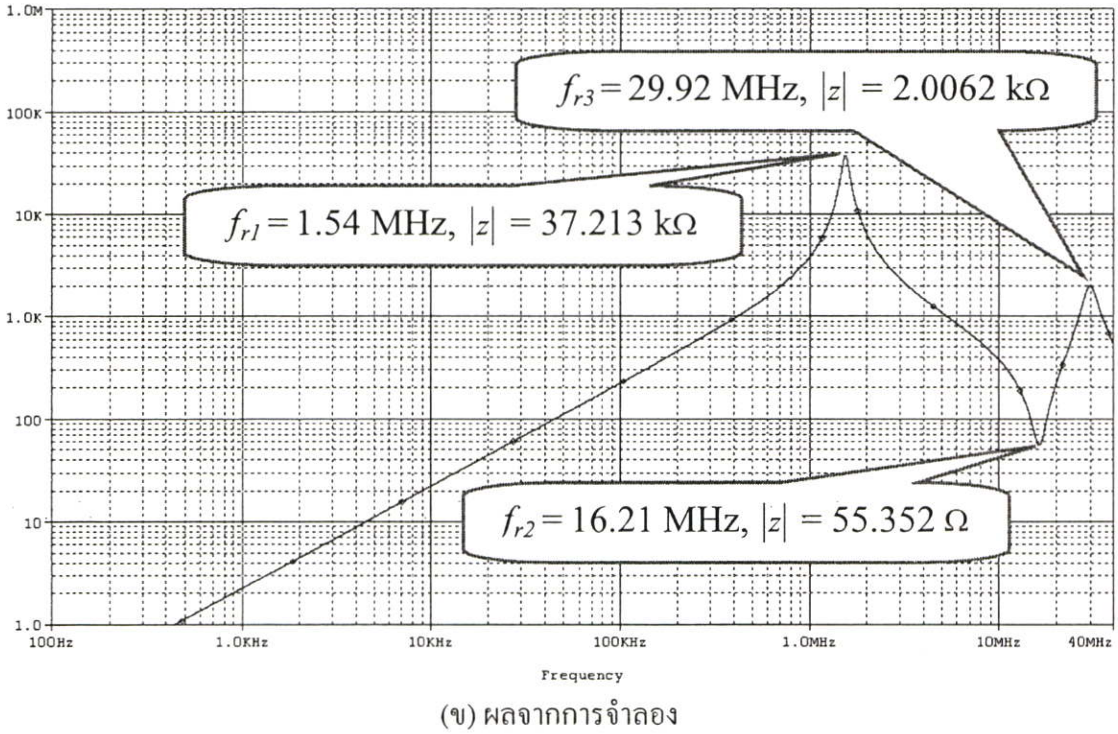
รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปที่เหมาะสมกับผลจากการวัดที่ทุกช่วงความถี่

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับค่าตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทาน ในวงจรสมมูลให้เหมาะสม ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการแบ่งตัวเหนี่ยวนำ L2 ออกเป็น 2 ส่วน คือ L21 และ L22 เพราะฉะนั้นจะได้วงจรสมมูลที่เหมาะสมกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปดังรูปที่ 4.6 โดยวงจรสม

มูลดังกล่าวจะมีกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ได้จากการวัดและการจำลองมีความใกล้เคียงกันตั้งแต่ช่วงความถี่ต่ำที่ 100 Hz จนถึงช่วงความถี่สูงที่ 40 MHz โดยจะนำวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 4.6 นี้ ไปใช้ในการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป



(ก) ผลจากการวัด

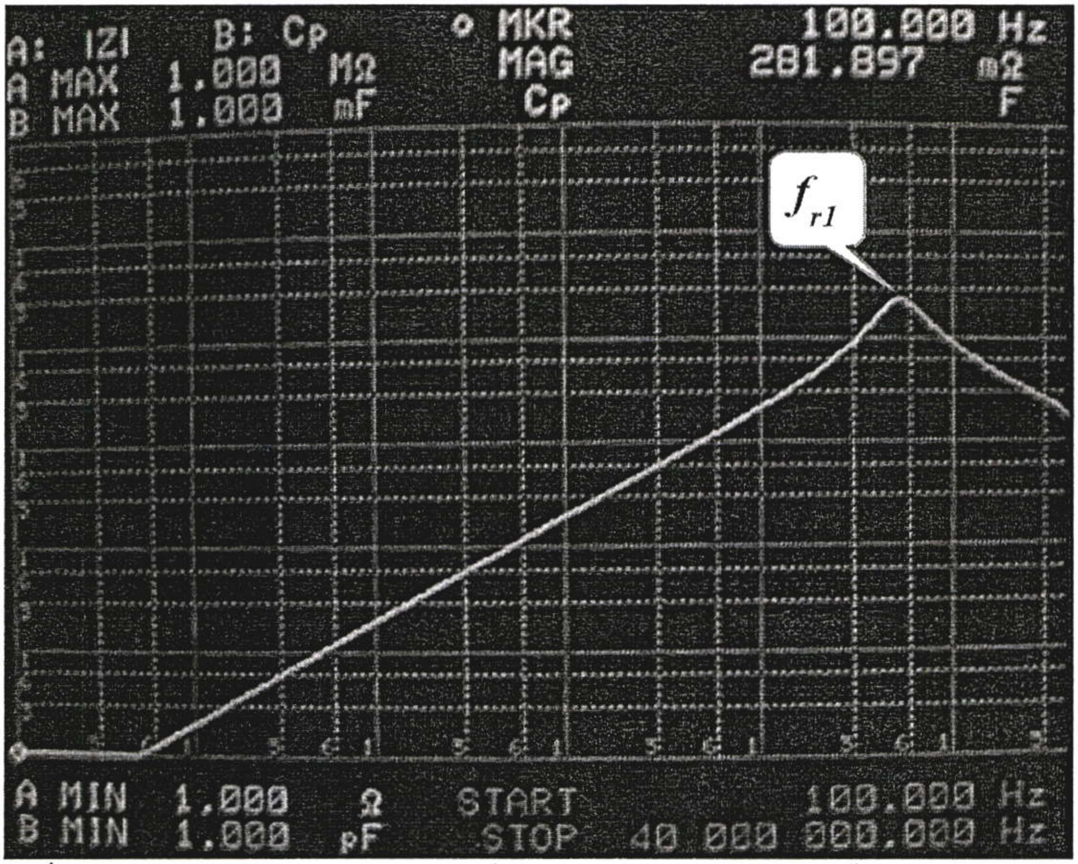


(ข) ผลจากการจำลอง

รูปที่ 4.7 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.6

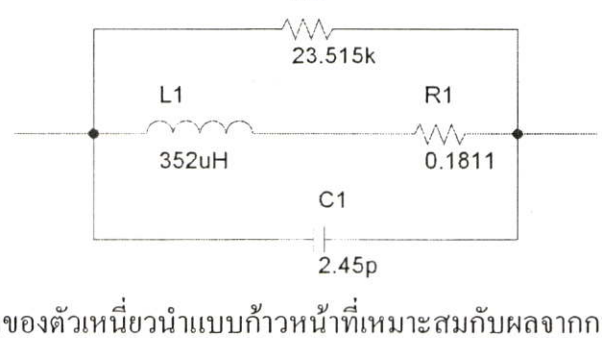
4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่ายอดเกิดขึ้นที่ความถี่ f_{r1} เพียงจุดเดียวเท่านั้น

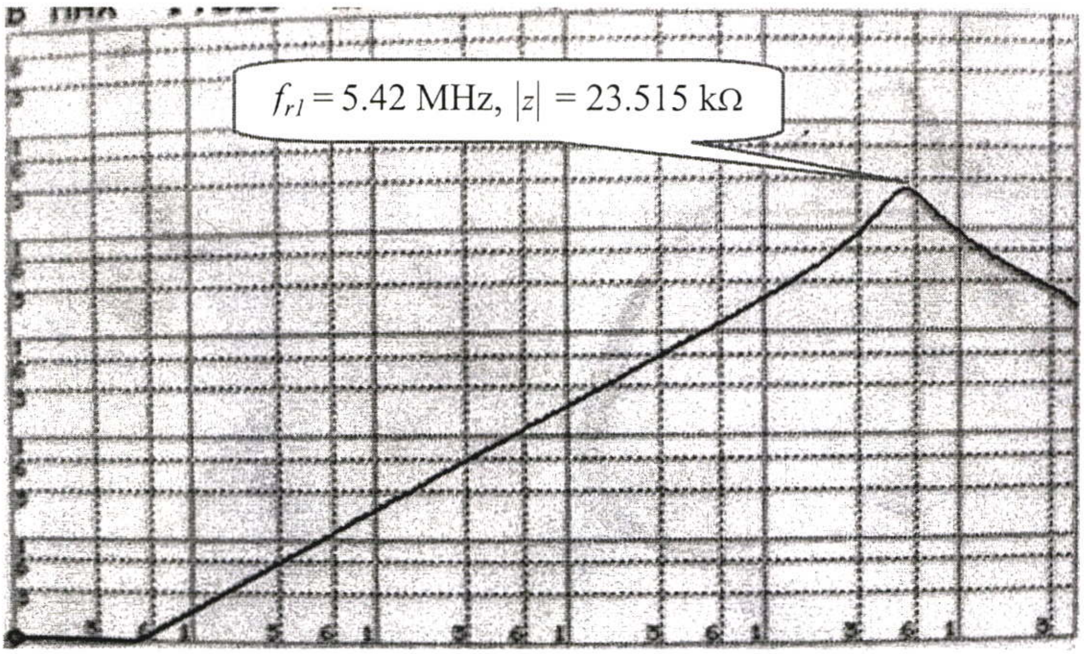


รูปที่ 4.8 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

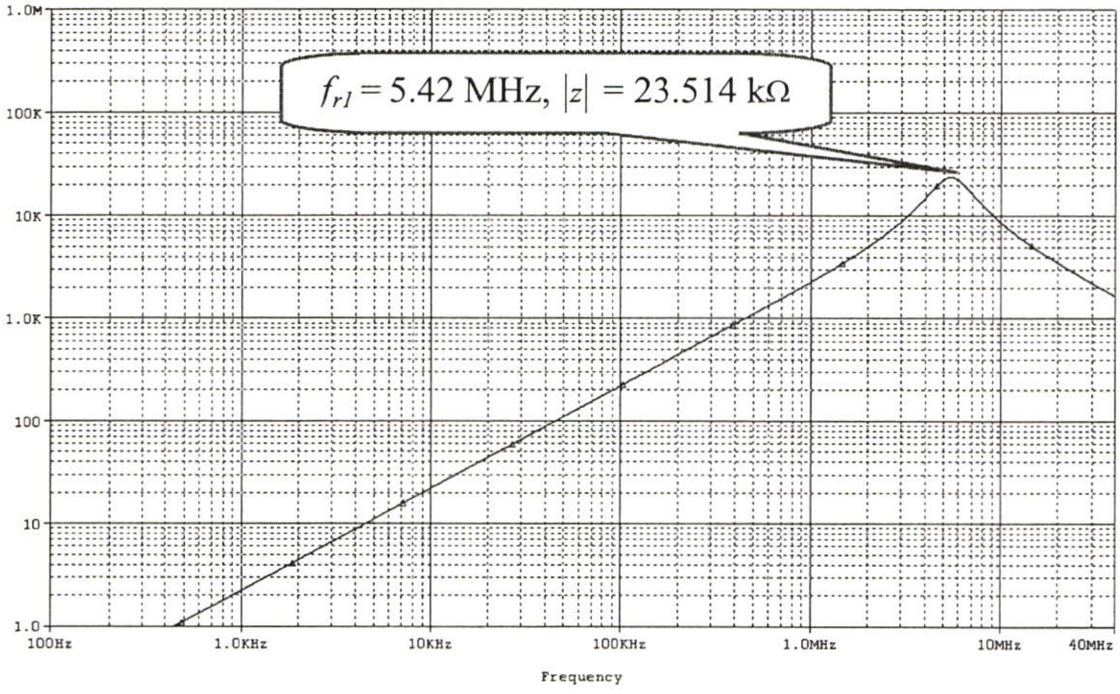
ดังนั้นวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะจะมีการต่อวงจรเหมือนกับวงจรสมมูลในรูปที่ 4.2 โดยจะมีความแตกต่างกันเฉพาะค่าของตัวเก็บประจุ C1 ค่าความต้านทาน R1 และ R2 เท่านั้น ซึ่งวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าที่เหมาะสมกับผลจากการวัดที่ทุกช่วงความถี่



(ก) ผลจากการวัด



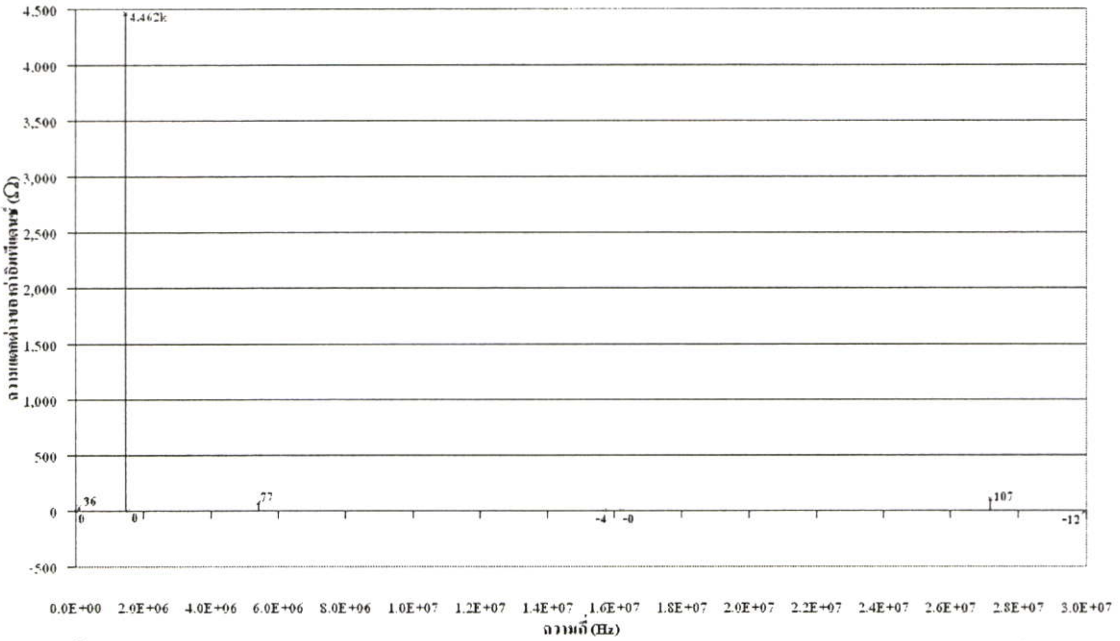
(ข) ผลจากการจำลอง

รูปที่ 4.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและการจำลองจากวงจรในรูปที่ 4.9

จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่ากราฟคุณลักษณะเฉพาะที่ได้จากการวัดและการจำลองมีความใกล้เคียงกันตั้งแต่ช่วงความถี่ต่ำที่ 100 Hz จนถึงช่วงความถี่สูงที่ 40 MHz ดังนั้นวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 4.9 นี้ จึงสามารถนำไปใช้ในการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าได้

ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

ค่าความถี่	ค่าอิมพีแดนซ์		ค่าความแตกต่างระหว่างผลจากการจำลองกับการวัด
	ที่ได้จากการจำลอง	ที่ได้จากการวัด	
100 Hz	288.741 mΩ	288.737 mΩ	0.004 mΩ
100 kHz	223.619 Ω	187.477 Ω	36.142 Ω
1.49 MHz	30.174 kΩ	25.712 kΩ	4.462 kΩ
1.54 MHz	37.213 kΩ	37.213 kΩ	0 Ω
5.42 MHz	968.279 Ω	890.896 Ω	77.383 Ω
15.70 MHz	61.796 Ω	65.731 Ω	-3.935 Ω
16.21 MHz	55.352 Ω	55.362 Ω	-0.010 Ω
27.16 MHz	1.274 kΩ	1.167 kΩ	0.107 kΩ
29.92 MHz	2.006 kΩ	2.018 kΩ	-0.012 kΩ



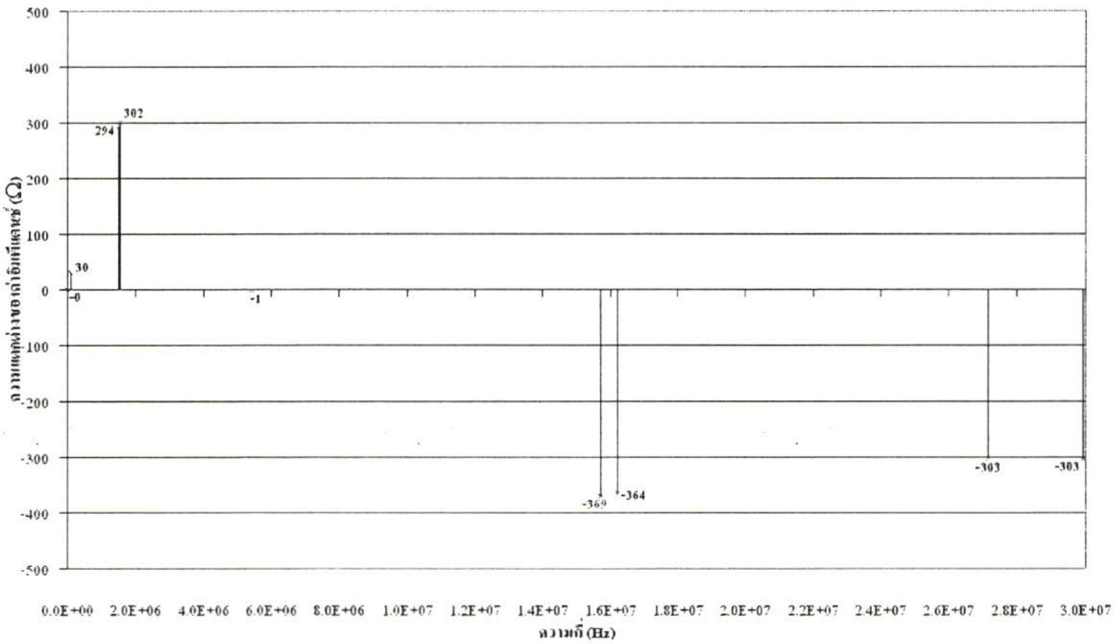
รูปที่ 4.11 กราฟความแตกต่างระหว่างผลจากการวัดกับการจำลองของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

จากผลของกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดและการจำลองดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้สามารถสรุปผลของความแตกต่างระหว่างผลจากการวัดกับผลจากการจำลอง ได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 โดยในตารางที่ 4.1 จะเป็นผลความแตกต่างของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป ส่วนในตารางที่ 4.2 จะเป็นผลความแตกต่างของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองและการวัดมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าแตกต่างกันมากที่สุด คือ 4.462 kΩ ที่ความถี่ 1.49 MHz ซึ่งจะสามารถนำมาเปรียบเทียบผลของความแตกต่างในรูปแบบของกราฟได้ดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

ค่าความถี่	ค่าอิมพีแดนซ์		ค่าความแตกต่างระหว่างผลจากการจำลองกับการวัด
	ที่ได้จากการจำลอง	ที่ได้จากการวัด	
100 Hz	285.852 mΩ	285.875 mΩ	-0.023 mΩ
100 kHz	221.232 Ω	191.395 Ω	29.837 Ω
1.49 MHz	3.525 kΩ	3.231 kΩ	0.294 kΩ
1.54 MHz	3.660 kΩ	3.358 kΩ	0.302 kΩ
5.42 MHz	23.514 kΩ	23.515 kΩ	-0.001 kΩ
15.70 MHz	4.606 kΩ	4.975 kΩ	-0.369 kΩ
16.21 MHz	4.431 kΩ	4.795 kΩ	-0.364 kΩ
27.16 MHz	2.477 kΩ	2.780 kΩ	-0.303 kΩ
29.92 MHz	2.235 kΩ	2.538 kΩ	-0.303 kΩ

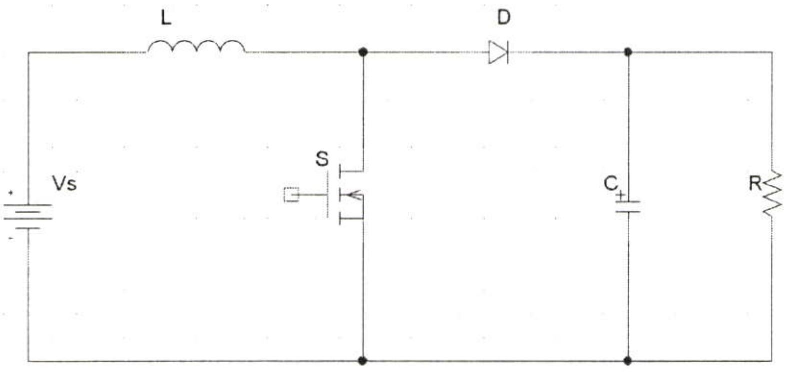


รูปที่ 4.12 กราฟความแตกต่างระหว่างผลจากการวัดกับการจำลองของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

จากตารางที่ 4.2 จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองและการวัดมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าแตกต่างกันมากที่สุด คือ 0.369 kΩ ที่ความถี่ 15.70 MHz ซึ่งจะสามารถนำมาเปรียบเทียบผลของความแตกต่างในรูปแบบของกราฟได้ดังรูปที่ 4.12

4.3 การจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรสวิตชิ่งความถี่สูงที่มีการทำงานในลักษณะที่ช่วยยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้สูงขึ้นจากค่าแรงดันไฟฟ้าเดิมได้โดยที่ไม่ต้องใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า วงจรจึงมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งแสดงองค์ประกอบต่างๆของวงจรจะแสดงในรูปที่ 4.13 [19] - [21]



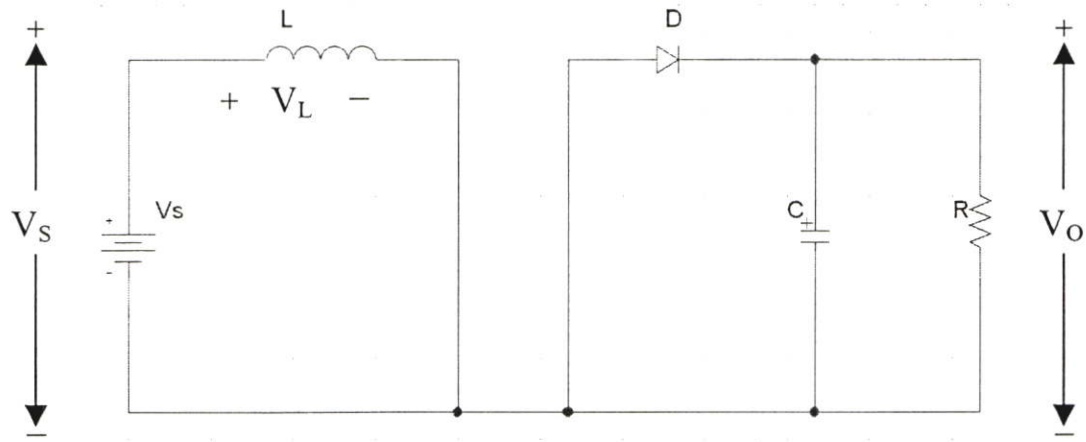
รูปที่ 4.13 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

4.3.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในทางอุดมคติ

ในการวิเคราะห์วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ทางอุดมคติ จะพิจารณาเงื่อนไขของการทำงานดังนี้ คือ

1. เมื่อมอสเฟต S ปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตจะเป็นศูนย์ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟตจะเป็นศูนย์ เมื่อมอสเฟตเปิดวงจร
2. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวไดโอด D เป็นศูนย์ เมื่อไดโอดอยู่ในสภาวะนำกระแส และกระแส ไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดจะเป็นศูนย์ เมื่อไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับ
3. ช่วงเวลาที่ใช้ในการปิดและเปิดวงจรของตัวมอสเฟตและไดโอด มีค่าเท่ากับศูนย์
4. อุปกรณ์ทุกตัวที่ใช้ในวงจรจะไม่มีการสูญเสียใดๆเกิดขึ้น ในขณะที่วงจรมีการทำงาน
5. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ. ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ โดยแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากับศูนย์

6. ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C มีขนาดใหญ่มาก มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าคงที่
7. กำหนดให้ความถี่ในการปิดและเปิดวงจรมีค่าคงที่ และให้ T แทนคาบเวลาในการปิดและเปิดวงจร ดังนั้นคาบเวลาในการปิดวงจรจะเท่ากับ DT และคาบเวลาในการเปิดวงจรจะเท่ากับ (1 - D)T โดย D คือค่าดิวตี้เรโช (Duty Ratio)



รูปที่ 4.14 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์ปิดวงจร

ก) กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์ปิดวงจร

วงจรสมมูลของบูสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์ปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ V_S และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_S และตัวเหนี่ยวนำ L ดังสมการที่ (4.1)

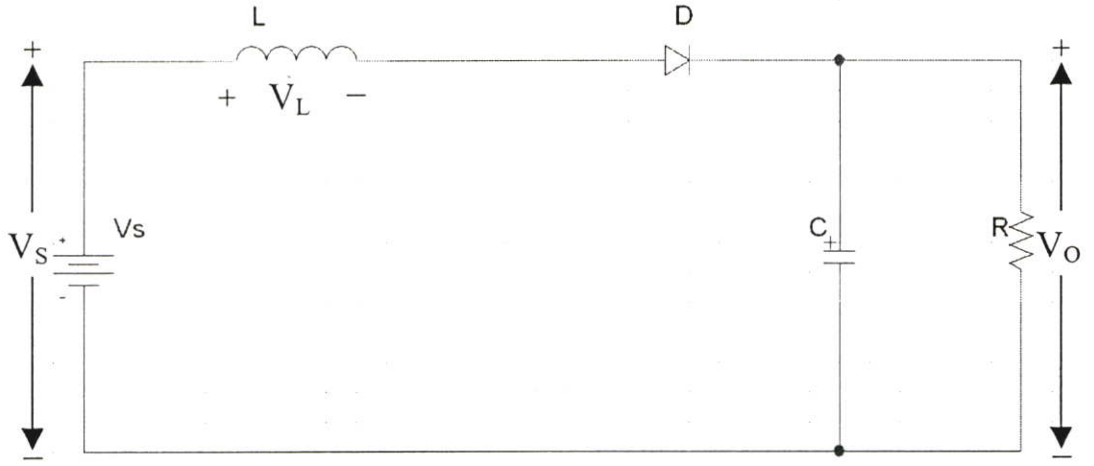
$$L\frac{di_L}{dt} = v_S(t) \tag{4.1}$$

จากสมการที่ (4.1) ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_S มีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาจะมีค่าคงที่ ดังสมการที่ (4.2)

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_S}{L} \tag{4.2}$$

เมื่อช่วงเวลา DT เป็นช่วงระยะเวลาที่สวิตช์ปิดวงจร ดังนั้นจึงสามารถแทนค่า Δt = DT ลงในสมการที่ (4.2) จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์ปิดวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ (4.3)

$$\Delta I_L = \frac{V_S}{L} \times (DT) \tag{4.3}$$



รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์เปิดวงจร

ข) กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์เปิดวงจร

วงจรสมมูลของบูสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์เปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าดังสมการที่ (4.4)

$$v_L = V_S - V_O \tag{4.4}$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาจะมีค่าติดลบ ดังแสดงในสมการที่ (4.5)

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_S - V_O}{L} \tag{4.5}$$

เมื่อช่วงเวลา (1 - D)T เป็นช่วงระยะเวลาที่สวิตช์เปิดวงจร ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์เปิดวงจร สามารถหาได้จากสมการที่ (4.6)

$$\Delta I_L = \frac{V_S - V_O}{L} \times (1 - D)T \tag{4.6}$$

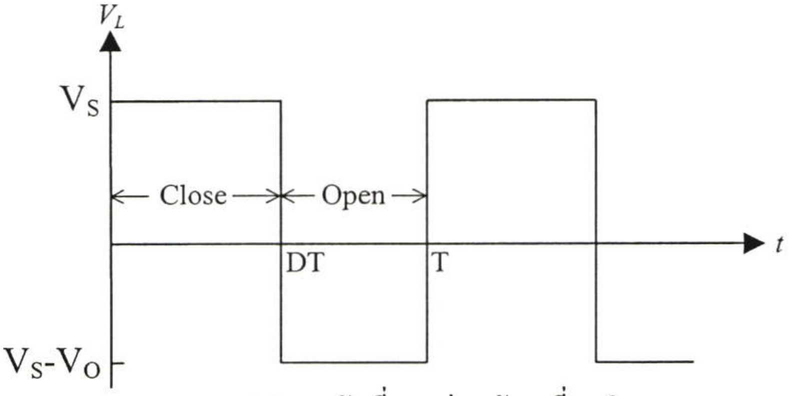
เมื่อผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำในแต่ละช่วงคาบเวลา T มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่าผลรวมของ ΔI_L ในสมการที่ (4.3) และ (4.6) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (4.7)

$$\frac{V_S}{L} \times DT + \frac{V_S - V_O}{L} \times (1-D)T = 0 \tag{4.7}$$

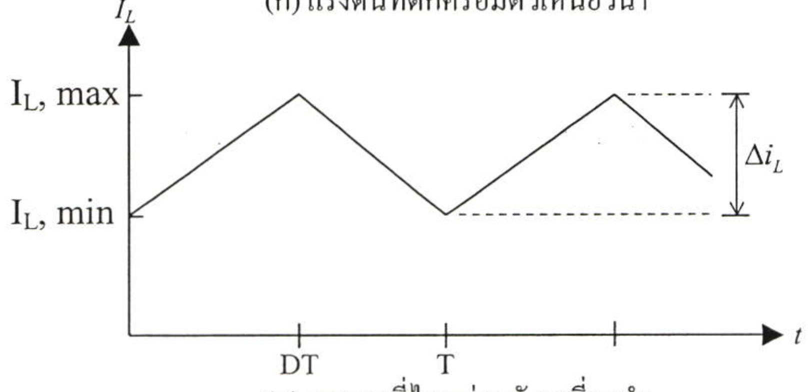
จากสมการที่ (4.7) เมื่อทำการปรับสมการให้เป็นรูปอย่างง่าย จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ดังสมการที่ (4.8)

$$V_O = \frac{V_S}{1-D} \tag{4.8}$$

จากสมการที่ (4.8) จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเสมอ เนื่องจากค่า D จะมีค่าอยู่ในช่วง $0 < D < 1$ โดยแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อ $D = 0$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อ $D = 1$ ซึ่งโดยปรกติค่า D จะมีค่าอยู่ระหว่าง $0.1 < D < 0.9$



(ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



(ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.16 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของตัวเหนี่ยวนำขณะที่สวิตช์ปิดและเปิดวงจร

สำหรับค่ากระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำ สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกับกำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดตัวต้านทาน โดยกำลังไฟฟ้าขาออก (P_O) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.9)

$$P_O = \frac{{V_O}^2}{R} \tag{4.9}$$

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.10)

$$P_S = V_S \times I_L \tag{4.10}$$

ในทางอุดมคติ กำลังไฟฟ้าขาเข้าจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาออก จะได้ว่าสมการที่ (4.9) มีค่าเท่ากับสมการที่ (4.10) เพราะฉะนั้นค่ากระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.11)

$$I_L = \frac{{V_O}^2}{V_S \times R} \tag{4.11}$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าขาออก $I_O = \frac{V_O}{R}$ และแรงดันไฟฟ้าขาออก $V_O = \frac{V_S}{1-D}$, โดยเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4.11) จะทำให้ได้สมการของค่ากระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (4.12) เมื่อ $0 < D < 1$ ซึ่งจะพบว่า $I_L > I_O$ เสมอ

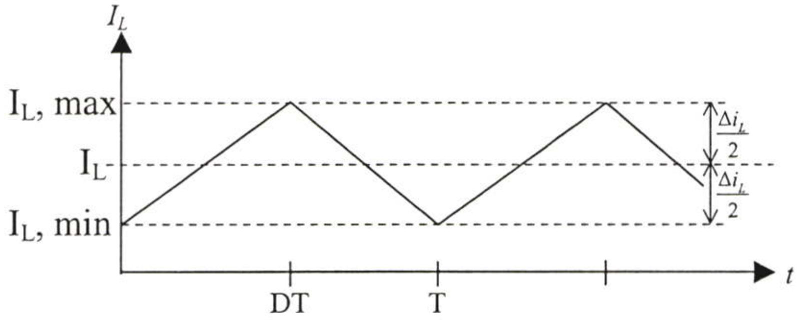
$$I_L = \frac{I_O}{1-D} \tag{4.12}$$

4.3.2 การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

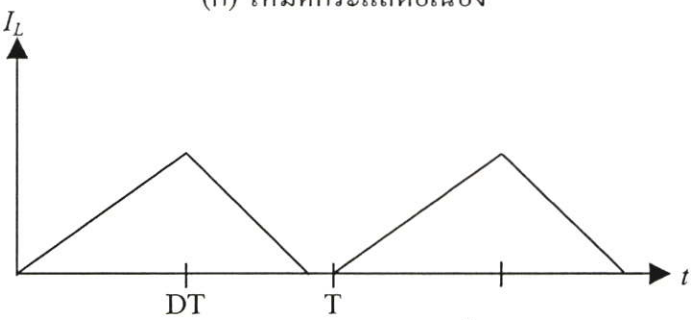
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงโหมดการทำงาน และเงื่อนไขในการเปลี่ยนโหมดการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จากโหมดกระแสต่อเนื่องไปเป็นโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง โดยรูปที่ 4.17 จะเป็นรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในโหมดการทำงานต่างๆของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่อง คือ การทำงานในลักษณะที่กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีการเก็บและคายพลังงานอย่างต่อเนื่อง จนไม่มีช่วงเวลาที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง คือ การทำงานใน

ลักษณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีช่วงเวลาที่มีค่าตกลงเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ก) และ 4.17 (ข) ตามลำดับ



(ก) โหมดกระแสต่อเนื่อง



(ข) โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในโหมดการทำงานต่างๆของบูสต์คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.17 (ก) จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลา จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างค่า I_L,max กับ I_L,min โดยจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.13) และ (4.14) ตามลำดับ

$$I_L,\max = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} \tag{4.13}$$

$$I_L,\min = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \tag{4.14}$$

เงื่อนไขของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง คือ $I_L > \frac{\Delta I_L}{2}$ เพราะฉะนั้นที่จุดเชื่อมต่อระหว่างโหมดกระแสต่อเนื่องกับโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง จะได้สมการของ I_L ดังสมการที่ (4.15)

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} \tag{4.15}$$

แทนค่าสมการที่ (4.8) ลงในสมการที่ (4.11) จะได้สมการของ I_L ดังแสดงในสมการที่ (4.16)

$$I_L = \frac{V_S}{(1-D)^2 \times R} \tag{4.16}$$

แทนค่า I_L จากสมการที่ (4.16) และค่า ΔI_L จากสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.13) และ (4.14) จะได้สมการของ $I_L,\max$ และ $I_L,\min$ ดังแสดงในสมการที่ (4.17) และ (4.18) ตามลำดับ

$$I_L,\max = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} + \frac{(DT)V_S}{2L} \tag{4.17}$$

$$I_L,\min = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{(DT)V_S}{2L} \tag{4.18}$$

จากสมการที่ (4.17) และ (4.18) จะได้ว่า วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง เมื่อองค์ประกอบต่างๆของวงจรเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (4.19) หรือ (4.20) คือ

$$\frac{V_S}{(1-D)^2 R} > \frac{(DT)V_S}{2L} \tag{4.19}$$

หรือ

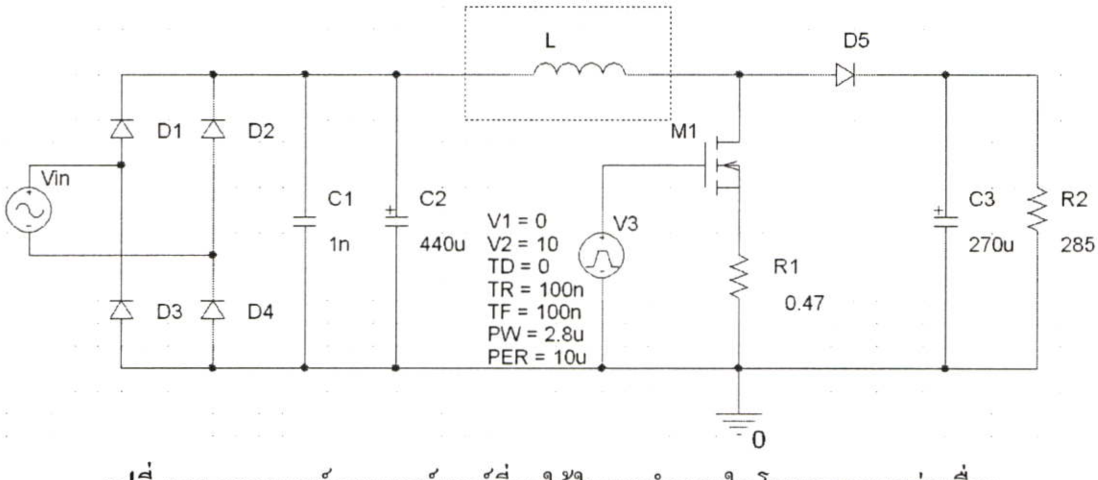
$$f > \frac{D(1-D)^2 R}{2L} \tag{4.20}$$

จากสมการที่ (4.19) และ (4.20) จะได้เงื่อนไขในการเปลี่ยนโหมดการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จากโหมดกระแสต่อเนื่องไปเป็นโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

1. ทำการลดค่าความถี่ในการสวิตชิ่ง (f) ลง
2. ทำการลดค่าดิวตี้เรโช (D) ลง
3. ทำการเพิ่มค่าความต้านทานของโหลดทางด้านขาออก (R) ขึ้น
4. ทำการลดค่าความเหนี่ยวนำ (L) ลง

4.3.3 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากเงื่อนไขในการเปลี่ยนโหมดการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงทำให้ได้วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ ซึ่งในการจำลองการทำงานของวงจรนั้น จะไม่ได้นำผลของค่าตัวเก็บประจุภายในตัวมอสเฟตและไดโอดมาพิจารณาด้วย โดยจะถือว่าอุปกรณ์อื่นๆนอกเหนือจากตัวเหนี่ยวนำ (L) จะมีการทำงานในแบบอุดมคติ โดยตัวเหนี่ยวนำ (L) ในกรอบเส้นประสี่เหลี่ยมจะถูกแทนที่ด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 4.6 เมื่อต้องการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป และแทนที่ตัวเหนี่ยวนำ (L) ในกรอบเส้นประสี่เหลี่ยมด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 4.9 เมื่อต้องการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งหวังที่จะทำการออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด ดังนั้นค่าต่างๆที่ใช้ในวงจร จึงเป็นการกำหนดขึ้นเองของผู้ทำการวิจัย เพื่อทำให้วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องเท่านั้น



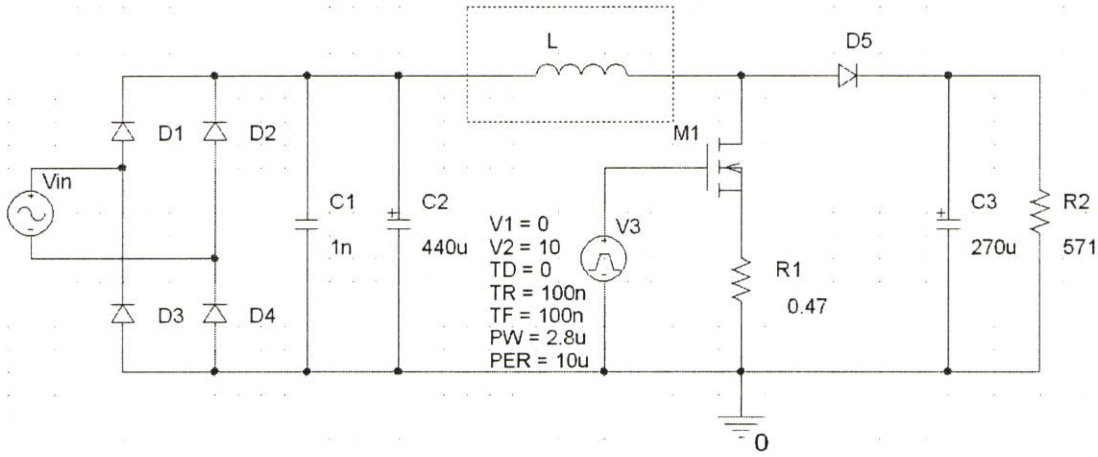
รูปที่ 4.18 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการจำลองในโหมดกระแสต่อเนื่อง

จากวงจรในรูปที่ 4.18 เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (4.20) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขของโหมดการทำงานของวงจรที่จะใช้ในการจำลอง จะได้ว่า

$$100\text{ kHz} > \frac{0.28\times(1-0.28)^2\times 285}{2\times 352\times 10^{-6}}$$

หรือ $100\text{ kHz} > 58.76\text{ kHz}$

โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นวงจรในรูปที่ 4.18 จึงสามารถนำมาใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่องด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ 4.19 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการจำลองในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

จากวงจรในรูปที่ 4.19 เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (4.20) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขของโหมดการทำงานของวงจรที่จะใช้ในการจำลอง จะได้ว่า

$$100\text{ kHz} > \frac{0.28\times(1-0.28)^2\times 571}{2\times 352\times 10^{-6}}$$

หรือ 100 kHz > 117.73 kHz

โดยผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นวงจรในรูปที่ 4.19 จึงเป็นวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องได้

4.4 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายวิธีการในการจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ทั้งแบบที่ใช้การพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า โดยกราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดเป็นอย่าง

มาก ในตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 40 MHz โดยผลของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปแสดงดังตารางที่ 4.1 และผลของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าแสดงดังตารางที่ 4.2

โดยวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 แบบ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะถูกนำไปใช้ในการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อเปรียบเทียบผลของสัญญาณรูปคลื่นที่ได้จากการวัดและการจำลองในบทต่อไป ซึ่งในบทนี้ก็ได้มีการอธิบายหลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ทั้งการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง รวมถึงอธิบายเงื่อนไขในการเปลี่ยนโหมดการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์อีกด้วย

บทที่ 5
วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง โดยจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ หัวข้อที่ 5.1 จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ที่ทำการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงเหตุผลที่ทำการทดลอง หัวข้อที่ 5.2 จะกล่าวถึงขอบเขตที่จะทำการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ และหัวข้อที่ 5.3 จะกล่าวถึงรูปแบบและการติดตั้งวงจรเพื่อทำการทดลองและทดสอบวงจรในรูปแบบต่างๆ

5.1 วัตถุประสงค์

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบรูปแบบการพันขดลวดในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยมีการนำเสนอว่า ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าจะสามารถลดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำลงได้ในบางช่วงความถี่ โดยจะมีการเปรียบเทียบผลกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตดังในหัวข้อที่ 5.2 โดยที่รูปแบบและประเด็นต่างๆ ที่ทำการทดลองจะเป็นไปตามหัวข้อที่ 5.3

5.2 ขอบเขตของการทดลอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ จะสอดคล้องกับขอบเขตของงานวิจัยในหัวข้อที่ 1.6 ดังนั้นในการทดลองจะใช้วงจรที่สร้างขึ้นจริง โดยวงจรดังกล่าวจะออกแบบให้ทำงานได้ตามพิกัดของวงจรในตารางที่ 1.1 และมีเงื่อนไขในการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าตามตารางที่ 3.1 โดยวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ และตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ได้ทำการออกแบบและตรวจสอบตามวิธีการในบทที่ 3 และบทที่ 4 ซึ่งหัวข้อต่างๆในการทดลองและเปรียบเทียบจะมีดังต่อไปนี้

- ด้านค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ
- ด้านรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟต
- ด้านรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

5.3 รูปแบบต่างๆที่ใช้ทำการทดสอบ

การทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก เนื่องจากว่าการหาค่าผลลัพธ์ที่ต้องการนั้นจะต้องทำการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัดที่แตกต่างกัน โดยการ

ทดสอบในส่วนที่ 1 จะเป็นการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ถูกปล่อยออกมาจากวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะต้องใช้โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) ซึ่งเป็นเครื่องมือเฉพาะด้านที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งสัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปแสดงผลที่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณจากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ในโดเมนของความถี่ สำหรับการทดสอบในส่วนที่ 2 จะเป็นการวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของอุปกรณ์สวิตซ์และตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในโดเมนของเวลา โดยสัญญาณที่ได้สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือในการวัด

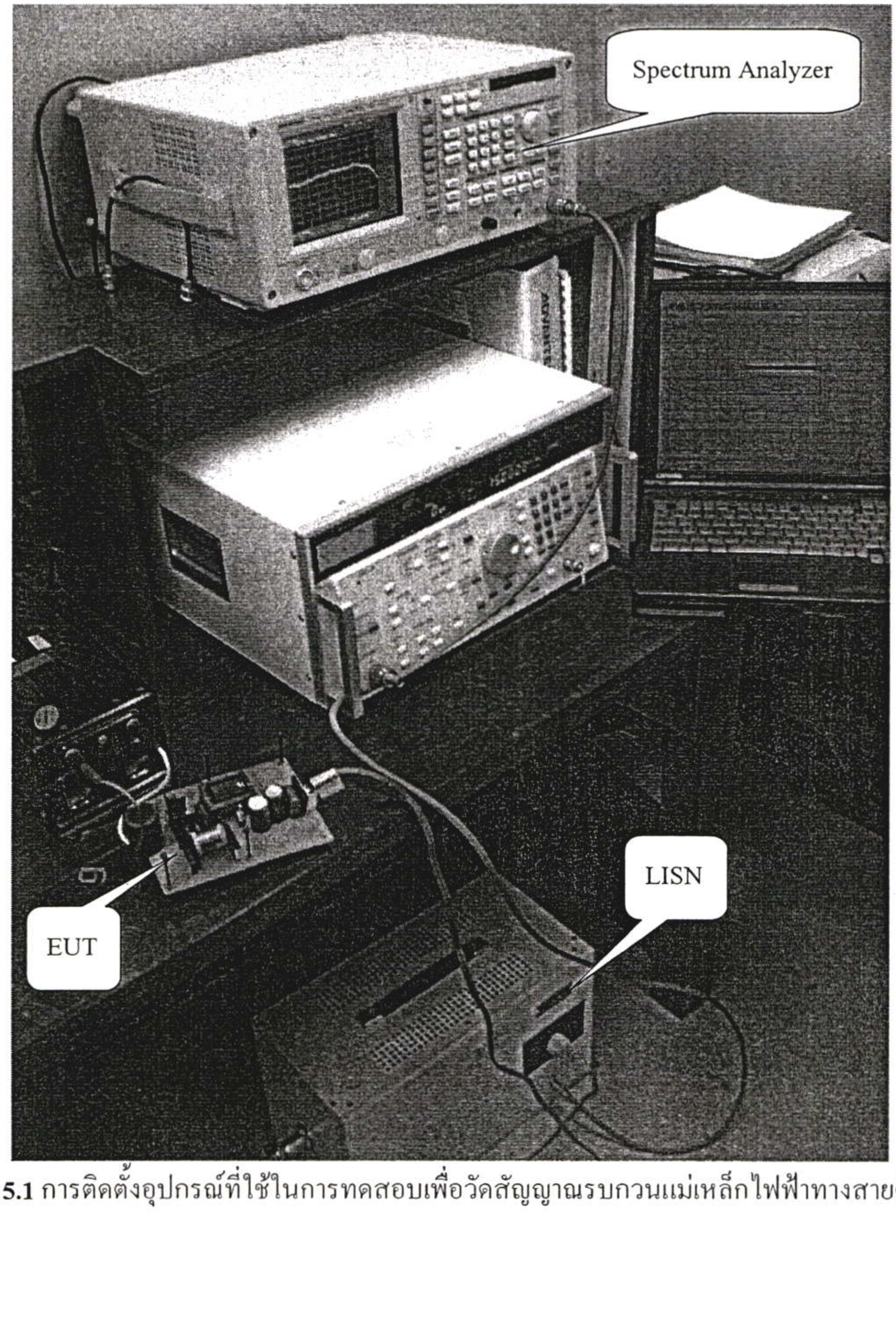
5.3.1 การทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

การทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในวิทยานิพนธ์นี้ ไม่มีจุดมุ่งหมายในด้านการทดสอบเพื่อให้ผ่านมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เป็นการศึกษาถึงผลกระทบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จากการพันแบบทั่วไปเป็นการพันแบบก้าวหน้าเท่านั้น

การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและเครื่องมือวัดจะเป็นไปตามรูปที่ 5.1 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบด้วยวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์พร้อมอุปกรณ์ประกอบตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยจะใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้เป็นโหลดของวงจร เพื่อใช้เปลี่ยนโหมดการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยเมื่อต้องทดสอบวงจรในโหมดกระแสต่อเนื่อง จะทำการปรับลดค่าความต้านทานของโหลดลงจนค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเท่ากับ 140 วัตต์ ซึ่งค่าดิวตี้เรโช (*Duty ratio*) ของวงจรจะมีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อต้องทดสอบวงจรในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง จะทำการปรับเพิ่มค่าความต้านทานของโหลดขึ้นจนค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเท่ากับ 70 วัตต์ ซึ่งค่าดิวตี้เรโช (*Duty ratio*) ของวงจรจะมีค่าประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์

ในการทดสอบนี้จะใช้แผงวงจรไฟฟ้าชิ้นเดียวกันตลอดการทดสอบ โดยจะมีการเปลี่ยนเฉพาะตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างแบบทั่วไปกับแบบก้าวหน้าเท่านั้น สำหรับเครื่องมือวัดในการทดสอบนี้จะใช้โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) และเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) โดยจะนำโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์มาต่อคั่นระหว่างแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับกับด้านแรงดันขาเข้าของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ และส่งสัญญาณที่วัดได้ไปที่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม ซึ่งค่าสัญญาณดังกล่าวจะอยู่ในโดเมนของความถี่ โดยจะแบ่งรูปแบบของการทดสอบออกเป็น 4 รูปแบบ ตามโหมดการทำงานของวงจรและชนิดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1. การวัดสัญญาณรบกวนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
2. การวัดสัญญาณรบกวนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง
3. การวัดสัญญาณรบกวนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
4. การวัดสัญญาณรบกวนของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง



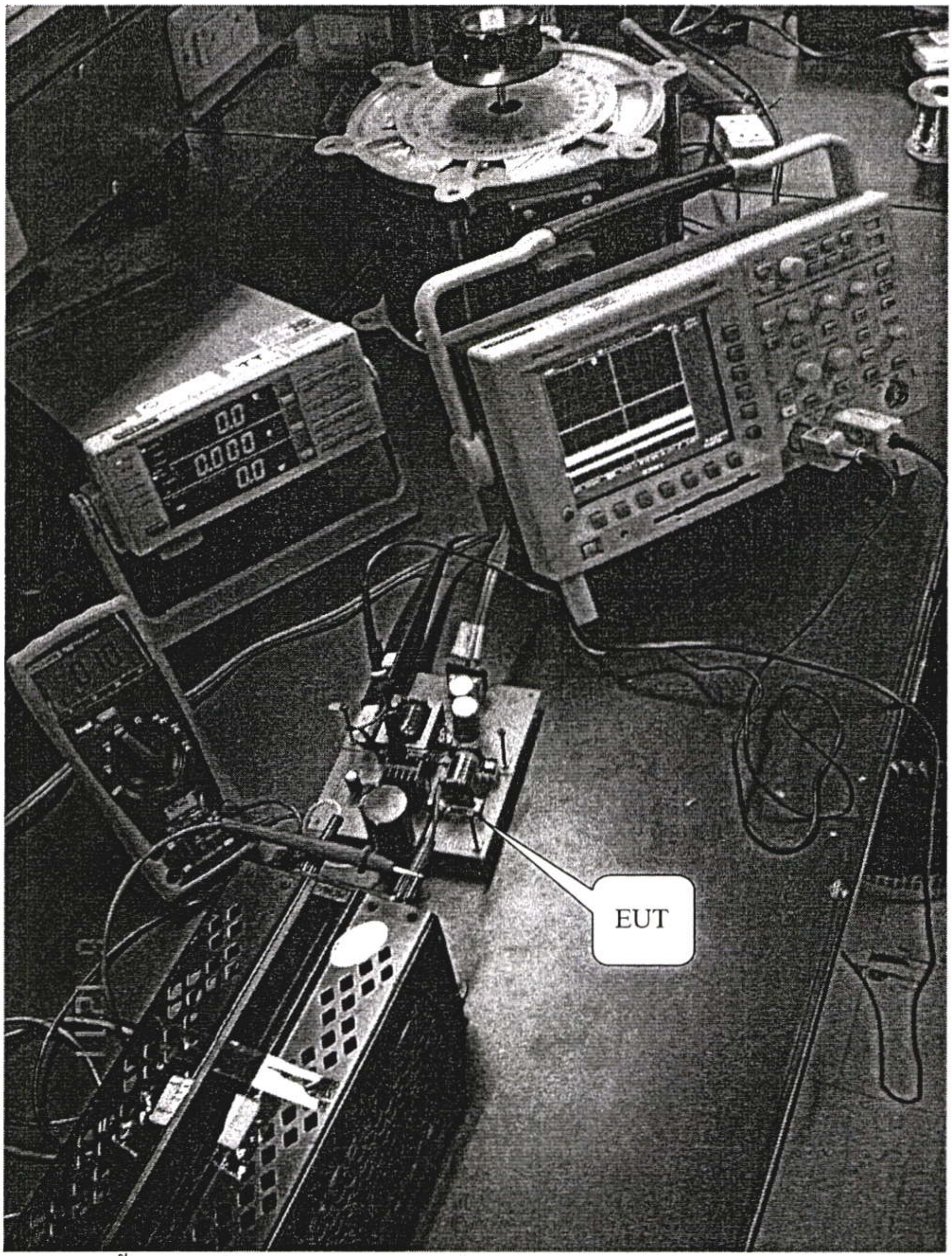
รูปที่ 5.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

5.3.2 การทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและเครื่องมือวัดจะเป็นไปตามรูปที่ 5.2 ซึ่งวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์พร้อมอุปกรณ์ประกอบที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเหมือนกับการทดสอบในหัวข้อที่ 5.3.1 โดยจะมีความแตกต่างกันเฉพาะเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเท่านั้น คือ ในการทดสอบนี้จะใช้มัลติมิเตอร์ เพาเวอร์มิเตอร์ ออสซิโลสโคป และโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า (Current Probe) เป็นเครื่องมือในการวัดผลสัญญาณ ซึ่งค่าสัญญาณดังกล่าวจะอยู่ในโดเมนของเวลา จากนั้นทำการแปลงรูปคลื่นสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปเป็นโดเมนของความถี่ด้วยเครื่องออสซิโลสโคป เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

โดยจะแบ่งรูปแบบของการทดสอบออกเป็น 8 รูปแบบ ตามโหมดการทำงานของวงจรและชนิดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

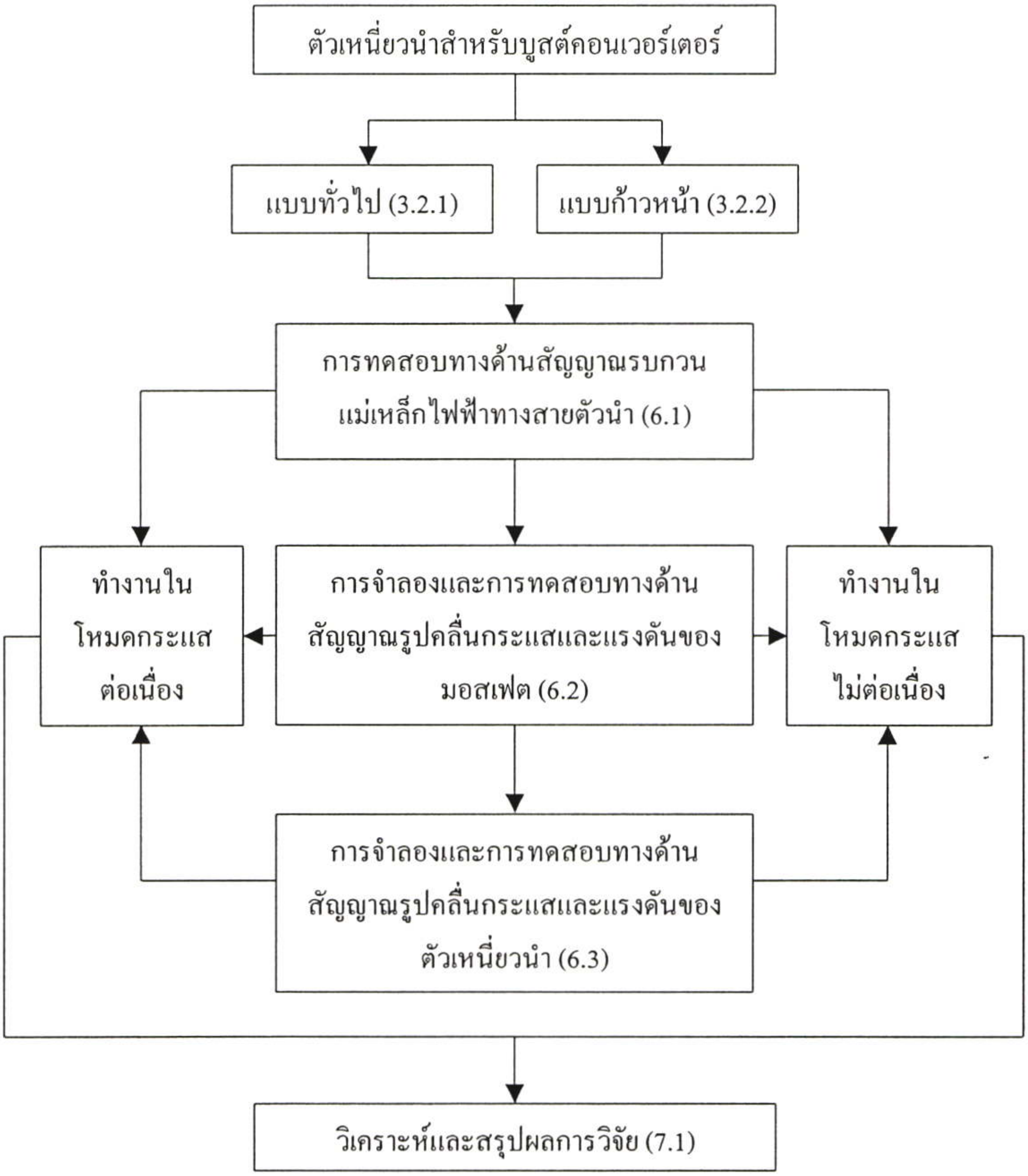
1. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของมอสเฟตในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
2. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของมอสเฟตในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง
3. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของมอสเฟตในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
4. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของมอสเฟตในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง
5. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
6. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง
7. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
8. การวัดสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าและทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณรูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

5.4 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึง เงื่อนไข การติดตั้งและรูปแบบที่ใช้ทำการทดสอบ ทั้งการทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และการทดสอบทางด้านสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดัน เพื่อให้เห็นภาพรวมและรายละเอียดของการทดสอบกรณีต่างๆ โดยจะสามารถสรุปหัวข้อต่างๆในการทดสอบได้ดังแผนภูมิในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภูมิแสดงรูปแบบการทดสอบทั้งหมดในงานวิจัยนี้

สำหรับผลการทดสอบและการวิเคราะห์ในทุกรูปแบบ จะได้ทำการแสดงและกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 6
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ โดยผลการทดลองจะเป็นการทดสอบตามรูปแบบการทดลองในบทที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า ในขณะที่การวิเคราะห์ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลจากการทดลอง และจะมีการเปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการทดลองกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป OrCAD Pspice ทั้งตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า โดยจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ หัวข้อที่ 6.1 จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ส่วนหัวข้อที่ 6.2 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟต และหัวข้อที่ 6.3 จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยหัวข้อทั้งหมดของผลการทดลองและการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปหัวข้อของผลการทดลองและการวิเคราะห์

หัวข้อของผลการทดลองและการวิเคราะห์		รูปแบบการพันขดลวด			
		แบบทั่วไป		แบบก้าวหน้า	
		โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง	โหมดกระแสต่อเนื่อง	โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง	โหมดกระแสต่อเนื่อง
สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (6.1)	6.1.1	☆	☆		
	6.1.2			☆	☆
	6.1.3	☆		☆	
	6.1.4		☆		☆
รูปคลื่นสัญญาณของมอสเฟต (6.2)	6.2.1	☆		☆	
	6.2.2		☆		☆
รูปคลื่นสัญญาณของตัวเหนี่ยวนำ (6.3)	6.3.1	☆		☆	
	6.3.2		☆		☆

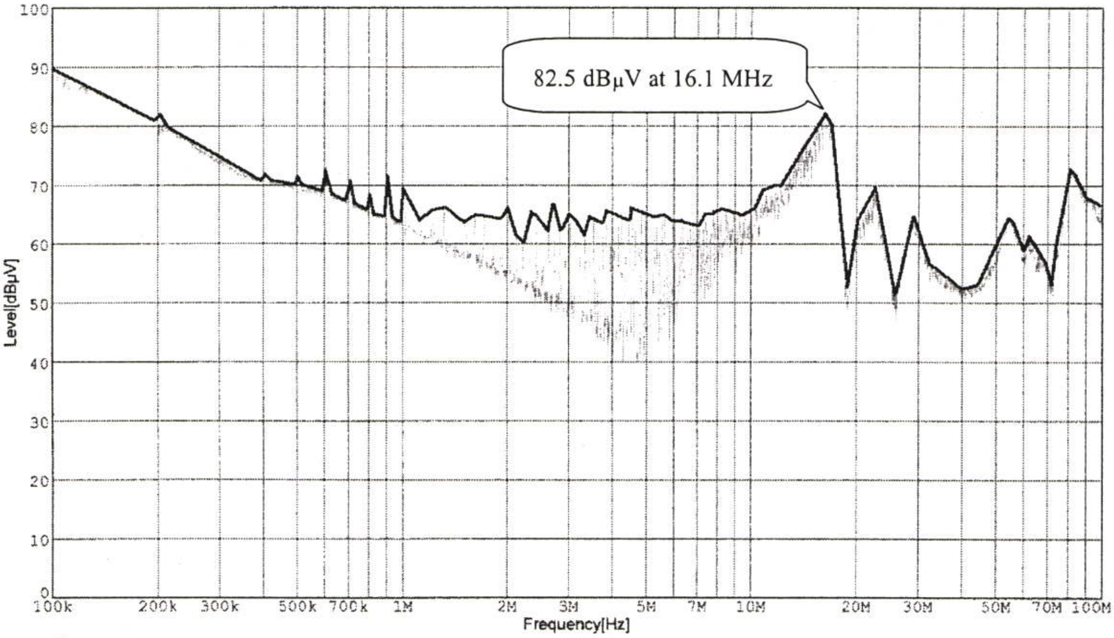
หมายเหตุ - โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง จะมีค่า P_{IN} = 70 W และ P_{OUT} = 66.15 W

- โหมดกระแสต่อเนื่อง จะมีค่า P_{IN} = 140 W และ P_{OUT} = 129.65 W

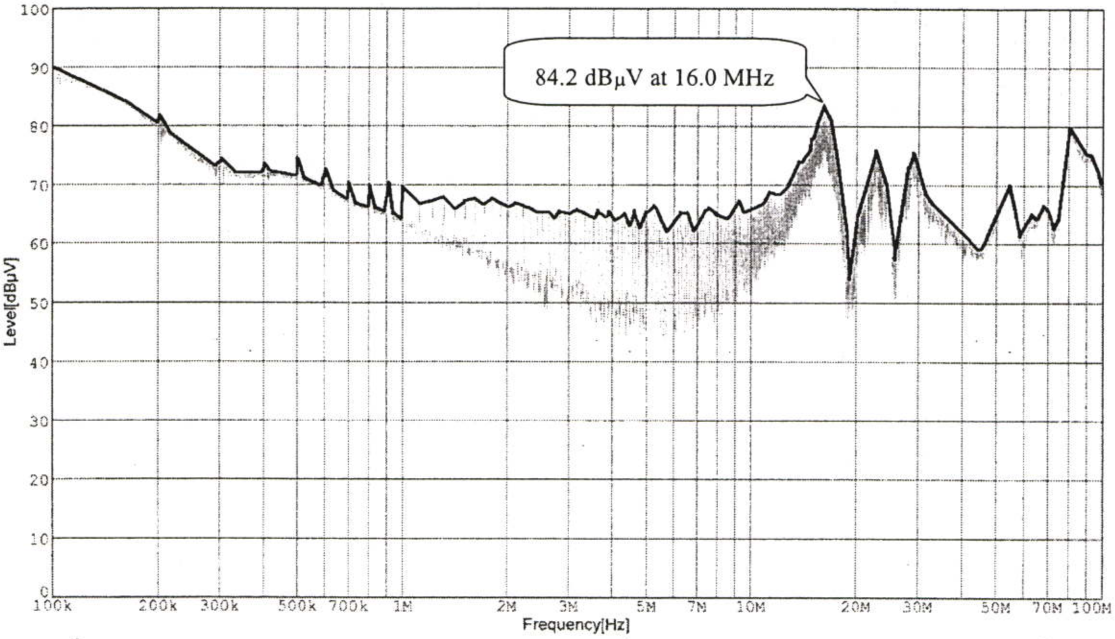
6.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

6.1.1 ตัวเหนี่ยวนำบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบทั่วไป

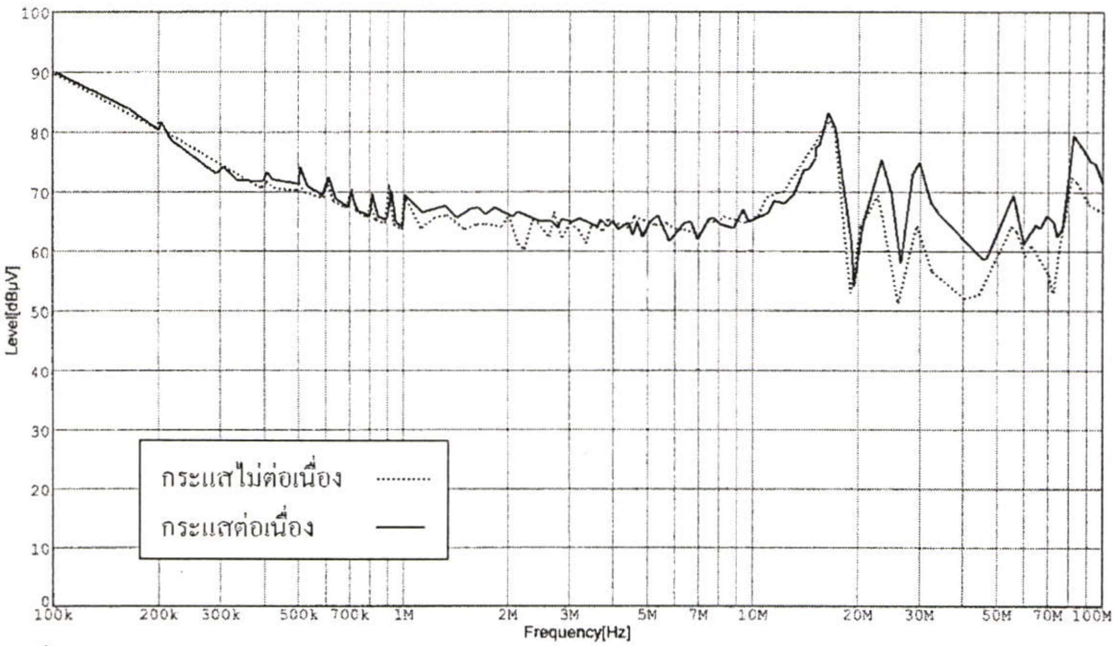
สเปคตรัมของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำสำหรับการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไปโดยทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 6.2 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไปโดยทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

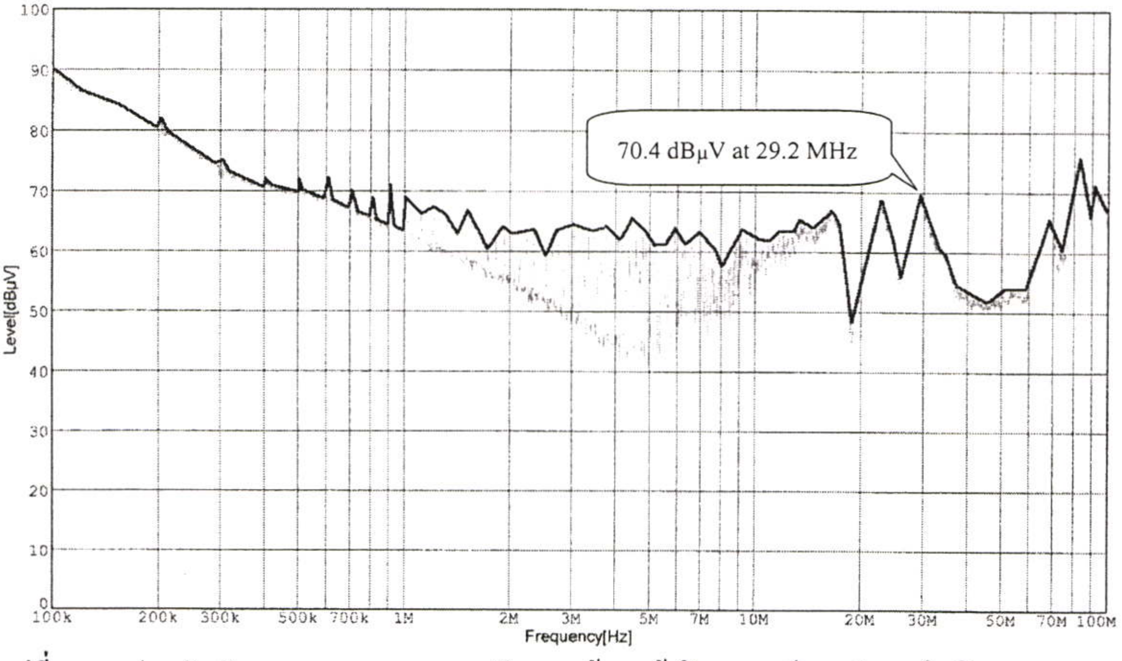


รูปที่ 6.3 การเปรียบเทียบสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไประหว่างการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องกับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

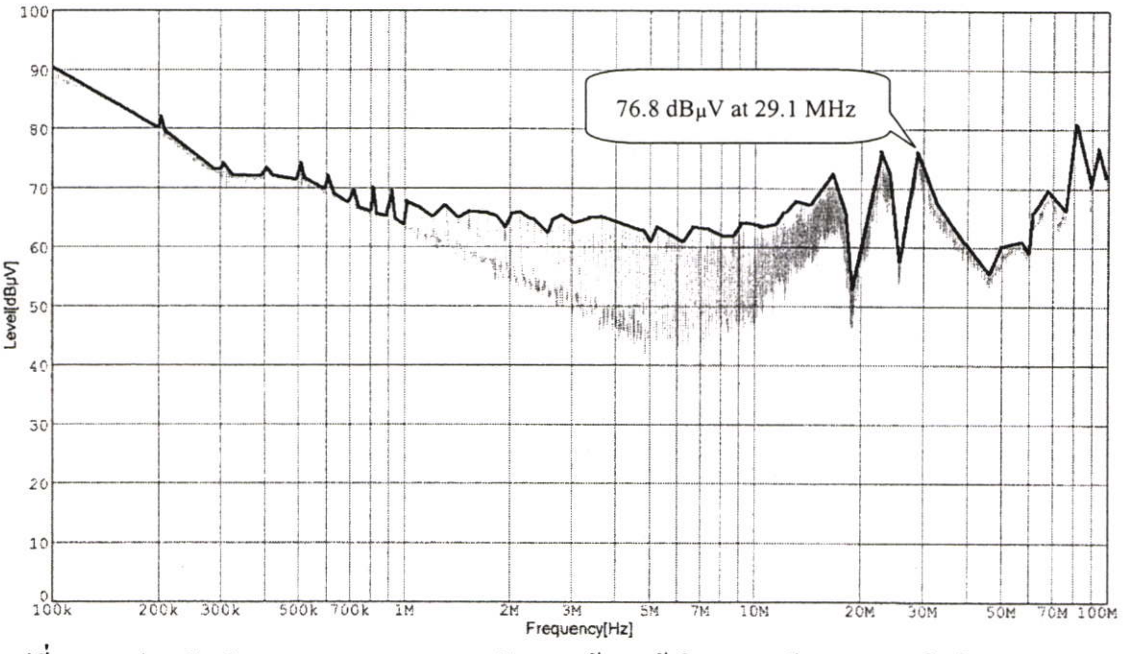
เมื่อนำสเปคตรัมสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของทั้งโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและโหมดกระแสต่อเนื่องมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 6.3 จะพบว่าสเปคตรัมสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของทั้ง 2 โหมดการทำงานจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 20 MHz ส่วนในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 MHz จนถึง 100 MHz นั้น พบว่าสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่องจะเป็นการทำงานในโหมดที่เลวร้ายที่สุดในการทดลองนี้

6.1.2 ตัวเหนี่ยวนำบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การพันแบบก้าวหน้า

สเปคตรัมของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำสำหรับการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.4 และ 6.5 ตามลำดับ



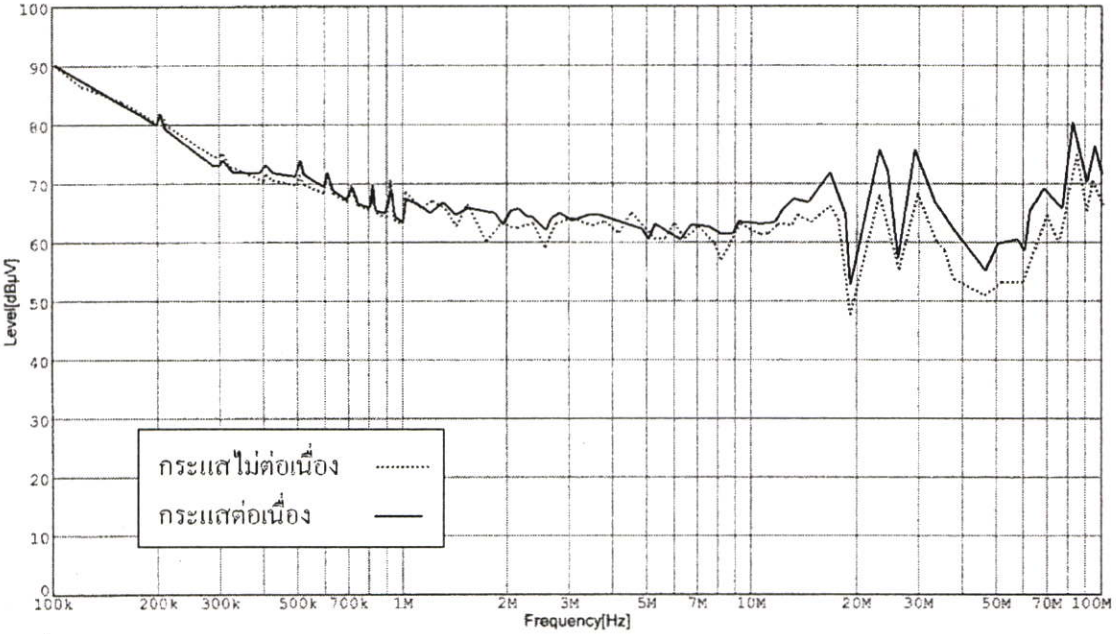
รูปที่ 6.4 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าโดยวงจรมีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 6.5 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าโดยวงจรมีการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

เมื่อนำสเปคตรัมสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของการทำงานทั้ง 2 โหมด มาทำการเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 6.6 จะพบว่าสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของทั้ง 2 โหมดการทำงาน จะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 10 MHz ส่วนในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 MHz

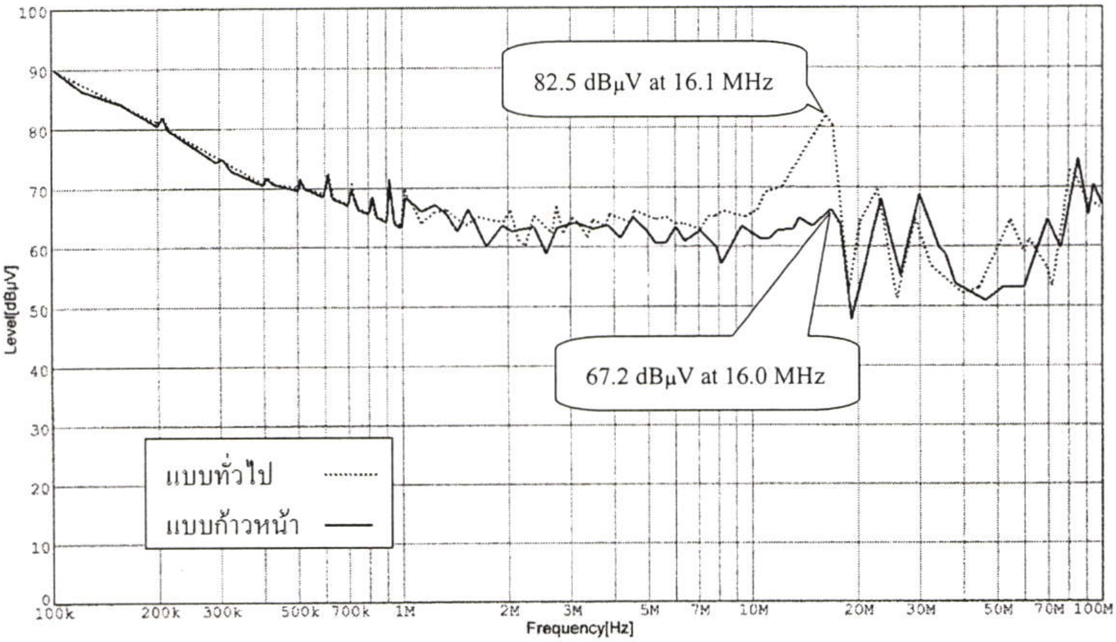
จนถึง 100 MHz นั้น จะพบว่าสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า ก็จะเป็นโหมดการทำงานที่เลวร้ายที่สุดเช่นเดียวกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไป



รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าระหว่างการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องกับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

6.1.3 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

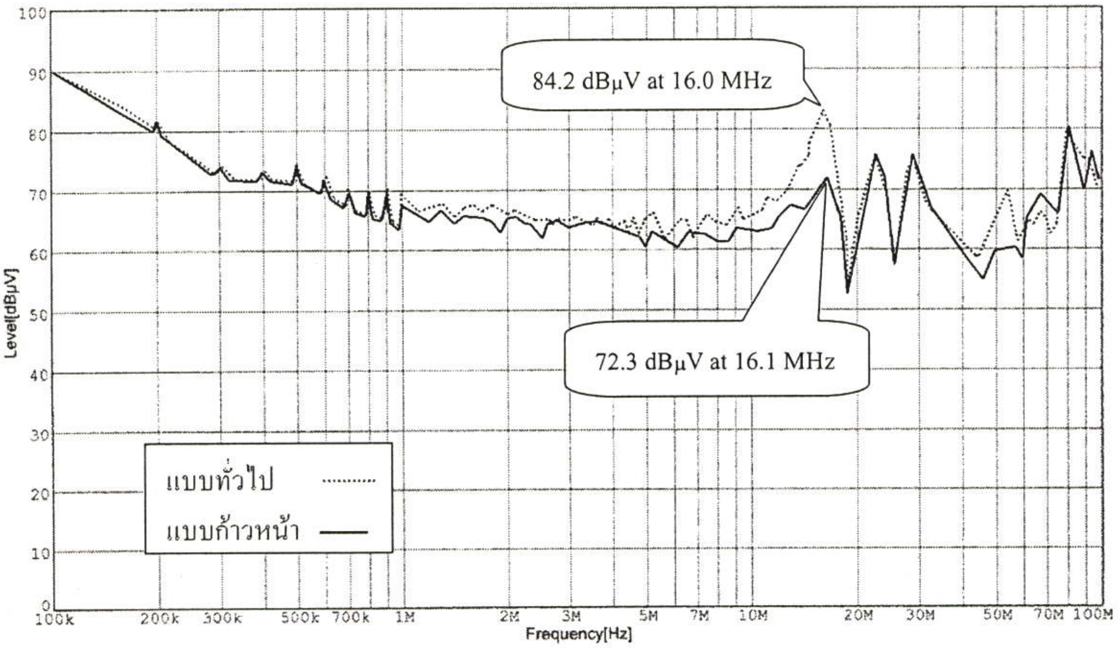
เมื่อนำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของทั้งการพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้า มาทำการเปรียบเทียบกันในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 6.7 โดยในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องนี้ จะพบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 10 MHz สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 MHz ถึง 20 MHz การพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะมีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ต่ำกว่าการพันแบบทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ความถี่ประมาณ 16 MHz สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของการพันแบบก้าวหน้าจะมีค่าต่ำกว่าการพันแบบทั่วไปถึงประมาณ 15.3 dB หลังจากนั้นในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 MHz จนถึง 100 MHz สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของการพันทั้งสองแบบก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะมีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับการพันแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง

6.1.4 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าในโหมดกระแสต่อเนื่อง

ส่วนการเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.8 ซึ่งจะพบว่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำระหว่างการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปกับการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า ก็จะมีลักษณะที่เหมือนกันกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง โดยที่ความถี่ประมาณ 16 MHz จะเป็นความถี่ที่การพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะสามารถลดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำลงได้มากที่สุด แต่ในโหมดการทำงานนี้จะสามารถลดลงได้เพียง 11.9 dB เท่านั้น



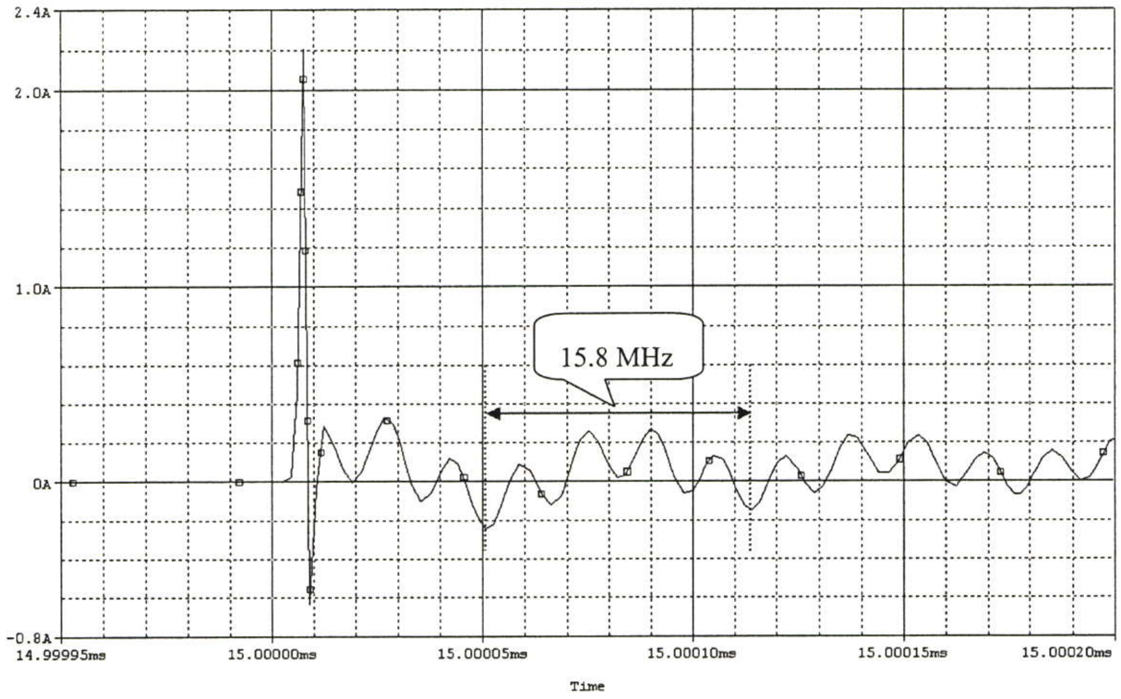
รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับการพันแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง

จากผลการทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ พบว่าความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ (SRF) ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 กับความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อเปลี่ยนมาใช้ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าจะไม่ใช่ความถี่เดียวกัน แต่ความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าลดลงมากที่สุด จะเป็นความถี่ช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปจะมีค่าลดลงมากที่สุดก่อนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยที่ความถี่ดังกล่าวจะอยู่ที่ 16.21 MHz ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปมีค่าลดลงเป็นผลมาจากค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

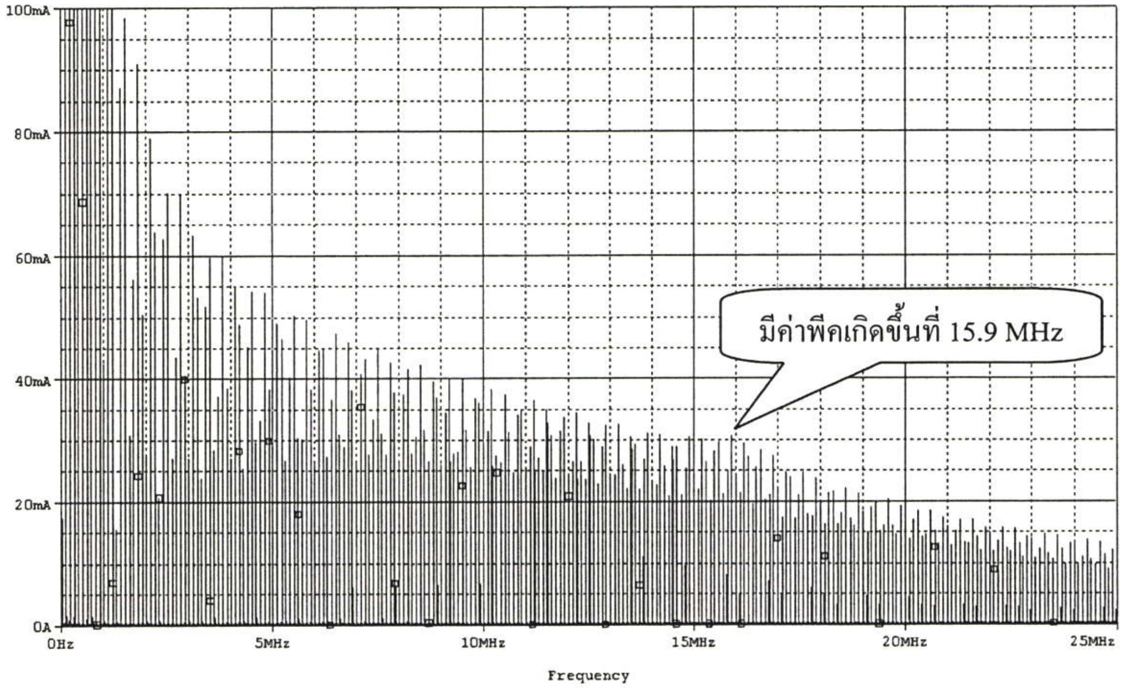
6.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟต

6.2.1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.9



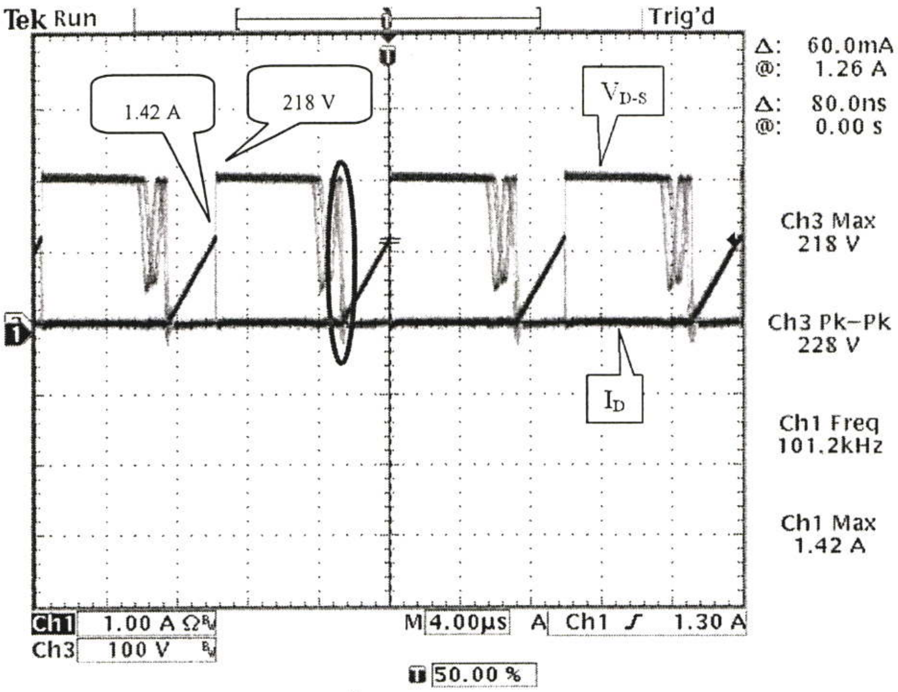
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา



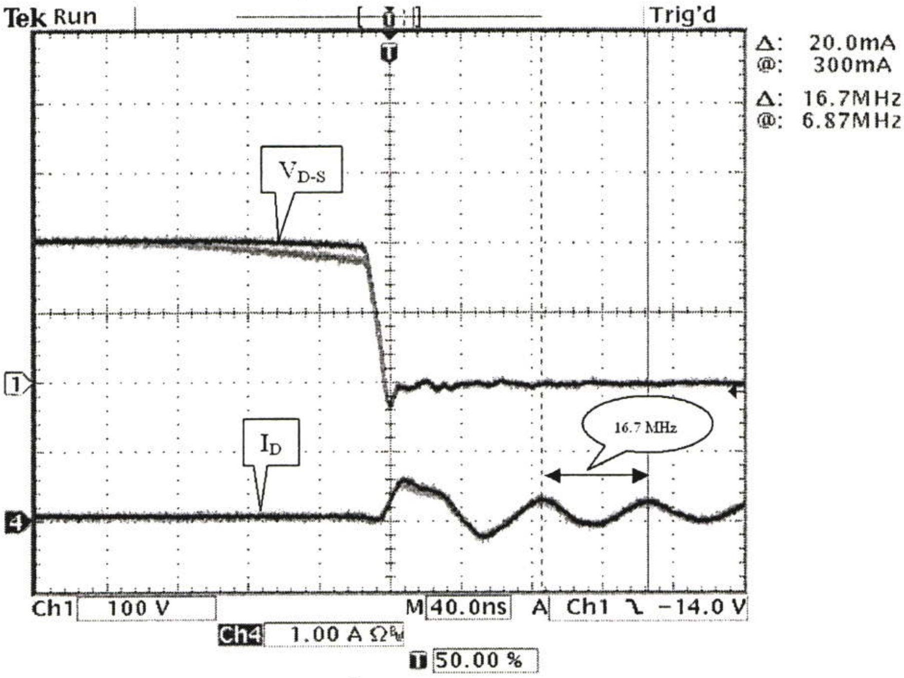
(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

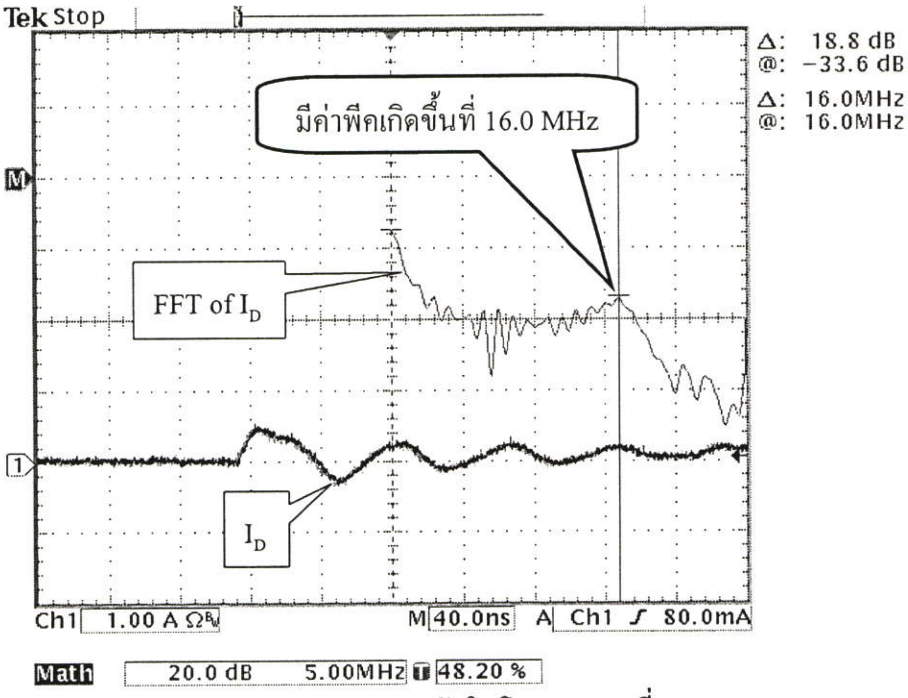
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.10



(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 µs/div)



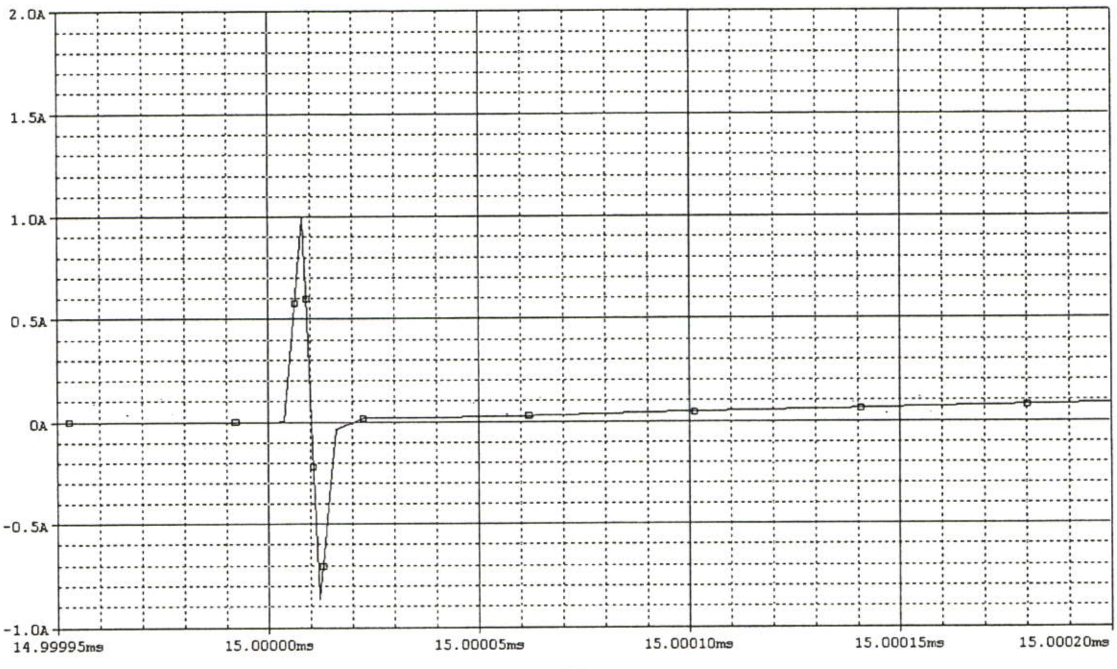
(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยาย (40 ns/div)



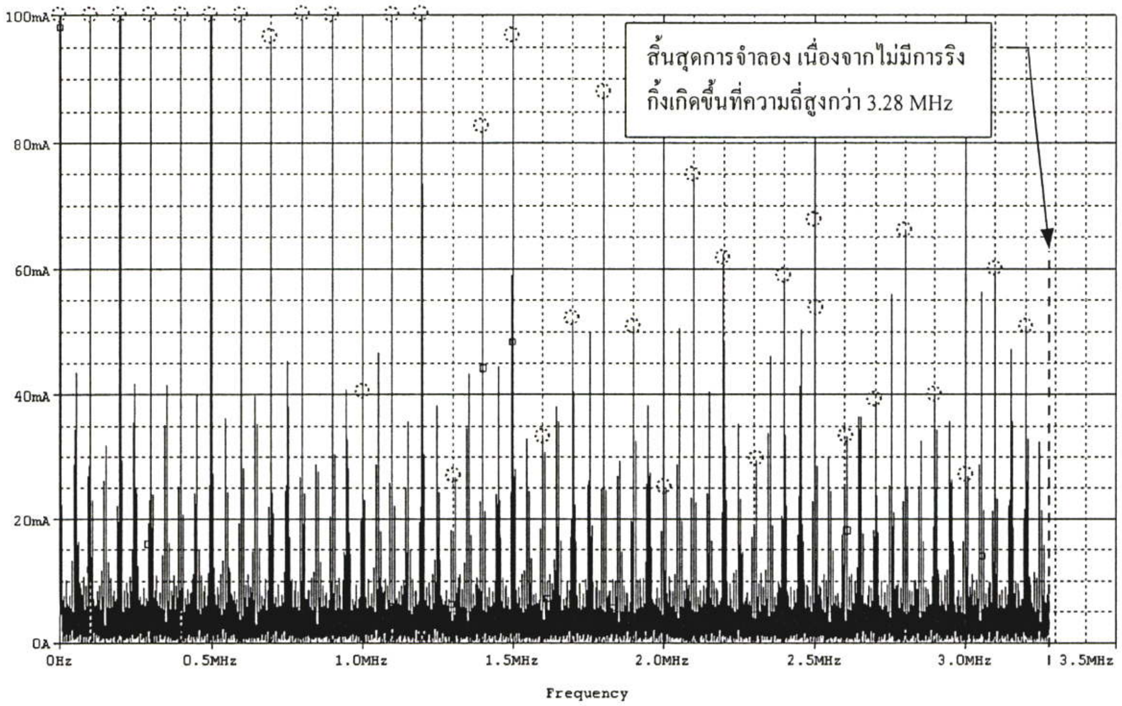
(ค) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.11



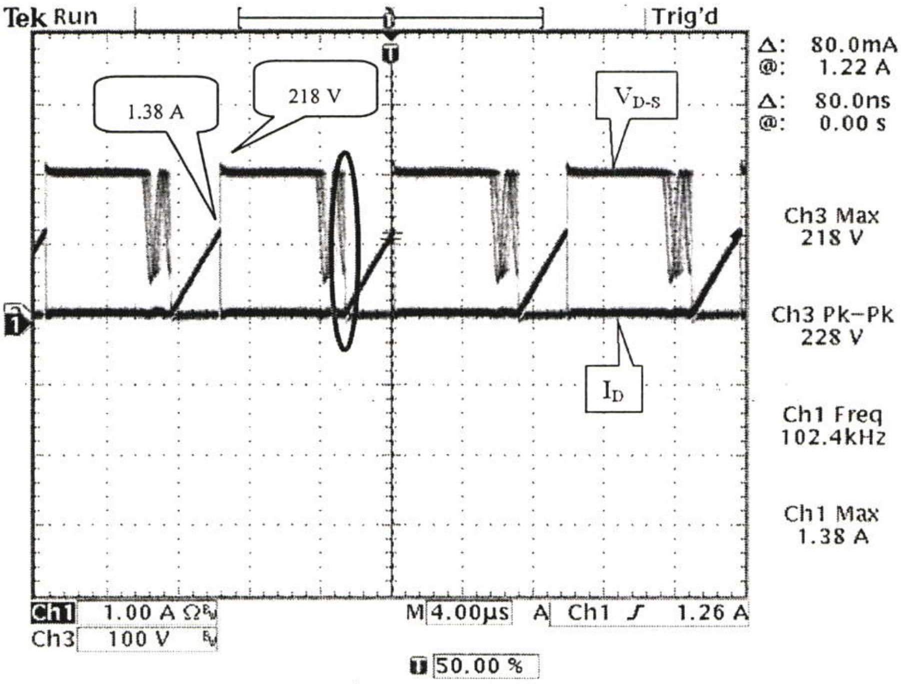
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา



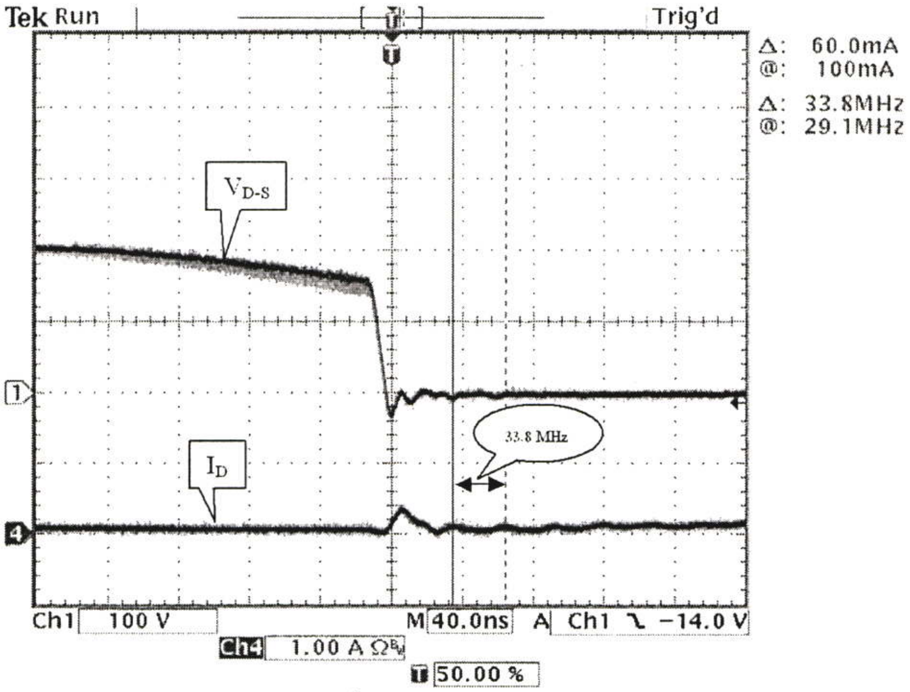
(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

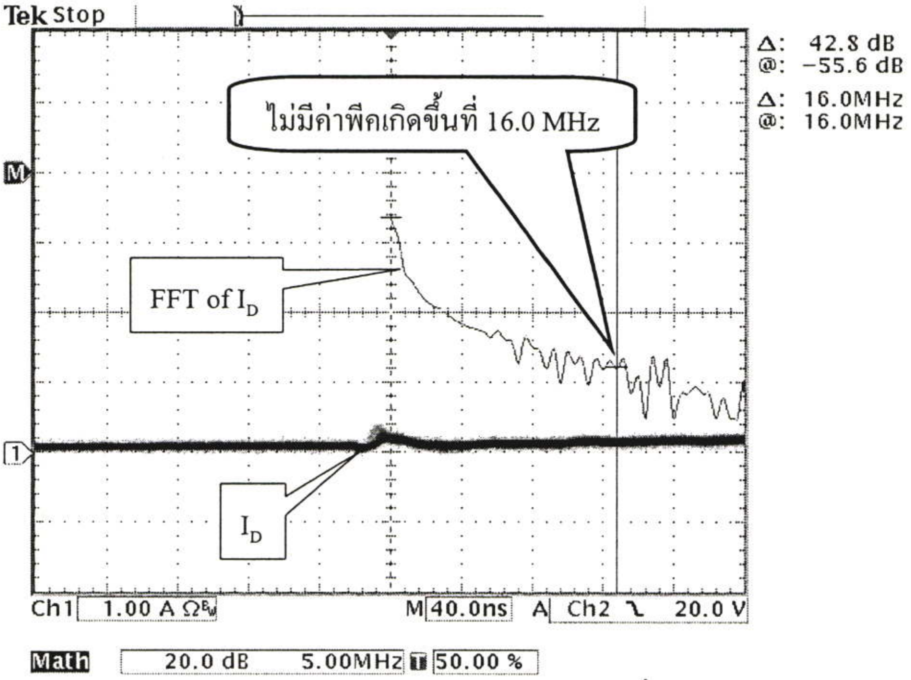
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.12



(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 μs/div)



(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยาย (40 ns/div)



(ค) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.9 (ก) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.11 (ก) จะพบ

ว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟตเกิดขึ้น แต่การพันแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 15.8 MHz

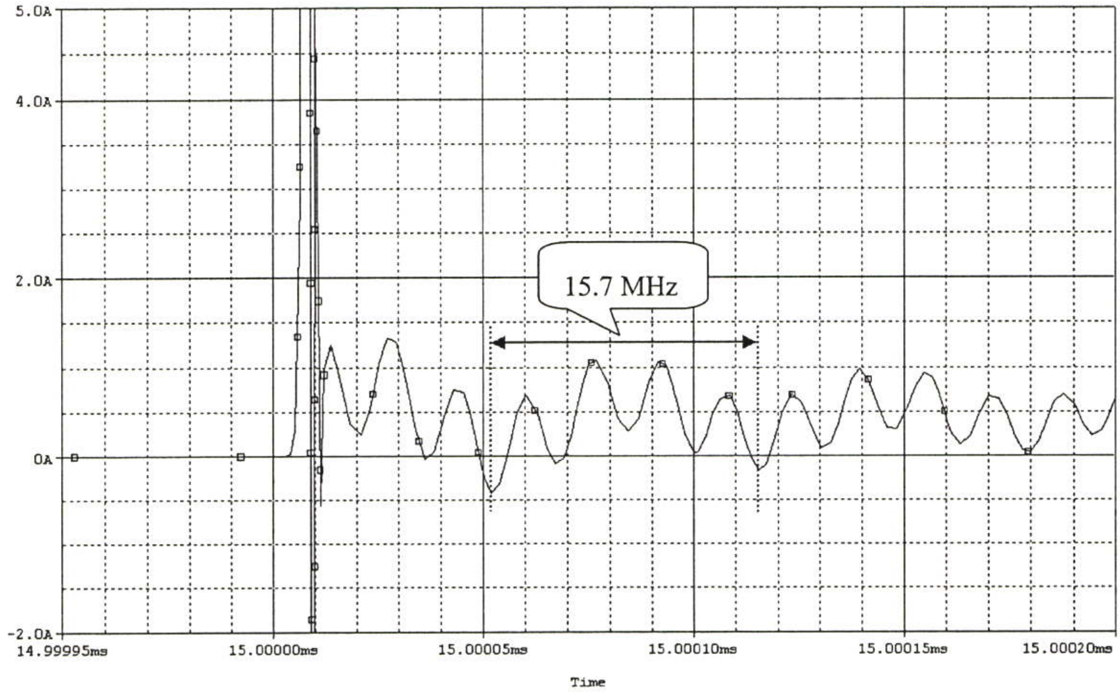
การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.9 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.11 (ข) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_D เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz แต่การพันแบบทั่วไปจะมีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_D เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนเวลา โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.10 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.12 (ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_D ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.7 MHz ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_D จะมีการริงกิ้งเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 33.8 MHz

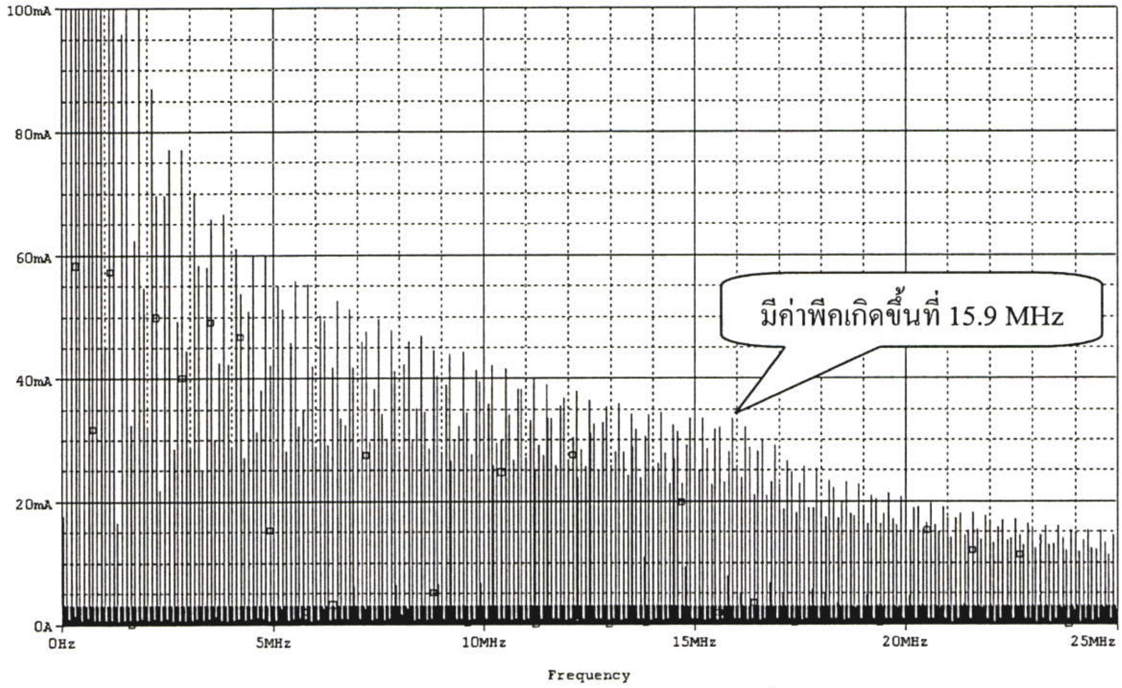
การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.10 (ค) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.12 (ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟต (I_D) ในโดเมนความถี่ ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป จะมีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ 16.0 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปมีค่าลดลงมากที่สุดก่อนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และยังเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกันกับความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำจากแบบทั่วไปมาเป็นแบบก้าวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ส่วนวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า จะไม่มีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ช่วง 16.0 MHz

6.2.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.13



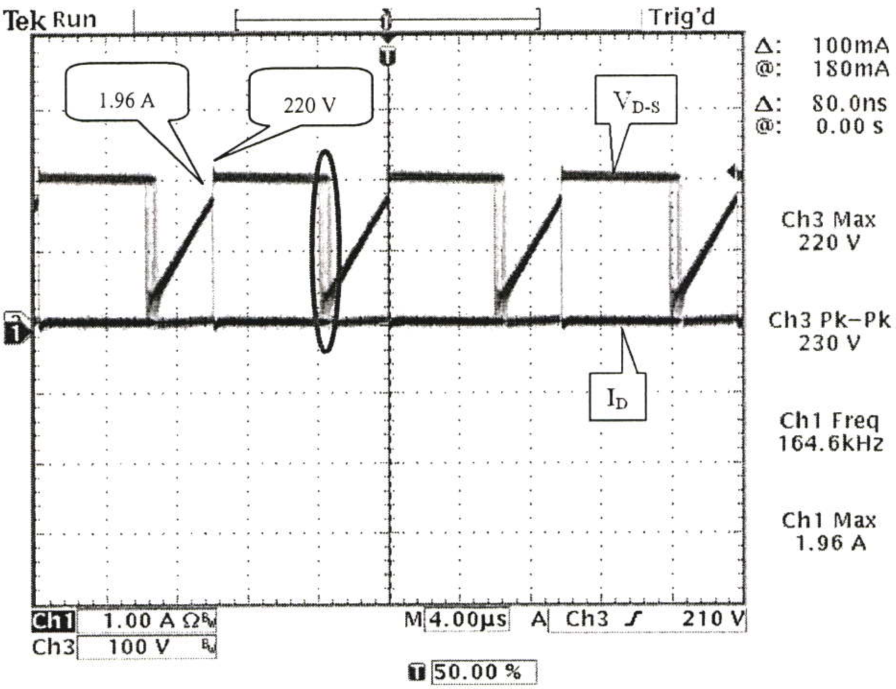
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา



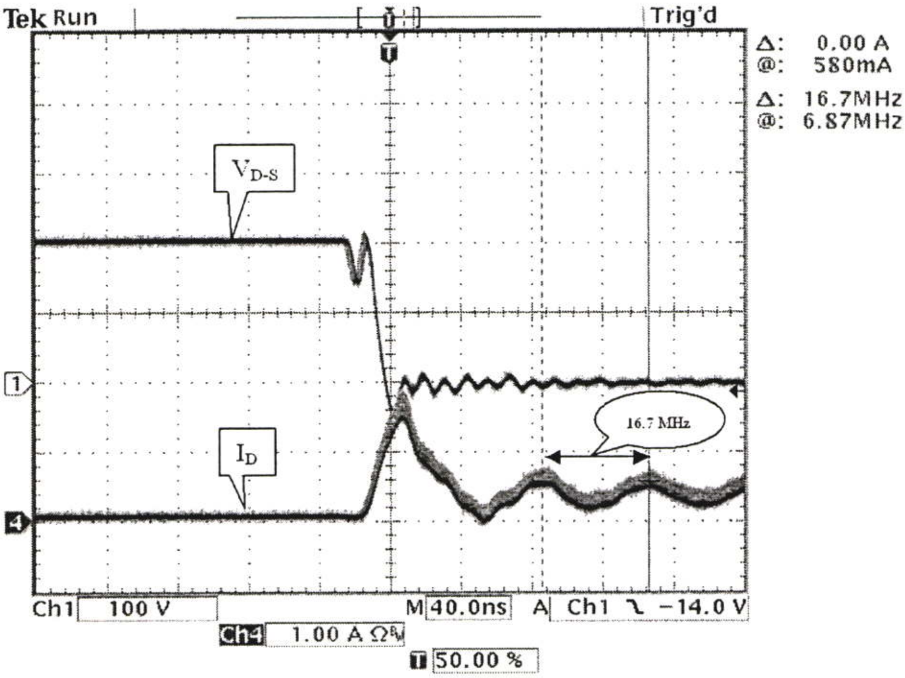
(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.13 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

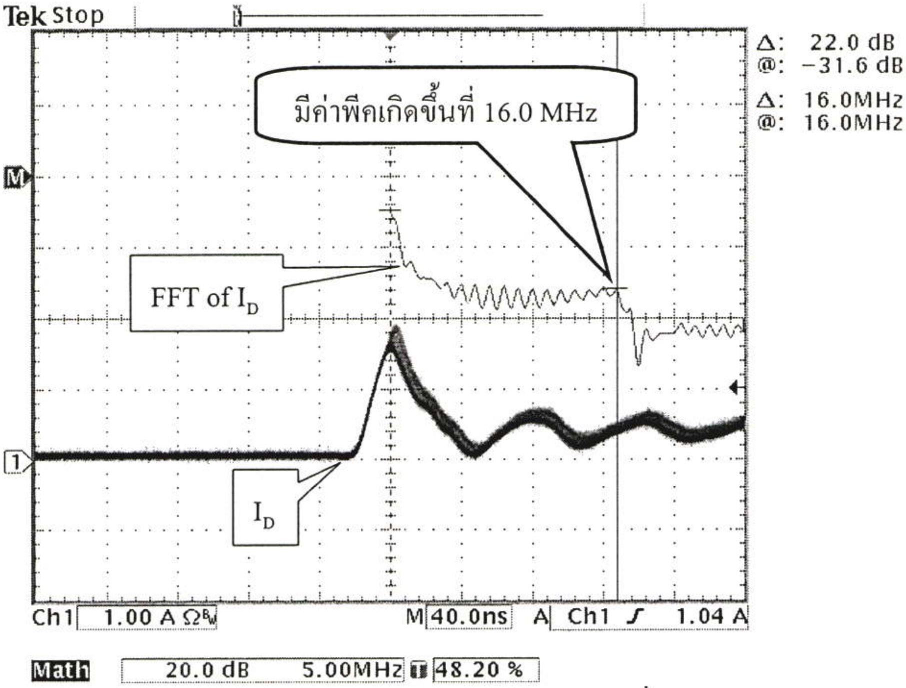
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.14



(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 µs/div)



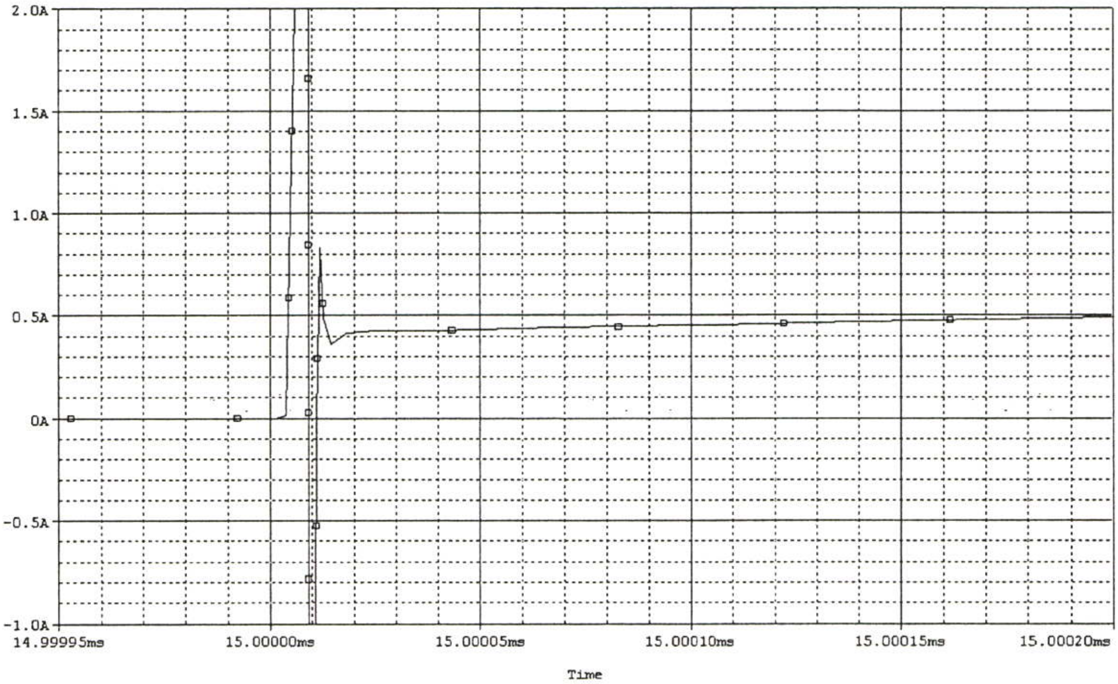
(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยาย (40 ns/div)



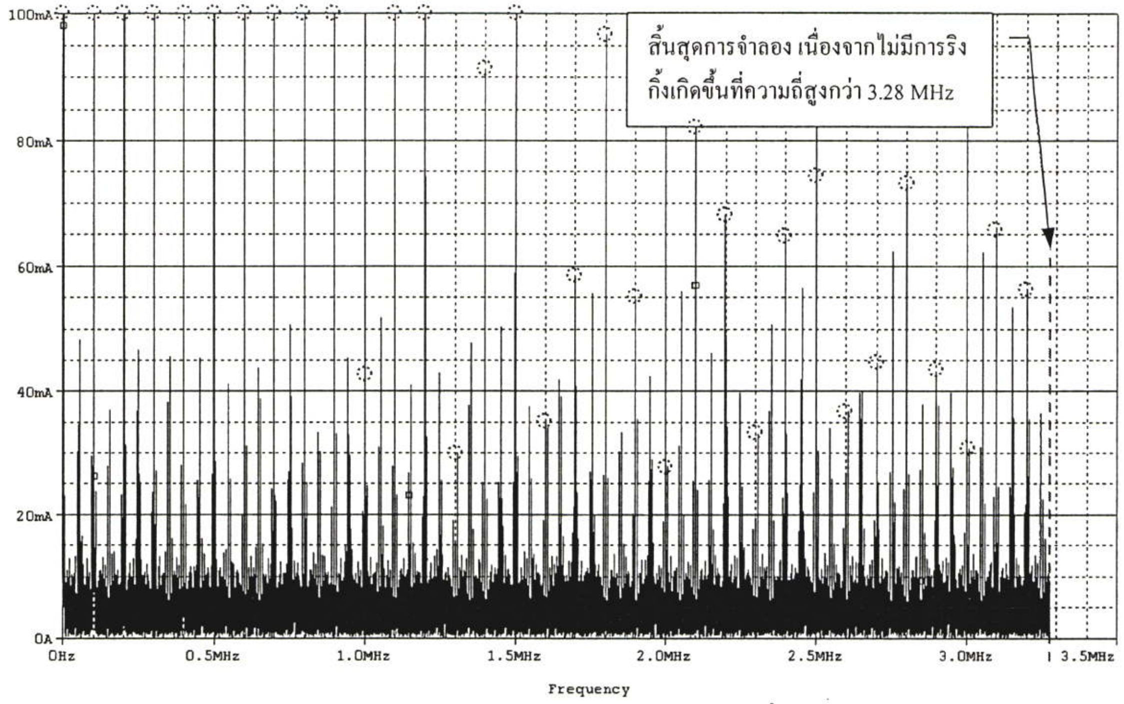
(ค) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.15



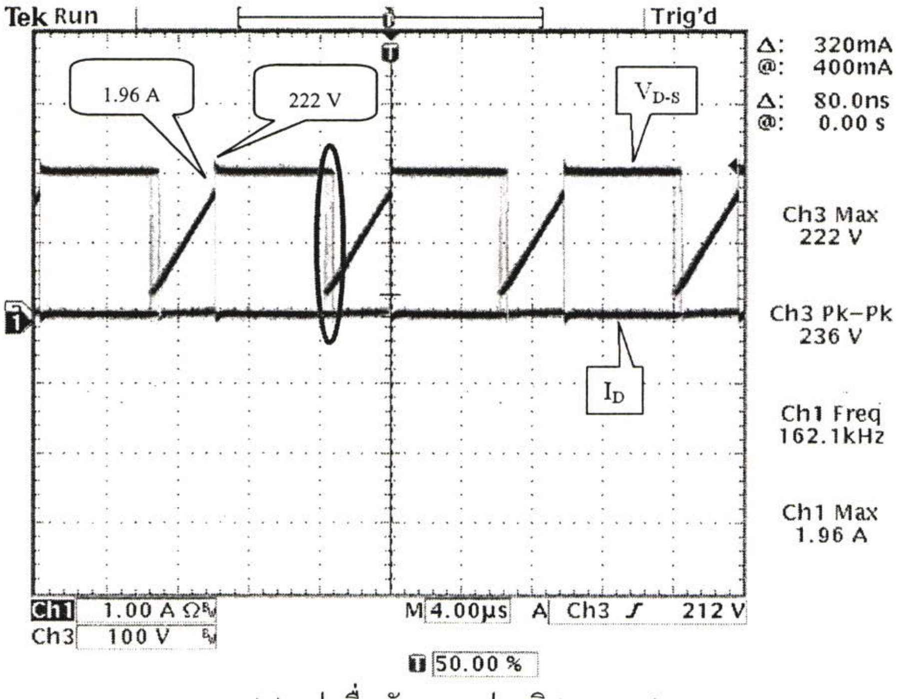
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา



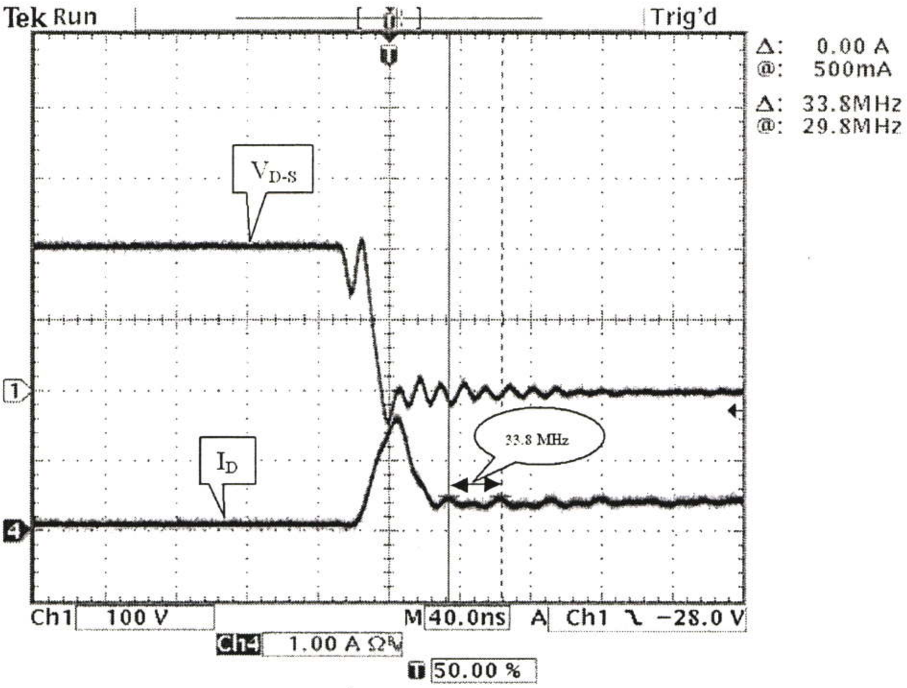
(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.15 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

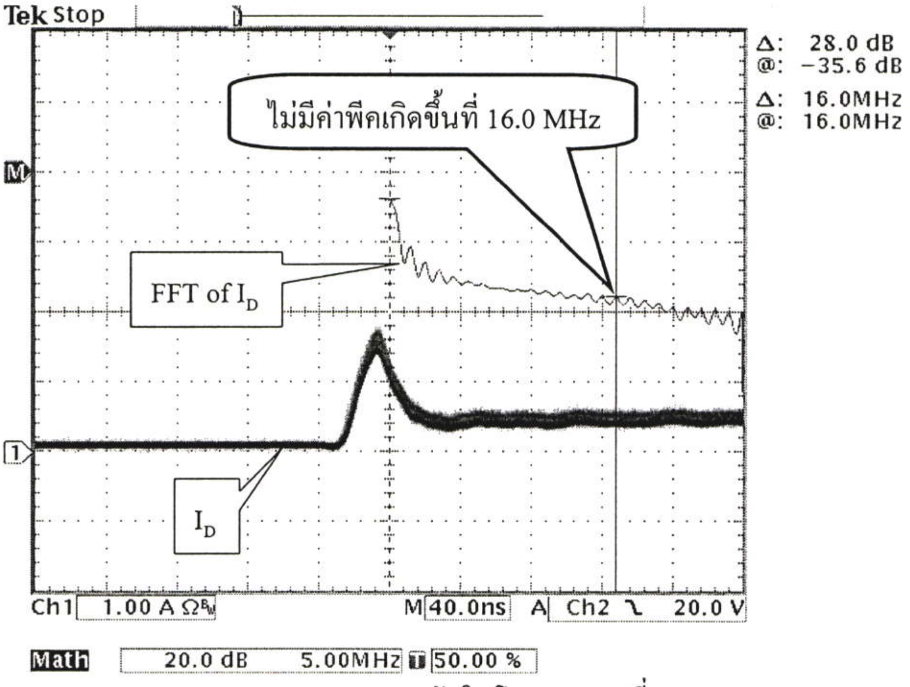
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟต จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.16



(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 μs/div)



(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยาย (40 ns/div)



(ค) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่

รูปที่ 6.16 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.13 (ก) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.15 (ก) จะ

พบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟตเกิดขึ้น แต่การพันแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 15.7 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.13 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.15 (ข) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_D เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz แต่การพันแบบทั่วไปจะมีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_D เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz

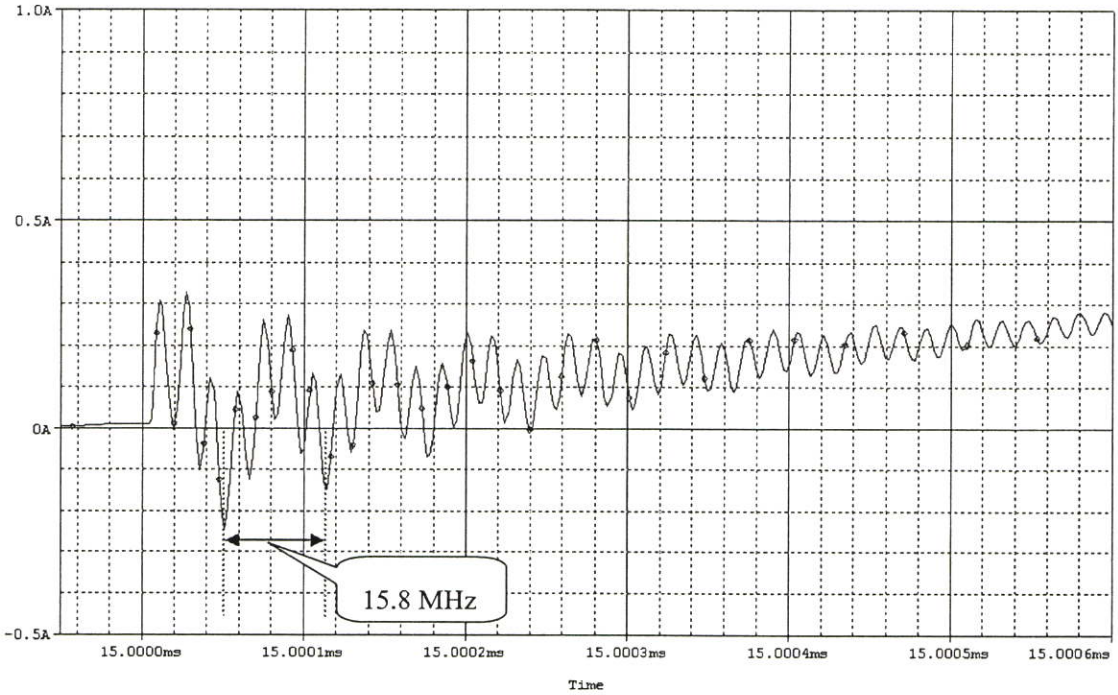
การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนเวลา โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.14 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.16 (ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_D ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.7 MHz ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_D จะมีการริงกิ้งเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 33.8 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.14 (ค) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.16 (ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟต (I_D) ในโดเมนความถี่ ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป จะมีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ 16.0 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปมีค่าลดลงมากที่สุดก่อนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และยังเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกันกับความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำจากแบบทั่วไปมาเป็นแบบก้าวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ส่วนวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า จะไม่มีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ช่วง 16.0 MHz

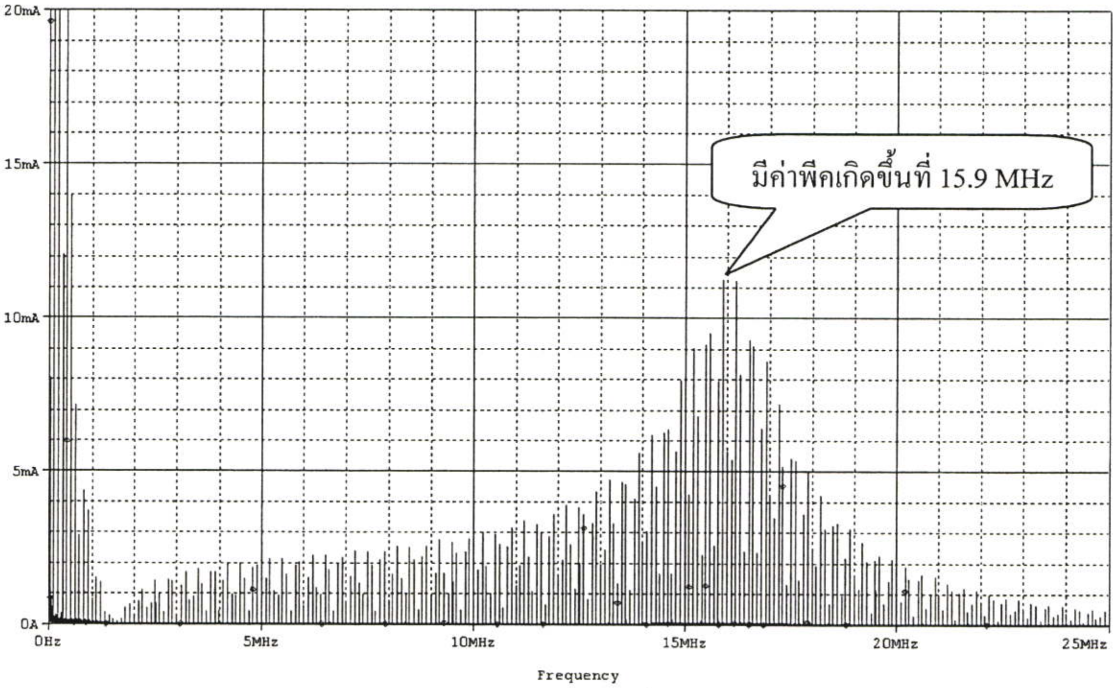
6.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้านรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ

6.3.1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

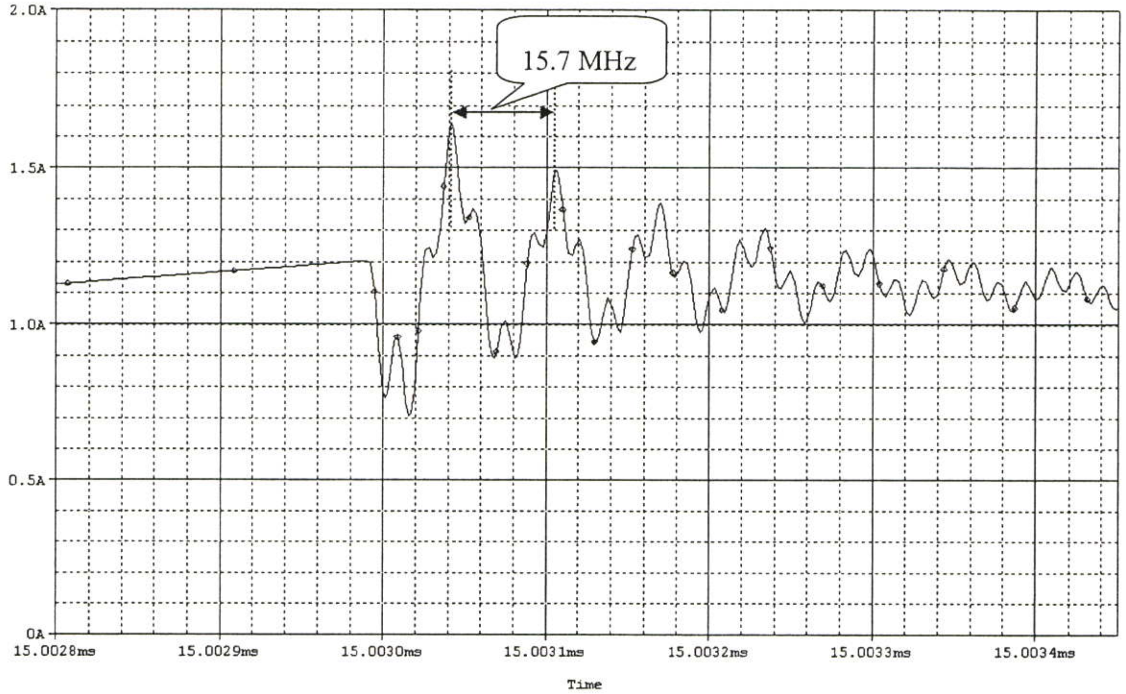
รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.17



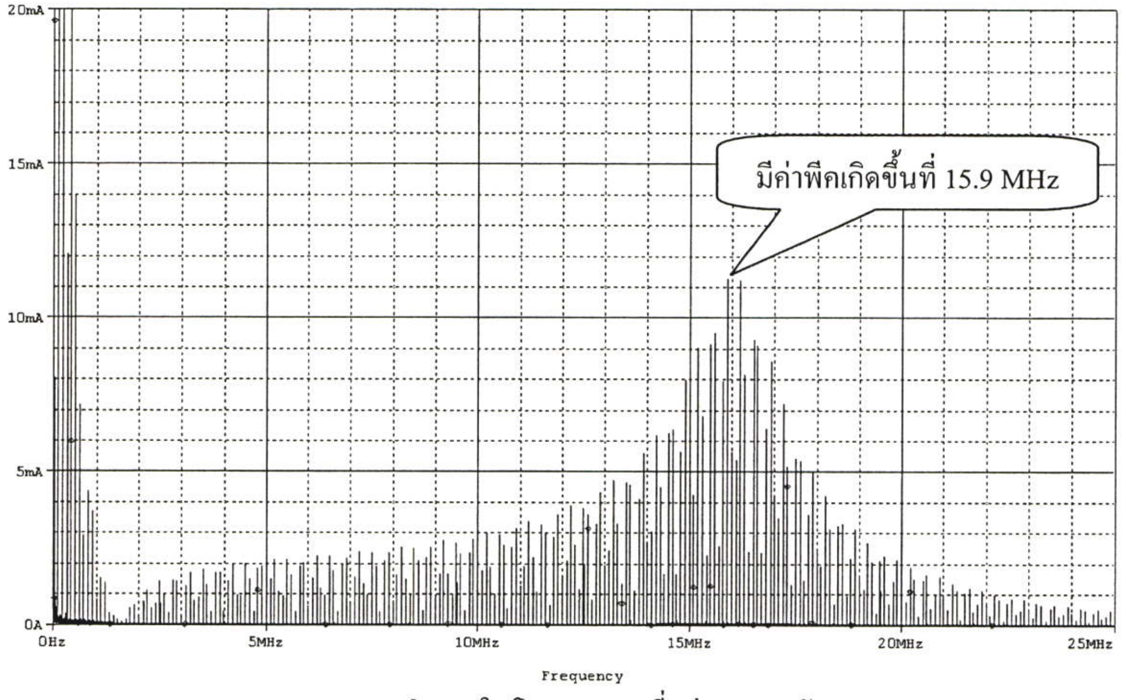
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงสะสมพลังงาน)



(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



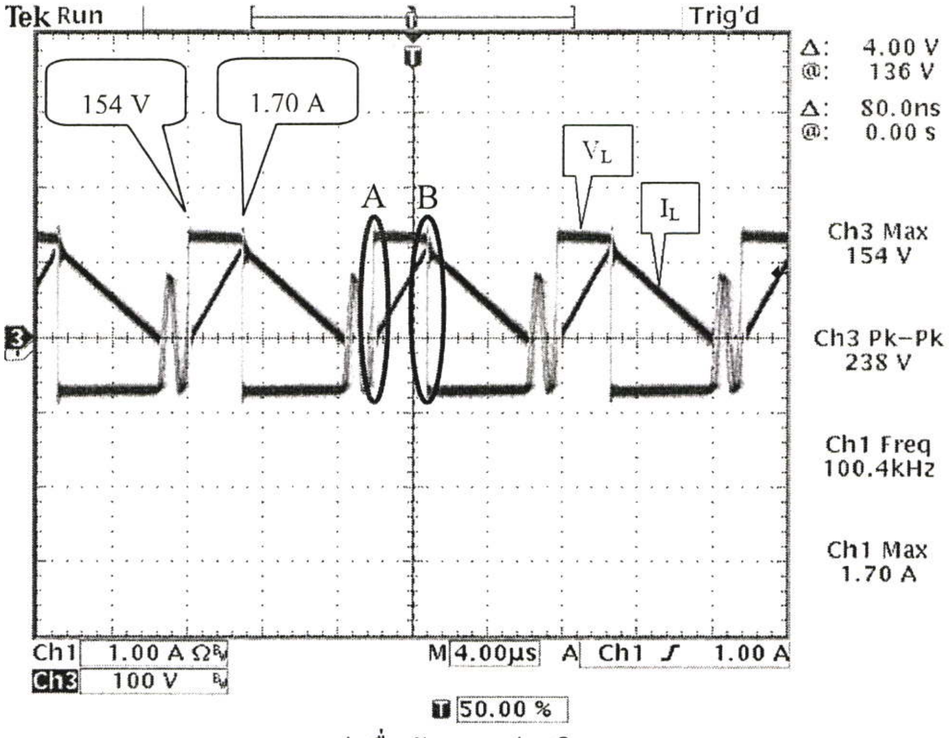
(ค) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงคายพลังงาน)



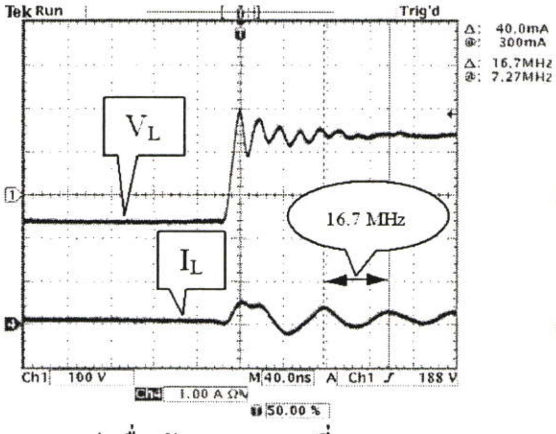
(ง) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.17 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

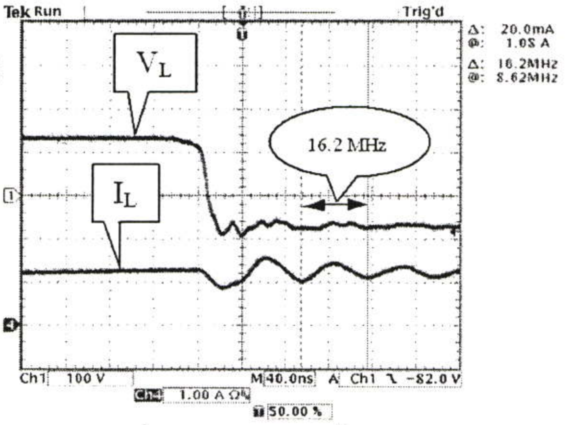
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.18



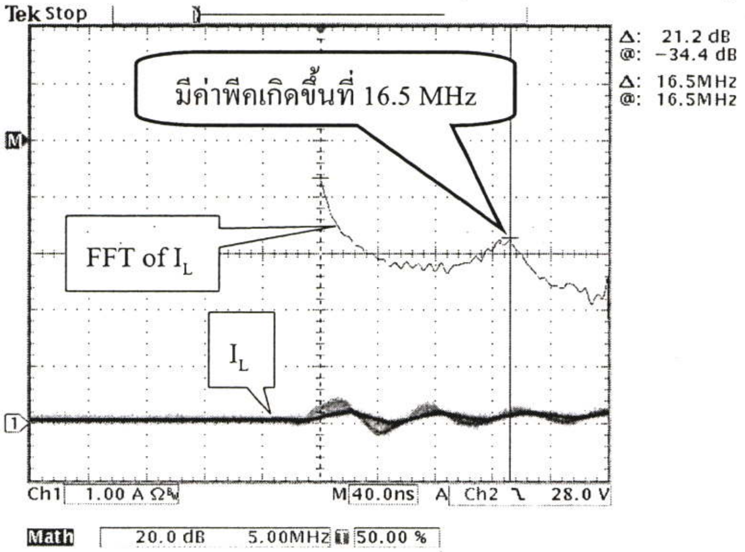
(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 μs/div)



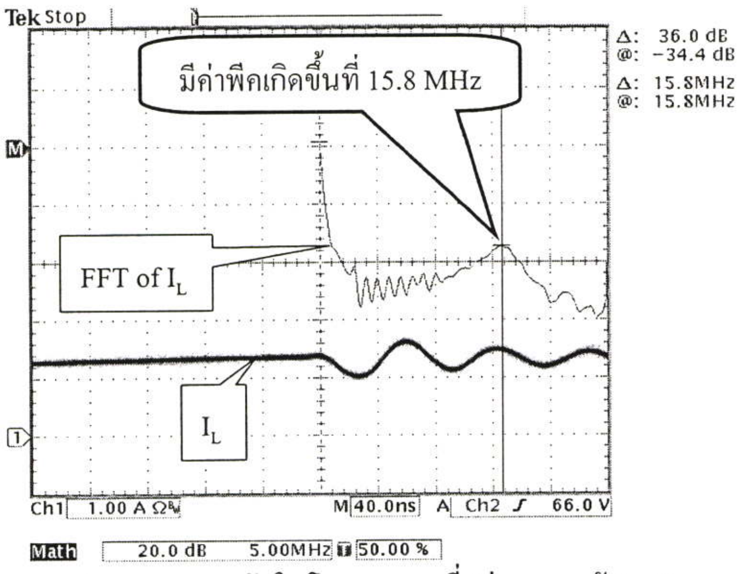
(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด A (40 ns/div)



(ค) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด B (40 ns/div)



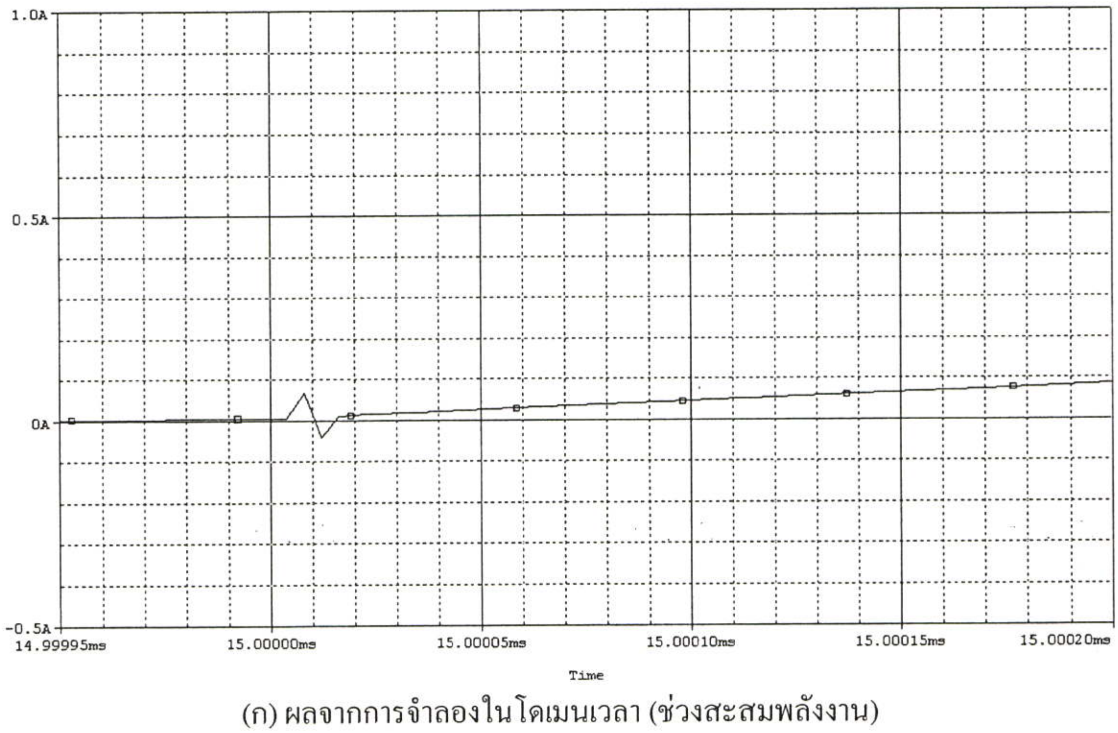
(ง) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



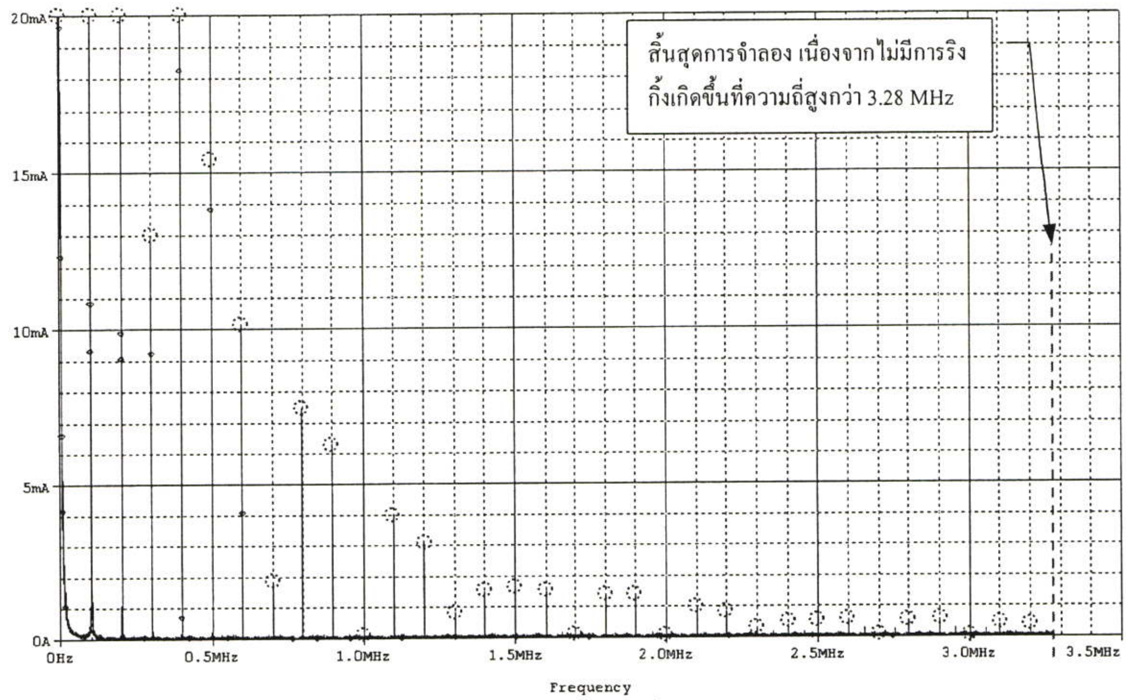
(จ) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.18 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

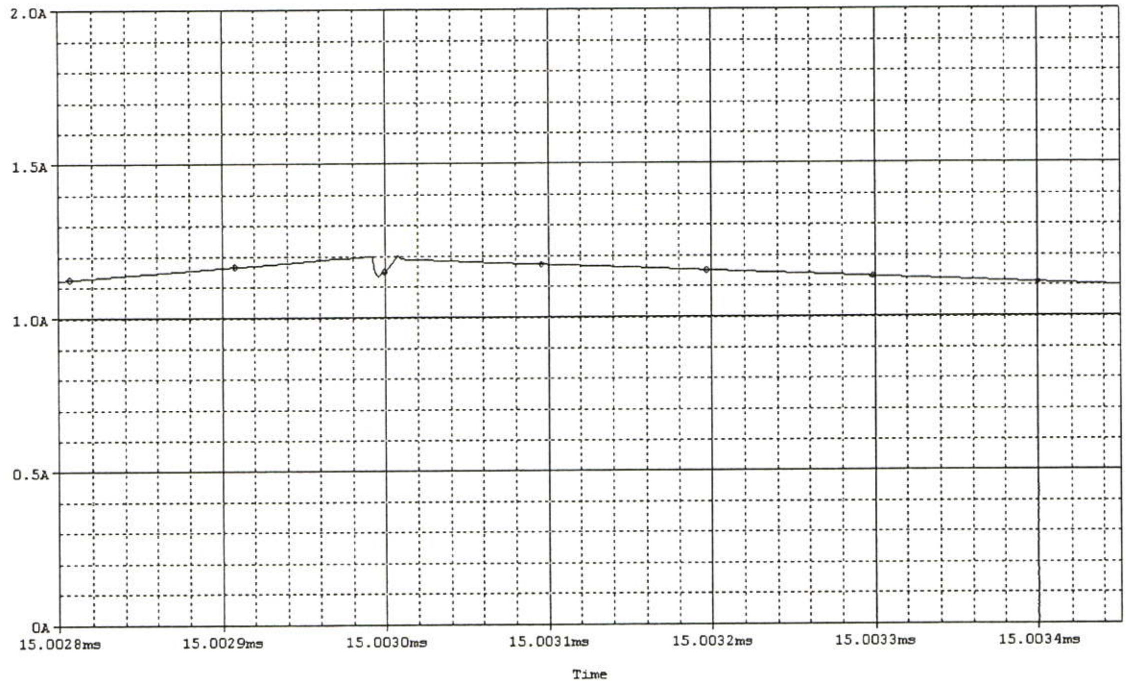
รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.19



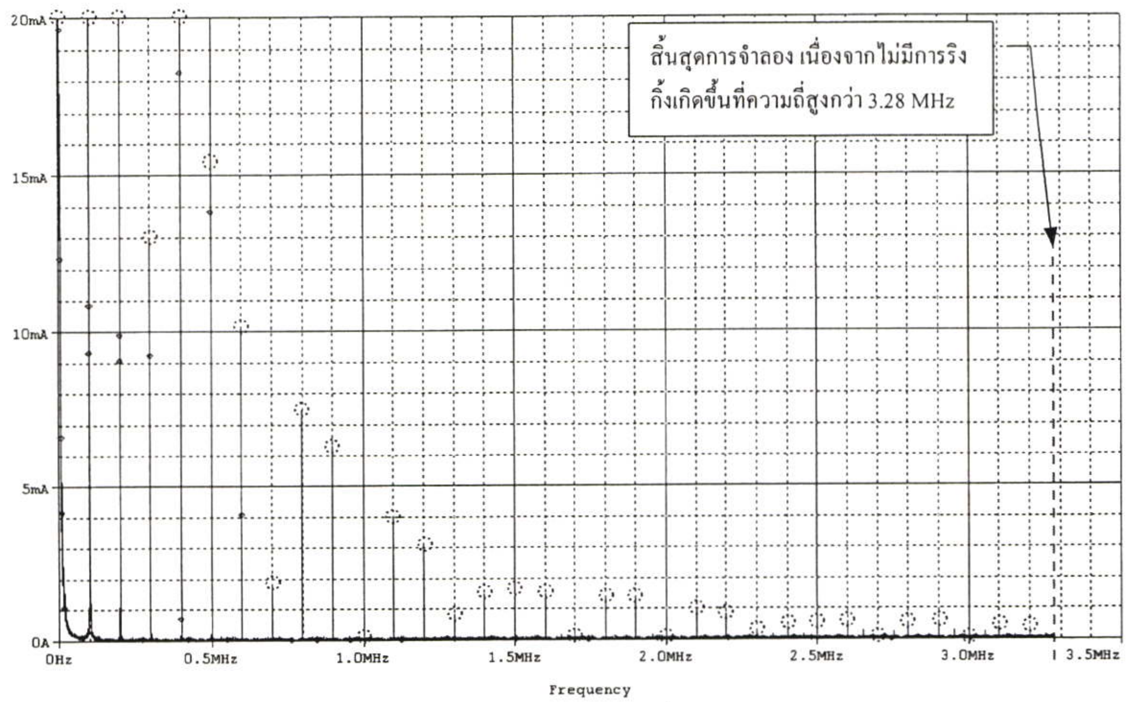
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงสะสมพลังงาน)



(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



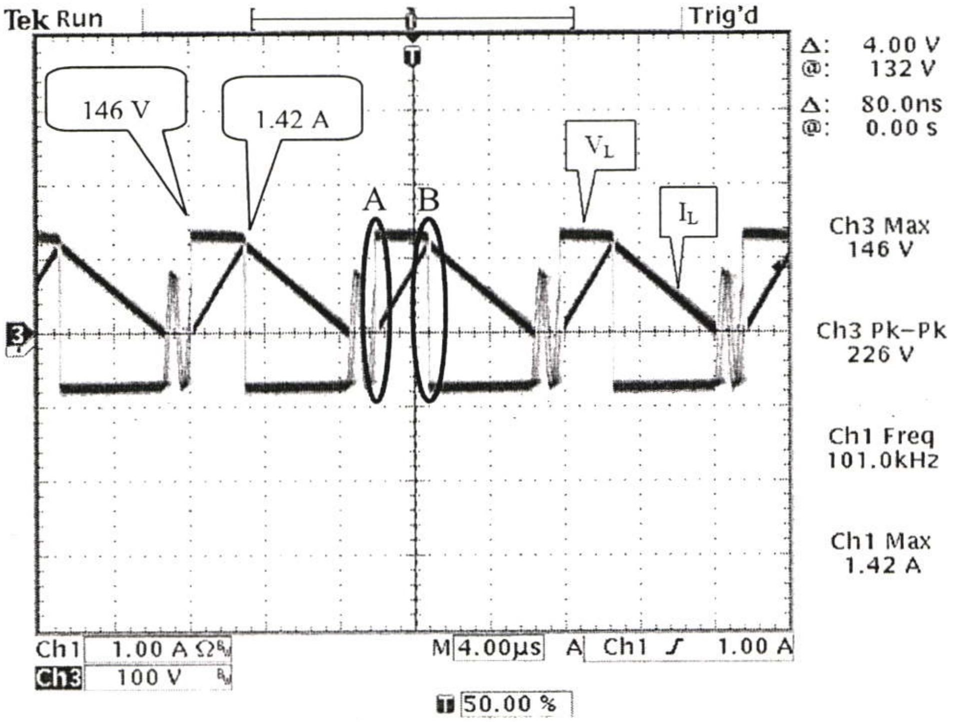
(ค) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงคายพลังงาน)



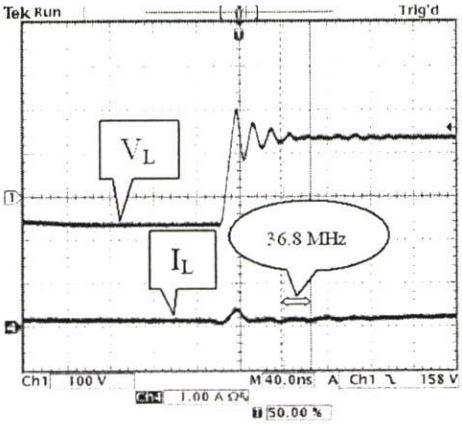
(ง) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.19 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

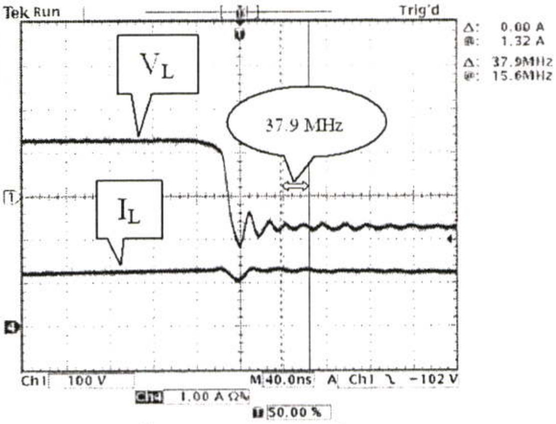
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.20



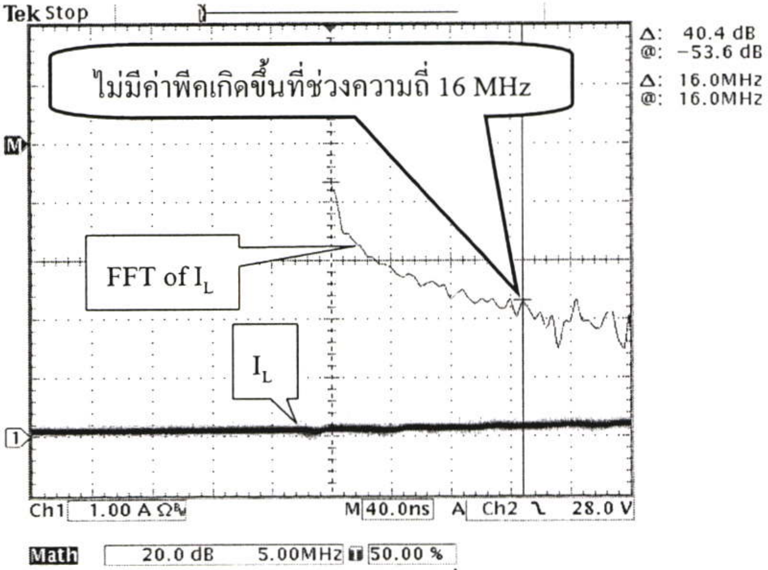
(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 μs/div)



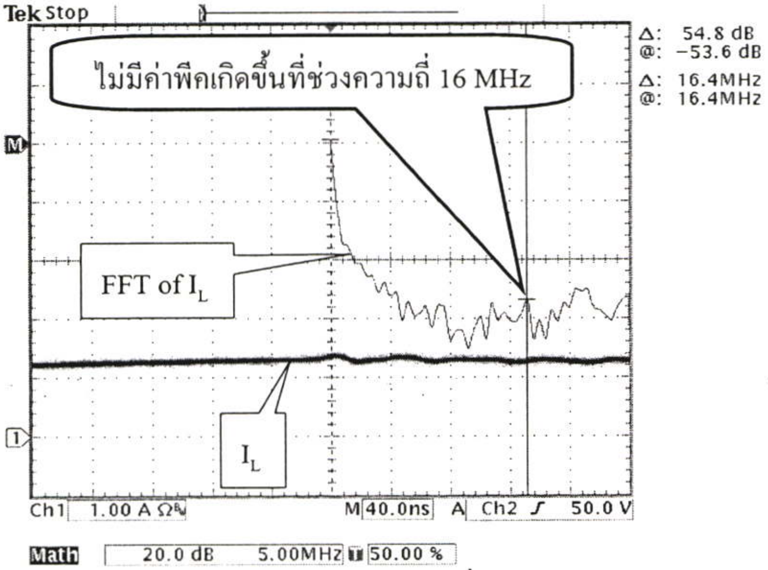
(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด A (40 ns/div)



(ค) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด B (40 ns/div)



(ง) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



(จ) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.20 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา ช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.17 (ก) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.19 (ก) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้น แต่การพันแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 15.8 MHz และในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.17 (ค) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.19 (ค) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าก็จะไม่มีการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้น แต่การพันแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 15.7 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ ช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.17 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.19 (ข) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz แต่การพันแบบทั่วไปจะมีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ความถี่ 15.9 MHz และในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.17 (ง) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.19 (ง) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าก็จะไม่มีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz แต่การพันแบบทั่วไปจะมีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ความถี่ 15.9 MHz

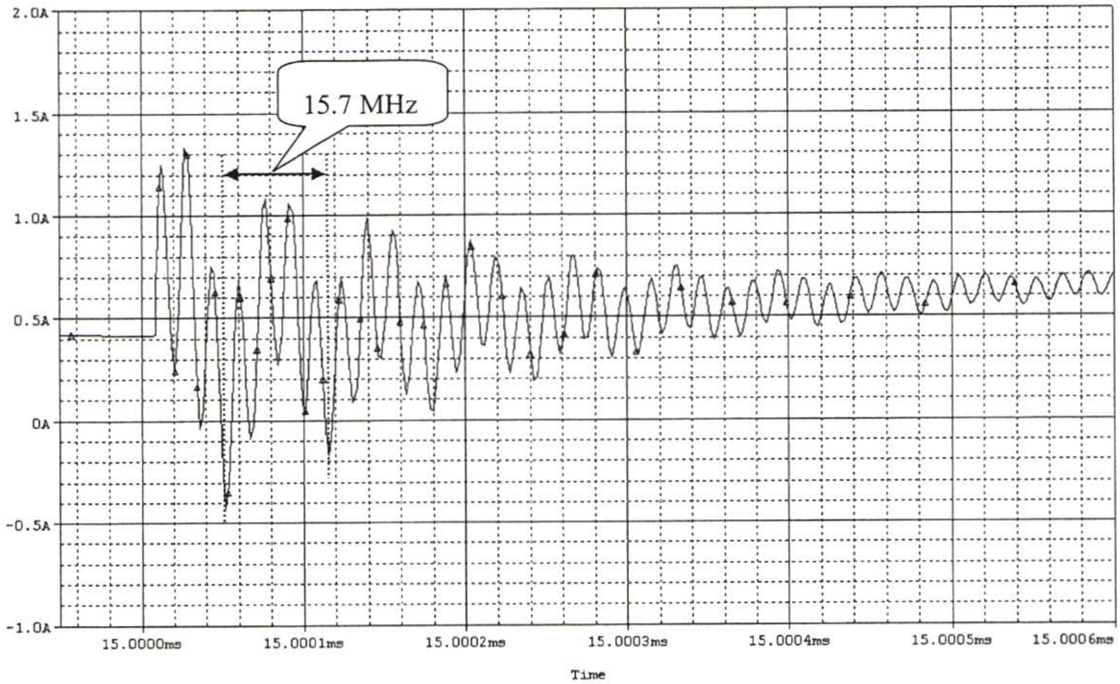
การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนเวลา ช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.18 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.20 (ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.7 MHz ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L จะมีการริงกิ้งเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 36.8 MHz และในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.18 (ค) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.20 (ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปก็จะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.2 MHz ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L จะมีการริงกิ้งเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 37.9 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ โดยในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงานจะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.18 (ง) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.20 (ง) ส่วนในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงานจะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.18 (จ) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.20 (จ) ซึ่งจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) ในโดเมนความถี่ ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป จะมี

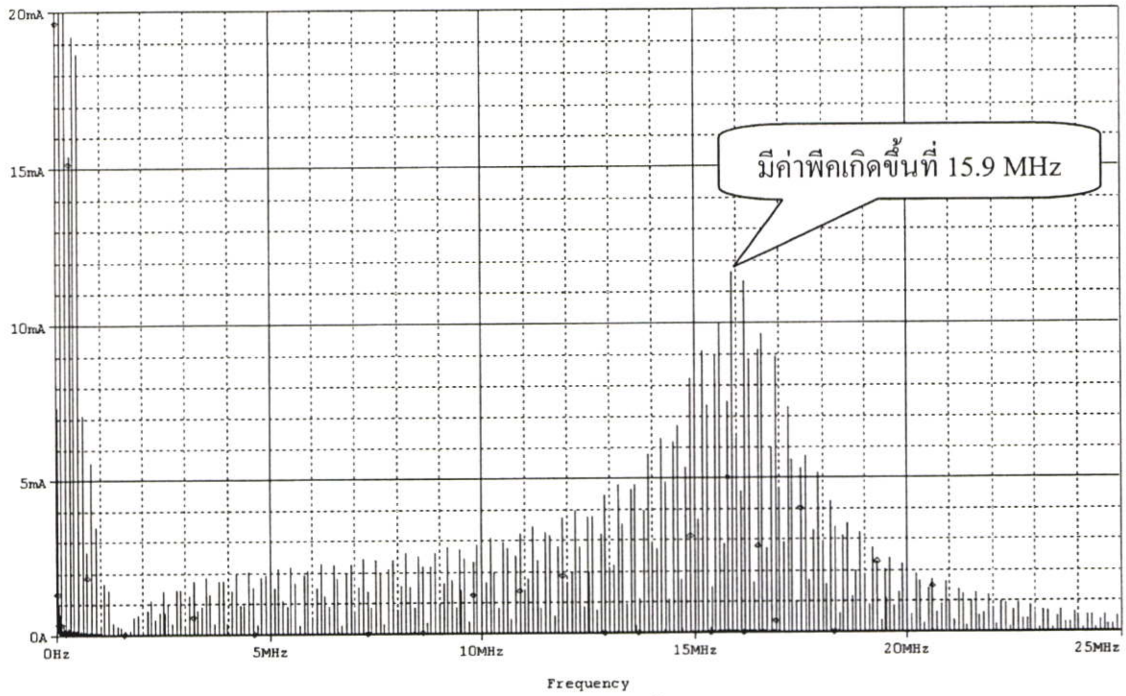
ค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ 16.5 MHz สำหรับช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน และจะมีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ 15.8 MHz สำหรับช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน ซึ่งทั้ง 2 ความถี่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปมีค่าลดลงมากที่สุดก่อนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และยังเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกันกับความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำจากแบบทั่วไปมาเป็นแบบก้าวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ส่วนวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า จะไม่มีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ช่วง 16.0 MHz ทั้งในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงานและช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน

6.3.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองและจากการวัดโดยวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

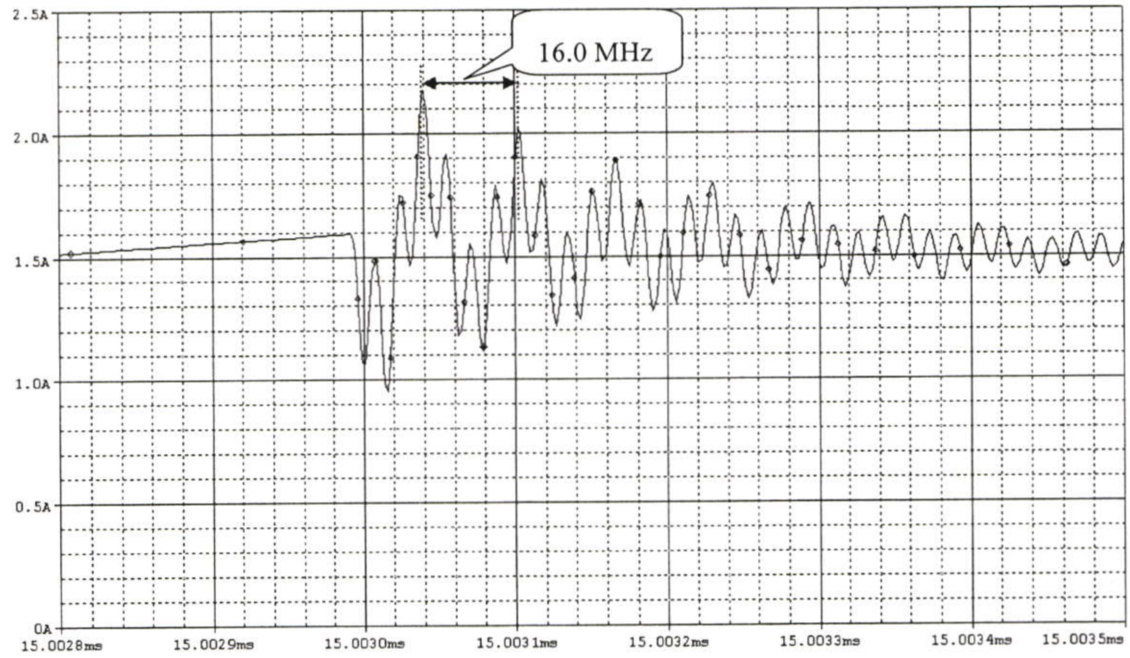
รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.21



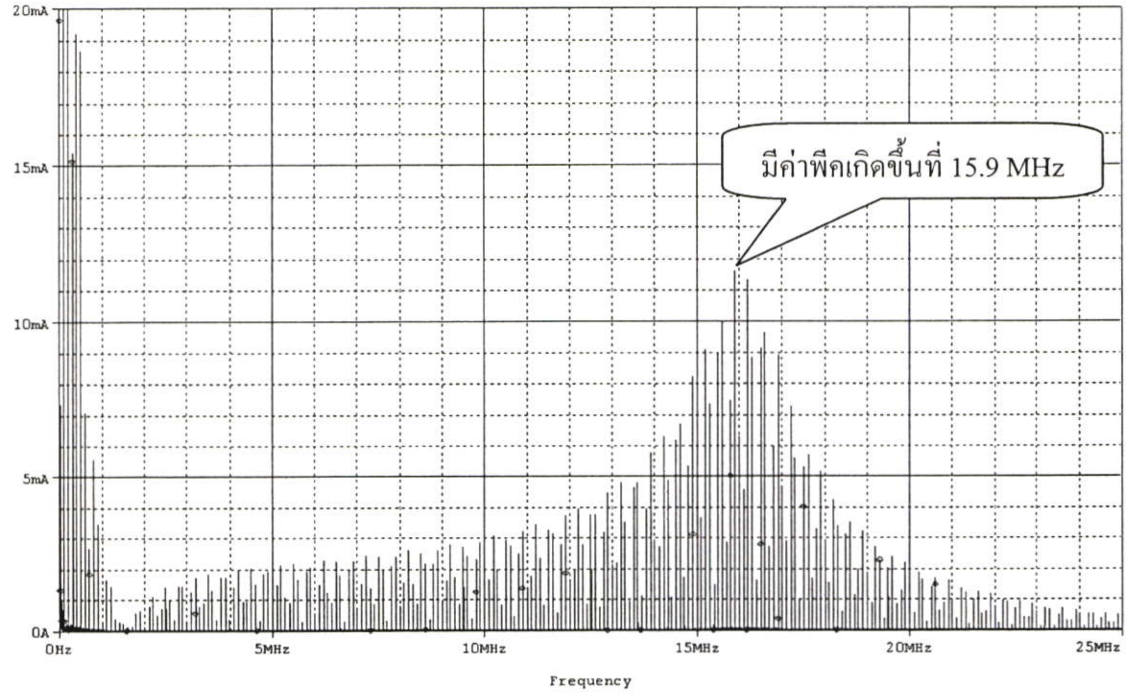
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงสะสมพลังงาน)



(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



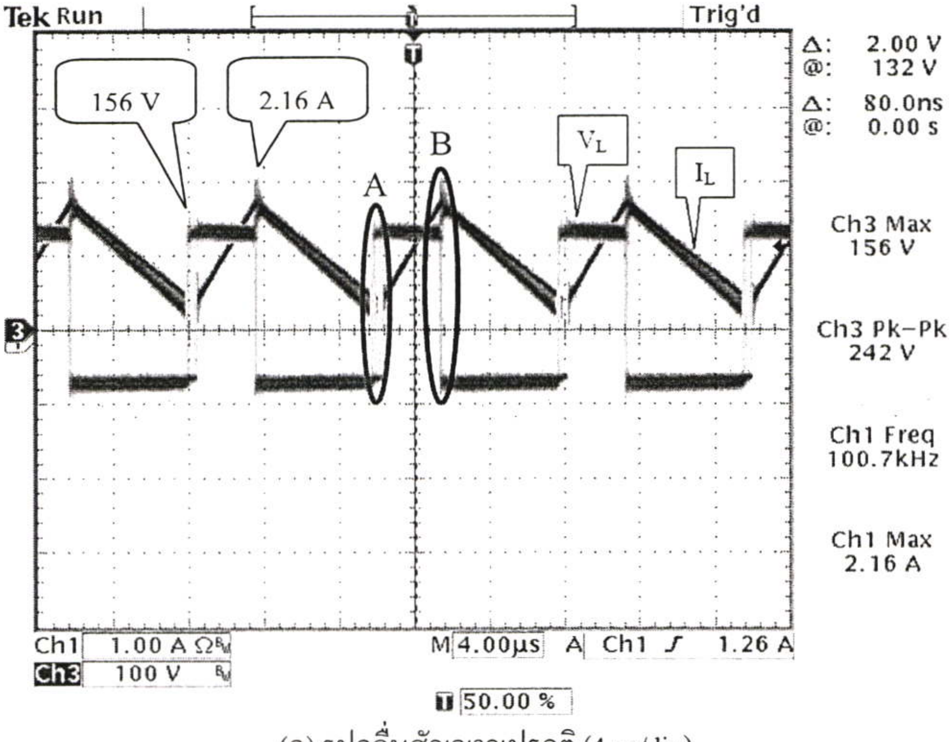
(ค) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงคายพลังงาน)



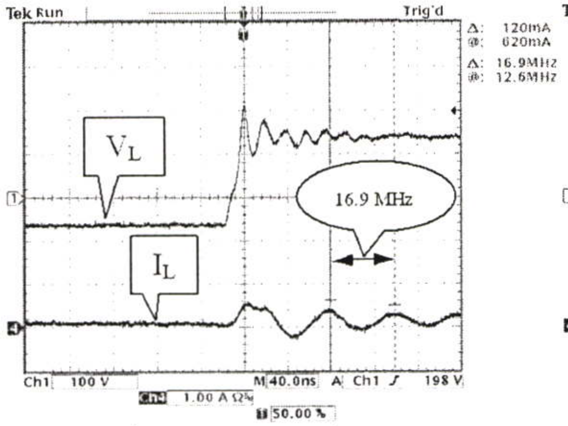
(ง) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.21 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

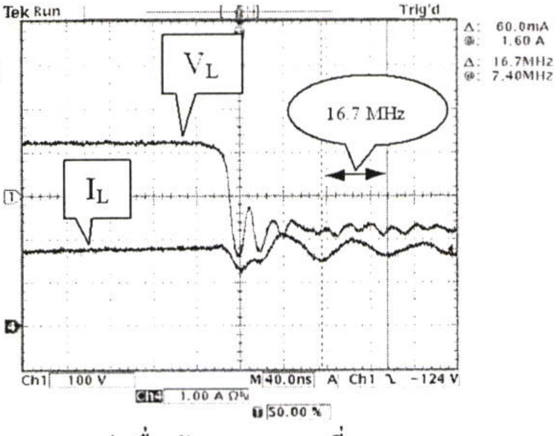
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป โดยทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.22



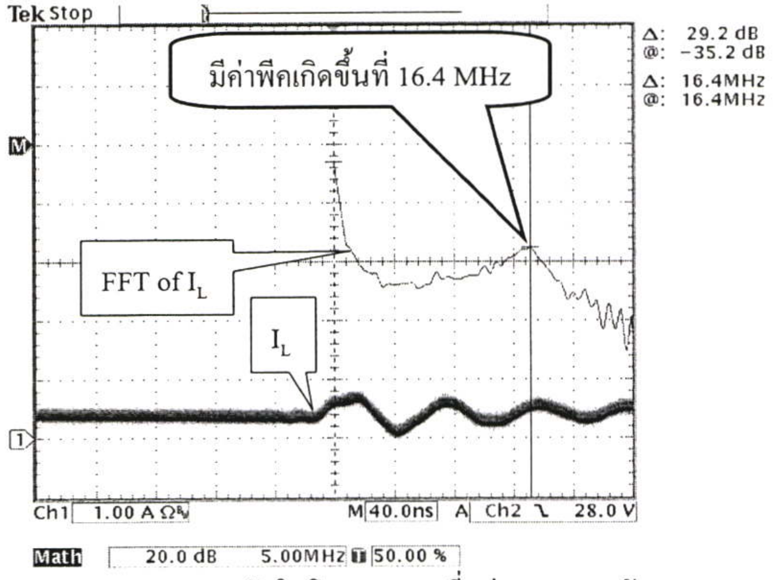
(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 µs/div)



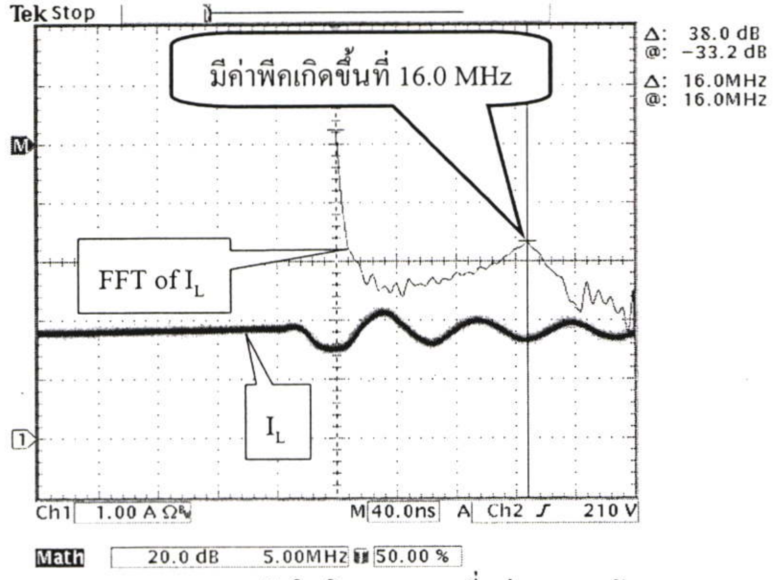
(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด A (40 ns/div)



(ค) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด B (40 ns/div)



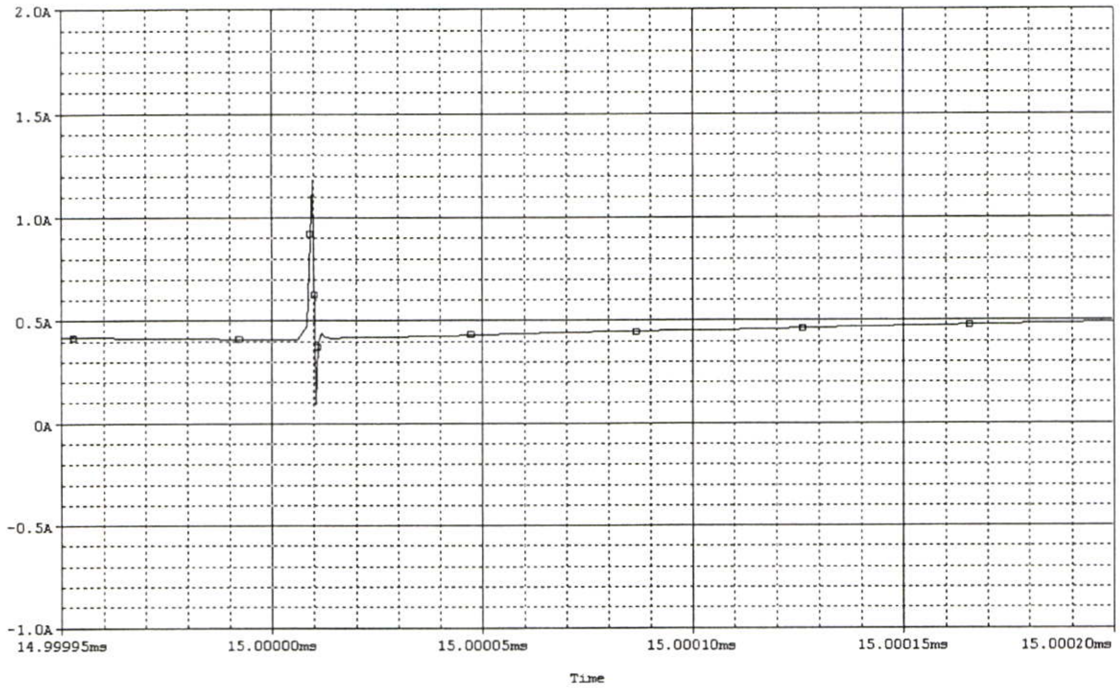
(ง) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



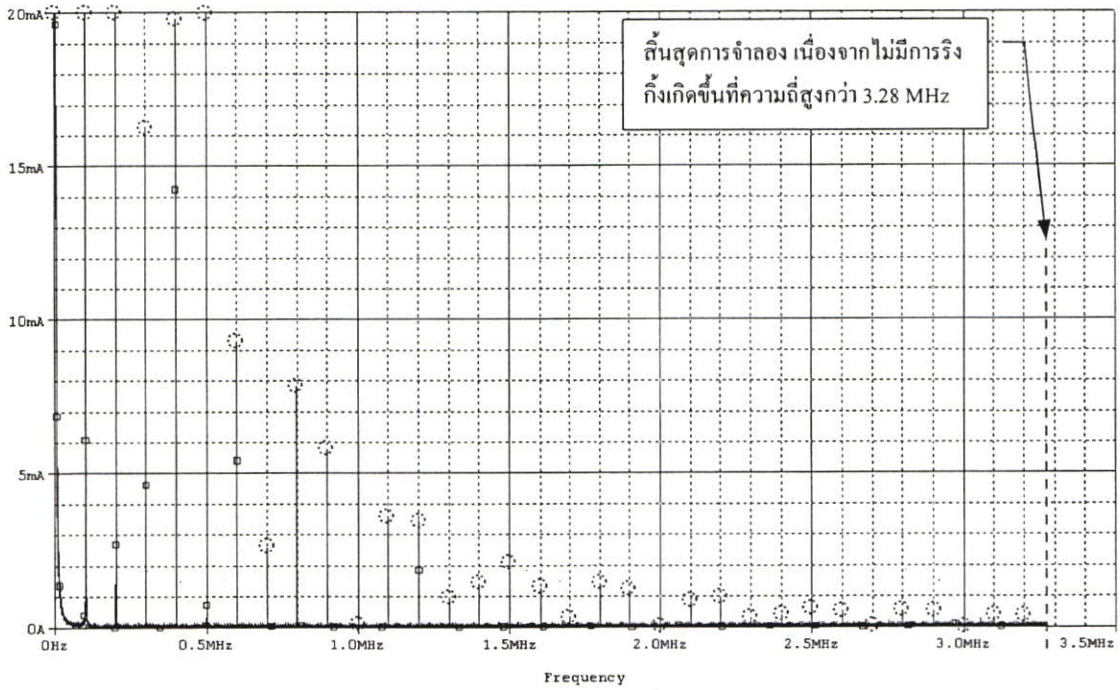
(จ) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.22 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

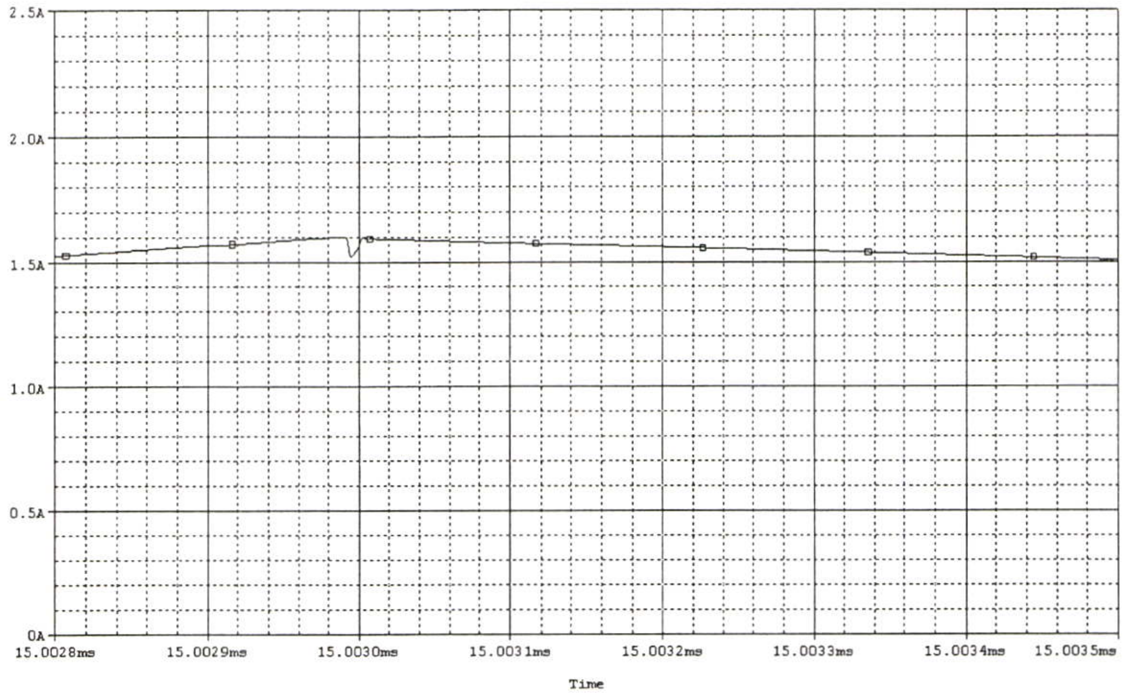
รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.23



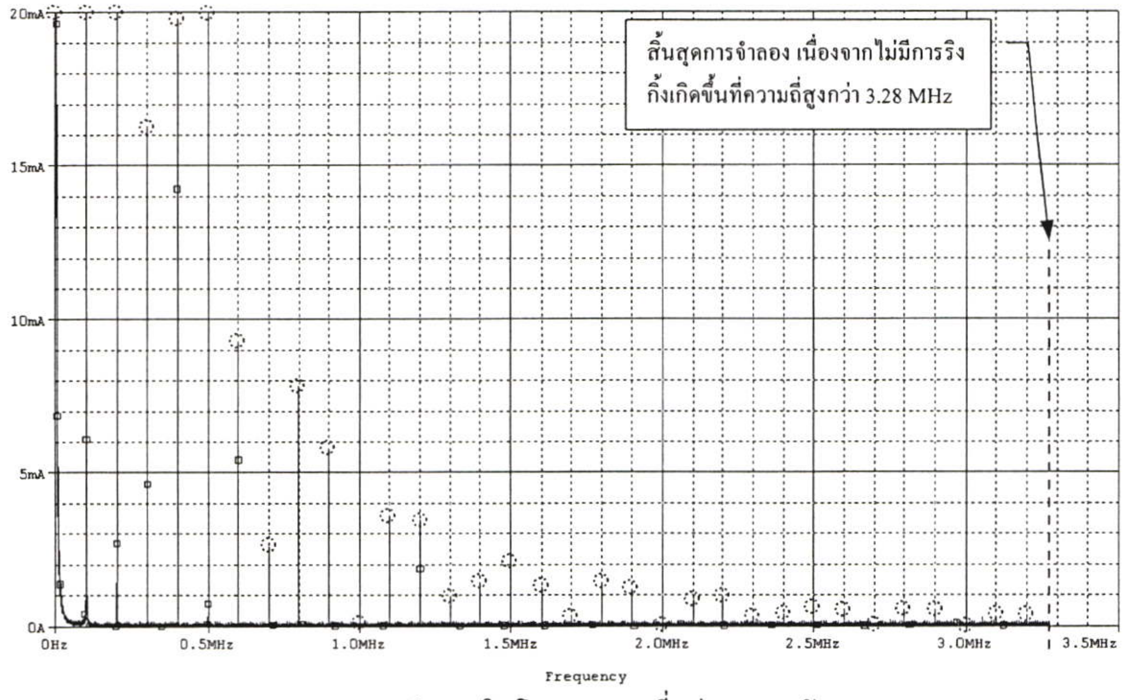
(ก) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงสะสมพลังงาน)



(ข) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



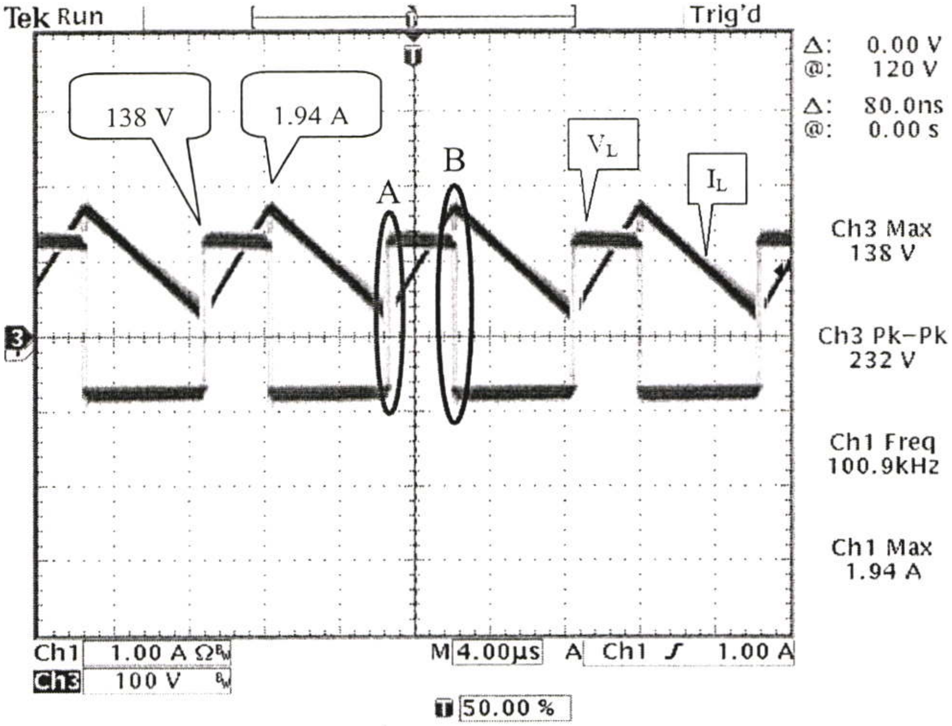
(ค) ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา (ช่วงคายพลังงาน)



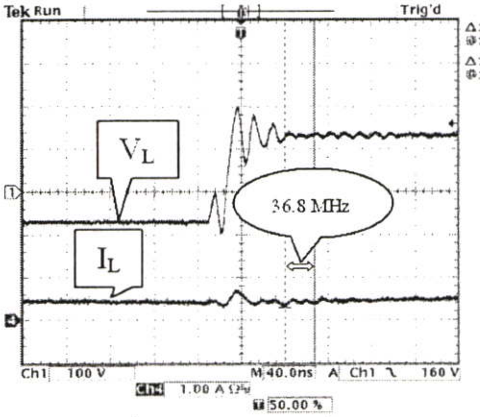
(ง) ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.23 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

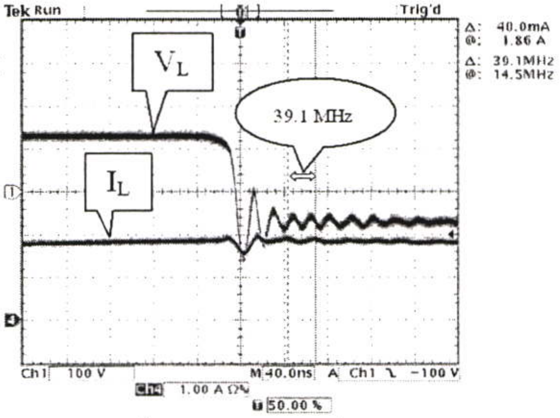
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ จากการวัดในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า โดยวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 6.24



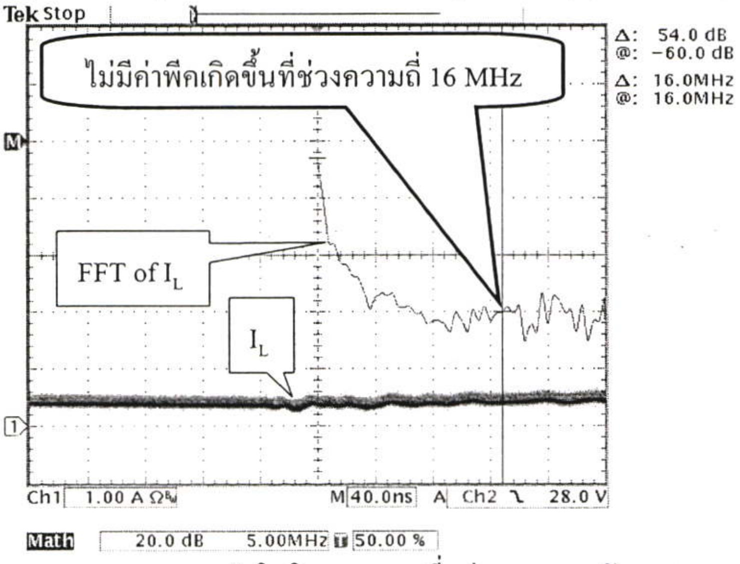
(ก) รูปคลื่นสัญญาณปรกติ (4 μs/div)



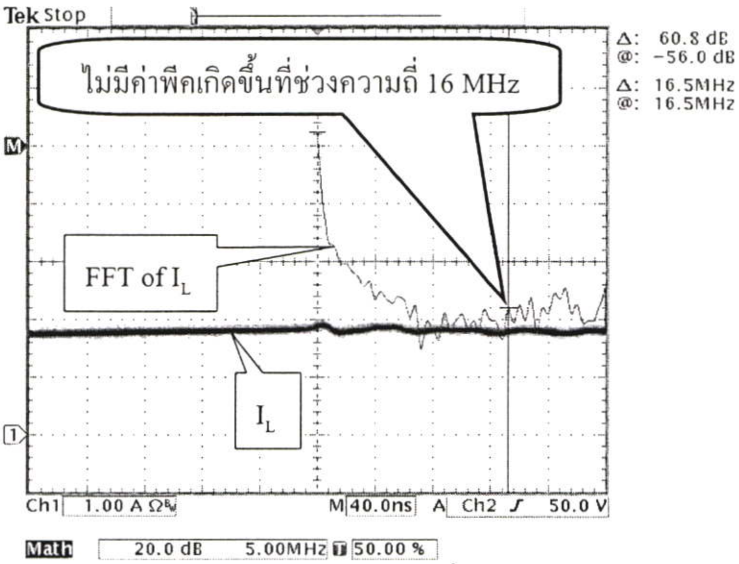
(ข) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด A (40 ns/div)



(ค) รูปคลื่นสัญญาณขยายที่จุด B (40 ns/div)



(ง) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงสะสมพลังงาน)



(จ) ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ (ช่วงคายพลังงาน)

รูปที่ 6.24 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนเวลา ช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.21 (ก) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.23 (ก) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้น แต่การพันแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 15.7 MHz และในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.21 (ค) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.23 (ค) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าก็จะไม่มีการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้น แต่การพันแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.0 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองในโดเมนความถี่ ช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.21 (ข) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.23 (ข) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าจะไม่มีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz แต่การพันแบบทั่วไปจะมีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ความถี่ 15.9 MHz และในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.21 (ง) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.23 (ง) จะพบว่าการพันแบบก้าวหน้าก็จะไม่มีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16.0 MHz แต่การพันแบบทั่วไปจะมีค่าพีคของสัญญาณรูปคลื่น I_L เกิดขึ้นที่ความถี่ 15.9 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนเวลา ช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.22 (ข) กับผลที่ได้จากการพัน

แบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.24 (ข) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปจะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.9 MHz ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L จะมีการริงกิ้งเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 36.8 MHz และในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.22 (ค) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.24 (ค) จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปก็จะมีการริงกิ้งเกิดขึ้น โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 16.7 MHz ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L จะมีการริงกิ้งเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการริงกิ้งอยู่ที่ 39.1 MHz

การวิเคราะห์ผลจากการวัดในโดเมนความถี่ โดยในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงานจะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.22 (ง) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.24 (ง) ส่วนในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงานจะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการพันแบบทั่วไป ดังรูปที่ 6.22 (จ) กับผลที่ได้จากการพันแบบก้าวหน้า ดังรูปที่ 6.24 (จ) ซึ่งจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) ในโดเมนความถี่ ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป จะมีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ 16.4 MHz สำหรับช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงาน และจะมีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ 16.0 MHz สำหรับช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน ซึ่งทั้ง 2 ความถี่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบทั่วไปมีค่าลดลงมากที่สุดก่อนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และยังเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกันกับความถี่ที่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำจากแบบทั่วไปมาเป็นแบบก้าวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ส่วนวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า จะไม่มีค่าพีค (Peak) เกิดขึ้นที่ความถี่ช่วง 16.0 MHz ทั้งในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มเก็บสะสมพลังงานและช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มคายพลังงาน

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบก้าวหน้า เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะทำการทดสอบทั้งโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง และแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งรูปแบบการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำทั้งแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า ได้ทำการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า ทั้งในเรื่องของค่าตัวเก็บประจุแฝง กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 สรุปผลการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 7.1.1 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า 7.1.2 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ 7.1.3 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า และ 7.1.4 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพรวมของวงจรไฟฟ้า

7.1.1 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

(ก) ด้านค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ

สามารถสรุปได้ว่า ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้วิธีการพันขดลวดแบบก้าวหน้าจะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมน้อยกว่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้วิธีการพันขดลวดแบบทั่วไป โดยจากการคำนวณในบทที่ 3 จะพบว่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันขดลวดแบบก้าวหน้าจะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมเท่ากับ 0.735 pF ส่วนตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้การพันขดลวดแบบทั่วไปจะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงรวมเท่ากับ 8.281 pF

(ข) ด้านความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ

ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเป็นตัวแสดงถึง ความถี่สูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำยังคงมีคุณสมบัติในการเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้วิธีการพันขดลวดแบบก้าวหน้าจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้วีธีการพันขดลวดแบบทั่วไป กล่าวคือ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่พันขดลวดแบบก้าวหน้าจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ครั้งแรกเกิดขึ้นที่ความถี่ 5.42 MHz ส่วนตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่พันขดลวดแบบทั่วไปจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ครั้งแรกเกิดขึ้นที่ความถี่ 1.54 MHz

(ค) ด้านจำนวนครั้งของการเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ

จากการวิเคราะห์กราฟคุณลักษณะเฉพาะของความถี่กับอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของ Hewlett-Packard รุ่นHP4194A โดยทำการวัดในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 40 MHz จะได้ว่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันขดลวดแบบก้าวหน้าจะมีการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นเพียงครั้งเดียวเท่านั้น คือ ที่ความถี่เท่ากับ 5.42 MHz ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้การพันขดลวดแบบทั่วไปจะมีการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้น 3 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เกิดขึ้นที่ความถี่ 1.54 MHz ครั้งที่ 2 ที่ความถี่ 16.21 MHz และครั้งที่ 3 เกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากับ 29.92 MHz

7.1.2 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

(ก) ด้านโหมดการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

สามารถสรุปได้ว่า วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จะมีค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่สูงกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ทั้งในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไปและในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และ 6.6 ตามลำดับ โดยในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำของทั้ง 2 โหมดการทำงานจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 20 MHz ส่วนในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 MHz จนถึง 100 MHz นั้น พบว่าสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องอยู่เสมอ ส่วนในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของทั้ง 2 โหมดการทำงานจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 10 MHz ส่วนในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 MHz จนถึง 100 MHz นั้น จะพบว่าสเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องอยู่เสมอ

(ข) ด้านรูปแบบการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า จะมีค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ต่ำกว่าวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป ทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง และโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ โดยที่ช่วงความถี่ประมาณ 16 MHz จะเป็นช่วงความถี่ที่การพันขดลวดแบบก้าวหน้าสามารถลดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำลงได้มากที่สุด คือ ในการทำงานโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องสามารถลดค่าสัญญาณรบกวนลงได้ 15.3 dB และในการทำงานโหมดกระแสต่อเนื่องสามารถลดค่าสัญญาณรบกวนลงได้ 11.9 dB โดยที่ความถี่ดังกล่าวจะเป็นช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกับช่วงความถี่ที่ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไปมีการเรโซแนนซ์ครั้งที่ 2 เกิดขึ้น ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ค่าตัวเก็บประจุแฝงมีอิทธิพลต่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามากที่สุด

7.1.3 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า

(ก) ด้านรูปคลื่นสัญญาณของมอสเฟต

จากการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณกระแสของมอสเฟตทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง พบว่ารูปคลื่นสัญญาณกระแสของมอสเฟตในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป จะมีการริงกิ้งเกิดขึ้นในช่วงที่มอสเฟตเริ่มนำกระแสไฟฟ้า โดยความถี่ในการริงกิ้งจะอยู่ที่ประมาณ 16 MHz ส่วนในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้าจะไม่มีการริงกิ้งของรูปคลื่นกระแสมอสเฟตเกิดขึ้น โดยการริงกิ้งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz

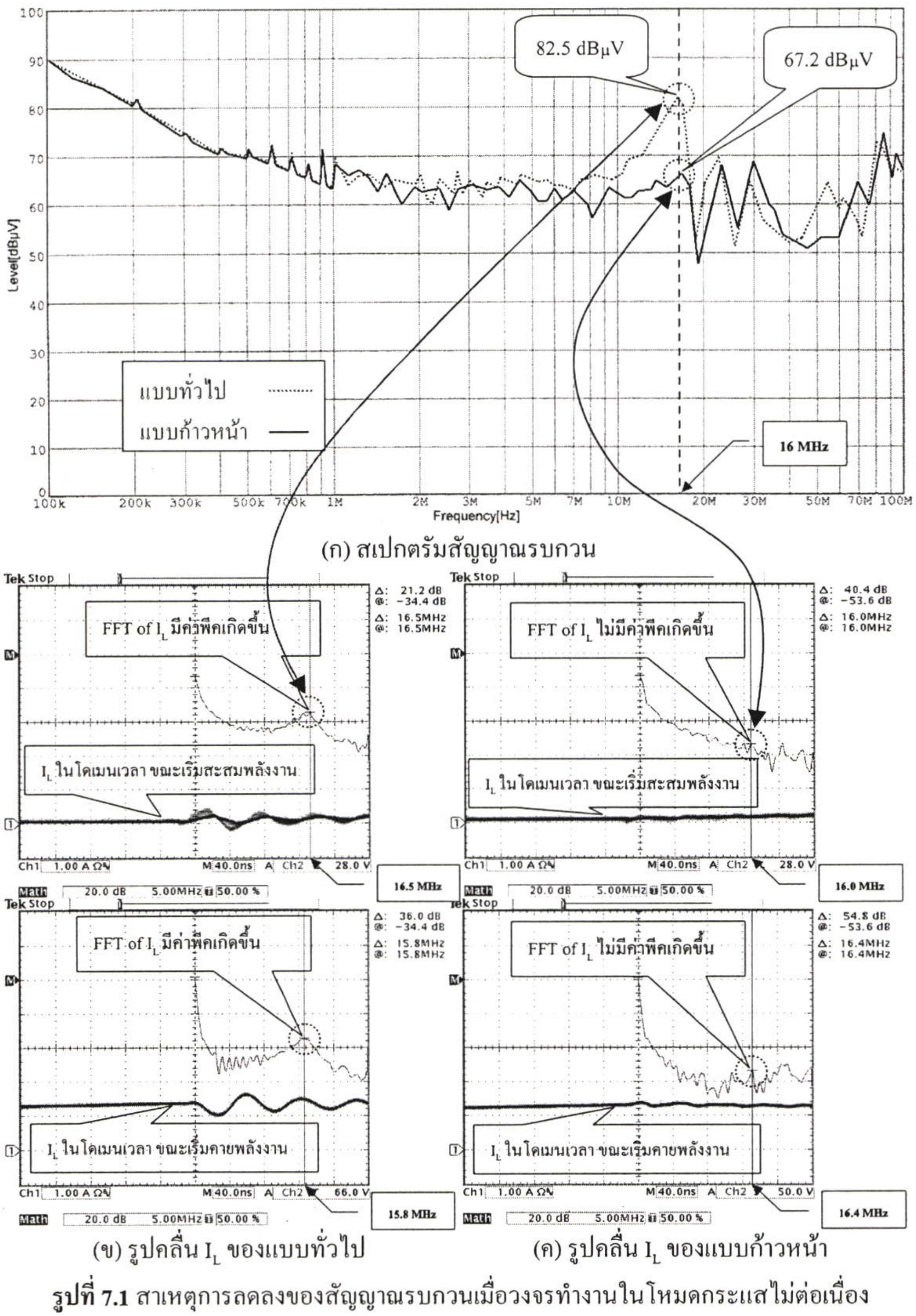
(ข) ด้านรูปคลื่นสัญญาณของตัวเหนี่ยวนำ

จากการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง พบว่ารูปคลื่นสัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไป จะมีการริงกิ้งเกิดขึ้นในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเริ่มสะสมพลังงานและเริ่มคายพลังงาน โดยความถี่ในการริงกิ้งจะอยู่ที่ประมาณ 16 MHz ส่วนในวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้าจะไม่มีการริงกิ้งของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้น โดยการริงกิ้งที่เกิดขึ้นนี้ก็จะเป็นผลทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำมีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz

ซึ่งจากการทดสอบและวิเคราะห์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบทั่วไปและตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันขดลวดแบบก้าวหน้า ทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อแตกต่างของการพันทั้ง 2 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบทั่วไปกับแบบก้าวหน้า

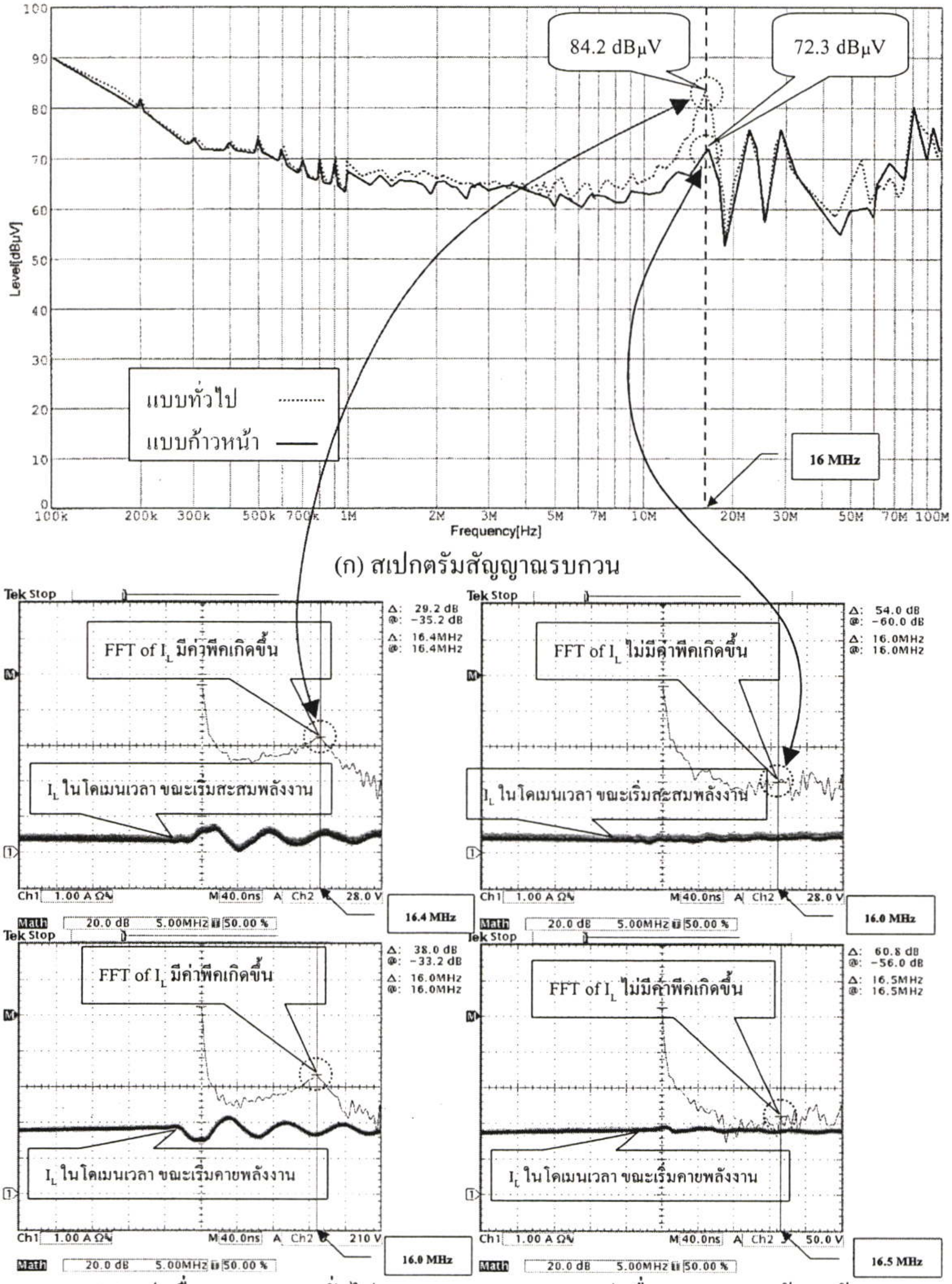
เงื่อนไขในการเปรียบเทียบ	แบบทั่วไป	แบบก้าวหน้า
ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ	8.281 pF	0.735 pF
ความถี่ในการเกิดเรโซแนนซ์ ครั้งที่ 1	1.54 MHz	5.42 MHz
ความถี่ในการเกิดเรโซแนนซ์ ครั้งที่ 2	16.21 MHz	ไม่มี
ความถี่ในการเกิดเรโซแนนซ์ ครั้งที่ 3	29.92 MHz	ไม่มี
ความถี่ในการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟต	16 MHz	ไม่มี
ความถี่ในการริงกิ้งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	16 MHz	ไม่มี
ค่าพีคของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่ความถี่ 16 MHz	มี	ไม่มี



รูปที่ 7.1 สาเหตุการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อวงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

ดังนั้นจึงสามารถอธิบายถึงสาเหตุหลักของการลดลงของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ช่วงความถี่ 16 MHz ได้ดังรูปที่ 7.1 และ รูปที่ 7.2 โดยรูปที่ 7.1 จะเป็นการอธิบายถึงสาเหตุการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดกระแสไม่

ต่อเนื่อง ส่วนรูปที่ 7.2 จะเป็นการอธิบายถึงสาเหตุการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง



(ก) สเปกตรัมสัญญาณรบกวน

(ข) รูปคลื่น I_L ของแบบทั่วไป (ค) รูปคลื่น I_L ของแบบก้าวหน้า

รูปที่ 7.2 สาเหตุการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

จากรูปที่ 7.1 ซึ่งเป็นการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L ในโดเมนความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป จะมีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz ซึ่งมีผลทำให้สเปกตรัมสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป มีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz เช่นกัน ส่วนรูปคลื่น I_L ของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า จะไม่มีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz จึงทำให้สามารถลดค่าสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 16 MHz ลงได้

จากรูปที่ 7.2 ซึ่งเป็นการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณ I_L ในโดเมนความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป จะมีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz ซึ่งมีผลทำให้สเปกตรัมสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป มีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz เช่นกัน ส่วนรูปคลื่นสัญญาณ I_L ในโดเมนความถี่ของตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า จะไม่มีค่าพีคเกิดขึ้นที่ช่วงความถี่ 16 MHz จึงทำให้สามารถลดค่าสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 16 MHz ลงได้

7.1.4 สรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพรวมของวงจรไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ด้านประสิทธิภาพรวมของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จะสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

<table>
<tr><th></th><th>โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (P_{IN} = 70W)</th><th>โหมดกระแสต่อเนื่อง (P_{IN} = 140W)</th><th>ความแตกต่างระหว่างโหมดการทำงาน</th></tr>
<tr><td rowspan="2">การพันขดลวดแบบทั่วไป</td><td>P_{OUT} = 64.92W</td><td>P_{OUT} = 126.99W</td><td rowspan="2">2.04%</td></tr>
<tr><td>Efficiency = 92.75%</td><td>Efficiency = 90.71%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">การพันขดลวดแบบก้าวหน้า</td><td>P_{OUT} = 66.15W</td><td>P_{OUT} = 129.65W</td><td rowspan="2">1.89%</td></tr>
<tr><td>Efficiency = 94.50%</td><td>Efficiency = 92.61%</td></tr>
<tr><td>ความแตกต่างระหว่างรูปแบบการพัน</td><td>1.75%</td><td>1.90%</td><td></td></tr>
</table>

จากตารางที่ 7.2 หากเปรียบเทียบกันระหว่างโหมดการทำงาน จะพบว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งเป็นเพราะว่ารูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องจะมีการริงกิ้งที่น้อยกว่าโหมดกระแสต่อเนื่อง ทำให้วงจรมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยกว่าโหมดกระแสต่อเนื่อง

หากเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบการพันขดลวด จะพบว่าในวงจรที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบทั่วไป เนื่องจากวงจรที่ใช้การพันแบบก้าวหน้าจะมีการริงกิ้งของรูปคลื่นสัญญาณที่น้อยกว่าแบบทั่วไป ทำให้วงจรมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยกว่าแบบทั่วไป

7.2 ข้อเสนอแนะ

ประเด็นต่างๆ ที่จะเป็นแนวทางในการวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆมีดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มจำนวนชั้นของขดลวด ในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนชั้นของขดลวดเพียง 2 ชั้น ซึ่งหากทำการเพิ่มจำนวนชั้นของขดลวดเป็น 3 หรือ 4 ชั้น ก็อาจจะทำให้รูปแบบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปได้

2. วงจรแปลงผันกำลังไฟตรงเป็นไฟตรง ที่มีการใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบนั้น นอกจากวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แล้ว ยังมีวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงเป็นไฟตรงแบบอื่นๆอีก ดังนั้นเมื่อนำเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าไปใช้กับตัวเหนี่ยวนำในวงจรอื่นๆ ก็อาจจะทำให้รูปแบบของการลดลงของสัญญาณรบกวนนั้นเปลี่ยนแปลงไปได้

3. เทคนิคการพันขดลวดแบบก้าวหน้า นอกจากจะนำมาใช้กับการพันตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการพันหม้อแปลงไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นเทคนิคการพันขดลวดแบบก้าวหน้าจึงอาจจะสามารถช่วยลดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงไฟฟ้าได้อีกด้วย

4. เนื่องจากการวิจัยนี้ทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวมเท่านั้น ดังนั้นหากทำการทดสอบและวิเคราะห์เพื่อศึกษาและอธิบายผลของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างและโหมดผลร่วม ก็จะทำให้ทราบว่าค่าสัญญาณรบกวนที่ลดลงนั้น เกิดจากการลดลงของสัญญาณรบกวนในโหมดใดบ้าง

5. เนื่องจากการวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบเฉพาะค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำเท่านั้น ดังนั้นหากทำการศึกษาถึงผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศ ก็จะทำให้ทราบว่า เทคนิคการพันขดลวดแบบก้าวหน้าสามารถลดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศได้หรือไม่

บรรณานุกรม

[1] วีระเชษฐ์ ขันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, "**อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**", พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พริ้นติ้ง, 2547.

[2] Gitau M.N., "**Modeling Conducted EMI Noise Generation and Propagation in Boost Converters**", IEEE Proceedings ISIE 2000, Vol. 2, pp. 353-358, Dec 2000.

[3] Wei Z., Michael T.Z. and Fred C.L., "**Conducted EMI Analysis of a Boost PFC Circuit**", IEEE APEC 1997, Vol. 1, pp. 223-229, Feb 1997.

[4] Prieto R., Cobos J.A., Garcia O., Alou P. and Uceda J., "**Taking into Account All the Parasitic Effects in the Design of Magnetic Components**", IEEE APEC 1998, Vol. 1, pp. 400-406, Feb 1998.

[5] Williams T., "**EMC for Product Designers**", Second Edition, Newnes, 1996.

[6] John C. Fluke, "**Controlling Conducted Emissions by Design**", New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.

[7] David A. Weston, "**Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications**", Second Edition, New York, Marcel Dekker Inc., 2001.

[8] Morgan D., "**A Handbook for EMC Testing and Measurement**", Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1994.

[9] Williams T. and Armstrong K., "**EMC for Systems and Installations**", Newnes, 2000.

[10] Cadirci I., Saka B. and Eristiren Y., "**Practrical EMI-Filter-Design Procedure for High-Power High-Efficiency SMPS according to MIL-STD 461**", IEEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 4, pp. 775 –782, Jul 2005.

[11] Ye S., Eberle W. and Liu Y. F., "**A Novel EMI Flter Design Method for Switching Power Supplies**", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, pp. 1668 –1678, Nov 2004.

[12] Kumar M. and Agarwal V., "**Power Line Filter Design for Conducted Electromagnetic Interference Using Time-Domain Measurement**", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, No. 1, pp. 178-186, Feb 2006.

[13] Massarini A. and Kazimierczuk M. K., "**Self-Capacitance of Inductors**", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 4, pp. 671–676, Jul 1997.

[14] Massarini A., Kazimierczuk M. K. and Grandi G., "**Lumped Parameter Models for Single- and Multiple-Layer Inductors**", IEEE PESC 1996, Vol. 1, pp. 295-301, Jun 1996.

[15] Qin Yu, Thomas W. Holmes and Krishna Naishadham, "**RF Equivalent Circuit Modeling of Ferrite-Core Inductors and Characterization of Core Materials**", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 44, No. 1, pp. 258-262, Feb 2002.

[16] Snelling E.C., "**Soft Ferrites: Properties and Applications**", Second Edition, London, Butterworths, 1988.

[17] Bossche A.V.D. and Valchev V.C., "**Inductors and Transformers for Power Electronics**", Boca Raton, Taylor & Francis, 2005.

[18] McLyman, Colonel Wm.T., "**Transformer and Inductor Design Handbook**", Second Edition, New York, Marcel Dekker, 1988.

[19] Mohan N., Undeland T.M. and Robbins W.P., "**Power Electronics: Converters, Applications and Design**", Second Edition, New York, John Wiley & Sons Inc., 1995.

[20] Rashid M.H., "**Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**", Second Edition, New Jersey, Prentice Hall International, 1993.

[21] Batarseh I., "**Power Electronic Circuits**", Hoboken, NJ: John Wiley, 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลแกนความถี่สูง ขดลวด และมอสเฟตกำลังที่ใช้

แกนความถี่สูงที่ใช้คือ EER-35A แบบ MB3

低パワーロス材標準材質特性
Low Power Loss Material Characteristics

JFE

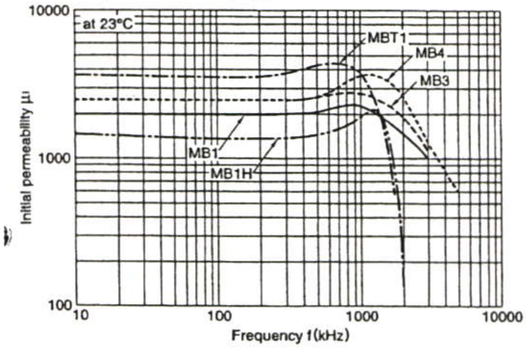
標準材質特性
Material Characteristics

材質名 Material			MB1	MB1H	MB3	MB4	MBT1
初透磁率 Initial permeability	μi	23°C	2000±25%	1600±25%	2500±25%	2500±25%	3400±25%
実効飽和磁束密度(1200A/m) Saturation flux density at 1200A/m	Bms (mT)	23°C	510	540	510	520	510
		60°C	470	505	450	470	460
		100°C	420	460	390	400	390
実効飽和残留磁束密度 Remanence	Brms (mT)	23°C	310	300	130	130	90
		60°C	170	170	90	88	70
		100°C	80	80	55	54	60
実効飽和保磁力 Coercivity	Hcms (A/m)	23°C	14.0	16.1	14.3	12.7	9.0
		60°C	9.4	10.5	10.3	8.0	7.0
		100°C	6.1	7.3	8.8	6.4	6.0
パワーロス(100kHz, 200mT) Power loss at 100kHz, 200mT	Pcv (kW/m³)	23°C	900max.	1070max.	700max.	630max.	450max.
		60°C	620max.	670max.	500max.	430max.	430max.
		100°C	440max.	450max.	410max.	300max.	380max.
		120°C	490max.	630max.	500max.	400max.	430max.
キュリー温度 Curie temperature	Tc (°C)		255min.	300min.	215min.	215min.	230min.
抵抗率 Resistivity	ρ (Ω-m)		6min.	6min.	6min.	4.5min.	4min.
密度 Density	d (kg/m³)		4.9×10^3	4.9×10^3	4.9×10^3	4.9×10^3	4.8×10^3

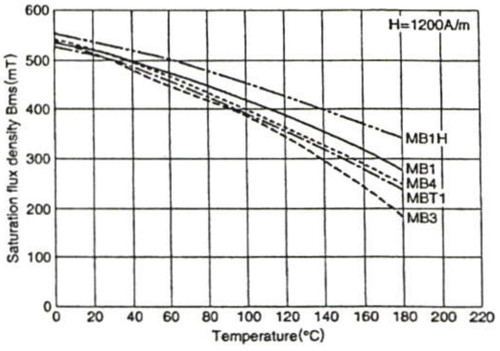
1A/m=$4\pi\times10^{-3}$Oe, 1mT=10Gauss

材質評価コア(R31/19/8Aリングコア)における特性を示しています。

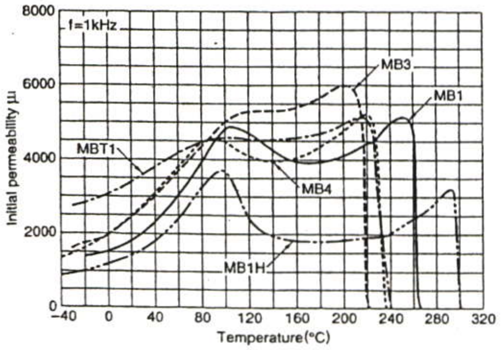
μi-周波数特性
Permeability vs. Frequency(Typical)



Bms-温度特性
Saturation flux density vs. Temperature(Typical)



μi-温度特性
Permeability vs. Temperature(Typical)



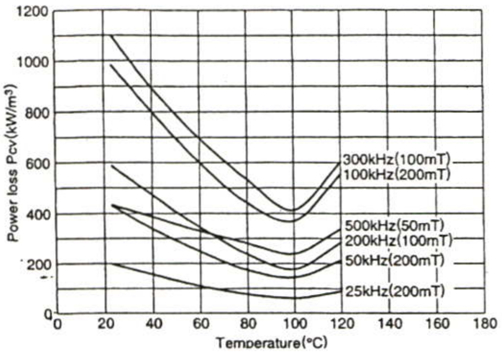
Specifications which provide more details for the proper and safe use of the described product are available upon request.
All specifications are subject to change without notice.

FERRITE MATERIALS FOR POWER SUPPLY

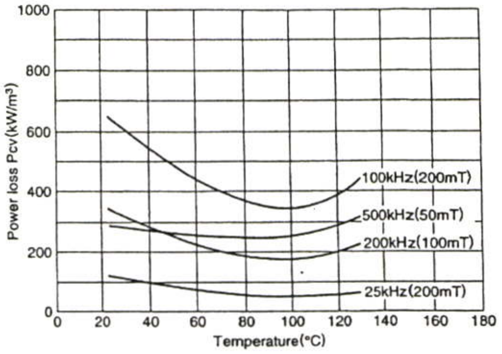
低パワーロス材標準材質特性
Low Power Loss Material Characteristics

JFE

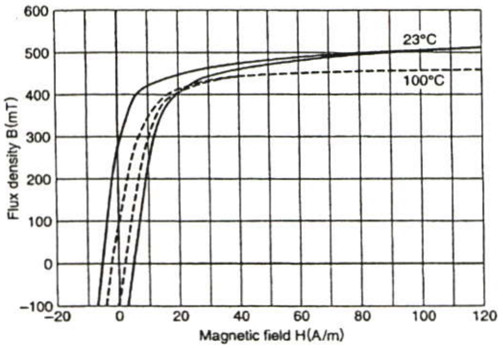
MB1H パワーロス-温度特性
MB1H Power loss vs. Temperature(Typical)



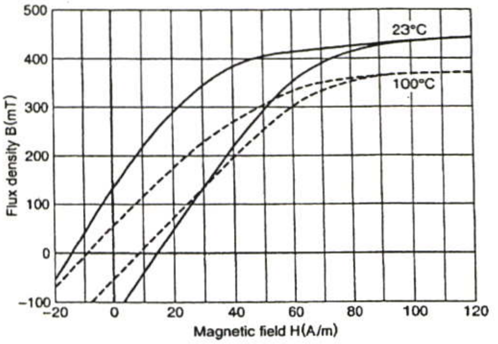
MB3 パワーロス-温度特性
MB3 Power loss vs. Temperature(Typical)



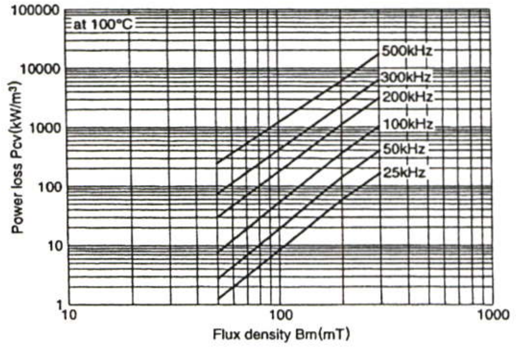
MB1H 直流ヒステリシス特性
MB1H Static magnetization curves(Typical)



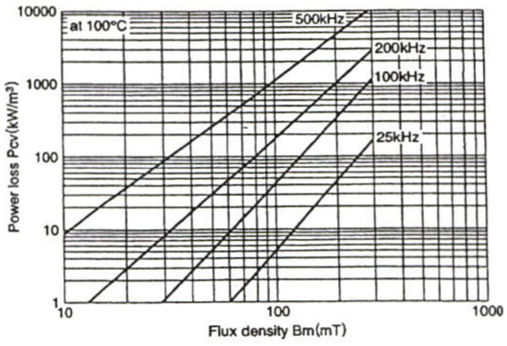
MB3 直流ヒステリシス特性
MB3 Static magnetization curves(Typical)



MB1H パワーロス-磁束密度特性
MB1H Power loss vs. Flux density(Typical)



MB3 パワーロス-磁束密度特性
MB3 Power loss vs. Flux density(Typical)



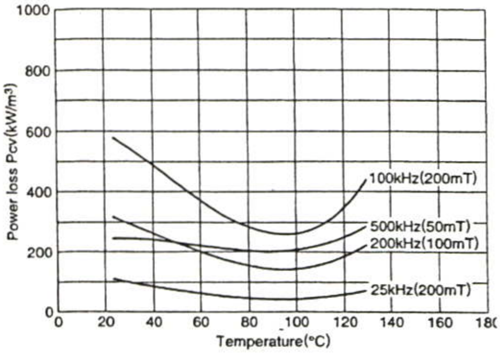
製品をより正しく、安全にご使用いただくために、さらに詳細な特性・仕様をご確認いただける納入仕様書をぜひご請求ください。
記載内容は、改良その他により予告なく変更する場合がありますので、あらかじめご了承ください。

FERRITE MATERIALS FOR POWER SUPPLY

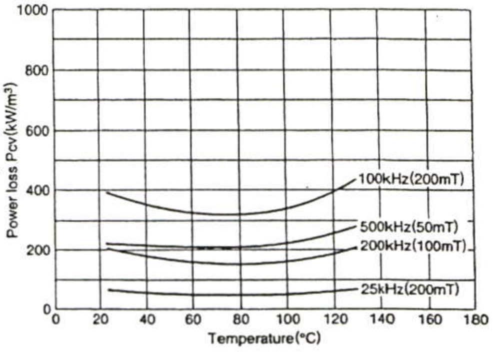
低パワーロス材標準材質特性
Low Power Loss Material Characteristics

JFE

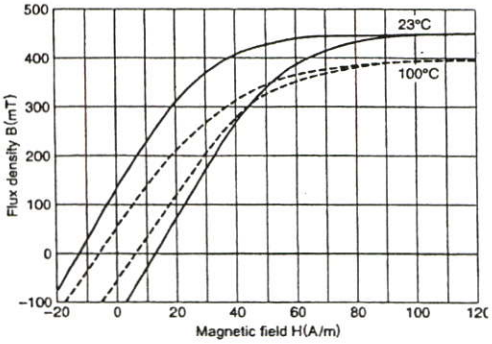
MB4 パワーロス-温度特性
MB4 Power loss vs. Temperature(Typical)



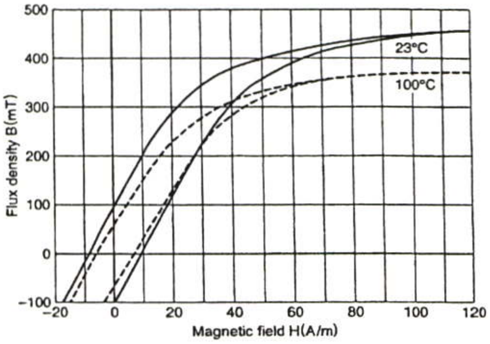
MBT1 パワーロス-温度特性
MBT1 Power loss vs. Temperature(Typical)



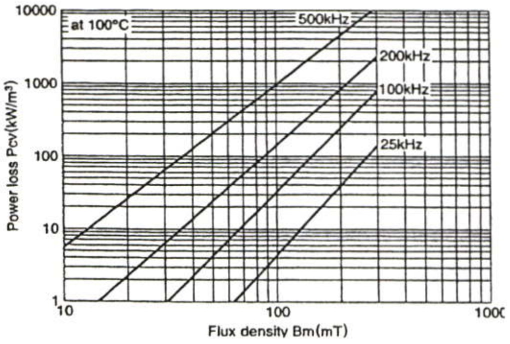
MB4 直流ヒステリシス特性
MB4 Static magnetization curves(Typical)



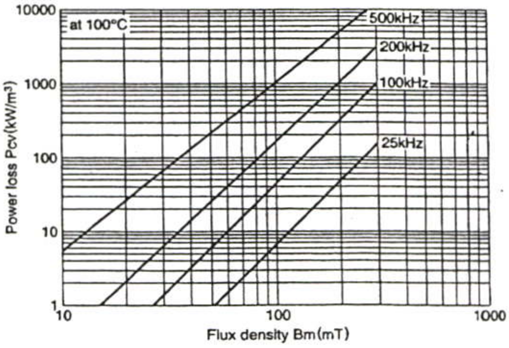
MBT1 直流ヒステリシス特性
MBT1 Static magnetization curves(Typical)



MB4 パワーロス-磁束密度特性
MB4 Power loss vs. Flux density(Typical)



MBT1 パワーロス-磁束密度特性
MBT1 Power loss vs. Flux density(Typical)



Specifications which provide more details for the proper and safe use of the described product are available upon request.
All specifications are subject to change without notice.

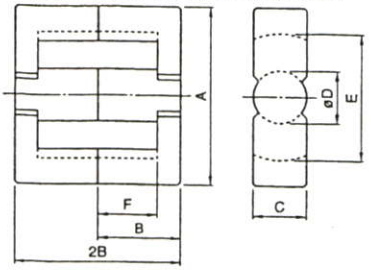
FERRITE CORES FOR POWER SUPPLY

EER コア

EER Cores

形状・寸法／特性

Shapes and dimensions/Characteristics



形状 Type	寸法 Dimensions(mm) A	2B	B	C	øD	E min.	2F min.	F	EC style	Bobbin
EER-7.5D	7.50±0.15	5.00	2.50±0.10	4.00±0.10	2.60±0.10	5.60	3.36	1.75±0.07		
EER-9.3K	9.30±0.20	4.80	2.40±0.05	4.85±0.15	3.35±0.15	7.65	3.20	1.675±0.075		
EER-9.3S	9.35±0.15	3.95	1.975±0.05	4.90±0.10	3.40±0.10	7.48	2.00	1.075±0.075		
EER-10.8K	10.8±0.2	4.90	2.45±0.10	5.90±0.10	4.38±0.13	8.70	2.96	1.58±0.10		
EER-10.8S	10.83±0.18	3.85	1.925±0.05	5.90±0.10	4.13±0.13	8.70	1.95	0.975min.		
EER-10.8D	10.83±0.2	4.90	2.45±0.10	5.90±0.10	4.13±0.13	8.70	2.95	1.575±0.10		○
EER-12.4D	12.4±0.25	8.20	4.10±0.10	5.00±0.15	3.40±0.10	10.4	6.00	3.10±0.10		
EER-17.5S	17.5±0.5	16.5	8.25±0.20	5.05±0.25	5.05±0.25	13.0	12.5	6.25±0.10		
EER-24K	24.4±0.6	28.9	14.45±0.15	8.50±0.40	8.50±0.20	18.0	19.8	10.1±0.2		○
EER-25.5A	25.5±0.6	18.6	9.30±0.25	7.50±0.25	7.50±0.25	19.7	11.9	6.20±0.25		○
EER-25.5B	25.5±0.6	31.0	15.5±0.3	7.50±0.25	7.50±0.25	19.7	24.2	12.4±0.3		
EER-28.5U	28.5±0.6	16.7	8.35±0.20	11.4±0.3	9.90±0.30	21.1	9.00	4.65±0.15		○
EER-28.5T	28.5±0.6	21.8	10.9±0.3	11.4±0.3	9.90±0.20	21.1	12.6	6.50±0.20		
EER-28.5A	28.5±0.6	28.0	14.0±0.3	11.4±0.3	9.90±0.30	21.1	18.6	9.60±0.30		○
EER-28.5B	28.5±0.6	33.8	16.9±0.3	11.4±0.3	9.90±0.30	21.1	24.4	12.5±0.3		○
EER-30M	29.8±0.8	31.6	15.8±0.4	9.50±0.40	9.50±0.30	21.9	21.4	11.0±0.3		
EER-33S	33.0±0.5	26.0	13.0±0.2	14.0±0.25	12.5±0.25	24.7	16.5	8.50±0.25		
EER-33K	33.0±0.5	34.0	17.0±0.2	14.0±0.25	12.5±0.25	24.7	24.5	12.5±0.25		
EER-34.2	34.2±0.8	34.6	17.3±0.3	10.8±0.3	10.8±0.3	25.6	23.6	12.1±0.3		
EER-35H	35.0±0.7	33.6	16.8±0.3	11.3±0.3	11.3±0.3	25.6	21.0	10.8±0.3		
EER-35A	35.0±0.8	41.4	20.7±0.3	11.3±0.3	11.3±0.3	25.3	28.8	14.7±0.3		○
EER-35B	35.0±0.9	48.8	24.4±0.4	11.3±0.3	11.3±0.3	25.2	36.0	18.4±0.4		
EER-39J	39.0±0.7	44.4	22.2±0.3	12.8±0.3	12.8±0.3	28.6	33.5	17.0±0.25		○
EER-39.1	39.1±0.8	39.6	19.8±0.3	12.5±0.3	12.5±0.3	29.3	28.6	14.6±0.3		
EER-40H	40.0±0.5	42.3	21.15±0.2	15.0±0.2	14.0±0.25	30.7	29.9	15.15±0.2		○
EER-40D	40.0±0.5	44.8	22.4±0.2	13.3±0.25	13.3±0.25	29.0	30.3	15.4±0.25		○
EER-40	40.0±0.5	54.6	27.3±0.2	13.3±0.25	13.3±0.25	29.0	40.0	20.3±0.3		
EER-42	42.0±0.8	42.4	21.2±0.2	15.2±0.4	15.2±0.2	30.1	29.8	15.3±0.4		
EER-42P	42.0±0.5	42.4	21.2±0.2	19.6±0.4	17.3±0.25	31.8	30.0	15.25±0.25		○
EER-42D	42.0±0.6	44.8	22.4±0.2	15.5±0.25	15.5±0.25	29.4	30.2	15.4±0.3		○
EER-44	44.0±0.8	44.6	22.3±0.4	14.8±0.4	14.8±0.4	32.5	32.2	16.5±0.4		
EER-45	45.0±1.0	48.0	24.0±0.4	14.8±0.4	14.8±0.4	32.5	32.2	16.5±0.4		
EER-48.7	48.7±1.1	49.4	24.7±0.4	16.3±0.4	16.3±0.4	36.1	35.4	18.1±0.4		
EER-49M	49.0±0.8	47.8	23.9±0.3	17.2±0.4	17.2±0.25	36.3	30.2	15.4±0.3		
EER-49L	49.0±0.8	54.0	27.0±0.3	17.2±0.4	17.2±0.25	36.4	36.4	18.5±0.3		○
EER-49P	49.0±0.7	55.0	27.5±0.2	17.2±0.4	17.2±0.25	36.4	37.6	19.0±0.2		
EER-54K	54.2±0.8	49.4	24.7±0.25	18.8±0.4	18.8±0.4	40.0	33.8	17.2±0.3		
EER-90	90.0±1.8	90.0	45.0±0.65	30.0±1.0	30.0±1.0	68.5	70.0	35.5±0.5	○	○
EER-94	94.0±1.8	95.0	47.5±0.65	30.0±1.0	30.0±1.0	68.5	70.0	35.5±0.5	○	○
EER-120	120.0±2.0	101.0	50.5±0.65	30.0±1.0	30.0±1.0	93.3	70.0	35.5±0.5	○	○

製品をより正しく、安全にご使用いただくために、さらに詳細な特性・仕様をご確認いただける納入仕様書をぜひご請求ください。
記載内容は、改良その他により予告なく変更する場合がありますので、あらかじめご了承ください。

FERRITE CORES FOR POWER SUPPLY

EER コア

EER Cores

JFE

形状 Type	A_L value(nH/N²)±25%				コア定数 Core parameters					Weight
	MB1	MB3	MB4	MBT1	C_1(mm⁻¹)	Le(mm)	Ae(mm²)	Amin(mm²)	Ve(mm³)	(g/set)
EER-7.5D	735	839	839	985	2.10	12.5	5.96	5.31	74.7	0.45
EER-9.3K	840	955	955	1110	1.74	14.0	8.04	8.81	113	0.69
EER-9.3S	1080	1210	1210	1390	1.27	11.9	9.31	9.07	111	0.66
EER-10.8K	1290	1460	1460	1700	1.15	14.3	12.3	15.1	176	1.1
EER-10.8S	1340	1510	1510	1740	1.04	12.4	12.0	10.2	149	0.90
EER-10.8D	1220	1380	1380	1610	1.21	14.4	12.0	10.2	173	0.98
EER-12.4D	705	700	700	996	2.53	23.4	9.27	8.88	217	1.2
EER-17.5S	940	1100	1100	1350	1.94	40.1	20.7	20.0	830	4.38
EER-24K	1920	2260	2260	2890	1.07	62.5	58.5	53.7	3660	19.8
EER-25.5A	1810	2000	2000	2670	1.08	47.6	44.2	42.4	2100	11.0
EER-25.5B	1280	1500	1500	1960	1.65	72.4	43.8	42.4	3170	16.3
EER-28.5U	3580	4170	4170	5160	0.524	42.9	81.9	77.0	3510	19.2
EER-28.5T	3300	3890	3890	4810	0.579	50.8	87.7	77.0	4450	25.5
EER-28.5A	2740	3270	3270	4120	0.744	63.4	85.2	77.0	5400	29.3
EER-28.5B	2370	2850	2850	3620	0.887	74.9	84.5	77.0	6340	34.0
EER-30M	2220	2650	2650	3340	0.925	70.7	76.4	70.9	5400	28.9
EER-33S	3990	4800	4800	5970	0.506	62.0	123	121	7610	40.6
EER-33K	3300	4200	4200	5040	0.637	78.0	122	121	9560	50.1
EER-34.2	2580	3200	3200	3950	0.820	79.2	96.6	91.6	7660	40.4
EER-35H	3090	3700	3700	4700	0.678	75.1	111	100	8310	45.1
EER-35A	2620	3300	3300	4050	0.822	90.4	110	100	9940	53.4
EER-35B	2280	2800	2800	3570	0.963	105	109	100	11500	60.9
EER-39J	2850	3500	3500	4440	0.766	102	133	129	13500	69.8
EER-39.1	2880	3480	3480	4470	0.749	92.9	124	123	11500	59.9
EER-40H	3530	4000	4000	5470	0.613	96.1	157	147	15000	79.9
EER-40D	3400	4300	4300	5280	0.638	97.5	153	139	14900	80.3
EER-40	2870	3490	3490	4520	0.773	117	151	139	17700	94.3
EER-42	4080	5200	5200	6320	0.531	96.6	182	178	17600	91.9
EER-42P	5150	6300	6300	7960	0.419	96.0	229	222	22000	116
EER-42D	4450	5200	5200	6890	0.487	97.8	201	189	19600	104
EER-44	3810	4400	4400	5930	0.573	103	179	169	18400	96.8
EER-45	3930	4760	4760	6130	0.558	106	190	172	20100	108
EER-48.7	4330	5260	5260	6780	0.509	113	221	209	24900	132
EER-49M	5090	6500	6500	7920	0.429	105	245	230	25900	140
EER-49L	4500	5570	5570	7070	0.493	119	241	225	28500	153
EER-49P	4430	5380	5380	6970	0.501	121	240	225	29000	155
EER-54K	5350	6000	6000		0.412	115	280	278	32200	169
EER-90	6720	8250	8250		0.347	215	619	559	133000	698
EER-94	7490	9210	9210		0.312	222	712	707	158000	819
EER-120	7430	9150	9150		0.318	250	788	707	197000	1070

Specifications which provide more details for the proper and safe use of the described product are available upon request.
All specifications are subject to change without notice.

ขดลวดที่ใช้คือ ขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ม.ม. และอยู่ในฉนวน Class 1 ของ JIS

Conductor Diameter (mm)	Conductor Tolerance (mm)	Class 0 Film Thickness Min (mm)	Class 0 Overall Diameter Max (mm)	Class 1 Film Thickness Min (mm)	Class 1 Overall Diameter Max (mm)	Resistance Max at 20.0C Ω/km
1.60	+-0.03	0.041	1.754	0.028	1.712	8.906
1.50	+-0.03	0.041	1.654	0.028	1.612	10.16
1.40	+-0.03	0.039	1.548	0.027	1.508	11.70
1.30	+-0.03	0.039	1.448	0.027	1.408	13.61
1.20	+-0.03	0.037	1.342	0.026	1.304	16.04
1.10	+-0.03	0.037	1.242	0.026	1.204	19.17
1.00	+-0.03	0.036	1.138	0.025	1.102	23.33
0.95	+-0.02	0.034	1.072	0.024	1.038	25.38
0.90	+-0.02	0.033	1.020	0.023	0.986	28.35
0.85	+-0.02	0.032	0.966	0.022	0.934	31.87
0.80	+-0.02	0.031	0.914	0.021	0.882	36.08
0.75	+-0.02	0.030	0.860	0.020	0.830	41.19
0.70	+-0.02	0.028	0.804	0.019	0.776	47.47
0.65	+-0.02	0.027	0.752	0.018	0.724	55.31
0.60	+-0.02	0.026	0.698	0.017	0.672	65.26
0.55	+-0.02	0.025	0.646	0.017	0.620	78.15
0.50	+-0.01	0.025	0.586	0.017	0.560	91.43
0.45	+-0.01	0.024	0.532	0.016	0.508	114.20
0.40	+-0.01	0.023	0.480	0.015	0.456	145.30
0.37	+-0.01	0.022	0.446	0.014	0.424	170.60
0.35	+-0.01	0.021	0.424	0.014	0.402	191.2
0.32	+-0.01	0.021	0.394	0.014	0.372	230.0
0.30	+-0.01	0.021	0.374	0.014	0.352	262.9
0.29	+-0.01	0.020	0.360	0.013	0.340	285.7
0.28	+-0.01	0.020	0.350	0.013	0.330	307.3
0.27	+-0.01	0.020	0.340	0.013	0.320	331.4
0.26	+-0.008	0.020	0.330	0.013	0.310	358.4
0.25	+-0.008	0.020	0.318	0.013	0.298	382.5
0.24	+-0.008	0.020	0.308	0.013	0.288	416.2
0.23	+-0.008	0.020	0.298	0.013	0.278	454.5
0.22	+-0.008	0.019	0.286	0.012	0.266	498.4
0.21	+-0.008	0.019	0.276	0.012	0.256	549.0
0.20	+-0.008	0.019	0.266	0.012	0.246	607.6
0.19	+-0.008	0.019	0.256	0.012	0.236	676.2
0.18	+-0.008	0.019	0.246	0.012	0.226	757.2
0.17	+-0.008	0.018	0.232	0.011	0.214	853.5
0.16	+-0.008	0.018	0.222	0.011	0.204	969.5
0.15	+-0.008	0.017	0.210	0.010	0.192	1,111
0.14	+-0.008	0.017	0.200	0.010	0.182	1,286
0.13	+-0.008	0.017	0.190	0.010	0.172	1,505
0.12	+-0.008	0.017	0.180	0.010	0.162	1,786
0.11	+-0.008	0.016	0.166	0.009	0.150	2,153
0.10	+-0.008	0.016	0.156	0.009	0.140	2,647

Conductor Diameter (mm)	Conductor Tolerance (mm)	Class 2 Film Thickness Min (mm)	Class 2 Overall Diameter Max (mm)	Class 3 Film Thickness Min (mm)	Class 3 Overall Diameter Max (mm)	Resistance Max at 20.0C Ω/km
1.00	+-0.012	0.017	1.062			22.49
0.95	+-0.010	0.017	1.008			24.84
0.90	+-0.010	0.016	0.956			27.71
0.85	+-0.010	0.015	0.904			31.11
0.80	+-0.010	0.015	0.852			35.17
0.75	+-0.008	0.014	0.798			39.87
0.70	+-0.008	0.013	0.746			45.84
0.65	+-0.008	0.012	0.694			53.26
0.60	+-0.008	0.012	0.644	0.008	0.632	62.64
0.55	+-0.006	0.012	0.592	0.008	0.581	74.18
0.50	+-0.006	0.012	0.542	0.008	0.531	89.95
0.45	+-0.006	0.011	0.490	0.007	0.479	112.1
0.40	+-0.005	0.011	0.439	0.007	0.429	141.7
0.37	+-0.005	0.010	0.407	0.007	0.397	165.9
0.35	+-0.005	0.010	0.387	0.007	0.377	185.7
0.32	+-0.005	0.010	0.357	0.007	0.347	222.8
0.30	+-0.005	0.010	0.337	0.007	0.327	254.0
0.29	+-0.004	0.009	0.324	0.006	0.315	273.9
0.28	+-0.004	0.009	0.314	0.006	0.305	294.1
0.27	+-0.004	0.009	0.304	0.006	0.295	316.6
0.26	+-0.004	0.009	0.294	0.006	0.285	341.8
0.25	+-0.004	0.009	0.284	0.006	0.275	370.2
0.24	+-0.004	0.009	0.274	0.006	0.265	402.2
0.23	+-0.004	0.009	0.264	0.006	0.255	438.6
0.22	+-0.004	0.008	0.252	0.005	0.243	480.1
0.21	+-0.003	0.008	0.241	0.005	0.232	522.8
0.20	+-0.003	0.008	0.231	0.005	0.222	577.2
0.19	+-0.003	0.008	0.221	0.005	0.212	640.6
0.18	+-0.003	0.008	0.211	0.005	0.202	715.0
0.17	+-0.003	0.007	0.199	0.005	0.191	803.2
0.16	+-0.003	0.007	0.189	0.005	0.181	908.8
0.15	+-0.003	0.006	0.177	0.004	0.169	1,037
0.14	+-0.003	0.006	0.167	0.004	0.159	1,193
0.13	+-0.003	0.006	0.157	0.004	0.149	1,389
0.12	+-0.003	0.006	0.147	0.004	0.139	1,636
0.11	+-0.003	0.005	0.135	0.003	0.128	1,957
0.10	+-0.003	0.005	0.125	0.003	0.118	2,381
0.09	+-0.003	0.005	0.113	0.003	0.107	2,959
0.08	+-0.003	0.005	0.103	0.003	0.097	3,778
0.07	+-0.003	0.004	0.091	0.003	0.085	4,990
0.06	+-0.003	0.004	0.081	0.003	0.075	6,966
0.05	+-0.003	0.004	0.069	0.003	0.064	10,240
0.04	+-0.002	0.003	0.056	0.002	0.052	15,670
0.03	+-0.002	0.003	0.044	0.002	0.040	28,870
0.025	+-0.002	0.003	0.037	0.002	0.034	42,780

HITACHI CABLE

www.hitachicable.com.sg • www.hitachi-cable.com.my

DIMENSIONS OF ENAMELLED ROUND WIRES (NEMA MW 1000)

AWG Size	Conductor Diameter Nominal (mm)	Conductor Diameter Min (mm)	Conductor Diameter Max (mm)	SINGLE Increase Diameter Min (mm)	SINGLE Overall Diameter Max (mm)	HEAVY Increase Diameter Min (mm)	HEAVY Overall Diameter Max (mm)	TRIPLE Increase Diameter Min (mm)	TRIPLE Overall Diameter Max (mm)
14	1.628	1.613	1.636	0.041	1.692	0.081	1.732	0.122	1.778
15	1.450	1.435	1.458	0.038	1.509	0.076	1.547	0.114	1.593
16	1.290	0.278	1.298	0.036	1.349	0.074	1.384	0.109	1.427
17	1.151	1.138	1.156	0.036	1.207	0.071	1.240	0.104	1.280
18	1.024	1.013	1.029	0.033	1.077	0.066	1.110	0.099	1.148
19	0.912	0.902	0.917	0.030	0.963	0.064	0.993	0.094	1.031
20	0.813	0.805	0.818	0.030	0.861	0.058	0.892	0.089	0.925
21	0.724	0.716	0.726	0.028	0.770	0.056	0.798	0.084	0.828
22	0.643	0.635	0.645	0.028	0.686	0.053	0.714	0.081	0.744
23	0.574	0.569	0.577	0.025	0.617	0.051	0.643	0.076	0.671
24	0.511	0.505	0.513	0.025	0.551	0.048	0.577	0.074	0.605
25	0.455	0.450	0.457	0.023	0.493	0.046	0.516	0.069	0.544
26	0.404	0.399	0.406	0.023	0.439	0.043	0.462	0.066	0.490
27	0.361	0.358	0.363	0.020	0.396	0.041	0.417	0.061	0.439
28	0.320	0.318	0.323	0.020	0.356	0.041	0.373	0.058	0.396
29	0.287	0.284	0.290	0.018	0.320	0.038	0.338	0.056	0.361
30	0.254	0.251	0.256	0.018	0.284	0.036	0.302	0.053	0.325
31	0.226	0.224	0.229	0.015	0.254	0.033	0.274		
32	0.203	0.201	0.206	0.015	0.231	0.030	0.249		
33	0.180	0.178	0.183	0.013	0.206	0.028	0.224		
34	0.160	0.157	0.163	0.013	0.183	0.025	0.198		
35	0.142	0.140	0.145	0.010	0.163	0.023	0.178		
36	0.127	0.124	0.130	0.010	0.147	0.020	0.160		
37	0.114	0.112	0.117	0.008	0.132	0.020	0.145		
38	0.102	0.099	0.104	0.008	0.119	0.018	0.130		
39	0.089	0.086	0.091	0.005	0.104	0.015	0.114		
40	0.079	0.076	0.081	0.005	0.094	0.015	0.102		
41	0.071	0.069	0.074	0.005	0.084	0.013	0.091		
42	0.064	0.061	0.066	0.005	0.076	0.010	0.081		
43	0.056	0.053	0.058	0.005	0.066	0.010	0.074		
44	0.051	0.048	0.053	0.0025	0.061	0.010	0.069		
45	0.0447			0.0025	0.0521	0.0076	0.0584		
46	0.0399			0.0025	0.0470	0.0076	0.0533		
47	0.0356			0.0025	0.0432	0.0076	0.0483		
48	0.0315			0.0025	0.0381	0.0051	0.0432		
49	0.0282			0.0025	0.0330	0.0051	0.0381		
50	0.0251			0.0025	0.0305	0.0051	0.0356		

มอสเฟตกำลังที่ใช้คือ STP8NM60FP

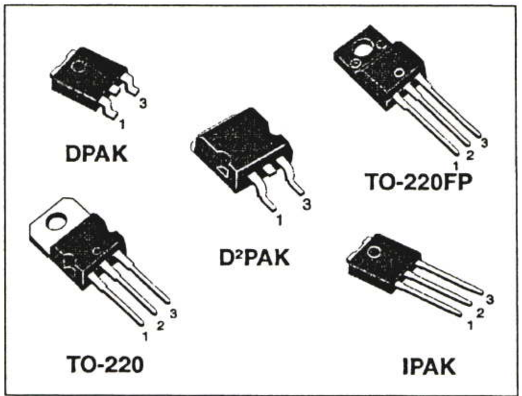
STD5NM60 - STD5NM60-1
STB8NM60 - STP8NM60 - STP8NM60FP

N-CHANNEL 650V@Tjmax - 0.9Ω - 8A - TO-220 /FP- D²/D/IPAK
MDmesh™ Power MOSFET

General features

Type	V_{DSS}	$R_{DS(on)}$	I_D	Pw
STD5NM60	650V	<1Ω	5A	96W
STD5NM60-1	650V	<1Ω	5A	96W
STB8NM60	650V	<1Ω	5A	100W
STP8NM60	650V	<1Ω	8A	100W
STP8NM60FP	650V	<1Ω	8A (1)	30W

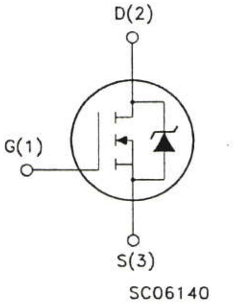
- 100% avalanche tested
- HIgh dv/dt and avalanche capabilities
- Low input capacitance and gate charge
- Low gate input resistance



Description

The MDmesh™is a new revolutionary Power MOSFET technology that associates the multiple drain process with the company's PowerMESH™ horizontal layout. The resulting product has an outstanding low on-resistance, impressively high dv/dt and excellent avalanche characteristics. The adoption of the company's proprietary strip technique yields overall dynamic performance that is significantly better than that of similar competition's products.

Internal schematic diagram



Applications

- Switching application

Order codes

Part number	Marking	Package	Packaging
STD5NM60-1	D5NM60	IPAK	Tape & reel
STD5NM60T4	D5NM60	DPAK	Tube
STB8NM60T4	B8NM60	D²PAK	Tape & reel
STP8NM60	P8NM60	TO-220	Tube
STP8NM60FP	P8NM60FP	TO-220FP	Tube

1 Electrical ratings

Table 1. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value			Unit
		TO-220 D²PAK	TO-220FP	IPAK DPAK	
V_{GS}	Gate-source voltage	± 30			V
I_D	Drain current (continuous) at T_C = 25°C	8	8 (1)	5	A
I_D	Drain current (continuous) at T_C=100°C	5	5 (1)	3.1 (1)	A
I_{DM} (2)	Drain current (pulsed)	32	32 (1)	20 (1)	A
P_{TOT}	Total dissipation at T_C = 25°C	100	30	96	W
	Derating factor	0.8	0.24	0.0.4	W/°C
dv/dt (3)	Peak diode recovery voltage slope	15			V/ns
V_{ISO}	Insulation withstand voltage (RMS) from all three leads to external heat sink (t=1s;T_C=25°C)	--	2500	--	V
T_J T_{stg}	Operating junction temperature Storage temperature	-55 to 150			°C

1. Limited only by maximum temperature allowed
2. Pulse width limited by safe operating area
3. $I_{SD} \leq 5A$, di/dt ≤400A/µs, V_{DD} =80%$V_{(BR)DSS}$

Table 2. Thermal resistance

Symbol	Parameter	Value			Unit
		TO-220 D²PAK	IPAK DPAK	TO-220FP	
$R_{thj-case}$	Thermal resistance junction-case max	1.25	1.3	4.16	°C/W
R_{thj-a}	Thermal resistance junction-ambient max	62.5			°C/W
T_l	Maximum lead temperature for soldering purpose	300			°C

Table 3. Avalanche data

Symbol	Parameter	Value	Unit
I_{AS}	Avalanche current, repetitive or not-repetitive (pulse width limited by Tj Max)	2.5	A
E_{AS}	Single pulse avalanche energy (starting Tj=25°C, I_D=I_{AS}, V_{DD}=50V)	200	mJ

2 Electrical characteristics

(T_{CASE}=25°C unless otherwise specified)

Table 4. On/off states

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	I_D = 250µA, V_{GS}= 0	600			V
I_{DSS}	Zero gate voltage drain current (V_{GS} = 0)	V_{DS} = Max rating, V_{DS} = Max rating @125°C			1 10	µA µA
I_{GSS}	Gate body leakage current (V_{DS} = 0)	V_{GS} = ±20V			±100	nA
$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	V_{DS}= V_{GS}, I_D = 250µA	3	4	5	V
$R_{DS(on)}$	Static drain-source on resistance	V_{GS}= 10V, I_D= 2.5A		0.9	1	Ω

Table 5. Dynamic

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
g_{fs}	Forward transconductance	V_{DS} = $I_{D(on)}$ x$R_{DS(on)max}$, I_D=2.5A		2.4		S
C_{iss} C_{oss} C_{rss}	Input capacitance Output capacitance Reverse transfer capacitance	V_{DS} =25V, f=1 MHz, V_{GS}=0		400 100 10		pF pF pF
$C_{oss\ eq}$[(1)].	Equivalent output capacitance	V_{GS}=0, V_{DS} =0V to 480V		50		pF
Q_g Q_{gs} Q_{gd}	Total gate charge Gate-source charge Gate-drain charge	V_{DD}=400V, I_D = 5A V_{GS} =10V *(see Figure 11)*		13 5 6	18	nC nC nC

1. $C_{oss\ eq.}$ is defined as a constant equivalent capacitance giving the same charging time as C_{oss} when V_{DS} inceases from 0 to 80% V_{DSS}

Table 6. **Switching times**

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$ t_r $t_{d(off)}$ t_f	Turn-on delay time Rise time Turn-off delay time Fall time	V_{DD}=300 V, I_D= 2.5A, R_G=4.7Ω, V_{GS}=10V *(see Figure 16)*		14 10 23 10		ns ns ns ns
$t_{r(Voff)}$ t_f t_c	Off-voltage rise time Fall time Cross-over time	V_{DD}=480 V, I_D= 5A, R_G=4.7Ω, V_{GS}=10V		7 10 17		ns ns ns

Table 7. **Source drain diode**

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{SD}	Source-drain current				8	A
I_{SDM}(1)	Source-drain current (pulsed)				32	A
V_{SD}(2)	Forward on voltage	I_{SD}=5A, V_{GS}=0			1.5	V
t_{rr} Q_{rr} I_{RRM}	Reverse recovery time Reverse recovery charge Reverse recovery current	I_{SD}=5A, V_{DD}=100V di/dt = 100A/µs, *(see Figure 21)*		300 1950 13		ns µC A
t_{rr} Q_{rr} I_{RRM}	Reverse recovery time Reverse recovery charge Reverse recovery current	I_{SD}=5A, V_{DD}=100V di/dt = 100A/µs, Tj=150°C *(see Figure 21)*		445 3005 13.5		ns µC A

1. Pulse width limited by safe operating area
2. Pulsed: pulse duration=300µs, duty cycle 1.5%

2.1 Electrical characteristics (curves)

Figure 1. Safe operating area for TO-220/ D²PAK

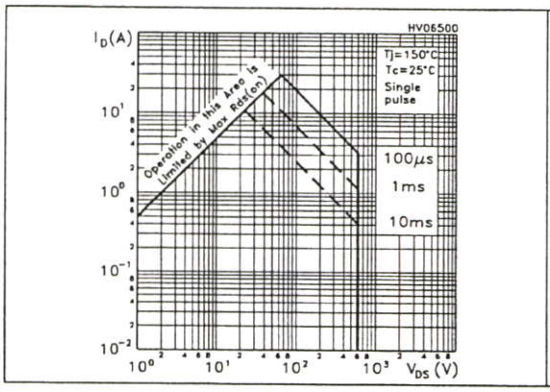


Figure 2. Thermal impedance for TO-220/ D²PAK

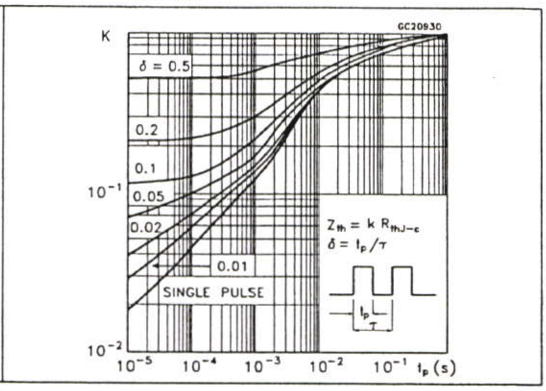


Figure 3. Safe operating areafor TO-220FP

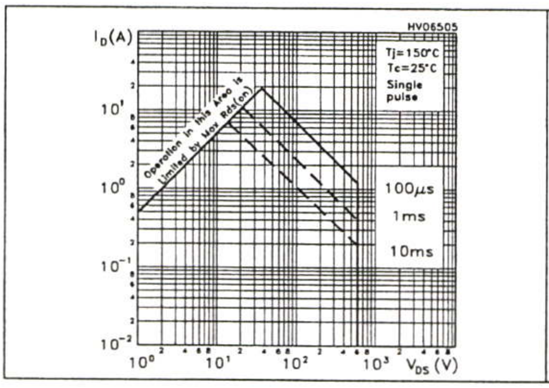


Figure 4. Thermal impedance for TO-220FP

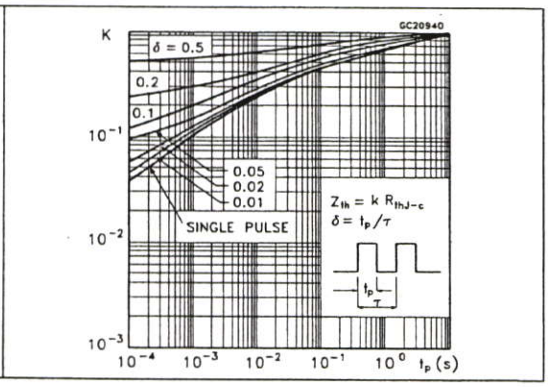


Figure 5. Safe operating area for DPAK/IPAK

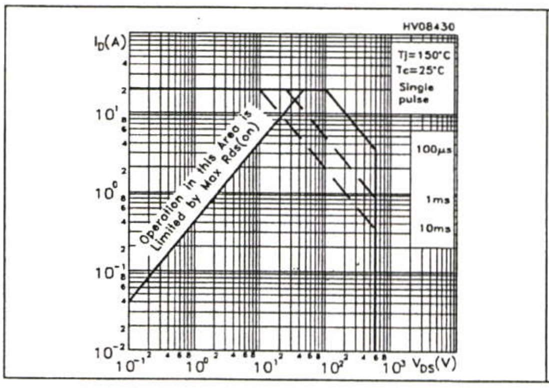


Figure 6. Thermal impedance for DPAK/IPAK

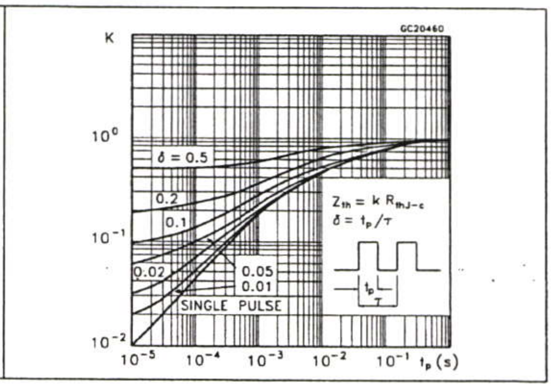


Figure 7. Output characterisics

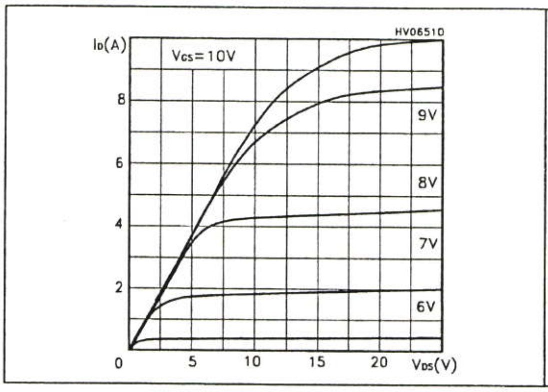


Figure 8. Transfer characteristics

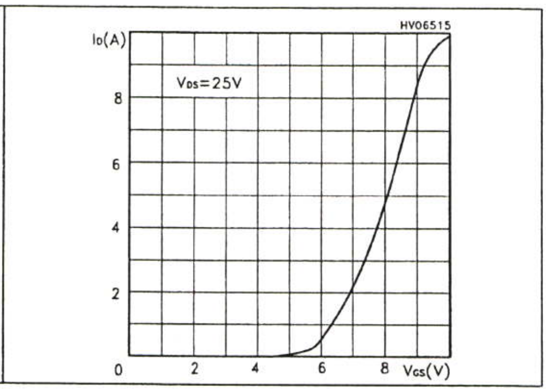


Figure 9. Transconductance

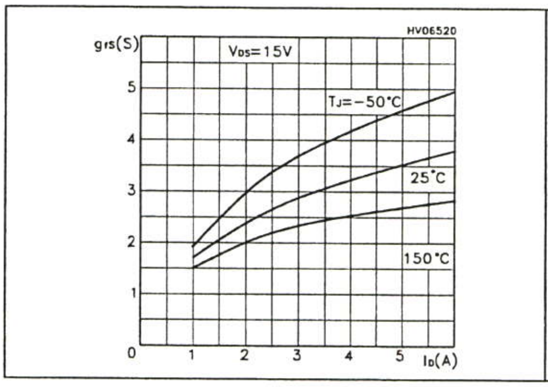


Figure 10. Static drain-source on resistance

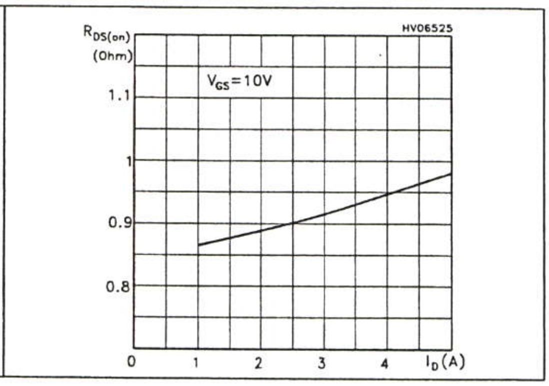


Figure 11. Gate charge vs gate-source voltage

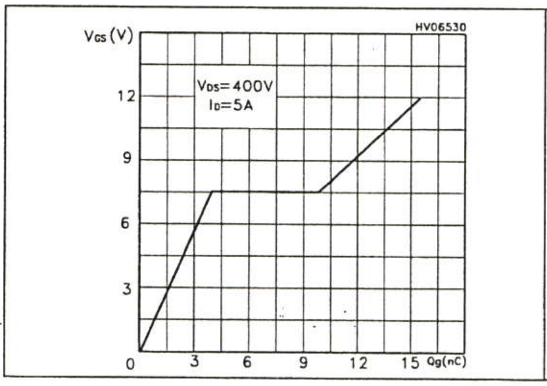


Figure 12. Capacitance variations

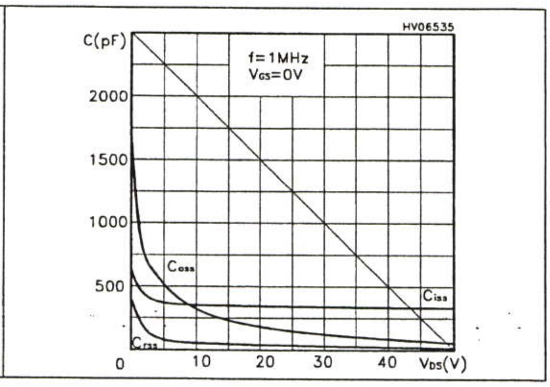


Figure 13. Normalized gate threshold voltage vs temperature

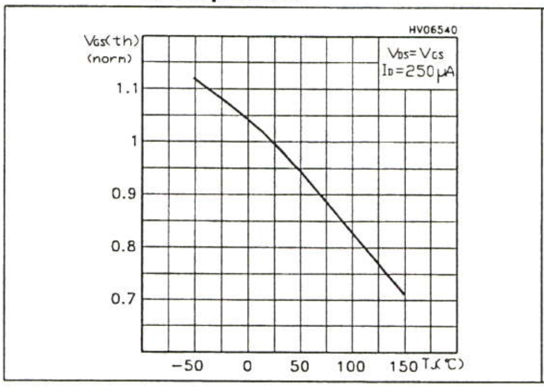


Figure 14. Normalized on resistance vs temperature

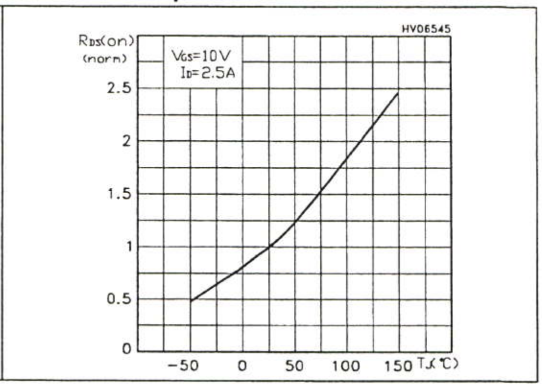
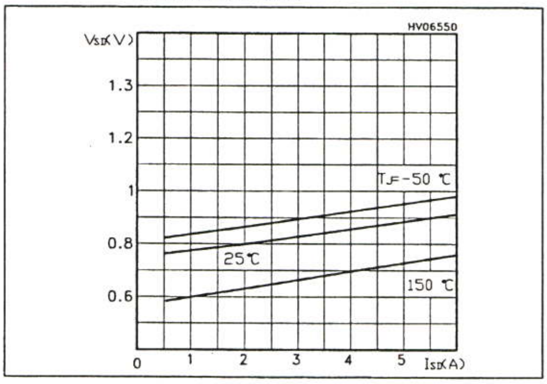


Figure 15. Source-drain diode forward characteristics



3 Test circuit

Figure 16. Switching times test circuit for resistive load

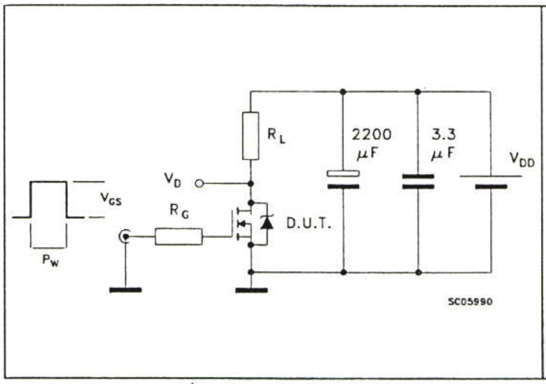


Figure 17. Gate charge test circuit

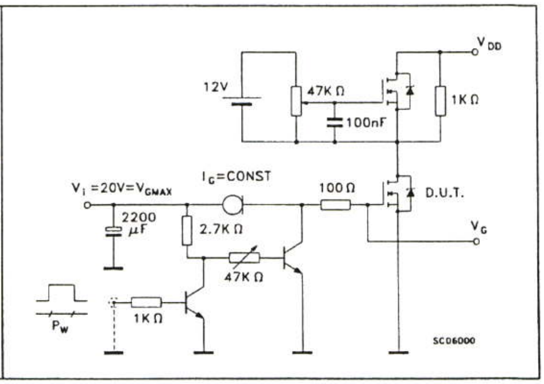


Figure 18. Test circuit for inductive load switching and diode recovery times

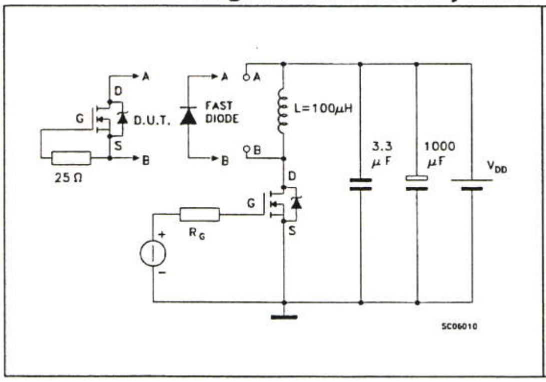


Figure 19. Unclamped inductive load test circuit

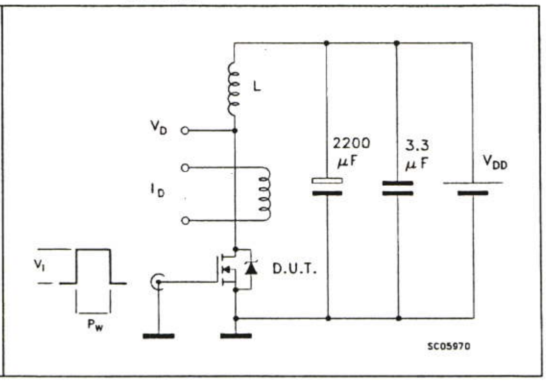


Figure 20. Unclamped inductive waveform

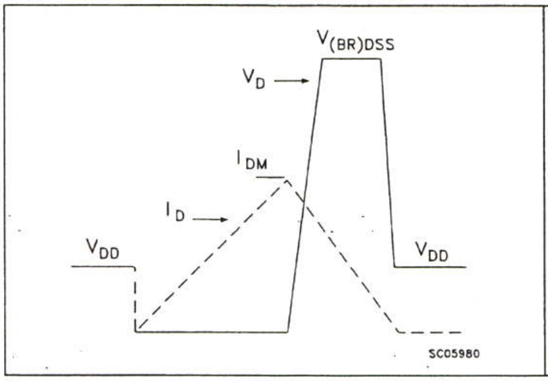
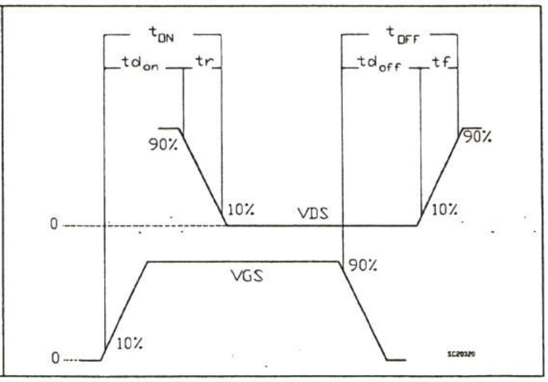


Figure 21. Switching time waveform

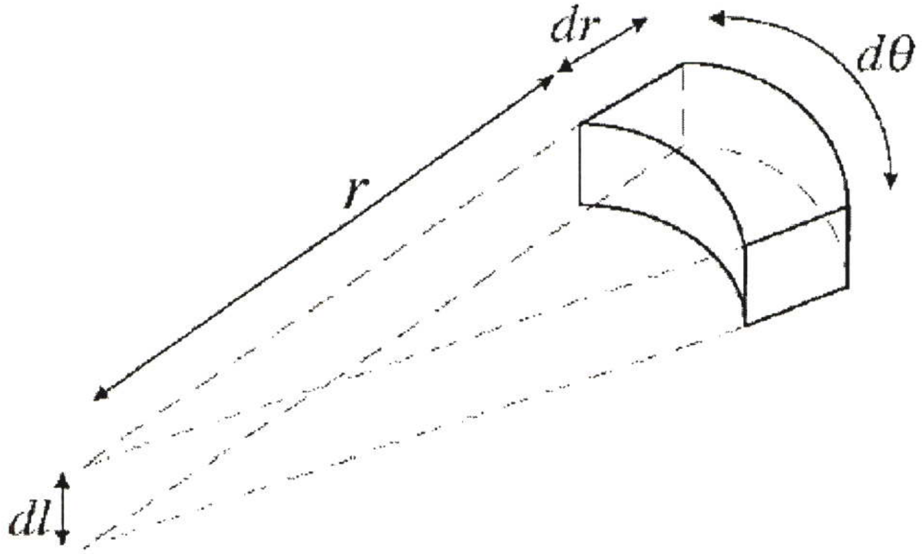


ภาคผนวก ข.

การหาค่า C_{tt} ระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน

การหาค่า C_{tt} ระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน จะต้องทำการแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ค่าตัวเก็บประจุในระหว่างฉนวนขดลวด 2. ค่าตัวเก็บประจุในช่องอากาศระหว่างขดลวด

1. ค่าตัวเก็บประจุในระหว่างฉนวนขดลวด



รูปที่ ข.1 ภาพตัดขวางของขดลวดแบบทรงกระบอกเพื่อแสดงลักษณะของฉนวนขดลวด

พิจารณาจากรูปที่ ข.1 จะได้สมการของค่าตัวเก็บประจุในระหว่างฉนวนขดลวดที่เป็นรูปทรงกระบอกดังสมการที่ (ข.1)

$$dC = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 r}{dr} d\theta d\ell \qquad (ข.1)$$

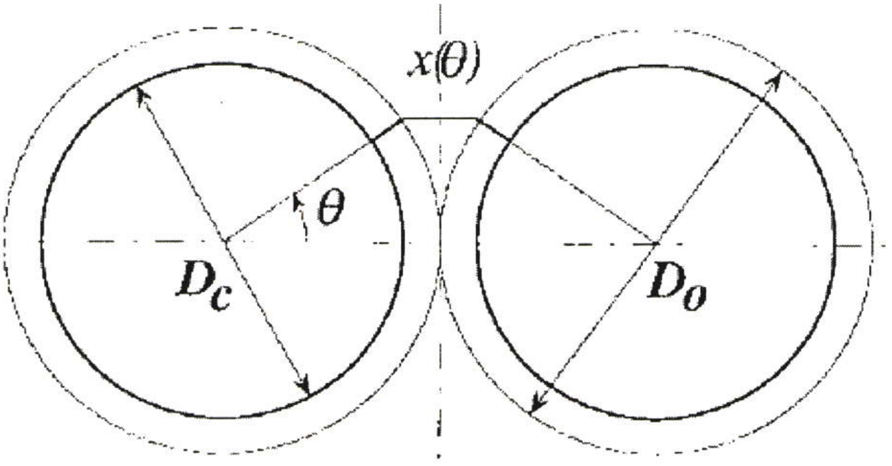
ทำการอินทิเกรตสมการ (ข.1) ตามแนวรัศมี r และความยาว ℓ ของขดลวด จะได้

$$dC_c = \varepsilon_r \varepsilon_0 d\theta \int_0^{\ell_t} d\ell \int_{r_C}^{r_O} \frac{r}{dr} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \ell_t}{\ln \frac{r_O}{r_C}} d\theta \qquad (ข.2)$$

ดังนั้นจะได้สมการค่าตัวเก็บประจุต่อหน่วยของมุม θ ดังสมการที่ (ข.3)

$$\frac{dC_{ttc}}{d\theta} = \frac{dC_c}{2} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \ell_t}{2\ln \frac{r_O}{r_C}} \qquad (ข.3)$$

2. ค่าตัวเก็บประจุในช่องอากาศระหว่างขดลวด



รูปที่ ข.2 ภาพตัดขวางของขดลวดเพื่อแสดงค่ามุม θ และระยะทาง $x(\theta)$ ในส่วนของช่องอากาศ

จากรูปที่ (ข.2) จะได้ว่า

$$x(\theta) = D_O(1-\cos\theta) \qquad (ข.4)$$

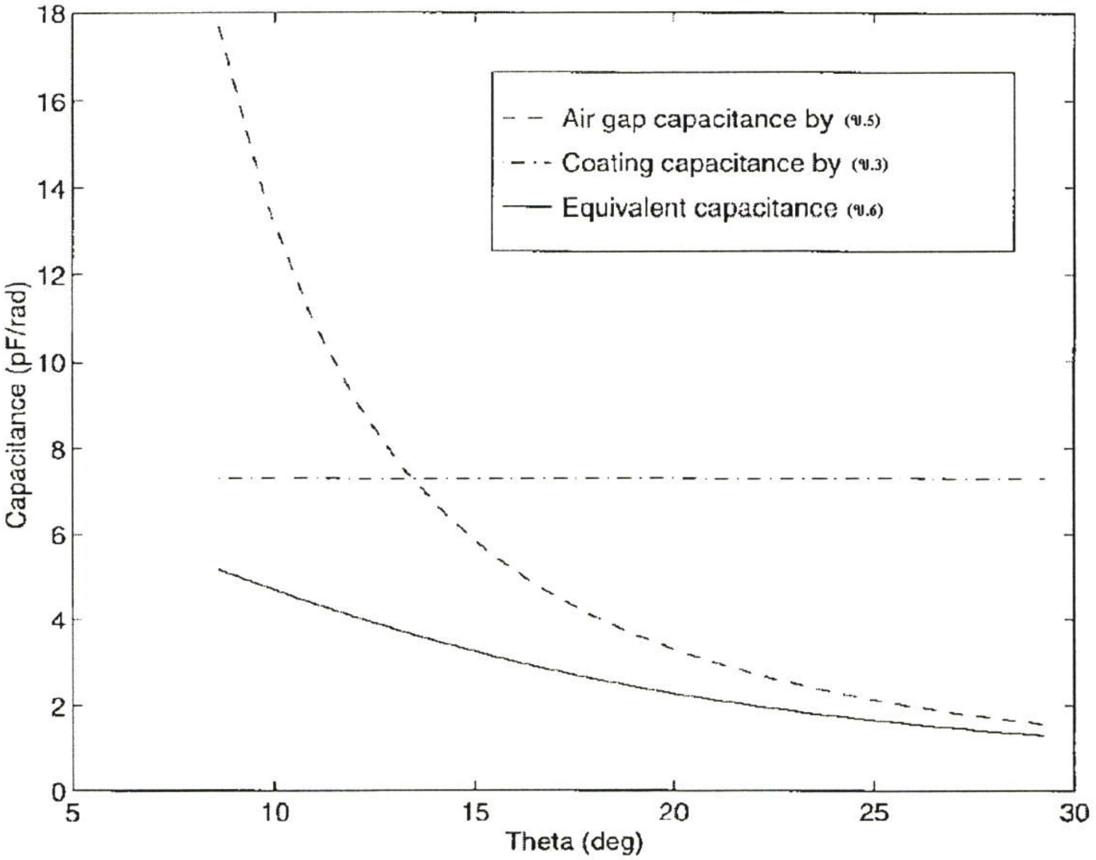
ดังนั้นจะได้สมการค่าตัวเก็บประจุต่อหน่วยของมุม θ ดังสมการที่ (ข.5)

$$\frac{dC_g(\theta)}{d\theta} = \varepsilon_0 \frac{\ell_t D_O}{2D_O(1-\cos\theta)} = \varepsilon_0 \frac{\ell_t}{2(1-\cos\theta)} \qquad (ข.5)$$

ซึ่งจะได้สมการสำหรับหาค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน โดยจะทำการรวมสมการ (ข.3) กับ (ข.5) ได้เป็นสมการของค่าตัวเก็บประจุรวมระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกัน โดยแสดงดังสมการที่ (ข.6)

$$dC_{eq}(\theta) = \frac{\varepsilon_0 \ell_t}{2} \frac{1}{1+\frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{D_O}{D_C}-\cos\theta} d\theta \qquad (ข.6)$$

ซึ่งเมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (ข.6) เพื่อหาค่า C_{eq} จะทำได้ยุ่งยากและซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงทำการพิจารณาสมการให้ง่ายขึ้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (ข.3) กับ (ข.5) ดังแสดงในรูปที่ (ข.3)



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (ข.3) กับ (ข.5) ในการหาค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวด

จากรูปที่ ข.3 กำหนดให้มุมที่เป็นจุดตัดของสมการ (ข.3) กับ (ข.5) มีค่าเท่ากับ θ^* โดยจะหาค่าได้จากการพิจารณาในช่วงที่สมการ (ข.3) มีค่าเท่ากับ (ข.5) คือ

$$\frac{\varepsilon_r}{\ln\frac{D_O}{D_C}} = \frac{1}{1-\cos\theta^*}$$

$$\theta^* = \arccos\left(1 - \frac{\ln\frac{D_O}{D_C}}{\varepsilon_r}\right) \qquad (ข.7)$$

ดังนั้นเพื่อให้การหาค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดที่อยู่ติดกันง่ายขึ้น จึงทำการแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ช่วง $|\theta| \le \theta^*$ 2. ช่วง $\theta^* < |\theta| \le \pi/6$

โดยช่วง $|\theta| \le \theta^*$ จะเป็นช่วงที่พิจารณาว่าขดลวดติดกัน(ไม่มีช่องอากาศ) จะได้

$$C_{ttc} = \frac{C_c}{2} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \ell_t \theta^*}{2\ln\frac{r_O}{r_C}} \qquad (ข.8)$$

ส่วนช่วง $\theta^* < |\theta| \le \pi / 6$ จะเป็นช่วงที่พิจารณาในส่วนของช่องอากาศระหว่างขดลวด จะได้

$$C_{ttg} = 2\int_{\theta^*}^{\pi/6} \frac{\varepsilon_0 \ell_t}{2(1-\cos\theta)} d\theta = \varepsilon_0 \ell_t \left[\cot\left(\frac{\theta^*}{2}\right) - \cot\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] \qquad (ข.9)$$

นำทั้ง 2 ส่วนมารวมกันจะได้สมการของ C_{tt} คือ

$$C_{tt} = C_{ttc} + C_{ttg} = \varepsilon_0 \ell_t \left[\frac{\varepsilon_r \theta^*}{\ln \frac{D_O}{D_C}} + \cot\left(\frac{\theta^*}{2}\right) - \cot\left(\frac{\pi}{12}\right) \right] \qquad (ข.10)$$

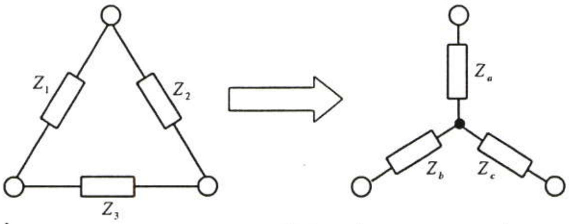
เมื่อ D_O คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (รวมฉนวน)

D_C คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (ไม่รวมฉนวน)

ภาคผนวก ค.

การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์

การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์



รูปที่ ค.1 การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ของค่าอิมพีแดนซ์ Z

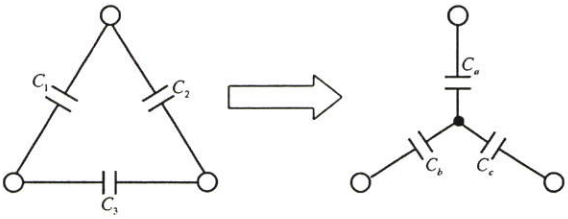
จากรูปที่ ค.1 เป็นรูปแสดงการเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ของค่าอิมพีแดนซ์ Z ซึ่งจะได้สมการในการเปลี่ยนรูปวงจรดังสมการที่ (ค.1) – (ค.3)

$$Z_a = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \qquad \text{(ค.1)}$$

$$Z_b = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \qquad \text{(ค.2)}$$

$$Z_c = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \qquad \text{(ค.3)}$$

จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้กับการเปลี่ยนรูปวงจรของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C ในรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 การเปลี่ยนรูปวงจรจากแบบเดลต้าไปเป็นแบบสตาร์ของค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า C

จากสมการ (ค.1) จะได้ว่า

$$\frac{1}{2\pi f C_a} = \frac{\frac{1}{2\pi f C_1} \times \frac{1}{2\pi f C_2}}{\frac{1}{2\pi f C_1} + \frac{1}{2\pi f C_2} + \frac{1}{2\pi f C_3}}$$

$$\frac{1}{2\pi f}\left(\frac{1}{C_a}\right)=\frac{\frac{1}{(2\pi f)^2}\times\frac{1}{C_1C_2}}{\frac{1}{2\pi f}\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right)}$$

$$\frac{1}{C_a}=\frac{\frac{1}{C_1C_2}}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}$$

$$C_a=\frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_1}\times\frac{1}{C_2}} \qquad (ค.4)$$

เพราะฉะนั้นในลักษณะเดียวกันจะได้ค่า C_b และ C_c ดังสมการที่ (ค.5) และ (ค.6) ตามลำดับ คือ

$$C_b=\frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_1}\times\frac{1}{C_3}} \qquad (ค.5)$$

$$C_c=\frac{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_2}\times\frac{1}{C_3}} \qquad (ค.6)$$

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. กฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ และวีระเชษฐ์ ขันเงิน. 2549. “การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการพันแบบก้าวหน้า” หน้า 297-300. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.** ชลบุรี : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

The EECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne

EECON XXIX

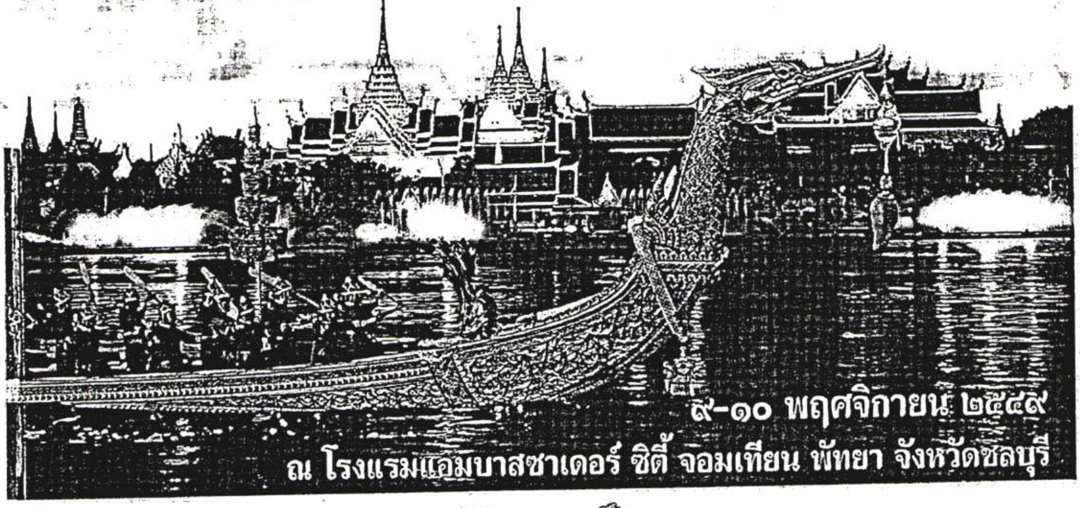
29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

EECON-29 RMUTT

Volume I

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)



ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการพันแบบก้าวหน้า

Conducted EMI Reduction on a Boost Converter Using Progressive Inductor Winding Techniques

กฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ และวีระเชษฐ์ ขันเงิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 ม. 2 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2737-3000 ต่อ 3322 E-mail : s7060218@kmitl.ac.th , kkveerac@kmitl.ac.th Website : www.kmitl.ac.th/emc

PW75

บทคัดย่อ

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์โดยปรกติมีสาเหตุมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่สูงร่วมกับตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ การลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่สูงอาศัยการใช้เทคนิคซอฟต์สวิตซึ่งและการลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ ในบทความนี้จะเสนอการลดค่าตัวเก็บประจุแฝงด้วยการพันขดลวดแบบก้าวหน้าโดยทำการเปรียบเทียบกับการพันแบบทั่วไป โดยจะนำมาแสดงและแยกทดสอบทั้งแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและแบบกระแสต่อเนื่อง ผลการทดลองในรูปแบบของสเปคตรัมสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งการพันแบบทั่วไปและการพันแบบก้าวหน้าจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน โดยแสดงให้เห็นถึงการลดลงของสัญญาณรบกวนเมื่อพันแบบก้าวหน้า

คำสำคัญ : สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า, การพันตัวเหนี่ยวนำ

Abstract

Electromagnetic interference (EMI) of a boost converter, normally caused by switching dv/dt rates and interacting with parasitic capacitance in the inductor for a boost converter. The reduction of high switching dv/dt can be used soft-switching techniques. On the other hand, parasitic capacitance in the inductor can be potentially reduced by winding techniques. In this paper, the parasitic capacitance can be reduced by modified progressive winding techniques. The EMI sources of the inductor normal winding are identified and measured with both of discontinuous and continuous current mode. Finally, the experimental EMI spectrum of both normal and progressive winding is compared to confirm the advantage of a progressive winding techniques.

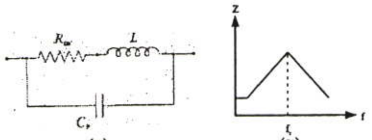
Keywords : electromagnetic interference, inductor winding techniques

1. บทนำ

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์[1]เพราะว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นทางสายตัวนำหรือทางการแผ่กระจายเป็นคลื่นอาจเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆในวงจรทำงานผิดพลาดได้ ซึ่งค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำ[2],[3]ของบูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำที่สูงก็จะทำให้มีการเกิดของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากตามไปด้วย เมื่อเทคนิคการพันแบบก้าวหน้าสามารถลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ได้ ดังนั้นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการพันแบบทั่วไปจึงสามารถลดลงได้โดยใช้เทคนิคการพันแบบก้าวหน้าในบางช่วงความถี่

2. ทฤษฎี

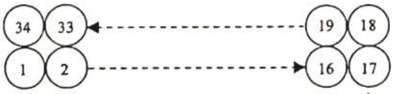
พฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำเมื่อทำงานที่ความถี่สูงจะมีลักษณะที่แตกต่างกับที่ความถี่ต่ำเป็นอย่างมาก เนื่องมาจากค่าความต้านทานของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้น โดยวงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ความถี่สูงและกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 1 (ก) และ 1 (ข) ตามลำดับ



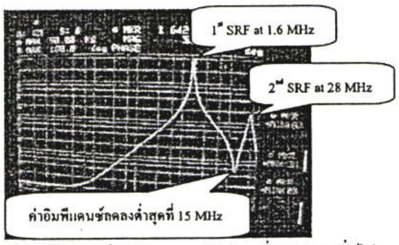
(ก) (ข)

รูปที่ 1 (ก) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ความถี่สูง (ข) กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

จากรูป 1 (ข) จะพบว่าเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนมากกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำก็จะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าตัวเก็บประจุแฝงที่ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง



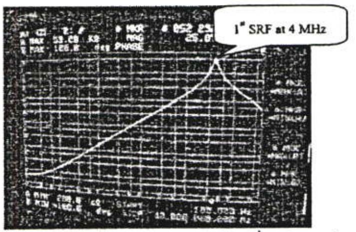
รูปที่ 2 การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป



รูปที่ 3 การเกิดเรโซแนนซ์(SRF)ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไป

การพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปจะเป็นการพันขดลวดในลักษณะเรียงชิดต่อกันไปจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายของอีกด้านหนึ่งเพื่อเป็นขดลวดชั้นแรก หลังจากนั้นจะทำการพันย้อนกลับมาบนขดลวดชั้นแรกเพื่อให้ได้จำนวนรอบของขดลวดตามที่ต้องการ ซึ่งการพันในลักษณะนี้จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงเนื่องจากขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพันและขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพันอยู่ใกล้กัน ดังรูปที่ 2 ส่วนค่าความถี่เรโซแนนซ์ของการพันแบบทั่วไปแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจะพบว่ามีการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้น 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 เกิดขึ้นที่ความถี่ 1.6 MHz และครั้งที่ 2 เกิดขึ้นที่ความถี่ 28 MHz

รูปที่ 4 การพันตัวเหนี่ยวนำสำหรับบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบก้าวหน้า

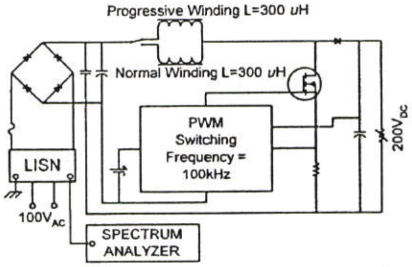


รูปที่ 5 การเกิดเรโซแนนซ์(SRF)ของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้า

ส่วนการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะเป็นการพันขดลวดในลักษณะเรียงสลับกันระหว่างขดลวดชั้นแรกกับขดลวดชั้นที่สอง ซึ่งการพันในลักษณะนี้จะทำให้ขดลวดที่เป็นจุดเริ่มต้นการพันและขดลวดที่เป็นจุดสิ้นสุดการพันอยู่ไกลจากกัน ดังรูปที่ 4 มีผลทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำกว่าการพันแบบทั่วไป สำหรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของการพันแบบก้าวหน้าแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งจะพบว่ามีการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นเพียงครั้งเดียวคือที่ความถี่ 4 MHz

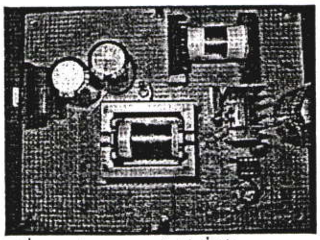
3. วิธีการทดลอง

ในรูปที่ 6 แสดงการจัดวิธีการทดลองในการวัดสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเท่ากับ 100 V_{AC} ส่วนแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับ 200 V_{DC} ความถี่ในการสวิตชิ่งจะใช้ที่ 100 kHz ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 300 μH จำนวนรอบในการพันเท่ากับ 34 รอบ ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องจะมีค่า 70 W ส่วนในการทำงานโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่าเท่ากับ 140 W



รูปที่ 6 การจัดวิธีการทดลองในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ สัญญาณที่ได้จะถูกส่งผ่าน LISN ไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม ADVANTEST R3132 ซึ่งถูกใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนที่ถูกส่งออกมาจากบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะใช้การวัดแบบค่ายอด(พีค) ดังนั้นผลการวัดที่ได้จึงเป็นเงื่อนไขกรณีที่เลวร้ายที่สุด

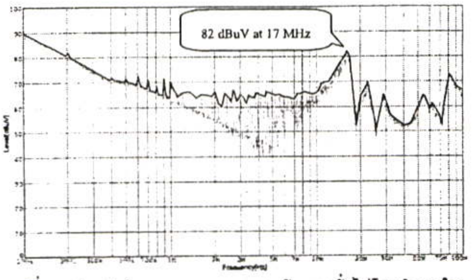


รูปที่ 7 ภาพถ่ายแผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

4. ผลการทดลอง

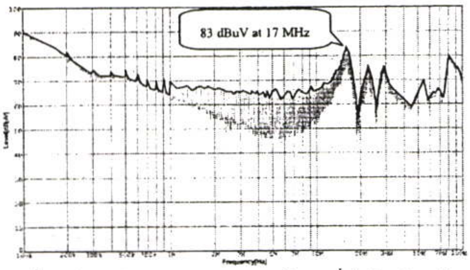
4.1 การพันตัวเหนี่ยวนำบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป

สเปคตรัมของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยมีการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและโหมดกระแสต่อเนื่องของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปแสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

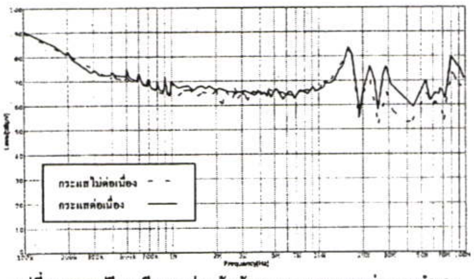


รูปที่ 8 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไปโดยทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

เมื่อนำสัญญาณรบกวนของทั้งโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่องมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 10 จะพบว่าสัญญาณรบกวนของทั้งสองโหมดการทำงานจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 20 MHz ส่วนในช่วง 20 MHzจนถึง 100 MHz นั้น สัญญาณรบกวนของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าโหมดไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในโหมดกระแสต่อเนื่องจะเป็นการทำงานในโหมดที่เลวร้ายที่สุดในการทดลองนี้



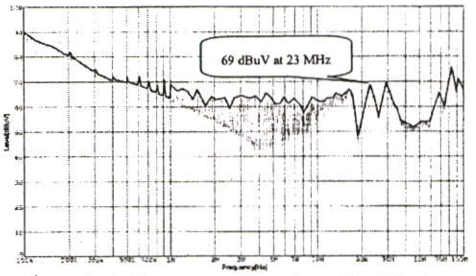
รูปที่ 9 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบทั่วไปโดยทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง



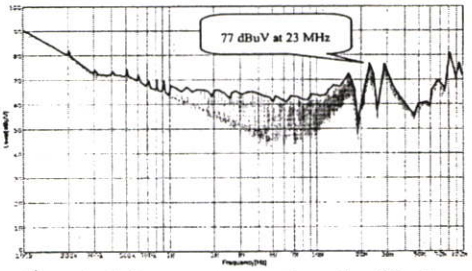
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องกับแบบต่อเนื่องของการพันแบบทั่วไป

4.2 การพันตัวเหนี่ยวนำบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบก้าวหน้า

สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำของโหมดการทำงานทั้ง 2 โหมดสำหรับการพันแบบก้าวหน้าแสดงดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

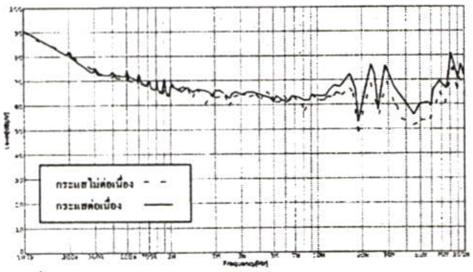


รูปที่ 11 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าโดยทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 12 สเปคตรัมสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าโดยทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

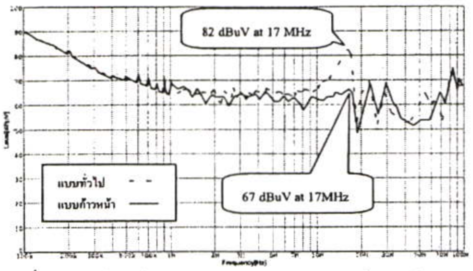
เมื่อนำสัญญาณรบกวนของทั้ง 2 โหมดมาทำการเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 13 จะพบว่าสัญญาณรบกวนของทั้ง 2 โหมดการทำงานจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 10 MHz ส่วนในช่วง 10 MHz จนถึง 100 MHz นั้น สัญญาณรบกวนของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่าในโหมดไม่ต่อเนื่อง ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องของการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าก็จะเป็นโหมดการทำงานที่เลวร้ายที่สุดเช่นเดียวกับการพันแบบทั่วไป



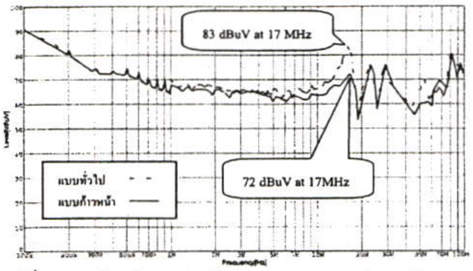
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องกับแบบต่อเนื่องของการพันแบบก้าวหน้า

4.3 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันตัวเหนี่ยวนำแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้า

เมื่อนำสัญญาณรบกวนของทั้งการพันแบบทั่วไปและแบบก้าวหน้ามาทำการเปรียบเทียบกันทั้งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องและแบบกระแสต่อเนื่อง ดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ โดยในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องจะพบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz จนถึง 10 MHz สัญญาณรบกวนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วง 10 MHz ถึง 20 MHz การพันแบบก้าวหน้าจะมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่าการพันแบบทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งที่ความถี่ประมาณ 17 MHz สัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าจะมีค่าต่ำกว่าแบบทั่วไปถึงประมาณ 15 dB หลังจากนั้นในช่วง 20 MHz จนถึง 100 MHz สัญญาณรบกวนของการพันทั้งสองแบบก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะมีค่ายอด(พีค)เกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับแบบก้าวหน้าในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง

ส่วนในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องก็จะพบว่าความแตกต่างของสัญญาณรบกวนระหว่างการพันแบบทั่วไปกับแบบก้าวหน้าก็จะมีลักษณะที่เหมือนกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง โดยที่ความถี่ประมาณ 17 MHz จะเป็นความถี่ที่การพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าจะสามารถลดสัญญาณรบกวนลงได้มากที่สุด แต่ในโหมดการทำงานนี้สามารถลดลงได้เพียง 11 dB เท่านั้น

จากผลการทดลองพบว่าความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์(SRF)กับความถี่ที่สัญญาณรบกวนลดลงมากที่สุดจะไม่ใช่ความถี่เดียวกัน แต่ความถี่ที่สัญญาณรบกวนลดลงมากที่สุดจะเป็นความถี่ช่วงที่ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3 โดยความถี่ดังกล่าวจะอยู่ที่ 15 MHz ซึ่งสาเหตุที่ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเป็นผลมาจากค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

5. สรุป

ด้วยเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำแบบก้าวหน้าที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น จะสามารถลดค่าตัวเก็บประจุแฝงในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าซึ่งจะช่วยลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ลงได้ โดยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 MHz ถึง 20 MHz จะเป็นช่วงความถี่ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนได้มากที่สุด ซึ่งในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่องสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าจะมีค่าต่ำกว่าการพันแบบทั่วไปถึงประมาณ 15 dB ส่วนในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องสัญญาณรบกวนของการพันแบบก้าวหน้าจะมีค่าต่ำกว่าการพันแบบทั่วไปประมาณ 11 dB ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าวถือว่าเป็นย่านความถี่ที่มีผลมาจากสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมเป็นหลักและมักจะเกิดจากผลของตัวเก็บประจุแฝงในวงจรเป็นส่วนใหญ่[4]

เอกสารอ้างอิง

[1] M.N. Gitau; "Modeling Conducted EMI Noise Generation and Propagation in Boost Converters"; IEEE International Symposium on Volume 2, 4-8 Dec. 2000 Page(s):353 - 358 vol.2

[2] Massarini, A.; Kazimierczuk, M.K.; Grandi, G.; "Lumped parameter models for single- and multiple-layer inductors"; PESC '96., 27th Annual IEEE, 23-27 June 1996 Page(s):295 - 301 vol.1

[3] Massarini, A.; Kazimierczuk, M.K.; "Self-capacitance of inductors"; Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 12, Issue 4, July 1997 Page(s):671 - 676

[4] John C.Fluke.; "Controlling Conducted Emission by Design"; New York, VNR, 1991.

กฤษฎา สฤษฏิ์ศิริ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจงานวิจัยด้าน EMC

วีระเชษฐ์ ขันเงิน จบการศึกษา วศ.บ., วศ.ม. (ไฟฟ้า) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, Ph.D.(Electrical Engineering) จาก Imperial College, University of London, UK. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน

นายกฤษฎา สฤษฎิ์ศิริ เกิดเมื่อวันที่ 14 เมษายน พ.ศ.2519 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนสฤษดิเดช ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547

ในปี พ.ศ. 2540 ถึงปัจจุบัน ได้เข้าทำงานที่บริษัทไทยตาบูชิอิเล็คทริค จำกัด โดยเริ่มงานในตำแหน่งวิศวกรออกแบบ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรอาวุโสในแผนกวิศวกรออกแบบ Switching Power Supply