

เทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำแบบใหม่สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการจำกัดขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

A novel of integrated EMI inductor using optimizing inductor-volume approach

ปฐวิติ บุญมา, วุฒิพล ชาริธีรเศรษฐ์ และ วีระเชษฐ์ ชันเงิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2737-3000 ต่อ 3322 E-mail: u_jain2@yahoo.com, vuttiaponnet@yahoo.com, kkveerac@kmitl.ac.th

Website: www.kmitl.ac.th/emc

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำใหม่คร่อม (common mode choke) และตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (differential mode choke) สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) โดยยึดกรอบปริมาตรเท่ากับขนาดของตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อมเพียง หนึ่งตัวเท่านั้น จากการเปรียบเทียบผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (conducted EMI) แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำ ที่นำเสนอจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้มากกว่าตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อมแบบเก่า (conventional common mode choke) ประมาณ 10 dB μ V ระหว่างย่านความถี่ 2 MHz – 15 MHz ในขณะที่ความถี่ในย่านอื่นจะมีขนาดใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า, ตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อม

Abstract

In this paper, the novel integrated common mode choke and differential mode choke, for EMI filter application, using optimizing inductor-volume approach is proposed. The conducted EMI for proposed inductor is verified by experiment. The experimental results show that proposed integrated EMI inductor can decrease the conducted EMI greater than conventional common mode inductor for 10 dB μ V during frequency range 2 MHz – 15 MHz. Moreover, the conducted EMI at other frequencies are similar.

Keywords: EMI Filter, Common Mode Choke, Integrated magnetic

1. คำนำ

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) มีหน้าที่หลักในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านทางสาย

ตัวนำที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (noise source) เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยย่านความถี่ที่พิจารณาสำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 จะพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 kHz – 30 MHz [1] ส่วนประกอบหลักของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อม (common mode choke) ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (differential mode choke) ตัวเก็บประจุผลต่าง (C_X) และตัวเก็บประจุผลร่วม (C_Y) ซึ่งโดยทั่วไป ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับโหมดผลต่างและโหมดผลร่วมจะเป็นแบบแยกแกันแม่เหล็กออกจากกัน เป็นผลทำให้ขนาดของวงจรกรองแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำเป็นหลัก และด้วยสาเหตุดังกล่าว ทำให้มีความพยายามในการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อมและตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างเข้าด้วยกันโดยให้มีขนาดเล็กที่สุด [2-4]

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อม และตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างแบบใหม่สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยยึดกรอบปริมาตรเท่ากับขนาดของตัวเหนี่ยวนำโหมดคร่อมเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น

2. การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสายตัวนำ

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำสามารถแบ่งได้สองรูปแบบกล่าวคือ

- สัญญาณรบกวนโหมดคร่อม (Common Mode Interference: CM)
- สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (Differential Mode Interference: DM)

สำหรับนิยามของสัญญาณรบกวนโหมดคร่อมคือ ความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำเทียบกับสายกราวด์ ในขณะที่นิยามของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างคือ ความแตกต่างของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำ

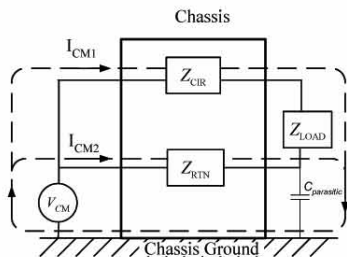
ดังนั้นในกรณีวงจรไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งประกอบด้วยสายไลน์ (L) สายนิวตรอน (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้า

โหมดผลร่วม (common mode voltage) และค่าแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง (differential mode voltage) ดังต่อไปนี้

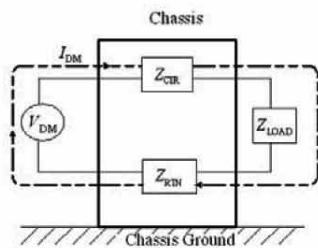
$$V_c = \frac{(V_{LG} + V_{NG})}{2} \quad (1)$$

$$V_d = \frac{(V_{LG} - V_{NG})}{2} \quad (2)$$

โดยที่ V_{LG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์
 V_{NG} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวตรอนกับกราวด์
 V_{LN} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับนิวตรอน
 ซึ่งการเดินทางของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างและโหมดร่วมที่อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเดินทางของกระแสไฟฟ้าในโหมดร่วมจะเดินทางผ่านตัวเก็บประจุของวงจร ในขณะที่กระแสไฟฟ้าในโหมดผลต่างจะไม่เดินทางผ่านตัวเก็บประจุ ดังกล่าว [5]



(ก)



(ข)

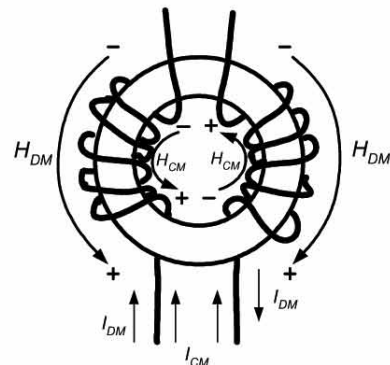
รูปที่ 1 การเดินทางของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (ก) นิยามสัญญาณรบกวนโหมดร่วม (ข) นิยามสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

3. ตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง

ตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วม ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยทั่วไปจะมีหน้าที่หลักๆ คือการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดร่วม โดยตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าโหมดร่วมไหลผ่าน และจะมีอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์สำหรับทิศทางของกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) ของตัว L_{CM} สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างได้เช่นกัน เพราะตัว L_{CM} เกิด

จากการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันบนแกนแม่เหล็กเดียวกัน โดยถ้าการพันดังกล่าวพันแบบชิดติดกันก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าน้อย ก็จะเป็นผลทำให้การกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้น้อยเช่นกัน ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมจึงนิยมพันขดลวดแบบไม่ชิดติดกัน เพื่อเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลและลดผลของตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว จะมีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี แต่เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟจึงมีปัญหาระงังขนาด น้ำหนัก และราคาที่ใช้ในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับแกนแม่เหล็กที่ใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมจะเป็นแกนแม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ ในขณะที่แกนแม่เหล็กที่ใช้สำหรับตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างจะเป็นแกนแม่เหล็กชนิด powder core [6-7] รูปที่ 2 จะแสดงทิศทางการพันขดลวดสำหรับตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วม (conventional common mode choke: CM choke) และแสดงทิศทางการพันแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าโหมดร่วมและโหมดผลต่างทางทฤษฎี และเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าโหมดร่วมที่ไหลผ่านในตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางเสริมกันทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าโหมดผลต่างที่ไหลผ่านในตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วม จะเกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางหักล้างกันทำให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นศูนย์

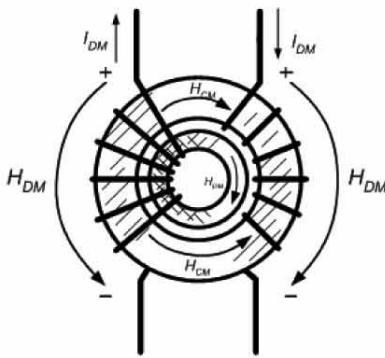


รูปที่ 2 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมโดยทั่วไป (CM)

บทความ [2] ได้มีการนำเสนอเทคนิคในการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วม (Integrated CM Choke, ICM) จะมีการนำแกนแม่เหล็กสองวงมาวางซ้อนกัน โดยวงนอกจะเป็นแกนแม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ และวงในจะเป็นแกนแม่เหล็กชนิด powder core โดยใช้สายตัวนำจากการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมมาพันรวมแกนแม่เหล็กทั้งสองแกน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมแบบ ICM จะเกิดสนามแม่เหล็กในโหมดผลต่างในแกนแม่เหล็กวงในขึ้น ทำให้ช่วยประหยัลดขดลวดในการพันแกนแม่เหล็กในโหมดผลต่างได้ และด้วยวิธีดังกล่าวจะเป็นการลด

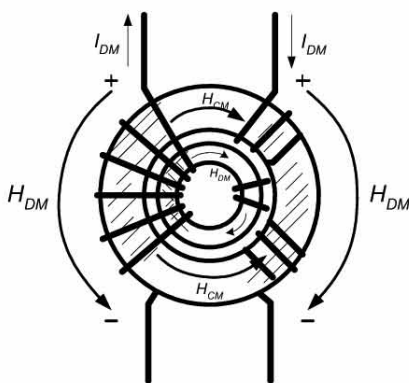
ขนาดของวงจรกรอง ง่ายต่อการพัน และลดต้นทุนในการผลิตได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม พิจารณาในรูปที่ 3 จะเห็นว่าแกนแม่เหล็กวงในหรือตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมต่างยังคงมีพื้นที่อีกส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ใช้งานให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใด เนื่องจากข้อเสียดังกล่าว ในบทความฉบับนี้จึงได้นำเสนอการรวมตัวเหนี่ยวนำแบบใหม่ที่ใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่มีอยู่ให้มากที่สุด



รูปที่ 3 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบ Integrated CM Choke (ICM)

รูปที่ 4 นำเสนอเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมผลต่างแบบใหม่ พิจารณาการออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบใหม่ที่น่าสนใจ (Proposed Integrated CM choke: PICM) จะเห็นว่าสามารถเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโหมผลต่างให้สูงมากขึ้น โดยขนาดพื้นที่เท่ากับขนาดของตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบเก่า รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบใหม่ที่น่าสนใจได้ทำการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากขดลวดอีกด้านหนึ่งมาพันบนพื้นที่แกนแม่เหล็กในโหมผลต่างที่เหลืออยู่ เพื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กในโหมผลต่างหรือค่าความเหนี่ยวนำในโหมผลต่างให้สูงขึ้น

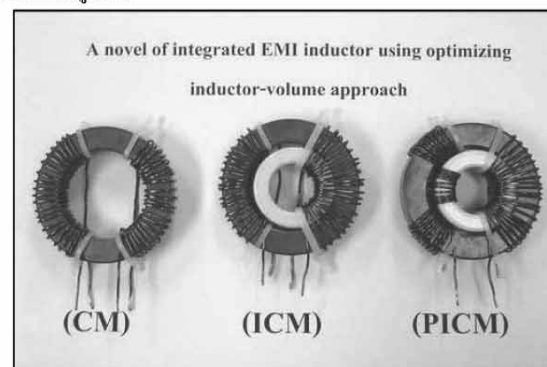


รูปที่ 4 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบใหม่ที่น่าสนใจ Proposed Integrated CM Choke (PICM)

4. ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับแกนแม่เหล็กที่ใช้ในการทำตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมจะเป็นแกนแม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ชนิดเดียวกันทั้งสามแกนแม่เหล็ก และจำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 20 รอบเท่ากันทั้งสองด้าน ในขณะที่สำหรับแกนแม่เหล็กที่ใช้ในการทำตัวเหนี่ยวนำโหมผลต่าง จะเป็นแกนแม่เหล็กชนิด powder core ที่มีค่า $\mu_i = 75$ (Material # 26) [8] และการพันแบบ (PICM) จะมีการพันขดลวดเพิ่มที่ความเหนี่ยวนำโหมผลต่างเท่ากับ 10 รอบ เป็นจำนวนสูงสุดของแกนแม่เหล็กจะพันได้ โดยลวดทองแดงที่ใช้จะเป็น เบอร์ AWG 18 และในการทดลองจะรักษาระยะห่างระหว่างขดลวดของทั้ง 3 รูปแบบให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด นอกจากนั้นจากการตรวจวัดจุด self resonant frequency ของตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวจะมีค่าสูงกว่า 40 MHz จึงไม่มีผลกระทบต่อการทดลอง

บทความนี้จะทำการทดสอบหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีการพันตัวเหนี่ยวนำ 3 กรณี ดังนี้ การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมโดยทั่วไป (CM) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบ Integrated CM Choke (ICM) และการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบใหม่ที่น่าสนใจ Proposed Integrated CM Choke (PICM) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมทั้ง 3 กรณี

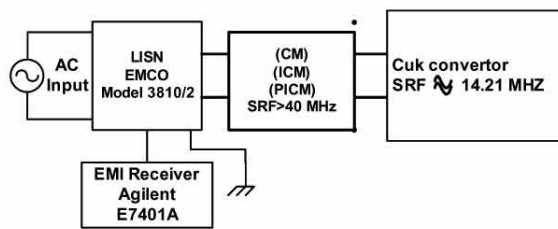
ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขของวงจรชดเชยคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมทั้งสามรูปแบบ

กำหนด	ค่าที่วัดได้
แรงดันอินพุต	24 V _{DC}
แรงดันเอาต์พุต	48 V _{DC}
ความถี่ (switching frequency)	50 kHz
กระแสเอาต์พุต	2 A

ตารางที่ 1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

บทความนี้ใช้วงจรชดเชยคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk converter) ในการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวงจรดังกล่าวมีค่า self resonant frequency เท่ากับ 14.2 MHz [9] และโหลดที่ใช้คือ โหลดความ

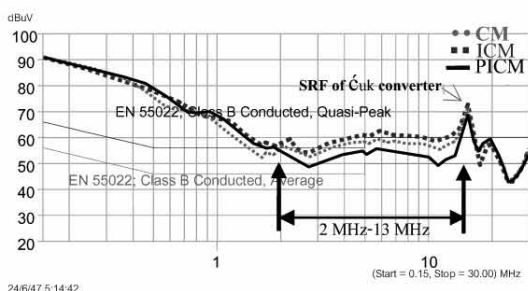
ด้านทาน เพื่อวัดผลการใช้ตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมทั้งสามแบบในการพิจารณาผลการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ



รูปที่ 6 ระบบที่ใช้ในการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี แสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz – 30 MHz อ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22 ผลจากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำทำให้ทราบว่า การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบใหม่ที่นำเสนอ (PICM) สามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมโดยทั่วไป (CM) ประมาณ 10 dBμV และการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมแบบ Integrated CM Choke (ICM) ประมาณ 5 dBμV ในย่านความถี่ตั้งแต่ 2 MHz – 15 MHz โดยการลดทอนในย่านความถี่ดังกล่าวเกิดจากค่าความเหนี่ยวนำผลต่างที่เพิ่มขึ้นของตัวเหนี่ยวนำแบบที่นำเสนอ ในขณะที่ย่านความถี่อื่นๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนั้น ที่ความถี่ประมาณ 15 MHz ซึ่งเป็นจุด self resonant frequency ของวงจรชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่าของสัญญาณรบกวนจะเกิดขึ้นเหมือนกันหมดไม่ว่าจะใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบใดก็ตาม



รูปที่ 7 ผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี

6. สรุป

เทคนิคในการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมผลต่างแบบที่นำเสนอ (PICM) สามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้ดีกว่าการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมที่ใช้อยู่โดยทั่วไป (CM) ประมาณ 10 dBμV ที่ย่านความถี่ 2 MHz – 15 MHz นอกจากนั้นข้อดีของเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอ คือ มีขนาดเล็ก และมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ทางสายตัวนำได้สูง เป็นผลทำให้สามารถลดขนาดของวงจรกรองสัญญาณรบกวน (EMI filter) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ย่านความถี่ที่เทคนิคในการรวมตัวเหนี่ยวนำแบบใหม่ ที่นำเสนอสามารถลดทอนได้จะขึ้นอยู่กับย่านความถี่ที่แกน powder core สามารถทำงานได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Prasad Kodali "Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, and Technologies" IEEE Press, 1996.
- [2] Richard Frederick, "Integrated electromagnetic interference filter", U.S. Patent 5 083 101, Jan 21, 1992.
- [3] Kouichi Yamaguchi, "Choke coil for eliminating common mode noise and differential mode noise", U.S. Patent 5 581 224, Dec 3, 1996.
- [4] Anand K. Upadhyay, "Integrated common mode and differential mode inductor device", U.S. Patent 5 313 176, May 17, 1994.
- [5] John C. Fluke. "Controlling Conducted Emission By Design". VANNOSTRAND REINHOLD, Inc 1991.
- [6] Richard Lee Ozenbaugh, "EMI Filter Design", Marcel Dekker, 1996.
- [7] Robert West, Common Mode Inductors for EMI filters Require Careful Attention to core Material Selection, PCIM Magazine, July 1995.
- [8] Coilws.com, Inc., www.roilws.com
- [9] Boonma. P, Tarateeraseth. V, Khan-ngern. W, Nitta. S, "The EMI study of Self-resonant Frequency Effect on a Cuk Converter", EMC 04 Sendai., vol. 2, pp. 701-704, 2004



ปฏิวัติ บุญมา ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ จบการศึกษา วศ.บ (ไฟฟ้า), วศ.ม. (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นวิศวกรที่ปรึกษา ด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า



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