บทที่ 7
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ได้นำเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างมาประยุกต์ใช้ และพัฒนาตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างให้มีความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้สูง เมื่อใช้ปริมาตรเท่ากับขนาดของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมเพียงตัวเดียวเท่านั้น โดยวิทยานิพนธ์จะทำการจำลองและทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดการทำงานต่างๆ และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบและหลักการทางทฤษฎีของสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง ว่าทำไมวงจรกรองสัญญาณรบรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอจึงให้ผลที่ดีกว่าแบบทั่วไป

สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำเสนอทั้ง 3 แบบ คือ

1 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป (การพันแบบ CM)
2 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM (การพันแบบ ICM)
3 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง แบบ PICM (การพันแบบ PICM)

7.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือหัวข้อที่ 7.1.1 จะเป็นการสรุปผลการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างของทั้ง 3 แบบ หัวข้อที่ 7.1.2 จะเป็นการสรุปผลในเงื่อนไขการทดสอบ และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการสรุปงานวิจัยในด้านอื่นๆ ดังต่อไปนี้

7.1.1 สรุปผลการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

จากการทดสอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างของการพันทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

- การใช้ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างของการพันทั้ง 3 แบบ ที่นำเสนอจะไม่สามารถการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตลอดย่านความถี่ แต่สามารถลดทอนได้ในระดับหนึ่ง และยังสูงกว่าเส้นขีดจำกัดมาตรฐานกำหนด ดังในรูปที่ 6.6
- วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่การพันแบบ PICM จะเหมาะสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือผลิตภัณฑ์ที่มีสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างสูง เนื่องจากรูปแบบการพัน

แบบ PICM จะมีค่าเหนี่ยวนำรั่วไหล $L_{CM,leakage}$ ที่เกิดจากรูปแบบการพันสูง ทำให้สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้

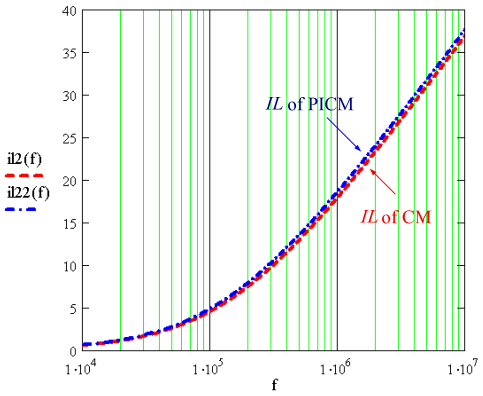
- สำหรับการพันแบบ PICM ควรจะเลือกเลือกแกนเหล็กชนิดผงโลหะให้มีค่าความซาบซึมสูงๆ เพื่อที่จะให้มีค่าเหนี่ยวนำโหมดผลต่างมีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาตรที่เท่ากัน
- ในการเลือกแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์สำหรับตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม ควรจะเลือกแกนเหล็กที่มีค่าความซาบซึมต่อความถี่สูงๆ และ ในการเลือกแกนเหล็กชนิดผงโลหะสำหรับตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ควรจะเลือกเนื้อสารแกนเหล็กให้เหมาะกับการใช้งาน

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแตกต่างกันสามารถสรุปโครงสร้างการพัน และรายละเอียดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 7.1 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

ตารางที่ 7.1 โครงสร้างการพันและวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

	การพันของทั้ง 3 แบบ		
	แบบ CM	แบบ ICM	แบบ PICM
ลักษณะการพัน	ง่าย	ง่าย	ยาก
L_{DM} ที่เกิดขึ้นจากการพัน	เท่ากับการออกแบบ	น้อยกว่าการออกแบบ	มากกว่าการออกแบบ
L_{CM} ที่เกิดขึ้นจากการพัน	เท่ากับการออกแบบ	มากกว่าการออกแบบ	มากกว่าการออกแบบ
C_X จากการออกแบบ	เท่ากับการออกแบบ	มาก	น้อย
C_Y จากการออกแบบ	เท่ากับการออกแบบ	น้อย	น้อย

จากรูปที่ 7.1 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนของเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการที่ 4.37 และ 4.43 โดยใช้โปรแกรม Mathcad จำลองการหาค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวน และจากสมการที่ 4.37 จะแสดงค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ CM และสมการที่ 4.43 จะแสดงค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ PICM และผลจากการจำลองจะเห็นว่าค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนจะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 7.1 การเปรียบเทียบค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ 4.37 และ 4.43

7.1.2 สรุปผลในเงื่อนไขการทดสอบ

จากเงื่อนไขการทดสอบทั้งหมด 3 เงื่อนไข สามารถสรุปได้ดังนี้

7.1.2.1 ที่จุดเปลี่ยนความถี่ (cut-off frequency) เดียวกัน

- ที่จุดเปลี่ยนความถี่เดียวกันการพันแบบ PICM จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากที่สุด ถึง 33 dB เมื่อพิจารณาโหมดผลร่วมที่ความถี่ 821 kHz เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} และตัวเก็บประจุ C_Y และตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล $L_{CM,leakage}$ ที่เกิดจากการพันช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมได้มากกว่าการพันทั้ง 2 แบบ และเมื่อพิจารณาโหมดผลต่าง ที่จุดเปลี่ยนความถี่ ที่ความถี่ 224 kHz การพันแบบ CM จะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากที่สุด ถึง 32.7 dB

- จากการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ จะเห็นว่าที่ความถี่สูงตั้งแต่ 10 MHz - 30 MHz ยังมีผลของสัญญาณรบกวนที่สูงกว่าเส้นขีดกำจัดมาตรฐานกำหนด เป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์แฝงของวงจรหรือ เป็นผลมาจากการวางตัวอุปกรณ์

- ในการจำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนเพื่อให้ได้ผลการจำลองให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ควรจะนำวงจรที่สร้างขึ้นจริงมาทำการวัดหาค่าพารามิเตอร์แฝงของวงจร แล้วเวลาจำลองการทำงานควรจะนำค่าพารามิเตอร์แฝงที่ได้จากการวัดมาใส่ในวงจรที่จะจำลองการทำงาน

7.1.2.2 กำหนดค่ากระแสรั่วไหลสูงสุด ($C_Y = 3300$ pF)

- ในเงื่อนไขนี้จะเป็นการพิจารณาโหมดร่วม เนื่องจากการกำหนดค่าตัวเก็บประจุ C_Y มีค่าเก็บประจุสูงสุดตามที่มาตรฐานยอมรับได้ เพราะการทำงานในโหมดผลร่วมจะมีตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} และตัวเก็บประจุ C_Y ช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และจากการทดสอบ

การพันแบบ PICM สามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนได้สูงที่สุด ดังในรูปที่ 6.47 เนื่องจากค่าเหนี่ยวนำที่เกิดจากรูปแบบการพัน และตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล $L_{CM,leakage}$ จะมีค่าเหนี่ยวนำมากกว่าการพันทั้ง 2 แบบ ดังสมการที่ 4.43

- จากการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ แม้ว่าจะกำหนดให้ตัวเก็บประจุ C_Y มีค่าเก็บประจุสูงสุดตามที่มาตรฐานยอมรับได้ จะเห็นว่าที่ความถี่สูงตั้งแต่ 10 MHz - 30 MHz ยังมีผลของสัญญาณรบกวนที่สูงกว่าเส้นขีดกำจัดมาตรฐานกำหนด

7.1.2.3 กำหนดค่า C_X ให้มีค่าเท่ากับการออกแบบ ($C_X = 0.68\ \mu F$)

- จากการที่กำหนดค่าตัวเก็บประจุ C_X ให้มีค่าเท่ากับการออกแบบ ทดสอบเพื่อ จะดูผลของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่มีค่าเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ที่เกิดจากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำ ว่าจะมีผลอย่างไรต่อการทำงานในโหมดผลต่าง สามารถสรุปได้ว่า การพันแบบ PICM นั้นสามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนได้สูงที่สุด 32.6 dB ที่ความถี่ 3 MHz เนื่องจากค่าเหนี่ยวนำโหมดผลต่างที่เกิดจากรูปแบบการพันจะมีค่าเหนี่ยวนำมากกว่าการพันทั้ง 2 แบบ

- จากการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนทั้ง 3 แบบ แม้ว่าจะกำหนดค่าตัวเก็บประจุ C_X ให้มีค่าเท่ากับการออกแบบ จะเห็นว่าที่ความถี่สูงตั้งแต่ 10 MHz - 30 MHz ยังมีผลของสัญญาณรบกวนที่สูงกว่าเส้นขีดกำจัดมาตรฐานกำหนด เป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์แฝงของวงจรหรือ เป็นผลมาจากการวางตัวอุปกรณ์

จากการทดสอบการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนในบทที่ 6 สามารถสรุปการผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของการพันทั้ง 3 แบบ ที่ทำงานในโหมดการทำงานต่างๆ ได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของการพันทั้ง 3 แบบ

	สัญญาณรบกวน	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของทั้ง 3 แบบ		
		แบบ CM	แบบ ICM	แบบ PICM
เงื่อนไขที่ 1	CM	✓✓✓	✓✓	✓✓✓
	DM	✓✓	✓	✓✓✓
	Total	✓✓✓	✓	✓✓
เงื่อนไขที่ 2	CM	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	DM	✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Total	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
เงื่อนไขที่ 3	CM	✓✓✓	✓✓	✓✓✓
	DM	✓✓	✓✓✓	✓✓✓
	Total	✓✓✓	✓✓	✓✓

เงื่อนไข

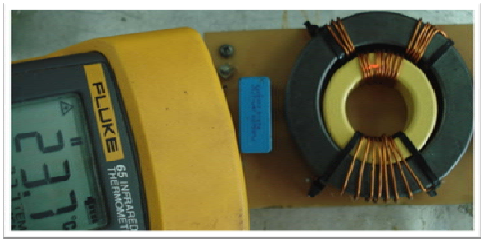
✓✓✓ คือ ความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากที่สุด

✓✓ คือ ความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนได้ปานกลาง

✓ คือ ความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนได้น้อยที่สุด

7.1.3 การสรุปงานวิจัยในด้านอื่นๆ

- อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง สามแบบ จะมีอุณหภูมิที่ต่ำประมาณ 23.7 °C เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ มีพิกัดการใช้งานที่สูง และวงจรชุดคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนมีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 7.2 การวัดอุณหภูมิของขดลวดที่เกิดจากพันแบบ PICM

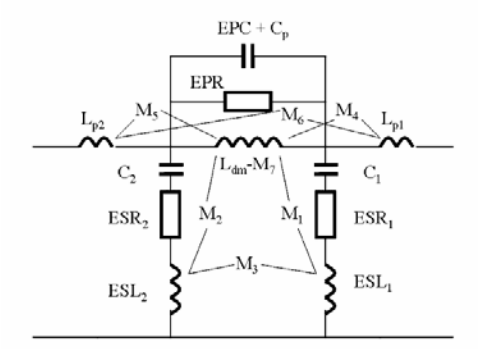
- จากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM จะมีความยุ่งยากในการพันมาก เนื่องจากการพันแบบ PICM จะต้องพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} ให้มีทิศทางของฟลักซ์ไปในทิศทางเดียวกันทั้งสองขดลวด แต่ถ้าพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} ให้มีทิศทางของฟลักซ์หักล้างกันทำให้การพันแบบ PICM จะไม่มีผลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} เลย

7.2 ข้อเสนอแนะ

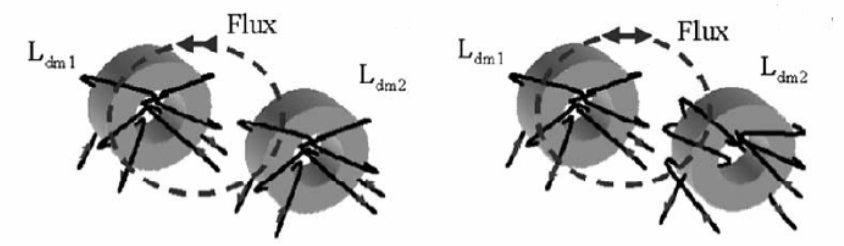
จากการศึกษาของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีความยุ่งยาก และมีเงื่อนไขการทำงานมาก และในวิทยานิพจน์นี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าวิธีหนึ่ง ที่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และผลจากการทดสอบจะพบปัญหาว่า ที่ย่านความถี่สูง ยังมีผลของสัญญาณรบกวนที่เกินกว่าเส้นขีดจำกัดมาตาฐานกำหนด และจากการศึกษาพบว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในย่านความถี่สูงนั้น เกิดจากค่าพารามิเตอร์แฝงของวงจรหรือ เป็นผลมาจากการวางตัวอุปกรณ์ จึงทำให้มีงานวิจัยมากมายที่ให้ความสำคัญกับเรื่องนี้ จากบทความเรื่อง Effect of Parasitic Parameters on EMI Filter Performance [23] และบทความเรื่อง Inductor Winding Capacitance Cancellation Using Mutual Capacitance Concept for Noise Reduction

Application [24] และจากบทความเรื่อง Analysis the Inductive Coupling Effects on the Differential Mode EMI in Power Converter [25] ได้นำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และจากรูปที่ 7.3 ได้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์แฝงที่เกิดขึ้นในของวงจรกรองสัญญาณรบกวน และค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงของตัวอุปกรณ์ภายในวงจรสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 7.4 และรูปที่ 7.5 โดยค่าพารามิเตอร์แฝง และค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงของตัวอุปกรณ์ภายในวงจรสัญญาณรบกวนนี้ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในย่านความถี่สูง

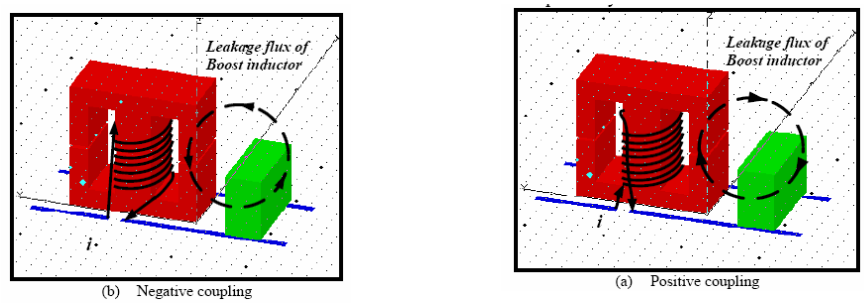
สำหรับงานวิจัยที่น่าจะทำต่อในอนาคตก็คือ การศึกษาค่าพารามิเตอร์แฝง และการเชื่อมโยงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในของวงจรกรองสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูง เพื่อที่จะสามารถคลอบคลุมการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในย่านความถี่สูง



รูปที่ 7.3 รูปแบบการวิเคราะห์วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า [23]



รูปที่ 7.4 รูปแบบการวิเคราะห์วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า [23]



รูปที่ 7.5 การเชื่อมโยงของฟลักซ์ของตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุของวงจรสัญญาณรบกวน [25]