

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

การศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์  
เหนี่ยวนำ

THE STUDY OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ON INVERTER  
DRIVE FOR INDUCTION MOTOR



5/11  
ค.ศ. 2548  
9549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **62709**  
วัน,เดือน,ปี **21 ส.ค. 2549**

b.....	11829428
i.....	

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

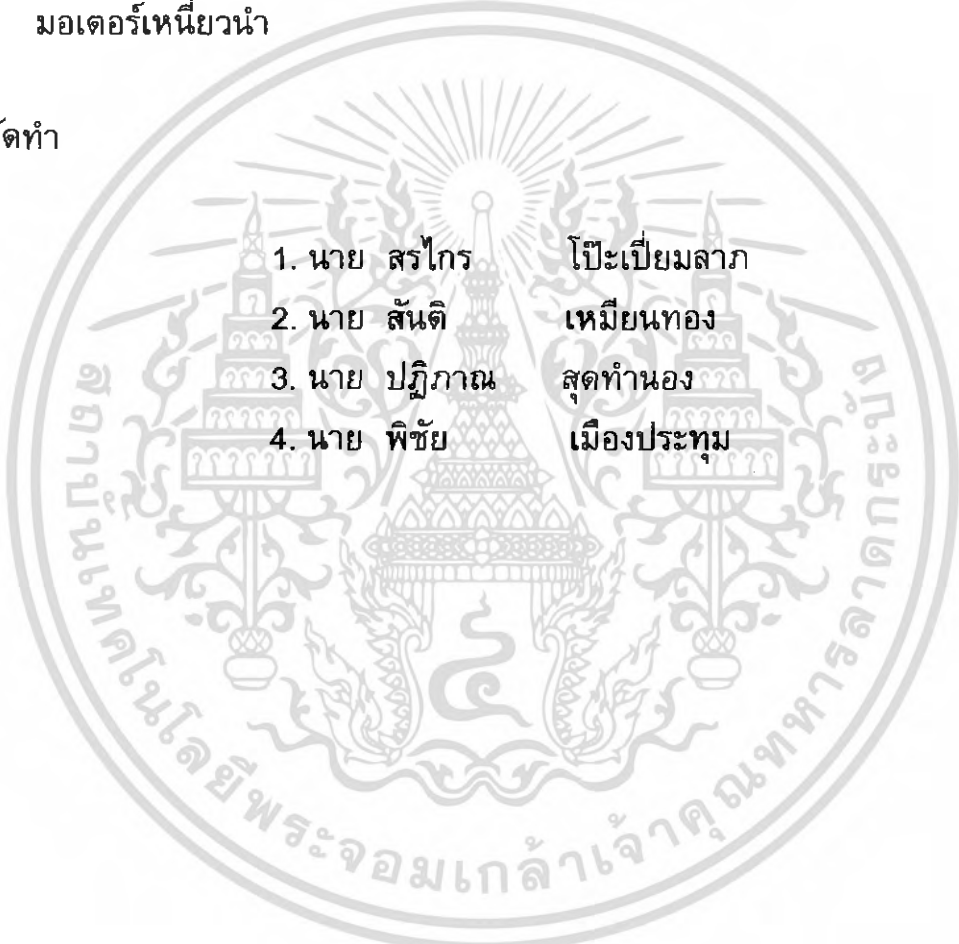
ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสัญญาครบถ้วนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน  
มอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย สรไกร โปะเปี่ยมลภ
  2. นาย สันติ เหมียนทอง
  3. นาย ปฏิภาณ สุดทำนอง
  4. นาย พิชัย เมืองประทุม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ เหนี่ยวนำ

นาย สรไกร โปะเปี่ยมลาก  
นาย สันติ เหมียนทอง  
นาย ปฏิภาณ สุดทำนอง  
นาย พิชัย เมืองประทุม  
รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 0.5 แรงม้า และ ออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถใช้งานได้ทั้งแบบโหมดผลต่างและโหมดผลรวม วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวงจรกรองสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการลดระดับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตัวนำได้แก่ชนิด LC, Pi และ T ซึ่งจะเป็นการป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปรบกวนหรือก่อให้เกิดความเสียหายให้กับระบบของการไฟฟ้า

**THE STUDY OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ON INVERTER DRIVE  
FOR INDUCTION MOTOR**

Sorakai Pohpaimlap

Santi Miantong

Patiparn Sudtumnorng

Pichai Muangpratoom

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2005

**ABSTRACT**

This thesis presents a study electromagnetic interference (EMI) of 1.5 kW inverter to control 0.5 hp induction motor. EMI filter is designed to reduce electromagnetic conducted emission for both differential mode and common mode. Electromagnetic interference filter are designed to prevent interference from traveling either into or out of equipment via its interfaces e.g. grid connection.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ทางคณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ. ร.อ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางในการศึกษาค้นคว้าตลอดการทำงาน และ ขอขอบคุณพี่ๆห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยจนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการศึกษา และ เรียนรู้การใช้ชีวิตในระดับอุดมศึกษา

และสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นทุกสิ่งทุกอย่าง เป็นผู้ให้ที่ยิ่งใหญ่ของคณะผู้จัดทำ ทำให้งานประสบความสำเร็จสมดังปรารถนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	4
2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส .....	4
2.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ .....	4
2.2.1 พีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ .....	5
2.2.2 โครงสร้างของพีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์.....	5
2.3 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.3.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) .....	6
2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) .....	6
2.3.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Noise source) .....	7
2.3.4 ทางเดินของสัญญาณรบกวน (Coupling Mode) .....	7
2.3.5 สิ่งที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Receiver on victim) .....	8
2.3.6 การแก้ปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.5 Insertion loss .....	10
2.6 ผลของความไม่เท่ากันของอิมพีแดนซ์ (Impedance Mismatch Effect) .....	11
2.7 องค์ประกอบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lumped Element Low-Pass filter) .....	12
2.7.1 วงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter) .....	12
2.7.2 วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Filter) .....	16
2.8 วงจรกรองแบบ LC (LC filter) .....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ( ต่อ )

	หน้า
2.9 วงจรกรองแบบ Pi (Pi filter).....	20
2.10 วงจรกรองแบบ T (T filter).....	21
2.11 สรุป.....	23
<b>บทที่ 3 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....</b>	<b>24</b>
3.1 การออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆใน EMI filter.....	24
3.1.1 การออกแบบส่วนประกอบในโหมดผลต่าง (DM).....	24
3.1.2 การออกแบบส่วนประกอบในโหมดผลร่วม (CM).....	25
3.1.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด (Common mode choke).....	27
3.1.4 การเลือกแกน.....	27
3.1.5 การพิจารณาถึงชนิดและย่านความถี่ของตัวเก็บประจุที่ใช้งาน.....	28
3.1.6 การพิจารณาถึงชนิดและย่านความถี่ในการใช้งานของตัวเหนี่ยวนำ.....	29
3.2 ขั้นตอนการออกแบบจริง.....	30
3.2.1 ทดสอบขั้วมอดเจอร์แบบ Full load.....	31
3.2.2 ออกแบบหาค่าอุปกรณ์ที่ในวงจรกรอง.....	31
3.2.3 ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของอุปกรณ์ในวงจรกรอง.....	33
3.3 สรุป.....	40
<b>บทที่ 4 การจำลองการทำงานและผลการทดลอง.....</b>	<b>41</b>
4.1 บทนำ.....	41
4.2 การสร้างแบบจำลองการทำงาน.....	41
4.2.1 วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN).....	41
4.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	42
4.2.3 วงจรสมมูลของมอดเจอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	42
4.2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
4.3 ผลการจำลองการทำงาน.....	44
4.3.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	44
4.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC.....	45

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

4.3.3	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เมื่อใส่วงจรกรอง สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L).....	45
4.3.4	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เมื่อใส่วงจรกรอง สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi.....	46
4.3.5	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เมื่อใส่วงจรกรอง สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T.....	46
4.3.6	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47 $\mu$ F.....	47
4.3.7	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ L (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และ ค่า C เป็น 0.47 $\mu$ F.....	47
4.3.8	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47 $\mu$ F.....	48
4.3.9	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47 $\mu$ F.....	48
4.3.10	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และค่า L เป็น 6.4 mH.....	49
4.3.11	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และ ค่า L เป็น 6.4 mH.....	49
4.3.12	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และค่า L เป็น 6.4 mH.....	50
4.3.13	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และค่า L เป็น 6.4 mH.....	50
4.3.14	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และค่า L เป็น 12.8 mH.....	51
4.3.15	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และ ค่า L เป็น 12.8 mH.....	51
4.3.16	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และค่า L เป็น 12.8 mH.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ( ต่อ )

หน้า

4.3.17 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น 1 $\mu$ F และค่า L เป็น 12.8 mH.....	52
4.3.18 เปรียบเทียบก่อนใส่วงจรกรองและหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณ รบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่าง ๆ.....	53
4.4 ผลการทดลอง.....	53
4.4.1 ตัวกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) ที่ใช้ทดลอง.....	54
4.4.1.1 วงจรกรองแบบ LC.....	54
4.4.1.2 วงจรกรองแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L).....	55
4.4.1.3 วงจรกรองแบบ Pi.....	57
4.4.1.4 วงจรกรองแบบ T.....	58
4.4.2 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	59
4.4.2.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนการทดลอง.....	59
4.4.2.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอดูเตอร์ขับโหลดที่พิกัด.....	60
4.4.2.3 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะมอดูเตอร์ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ LC.....	60
4.4.2.4 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะมอดูเตอร์ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L).....	61
4.4.2.5 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะมอดูเตอร์ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ Pi.....	62
4.4.2.6 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะมอดูเตอร์ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ T.....	63
4.4.2.7 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุด เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T.....	64
4.4.2.8 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ดีที่สุด เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T.....	65
4.4.2.9 การเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่ดีที่สุดและไม่ดีที่สุดที่สร้างขึ้นเองกับผลการกรองของวงจร กรองที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด.....	66
4.5 สรุปผลการทดลอง.....	68
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
5.1 บทสรุป.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
5.3 สิ่งที่ควรดำเนินการต่อไป.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก. รูปภาพอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....	73
ภาคผนวก ข. Data sheet.....	79
กิตติกรรมประกาศ.....	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....5
2.2	บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านสัญญาณรบกวน.....6
2.3	แสดงลักษณะทั่วไปในการป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย EMI Filter.....10
2.4	วงจรกรองแบบ 4 ขั้ว.....10
2.5	(ก) วงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ .....12
	(ข) วงจรขณะยังไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน.....12
	(ค) วงจรขณะได้ทำการต่อวงจรกรองสัญญาณโดยใช้ตัวเก็บประจุ.....13
	(ง) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ.....14
	(จ) $R_p = \text{parasitic resistance}$ , $L_p = \text{parasitic inductance}$ .....15
2.6	(ก) วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ.....16
	(ข) วงจรขณะได้ทำการต่อวงจรกรองสัญญาณโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ.....16
	(ค) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ.....17
	(ง) $C_p = \text{parasitic capacitance}$ , $R_p = \text{parasitic resistance}$ .....18
2.7	(ก) วงจรกรองแบบ LC สำหรับแหล่งจ่ายที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำและโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์สูง.....19
	(ข) วงจรกรองแบบ LC สำหรับแหล่งจ่ายที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ.....19
	(ค) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ LC.....19
2.8	การต่อวงจรกรองแบบ LC ร่วมกัน.....20
2.9	(ก) วงจรกรองแบบ $\Pi$ .....20
	(ข) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ $\Pi$ .....20
2.10	การต่อวงจรแบบ $\Pi$ ร่วมกัน.....21
2.11	การต่อวงจรแบบ $\Pi$ ร่วมกันแบบสมมูล.....21
2.12	(ก) วงจรกรองแบบ T.....21
	(ข) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ T.....22
3.1	แผนผังการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....30
3.2	กราฟสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะขับมอเตอร์แบบ Full load.....31
3.3	กรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบ.....32
3.4	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ $C_x = 0.22 \mu\text{F}$ .....33
3.5	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ $C_x = 0.47 \mu\text{F}$ .....34
3.6	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ $C_x = 1 \mu\text{F}$ .....35
3.7	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ $C_y = 3.3 \text{ nF}$ .....36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป( ต่อ )

รูปที่	หน้า
3.8	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเหนี่ยวนำ $L = 1.6 \text{ mH}$ ..... 37
3.9	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเหนี่ยวนำ $L = 3.2 \text{ mH}$ ..... 38
3.10	ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเหนี่ยวนำ $L = 6.4 \text{ mH}$ ..... 39
4.1	วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)..... 41
4.2	วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ..... 42
4.3	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... 42
4.4	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC..... 43
4.5	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)..... 43
4.6	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ Pi..... 44
4.7	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ T..... 44
4.8	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ จากการจำลองระบบเมื่อไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า..... 44
4.9	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC..... 45
4.10	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) ..... 45
4.11	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi..... 46
4.12	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T..... 46
4.13	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า $L$ เป็น $12.8 \text{ mH}$ และค่า $C$ เป็น $0.47 \text{ }\mu\text{F}$ ..... 47
4.14	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า $L$ เป็น $12.8 \text{ mH}$ และค่า $C$ เป็น $0.47 \text{ }\mu\text{F}$ ..... 47
4.15	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า $L$ เป็น $12.8 \text{ mH}$ และค่า $C$ เป็น $0.47 \text{ }\mu\text{F}$ ..... 48
4.16	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า $L$ เป็น $12.8 \text{ mH}$ และค่า $C$ เป็น $0.47 \text{ }\mu\text{F}$ ..... 48
4.17	วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า $C$ เป็น $1\text{ }\mu\text{F}$ และ ค่า $L$ เป็น $6.4 \text{ mH}$ ..... 49

## สารบัญรูป( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.18 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $6.4\text{ mH}$ .....	49
4.19 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $6.4\text{ mH}$ .....	50
4.20 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $6.4\text{ mH}$ .....	50
4.21 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $12.8\text{ mH}$ .....	51
4.22 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $12.8\text{ mH}$ .....	51
4.23 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $12.8\text{ mH}$ .....	52
4.24 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น $1\mu\text{F}$ และค่า L เป็น $12.8\text{ mH}$ .....	52
4.25 เปรียบเทียบผลการจำลองก่อนใส่วงจรกรองและหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณ รบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยการเชื่อมต่อเส้นที่ยอดคลื่น.....	53
4.26 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการในการทดลอง.....	53
4.27 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการต่อจริงในการทดลอง.....	54
4.28 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC.....	55
4.29 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L).....	56
4.30 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ Pi.....	58
4.31 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ T.....	59
4.32 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนการทดลอง.....	59
4.33 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอดูเรอร์รับโหลดที่พิกัด.....	60
4.34 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง.....	60
4.35 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ เปลี่ยนแปลง.....	61
4.36 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ Pi โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.37	สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ T โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง.....	63
4.38	การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T.....	64
4.39	การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T.....	65
4.40	การเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีและไม่ดีที่สุดที่สร้างขึ้นเองกับผลการกรองของวงจรกรองที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 มาตรฐานความปลอดภัยของปริมาณกระแสรั่วไหลระหว่างสายตัวนำและกราวด์.....	26
3.2 พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป.....	28
3.3 ย่านความถี่ที่เหมาะสมกับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	29
4.1 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบต่างๆ.....	43
4.2 ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC.....	61
4.3 ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L).....	62
4.4 ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi.....	63
4.5 ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T.....	64
4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T.....	65
4.7 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T.....	66
4.8 การเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีและไม่ดีที่สุดที่สร้างขึ้นเองกับผลการกรองของวงจรกรองที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา [5]

ในชีวิตประจำวันการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะเคยเจอปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนต่างๆที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ของเรา ขณะใช้งาน ซึ่งปัญหาสัญญาณรบกวนไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะกับอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้านเท่านั้น ในปัจจุบันระบบอุตสาหกรรมมีการใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำกันอย่างแพร่หลาย เพราะมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี การทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นอาศัยหลักการการสวิตซ์ความถี่สูงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการทำงานดังกล่าวจะเป็นสาเหตุของการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน (Electromagnetic Interference: EMI) ดังนั้น ปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะหาทางแก้ไขปัญหาได้จึงจำเป็นต้องศึกษาในเรื่องสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจ รู้ถึงสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาและออกแบบสร้างอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถลดผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนได้อย่างเหมาะสม

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถส่งผ่านได้ 2 ทาง คือ การส่งผ่านทางตัวนำ และการส่งผ่านทางอากาศ โดยการป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านทางสายตัวนำมีหลักการคือ การใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference filter) ต่อเข้าไประหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนผ่านเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และไปรบกวนอุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ในระบบไฟฟ้าเดียวกัน สำหรับการป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านทางอากาศนั้นมีหลักการคือ การใช้วัสดุกันสัญญาณรบกวน (shielding) เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านทางอากาศไม่ให้ผ่านเข้าไปถึงอุปกรณ์อื่นๆ

โครงการนี้จะเป็นการนำเสนอผลการศึกษารบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ และการแพร่กระจายทางอากาศที่เกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถลดผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในตัวนำและทำการทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมา โดยการใช้เครื่องมือวัด และทำการจำลองระบบ (simulation)

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผลกระทบต่อการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะทำการศึกษาทั้งกรณีที่เกิดการแพร่กระจายมาตามตัวนำและแพร่กระจายมาทางอากาศ ดังนั้นหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตู้จำหน่ายเครื่องดื่ม ทดสอบ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตู้จำหน่าย

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 kW และทำการศึกษาค้นคว้าแหล่งกำเนิด ผลกระทบ และแนวทางการป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตู้จำหน่าย เพื่อนำมาพิจารณาในการออกแบบ จำลองระบบ และสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณรบกวนทั้งแบบโหมดผลต่าง (DM) และโหมดผลรวม (CM) เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสายตู้จำหน่าย

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทั้งที่มาตามสายตู้จำหน่าย และแพร่กระจายมาทางอากาศและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้ พีดีบี เบิลยู เอ็ม อินเวอร์เตอร์ และตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาจำลองระบบรวมกับการทดลอง
2. ค้นคว้าหาหลักการในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และสร้างวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ เพื่อนำมาใช้ป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตู้จำหน่าย
3. ทำการวัด ทดสอบ วิเคราะห์ และ เปรียบเทียบคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิด แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน
2. สามารถใช้เครื่องมือวัดเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนได้อย่างถูกต้อง
3. มีความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนทั้งที่มาตามสายตู้จำหน่าย และ ทางอากาศที่เกิดจากการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
4. สามารถนำวงจรสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบที่สร้างขึ้น ไปใช้เป็นชุดทดลองเพื่อพิจารณาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ได้เรียนรู้วิธีการจำลองระบบด้วยโปรแกรม Pspice แล้วนำผลการจำลองระบบที่ได้ไปเปรียบเทียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง
6. สามารถนำวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบที่ได้นำไปศึกษาและพัฒนาต่อเพื่อใช้งานจริงในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบของการไฟฟ้าฯ
7. สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะการหมุนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์ ส่วนมากในโรงงานอุตสาหกรรมมักจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพราะมีราคาถูกไม่แพงมากนักต้องการการดูแลรักษาน้อย และมีความเร็วเกือบคงที่ คือความเร็วจากสภาวะไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่ จะลดลงเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่ก็มีข้อเสีย [4] คือ

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ตัวประกอบกำลังต่ำและล่าช้า
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมักจะสูงเป็น 5 เท่าหรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด

(ขณะขับโหลดเต็มที่)

#### 2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ส่วนอยู่กับที่ (stator) มีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์มาเจอร์ (armature) ที่บรรจุอยู่ในร่องสล็อต

2. ส่วนที่หมุน (rotor) โรเตอร์แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ

- แบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor) แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนต เซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่า สล็อต (slot) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลาลำนำแผ่นเหล็กเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ นำแกนโรเตอร์ไปวางในพิมพ์เพื่อฉีดลูมิเนียมเหลวอัดแน่นอยู่ในร่องสล็อต และมีกรวยยื่นออกไปสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน

- แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากแบบกรงกระรอก คือ มีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลลิปริง (slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่มีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

### 2.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ ซึ่งจะต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟและมอเตอร์ ดังนั้น อินเวอร์เตอร์ที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้ [4]

1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ

2. สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ ( $v / f$ ) ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ

3. สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดความถี่ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดคงที่ที่ต้องการ โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกออกตามชนิดของอินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter: CSI)
- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter: VSI)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันแบบพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น

### 2.2.1 พีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์

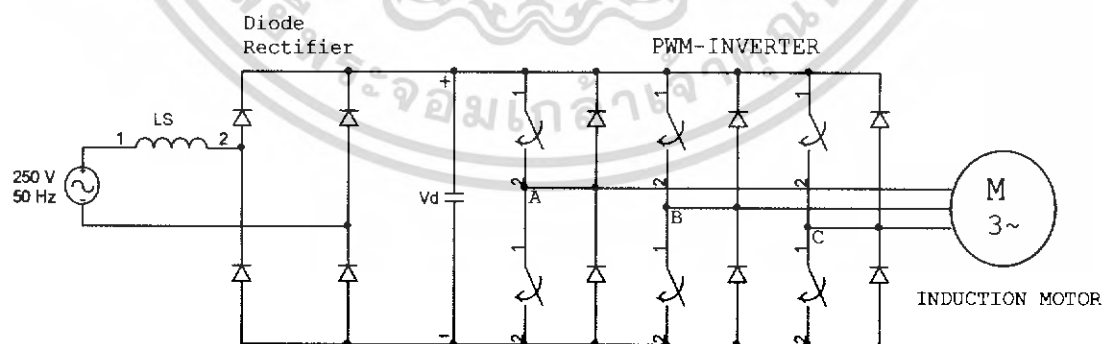
โครงสร้างของแรงดันดีซีลิงค์มีขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่ามากอาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุทของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด และโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

1. แบบสแต็ปอินเวอร์เตอร์
2. แบบพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์

ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันคือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่ายปรับความถี่ได้ในย่านกว้าง

ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันคือ มักมีปัญหาในเรื่องการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิตชิ่งในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ในทางปฏิบัติใช้วงจรลอคเอาท์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (dead time) เป็นส่วนช่วยในการป้องกัน

### 2.2.2 โครงสร้างของพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

จากรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงลักษณะโครงสร้างของพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันโดยรับแรงดันไฟป้อน 1 เฟส จากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าผ่านไดโอดเรกติไฟเออร์ ซึ่งเป็นวงจรสร้างแรงดันดีซี ป้อนให้กับพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์และในส่วนของพี-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนี้ จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทั้งความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หลักการหนึ่งที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ก็คือ จะใช้การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันรูปคลื่นไซน์ 3 เฟส ( $V_{\text{control}}$ ) ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และมีคุณสมบัติที่สามารถปรับแมกนิจูดให้แปรผันไปตามความถี่ได้ด้วย โดยจะนำสัญญาณควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (triangle waveform) ที่มีค่าเท่ากับค่าของความถี่ของการสวิตช์

### 2.3 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งจะกล่าวถึงนิยามของทั้งสองประเภท และอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 2.3.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

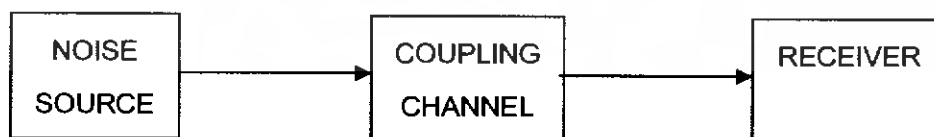
ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ความสามารถของอุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบที่สามารถทำงานอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและต้องไม่เป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกสู่สภาพแวดล้อม ดังนั้นความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า จึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบคือ ความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์ภายในระบบเดียวกันและไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่อุปกรณ์อื่นๆในระบบเดียวกันทนไม่ได้

(2) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอกคือ ความสามารถในการทำงานของระบบทั้งระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยระบบภายนอก และไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่ระบบอื่น ภายนอกไม่สามารถทำงานได้

#### 2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการส่งผ่านสัญญาณรบกวน

### 2.3.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (noise source)

สัญญาณรบกวน (noise source) คือ สัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระหว่างที่อุปกรณ์หรือระบบใด ๆ ทำงานอยู่หรือปนเข้ามา กับสัญญาณที่พึงประสงค์ซึ่งบ่อยครั้งที่สัญญาณรบกวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์หรือระบบเกิดการผิดพลาด ถ้าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่มากเกินไปกว่าอุปกรณ์หรือระบบจะรับได้ ซึ่งสัญญาณรบกวนมีหลายประเภทไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียงสัญญาณไฟฟ้าและอื่น ๆ สำหรับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีทั้งที่เกิดจากสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นได้แก่ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ และที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้แก่ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า, การเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง รวมทั้งการเกิดไฟฟ้าสถิตย์

การศึกษาถึงแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้มีความเข้าใจถึงการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการออกแบบและป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะเน้นไปที่แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายนอกวงจร ได้แก่ เครื่องมือเครื่องใช้ข้างเคียงที่ทำงานใกล้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า หรือ แม้แต่ไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น การป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกวงจรมันบางครั้งอาจจะป้องกันได้ โดยการวางอุปกรณ์ที่ทำงานในย่านความถี่เดียวกันไว้ห่าง ๆ กันแยกวงจรที่ใช้กำลังสูง ออกให้ห่างจากวงจรควบคุมหรือวงจรกำลังต่ำ ใส่วงจรกรองและทำกล่องชิลด์ให้กับวงจรก็จะสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกได้

(2) แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายในวงจร ไม่สามารถหลีกเลี่ยงโดยการวางห่าง ๆ ได้ จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขที่ตัววงจรเอง เพื่อที่จะทำให้วงจรสามารถสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและลดความเสี่ยงต่อการรบกวนกันเอง ซึ่งวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่พบบ่อย ๆ ได้แก่ การชิลด์ตัวนำ (shielding) การต่ออุปกรณ์ลงกราวด์ (grounding) การทำให้วงจรสมดุล (balancing) การกรองสัญญาณ (filtering) การวางตำแหน่งของวงจร (separation and orientation) การควบคุมระดับอิมพีแดนซ์ภายในวงจร (circuit impedance control) การออกแบบสายสัญญาณ (cable design) และเทคนิคการหักล้าง (cancellation techniques)

### 2.3.4 ทางเดินของสัญญาณรบกวน (coupling mode)

การเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหมายถึง วิธีการหรือทางเดินของสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณรบกวนซึ่งการเชื่อมต่อจะสามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ

#### 2.3.4.1 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำ (conducted interference) จะเกิดกับอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ต่ำถึงปานกลาง การรบกวนเกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ในย่านตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30

MHz ผ่านตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ข้างเคียงทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำคือ สัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งมาออกมาทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวนำ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

(1) การสัญญาณรบกวนในโหมดร่วม (Common Mode: CM)

โหมดร่วม คือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากับ กราวด์ของระบบทั้งในส่วนของ line และ neutral โดยจะถือว่าทั้ง line และ neutral ของระบบ ไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไหลลงกราวด์ของระบบโดยผ่านทางตัว เก็บประจุปรสิต (parasitic capacitor) ที่อยู่ระหว่างตัวนำกับกราวด์ของวงจร

(2) การสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง (Differential-Mode: DM)

โหมดผลต่าง คือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้า เฉพาะใน line และ neutral เท่านั้นให้ถือว่าวงจรนี้ไม่มีส่วนใดต่อลงกราวด์

2.3.4.2 การเกิดสัญญาณรบกวนโดยการแผ่กระจาย

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการแผ่กระจาย (radiated interference) เกิดขึ้นใน อุปกรณ์ที่ใช้ความถี่สูง โดยเฉพาะกับอุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจร ซึ่งมาตรฐานของ คณะกรรมาธิการเทคนิคไฟฟ้าระหว่างชาติ (International Electrotechnical Commission: IEC) ได้กำหนดให้วัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการแผ่กระจายโดยเริ่มต้นที่ความถี่ 30 MHz ขึ้นไป จนถึง 1 GHz การป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบนี้สามารถป้องกันได้ โดยการชิลด์ และการใช้เทคนิคอื่น ๆ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการแผ่กระจาย มักจะเกิดการชิลด์สายเคเบิลและสายสัญญาณที่ไม่ดี หรือเกิดจากสายสัญญาณที่เปิดโล่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนแผ่นปริ้นท์บริเวณจุดบัดกรีที่เปิดเผย

จะเห็นว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในย่าน ความถี่สูงซึ่งแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำจะอยู่ในย่าน ความถี่ 150 kHz - 30 MHz และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการแผ่กระจาย จะอยู่ใน ย่านความถี่ 30 MHz - 1 GHz ซึ่งต่างจากสัญญาณรบกวนอื่นเนื่องมาจากฮาร์โมนิค ซึ่งอยู่ ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า

2.3.5 สิ่งที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (receiver on victim)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอาจมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจร อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวน เช่น integrated circuit (IC) และอาจทำให้เกิด การรบกวนต่อตัวรับ เช่น รบกวนการทำงานในเครื่องรับวิทยุ โทรทัศน์ หรือทำให้วงจร อิเล็กทรอนิกส์ไม่ทำงาน โดยเฉพาะในวงจรดิจิทัล ผลจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำ ให้ตัวรับ (victim) ได้รับผลกระทบซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสัญญาณรบกวน

2.3.6 การแก้ปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

มีหลักการดังต่อไปนี้

(1) ลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิด (noise source) โดยทำให้มีการส่งสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาน้อยที่สุด

(2) ทำให้สัญญาณมีคุณภาพมากขึ้น นั่นคือ การลดทอนสัญญาณที่ไม่ต้องการในส่วนของเส้นทางเชื่อมโยง (coupling) โดยสามารถทำได้คือ หากเส้นทางเชื่อมโยงผ่านสายตัวนำ (conducted) จะแก้ปัญหาโดยใช้วงจรกรอง (filter) กรองสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ และถ้าเส้นทางเชื่อมเป็นแบบผ่านทางอากาศ (radiated) การแก้ปัญหาทำได้โดยการใช้วัสดุป้องกัน (shielding) กันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

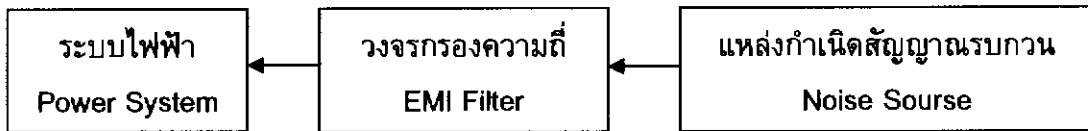
(3) เพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถทนการรบกวนจากสัญญาณรบกวนได้ (increase immunity)

#### 2.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [5]

วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งผลจากการรบกวนทางสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงเข้าไปรบกวนในระบบโดยวงจรกรองคลื่นความถี่สูงไม่ให้ผ่านไปแต่จะยอมให้คลื่นความถี่ต่ำผ่านไปได้ ถ้าเป็นการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำสัญญาณรบกวนความถี่สูงจะอยู่ในย่าน 150 kHz – 30 MHz และถ้าเป็นการส่งผ่านสัญญาณรบกวนทางอากาศสัญญาณความถี่สูงจะอยู่ในย่าน 30 MHz – 1GHz ซึ่งเราจะใช้วงจรกรองความถี่จากผลของสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็ก เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่ส่งผ่านทางสายตัวนำ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความแตกต่างจากวงจรกรองความถี่ต่ำชนิดอื่นๆ เช่น ในวงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิก ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเหมือนกันแต่จะมีค่าของ cut – off frequency ที่ความถี่หลักมูลขึ้นไปคือ จะกรองคลื่นความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของคลื่นความถี่หลักมูล หรือเรียกว่าเป็นลำดับของฮาร์โมนิก และยอมให้คลื่นความถี่หลักมูลผ่านไปได้ เช่น ถ้าคลื่นความถี่หลักมูลมีค่าเท่ากับ 50 Hz วงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกก็จะกรองคลื่นความถี่ที่เป็นลำดับของฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ เช่น ลำดับของฮาร์โมนิกที่ 3 จะมีความถี่เท่ากับ 3 เท่าของของคลื่นความถี่หลักมูลคือ 150 Hz ลำดับของฮาร์โมนิกที่ 5 จะมีความถี่เท่ากับ 5 เท่าของคลื่นความถี่หลักมูลคือ 250 Hz แต่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำงานในย่านความถี่ที่สูงคือ มีค่า cut – off frequency ที่สูงกว่าวงจรกรองผลจากการรบกวนของฮาร์โมนิกเพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่อยู่ในย่าน 150 kHz – 30 MHz

วงจรกรองความถี่จากผลสัญญาณรบกวนของสัญญาณทางแม่เหล็ก จะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็ก เช่น switching mode power supply, converter, inverter ไม่ให้ไปรบกวนแหล่งกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะทั่วไปในการป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย EMI Filter

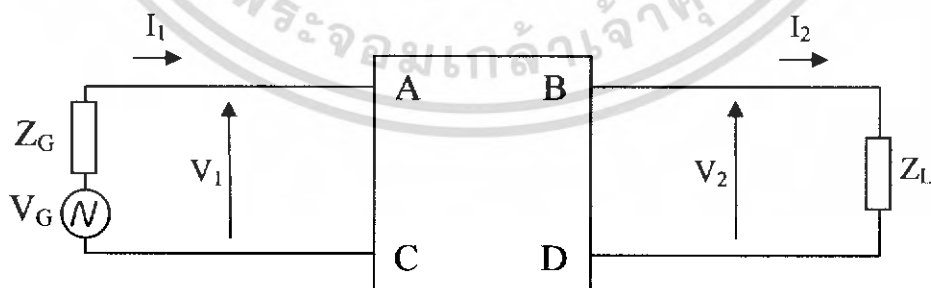
## 2.5 Insertion loss

ประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถอธิบายได้โดยค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ insertion loss, อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance) และอิมพีแดนซ์ด้านออก (output impedance) โดยค่า insertion loss เป็นสมการแสดงถึงประสิทธิภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถนิยามโดยสมการ [5]

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_1$  = พิกัดแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายแรงดันที่ไม่มีวงจรกรองต่ออยู่  
 $V_2$  = พิกัดแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายแรงดันที่มีวงจรกรองต่ออยู่โดยวัดที่จุดขาออกของวงจรกรอง

ซึ่งค่า insertion loss ของวงจรกรองสามารถคำนวณได้อีกรูปแบบหนึ่ง โดยการใช้เมตริกซ์ในรูปแบบของ A, B, C, D พารามิเตอร์ เมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย  $Z_G$  และอิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้าต่อตั้งรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรกรองแบบ 4 ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรานิยามค่าของ insertion loss ได้ดังนี้

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{AZ_L BCZ_G Z_L + DZ_G}{Z_G + Z_L} \right| \quad (2.2)$$

## 2.6 ผลของความไม่เท่ากันของอิมพีแดนซ์ (Impedance Mismatch Effect)

วงจรกรองโดยปกติแล้วจะถูกออกแบบให้ปฏิบัติงานที่อิมพีแดนซ์ขาเข้าและอิมพีแดนซ์ขาออกของวงจรที่มีค่าเฉพาะเจาะจง เมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายของภาระทางไฟฟ้าต่างไปจากที่ได้ออกแบบไว้จะทำให้ผลตอบสนองที่ได้ออกมาเปลี่ยนแปลงไป ผลของความไม่เท่ากันของอิมพีแดนซ์จะทำให้ระดับของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น ผลของการไม่เท่ากันของอิมพีแดนซ์สามารถประมาณว่าอิมพีแดนซ์  $Z_G$  และ  $Z_L$  เป็นตัวต้านทานทำให้พลังงานสูงสุด ( $P_{max}$ ) ที่ส่งผ่านไปยังภาระทางไฟฟ้า โดยปราศจากวงจรกรองคือ

$$P_{max} = \frac{|V_G|^2}{4R_G} \quad \text{เมื่อ } Z_L = R_O = R_G \quad (2.3)$$

พลังงานที่ส่งผ่านไปยังภาระทางไฟฟ้าเมื่อมีการต่อวงจรกรองระหว่างภาระทางไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้า จะได้

$$P_{max} = \frac{|V_G|^2}{R_O} \quad (2.4)$$

ดังนั้นค่า insertion loss ของวงจรจะได้เท่ากับ

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_O}{R_G}} \frac{V_G}{V_L} \right] \quad (2.5)$$

ภายใต้เงื่อนไขของ  $R_O = R_G$  ค่าของ insertion loss จะได้เป็น

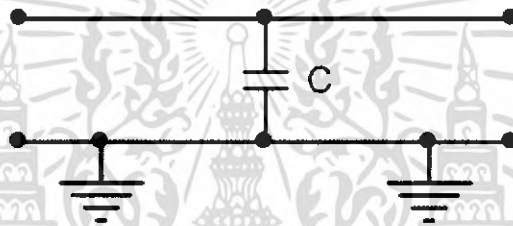
$$IL = \alpha_O = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_G}{V_L}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2.6)$$

## 2.7 องค์ประกอบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ( Lumped Element Low-Pass filter )

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกออกแบบเพื่อลดทอนพลังงานย่านความถี่สูงที่ไม่ต้องการ ในขณะที่ยอมให้พลังงานที่ย่านความถี่อื่น ๆ ผ่านไปได้โดยไม่เปลี่ยนแปลง วงจรกรองแบบสะท้อนพลังงานได้ใช้หลักการนี้โดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมที่มีค่าสูงหรืออิมพีแดนซ์ที่ต่อแบบขนานมีค่าต่ำ เพื่อรบกวนผลการทำงานของกระแส

### 2.7.1 วงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor filter)

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวงจรกรองแบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ระหว่างตัวนำซึ่งมีสัญญาณรบกวนประกอบอยู่และมีสายตัวนำลงดินดังรูป ที่ 2.5 (ก) ตัวเก็บประจุจะกรองพลังงานที่ความถี่สูงออกไป และจะยอมจะยอมให้สัญญาณที่ความถี่ต่ำที่ต้องการผ่านไป



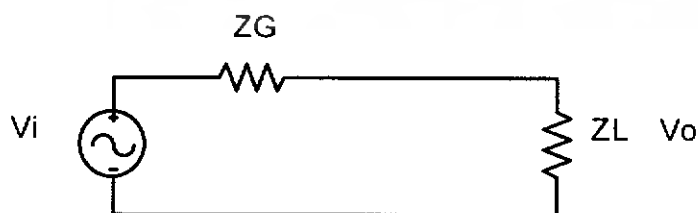
รูปที่ 2.5 (ก) วงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ

การหาความสามารถของวงจรในการลดทอนสัญญาณรบกวนว่ามีประสิทธิภาพเพียงใดสามารถหาได้จากสูตรดังต่อไปนี้ [2]

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $V_1$  = แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทขณะไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

$V_2$  = แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทขณะใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



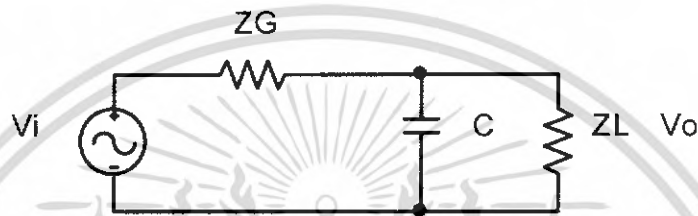
รูปที่ 2.5 (ข) วงจรขณะยังไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 (ข) จะสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต (voltage transfer) ขณะที่ไม่ได้ใส่ตัวเก็บประจุรอสัญญาณรบกวนได้เท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} \quad (2.8)$$

หาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต (voltage transfer) ขณะที่ใส่ตัวเก็บประจุรอสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ค)



รูปที่ 2.5 (ค) วงจรขณะได้ทำการต่อวงจรรอสัญญาณโดยใช้ตัวเก็บประจุ

กำหนดให้  $Z_C = \frac{1}{j\omega \cdot C}$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} \quad (2.9)$$

$$Z_L // Z_C = \frac{Z_L \times Z_C}{Z_L + Z_C}$$

$$Z_L // Z_C = \frac{Z_C}{1 + j\omega \cdot C \times Z_L}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_C}{1 + j\omega \cdot C \times Z_L} \times \frac{1}{Z_G + \frac{Z_L}{1 + j\omega \cdot C \times Z_L}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L + j\omega \cdot C \times Z_G \times Z_L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{V_o}{V_i} \right]$$

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} \times \frac{Z_G + Z_L + j\omega \cdot C \times Z_G \times Z_L}{Z_L} \right]$$

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ 1 + \frac{j\omega \cdot C \times Z_G \times Z_L}{Z_G \times Z_L} \right] \quad (2.10)$$

กำหนดให้  $Z_P = Z_L // Z_C = \frac{Z_L \times Z_C}{Z_L + Z_C}$

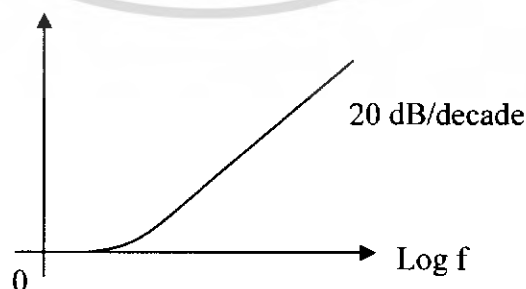
$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ 1 + \frac{Z_P}{Z_C} \right] \quad (2.11)$$

จะเห็นได้ว่า ถ้าค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (capacitive reactance) มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาขนานกัน ก็จะทำให้ตัวเก็บประจุมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง

$$Z_C \ll Z_P \quad (2.12)$$

ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อด้วยคาปาซิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ

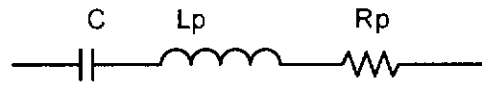
Insertion loss (dB)



### รูปที่ 2.5 (ง) ค่า insertion loss ของวงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติแล้วตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยทั้งค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำต่ออนุกรม แสดงวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.5 (จ) [3]



รูปที่ 2.5 (จ)  $R_p$  = parasitic resistance

$L_p$  = parasitic inductance

ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเหนี่ยวนำของแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ ความเหนี่ยวนำของขาของตัวเก็บประจุ ความต้านทานรวมของแผ่นตัวนำและค่าความต้านทานต่อขานานที่เกิดขึ้นที่แผ่นตัวนำ ผลเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บประจุแต่ละชนิด จากสาเหตุเหล่านี้เอง ทำให้เกิดผลของความถี่เรโซแนนซ์คือ วงจรกรองจะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุเมื่ออยู่ในสภาวะก่อนถึงความถี่เรโซแนนซ์ และเมื่อผ่านความถี่เรโซแนนซ์ไปแล้ว ตัวเก็บประจุนี้ จะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ คุณสมบัติของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆก็นำมาใช้เป็นวงจรกรองสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ตัวเก็บประจุแบบเมทาไลซ์ (metalized paper capacitor) มีขนาดเล็กแต่จะมีประสิทธิภาพต่ำในย่านความถี่วิทยุ เนื่องจากมีความต้านทานระหว่างจุดต่อสูง และผลของความเหนี่ยวนำจากนำของแผ่นฟิล์มโลหะ โดยส่วนมากจะใช้งานได้ถึงที่ย่านความถี่ 20 MHz

- ตัวเก็บประจุไมกาและแบบเซรามิก เป็นตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็ก และจะใช้งานได้ถึงที่ย่านความถี่ประมาณ 200 MHz ตัวเก็บประจุชนิดนี้ก็ยังคงประสิทธิภาพที่ย่านความถี่สูง ส่วนข้อเสียของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือตัวเก็บประจุได้รับผลกระทบจาก แรงดันขณะใช้งาน กระแสความถี่และอุณหภูมิ สภาพแวดล้อม เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงมาก ๆ ตัวเก็บประจุจะมีขนาดเล็กลง

- feed-through capacitor เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้งานในย่านความถี่สูง เนื่องจากตัวเก็บประจุมีความถี่เรโซแนนซ์สูงถึง 1 GHz feed-through capacitor เป็นตัวเก็บประจุแบบ 3 ขั้ว และออกแบบเพื่อลดผลของตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากความยาวของตัวนำ

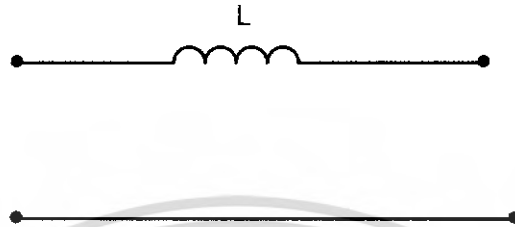
- ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลติก (electrolytic capacitor) มักจะใช้สำหรับเป็นวงจรกรองที่ใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นอุปกรณ์ที่มีขั้วเดียวและค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่จะทำให้กรองความถี่ย่านความถี่วิทยุได้ไม่ต้องใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำ และมีองค์ประกอบการสูญเสียมาก

- ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัมจะถูกนำมาใช้ เมื่อต้องการความจุที่มีค่ามากในวงจร ที่มีพื้นที่เล็ก ๆ ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะตอบสนองต่อแรงดันเกินได้อย่างรวดเร็ว และหากต่อกลับขั้วตัวเก็บประจุจะเสียหายและมีคุณสมบัติต่ำที่ย่านความถี่สูงซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างและค่าของความจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.2 วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ (inductive filter)

วงจรกรองแบบนี้ ตัวเหนี่ยวนำจะถูกต่ออนุกรมกับตัวนำที่ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.6 (ก)



รูปที่ 2.6 (ก) วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ

หาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในกรณียังไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวเหนี่ยวนำ เหมือนกับในกรณีใช้ตัวเก็บประจุ ดังนั้นจะได้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} \quad (2.13)$$

หาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในกรณีใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวเหนี่ยวนำ หากค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต (voltage transfer) ขณะที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ กรองสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.6 (ข) วงจรขณะได้ทำการต่อวงจรกรองสัญญาณโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ

$$\frac{V_{ind}}{V_i} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L + j\omega \cdot L \times Z_G \times Z_L} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{\frac{V_o}{V_i}}{\frac{V_{ind}}{V_i}} \right]$$

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} \times \frac{Z_G + Z_L + j\omega \cdot L}{Z_L} \right]$$

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{Z_G + Z_L + j\omega \cdot L}{Z_G + Z_L} \right]$$

$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ 1 + \frac{j\omega \cdot L}{Z_G + Z_L} \right]$$

กำหนดให้  $Z_{sum} = Z_G + Z_L$  และ  $Z_{ind} = j\omega \cdot L$

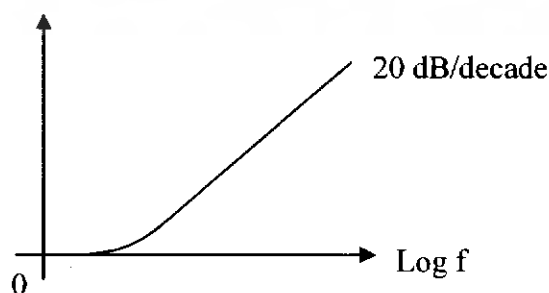
$$IL(dB) = 20 \log_{10} \left[ 1 + \frac{Z_{ind}}{Z_{sum}} \right] \quad (2.15)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า ถ้าค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่ออนุกรมรวมกัน ก็จะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง

$$Z_{ind} \gg Z_{sum} \quad (2.16)$$

ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อด้วยอินดักเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ

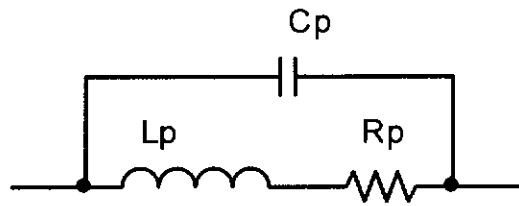
Insertion loss (dB)



รูปที่ 2.6 (ค) ค่า insertion loss ของวงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติแล้วตัวเหนี่ยวนำ จะประกอบด้วยตัวต้านทานต่ออนุกรมและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดภายใน แสดงวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.6 (ง) [3]



รูปที่ 2.6 (ง)  $C_p$  = parasitic capacitance,  $R_p$  = parasitic resistance

ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวเหนี่ยวนำจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ของตัวอุปกรณ์เอง

ตัวเหนี่ยวนำจะแสดงค่าความเหนี่ยวนำเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์และหากอยู่ในสภาวะที่มีความถี่มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์แล้วตัวเหนี่ยวนำจะแสดงค่าของความจุที่มีอิมพีแดนซ์ลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำธรรมดาไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวงจรกรองที่ความถี่สูง

วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำ จะมีทั้งแบบแกนอากาศ แกนพาวเดอร์ไอรอน และแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะมีค่าเปอร์มิติวิตีสูงทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทั้งอิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้าและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องมีค่าต่ำและค่ารีแอคแตนซ์ที่แน่นอนของตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง สิ่งที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบคือต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ที่แน่นอนของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้าที่รับสัญญาณรบกวน

ความเหมาะสมของการนำวงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำไปใช้งาน

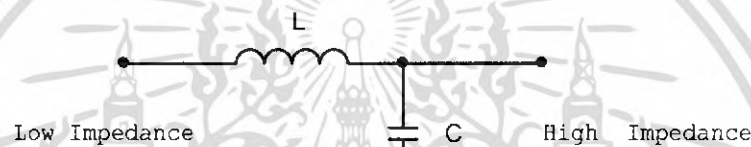
วงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อนำไปใช้กับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าสูงและประสิทธิภาพต่ำสุดเมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและโหลดมีค่าต่ำมาก วงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อนำไปใช้กับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและโหลดมีค่าต่ำมาก และค่าความเหนี่ยวนำต้องมีค่าสูงด้วย และมีประสิทธิภาพต่ำสุดเมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและโหลดมีค่าสูง เพื่อที่จะออกแบบวงจรกรองให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานแล้วมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและอิมพีแดนซ์ของโหลดที่เป็นตัวรับสัญญาณรบกวนนั้น วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ ถือว่าเป็นวงจรกรองที่มีเพียงส่วนประกอบเดียว และมีข้อเสียคือมีประสิทธิภาพในการกรองต่ำ (6dB/octave หรือ 20dB/decade) และไม่สามารถแก้ปัญหาได้เมื่อนำไปใช้งานกับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าสูงแต่อิมพีแดนซ์

ของโหลดมีค่าสูงหรือเมื่อนำไปใช้งานกับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าสูงแต่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าต่ำ

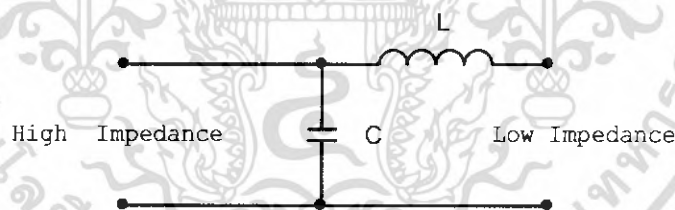
เมื่อเราแก้ไขปัญหโดยนำตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมาต่อร่วมกัน เช่น การต่อร่วมกันแบบ LC ประสิทธิภาพในการกรองจะเพิ่มเป็น(12dB/octave หรือ40dB/decade) วงจรกรองแบบนี้สามารถนำมาแก้ไขในเรื่องของความไม่เท่ากันระหว่างอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายโหลดได้

## 2.8 วงจรกรองแบบ LC (LC filter )

ค่าประสิทธิภาพของการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองแบบ LC แสดงดังรูปที่ 2.7 (ค) ถ้าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าเท่ากันแล้วค่า insertion loss จะไม่ขึ้นอยู่กับ การวางตัวของตัวเก็บประจุในวงจร แต่เมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าไม่เท่ากันแล้วค่า insertion loss จะมีค่าสูงสุดเมื่อตัวเก็บประจุต่อขนานกับด้านที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.7

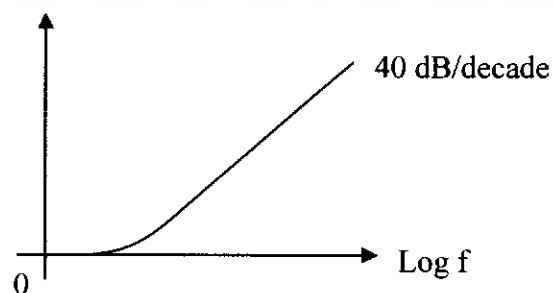


รูปที่ 2.7 (ก) วงจรกรองแบบ LC สำหรับแหล่งจ่ายที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำและโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์สูง



รูปที่ 2.7 (ข) วงจรกรองแบบ LC สำหรับแหล่งจ่ายที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

Insertion loss (dB)



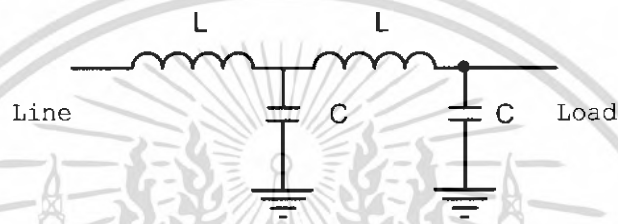
รูปที่ 2.7 (ค) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ LC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของค่า insertion loss ของวงจรกรองแบบ LC เมื่ออยู่ในสภาวะความถี่สูงจะมีประสิทธิภาพในการกรองได้ดีกว่าวงจรที่ใช้เพียงตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว อย่างไรก็ตามวงจรกรองแบบ LC จะมีความถี่เรโซแนนซ์คือ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.17)$$

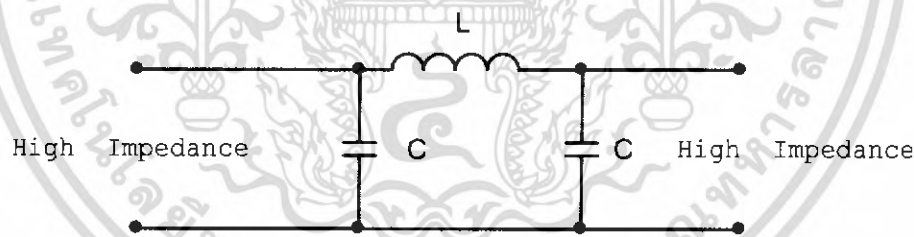
วงจรกรองแบบ LC อาจจะมีปัญหาในการลดทอนที่ความถี่สูงเนื่องจากค่าตัวเก็บประจุแฝง ซึ่งจะเกิดการเรโซแนนซ์และออสซิลเลต เมื่อสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วงทรานเซียนท์



รูปที่ 2.8 การต่อวงจรกรองแบบ LC ร่วมกัน

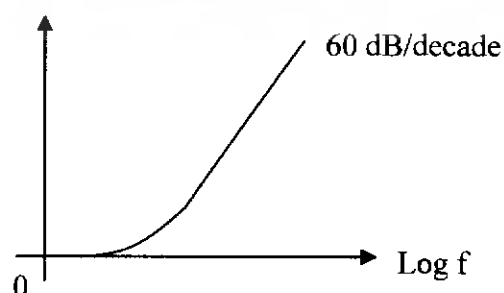
## 2.9 วงจรกรองแบบ (Pi filter)

โครงสร้างของวงจรกรองแบบ Pi ได้แสดงไว้ในรูป 2.9 (ก) ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้กันทั่วไป ดังรูป



รูปที่ 2.9 (ก) วงจรกรองแบบ Pi

Insertion loss (dB)

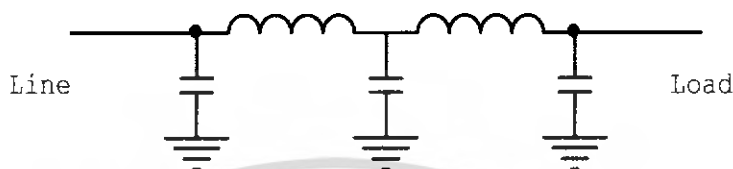


รูปที่ 2.9 (ข) ค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ Pi

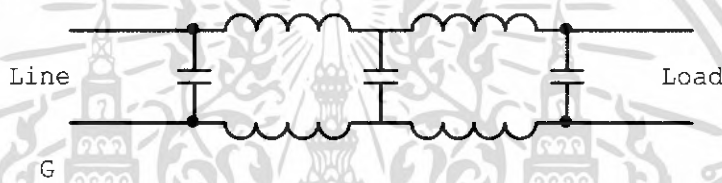
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะกราฟดังรูป 2.9 (ข) ค่าของวงจรกรองแบบ Pi จะมีค่าสูงกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งค่า Insertion loss ของวงจรกรองแบบ Pi จะมีความชันประมาณ 60 dB/decade

วงจรกรองแบบ Pi จะมีประสิทธิภาพต่ำสำหรับสัญญาณรบกวนอยู่ในสถานะทรานเซียนท์ วงจรกรองแบบ Pi จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการกรองโดยการชิลด์วงจรกรองด้วยกล่องโลหะ วงจรกรองแบบ Pi จะถูกนำมาใช้เมื่อต้องการลดทอนความถี่สูงเป็นความถี่ต่ำมากๆ



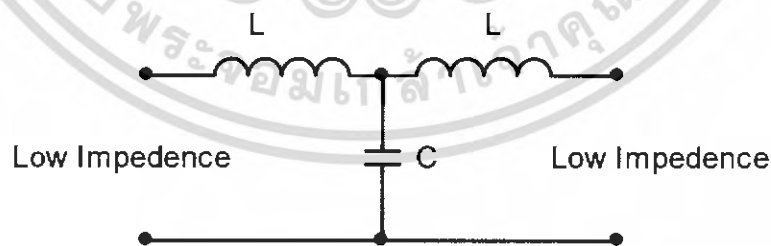
รูปที่ 2.10 การต่อวงจรแบบ Pi ร่วมกัน



รูปที่ 2.11 การต่อวงจรแบบ Pi ร่วมกันแบบสมดุลง

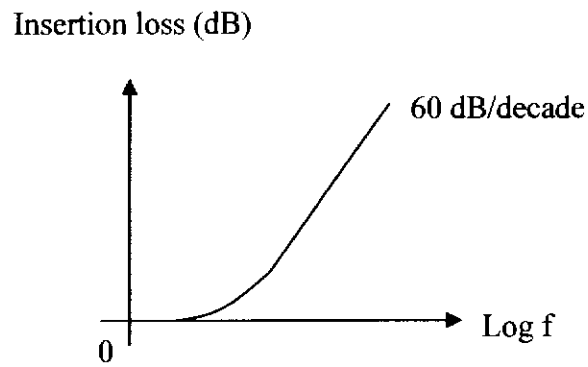
## 2.10 วงจรกรองแบบ T (T filter)

โครงสร้างของวงจรกรองแบบแสดงดังรูปที่ 2.12(ก) วงจรกรองแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนในสถานะทรานเซียนท์



รูปที่ 2.12 (ก) วงจรกรองแบบ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 (ข) ค่า insertion loss ของวงจรรองแบบ T

ลักษณะของค่า insertion loss ของวงจรรองแบบ T ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ข) วงจรรองแบบ T หนึ่งวงจรจะมีค่า insertion loss เท่ากันกับวงจรรองแบบ Pi คือ 60 dB/decade หรือ 18dB/octave

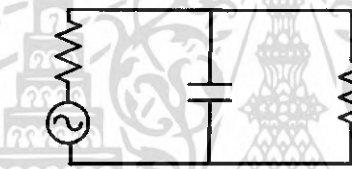
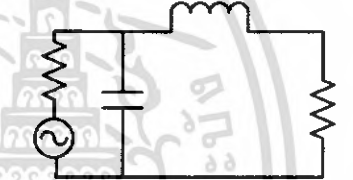
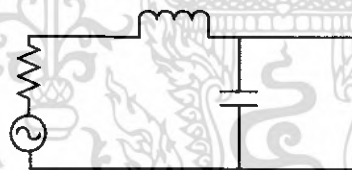
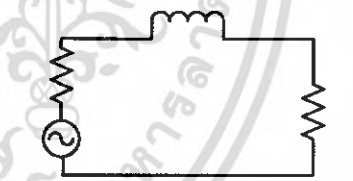
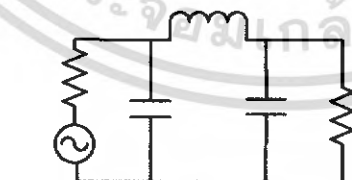
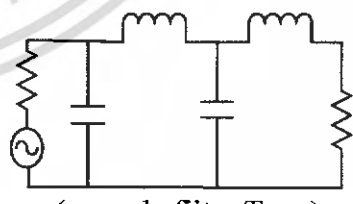
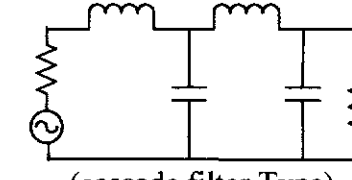
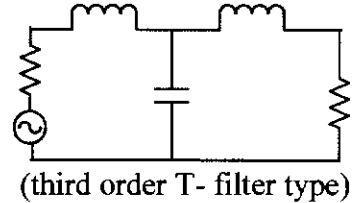


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 สรุป

จากคำอธิบายข้างต้นสามารถทำให้ตัดสินใจได้ถึงว่าจะสามารถเลือกวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบใดเพื่อประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ

ถ้าหากทราบว่าวงจรกรองจะถูกนำไปใช้ต่อกับอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำทั้งสองด้านคือทั้งด้านแหล่งจ่ายและด้านโหลดเราสามารถเลือกวงจรกรองแบบ T ไปใช้งานได้เนื่องจากทั้งสองด้านจะต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ ในทางตรงกันข้ามหากวงจรกรองถูกต่ออยู่ระหว่างอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงทั้งสองด้านเราสามารถเลือกวงจรกรองแบบ Pi ไปใช้งานได้ และถ้าหากอิมพีแดนซ์ทั้งสองด้านมีค่าต่างกันมากแล้วเราสามารถเลือกวงจรกรองแบบ LC ไปใช้งานได้โดยด้านที่มีตัวเหนี่ยวนำจะต่อกับด้านที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำส่วนด้านที่มีตัวเก็บประจุจะต่อกับด้านที่มีอิมพีแดนซ์สูงซึ่งในแต่ละวงจรจะมีผลตอบสนองต่อความถี่แตกต่างกันไป สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

$Z_L$ \ $Z_S$	High	Low
High	 <p>(first order capacitor filter type)</p>	 <p>(second order L-filter type)</p>
Low	 <p>(second order L- filter type)</p>	 <p>(first order inductor filter type)</p>
High	 <p>(third order <math>\pi</math> - filter type)</p>	 <p>(cascade filter Type)</p>
Low	 <p>(cascade filter Type)</p>	 <p>(third order T- filter type)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

### 3.1 การออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ใน EMI filter

สิ่งสำคัญที่จำเป็นในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบในโหมดผลต่าง และส่วนประกอบในโหมดผลรวม การเลือกใช้ อุปกรณ์ต่าง ๆ ใน EMI filter มีความสำคัญมาก เนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีผลต่อการเกิด สัญญาณรบกวนในตัวเองด้วย

#### 3.1.1 การออกแบบส่วนประกอบในโหมดผลต่าง

วงจรกรองสัญญาณรบกวนต้องเสมือนทำให้ระบบมองโปร่งใส เพื่อที่จะทำให้สัญญาณ ที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณรบกวนไม่ให้เกิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากผลของวงจรกรองสัญญาณรบกวน เอง สำหรับตัวเหนี่ยวนำในโหมดผลต่างจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง โดย การดูดซับพลังงานและตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมอยู่หรือที่เรียกว่าค่า  $C_x$  จะทำหน้าที่เป็นทางผ่าน ของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไปสู่นิวทรัลเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย หรือจากทางด้านตรงข้าม

#### อิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากทฤษฎีการส่งถ่ายพลังงานสูงสุด จะต้องทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้าถูกส่ง ถ่ายไปยังฝั่งด้านเข้าของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งโดยปกติแล้วในทาง ปฏิบัติค่าอิมพีแดนซ์ของทางด้านภาระทางไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ตลอดค่าความถี่ ในการออกแบบ วงจรกรองสัญญาณรบกวน ถ้าจุด cut-off frequency ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำและ เกิดการกรองสัญญาณที่ฮาร์โมนิระดับต่ำ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ ที่ทำหน้าที่ส่วนประกอบ ของโหมดผลต่างมีขนาดสูงและเกิดความร้อนขึ้นในตัวอุปกรณ์ อันเนื่องมาจากค่าความ ด้านทานภายในและค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนกรณี ระบบไฟฟ้ากระแสสลับจะ สามารถพิจารณาได้จากสมการ(3.1) [1]

$$R_d = \frac{V_{min,rms}}{I_{max,rms}} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$R_d$	คือ	ค่าความต้านทานต่ำสุดหรือโหลดสูงสุดที่ใช้งาน
	$V_{min,rms}$	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ใช้งาน
	$I_{max,rms}$	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การออกแบบส่วนประกอบในโหมดผลรวม

ในการออกแบบโหมดผลต่างมีการคำนึงถึงค่าความถี่ที่ทำการออกแบบแต่สำหรับการออกแบบในโหมดผลรวม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงมาก คือ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด ไซค์ ความเหนี่ยวนำที่ทำการออกแบบต้องมีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลน้อย เพื่อไม่ให้เกิดการอิมิตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขณะที่รับภาระไฟฟ้าที่พิกัด ส่วนประกอบวงจรกรองโหมดรวมจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ระหว่างสายตัวนำ สายนิวทรัลและสายกราวด์ หรือ ที่เรียกว่าตัวเก็บประจุ  $C_v$  ตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด ตัวเก็บประจุ  $C_v$  จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณรบกวนลงสู่ระบบกราวด์ ตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมดไซค์จะทำให้เกิดการหักล้างระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กในโหมดผลต่างทำให้สภาวะที่ทำงาน แกนเหล็กจะไม่เกิดการอิมิตัว ส่วนประกอบในโหมดรวมจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อมีค่า cut-off frequency ต่ำลง ถ้าการออกแบบตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมดไซค์ไม่สมดุลทั้งสองด้านจะมีผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่างอิมพีแดนซ์ที่ทำการออกแบบสำหรับโหมดรวมจะมีขนาดสูงกว่าในโหมดผลต่างจากข้อมูลจะได้สมการสำหรับการออกแบบค่าอุปกรณ์ในโหมดผลรวมดังสมการ(3.2) [1]

การหาค่าความถี่คัทออฟของวงจรกรอง ( $F_0$ )

$$F_0 = \frac{F}{2^X} = \frac{F}{2^{\frac{dB}{L}}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $F$  คือ ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการกำจัด

$dB$  คือ ค่าการลดทอนที่ต้องการ ณ ความถี่ที่ต้องการกำจัด

$L$  คือ ค่าความสูญเสีย (loss) หรือ ค่าการอัตราลดทอน ในหน่วย dB/decade ของวงจรกรอง

การคำนวณหาค่า ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

$$L = \frac{R_d}{\pi F_0} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{\pi F_0 R_d} \quad (3.4)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำคอมมอนโหมดใช้ค  
 $C$  คือ ค่าตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างกราวด์และตัวนำ  
 $R_d$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ในการออกแบบ  
 $F_0$  คือ cut-off frequency

ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้ใช้เป็นค่าคอมมอนโหมดและค่าตัวเก็บประจุจะเป็นค่าตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ และสายตัวนำจะถูกกำหนดด้วยค่ามาตรฐานทางความปลอดภัยของปริมาณกระแสรั่วไหล ที่เกิดขึ้นระหว่างระบบตัวระบบตัวนำ และระบบกราวด์ดังตารางที่ 3.1 ค่าตัวนำที่ได้เมื่อนำมาหารด้วยค่ามาตรฐานและนำผลหารมาคูณกับค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ จะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่นำไปใช้จริงในวงจรกรองสัญญาณรบกวน [5]

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานความปลอดภัยของปริมาณกระแสรั่วไหลระหว่างสายตัวนำและกราวด์

Standard	Limit specification	
MIL-STD 461	Leakage current	$\leq 3.5 \text{ mA}$
	Capacitor	$\leq 0.1 \mu\text{F}$ for 60 Hz
		$0.02 \mu\text{F}$ for 400 Hz
Underwrit 's Laboratories (UL)	Leakage current	$\leq 5\text{mA}$
IEC 360	Leakage current	$\leq 3.5 \text{ mA}$ for equipment housed in a grounded metal case (Class I)
		$\leq 0.75 \text{ mA}$ for Class-I portaple (< 18 kg) equipment
		$\leq 0.75 \text{ mA}$ for double-insulated equipment (Class-II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด (common mode choke)

สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด choke คือ การเลือกแกนเหล็กและการพันขดลวด แกนที่นำมาใช้ต้องเป็นแกนที่นำมาใช้ต้องเป็นแกนที่ให้ค่าความเหนี่ยวนำสูง เพื่อให้สามารถรองรับกระแสผลรวมที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการออกแบบให้มีขนาดเล็กลงได้หลักการการทำงานของตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด choke โดยการทำให้ผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิด (H-field) อันเนื่องมาจากกระแสไหลผลต่างทั้งสองข้างของแกนหักล้างกันพอดีทำให้ไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวภายในแกนเหล็กการสร้างตัวเหนี่ยวนำคอมมอนโหมด choke สามารถสร้างได้โดยการพันขดลวดซึ่งทำให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากผลของโหมดรวมมีค่าเสริมกันการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำต้องทำการพันอย่างระมัดระวังเพื่อลดการเกิดค่าตัวเก็บประจุระหว่างขดแต่ละขดและให้ค่าแรงดันที่เกิดระหว่างขดมีค่าน้อยที่สุด การพันขดลวดประมาณ 3/4 หรือ 7/8 ของเส้นรอบวงของแกนทอรอยด์จะใช้งานได้ดีสำหรับงานที่พิกัดกระแสต่ำ สำหรับงานที่ต้องการพิกัดกระแสสูงต้องมีการเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดและต้องมีการพันหลายชั้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดมีขนาดเพิ่มขึ้นและค่าความถี่กำทอนของตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำลง

### 3.1.4 การเลือกแกน

แกนที่เหมาะสมในการใช้งานที่ย่านความถี่สูงได้แก่แกนเฟอร์ไรต์ (ferrite core) เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำในแกนอากาศมาก จุดอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กสูงประมาณในช่วง 3,000-4,000 เกาส์ ค่าการสูญเสีย (core loss) ในแกนมีค่าต่ำ สำหรับแกนเฟอร์ไรต์เหมาะจะใช้งานในย่านอุณหภูมิ -55 °C ถึง 140 °C สำหรับการใช้งานในลักษณะงานวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะเลือกใช้แกนในแบบวงแหวนเพื่อสร้างตัวเหนี่ยวนำสองตัวร่วมแกนเดียวกันสามารถจะคำนวณเพื่อเลือกใช้แกนได้ดังสมการ(3.5) [5]

$$L = A_L N^2 \quad (3.5)$$

เมื่อพิจารณาจากสูตรเมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้ในวงจรกรองสามารถแทนค่าและได้  $A_L$  และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลแกนจากผู้ผลิตและเลือกใช้แกนที่เหมาะสม การเลือกใช้ขดลวดที่จะมาทำการพันตัวเหนี่ยวนำสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ คือ ขนาดกระแสที่วงจรกรองรับและขนาดหน้าตัดของแกนสำหรับพันลวดได้สูงสุด

3.1.5 การพิจารณาถึงชนิดและย่านความถี่ของตัวเก็บประจุที่ใช้งาน คุณสมบัติของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ สรุปดังตารางต่อไปนี้ [3]

ตารางที่ 3.2 พิกัดและชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้โดยทั่วไป

ชนิด	ความจุไฟฟ้า	พิกัดแรงดัน	การประยุกต์ใช้งาน	ย่านความถี่
เซรามิก (Ceramic)	10 pF – 1 $\mu$ F	50 V – 30 kV	ราคาไม่แพงและใช้กับงาน ทั่วไป	500 Hz – 500 MHz
สองชั้น (Double layer)	0.1 – 1 F	1.5 – 6 V	สำรองสำหรับหน่วยเก็บความจำ Memory backup	ต่ำกว่า 1 kHz
อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic)	0.1 $\mu$ F – 1.6 F	3 – 600 V	วงจรกรองแหล่งจ่ายกำลัง สวิตซิ่ง	ต่ำกว่า 1 kHz
แก้ว (Glass)	10 – 1000 pF	100 – 600 V	วงจรความถี่สูง	1 kHz – 5 GHz
ไมกา (Mica)	1 pF – 0.01 $\mu$ F	100 – 600 V	วงจรความถี่สูง	1 kHz – 5 GHz
ไมลาร์ (Mylar)	1 nF – 50 $\mu$ F	50 – 600 V	ราคาไม่แพงและใช้กับงาน ทั่วไป	500 Hz – 500 MHz
น้ำมัน (Oil)	0.1 – 20 $\mu$ F	200 V – 10 kV	วงจรกรองแรงดันสูง	ต่ำกว่า 1 kHz
โพลีคาร์บอเนต Polycarbonate	100 pF – 30 $\mu$ F	50 – 800 V	คุณภาพสูงและขนาดเล็ก กะทัดรัด	dc – 1000 MHz
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	100 pF – 50 $\mu$ F	100 – 800 V	คุณภาพสูงและ dielectric absorption มีค่าต่ำ	dc – 1000 MHz
โพลีสไทรีน (Polystyrene)	10 pF – 2.7 $\mu$ F	100 – 600 V	วงจรกรองสัญญาณขนาดเล็กมี คุณภาพ สูง และขนาดใหญ่	dc – 1000 MHz
เปอร์ซีเลน (Porcelain)	100 pF – 0.1 $\mu$ F	50 – 400 V	ใช้งานได้นาน	500 Hz – 500 MHz
แทนทาลัม (Tantalum)	0.1 – 500 $\mu$ F	6 – 100 V	ความจุไฟฟ้าสูง	ต่ำกว่า 1 kHz
เทฟลอน (Teflon)	1 nF – 2 $\mu$ F	50 – 200 V	คุณภาพสูงและ dielectric absorption มีค่าต่ำ	dc – 1000 MHz
สุญญากาศ(Vacuum)	1 – 5000 $\mu$ F	2 – 36 kV	เครื่องส่งสัญญาณ	500 Hz – 500 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

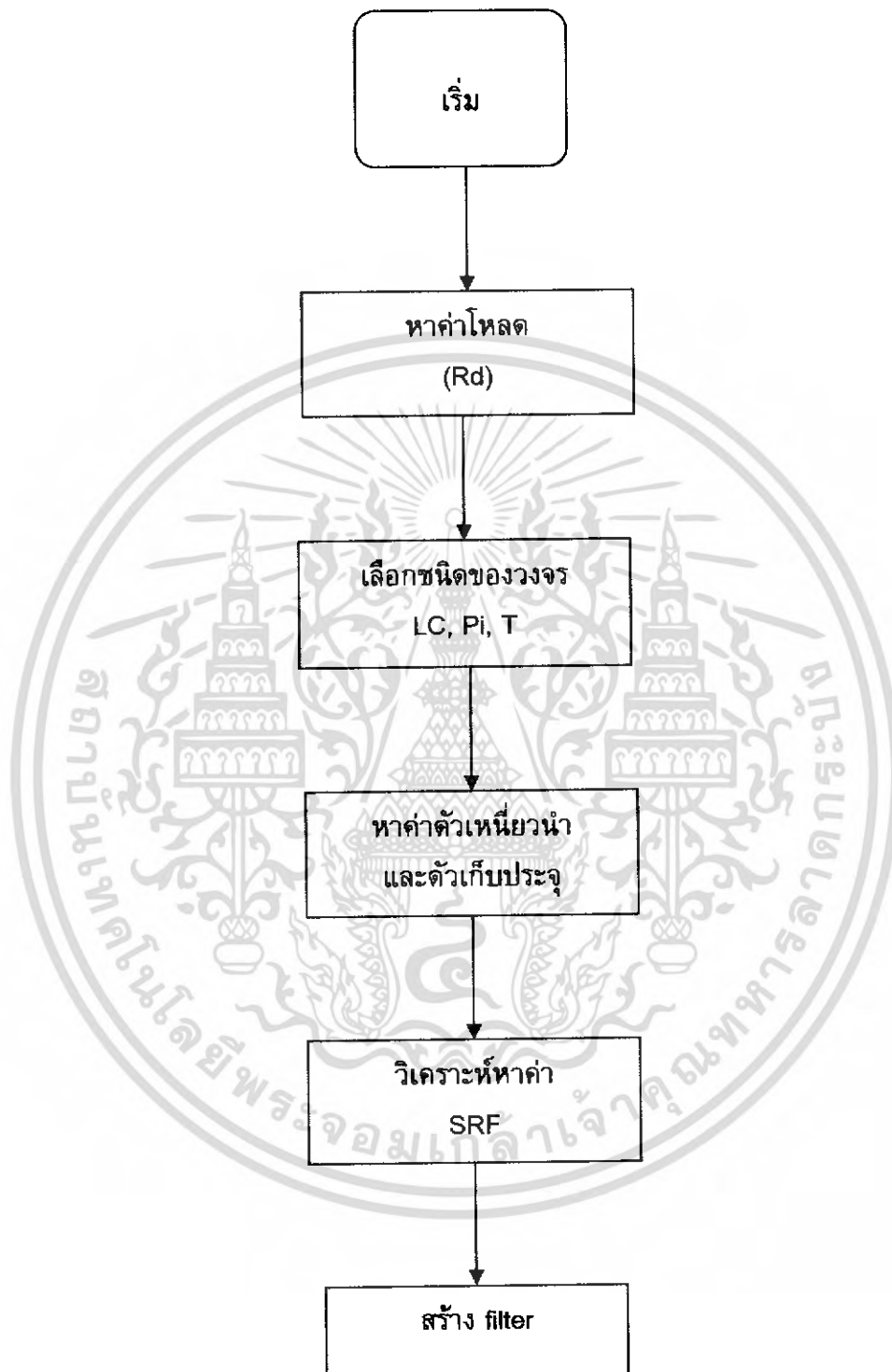
3.1.6 การพิจารณาถึงชนิดและย่านความถี่ในการใช้งานของตัวเหนี่ยวนำ คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำชนิดต่างๆ สรุปดังตารางต่อไปนี้ [3]

ตารางที่ 3.3 ย่านความถี่ที่เหมาะสมกับตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ

MAGNETIC MATERIAL	FREQUENCY RANGE					
	1KHz	10KHz	30KHz	100KHz	1MHz	2MHz
TRANSFORMER LAMINATIONS (NICKEL - IRON)	$\mu = 5,000 - 60,000$ $B_m = 8,000 - 15,000$					
TAPE WOUND CORES (NICKEL - IRON)	$\mu = 5,000 - 100,000$ $B_m = 8,000 - 20,000$					
TAPE WOUND CORES (AMORPHOUS)	$\mu = 3,000 - 20,000$ $B_m = 5,000 - 16,000$					
CUT CORES (NICKEL - IRON)	$\mu = 1,000 - 25,000$ $B_m = 8,000 - 20,000$					
BOBBIN CORES (NICKEL - IRON)		$\mu = 5,000 - 100,000$ $B_m = 8,000 - 15,000$				
PERMALLOY POWDER CORES (80% Ni)		$\mu = 14 - 550$ $B_m = 7,000$				
HIGH FLUX POWDER CORES (50 Ni - 50 Fe)		$\mu = 14 - 160$ $B_m = 14,000$				
KOOL MU POWDER CORES		$\mu = 26 - 125$ $B_m = 14,000$				
FERRITES (MnZn)				$\mu = 750 - 15,000$ $B_m = 3,500 - 5,000$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบจริง

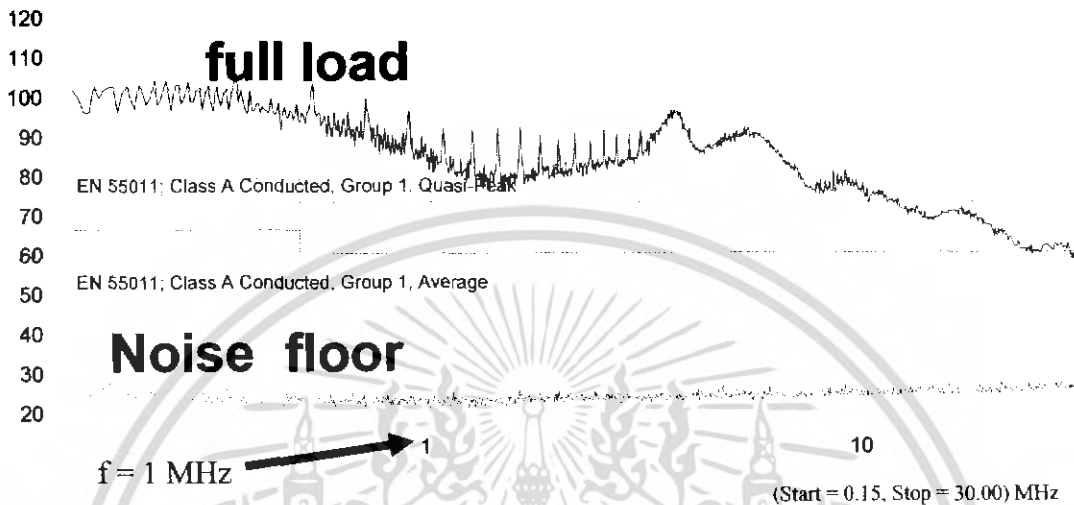


รูปที่ 3.1 แผนผังการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ทดสอบขั้วมอเตอร์แบบ full load แล้วนำผลของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก EMC spectrum analysis มาพิจารณาออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

**dBuV**



รูปที่ 3.2 กราฟสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะขั้วมอเตอร์แบบ Full load

### 3.2.2 ออกแบบหาค่าอุปกรณ์ที่ในวงจรกรอง

จากผลการทดสอบการทำงานอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 Hz ใช้กระแสไฟฟ้า ( $I_{rms}$ ) 2 A ที่แรงดัน ( $V_{rms}$ ) 220 V ดังนั้นสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนในระบบไฟฟ้ากระแสสลับได้จากสมการที่(3.1) [1]

$$R_d = \frac{V_{min,rms}}{I_{max,rms}} = \frac{220}{2} = 110\Omega$$

ความถี่คัทออฟ คือ 
$$F_o = \frac{F}{2^{\frac{dB}{20}}} = \frac{1MHz}{2^{\frac{90}{20}}} = \frac{1000000}{181} = 5.5kHz$$

ตัวเหนี่ยวนำมีค่า 
$$L = \frac{R_d}{\pi F_o} = \frac{110}{3.14(5500)} = 6.37mH$$

ตัวเก็บประจุมีค่า 
$$C = \frac{1}{\pi F_o R_d} = \frac{1}{(3.14)(5500)(110)} = 0.52\mu F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณจำนวนรอบการพันค่าตัวเหนี่ยวนำ จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$L = A_L N^2$$

โดยที่  $L = 3.2 \text{ mH}$  (จำนวน 2 ขด)

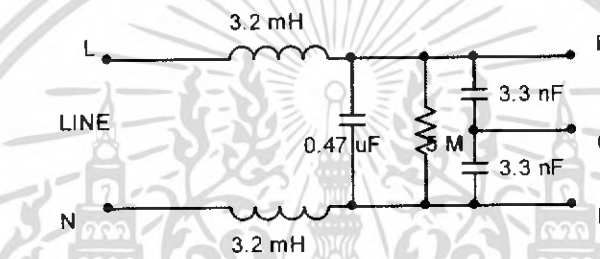
$A_L = 13400 \text{ nH} / N$  (ได้มาจากข้อมูลของผู้ผลิต)

ดังนั้น  $N = (L / A_L)^{1/2}$

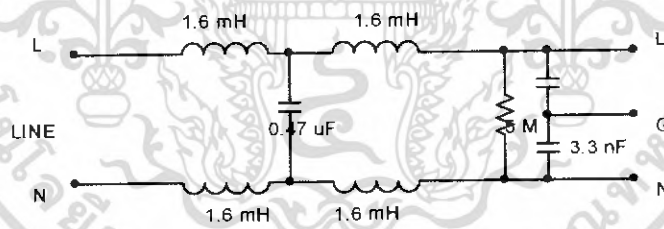
$$N = (3.2 \cdot 10^{-3} / 13400 \cdot 10^{-9})^{1/2}$$

$N = 15.45$  รอบ ประมาณ 16 รอบ

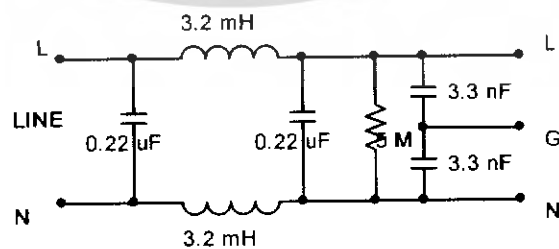
ดังนั้น วงจรกรองทั้งสามแบบ ที่ได้จากการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูป



(ก) วงจรกรองแบบ LC



(ข) วงจรกรองแบบ T



(ค) วงจรกรองแบบ Pi

### รูปที่ 3.3 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

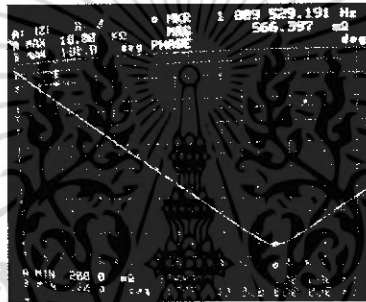
### 3.2.3 ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของอุปกรณ์ในวงจรกรอง

ทำการนำไปวิเคราะห์ค่าด้วยเครื่อง impedance analyzer ในย่านความถี่ 150 kHz-30MHz ทำให้วิเคราะห์ค่าความถี่ก่าทอนของตัวเอง (Self Resonance Frequency: SRF) และส่วนประกอบแฝงของอุปกรณ์ได้ดังนี้

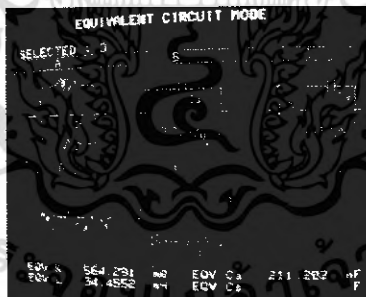
3.2.3.1 ตัวเก็บประจุ  $C_x = 0.22 \mu\text{F}$  มีค่า SRF = 1.8 MHz



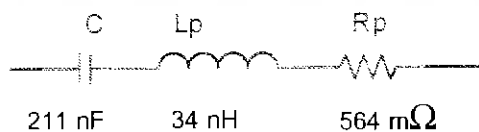
(ก) ตัวเก็บประจุ  $C_x = 0.22 \mu\text{F}$



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่ก่าทอนของตัวเก็บประจุ  $C_x = 0.22 \mu\text{F}$



(ค) ส่วนประกอบแฝงของ  $C_x = 0.22 \mu\text{F}$



(ง) วงจรส่วนประกอบแฝงของ  $C_x = 0.22 \mu\text{F}$

### รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ $C_x = 0.22 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

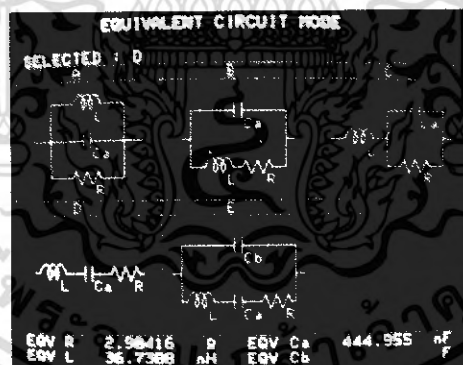
### 3.2.3.2 ตัวเก็บประจุ $C_x = 0.47 \mu\text{F}$ มีค่า $\text{SRF} = 1.11 \text{ MHz}$



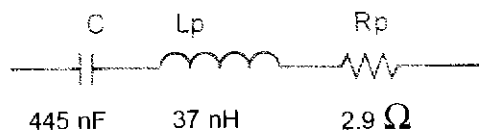
(ก) ตัวเก็บประจุ  $C_x = 0.47 \mu\text{F}$



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่ก้ำก๋อนของตัวเก็บประจุ  $C_x = 0.47 \mu\text{F}$



(ค) ส่วนประกอบแฝงของ  $C_x = 0.47 \mu\text{F}$



(ง) วงจรส่วนประกอบแฝงของ  $C_x = 0.47 \mu\text{F}$

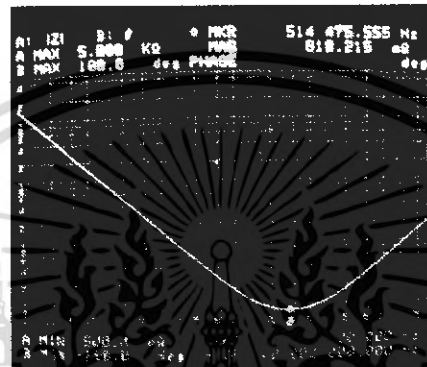
### รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ $C_x = 0.47 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

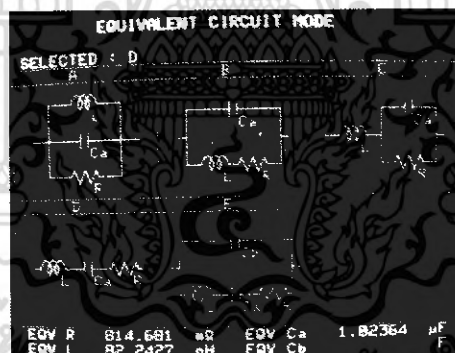
### 3.2.3.3 ตัวเก็บประจุ $C_x = 1 \mu\text{F}$ มีค่า $\text{SRF} = 514 \text{ KHz}$



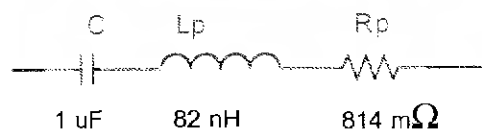
(ก) ตัวเก็บประจุ  $C_x = 1 \mu\text{F}$



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่กำทอนของตัวเก็บประจุ  $C_x = 1 \mu\text{F}$



(ค) ส่วนประกอบแฝงของ  $C_x = 1 \mu\text{F}$

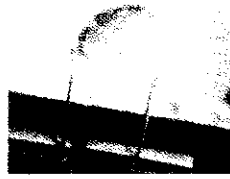


(ง) วงจรส่วนประกอบแฝงของ  $C_x = 1 \mu\text{F}$

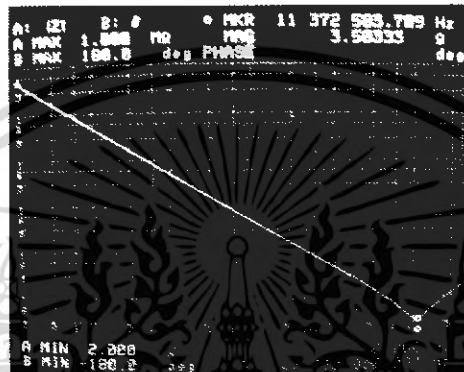
**รูปที่ 3.6** ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ  $C_x = 1 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

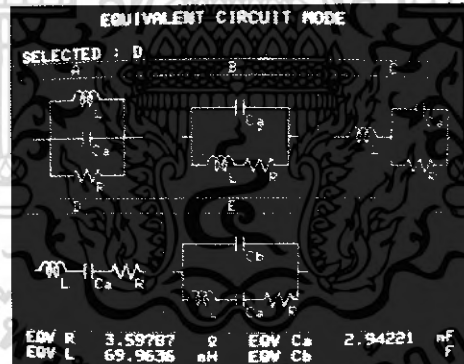
3.2.3.4 ตัวเก็บประจุ  $C_y = 3.3 \text{ nF}$  มีค่า  $\text{SRF} = 11.3 \text{ MHz}$



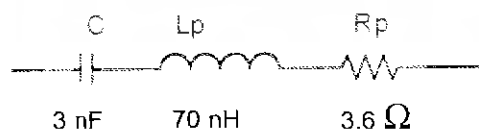
(ก) ตัวเก็บประจุ  $C_y = 3.3 \text{ nF}$



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่กำหนดของตัวเก็บประจุ  $C_y = 3.3 \text{ nF}$



(ค) ส่วนประกอบแฝงของ  $C_y = 3.3 \text{ nF}$

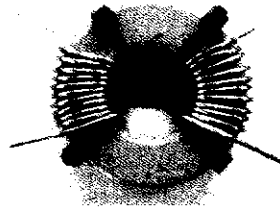


(ง) วงจรส่วนประกอบแฝงของ  $C_y = 3.3 \text{ nF}$

**รูปที่ 3.7** ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเก็บประจุ  $C_y = 3.3 \text{ nF}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

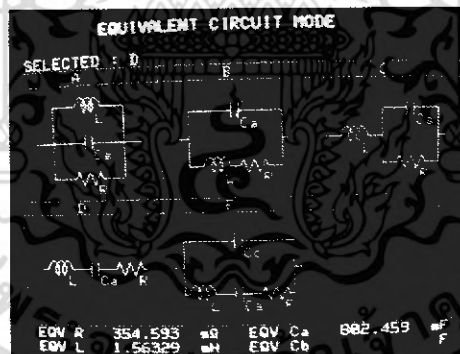
### 3.2.3.5 ตัวเหนี่ยวนำ $L = 1.6 \text{ mH}$ ( $\times 2$ ) จำนวนรอบ 11 ( $\times 2$ ) ค่า $\text{SRF} = 2.26 \text{ MHz}$



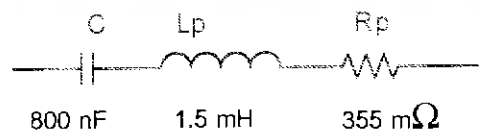
(ก) ตัวเหนี่ยวนำ  $L = 1.6 \text{ mH}$  ( $\times 2$ )



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่ก้ำก๋อของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 1.6 \text{ mH}$



(ค) ส่วนประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 1.6 \text{ mH}$

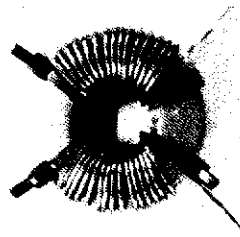


(ง) วงจรส่วนประกอบแฝงของ  $L = 1.6 \text{ mH}$

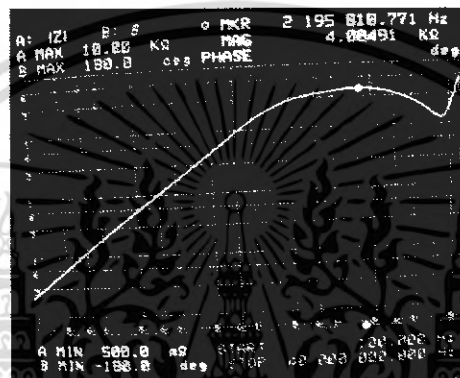
### รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเหนี่ยวนำ $L = 1.6 \text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

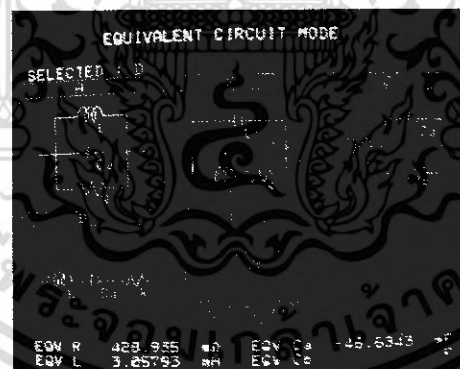
3.2.3.6 ตัวเหนี่ยวนำ  $L = 3.2 \text{ mH}$  ( $\times 2$ ) จำนวนรอบ 16 ( $\times 2$ ) ค่า  $\text{SRF} = 2.19 \text{ MHz}$



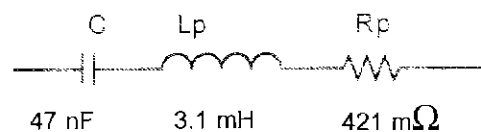
(ก) ตัวเหนี่ยวนำ  $L = 3.2 \text{ mH}$  ( $\times 2$ )



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่ก่าทอนของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 3.2 \text{ mH}$



(ค) ส่วนประกอบแฝงของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 3.2 \text{ mH}$



(ง) วงจรส่วนประกอบแฝงของ  $L = 3.2 \text{ mH}$

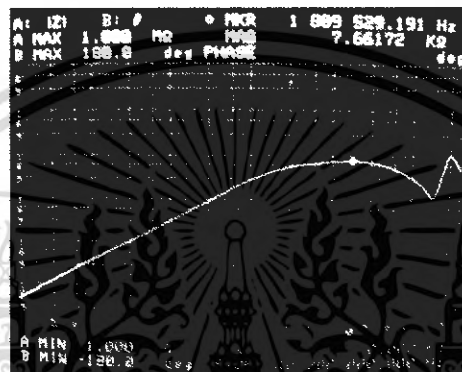
**รูปที่ 3.9** ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 3.2 \text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

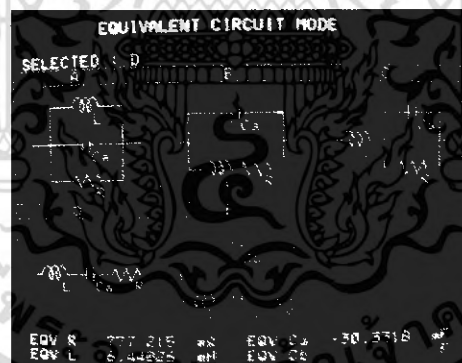
### 3.2.3.7 ตัวเหนี่ยวนำ $L = 6.4 \text{ mH}$ ( $\times 2$ ) จำนวนรอบ 21( $\times 2$ ) ค่า SRF = 1.8 MHz



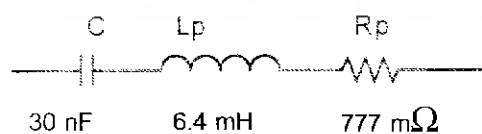
(ก) ตัวเหนี่ยวนำ  $L = 6.4 \text{ mH}$  ( $\times 2$ )



(ข) กราฟแสดงค่าความถี่ก้ำก๋อนของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 6.4 \text{ mH}$



(ค) ส่วนประกอบแผงของตัวเหนี่ยวนำ  $L = 6.4 \text{ mH}$



(ง) วงจรส่วนประกอบแผงของ  $L = 6.4 \text{ mH}$

### รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองต่อความถี่สูงของตัวเหนี่ยวนำ $L = 6.4 \text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สรุป

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญในการกำหนดค่าองค์ประกอบของฟิลเตอร์คือ ค่า L, C ของฟิลเตอร์ หรือการออกแบบนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขแวดล้อมต่างๆของระบบที่จะพิจารณานั้นคือ

1. แรงดันต่ำสุด (minimal rms line voltage)
2. แรงดันสูงสุด (maximum rms line current)
3. ชนิดของโหลด
4. ความถี่ไลน์ (power line frequency)
5. ความสูญเสียที่ต้องการ (loss required) ที่ต้องลดทอน

ขั้นตอนการออกแบบจะสามารถออกแบบเลือกชนิดของฟิลเตอร์ที่ต้องการใช้โดยพิจารณาจากโหลดค่าความสูญเสีย และเลือกออกแบบใน common mode หรือ differential mode คำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันต่ำสุดกับค่ากระแสโหลดสูงสุดโดยใช้ได้กับทั้ง common mode หรือ differential mode หาค่าความถี่ cut off ของฟิลเตอร์ทั้ง common mode หรือ differential mode แล้วคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้

จากการหาผลตอบสนองต่อความถี่สูงของอุปกรณ์ในวงจรกรองโดยการนำไปวิเคราะห์ค่าด้วยเครื่อง impedance analyzer ทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าความถี่กำหนดของตัวมันเองและส่วนประกอบแฝงของอุปกรณ์โดยสามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

รูปที่	Cx (uF)	Cy (nF)	L (mH)	SRF (MHz)	ส่วนประกอบแฝง		
					C (nF)	Rp (mΩ)	Lp
3.1	0.22	-	-	1.80	211.20	564.29	34.45nH
3.2	0.47	-	-	1.11	444.95	2904.16	36.73nH
3.3	1	-	-	0.51	1023.64	814.68	82.24nH
3.4	-	3.30	-	11.37	2.94	3597.87	69.96nH
3.5	-	-	1.60	2.26	802.45	345.59	1.56 mH
3.6	-	-	3.20	2.19	46.63	428.93	3.05 mH
3.7	-	-	6.40	1.80	30.33	777.21	6.44 mH

## บทที่ 4

### การจำลองการทำงานและผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

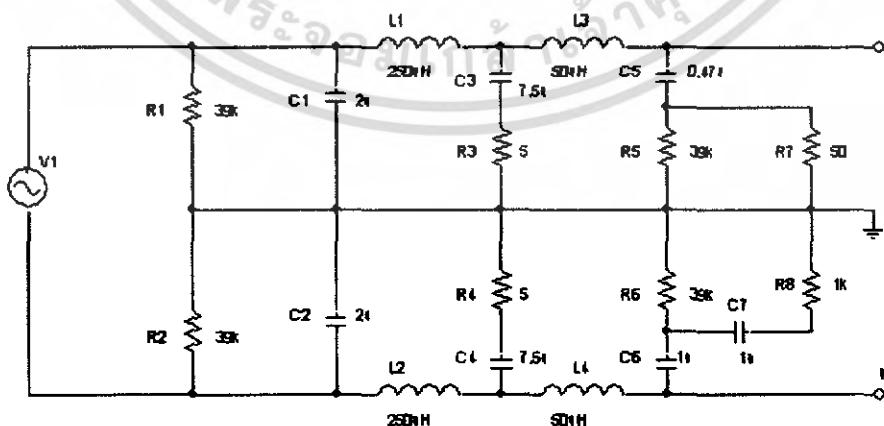
ในบทนี้จะเป็นการจำลองระบบการทำงาน (simulation) เพื่อทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) แต่ละชนิดโดยใช้โปรแกรม Pspice ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานและสามารถทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สนใจได้ โดยจะทำการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรองและเปรียบเทียบผลที่ได้ โดยจะวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณรบกวนในรูปของความถี่ (frequency domain) โดยใช้คำสั่ง FFT (fast fourier transform) ที่มีอยู่ในโปรแกรม ซึ่งค่าที่ใช้ในการจำลองการทำงานนี้จะเป็นค่าที่ได้จากการออกแบบในบทที่แล้ว

#### 4.2 การสร้างแบบจำลองการทำงาน

ในการสร้างวงจรจำลองระบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice สามารถทำได้โดยการลากเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่มีให้เลือกใช้ในโปรแกรมเข้าด้วยกันและทำการเลือกรูปแบบการจำลองระบบ โดยในการจำลองระบบเพื่อทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องประกอบไปด้วย วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) วงจรกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือ วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

##### 4.2.1 วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)

จะทำหน้าที่แยกสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่ผ่านเข้ามาทางสายตัวนำ ไม่ให้มีผลมากระทบกับการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านทางสายตัวนำซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบและทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

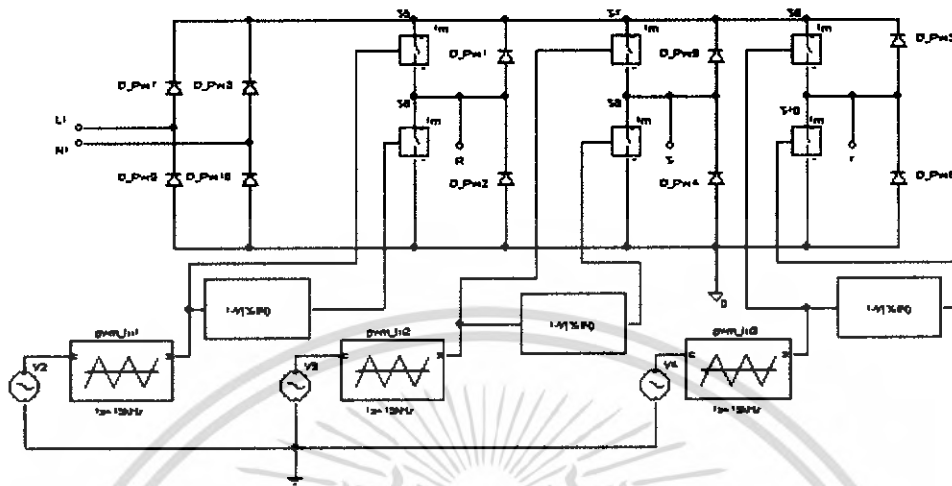


รูปที่ 4.1 วงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

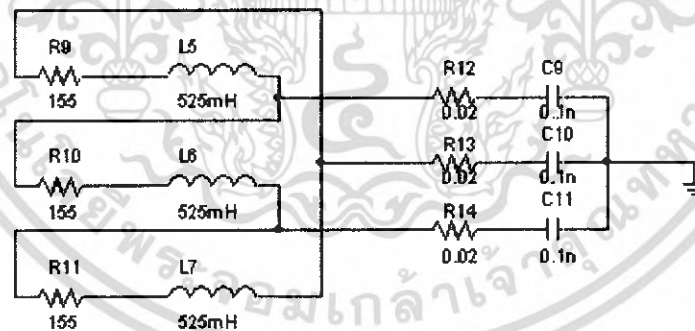
แบบจำลองที่สร้างเป็นอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม แบบ ยูนิโพลาร์



รูปที่ 4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

#### 4.2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ในการทำแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้วงจรสมมูลโดยประมาณ เนื่องจากในการศึกษาผลของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะเน้นผลการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ (อินเวอร์เตอร์) เป็นหลัก



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

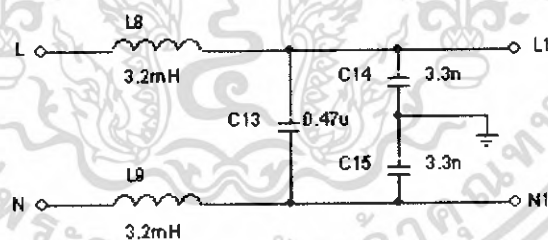
#### 4.2.4 การจำลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการจำลองจะแบ่งชนิดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ คือ แบบ LC แบบ Pi และแบบ T ซึ่งในแบบจำลองจะทำการจำลองทั้งแบบ LC แบบ Pi และแบบ T และทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกัน แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงนำไปทดลองจริงต่อไป สามารถสรุปได้ดังตาราง

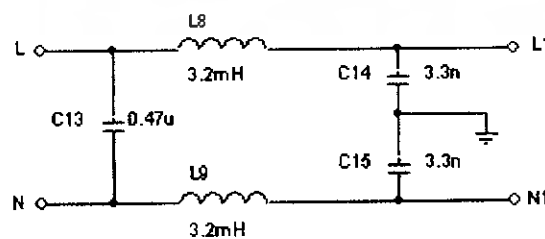
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบต่างๆ

ชนิดวงจรกรอง	ตัวเหนี่ยวนำ ( mH )	ตัวเก็บประจุ ( uF )	หมายเหตุ
LC	3.2(x2)	0.47	L= 1.6 mH (x2)
		1.00	ค่า SRF =2.26 MHz
	6.4(x2)	0.47	L= 3.2 mH (x2)
		1.00	ค่า SRF =2.19MHz
LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)	3.2(x2)	0.47	L= 6.4 mH (x2)
		1.00	ค่า SRF =1.8 MHz
	6.4(x2)	0.47	C= 0.22 uF
		1.00	ค่า SRF = 1.8 MHz
Pi	3.2(x2)	0.22(x2)	C= 0.47 uF
		0.47(x2)	ค่า SRF = 1.11 MHz
	6.4(x2)	0.22(x2)	C= 1 uF
		0.47(x2)	ค่า SRF = 514 KHz
T	1.6(x4)	0.47	
		1.00	
	3.2(x4)	0.47	
		1.00	

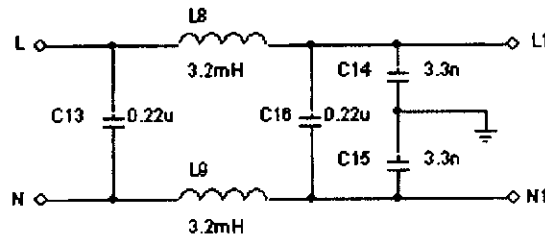


รูปที่ 4.4 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC

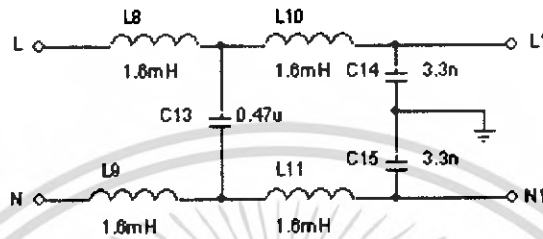


รูปที่ 4.5 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ Pi

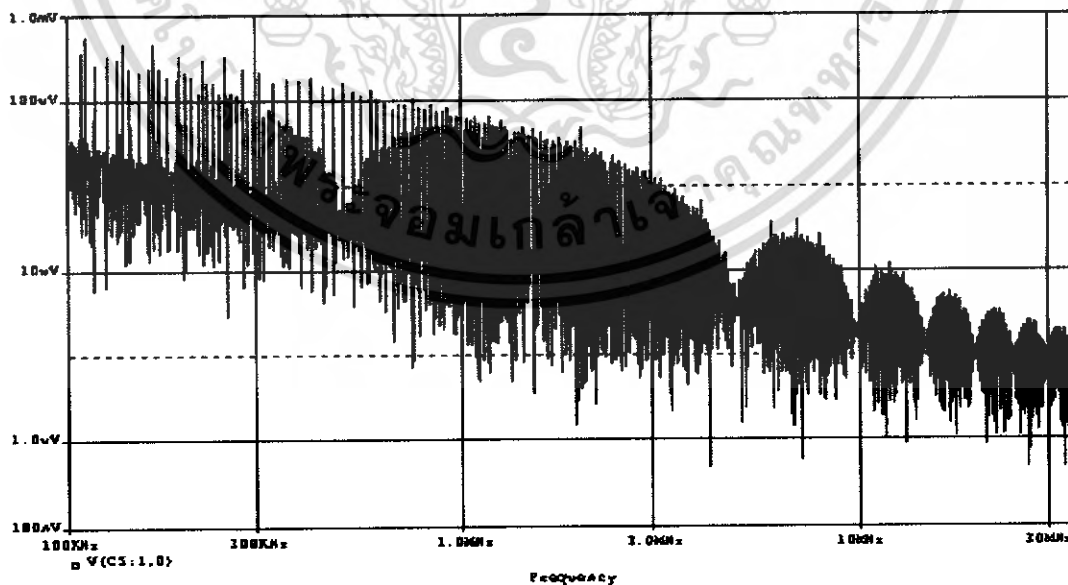


รูปที่ 4.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ T

### 4.3 ผลการจำลองการทำงาน

ผลของการจำลองการทำงานจะประกอบไปด้วยสองส่วนด้วยกันคือ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนใส่ filter และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหลังใส่ filter ชนิดต่างๆ เข้าไปในวงจร

4.3.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อไม่ได้ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ดังรูป

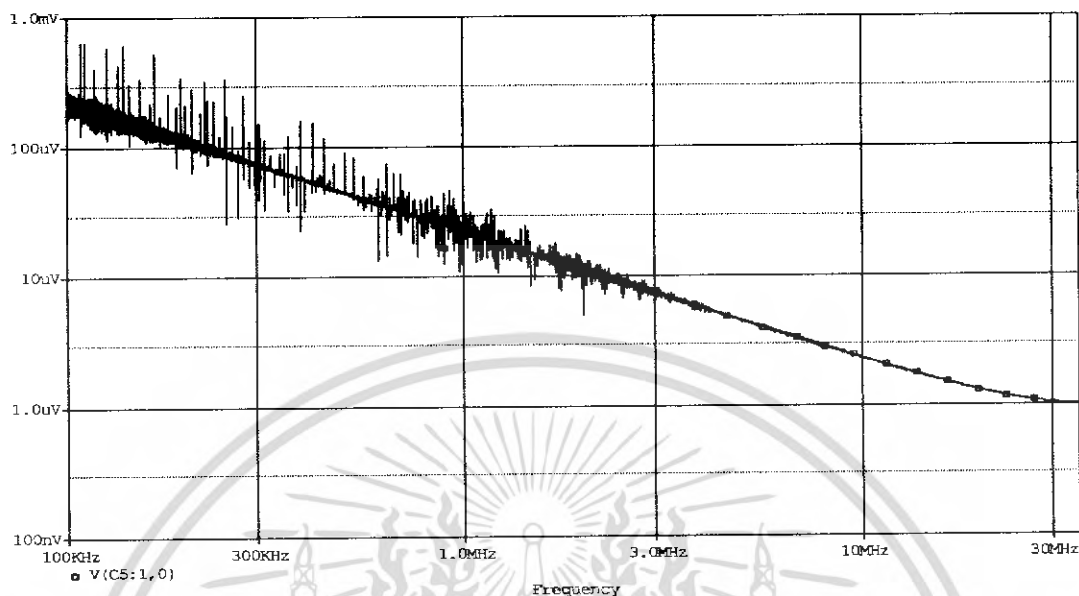


รูปที่ 4.8 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ จากการจำลองระบบเมื่อไม่ได้ใส่

วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

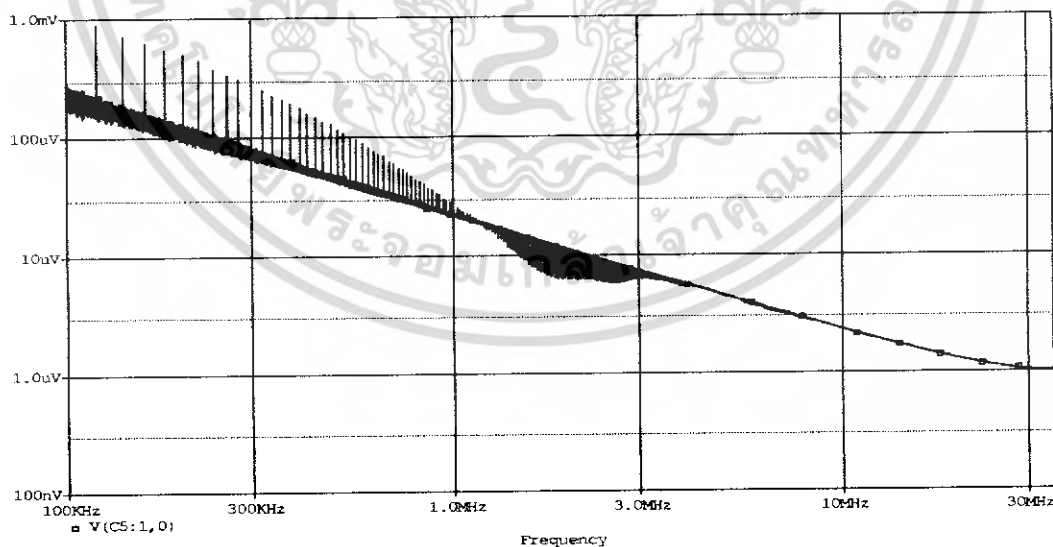
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC จะได้ดังรูป



**รูปที่ 4.9** สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC

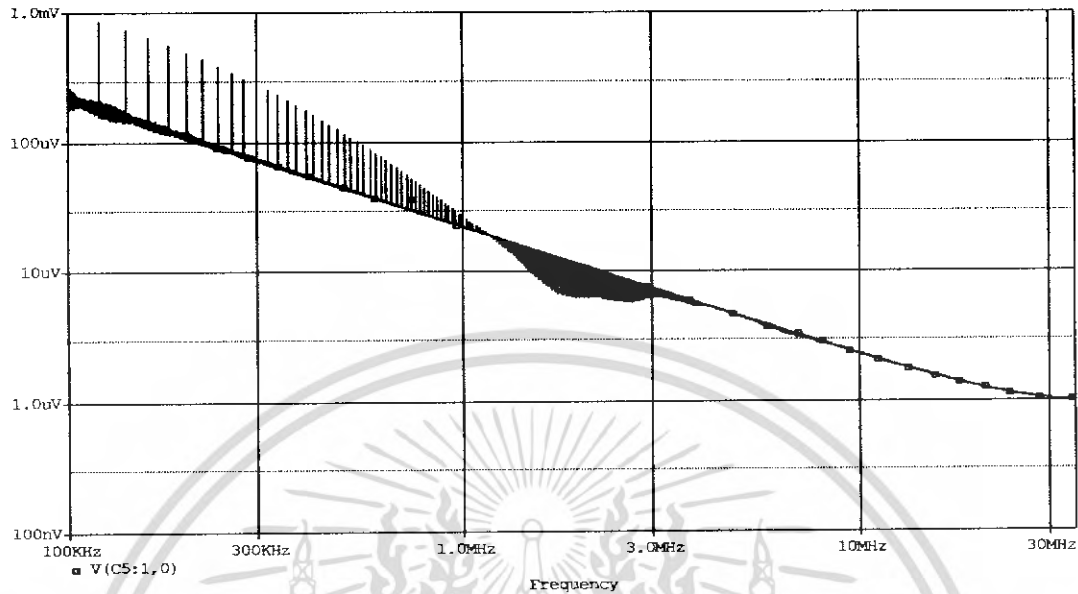
### 4.3.3 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) จะได้ดังรูป



**รูปที่ 4.10** สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)

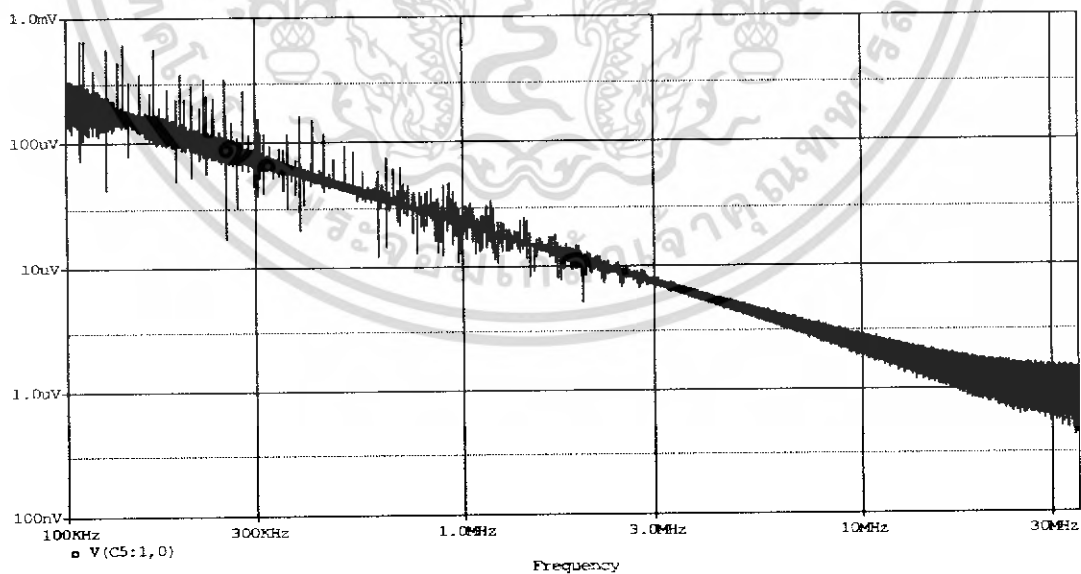
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.4 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.11 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi**

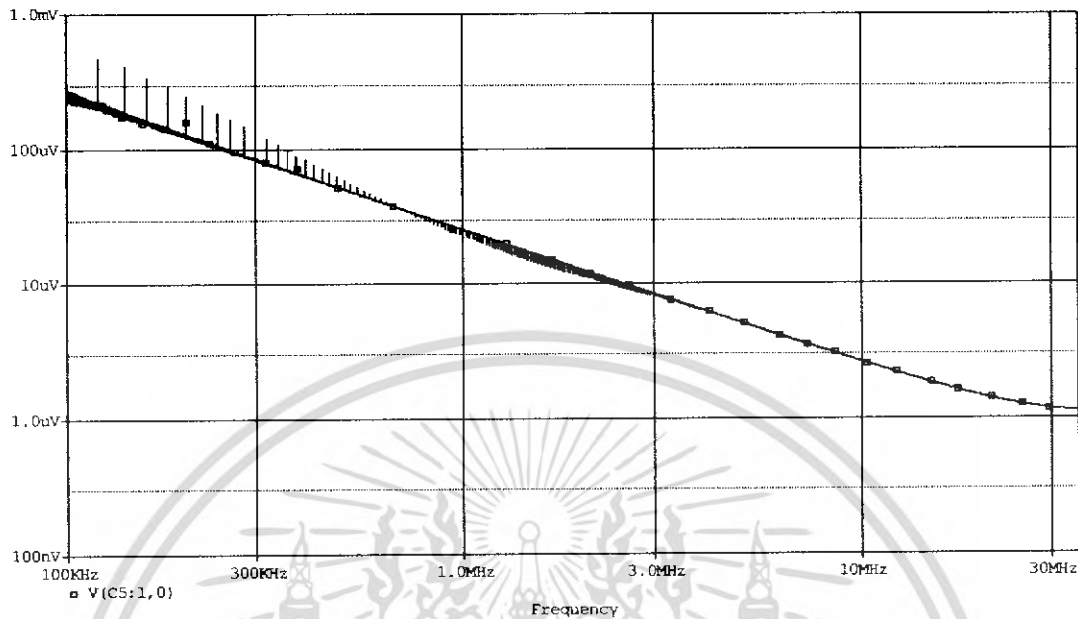
**4.3.5 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.12 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จากการจำลองระบบเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T**

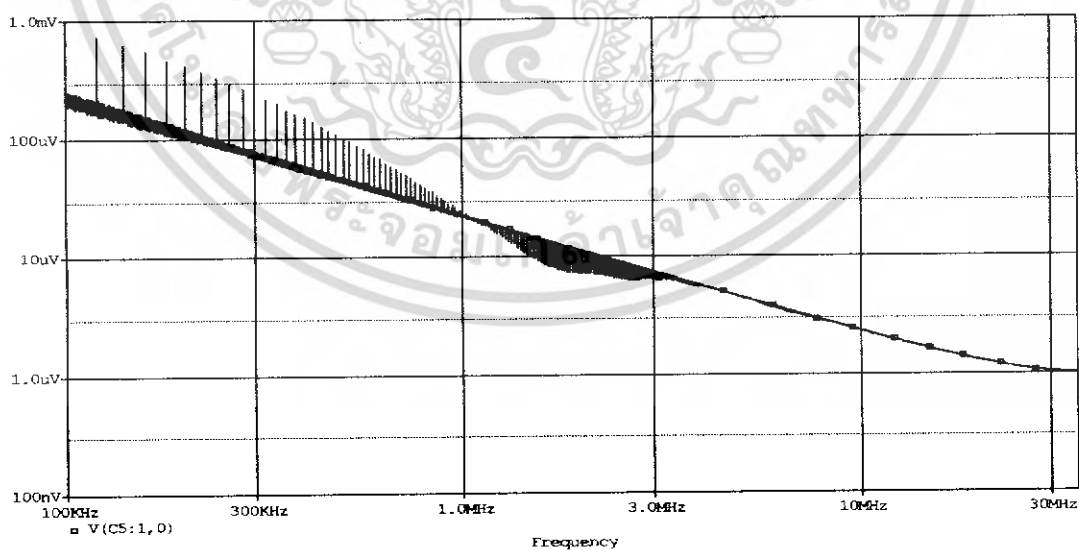
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F**

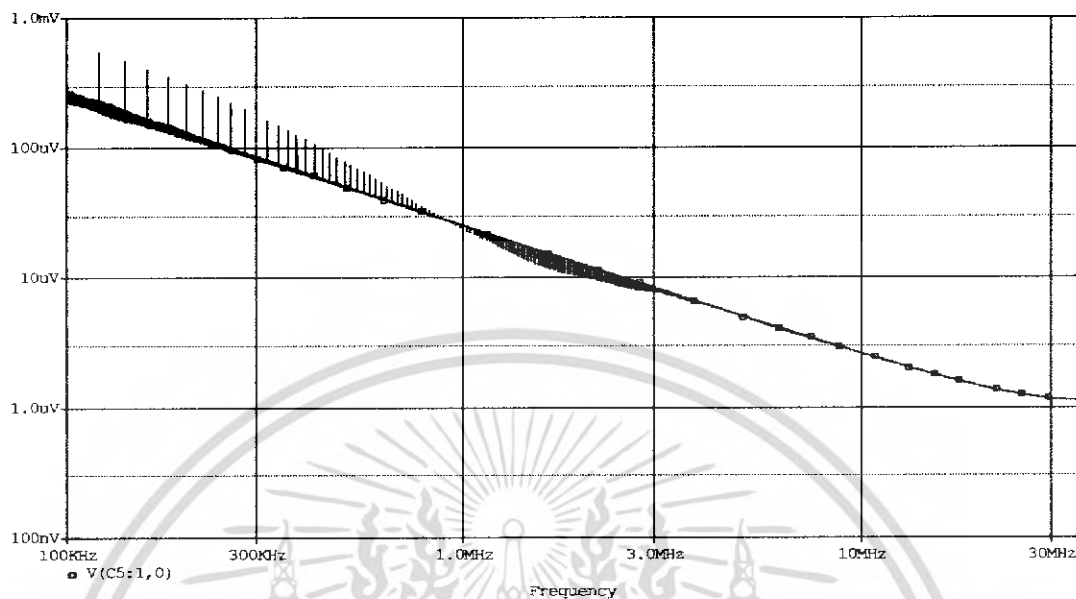
**4.3.7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.14 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F**

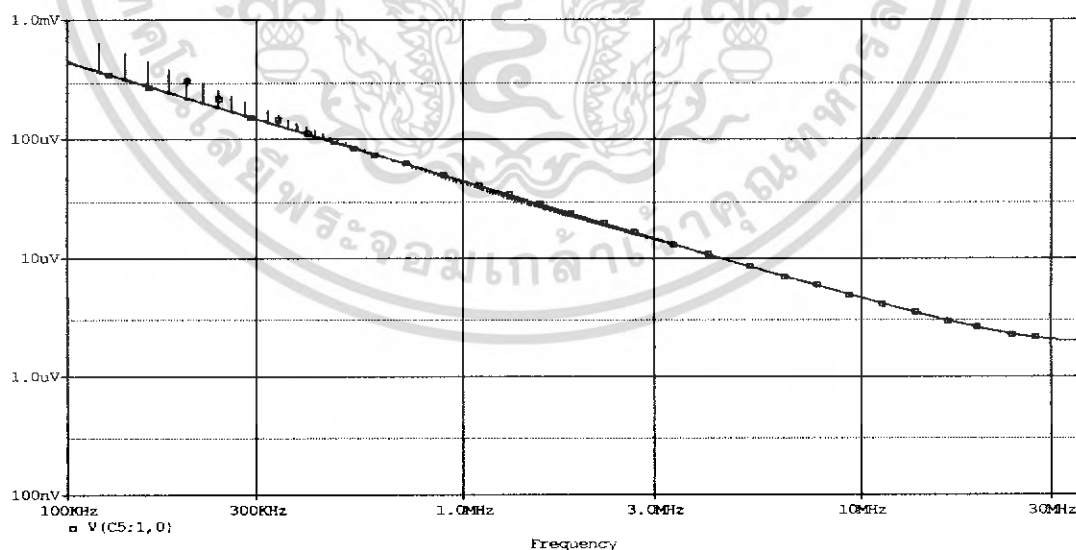
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และ ค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F**

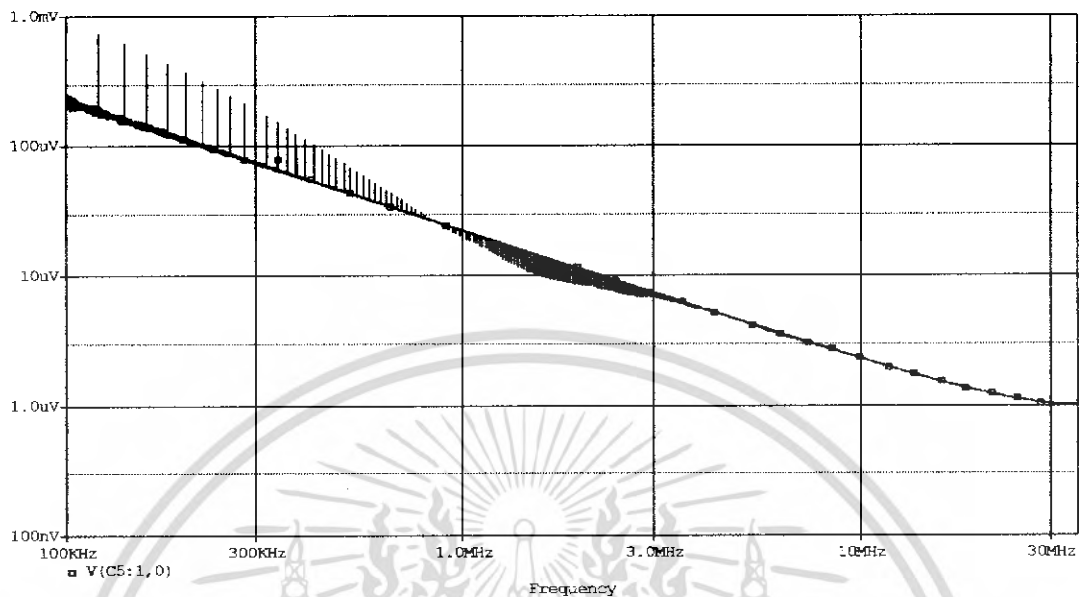
**4.3.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า L เป็น 12.8 mH และค่า C เป็น 0.47  $\mu$ F**

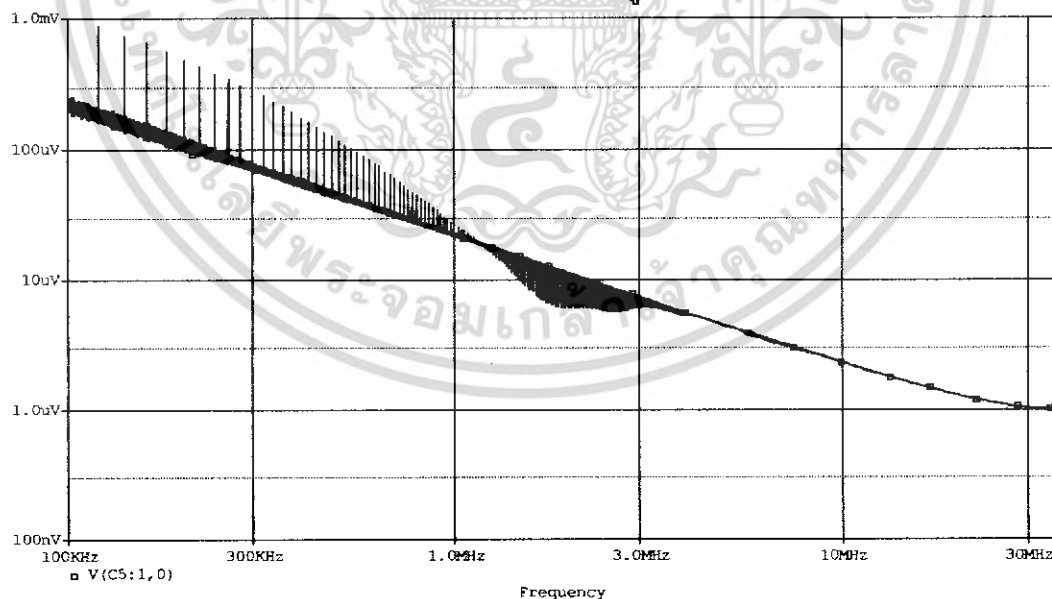
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.10** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$  จะได้ดังรูป



**รูปที่ 4.17** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$

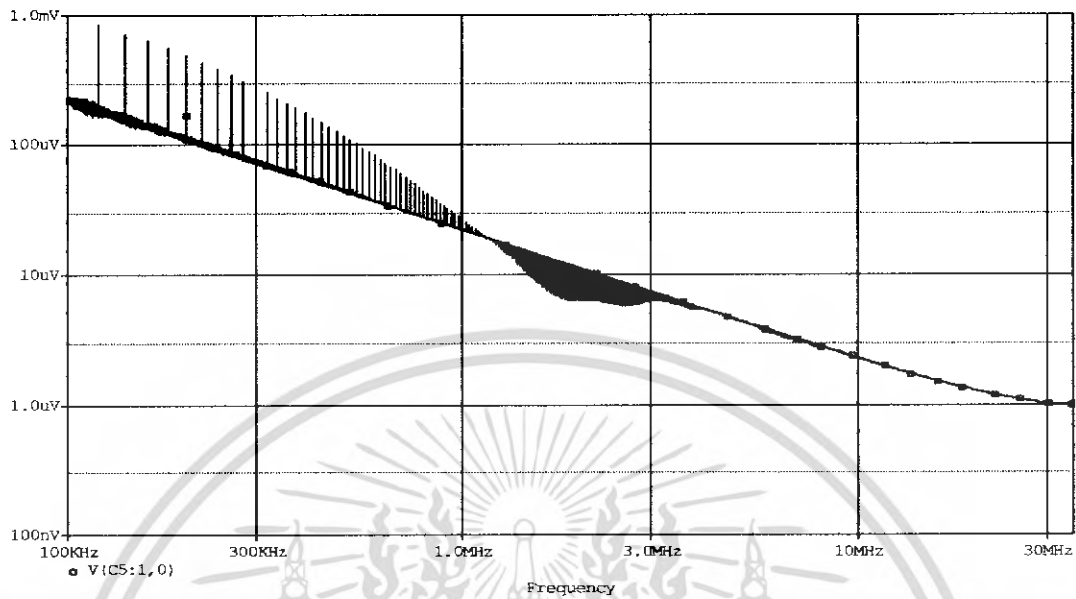
**4.3.11** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$  จะได้ดังรูป



**รูปที่ 4.18** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$

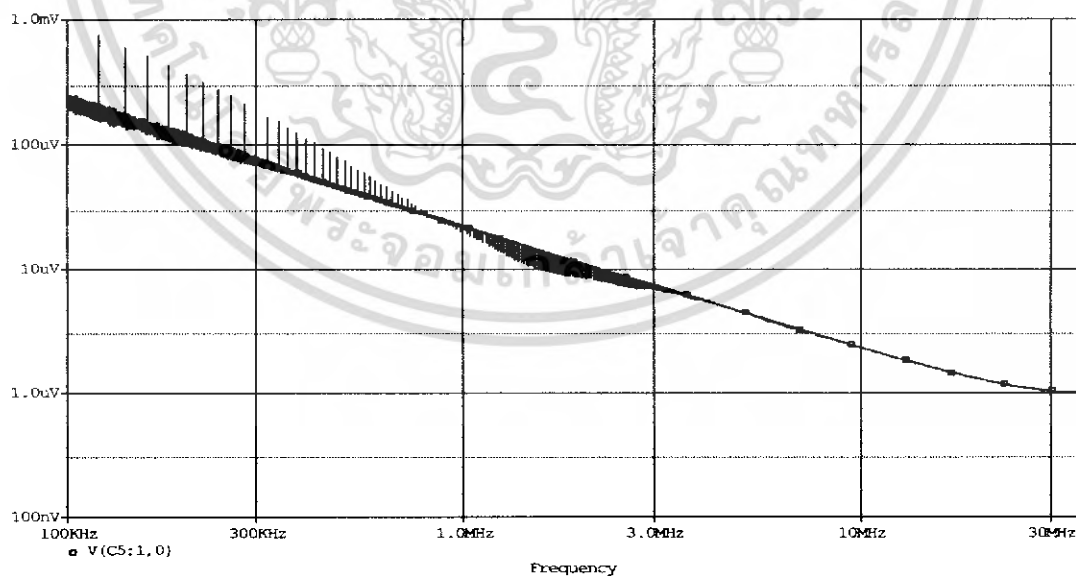
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$  จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.19** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$

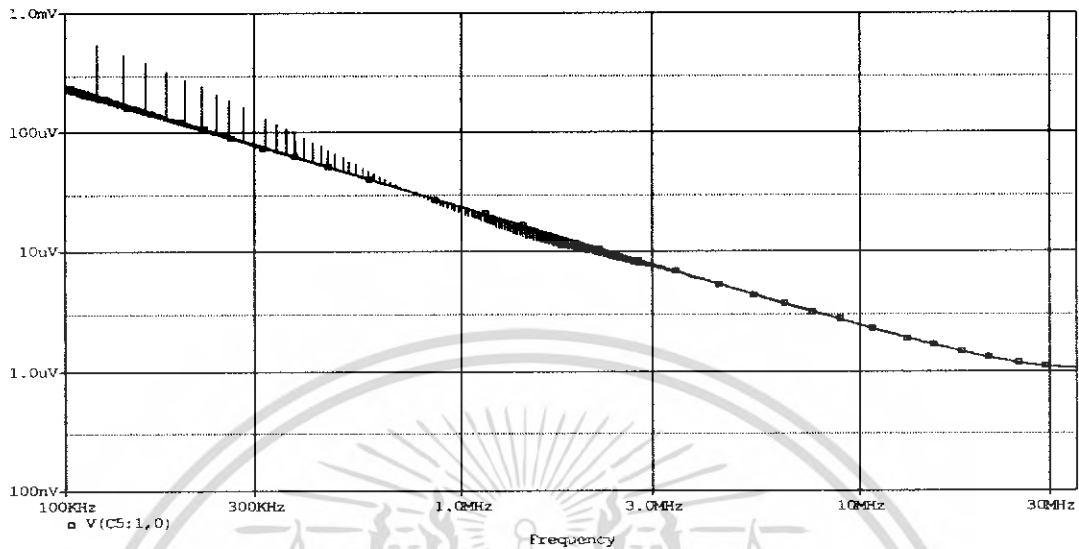
**4.3.13 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$  จะได้ดังรูป**



**รูปที่ 4.20** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $6.4\text{ mH}$

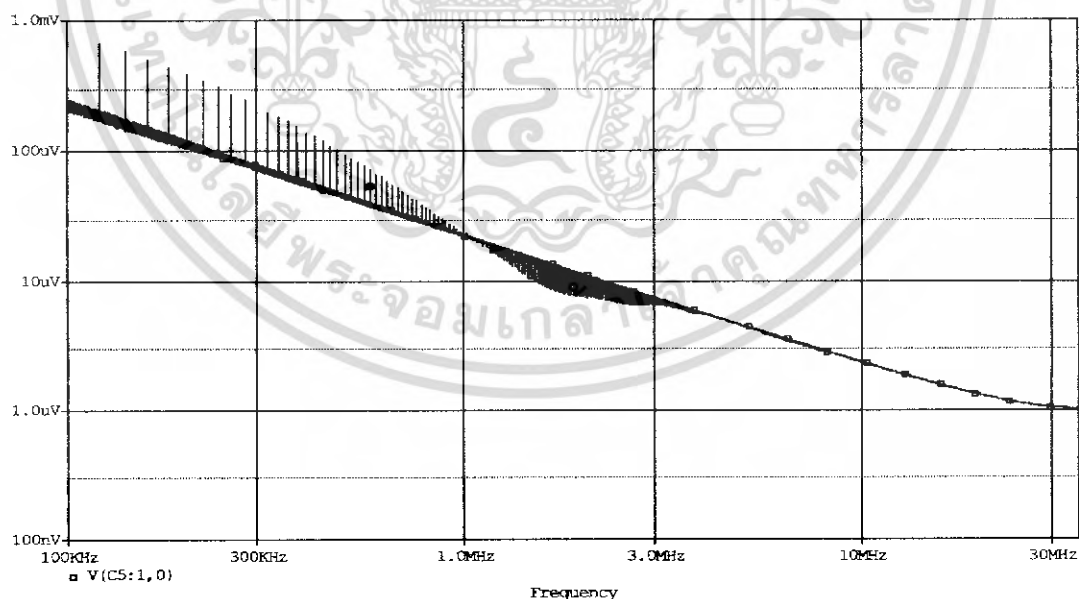
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.14 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$  จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.21 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$

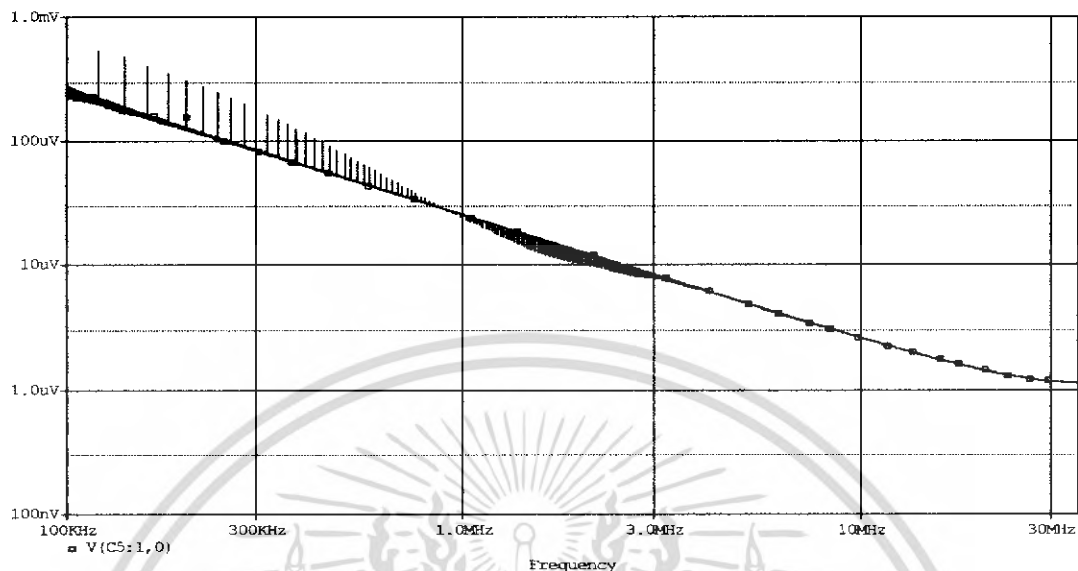
4.3.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$  จะได้ดังรูป



รูปที่ 4.22 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$

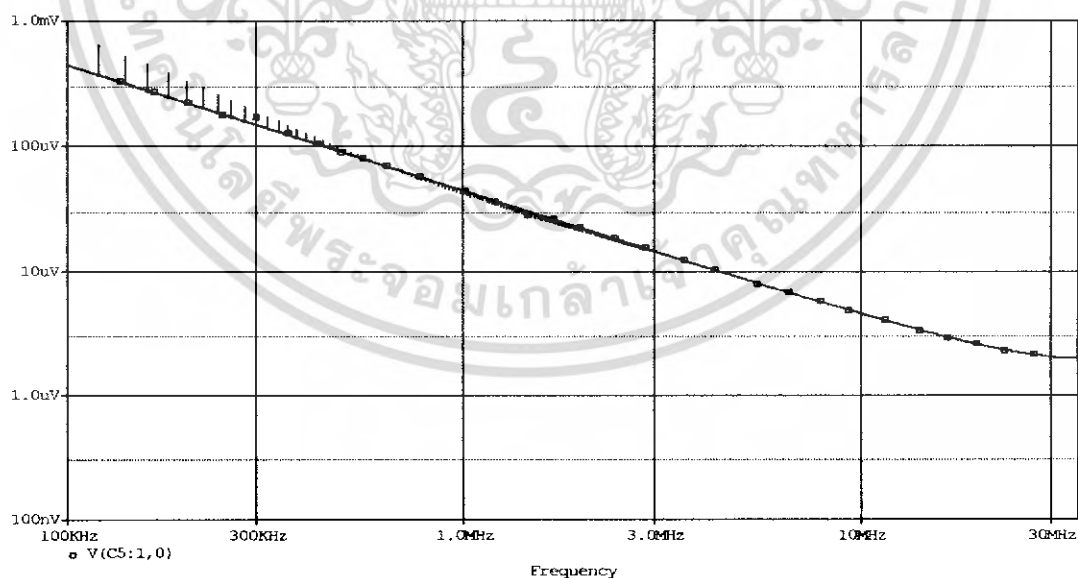
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.16** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$  จะได้ดังรูป



**รูปที่ 4.23** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และ ค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$

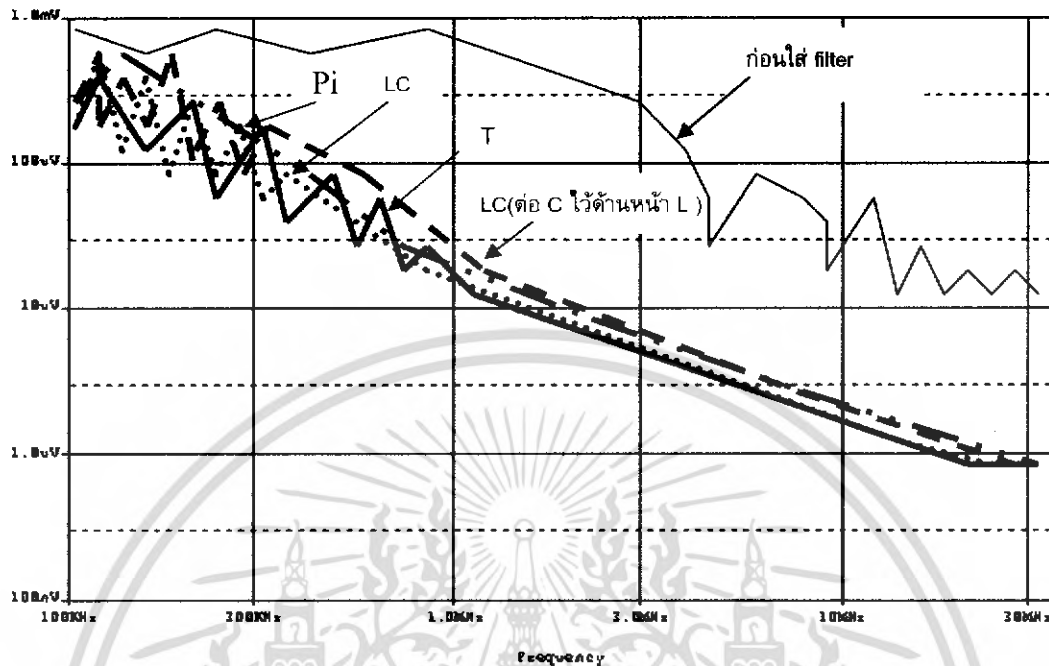
**4.3.17** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$  จะได้ดังรูป



**รูปที่ 4.24** วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T โดยเพิ่มค่า C เป็น  $1\mu\text{F}$  และ ค่า L เป็น  $12.8\text{ mH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

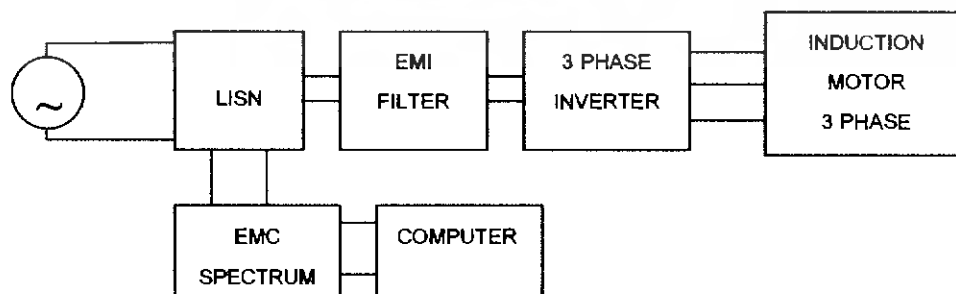
#### 4.3.18 เปรียบเทียบก่อนใส่วงจรกรองและหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลการจำลองก่อนใส่วงจรกรองและหลังจากใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยการเชื่อมต่อเส้นที่ยอดคลื่น

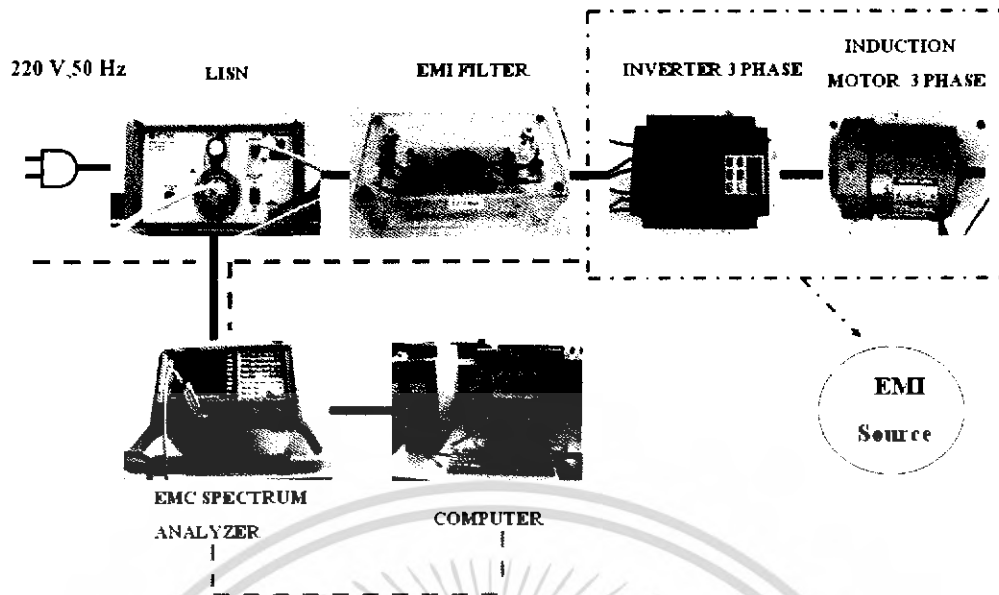
#### 4.4 ผลการทดลอง

ในการทดลองจากระบบจริงโดยในระบบจริงจะใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟสที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราสามารถวัดสัญญาณรบกวนได้โดยการต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับ LISN และทำการวิเคราะห์คลื่นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่อง Spectrum Analyzer ที่ต่ออยู่กับ LISN โดยผลที่ได้จะแสดงผลไปยังหน้าจอคอมพิวเตอร์และการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการต่อ EMI filter เข้าไประหว่าง LISN กับ INVERTER โดยบล็อกไดอะแกรมของวงจรการต่อจริงในการทดลองจะแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.26 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการทดลอง

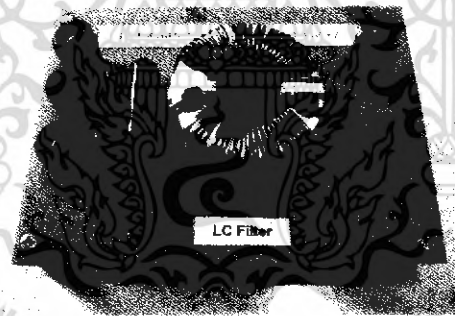
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



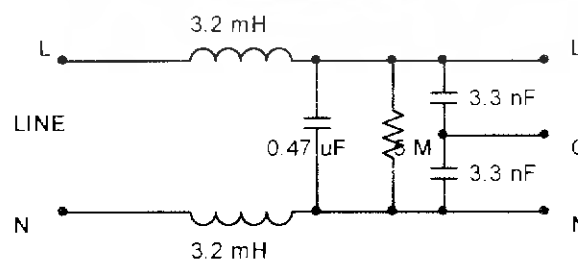
รูปที่ 4.27 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการต่อจริงในการทดลอง

#### 4.4.1 ตัวกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) ที่ใช้ทดลอง

##### 4.4.1.1 วงจรกรองแบบ LC โดยการเปลี่ยนแปลงเพิ่มและลดค่าพารามิเตอร์

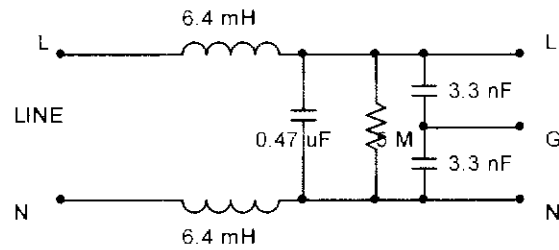


(ก) รูปวงจรกรองแบบ LC

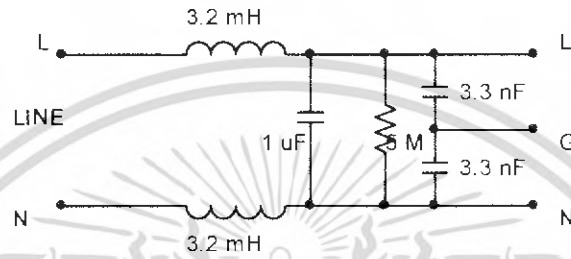


(ข) วงจรกรองแบบ LC ที่ได้จากการออกแบบ

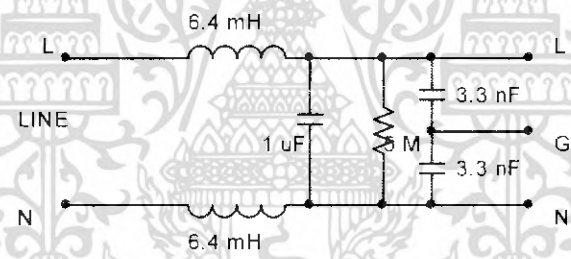
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) วงจรกรองแบบ LC ที่เพิ่มค่า L เป็น 2 เท่า



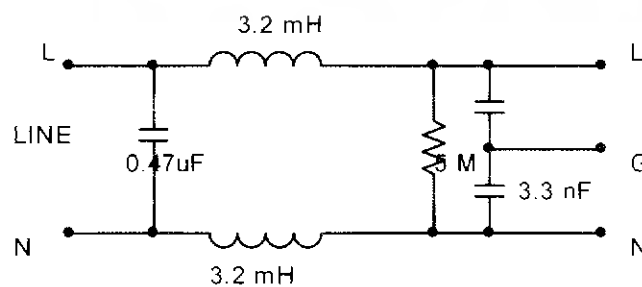
(ง) วงจรกรองแบบ LC ที่เพิ่มค่า C เป็น 2 เท่า



(จ) วงจรกรองแบบ LC ที่เพิ่มค่า L และ C เป็น 2 เท่า

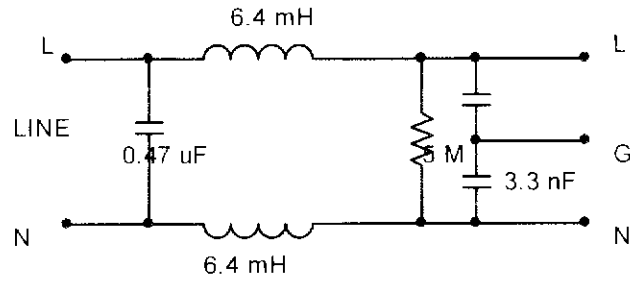
#### รูปที่ 4.28 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC

##### 4.4.1.2 วงจรกรองแบบ แบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)

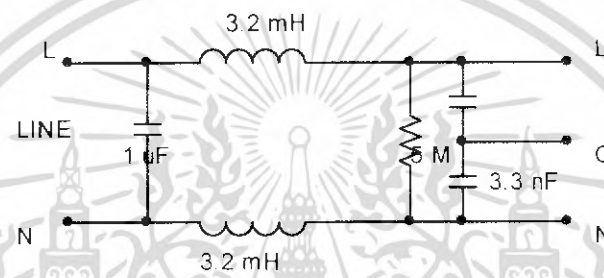


(ก) วงจรกรองแบบ LC โดยต่อ C ไว้ด้านหน้า L

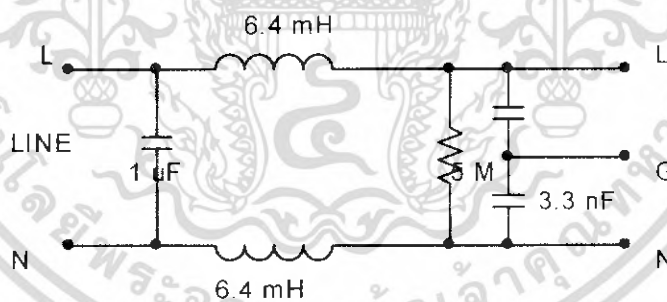
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรกรองแบบ LC โดยต่อ C ไว้ด้านหน้า L โดยเพิ่ม L เป็น 2 เท่า



(ค) วงจรกรองแบบ LC โดยต่อ C ไว้ด้านหน้า L โดยเพิ่ม C เป็น 2 เท่า

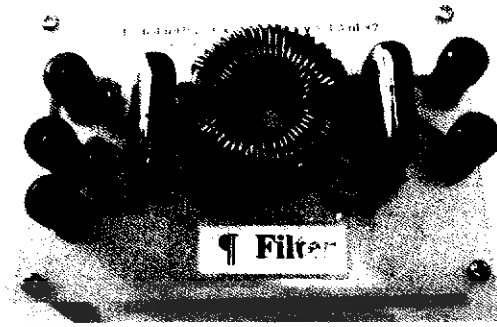


(ง) วงจรกรองแบบ LC โดยต่อ C ไว้ด้านหน้า L โดยเพิ่ม L และ C เป็น 2 เท่า

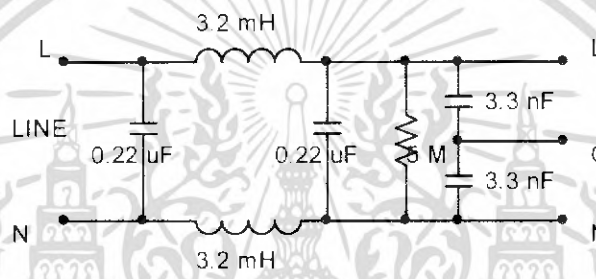
รูปที่ 4.29 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

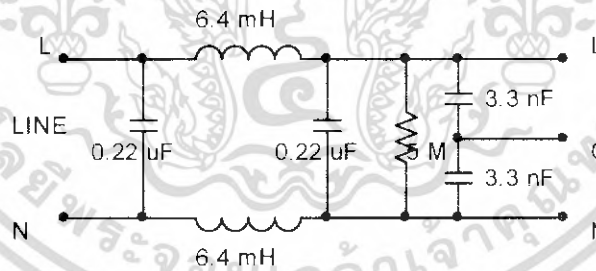
## 4.4.1.3 วงจรกรองแบบ Pi



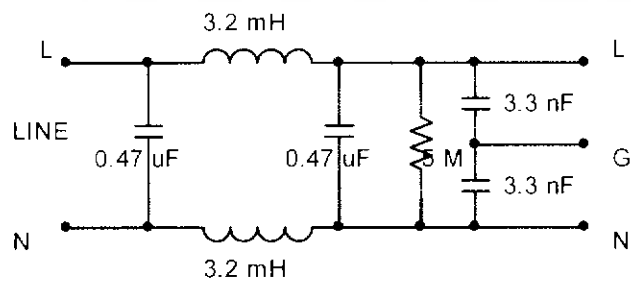
(ก) รูปวงจรกรองแบบ Pi



(ข) รูปวงจรกรองแบบ Pi ที่ได้จากการออกแบบ

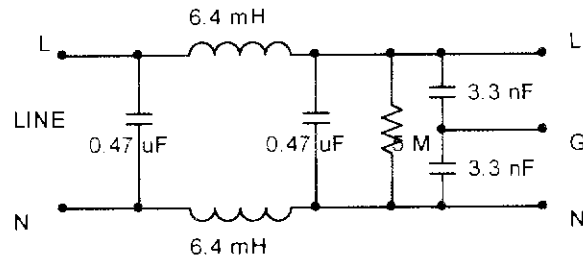


(ค) รูปวงจรกรองแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L เป็น 2 เท่า



(ง) รูปวงจรกรองแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น 2 เท่า

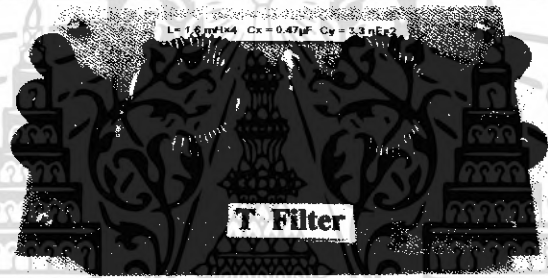
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



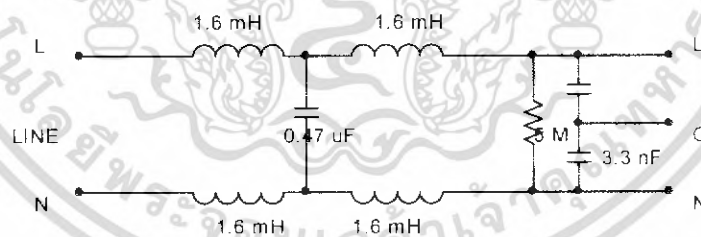
(จ) รูปวงจรกรองแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L และ C เป็น 2 เท่า

รูปที่ 4.30 วงจรกรองสัญญาณรบกวนบนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ Pi

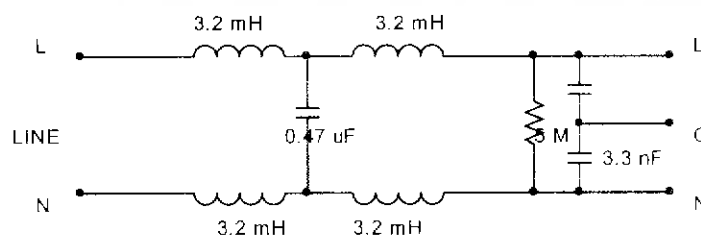
#### 4.4.1.4 วงจรกรองแบบ T



(ก) รูปวงจรกรองแบบ T

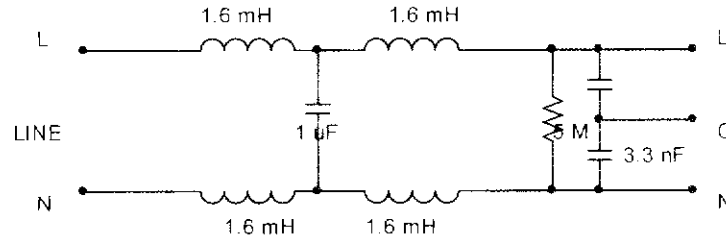


(ข) รูปวงจรกรองแบบ Pi ที่ได้จากการออกแบบ

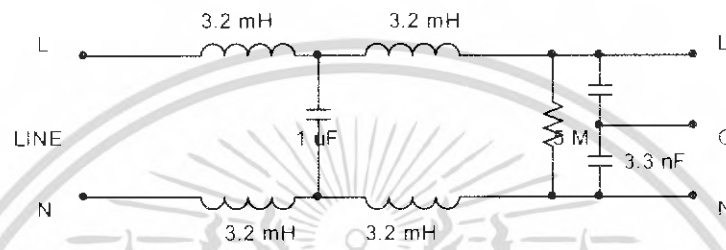


(ค) รูปวงจรกรองแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L เป็น 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) รูปวงจรรองแบบ Pi โดยเพิ่มค่า C เป็น 2 เท่า

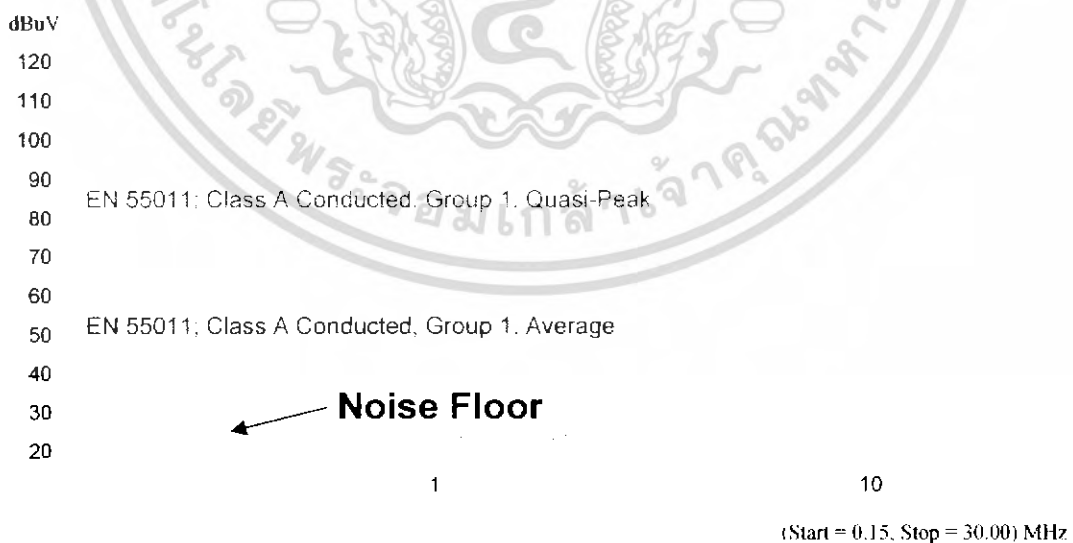


(จ) รูปวงจรรองแบบ Pi โดยเพิ่มค่า L และค่า C เป็น 2 เท่า

รูปที่ 4.31 วงจรรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ T

4.4.2 ผลการทดลองวงจรรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

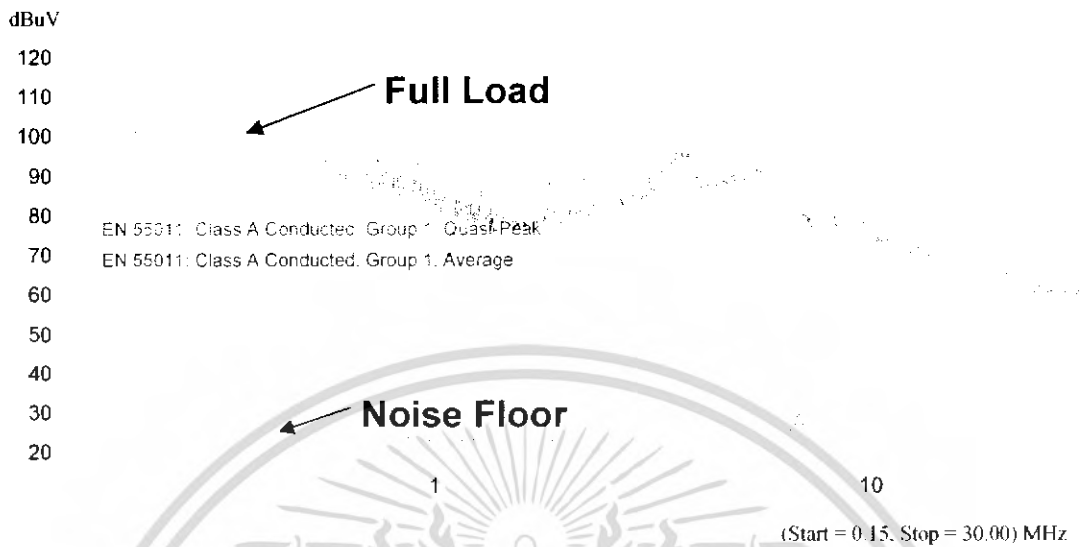
4.4.2.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนการทดลอง



รูปที่ 4.32 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนการทดลอง

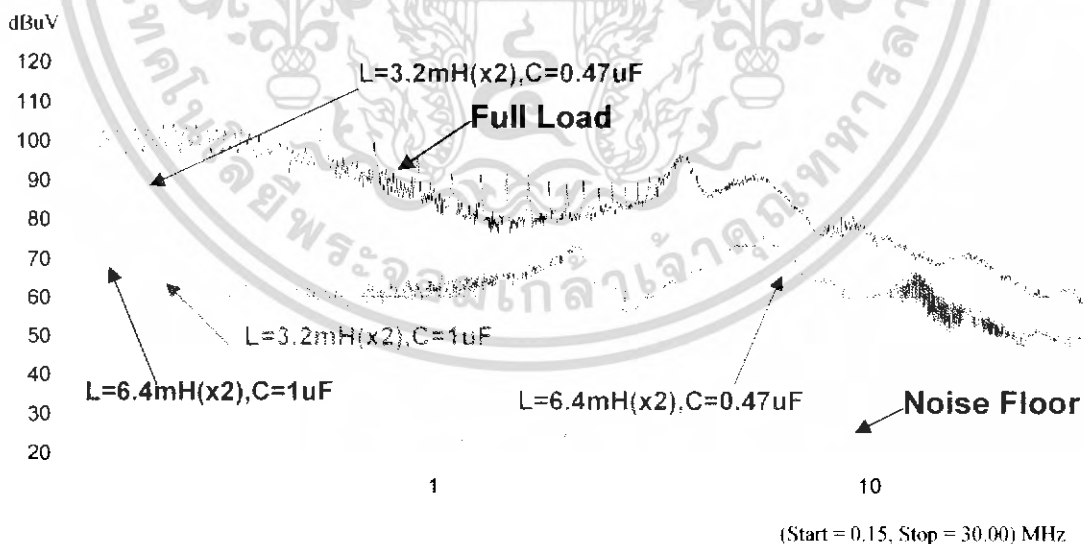
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอเตอร์ขับโหลดที่พิกัด



รูปที่ 4.33 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอเตอร์ขับโหลดที่พิกัด

#### 4.4.2.3 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอเตอร์ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ LC



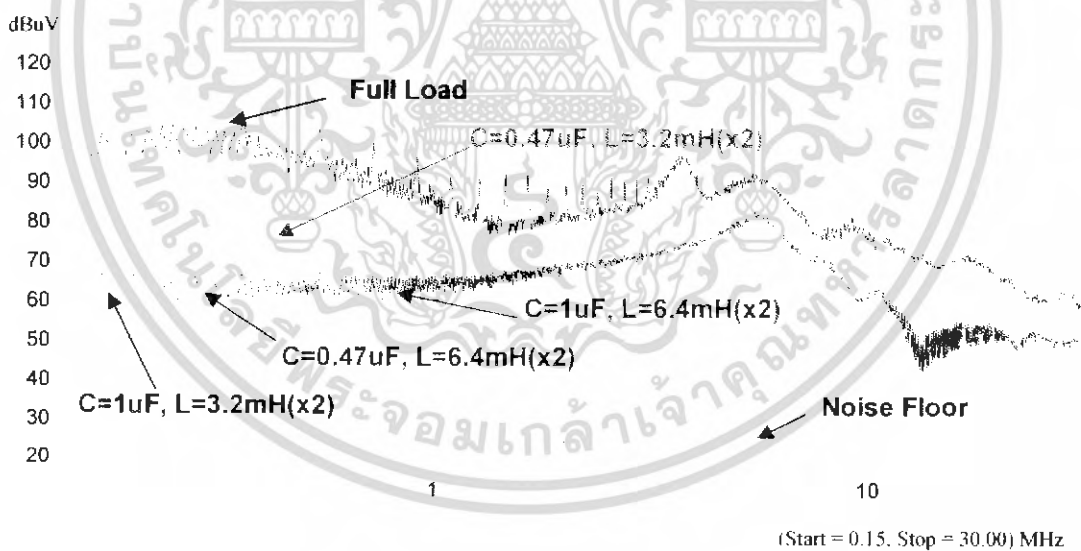
รูปที่ 4.34 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC

ชนิด วงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมปริจูดของ สัญญาณรบกวนทาง ไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความ ถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
LC	3.2(x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	71	34
			ค่าต่ำสุด	30	58	48	10
		1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	65	40
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
	6.4(x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	64	41
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
		1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	62	43
			ค่าต่ำสุด	30	58	47	11

**4.4.2.4** ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอเตอร์  
ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)



**รูปที่ 4.35** สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC (ต่อ C ไว้ด้านหน้า L) โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง

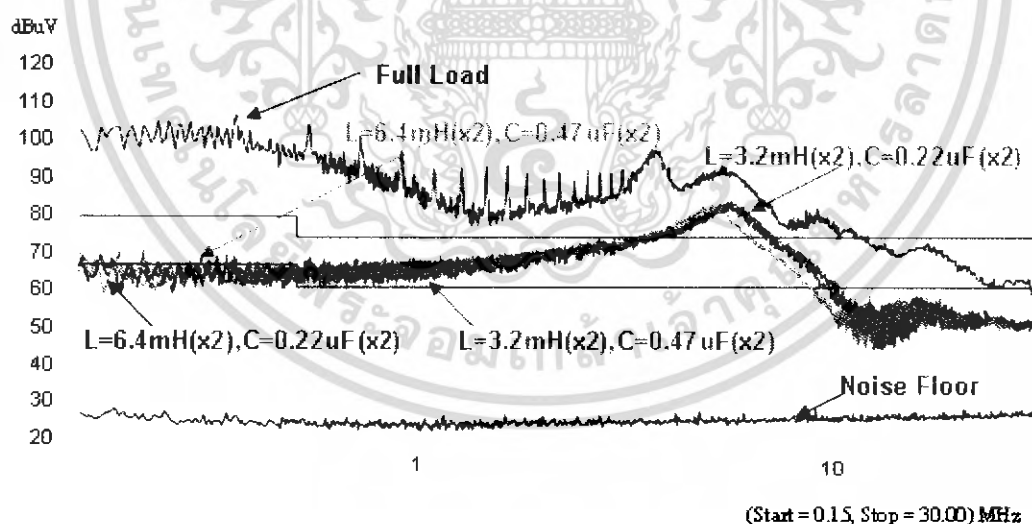
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ LC  
(ต่อ C ไว้ด้านหน้า L)

ชนิด วงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมป์ริจูดของ สัญญาณรบกวนทาง ไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความ ถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
LC	3.2(x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	73	32
			ค่าต่ำสุด	30	58	48	10
		1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	67	38
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
	6.4(x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	65	40
			ค่าต่ำสุด	30	58	51	7
		1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	65	40
			ค่าต่ำสุด	30	58	50	8

#### 4.4.2.5 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอดเดอร์

ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ Pi



**รูปที่ 4.36** สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ Pi โดย  
เปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง

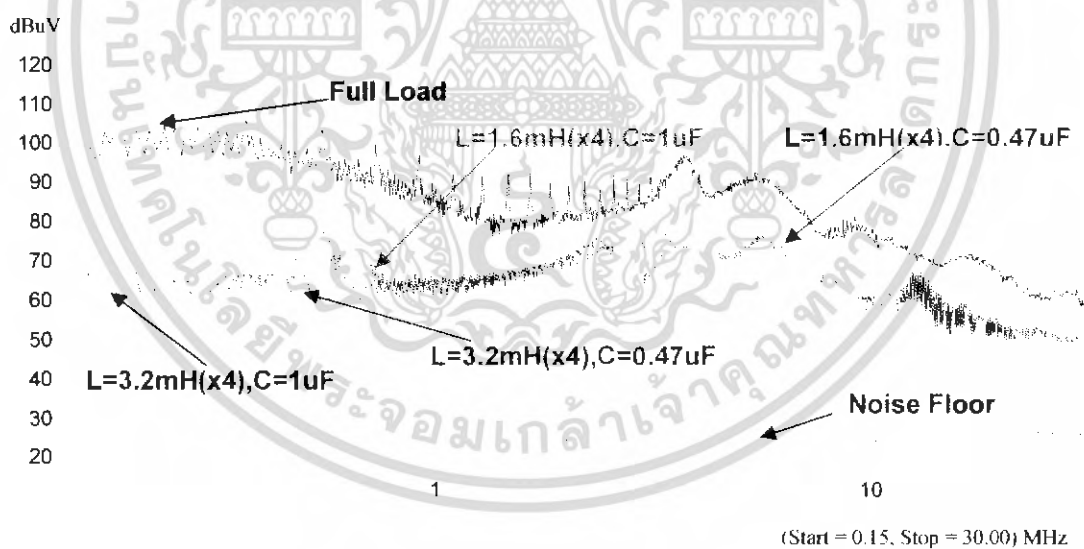
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pi

ชนิด วงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมป์รีจูดของ สัญญาณรบกวนทาง ไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความ ถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
Pi	3.2(x2)	0.22(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	66	39
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
		0.47(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	67	38
			ค่าต่ำสุด	30	58	51	7
	6.4(x2)	0.22(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	66	39
			ค่าต่ำสุด	30	58	50	8
		0.47(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	69	36
			ค่าต่ำสุด	30	58	52	6

#### 4.4.2.6 ผลการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอดเดอร์

ขับโหลดที่พิกัดเมื่อใส่วงจรกรองแบบ T



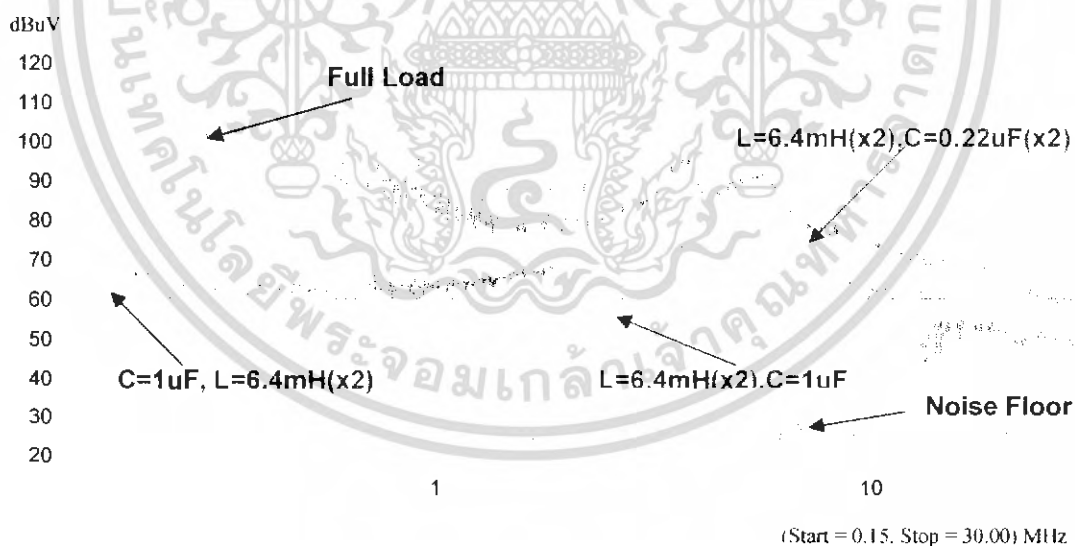
**รูปที่ 4.37** สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ T โดยเปรียบเทียบเมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** ผลการทดลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ T

ชนิด วงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมปริจูดของ สัญญาณรบกวนทาง ไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความ ถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
T	1.6(x4)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	68	37
			ค่าต่ำสุด	30	58	51	7
		1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	66	39
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
	3.2(x4)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	70	35
			ค่าต่ำสุด	30	58	50	8
		1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	65	40
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9

**4.4.2.7 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T**



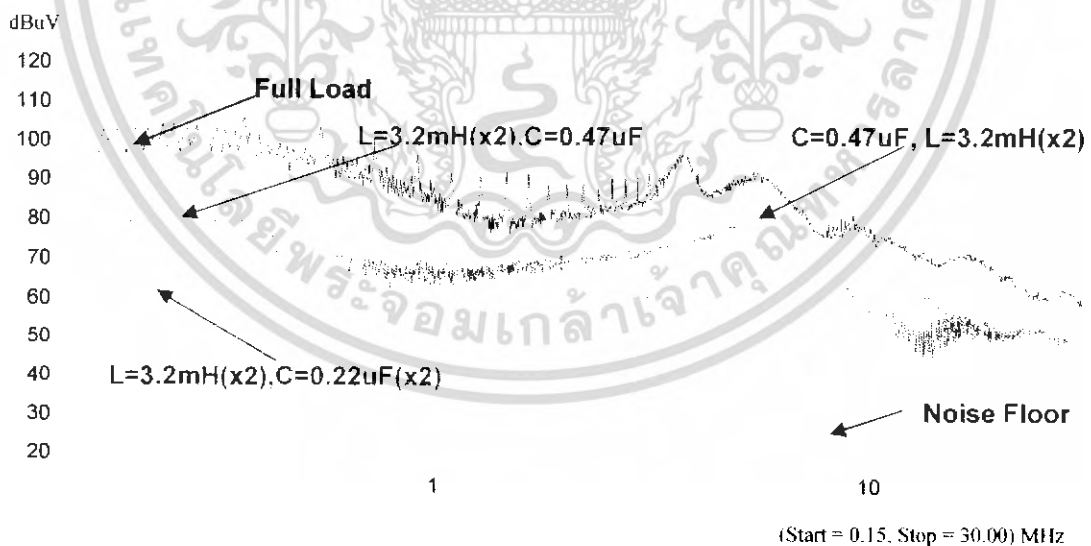
**รูปที่ 4.38** การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.6** การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรอง  
สัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T

ชนิด วงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมปริจูดของ สัญญาณรบกวน ทางไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
LC	6.4(x2)	1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	62	43
			ค่าต่ำสุด	30	58	47	11
CL	6.4(x2)	1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	65	40
			ค่าต่ำสุด	30	58	50	8
Pi	6.4(x2)	0.22(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	66	39
			ค่าต่ำสุด	30	58	50	8
T	3.4	1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	65	40
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9

**4.4.2.8** การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจร  
กรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T



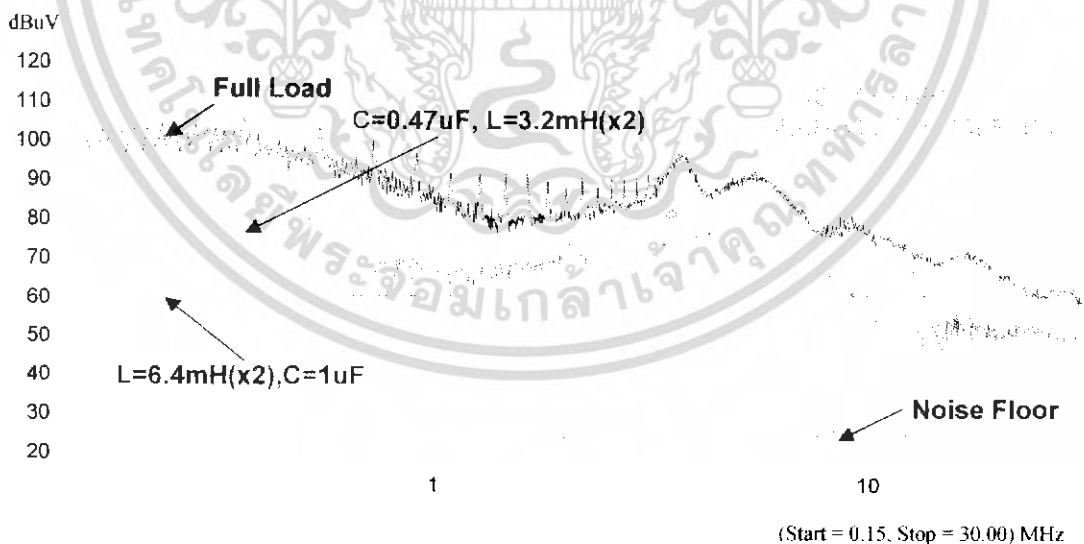
**รูปที่ 4.39** การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรอง  
สัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.7** การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ดีที่สุดเมื่อใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบ LC, Pi, T

ชนิด วงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมปริจูดของ สัญญาณรบกวน ทางไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
LC	3.2(x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	71	34
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
CL	3.2(x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	73	32
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
Pi	3.2(x2)	0.22(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	68	30
			ค่าต่ำสุด	30	58	49	9
T	1.6(x4)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	69	36
			ค่าต่ำสุด	30	58	51	7

**4.4.2.9** การเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีและไม่ดีที่สุดที่ทำขึ้นเองกับผลการกรองของวงจรกรองที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด



**รูปที่ 4.40** การเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีและไม่ดีที่สุดที่ทำขึ้นเองกับผลการกรองของวงจรกรองที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** การเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดและไม่ดีที่สุด  
ที่ทำขึ้นเองกับผลการกรองของวงจรกรองที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด

ชนิดวงจร กรอง	L (mH)	C ( $\mu$ F)	แอมปริจูดของ สัญญาณรบกวน ทางไฟฟ้าก่อนใส่ ฟิลเตอร์	ความถี่ (MHz)	dB $\mu$ V		Insertion loss (ผลต่าง)
					ก่อนใส่ ฟิลเตอร์	หลังใส่ ฟิลเตอร์	
LC	6.4(x2)	1.00	ค่าสูงสุด	0.36	105	62	43
			ค่าต่ำสุด	30	58	47	11
CL	3.2 (x2)	0.47	ค่าสูงสุด	0.36	105	73	32
			ค่าต่ำสุด	30	58	48	9
Schaffner	6(x2)	0.33(x2)	ค่าสูงสุด	0.36	105	70	35
			ค่าต่ำสุด	30	58	51	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจึงสรุปได้ว่า การที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆเข้าไปในวงจรจะทำให้ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปได้ โดย filter ทั้งสามแบบคือ แบบ LC แบบ Pi และแบบ T สามารถลดทอนได้ใกล้เคียงกันมากซึ่งถ้าเพิ่มค่า L และ C เข้าไปก็อาจจะลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากขึ้นกว่าเดิมแต่ก็ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยโปรแกรม Pspice จะเห็นได้ว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาค่อนข้างที่จะเหมือนกันหรือแตกต่างกันเล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วการจำลองการทำงานก็จะบ่งบอกว่าวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และเมื่อทำการทดลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบมาและที่มีขายอยู่ทั่วไปนั้นจะเห็นได้ว่าจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ระดับสัญญาณจะลดลงต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน CISPR 11 แสดงว่าตัวกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาใส่เข้าไปในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์สามารถลดระดับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าลงได้และจะเห็นได้ว่าวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) ที่ทำขึ้นเอง สามารถลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงได้ต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน CISPR 11 และต่ำกว่าตัวกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขายทั่วไป

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

ประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองโดยการใช้ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่จะนำมาต่อโดยประสิทธิภาพในการลดการลดทอนสัญญาณสูงสุดจะเท่ากับ 20 dB/decade ซึ่งสามารถสรุปค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมได้ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับวงจรกรองด้วยตัวเก็บประจุจะเหมาะสำหรับต่อร่วมกับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายและโหลดที่สูง เมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัววงจรกรองเอง และสำหรับวงจรกรองด้วยตัวเหนี่ยวนำจะเหมาะสำหรับต่อร่วมกับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายและโหลดที่ต่ำ เมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองเองในขณะที่วงจรกรองแบบ LC จะเหมาะกับวงจรที่ต้องการประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนเท่า 40 dB/decade โดยค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของวงจรกรองแบบ LC ดังกล่าวโดยค่าอิมพีแดนซ์สูงจะต้องต่อกับด้านที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ในขณะที่อิมพีแดนซ์ต่ำต่ออยู่กับด้านที่ต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองยังสามารถทำได้โดยการต่อวงจรกรองแบบต่างๆอนุกรมกันกันได้ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อกับวงจรกรองแบบต่างๆมีค่าไม่เหมาะสม ก็จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของวงจรกรองมีค่าน้อยลง เช่น สำหรับวงจรกรองแบบ LC อาจจะมีค่าประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนเหลือเพียง 20 dB/decade

จากการทดลอง simulation LC filter โดย Pspice จะเห็นได้ว่า filter มีส่วนช่วยในการลดทอนของสัญญาณรบกวนได้มาก และเมื่อเราเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำมากขึ้นเป็น 2 เท่าก็จะเห็นว่าการกรองสัญญาณมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากการกรองสัญญาณ จะเห็นได้ว่า insertion loss นั้นเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการหรือคือค่าสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกดังนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อ insertion loss มีมากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นก็จะมีน้อยลงซึ่งนั่นก็เป็นตัวแสดงถึงว่าวงจรฟิลเตอร์มีประสิทธิภาพที่ดี

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญในการกำหนดค่าองค์ประกอบของฟิลเตอร์คือ ค่า L, C ของฟิลเตอร์ หรือการออกแบบนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขแวดล้อมต่างๆของระบบที่จะพิจารณานั้นคือ

1. แรงดันต่ำสุด (minimal rms line voltage)
2. แรงดันสูงสุด (maximum rms line current)
3. ชนิดของโหลด
4. ความถี่ไลน์ (power line frequency)
5. ความสูญเสียที่ต้องการ (loss required) ที่ต้องลดทอน

ขั้นตอนการออกแบบจะสามารถออกแบบเลือกชนิดของฟิลเตอร์ที่ต้องการใช้โดยพิจารณาจากโพลค่าความสูญเสีย และเลือกออกแบบใน common mode หรือ differential mode คำนวณค่าไซนัสมพีแดนซ์จากอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันต่ำสุดกับค่ากระแสโพลสูงสุด โดยใช้ได้กับทั้ง common mode หรือ differential mode กำหนดค่าความถี่คัทออฟ ของฟิลเตอร์ทั้ง common mode หรือ differential mode สามารถหาได้ 2 วิธีคือ การหาโดยใช้ chain matrix และการคำนวณค่าโดยคิดจากค่าความสูญเสียในฟิลเตอร์ (fo the easy way)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรออกแบบ filter ให้เหมาะสมกับพิกัดการใช้งานก่อน ในการทดลองควรเลือกอุปกรณ์กรองให้เหมาะสมกับการใช้งานในย่านความถี่สูง และควรต่อระบบ ground ทุกครั้ง ก่อนทำการทดลอง

## 5.3 สิ่งที่ควรดำเนินการต่อไป

ทำการศึกษาและพัฒนาออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยการวิเคราะห์แยกเป็นโหมดผลร่วม และโหมดผลต่าง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard Lee Ozenbaugh, EMI Filter Design, New York, Marcel Dekker, 1996.
- [2] Mark J.Nave, Power line filter disign for switched-mode power supplies, New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [3] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราชีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพฯ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [4] จรัญศักดิ์ รงค์ภักดี วีระศักดิ์ จันทรแก้ว สวัสดิ์ ภูซงค์ และ เครื่องมาศ มากชู, "การศึกษาผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ," ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [5] รัฐพล ปานประเสริฐ วิชรพงศ์ นุเสน วิชรัตน์ ศรีวรานันท์กุล และ สมิตร์ชัย นุชชาติ, "การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า," ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [6] International Electrotechnique Commission. CISPR 11, Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment-Electromagnetic disturbance characteristics-Limits and methods of measurement. 3<sup>rd</sup> ed. Geneva: IEC Central Office. 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## รูปภาพอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง



รูปที่ ก-1 แกนเฟอร์ไรต์ (ferrite core)

รูปที่ ก-2 ขดลวดทางแดงที่ใช้พันบนแกนเหล็ก

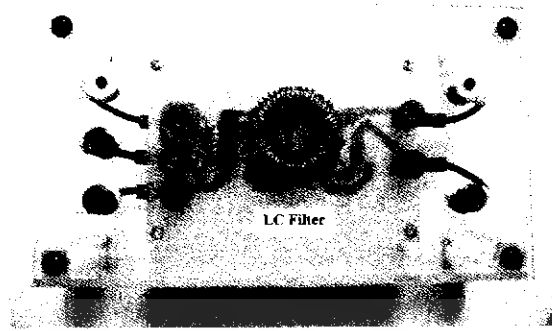
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 ตัวเหี่ยววันที่ใช้ทดลอง

รูปที่ ก-4 ตัวเก็บประจุที่ใช้ทดลอง

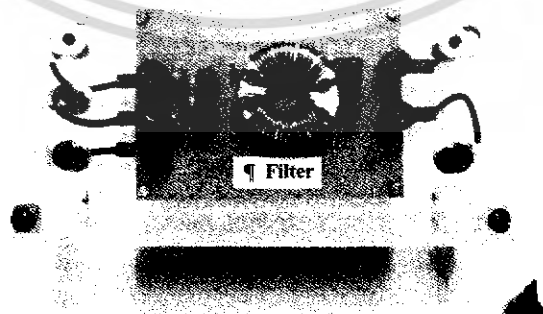
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ LC

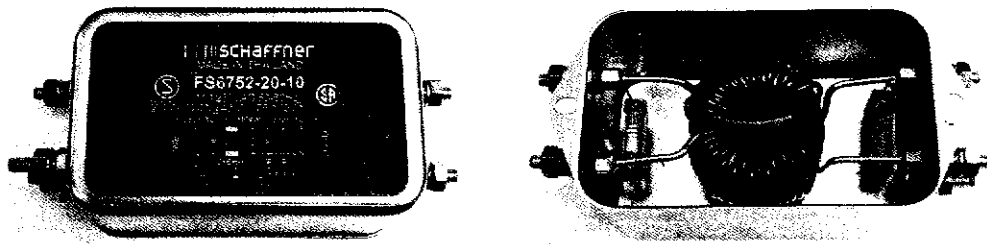


รูปที่ ก-6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ T



รูปที่ ก-7 วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ Pi

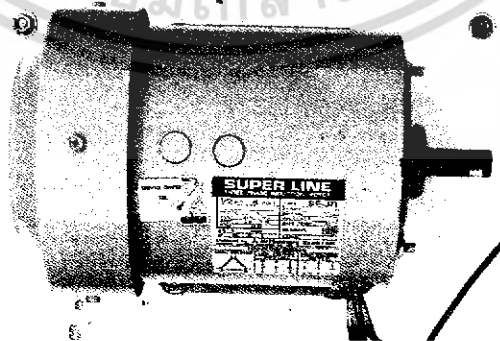
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-8 ตัวกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีตามท้องตลาด

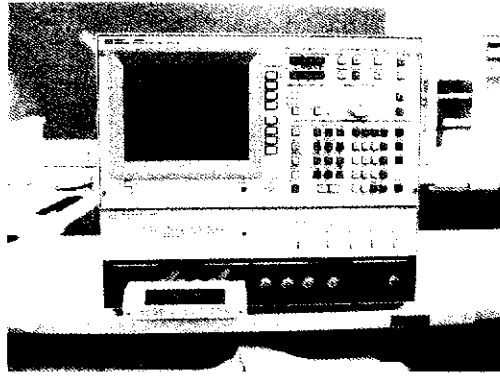


รูปที่ ก-9 FUJI Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE(0.1~1.5kW)

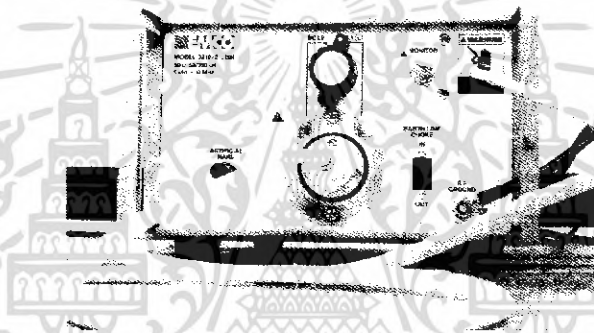


รูปที่ ก-10 Induction Motor 0.5 HP 3-Ø

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 IMPEDANCE ANALYZER



รูปที่ ก-12 LISN Model 3810/2 LISN 50  $\Omega$  50/250  $\mu$ H, 9kHz-30MHz

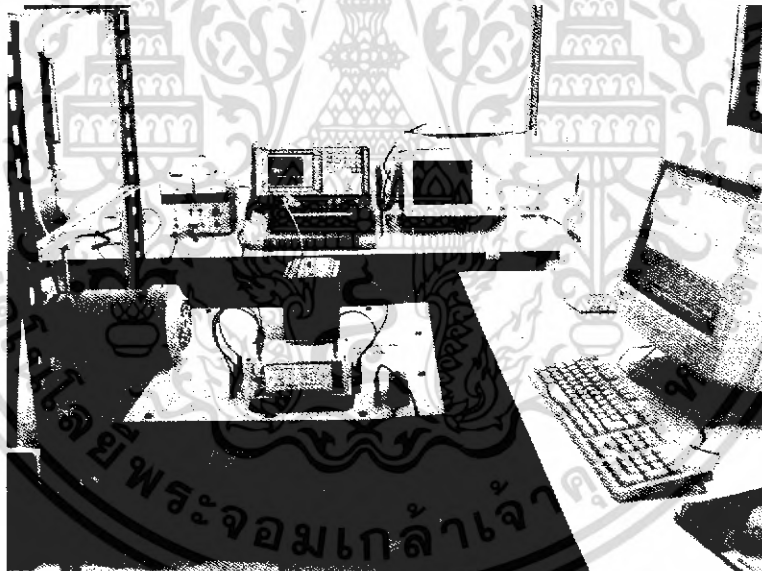


รูปที่ ก-13 EMC SPECTRUM Analyzer 9 kHz-1.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-14 คอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้ในการวัดสำหรับEMC SPECTRUM ANALYZER



รูปที่ ก-15 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

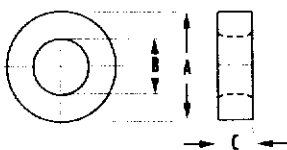


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Toroid Core Data

PART		$A_L$ (mH/1000T)								
		MECHANICAL DIMENSIONS			POWER MATERIALS			HIGH PERMEABILITY MATERIALS		
		A (OD)	B (ID)	C (HGT.)	R 2300 $\mu$ $\pm$ 25%	P 2500 $\mu$ $\pm$ 25%	F 3000 $\mu$ $\pm$ 20%	J 5000 $\mu$ $\pm$ 20%	W 10,000 $\mu$ $\pm$ 30%	H 15,000 $\mu$ $\pm$ 30%
40200TC	mm in	2.54 0.100	1.27 0.050	1.27 0.050	400	454	525	875	1,750	2,625
40301TC	mm in	3.51 0.138	1.83 0.072	1.27 0.050	380	410	495	825	1,650	2,475
40502TC	mm in	3.94 0.155	2.24 0.088	1.27 0.050	340	368	440	735	1,470	2,205
40503TC	mm in	3.94 0.155	2.24 0.088	2.54 0.100	670	716	885	1,475	2,950	4,425
40401TC	mm in	4.83 0.190	2.29 0.090	1.27 0.050	440	474	570	950	1,900	2,850
40402TC	mm in	4.83 0.190	2.29 0.090	2.54 0.100	870	948	1,140	1,900	3,800	5,700
40601TC	mm in	5.84 0.230	3.05 0.120	1.52 0.060	450	488	585	980	1,960	2,940
40603TC	mm in	5.84 0.230	3.05 0.120	3.18 0.125	940	1,020	1,225	2,040	4,080	6,120
40705TC	mm in	7.62 0.300	3.18 0.125	4.78 0.188	1,920	2,088	2,505	4,175	8,350	12,500
40907TC	mm in	9.53 0.375	5.59 0.220	7.11 0.280	1,730	1,884	2,260	3,765	7,530	11,300
41003TC	mm in	9.53 0.375	4.75 0.187	3.18 0.125	1,000	1,095	1,314	2,196	4,392	6,590
41005TC	mm in	9.53 0.375	4.75 0.187	4.78 0.188	1,510	1,650	1,980	3,308	6,616	9,920
41206TC	mm in	12.7 0.500	5.16 0.203	6.35 0.250	2,600	2,820	3,384	5,640	11,280	16,900
41303TC	mm in	12.7 0.500	7.92 0.312	3.18 0.125	680	745	894	1,488	2,976	4,460
41305TC	mm in	12.7 0.500	7.92 0.312	5.08 0.200	1,090	1,190	1,430	2,380	4,760	7,140
41306TC	mm in	12.7 0.500	7.92 0.312	6.35 0.250	1,360	1,485	1,782	2,968	5,936	8,900

To order, add coating and material code.



$\Delta A_L$  values based on testing at 5 gauss in a degaussed state.

For the cores listed here, dimensional tolerances for bare and coated cores are on pages 13.10-13.12.

Page 3.12 also lists guidelines for dimensional tolerances of all toroids.

Other core heights are available upon special request.

## Toroid Core Data

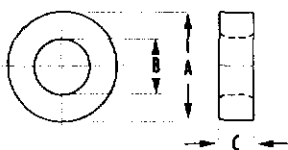
PART	MAGNETIC DATA					AVAIL. COATINGS
	$l_e$ (cm)	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )	$V_e$ (cm <sup>3</sup> )	WINDOW AREA (cm <sup>2</sup> )	CORE WEIGHT (grams per set)	
40200TC	0.553	0.008	0.0044	0.013	.03	Y
40301TC	0.782	0.0102	0.0079	0.026	.04	Y
40502TC	0.921	0.0108	0.0099	0.039	.05	Y
40503TC	0.921	0.0210	0.0193	0.039	.10	Y
40401TC	1.021	0.0154	0.0157	0.041	.09	Y
40402TC	1.021	0.0308	0.0314	0.041	.17	Y
40601TC	1.30	0.021	0.027	0.073	.14	Y
40603TC	1.30	0.044	0.057	0.073	.30	Y
40705TC	1.50	0.098	0.146	0.079	.90	Y
40907TC	2.27	0.135	0.306	0.245	1.6	0.033 Y, Z
41003TC	2.07	0.070	0.145	0.177	.82	Y, Z
41005TC	2.07	0.107	0.221	0.177	1.2	0.019 Y, Z
41206TC	2.46	0.221	0.554	0.209	3.3	0.046 Y, Z
41303TC	3.12	0.072	0.225	0.493	1.2	0.035 Y, Z
41305TC	3.12	0.117	0.364	0.493	1.9	0.058 Y, Z
41306TC	3.12	0.146	0.457	0.493	2.4	0.072 Y, Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Toroid Core Data (con't)

PART	MECHANICAL DIMENSIONS			POWER MATERIALS			HIGH PERMEABILITY MATERIALS			
	A (OD)	B (ID)	C (HGT.)	R	P	F	J	W	H	
				2300 $\mu$ $\pm$ 25%	2500 $\mu$ $\pm$ 25%	3000 $\mu$ $\pm$ 20%	5000 $\mu$ $\pm$ 20%	10,000 $\mu$ $\pm$ 30%	15,000 $\mu$ $\pm$ 30%	
41406TC	mm	12.7	7.14	6.35	1,660	1,805	2,166	3,612	7,224	10,800
	in	0.500	0.281	0.250						
41407TC	mm	12.7	7.14	4.78	1,240	1,356	1,630	2,715	5,430	8,140
	in	0.500	0.281	0.188						
41506TC	mm	13.2	7.37	3.96	1,020	1,111	1,334	2,295	4,590	6,880
	in	0.520	0.290	0.156						
41435TC	mm	13.6	7.01	3.51	1,040	1,130	1,350	2,260	4,520	6,780
	in	0.535	0.276	0.138						
41450TC	mm	14.0	8.99	5.00	990	1,080	1,290	2,160	4,320	6,480
	in	0.551	0.354	0.197						
41605TC	mm	15.9	8.89	4.70	1,260	1,375	1,650	2,760	5,520	8,280
	in	0.625	0.350	0.185						
41809TC	mm	18.4	9.75	10.3	2,810	3,050	3,660	6,115	12,200	18,300
	in	0.726	0.384	0.404						
42106TC	mm	20.6	12.7	6.35	1,380	1,500	1,680	2,800	5,600	8,400
	in	0.810	0.500	0.250						
42109TC	mm	20.6	12.7	8.89	1,930	2,100	2,520	4,200	8,400	12,600
	in	0.810	0.500	0.350						
42206TC	mm	22.1	13.7	6.35	1,380	1,510	1,812	3,020	6,040	9,060
	in	0.870	0.540	0.250						
42207TC	mm	22.1	13.7	7.92	1,720	1,875	2,250	3,700	7,400	11,100
	in	0.870	0.540	0.312						
42212TC	mm	22.1	13.7	12.7	2,770	3,020	3,624	6,040	12,080	18,100
	in	0.870	0.540	0.500						
42507TC	mm	25.4	15.5	7.92	1,800	1,958	2,348	3,913	7,825	11,700
	in	1.000	0.610	0.312						
42508TC	mm	25.4	15.5	10.0	2,220	2,420	2,900	4,830	9,660	14,490
	in	1.000	0.610	0.394						
42908TC	mm	29.0	19.0	7.49	1,450	1,585	1,902	3,170	6,340	9,510
	in	1.142	0.748	0.295						
42915TC	mm	29.0	19.0	15.2	2,960	3,222	3,868	6,447	12,894	19,300
	in	1.142	0.748	0.600						

To order, add coating and material code.



$\Delta A_L$  values based on testing at 5 gauss in a de-gaussed state.

For the cores listed here, dimensional tolerances for bare and coated cores are on pages 13.10-13.12. Page 13.12 also lists guidelines for dimensional tolerances of all toroids.

Other core heights are available upon special request.

## Toroid Core Data (con't)

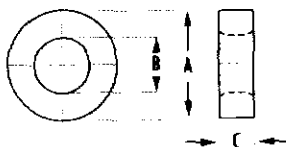
	MAGNETIC DATA						AVAIL. COATINGS
	$l_e$ (cm)	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )	$V_e$ (cm <sup>3</sup> )	WINDOW AREA (cm <sup>2</sup> )	CORE WEIGHT (grams per set)	$W_{aAc}$ (cm <sup>4</sup> )	
<b>41406TC</b>	2.95	0.169	0.498	0.400	2.7	0.064	Y, Z
<b>41407TC</b>	2.95	0.126	0.373	0.400	1.9	0.050	Y, Z
<b>41506TC</b>	3.06	0.109	0.332	0.426	1.9	0.046	Z
<b>41435TC</b>	3.01	0.108	0.326	0.386	1.8	0.042	Z
<b>41450TC</b>	3.50	0.120	0.421	0.636	2.2	0.076	Z
<b>41605TC</b>	3.68	0.153	0.562	0.620	2.8	0.094	Z
<b>41809TC</b>	4.14	0.403	1.67	0.746	9.9	0.301	Z
<b>42106TC</b>	5.00	0.231	1.15	1.27	5.4	0.293	Z
<b>42109TC</b>	5.00	0.326	1.63	1.27	8.1	0.414	Z
<b>42206-TC</b>	5.42	0.250	1.36	1.48	6.4	0.370	Z
<b>42207-TC</b>	5.42	0.315	1.71	1.48	8.5	0.466	Z
<b>42212-TC</b>	5.42	0.511	2.77	1.48	13.5	0.756	Z
<b>42507-TC</b>	6.17	0.374	2.31	1.89	11.6	0.707	Z
<b>42508-TC</b>	6.17	0.475	2.93	1.89	14.9	0.898	Z
<b>42908-TC</b>	7.32	0.358	2.62	2.84	12.9	1.02	Z
<b>42915-TC</b>	7.32	0.740	5.42	2.84	27.6	2.10	Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Toroid Core Data (con't)

SIZE	MECHANICAL DIMENSIONS			POWER MATERIALS			HIGH PERMEABILITY MATERIALS		
	A (OD)	B (ID)	C (HGT.)	R 2300 $\mu$ $\pm$ 25%	P 2500 $\mu$ $\pm$ 25%	F 3000 $\mu$ $\pm$ 20%	J 5000 $\mu$ $\pm$ 20%	W 10,000 $\mu$ $\pm$ 30%	H 15,000 $\mu$ $\pm$ 30%
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
43113TC	31.0	19.0	13.0	2,850	3,100	3,720	6,200	12,400	-
	1.220	0.748	0.512						
43205TC	32.0	15.0	4.50	1,480	1,610	1,930	3,220	6,440	-
	1.260	0.591	0.177						
43610TC	36.0	23.0	10.0	2,030	2,210	2,726	4,543	9,085	-
	1.417	0.906	0.394						
43615TC	36.0	23.0	15.0	3,100	3,366	4,040	6,736	13,400	-
	1.417	0.906	0.590						
43806TC	38.1	19.0	6.35	2,020	2,200	2,640	4,400	8,800	-
	1.500	0.750	0.250						
43813TC	38.1	19.0	12.7	3,850	4,185	5,020	8,365	16,700	-
	1.500	0.750	0.500						
43825TC	38.1	19.0	25.4	8,060	8,762	10,040	16,730	33,400	-
	1.500	0.750	1.000						
44416TC	44.5	19.0	15.9	5,360	5,830	7,000	11,600	23,200	-
	1.750	0.750	0.625						
44715TC	46.9	27.0	15.0	3,700	4,030	4,840	8,075	16,100	-
	1.846	1.063	0.591						
44916TC	49.1	33.8	15.9	2,710	2,950	3,540	5,900	11,800	-
	1.932	1.332	0.625						
44920TC	49.1	31.8	15.9	2,790	3,032	3,640	6,065	12,130	-
	1.932	1.252	0.625						
44925TC	49.1	31.8	19.0	3,420	3,718	4,460	7,435	14,870	-
	1.932	1.252	0.750						
44932TC	49.1	33.8	31.8	5,430	5,900	7,080	11,800	23,600	-
	1.932	1.332	1.250						
46113TC	61.0	35.6	12.7	3,140	3,491	4,107	6,845	13,690	-
	2.400	1.400	0.500						
46326TC	63.0	38.0	25.0	5,770	6,270	7,530	12,500	25,100	-
	2.480	1.496	0.984						
47313TC	73.7	38.9	12.7	3,700	4,024	4,880	8,140	16,280	-
	2.900	1.530	0.500						
47325TC	3.66	38.860	25.40	7,400	8,050	9,760	16,280	32,560	-
	2.900	1.530	1.000						
48613TC	85.7	55.5	12.7	2,510	2,726	3,310	5,520	11,040	-
	3.375	2.187	0.500						

To order, add coating and material code.



$\Delta A_L$  values based on testing at 5 gauss in a de-gaussed state.

For the cores listed here, dimensional tolerances for bore and coated cores are on pages 13.10-13.12.

Page 13.12 also lists guidelines for dimensional tolerances of all toroids.

Other core heights are available upon special request.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Toroid Core Data (con't)

	MAGNETIC DATA						AVAIL. COATINGS
	$l_e$ (cm)	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )	$V_e$ (cm <sup>3</sup> )	WINDOW AREA (cm <sup>2</sup> )	CORE WEIGHT (grams per set)	$W_{aAc}$ (cm <sup>4</sup> )	
<b>43113TC</b>	7.55	0.745	5.62	2.83	29.3	2.11	<b>Z</b>
<b>43205TC</b>	6.72	0.345	2.32	1.77	12.9	0.611	<b>Z</b>
<b>43610TC</b>	8.97	0.628	5.63	4.15	29.4	2.61	<b>Z</b>
<b>43615TC</b>	8.97	0.946	8.48	4.15	44.0	3.93	<b>Z</b>
<b>43806TC</b>	8.30	0.570	4.73	2.85	26.4	1.62	<b>Z</b>
<b>43813TC</b>	8.30	1.15	9.55	2.85	51.7	3.27	<b>Z</b>
<b>43825TC</b>	8.30	2.31	19.2	2.85	103.4	6.58	<b>Z</b>
<b>44416TC</b>	8.87	1.87	16.6	2.85	80.8	5.33	<b>Z</b>
<b>44715TC</b>	11.0	1.42	15.7	5.72	84	8.12	<b>Z</b>
<b>44916TC</b>	12.7	1.16	14.8	8.99	75.3	10.4	<b>Z</b>
<b>44920TC</b>	12.3	1.19	14.7	7.94	74.6	9.45	<b>Z</b>
<b>44925TC</b>	12.3	1.46	18.0	7.94	91.0	11.6	<b>Z</b>
<b>44932TC</b>	12.7	2.36	30.0	8.99	150.6	21.2	<b>Z</b>
<b>46113TC</b>	14.5	1.56	22.5	9.93	117.3	15.5	<b>Z</b>
<b>46326TC</b>	15.2	3.04	46.2	11.3	231	34.4	<b>Z</b>
<b>47313TC</b>	16.5	2.12	35.5	11.9	177	25.2	<b>Z</b>
<b>47325TC</b>	354	16.5	4.24	71	11.9	50.4	<b>Z</b>
<b>48613TC</b>	21.5	1.87	40.2	24.2	203	45.2	<b>Z</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้