

บทที่ 4

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

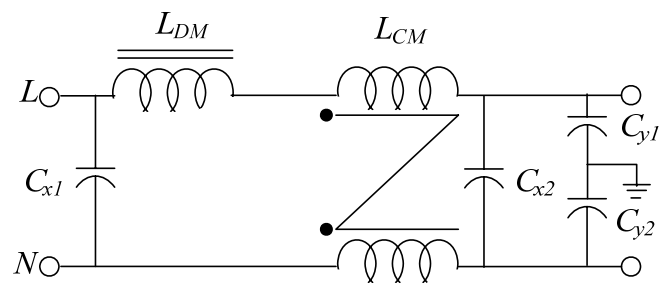
บทนี้จะเป็นการนำเสนอขั้นตอนการออกแบบ และคำนวณหาค่าส่วนประกอบของวงจรสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) โดยที่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะมีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง ที่มีรูปแบบการพันแตกต่างกัน โดยมีทั้งหมด 3 แบบการพัน คือ แบบที่หนึ่ง การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป (conventional common mode choke : การพันแบบ CM) แบบที่สอง การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM (integrated common mode choke : การพันแบบ ICM) และแบบที่สาม การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM (proposed integrated common mode choke : การพันแบบ PICM) และบทนี้จะมีหัวข้อที่สำคัญ 3 หัวข้อ คือ หัวข้อที่ 4.1 จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และหัวข้อที่ 4.2 จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าการออกแบบและส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และหัวข้อที่ 4.3 จะกล่าวถึงความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

4.1 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

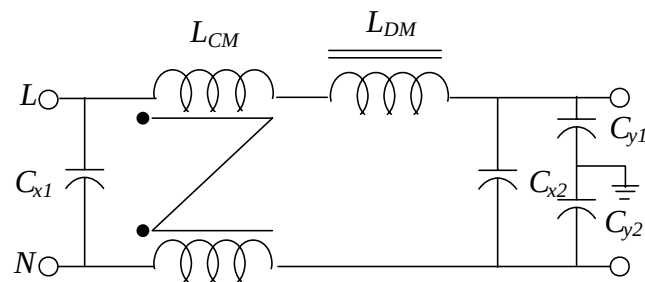
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนมากจะใช้สำหรับขจัดสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา และสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่ไม่ต้องการ และลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในทางสายตัวนำที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง โดยทั่วไปวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีโครงสร้าง คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ (passive components) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการนำเสนอรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างทั้งหมด 3 แบบการพัน รวมทั้งแสดงรายละเอียดการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ดังในรูปที่ 4.1 (ก) จะแสดงการพันแบบ CM และการพันแบบ ICM ดังในรูปที่ 4.1 (ข) และในรูปที่ 4.1 (ค) จะแสดงการพันแบบ PICM โดยการพันแบบ CM จะมีโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนคือ ตัวเก็บประจุ C_{X1} ต่ออยู่ระหว่างตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (common mode inductance: L_{CM}) กับตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (differential mode inductance: L_{DM}) ซึ่งจะหมายความว่าตัวเหนี่ยวนำทั้ง 2 นั้น จะเป็นแบบแยกแกนเหล็ก ส่วนตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} จะต่ออยู่ที่สายตัวนำไฟฟ้าหรือสายนิวตรอนก็ได้ และ ตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะต่ออยู่ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับสายนิวตรอน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2}

จะต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับสายนิวตรอน โดยที่กราวด์ต่อกับตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ดังในรูปที่ 4.1 (ก) และจากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการพันแบบ CM จะมีตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม L_{CM} ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} ตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} และตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} จะนำค่าต่างๆ ที่ได้มาทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้กับการพันแบบ ICM และการพันแบบ PICM ตามลำดับ

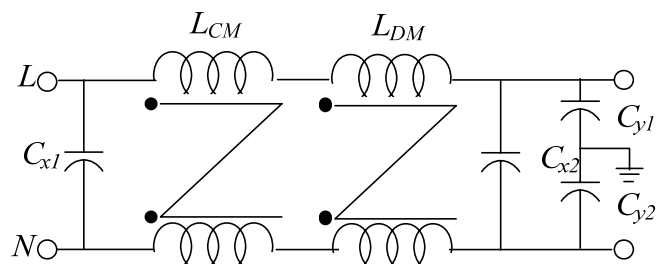
ในส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน คือ วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk converter) จะมีที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ แรงดันด้านอินพุต 24 โวลต์ และแรงดันด้านออก 48 โวลต์



(ก) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป



(ข) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM

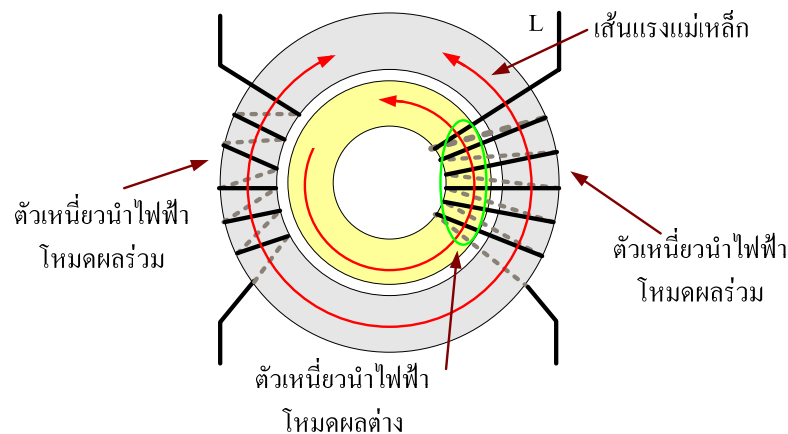


(ค) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM

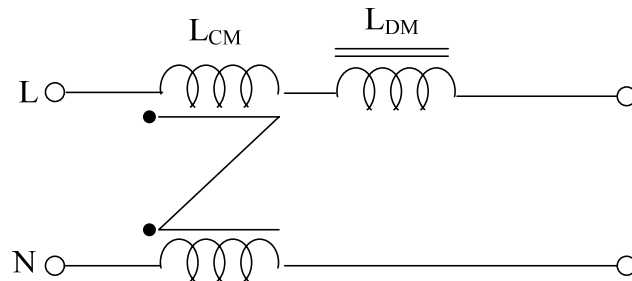
รูปที่ 4.1 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

จากแบบการพัน CM ดังในรูปที่ 4.1 (ก) จะแสดงการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป และแบบการพัน ICM ในรูปที่ 4.1 (ข) จะเป็นลักษณะการพันที่นำเสนอจากสิทธิบัตรที่จดในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการพันแบบ ICM นี้จะนำเสนอเทคนิคการ

รวมตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่างเข้าด้วยกันดังในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าแกนเหล็กทั้ง 2 แกน จะอยู่ซ้อนกันทำให้สามารถที่จะลดขนาดของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าลงได้ และเมื่อพิจารณาที่สายตัวนำจะเห็นว่าลักษณะการพันขดลวดจะพันขดลวดทั้งสองแกนเหล็ก ทำให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง L_{DM} จะถูกกำหนดโดยรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม L_{CM} และจากรูปที่ 4.2 (ข) จะแสดงวงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างแบบ ICM



(ก) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างแบบ ICM

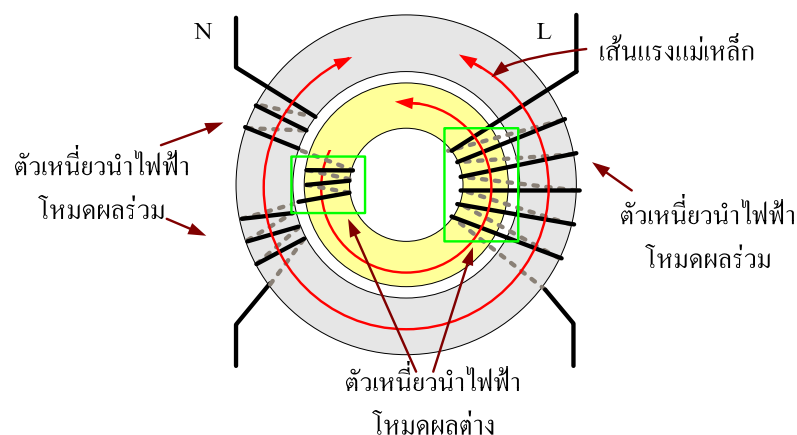


(ข) วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างแบบ ICM

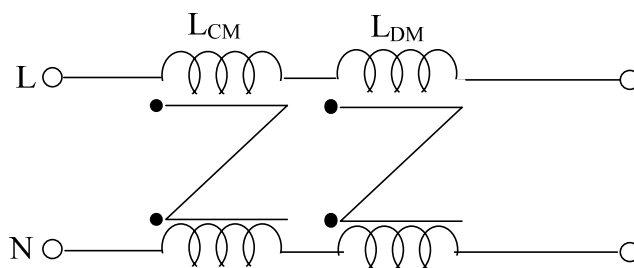
รูปที่ 4.2 แบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างแบบ ICM

สำหรับการพันแบบ PICM ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค) และรูปที่ (4.3) จะแสดงรูปแบบการพัน PICM โดยจะเห็นว่ารูปแบบการพัน PICM จะมีลักษณะการพันคล้ายกับการพันแบบ ICM แต่จะแตกต่างกันตรงที่สายนิวตรอนจะทำการพันขดลวดที่แกนด้านในของแกนทั้งสอง โดยจำนวนรอบที่พันได้จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง L_{DM} จากการพันแบบ CM และตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม L_{CM} จะทำการแบ่งจำนวนรอบออกเป็นสองกลุ่ม แต่มีจำนวนรอบเท่ากับการออกแบบข้างต้น ส่วนรายละเอียดต่างๆ จะอธิบายในหัวข้อการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างต่อไป และจากรูปที่ 4.3 (ข) จะแสดงวงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำโหมค

ผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM และขั้นตอนการออกแบบทั้งหมดได้แสดงในแผนภูมิรูปที่ 4.4



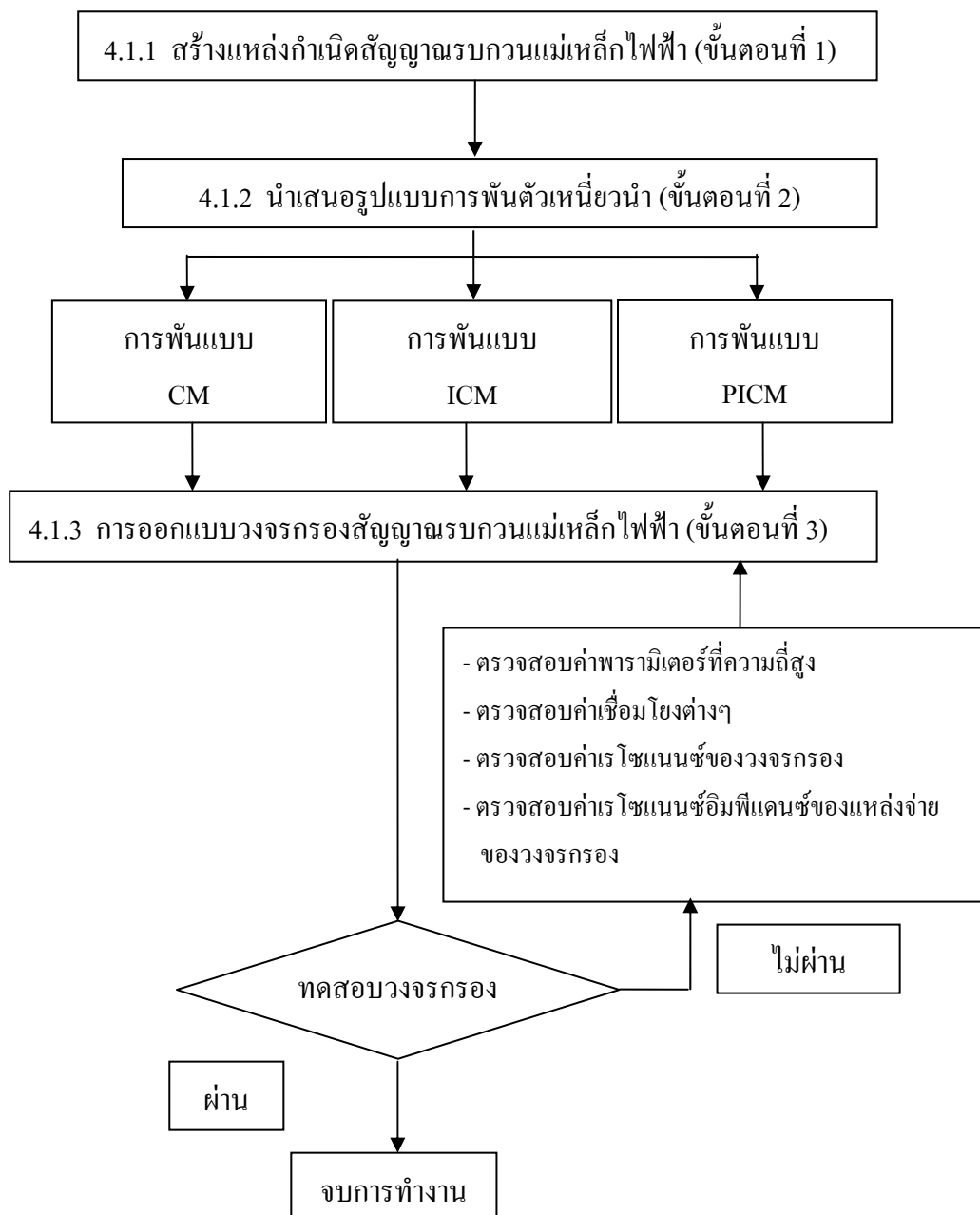
(ก) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM



(ข) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM

รูปที่ 4.3 แบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM

สำหรับเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการเปรียบเทียบรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม L_{CM} และตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} ว่ามีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่ทำงานในโหมดผลรวมและโหมดผลต่างได้อย่างไร โดยมีพิกัดในการทดสอบเดียวกัน และตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม L_{CM} จะมีจำนวนรอบเท่ากันทั้ง 3 แบบการพัน



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการออกแบบ

4.1.1 สร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (ขั้นตอนที่ 1)

จากแผนภูมิรูปที่ 4.4 จะแสดงขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวน โดยจะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากบทความ “A Procedure for Designing EMI Filters for AC Line Applications” ซึ่งในขั้นตอนที่ 1 นี้ จะเป็นการสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ที่ใช้ในการทดสอบการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะใช้วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เนื่องจากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ไม่ซับซ้อน

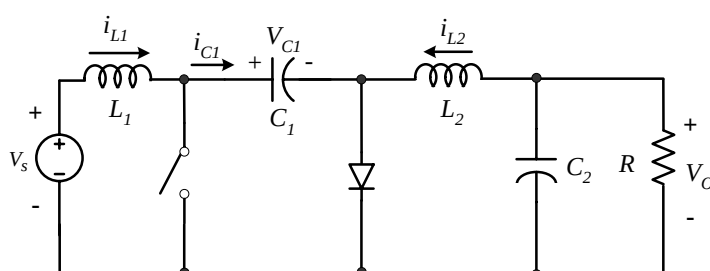
และสามารถที่จะอธิบายการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ชัดเจน และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ จะอยู่ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Ćuk converter)

ปริมาณทางไฟฟ้า	ขนาด/พิกัด	หน่วยวัด
แรงดันด้านเข้า (V_i)	24	โวลต์ (V)
แรงดันด้านออก (V_o)	48	โวลต์ (V)
กระแสไฟฟ้าด้านออก (I_o)	2.08	แอมแปร์ (A)
กำลังไฟฟ้าด้านออก (P_o)	100	วัตต์ (W)
ความถี่สวิตช์ (f)	50	กิโลเฮิรตซ์ (kHz)

เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 4.1 จะเป็นพิกัดของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดย วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์มีหลักการทำงาน คือ เป็นวงจรที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออก โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า และวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ได้ถูกออกแบบ เพื่อแก้ปัญหากระแสฮาร์มอนิกส์สูง โดยจะมีตัวเหนี่ยวนำ L_1 ทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้าในด้านเข้า และมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC ทางด้านออก ส่วนการเชื่อมต่อระหว่างด้านเข้ากับด้านด้านออกของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์จะใช้ตัวเก็บประจุ C_1 ดังวงจรในรูปที่ 4.5 และในส่วนรายละเอียดการทำงานต่างๆ และการออกแบบวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ สามารถหาได้จาก [5]



รูปที่ 4.5 วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

4.1.2 นำเสนอรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง (ขั้นตอนที่ 2)

ในขั้นตอนต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งได้นำเสนอ 3 แบบการพัน คือ แบบที่หนึ่ง การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป (การพันแบบ CM) แบบที่

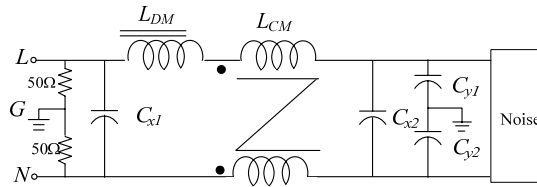
สอง การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM (การพันแบบ ICM) และแบบที่สาม การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM (การพันแบบ PICM) ตามลำดับ พร้อมกับวิธีการหาค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ของทั้ง 3 รูปแบบการพัน ดังนี้

แบบที่ 1) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป (การพันแบบ CM)

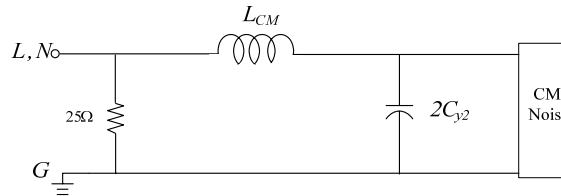
ในการพันแบบที่ 1 นี้ จะเป็นการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่ใช้อยู่ทั่วไป ดังในรูปที่ 4.6 และจากรูปที่ 4.6 ก) จะแสดงวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป และเพื่อให้เข้าใจการทำงานจะทำการแยกวิเคราะห์การเกิดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม (CM noise) และวิเคราะห์การเกิดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง (DM noise) ได้ดังนี้

สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม เมื่อพิจารณาทิศทางของกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม i_{CM} โดยที่กระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม i_{CM} จะไหลผ่านระหว่างสายตัวนำกับสายนิวตรอน ไปสู่ วงจรกรองสัญญาณรบกวน แล้วไหลกลับวงจรลงสู่กราวด์ ดังนั้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม i_{CM} จะได้วงจรดังรูปที่ 4.6 (ค) โดยจากรูปจะแสดงวงจรสมมูลของสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และจากรูปทำให้ทราบว่า อุปกรณ์ตัวใดมีผลช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} และ ตัวเก็บประจุ C_Y จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมได้มาก และตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม เนื่องจาก ตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะไม่มีผลเมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม รวมทั้งค่าความต้านทานของ LISN ที่ต่ออยู่จะมีค่าลดลงเท่ากับ 25Ω เมื่อมองจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

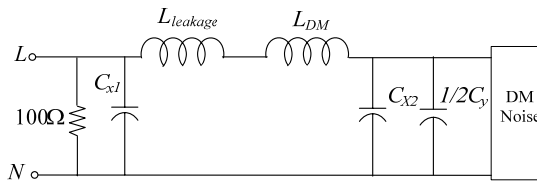
สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง i_{DM} กล่าวคือ กระแส i_{DM} จะไหลผ่านสายตัวนำ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ไปสู่สายนิวตรอน แล้วกลับมาครบวงจรที่แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน จะได้วงจรดังรูปที่ 4.6 (ง) และจากรูปจะเห็นว่าตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} และ ตัวเก็บประจุ C_X จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้มาก แต่ตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จะไม่มีผล ต่อการลดทอนเมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง แต่ยังมีผลของ $L_{leakage}$ ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} และ ตัวเก็บประจุ C_Y จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้น้อยเนื่องจากจะมีค่าลดลง ส่วนตัวต้านทานของ LISN ที่ต่ออยู่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 100Ω เมื่อมองจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง



(ก) วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป



(ข) วงจรสมมูลย์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

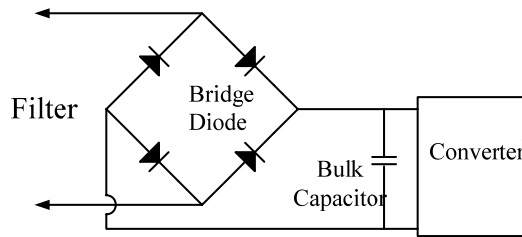


(ค) วงจรสมมูลย์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

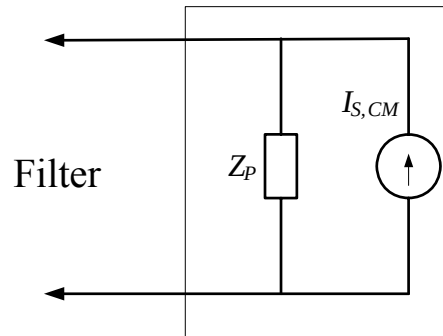
รูปที่ 4.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป

การหาค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป

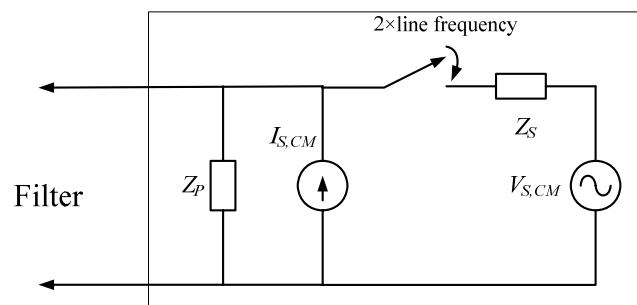
ก่อนที่จะทำการหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป นั้นจะต้องทำการพิจารณาหลักการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ก่อน โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายของวงจรคอนเวอร์เตอร์ และการทำงานในโหมดผลร่วม และในโหมดผลต่าง ซึ่งในรูปที่ 4.7 จะแสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ และในรูปที่ 4.7 (ข) จะแสดงวงจรสมมูลย์ของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม ซึ่งจะเห็นว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์จะเหมือนกับแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,CM}$ ที่ต่อขนานกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_p และในรูปที่ 4.7 (ค) เป็นวงจรสมมูลย์ของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง จะมีการทำงานอยู่สองลักษณะ คือ ลักษณะแรกขณะที่ไดโอดทำงาน จะทำให้สวิตช์ปิด และวงจรจะต่อกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_s และอนุกรมกับแหล่งจ่าย $V_{S,CM}$ และลักษณะที่สองขณะที่ไดโอดไม่ทำงาน จะทำให้สวิตช์เปิด และจะเหมือนกับวงจรสมมูลย์ของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม [13]



(ก) วงจรคอนเวอร์เตอร์



(ข) วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม



(ค) วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนที่โหมดต่างๆ

การหาค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โหมดผลร่วม และโหมดผลต่าง ซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

ก) โหมดผลร่วม

ในการวิเคราะห์การทำงานโหมดผลร่วม จะเริ่มจากการพิจารณาการทำงานของวงจรสมมูลของสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมในรูปที่ 4.6 (ก) ซึ่งจะเริ่มจากการพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า $I_{S,CM}$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ Z_p ดังในรูปที่ 4.8 (ก) จะแสดงวงจรการทำงานโหมดผลร่วม โดยจะเริ่มจากการพิจารณาอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวน

แม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม โดยจะหาได้จากการหาค่า Transfer function ของแรงดันไฟฟ้า ขณะใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนกับขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (4.1)

$$\text{CM Attenuation} = \frac{V_{\text{LISN (without filter)}}}{V_{\text{LISN (with filter)}}} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.8 (ก) เมื่อพิจารณาในส่วนของ EMI filter จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_Y เท่ากับ $C_{CM} = 2C_Y$ และจากรูปที่ 4.8 (ก) จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ Z_P จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_Y ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_Y จะมีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_P แต่จะที่ค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 25Ω ของ LISN ดังนั้นจะได้ ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)

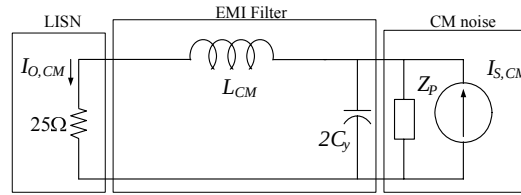
$$\frac{1}{\omega 2C_Y} \ll Z_P \quad (4.2)$$

และ

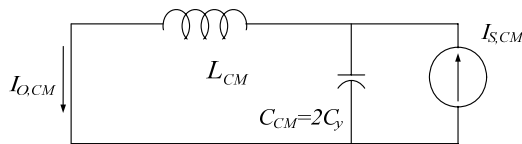
$$\omega L_C \gg 25\Omega \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.2) และ (4.3) ทำให้สามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 4.8 (ข) และจากนั้นเพื่อจะให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎีบท reciprocity โดยจะย้ายข้างแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,CM}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{S,CM}$ ดังในรูปที่ 4.8 (ค) และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 (ค) จะเห็นว่าเป็นวงจรกรองความถี่ แบบ LC filter ดังนั้นค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมเท่ากับ 40 dB/dec ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวงจรแบบ LC filter ดังรูปที่ 4.8 (ง) และจะเห็นว่าจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,CM}$ จะถูกกำหนดจากค่า L_C และ C_Y เพราะฉะนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่ จะหาได้จากสมการที่ (4.4)

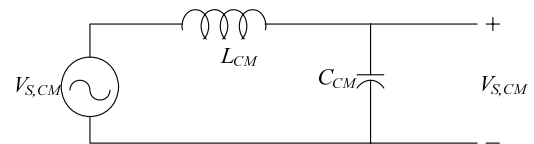
$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_{CM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM} \cdot 2C_Y}} \quad (4.4)$$



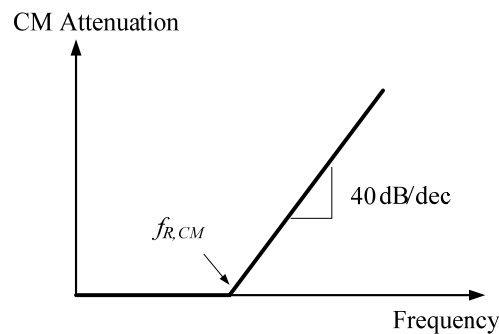
(ก) วงจรโหมดผลร่วม



(ข) วงจรสมมูลโหมดผลร่วม



(ค) วงจรสมมูลโหมดผลร่วมโดยใช้ทฤษฎี reciprocity



(ง) การลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

รูปที่ 4.8 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

ข) โหมดผลต่าง

ในการพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ในรูปที่ 4.9 นั้น จะเริ่มจากการพิจารณาการทำงานของไดโอด ขณะที่สวิตช์เปิด และสวิตช์ปิด ดังในรูปที่ 4.9 (ก) และในรูปที่ 4.9 (ข) ตามลำดับ โดยในรูปที่ 4.9 (ก) จะเป็นการทำงานขณะสวิตช์เปิด ซึ่งในการวิเคราะห์วงจรจะเหมือนกับการทำงานในโหมดผลร่วม คือ จากวงจรค่าอิมพีแดนซ์ Z_p จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_{X2} ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{X2} จะมีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_p แต่จะทีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 100Ω ของ LISN ดังนั้น จะได้ดังสมการที่ (4.5) และ (4.6) และเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 100Ω ของ LISN สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.7) จะได้ดังในรูปที่ 4.8 (ค) และเพื่อจะให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎี reciprocity โดยจะย้ายข้างแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,DM}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{S,DM}$ ในรูปที่ 4.9 (จ)

$$\frac{1}{\omega C_{X2}} \ll Z_P \quad (4.5)$$

และ

$$\frac{1}{\omega C_{X1}} \gg 100 \quad (4.6)$$

และ

$$\omega L_{DM} \gg 100 \quad (4.7)$$

ขณะสวิตช์ปิด ดังในรูปที่ 4.9 (ข) จะมีการวิเคราะห์เหมือนกับขณะสวิตช์เปิด คือ จากรูปที่ 4.9 (ข) ตัวเก็บประจุ C_{X2} จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_S ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.8)

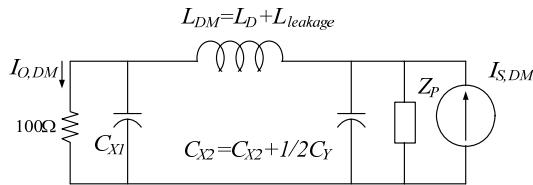
$$\frac{1}{\omega C_{X2}} \gg Z_S \quad (4.8)$$

จากรูปที่ 4.9 (ง) จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ 100 Ω ของ LISN ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_{X1} เมื่อทำการพิจารณาจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุ C_{X1} มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ 100 Ω ของ LISN จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.9) และจากนั้นเพื่อจะให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎีของ reciprocity โดยจะย้ายข้างแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,DM}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{S,DM}$ ในรูปที่ 4.9 (ง) และจะได้ดังรูปที่ 4.9 (ฉ)

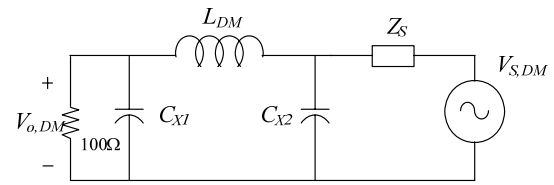
$$100 \gg \frac{1}{\omega C_{X1}} \quad (4.9)$$

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 (จ) และรูปที่ 4.9 (ฉ) จะเห็นว่าจะเป็นการทำงานแบบวงจร LC filter นั้นเอง โดยรูปที่ 4.9 (ซ) จะแสดงการลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ซึ่งจะมีค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง เท่ากับ 40 dB/dec ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวงจรแบบ LC filter และจะเห็นว่าจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,DM}$ จะถูกกำหนดจากค่า L_{DM} โดยที่ $L_{DM} = L_D + L_{leakage}$ และ $C_{X1} = C_{X2} = C_{DM}$ เพราะฉะนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่จะหาได้จากสมการที่ (4.10)

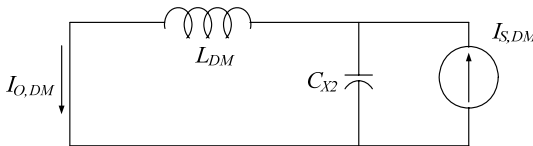
$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{DM}C_{DM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_D + L_{leakage}) \cdot C_{DM}}} \quad (4.10)$$



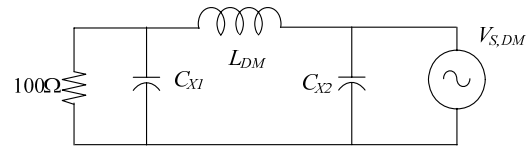
(ก) วงจรโหมคผลต่างขณะที่สวิตช์เปิด



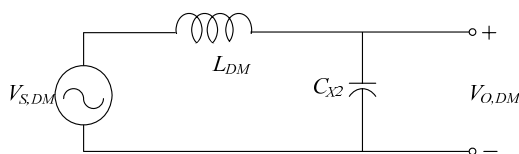
(ข) วงจรโหมคผลต่างขณะที่สวิตช์ปิด



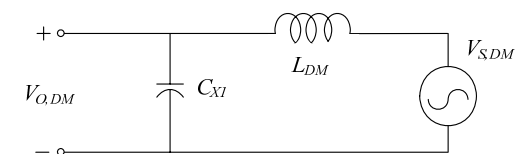
(ค) วงจรสมมูลโหมคผลต่างขณะที่สวิตช์เปิด



(ง) วงจรสมมูลโหมคผลต่างขณะที่สวิตช์ปิด



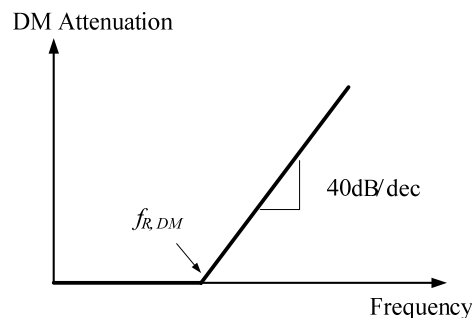
(จ) วงจรสมมูลโหมคผลต่างขณะที่สวิตช์เปิด



(ฉ) วงจรสมมูลโหมคผลต่างขณะที่สวิตช์ปิด

โดยใช้ทฤษฎี reciprocity

โดยใช้ทฤษฎี reciprocity



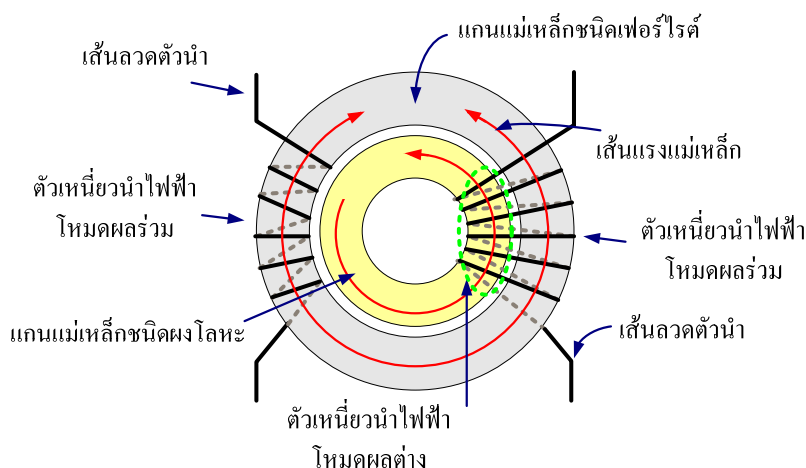
(ข) การลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมคผลต่าง

รูปที่ 4.9 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมคผลต่าง

แบบที่ 2) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่าง แบบ ICM

การพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและ โหมคผลต่างแบบ ICM ในรูปที่ 4.10 จะเป็นการนำเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างเข้าด้วยกัน โดยจะมีแกนเหล็ก 2 แกนวางซ้อนกัน ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งแกนเหล็กวงนอก จะเป็นแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ และแกนวงในจะเป็นแกนเหล็กชนิดผงโลหะ ส่วนเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างนั้น จะแสดงดังในรูปที่ 4.10 จากรูปเมื่อพิจารณาเทคนิคการพัน ทางด้านสายนิวตรอน จะเป็นการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม โดยจะทำการพันขดลวดบนแกนเหล็กวงนอก ชนิดเฟอร์ไรต์ เพียงแกนเหล็กเดียว และเมื่อพิจารณาเทคนิคการพันทางด้านสายตัวนำไฟฟ้า จะเป็นการพันขดลวดทั้งสองแกนเหล็ก ดังในรูปที่ 4.10 จะได้ค่าเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่าง โดยที่แกนเหล็กวง

นอกนั้น จะได้ค่าเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม และแกนวงในนั้นจะได้ค่าเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง โดยค่าของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างนั้น จะถูกกำหนดโดยจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม และในการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมจะต้องคำนึงถึงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางเสริมกันเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วม และการพันแบบ ICM นั้น ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างจะอยู่ที่สายตัวนำไฟฟ้าหรือสายนิวตรอนก็ได้

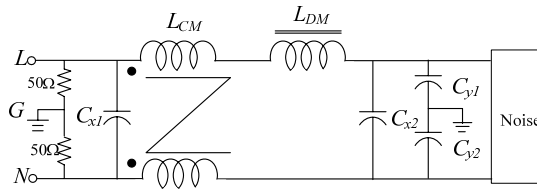


รูปที่ 4.10 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM

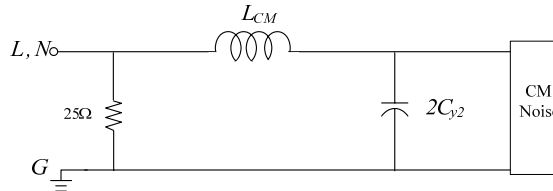
ในรูปที่ 4.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM นี้ จะมีวงจรสมมูลย์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับการพันแบบ CM และเมื่อทำการพิจารณาวงจรสมมูลย์ของสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง จึงไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์การทำงานจะเหมือนกับการพันแบบ CM สามารถสรุปได้ดังนี้

การพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม ดังในรูปที่ 4.11 (ข) ตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} และตัวเก็บประจุ C_Y จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมได้มาก และตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีไม่ผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม รวมทั้งค่าความต้านทานของ LISN จะมีค่าลดลงเท่ากับ 25Ω เมื่อมองจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม

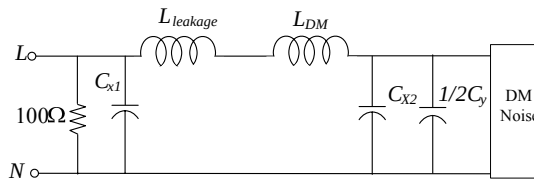
การพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ดังในรูปที่ 4.11 (ค) ตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} และตัวเก็บประจุ C_X จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้มาก และตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จะไม่มีผล เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง แต่ยังมีผลของ $L_{leakage}$ ที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} และ ตัวเก็บประจุ C_Y จะมีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างน้อย เนื่องจากจะมีค่าลดลง ส่วนตัวต้านทานของ LISN ที่ต่ออยู่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 100Ω เมื่อมองจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง



(ก) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM



(ข) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม



(ค) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

รูปที่ 4.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM

การหาค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โหมดผลรวม และโหมดผลต่าง ซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

ก) โหมดผลรวม

จากรูปที่ 4.12 (ก) เมื่อพิจารณาวงจรผลรวม จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_Y มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของตัวเก็บประจุ C_Y และเมื่อการพิจารณาวจรจากรูปที่ 4.12 (ก) จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_p จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_Y ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_Y จะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_p ดังนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.11) และเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำ L_C ที่ต่ออนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์ $25\ \Omega$ ของ LISN เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_C จะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ $25\ \Omega$ ของ LISN ดังนั้นจะได้ดังในรูปที่ 4.12 (ข)

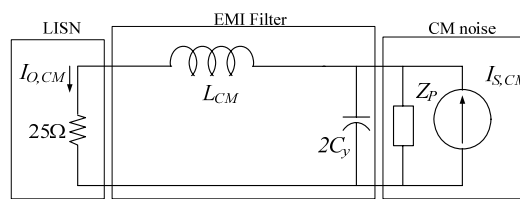
$$\frac{1}{\omega 2C_y} \ll Z_p \quad (4.11)$$

และ

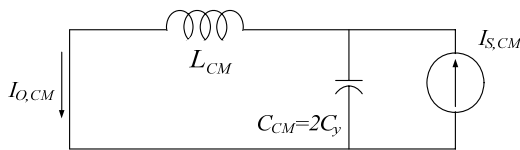
$$\omega L_C \gg 25\ \Omega \quad (4.12)$$

จากรูปที่ 4.12 (ข) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎีของ reciprocity โดยจะย้ายข้างแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,CM}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{S,CM}$ จะได้ดังรูปที่ 4.12 (ค) และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.12 (ค) จะเห็นว่าเป็นวงจรกรองความถี่ แบบ LC filter ดังนั้นค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม เท่ากับ 40 dB/dec ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวงจรแบบ LC filter ดังรูปที่ 4.12 (ง) และจะเห็นว่าจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,CM}$ จะถูกกำหนดจากค่า L_C และ C_Y เพราะฉะนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่ จะหาได้จากสมการที่ (4.13)

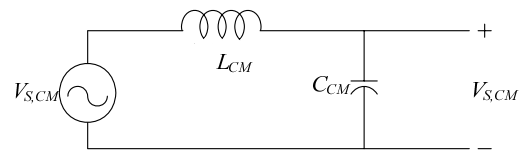
$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_{CM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM} \cdot 2C_Y}} \quad (4.13)$$



(ข) วงจรโหมดผลรวม

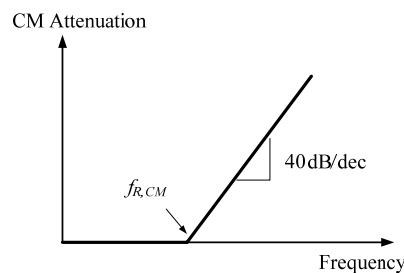


(ค) วงจรสมมูลโหมดผลรวม



(ง) วงจรสมมูลโหมดผลรวมโดยใช้ทฤษฎี

reciprocity



(จ) การลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม

รูปที่ 4.12 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม

ข) โหมดผลต่าง

ในการพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ในรูปที่ 4.13 จะมีวิธีการวิเคราะห์แบบเดียวกับการพันแบบ CM ดังนั้น จะเริ่มจากการพิจารณาการทำงานของไดโอด ขณะที่สวิตช์เปิด โดยมีการพิจารณา คือ จากวงจรค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{X2} จะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_p แต่จะที่ค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 100Ω ของ LISN ดังนั้นจะได้ ดังสมการที่ (4.14) และ (4.15) และเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 100Ω ของ LISN จะได้ดังในรูปที่ 4.13 (ค) และเพื่อจะให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎี reciprocity โดยจะย้ายข้างแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,DM}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{S,DM}$ ในรูปที่ 4.13 (จ)

$$\frac{1}{\omega C_{X2}} \ll Z_p \quad (4.14)$$

และ

$$\frac{1}{\omega C_{X1}} \gg 100 \quad (4.15)$$

จากรูปที่ 4.13 (ข) ขณะที่สวิตช์ปิด จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_{X2} จะต่ออนุกรมกับ Z_s ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{X2} จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_s ดังสมการที่ (4.16) และจะได้ดังในรูปที่ 4.13 (ง)

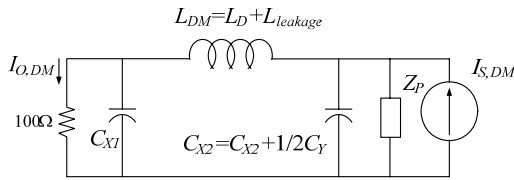
$$\frac{1}{\omega C_{X2}} \gg Z_s \quad (4.16)$$

และจากรูปที่ 4.13 (ง) เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ 100Ω ของ LISN จะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{X1} สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.17) และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎีของ reciprocity โดยจะย้ายข้างแหล่งจ่ายกระแส $I_{S,DM}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{S,DM}$ จะได้ดังรูปที่ 4.13 (ฉ)

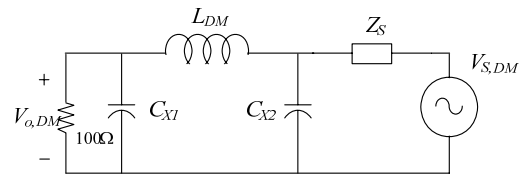
$$100 \gg \frac{1}{\omega C_{X1}} \quad (4.17)$$

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 (จ) และรูปที่ 4.13 (ฉ) จะเห็นว่าจะเป็นการทำงานแบบวงจร LC Filter นั้นเอง โดยรูปที่ 4.13 (ซ) จะแสดงการลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ซึ่งจะมีค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง เท่ากับ 40 dB/dec และจะเห็นว่าจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,DM}$ จะถูกกำหนดจากค่า L_{DM} โดยที่ $L_{DM} = L_D + L_{leakage}$ และ $C_{X1} = C_{X2} = C_{DM}$ เพราะฉะนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่ จะหาได้จากสมการที่ (4.18)

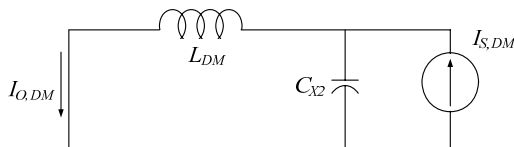
$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{DM}C_{DM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_D + L_{leakage}) \cdot C_{DM}}} \quad (4.18)$$



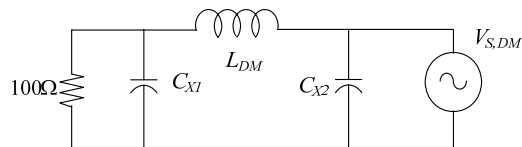
(ก) วงจรโหมดผลต่างขณะที่สวิตช์เปิด



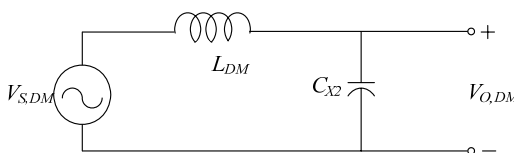
(ข) วงจรโหมดผลต่างขณะที่สวิตช์ปิด



(ค) วงจรสมมูลย์โหมดผลต่างขณะที่สวิตช์เปิด

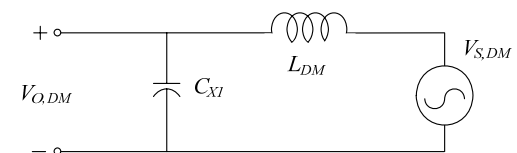


(ง) วงจรสมมูลย์โหมดผลต่างขณะที่สวิตช์ปิด



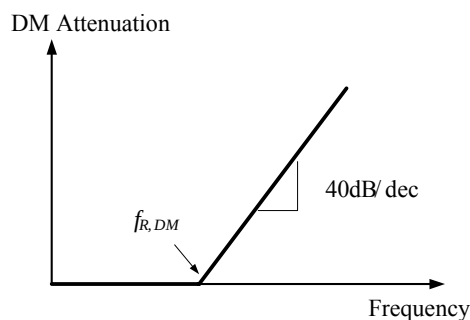
(จ) วงจรสมมูลย์โหมดผลต่างโดยใช้ทฤษฎี

reciprocity



(ฉ) วงจรสมมูลย์โหมดผลต่างโดยใช้ทฤษฎี

reciprocity



(ซ) การลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

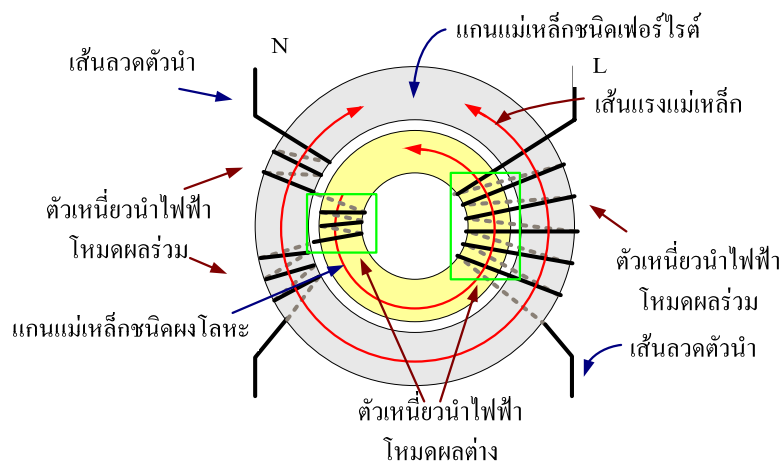
รูปที่ 4.13 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

แบบที่ 3) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง แบบ PICM

การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM แบบใหม่ที่น่าสนใจจะเป็นการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ด้านในของแกนเหล็กชนิดผงโลหะ และจะเป็นการพัฒนาเทคนิคการพันแบบ ICM ซึ่งจะนำเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างมาใช้ ซึ่งการพันแบบ ICM นั้น จะใช้แกนเหล็กชนิดผงโลหะเพียงด้านเดียว ดังนั้น แนวความคิดของการ

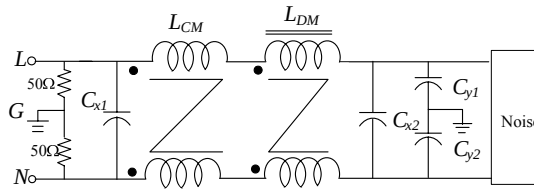
พันแบบ PICM จะใช้ประโยชน์จากแกนเหล็กชนิดผงโลหะอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะพันจำนวนรอบบนแกนเหล็กชนิดผงโลหะ ให้ได้ค่าเหนี่ยวนำโหมดผลต่างมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการออกแบบหรือให้มีจำนวนรอบมากเท่าที่แกนเหล็กชนิดผงโลหะรับได้

จากเทคนิคการรวมตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM ดังในรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าแกนเหล็กวงนอกจะเป็นแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ และแกนเหล็กวงในจะเป็นแกนเหล็กชนิดผงโลหะ เมื่อพิจารณาขดลวดด้านสายตัวนำไฟฟ้าจะมีลักษณะการพันเหมือนกับการพันแบบ ICM และเมื่อพิจารณาขดลวดด้านสายนิวตรอน จะมีลักษณะการพันขดลวด คือ ผลรวมของจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมที่พันขดลวดบนแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ จะมีจำนวนรอบเท่ากับด้านสายตัวนำไฟฟ้าหรือเท่ากับการออกแบบ และในเส้นขดลวดตัวนำเดียวกันนั้น จะพันขดลวดบนแกนเหล็กชนิดผงโลหะในแกนเหล็กวงในด้วย และที่สำคัญ ในการพันขดลวดบนแกนเหล็กชนิดผงโลหะจะต้องคำนึงถึงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก จะต้องมิติศทางเสริมกัน เมื่อพิจารณาของทิศทางกระแสโหมดผลต่าง i_{DM}

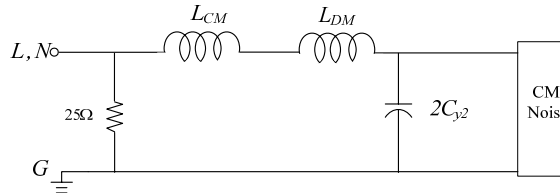


รูปที่ 4.14 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง แบบ PICM

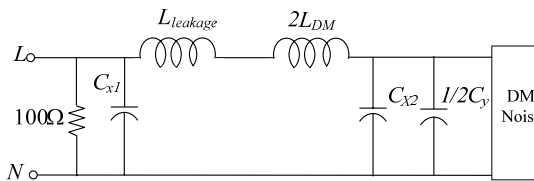
ในการวิเคราะห์เทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง แบบ PICM นั้น จะมีการวิเคราะห์การทำงานเหมือนกับการพันแบบ CM และการพันแบบ ICM และจากรูปที่ 4.15 จะแสดงวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM และในรูปที่ 4.15 (ก) จะเห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่างมีลักษณะการพันแบบแกนร่วมกัน และในรูปที่ 4.15 (ข) และรูปที่ 4.15 (ค) จะแสดงวงจรสมมูลสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และวงจรสมมูลสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ตามลำดับ และในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง



(ก) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM



(ข) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม



(ค) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

รูปที่ 4.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM

การหาค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โหมดผลร่วม และโหมดผลต่าง ซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

ก) โหมดผลร่วม

จากรูปที่ 4.16 แสดงวงจรสมมูลสำหรับการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และจากรูปที่ 4.16 (ก) เมื่อพิจารณาวงจรโหมดผลร่วม จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_Y มีค่าเท่ากับ $2C_Y$ และตัวเหนี่ยวนำ $L_{DM} = 1/2 L_{DM}$ เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 4.16 (ก) จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_p ต่อกันกับตัวเก็บประจุ C_Y และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_Y จะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_p จะได้ ดังในสมการที่ (4.19) และค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวเหนี่ยวนำ $\left(L_{CM} + \frac{1}{2} L_{DM} \right)$ จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ 25Ω ของ LISN ดังในสมการที่ (4.20) และจะได้ดังรูปที่ 4.16 (ข)

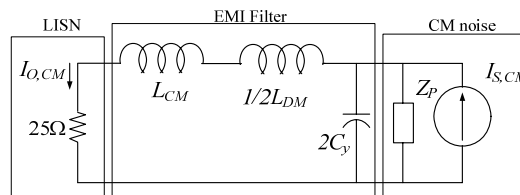
$$\frac{1}{\omega 2C_Y} \ll Z_p \quad (4.19)$$

และ

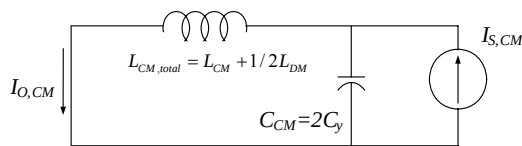
$$\omega \left(L_{CM} + \frac{1}{2} L_{DM} \right) \gg 25\Omega \quad (4.20)$$

จากรูปที่ 4.16 และเพื่อให้่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎีของ reciprocity จะได้ดังในรูปที่ 4.16 (ค) และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 (ค) จะเห็นว่าเป็นวงจรกรองความถี่ แบบ LC filter ดังนั้นค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม เท่ากับ 40 dB/dec ดังรูปที่ 4.16 (ง) และจะเห็นว่าจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,CM}$ จะถูกกำหนดจากค่า L_C โดยที่ $L_C = L_{CM} + 1/2 L_{DM}$ และ C_Y เพราะฉะนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่ จะหาได้จากสมการที่ (4.21)

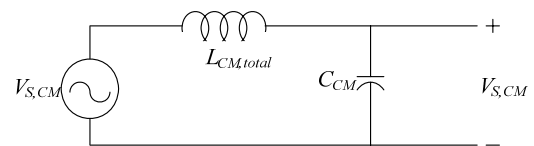
$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_{CM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{CM} + 1/2 L_{DM}) \cdot 2C_Y}} \quad (4.21)$$



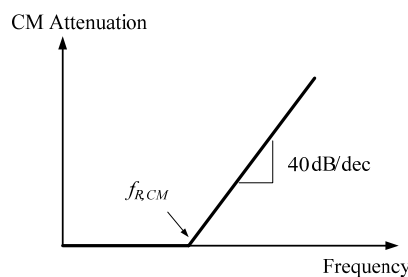
(ก) วงจรโหมดผลรวม



(ข) วงจรสมมูลโหมดผลรวม



(ค) วงจรสมมูลโหมดผลรวมโดยใช้ทฤษฎี reciprocity



(ง) การลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม

รูปที่ 4.16 การหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม

ข) โหมดผลต่าง

จากรูปที่ 4.17 ในการพิจารณาสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง จะมีวิธีการวิเคราะห์แบบเดียวกันกับการพันแบบ CM และการพันแบบ ICM โดยจะเริ่มจากการพิจารณาการทำงานของไดโอด ขณะที่สวิตช์เปิด โดยมีการพิจารณา คือ จากวงจรค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{X2} จะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ Z_P แต่จะหาค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 100Ω ของ LISN ดังนั้นจะได้ ดังสมการที่ (4.22) และ (4.23) และเมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า 100Ω ของ LISN จะได้ดังในรูปที่ 4.17 (ค) และเพื่อจะให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎี reciprocity จะได้ดังในรูปที่ 4.17 (จ)

$$\frac{1}{\omega C_{X2}} \ll Z_P \quad (4.22)$$

และ

$$\frac{1}{\omega C_{X1}} \gg 100 \quad (4.23)$$

จากรูปที่ 4.17 (ข) จะแสดงวงจรโหมดผลต่าง ขณะสวิตช์ปิด จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ C_{X2} จะต่ออนุกรมกับ Z_S ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{X2} จะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_S ดังสมการที่ (4.24) และเมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ 100Ω ของ LISN จะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ ของตัวเก็บประจุ C_{X1} สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.25) และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงใช้ทฤษฎีของ reciprocity จะได้ดังในรูปที่ 4.17 (ฉ)

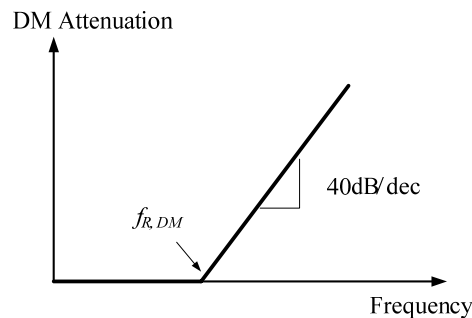
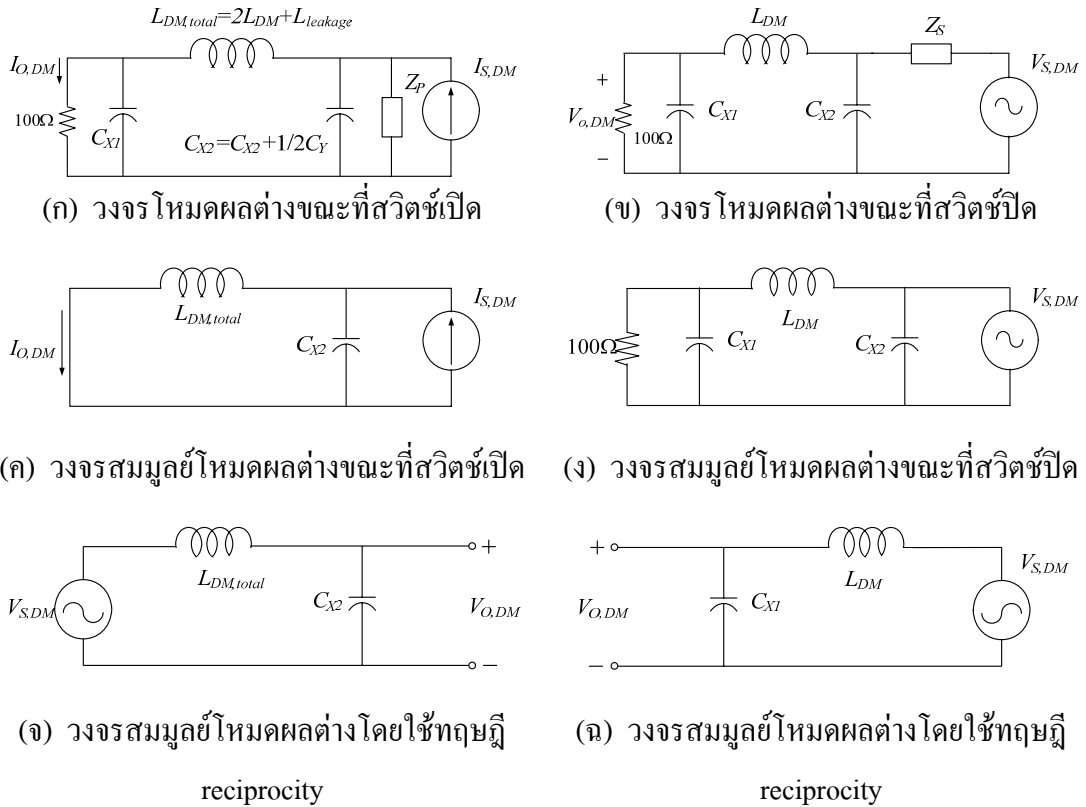
$$\frac{1}{\omega C_{X2}} \gg Z_S \quad (4.24)$$

และ

$$100 \gg \frac{1}{\omega C_{X1}} \quad (4.25)$$

และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.17 (จ) และรูปที่ 4.17 (ฉ) จะเห็นว่าจะเป็นการทำงานแบบวงจร LC filter โดยรูปที่ 4.17 (ข) จะแสดงการลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ซึ่งจะมีค่าความชันในการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง เท่ากับ 40 dB/dec และจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,DM}$ จะถูกกำหนดจากค่า $L_{DM,total}$ โดยที่ $L_{DM,total} = 2L_{DM} + L_{leakage}$ และ $C_{X1} = C_{X2} = C_{DM}$ เพราะฉะนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่ จะหาได้จากสมการที่ (4.26)

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{DM}C_{DM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2L_{DM} + L_{leakage}) \cdot C_{DM}}} \quad (4.26)$$



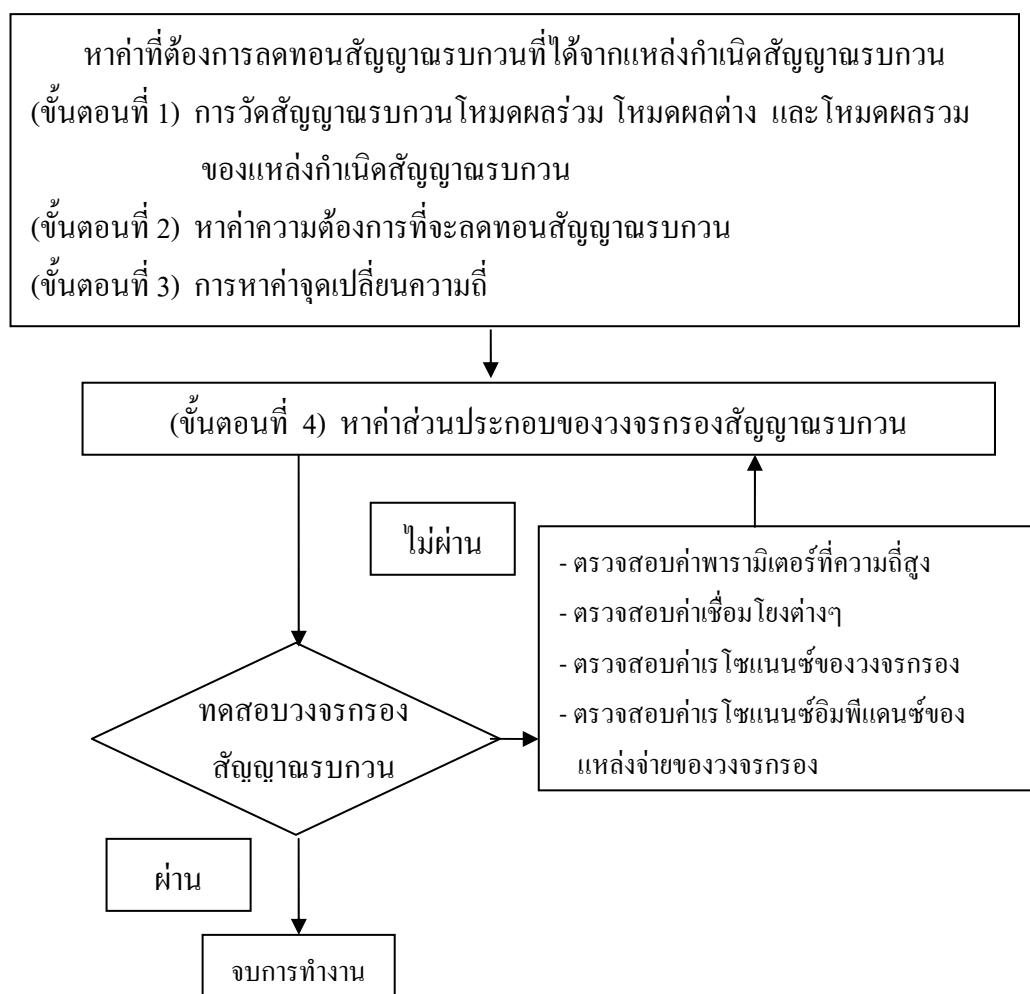
(ซ) การลดทอนสัญญาณรบกวนของสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

รูปที่ 4.17 วงจรสมมูลย์สำหรับการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง

4.1.3 ขั้นตอนนอกแบบวงจรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (ขั้นตอนที่ 3)

เมื่อได้วงจรสมมูลย์ของวงจรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบการพันแล้ว จากนั้นก็จะเริ่มในส่วนของการออกแบบ โดยสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.19 ซึ่งจะแสดงลำดับขั้นตอนการออกแบบ เริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ไม่มีวงจรองสัญญาณรบกวน จากนั้นทำการคำนวณหาความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวน โดยจะทำการเปรียบเทียบกับเส้นขีดจำกัดมาตรฐาน และขั้นตอนต่อมาทำการหาจุดเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง เพื่อที่จะคำนวณค่าส่วนประกอบในวงจรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อได้ค่าที่ต้องการแล้ว ทำ

การทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ว่าสามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตามที่คำนวณได้หรือไม่ ถ้าได้ก็เป็นการสิ้นสุด ขั้นตอนการออกแบบ แต่ถ้าไม่ผ่านเส้นขีดจำกัดมาตรฐาน จะต้องทำการตรวจสอบค่าต่างๆ เช่น ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่สูง และตรวจสอบค่าเชื่อมโยงต่างๆ ดังในรูปที่ 4.19 รวมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานอีกครั้ง แล้วจึงทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าใหม่อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 4.19 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม โหมดผลต่าง และโหมดผลรวม ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนขณะที่ไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โพรบกระแส ในการวัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้สัญญาณรบกวนโหมดผลรวม โหมดผลต่าง และโหมดผลรวมแล้ว จากนั้นก็ทำการหาค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวน โดยจะทำการเปรียบเทียบกับเส้นขีดจำกัดมาตรฐาน ตลอดจนความถี่ใช้งาน และจะรวมผลของการผิดพลาดจากการวัดประมาณ

3 dB ซึ่งจะหาการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม $V_{reg,CM}$ ได้จากสมการที่ (4.27) และการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง $V_{reg,DM}$ ได้จากสมการที่ (4.28)

$$(V_{reg,CM})_{dB} = (V_{CM})_{dB} - (V_{limit})_{dB} + 3dB \quad (4.27)$$

$$(V_{reg,DM})_{dB} = (V_{DM})_{dB} - (V_{limit})_{dB} + 3dB \quad (4.28)$$

เมื่อ

$(V_{CM})_{dB}$ คือ ค่าสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1

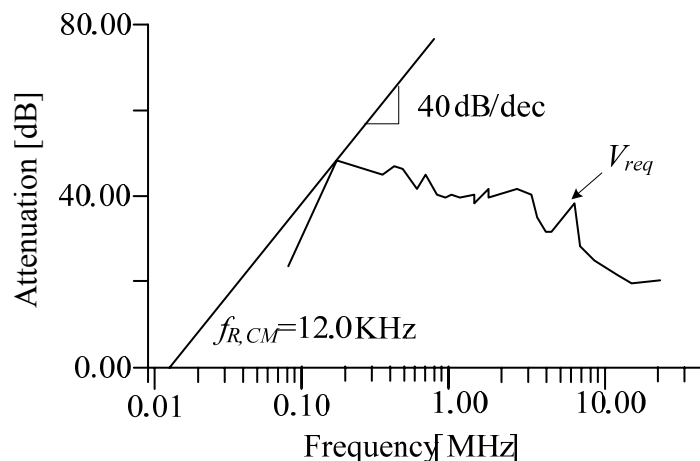
$(V_{DM})_{dB}$ คือ ค่าสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1

$(V_{limit})_{dB}$ คือ เส้นขีดจำกัดมาตรฐาน

3dB คือ ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการวัด

ขั้นตอนที่ 3 การหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่

ในขั้นตอนนี้จะมีความสำคัญมากเพราะถ้าจุดเปลี่ยนความถี่ไม่ถูกต้องแล้ว จะทำให้วงจรกรองสัญญาณรบกวนไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนตามที่ต้องการได้ เริ่มจากการนำค่าจากสมการที่ (4.27) คือ ค่าที่ต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม $(V_{reg,CM})_{dB}$ และจากสมการที่ (4.28) คือ ค่าที่ต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง $(V_{reg,DM})_{dB}$ มาหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่ โดยจะนำค่าที่ได้มาทำการพล็อต (plot) ลงในล็อกซเกล (log-log scale) ดังในรูปที่ 4.18 ซึ่งจะแสดงตัวอย่างการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่ [2] แล้วจากนั้นก็นำสโลป ขนาด 40 dB/dec มาตัดเส้นที่ต้องการลดทอนสัญญาณรบกวน แล้วจึงได้จุดเปลี่ยนความถี่ ดังรูป



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่

ขั้นตอนที่ 4 การหาค่าส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวน

จากขั้นตอนที่ 3 เราจะได้จุดเปลี่ยนความถี่ ของโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง จากนั้นนำค่าจุดเปลี่ยนความถี่ไปหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ดังนี้

ก) หาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลรวมจะได้ L_C และ C_Y

จากการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่ $f_{R,CM}$ ดังสมการที่ (4.29)

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM} \cdot 2C_Y}} \quad (4.29)$$

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จะได้ดังสมการที่ (4.30)

$$L_{CM} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,CM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot C_Y} \quad (4.30)$$

การหาค่าตัวเก็บประจุ C_Y จะได้ดังสมการที่ (4.31)

$$C_Y = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,CM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{CM}} \quad (4.31)$$

ข) หาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่าง L_{DM} , C_{X1} และ C_{X2}

และจากสมการที่ (4.29) จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ดังสมการที่ (4.32)

$$L_{DM} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_{DM}} \quad (4.32)$$

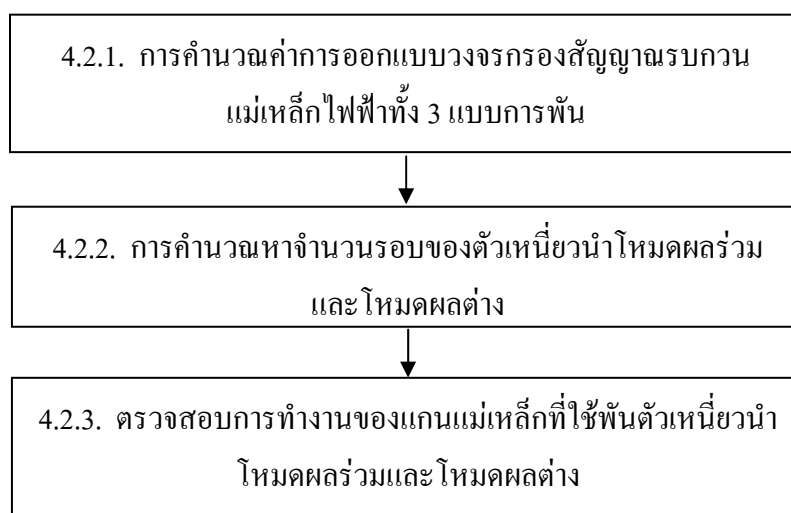
การหาค่าตัวเก็บประจุ $C_{DM} = C_{X1} = C_{X2}$ ได้ดังสมการที่ (4.33)

$$C_{DM} = C_{X1} = C_{X2} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{DM}} \quad (4.33)$$

เมื่อได้ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วก็สามารถประกอบเป็นวงจรกรองเพื่อนำไปทำการทดสอบว่าสามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวน ความถี่ที่ต้องการจะลดทอนสัญญาณรบกวนได้ และในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางทฤษฎีแล้ว จะสามารถทำได้ง่าย แต่ในความเป็นจริงนั้น ในทางปฏิบัติจะเป็นไปได้ยากและมีความยากลำบาก เนื่องจากผลของตัวอุปกรณ์ เช่น การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และค่าของตัวเก็บประจุที่จำกัด รวมทั้งคุณสมบัติของสารที่นำมาใช้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการวางตัวอุปกรณ์บนแผ่นวงจรไฟฟ้าไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการรบกวนระหว่างตัวอุปกรณ์

4.2 การคำนวณค่าการออกแบบและส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะเป็นการคำนวณค่าการออกแบบและส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบการพัน ที่ได้จากการขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อที่ 4.1 และ ทำการตรวจสอบการทำงานของแกนแม่เหล็กที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง ดังในรูปที่ 4.20 สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูป

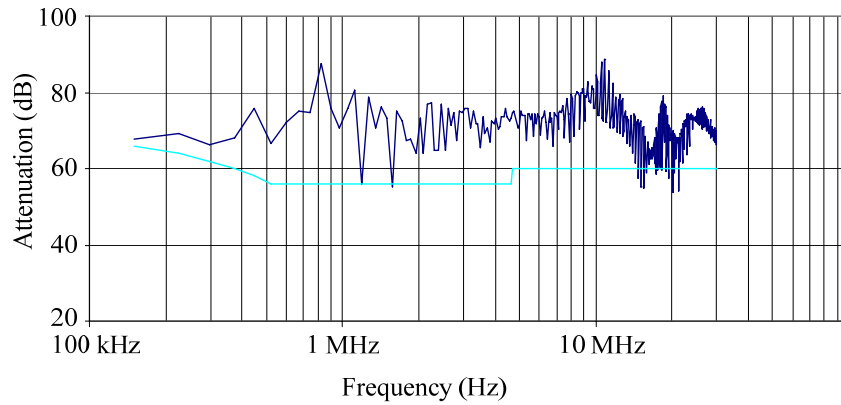


รูปที่ 4.20 การออกแบบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

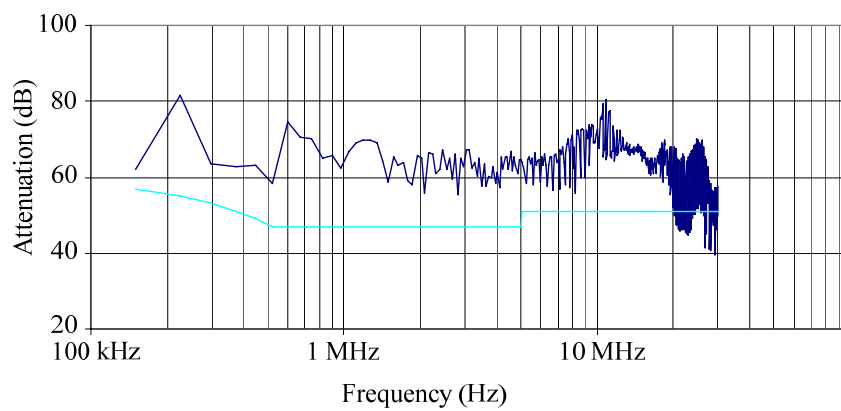
4.2.1. การคำนวณค่าการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.19 ในหัวข้อที่ 4.1.3 จะแสดงขั้นตอนออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการคำนวณค่าของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบ โดยการคำนวณจะสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 โดยจะเริ่มจากการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม และโหมดผลต่าง ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน คือ วงจรซุกคอนเวอร์เตอร์ ขณะที่ไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน ซึ่งในการวัดสัญญาณรบกวนจะใช้โพรบกระแสวัดสัญญาณรบกวนในโหมดต่างๆ และจะเก็บผลของสัญญาณรบกวนที่ได้จากเครื่อง EMC analyzer ในรูปของ excel แล้วจึงทำการพล็อตผลที่ได้ดังในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ซึ่งผลที่ได้จากการวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมจะได้ดังในรูปที่ 4.21 และสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างจะได้ดังในรูปที่ 4.22 และในรูปทั้งสองจะแสดงเส้นขีดจำกัดมาตรฐานตามมาตรฐาน EN 55022 Class B ด้วย



รูปที่ 4.21 สัญญาณรบกวนโหมดผลรวมที่ได้จากการวัด



รูปที่ 4.22 สัญญาณรบกวนโหมดผลต่างที่ได้จากการวัด

ขั้นตอนที่ 2 ในขั้นตอนนี้จะนำผลของสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม และโหมดผลต่าง ที่ได้จากการวัดในขั้นตอนที่ 1 มาทำการหาค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม และโหมดผลต่าง โดยจะทำการเปรียบเทียบกับเส้นขีดจำกัดมาตรฐาน และจะรวมผลของการผิดพลาดจากการวัดประมาณ 3 dB และในการหาค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม $V_{reg,CM}$ จะหาได้จากสมการที่ (4.27) และผลของค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม จะแสดงดังในรูปที่ 4.23 ตัวอย่างการหาค่า $V_{reg,CM}$ ที่ความถี่ 821.6 kHz จะได้ ค่า $(V_{CM})_{dB}$ เท่ากับ 87.5 dB และ $(V_{limit})_{dB}$ เท่ากับ 56 dB และค่าผิดพลาดจากการวัดประมาณ 3 dB จะได้ค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม เท่ากับ

$$(V_{reg,CM})_{dB} = (V_{CM})_{dB} - (V_{limit})_{dB} + 3 \text{ dB}$$

$$(V_{reg,CM})_{dB} = (87.5)_{dB} - (56)_{dB} + 3 \text{ dB} = 34.5 \text{ dB}$$

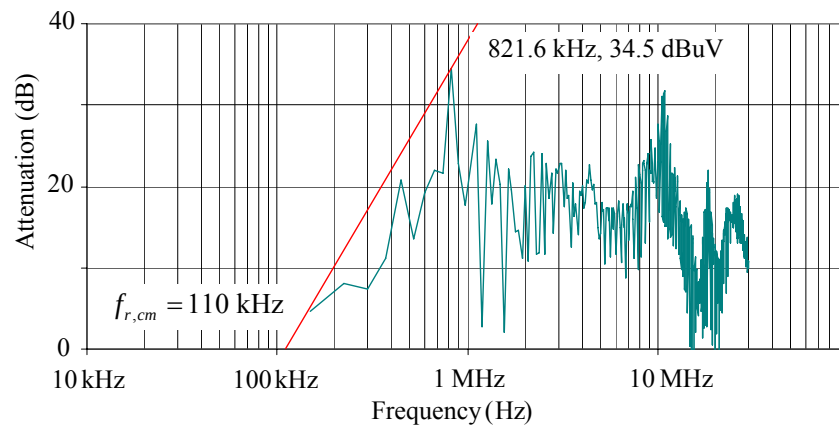
จะได้ $V_{reg,CM} = 34.5 \text{ dB}$ ดังในรูปที่ 4.22 จากนั้นในการหาค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง $V_{reg,DM}$ จะหาได้จากสมการที่ (4.28) และผลของค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลต่าง จะแสดงดังในรูปที่ 4.24 ตัวอย่างการหาค่า $V_{reg,DM}$ ที่

ความถี่ 224.6 kHz จะได้ ค่า $(V_{DM})_{dB}$ เท่ากับ 90.5 dB และ $(V_{limit})_{dB}$ เท่ากับ 64 dB และค่าผิดพลาดจากการวัดประมาณ 3 dB จะได้ค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวม เท่ากับ

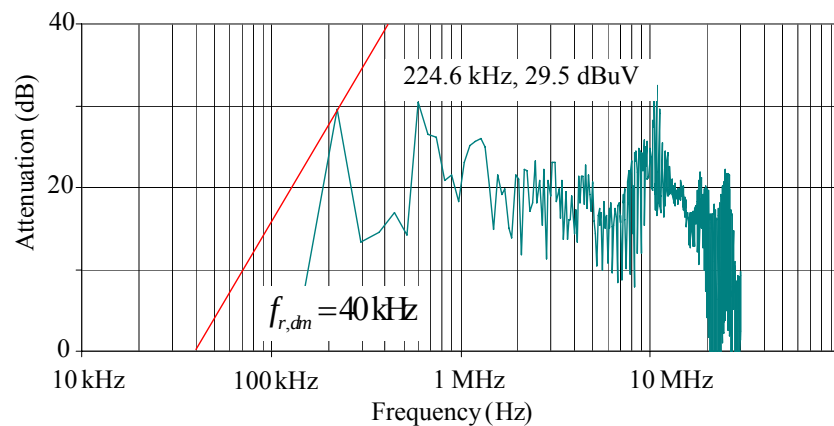
$$(V_{reg,DM})_{dB} = (V_{DM})_{dB} - (V_{limit})_{dB} + 3 \text{ dB}$$

$$(V_{reg,DM})_{dB} = (90.5)_{dB} - (64)_{dB} + 3 \text{ dB} = 29.5 \text{ dB}$$

จะได้ $V_{reg,DM}$ เท่ากับ 29.5 dB ดังในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 การลดทอนสัญญาณรบกวน และค่าจุดเปลี่ยนความถี่โหมดผลรวม $f_{r,CM}$



รูปที่ 4.24 การลดทอนสัญญาณรบกวน และค่าจุดเปลี่ยนความถี่โหมดผลต่าง $f_{r,DM}$

ขั้นตอนที่ 3 จะเป็นการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่ (f_r)

ในขั้นตอนที่ 2 นั้นจะได้ค่าความต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง แล้ว จากนั้นในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ข้อมูลจากผนวก ค จะแสดงการผลของการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่ (f_r) ด้วย ในขั้นตอนการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่นี้มีความสำคัญมากเพราะถ้าจุดเปลี่ยนความถี่ไม่ถูกต้องแล้ว จะทำให้วงจรกรองสัญญาณรบกวนไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนตามที่ต้องการได้ ในการหาค่าจุดเปลี่ยนความถี่ เริ่มจากการนำค่าที่ต้องการที่จะ

ลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม $(V_{reg,CM})_{dB}$ และ ค่าที่ต้องการที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง $(V_{reg,DM})_{dB}$ ในขั้นตอนที่ 2 จากนั้นนำสโลป ขนาด 40 dB/dec มาสัมผัสเส้นที่ต้องการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ดังในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งจะได้อัตราเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวม $f_{r,CM}$ เท่ากับ 110 kHz และอัตราเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลต่าง $f_{r,DM}$ เท่ากับ 40 kHz ดังในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ

ในส่วนของสโลป ขนาด 40 dB/dec นั้นจะได้มาจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.1

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการหาค่าส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรกรองสัญญาณรบกวน

จากขั้นตอนที่ 3 จะได้อัตราเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง จากนั้นในขั้นตอนนี้ จะเป็นการนำค่าอัตราเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ไปหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบการพัน ดังนี้

แบบที่ 1 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป

ก) หาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลรวมจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_C และตัวเก็บประจุ C_Y

ในการหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลรวมจะต้องหาค่ากระแสรั่วไหลลงดินก่อน ซึ่งดูจากวงจรกรองสัญญาณรบกวน ตัวเก็บประจุ C_Y จะต่ออยู่ระหว่างสายตัวนำกับกราวด์และสายนิวตรอนกับกราวด์ ดังนั้น กระแสรั่วไหลลงดิน I_{lkg} จะสามารถหาได้จาก $I_{lkg} = 2\pi f \cdot V \cdot (1.1) \cdot (1.2) \cdot C_{y,total}$ ซึ่งจากตารางที่ 3.1 ชัดจำกัดกระแสรั่วไหลลงดินสำหรับมาตรฐานความปลอดภัย สำหรับเครื่องมือที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ จะให้กระแสรั่วไหลลงดิน $I_{lkg} = 0.75 \text{ mA}$ ดังนั้นตัวเก็บประจุ $C_{y,total}$ จะมีค่าเท่ากับ

$$C_{y,total} = \frac{0.75 \times 10^{-3}}{2\pi f \cdot 240 \cdot 1.1 \cdot 1.2} = 7 \text{ nF}$$

จากการคำนวณจะได้ค่าตัวเก็บประจุ $C_{y,total}$ จะมีค่าเท่ากับ 7 nF ดังนั้นตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ $C_{y,total} = C_{Y1} + C_{Y2}$ ฉะนั้นจะได้ตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} มีค่าเท่ากับ $(7 \text{ nF})/2 = 3.5 \text{ nF}$

ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ที่คำนวณมีค่าเท่ากับ 3.5 nF จำนวน 2 ตัว แต่ค่าตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ที่ใช้ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 3.3 nF จำนวน 2 ตัว

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จะหาได้จากสมการที่ (4.30) โดยตัวเก็บประจุ C_Y ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ $3.3 \times 10^{-9} \text{ F}$ และอัตราเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวม $f_{r,CM}$ เท่ากับ 60 kHz ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำ L_{CM} จะมีค่าเท่ากับ

$$L_{CM} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,CM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2C_Y}$$

$$L_{CM} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 110 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 3.3 \times 10^{-9}} = 0.317 \text{ mH}$$

ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ใช้ จะมีค่าเท่ากับ 0.317 mH แต่ค่าความเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ใช้ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 0.36 mH

ข) หาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่าง L_{DM} , C_{X1} และ C_{X2}

จากสมการที่ (4.31) จะได้ค่าเหนี่ยวนำ L_{DM} ดังนั้นในการหาค่าเหนี่ยวนำ L_{DM} จึงทำการกำหนดค่า C_{X1} และ C_{X2} ก่อน เพราะฉะนั้นจึงกำหนดให้ C_{X1} และ C_{X2} เท่ากับ 0.68 μF และค่าจุดเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวม $f_{r,DM}$ เท่ากับ 40 kHz ดังนั้นค่าเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีค่าเท่ากับ

$$L_{DM} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_{DM}}$$

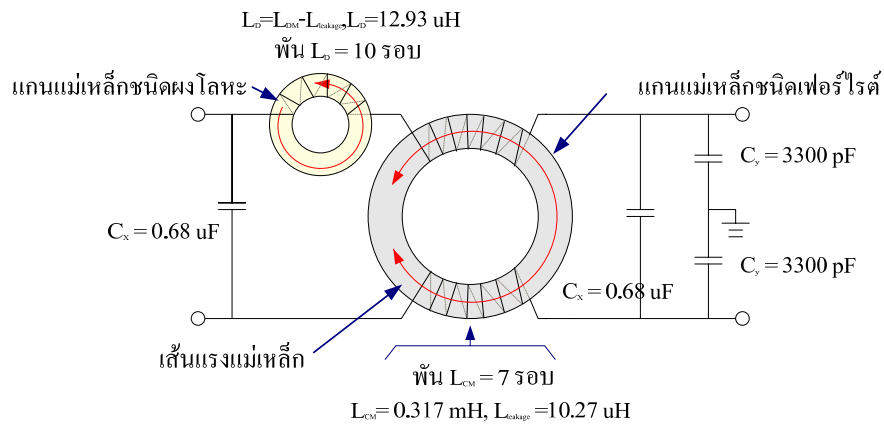
$$L_{DM} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 40 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{0.68 \times 10^{-6}} = 23.2 \text{ } \mu\text{H}$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 23.2 μH แต่ในทางปฏิบัติค่าความเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีผลของ ค่าความเหนี่ยวนำ $L_{leakage}$ ของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่ได้จากการวัดรวมอยู่ด้วย ดังนั้นค่าเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่จะใช้พันเป็นตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีค่าเท่ากับ 23.2 $\mu\text{H} - L_{leakage}$ และในการวัดค่าความเหนี่ยวนำ $L_{leakage}$ ของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} มีค่าเท่ากับ 10.27 μH ดังนั้นจะได้ค่าความเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่ใช้พันในทางปฏิบัติมีค่าเท่ากับ $23.2 \times 10^{-6} - 10.27 \times 10^{-6} = 12.93 \text{ } \mu\text{H}$

สรุปการหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป

- ค่าตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 3.5 nF แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 3.3 nF
- ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.317 mH แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 0.36 mH
- ค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 0.68 μF

- ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ $23.2 \mu\text{H}$ ในทางปฏิบัติมีค่าเท่ากับ $L_D = L_{DM} - L_{leakage} = 23.2 \times 10^{-6} - 10.27 \times 10^{-6} = 12.93 \mu\text{H}$



รูปที่ 4.25 ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทั่วไป

แบบที่ 2 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM

ก) หากค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลร่วมจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_C และตัวเก็บประจุ C_Y

จากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM ที่มีความแตกต่างกันกับแบบการพันแบบ CM นั้น ทำให้ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างมีความแตกต่างกันด้วย และจากเงื่อนไขในการวิจัยในบทที่ 1 ที่ว่า จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ใช้จะมีจำนวนรอบเท่ากัน ดังนั้นในหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM นั้นจะพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำเหนี่ยวนำ L_{CM} เท่ากับจำนวนรอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบทั่วไป และจากการคำนวณตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่มีการพันแบบ CM นั้น จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.317 mH และมีการพันเส้นลวดตัวนำบนแกนเฟอร์ไรต์ทั้งหมด 7 รอบ

ในทางปฏิบัติจากเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM ที่มีการพันแบบแกนร่วมระหว่างแกนแม่เหล็กชนิดเฟอร์ไรต์กับแกนผลโลหะ จะพันเส้นลวดตัวนำบนแกนเหล็กทั้งสองทั้งหมด 7 รอบ จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,L}$ มีค่าเท่ากับ 0.418 mH และค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,N}$ มีค่าเท่ากับ 0.422 mH ดังรูปที่ 4.26

การหาค่าตัวเก็บประจุ C_Y จะหาได้จากสมการที่ (4.18) โดยตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 0.42 mH และจุดเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลร่วม $f_{r,CM}$ เท่ากับ 110 kHz ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุ C_Y จะมีค่าเท่ากับ

$$C_Y = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,CM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{CM}}$$

$$C_Y = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 110 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{0.42 \times 10^{-3}} = 6 \text{ nF}$$

ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุ C_Y รวมที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าเท่ากับ 6 nF ดังนั้นตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} จะมีค่า 3 nF แต่ในทางปฏิบัติค่าตัวเก็บประจุ C_Y ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 2.7 nF จำนวน 2 ตัว

ข) หาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่าง L_{DM} , C_{X1} และ C_{X2}

จากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM จะได้ค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จากการพันของตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,leakage}$ ในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าของตัวเหนี่ยวนำ $L_{DM} = L_{CM,leakage} = 19.16 \mu\text{H}$

การหาค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะหาได้จากสมการที่ (4.13) โดยตัวเหนี่ยวนำ $L_{DM} = L_{CM,leakage} = 19.16 \mu\text{H}$ และค่าจุดเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวม $f_{r,DM}$ เท่ากับ 40 kHz ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะมีค่าเท่ากับ

$$C_X = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{r,DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{DM}}$$

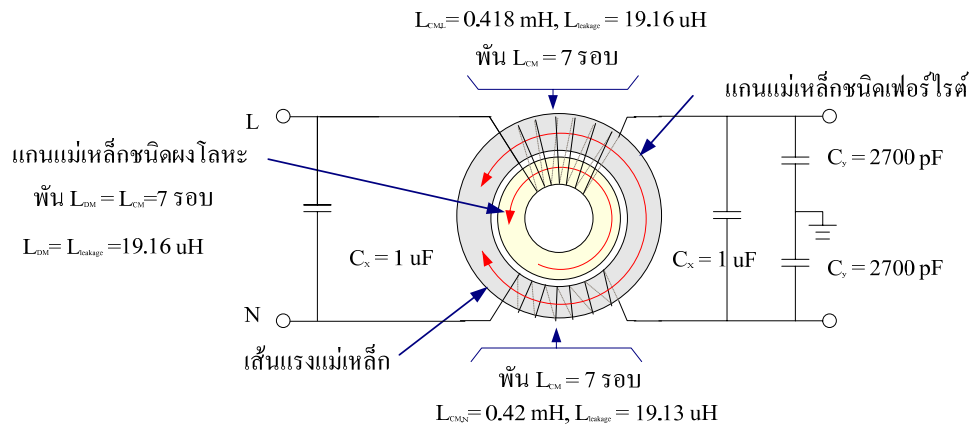
$$C_X = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 40 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{19.16 \times 10^{-6}} = 0.83 \mu\text{F}$$

ดังนั้นค่าของตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.83 μF แต่ในทางปฏิบัติค่าของตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะมีค่าเท่ากับ 1.0 μF

สรุปการหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ ICM

- ค่าตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 3 nF แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 2.7 nF
- ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.32 mH แต่ในทางปฏิบัติตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,L}$ จะมีค่าเท่ากับ 0.418 mH และตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,N}$ จะมีค่าเท่ากับ 0.422 mH
- ค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 1.0 μF

- ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ $23.2 \mu\text{H}$ แต่ในทางปฏิบัติตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} มีค่าเท่ากับ $L_{DM} = L_{CM,leakage} = 19.16 \mu\text{H}$



รูปที่ 4.26 ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ICM

แบบที่ 3 การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM

ก) หากค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลร่วมจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_C และตัวเก็บประจุ C_Y

จากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM ที่มีความแตกต่างกันกับแบบการพันแบบ CM และการพันแบบ ICM นั้น ทำให้ค่าตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างมีความแตกต่างกัน และจากเงื่อนไขในการวิจัยในบทที่ 1 ที่ว่า จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ใช้จะมีจำนวนรอบเท่ากัน ดังนั้นในหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM นั้นจะพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำเหนี่ยวนำ L_{CM} เท่ากับจำนวนรอบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบ CM และการพันแบบ ICM และจากการคำนวณตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่มีการพันแบบ CM นั้น จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.32 mH และมีการพันเส้นลวดตัวนำบนแกนเฟอร์ไรต์ทั้งหมด 7 รอบ

ในทางปฏิบัติจากเทคนิคการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM นั้น จะที่มีการพันแบบร่วมแกนเหล็กระหว่างแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์กับแกนเหล็กชนิดผงโลหะ จะพันเส้นลวดตัวนำบนแกนเหล็กทั้งสองทั้งหมด 7 รอบ จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,L}$ จากการวัดมีค่าเท่ากับ 0.401 mH และค่าตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,N}$ จากการวัดมีค่าเท่ากับ 0.419 mH ดังรูปที่ 4.27

การหาค่าตัวเก็บประจุ C_Y จะหาได้จากสมการที่ (4.21) โดยตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 0.419 mH และจุดเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลร่วม $f_{r,CM}$ เท่ากับ 110 kHz ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุ C_Y จะมีค่าเท่ากับ

$$C_Y = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{R,CM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{CM}}$$

$$C_Y = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 110 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{0.419 \times 10^{-3}} = 6 \text{ nF}$$

ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุ C_Y ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าเท่ากับ 6 nF แต่ในทางปฏิบัติค่าตัวเก็บประจุ C_Y ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 2.7 nF จำนวน 2 ตัว

ข) หาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในโหมดผลต่าง L_{DM} , C_{X1} และ C_{X2}

จากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM จะได้ค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จากการพันของตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,leakage}$ ในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าของตัวเหนี่ยวนำ $L_{DM} = L_{CM,leakage}$ ดังนั้นค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมจะมีค่าเท่ากับ $L_{CM,L,leakage} = 50.47 \text{ }\mu\text{F}$ และ $L_{CM,N,leakage} = 52.76 \text{ }\mu\text{F}$

การหาค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะหาได้จากสมการที่ (4.26) โดยตัวเหนี่ยวนำ $L_{DM} = L_{CM,leakage} = 52.76 \text{ }\mu\text{H}$ และค่าจุดเปลี่ยนความถี่ในโหมดผลรวม $f_{r,DM}$ เท่ากับ 40 kHz ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะมีค่าเท่ากับ

$$C_X = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{r,DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{DM}}$$

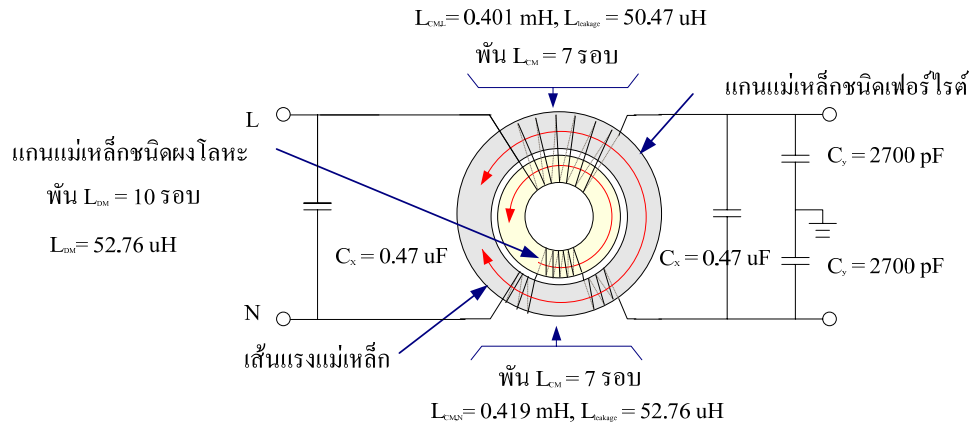
$$C_X = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 40 \times 10^3} \right)^2 \cdot \frac{1}{52.76 \times 10^{-6}} = 0.3 \text{ }\mu\text{F}$$

ดังนั้นค่าของตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.3 μF แต่ในทางปฏิบัติค่าของตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} จะมีค่าเท่ากับ 0.47 μF

สรุปการหาค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่างแบบ PICM

- ค่าตัวเก็บประจุ C_{Y1} และ C_{Y2} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 3 nF แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 2.7 nF
- ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.32 mH แต่ในทางปฏิบัติตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,L}$ จะมีค่าเท่ากับ 0.401 mH และตัวเหนี่ยวนำ $L_{CM,N}$ จะมีค่าเท่ากับ 0.419 mH
- ค่าตัวเก็บประจุ C_{X1} และ C_{X2} ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 0.47 μF

- ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ $23.2 \mu\text{H}$ แต่ในทางปฏิบัติตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} มีค่าเท่ากับ $L_{DM} = L_{CM,leakage} = 52.76 \mu\text{H}$



รูปที่ 4.27 ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PICM

เมื่อได้ค่าส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบการพันแล้วก็สามารถประกอบเป็นวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบว่าสามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ที่ต้องการจะลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้หรือไม่ และจากในรูปที่ 4.19 นั้นจะเป็นการนำเสนอขั้นตอนการออกแบบแล้วยังเป็นการตรวจสอบการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวน และแสดงเงื่อนไขการตรวจสอบดังรูป

4.2.2 การคำนวณหาจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง

การคำนวณหาจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างนั้น จะหาได้จากสมการที่ (4.34)

$$\text{Required turns} = \left[\frac{\text{desired } L \text{ (nH)}}{A_L \text{ (nH/N}^2\text{)}} \right]^{1/2} \quad (4.34)$$

เมื่อ $A_L \text{ (nH/N}^2\text{)}$ จะได้ข้อมูลจากผู้ผลิต(ผนวก ข)

จากสมการที่ 4.34 จะเป็นการคำนวณหาจำนวนรอบในการพันของตัวเหนี่ยวนำ โดยจะต้องทราบค่าเหนี่ยวนำที่ต้องการ แล้วจากนั้นเลือกขนาดของแกนเหล็กที่ใช้ในการพันซึ่งแกนเหล็กจะบอกค่า $A_L \text{ (nH/N}^2\text{)}$ ที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณหาจำนวนรอบการพันของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม

จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม ค่าที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.32 mH ดังนั้นจำนวนรอบที่ต้องการ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.34 เมื่อ $A_L \text{ (nH/N}^2\text{)}$ จะได้ข้อมูลจากผู้ผลิต(ผนวก ก) นั้นมีค่าเท่ากับ $8230 \text{ (nH/N}^2\text{)}$ จะมีค่าเท่ากับ

$$\text{Required turns} = \left[\frac{0.32 \times 10^6 \text{ (nH)}}{8230 \text{ (nH/N}^2\text{)}} \right]^{1/2} = 6.3 \text{ turns}$$

ดังนั้นจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมจะเท่ากับ 6.3 รอบ และในทางปฏิบัติแล้วจะพันเท่ากับ 7 รอบ และค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 0.36 mH

การคำนวณหาจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง

จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ค่าที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 23.2 μH ในทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ $L_D = L_{DM} - L_{leakage} = 23.2 \times 10^{-6} - 10.27 \times 10^{-6} = 12.93 \times 10^{-6} \text{ H}$ ดังนั้นจำนวนรอบที่ต้องการ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.34 เมื่อ $A_L \text{ (nH/N}^2\text{)}$ จะได้ข้อมูลจากผู้ผลิต (ผนวก ก) นั้นมีค่าเท่ากับ 100 $\text{(nH/N}^2\text{)}$ จะมีค่าเท่ากับ

$$\text{Required turns} = \left[\frac{12.9 \times 10^3 \text{ (nH)}}{100 \text{ (nH/N}^2\text{)}} \right]^{1/2} = 11.4 \text{ turns}$$

ดังนั้นจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมจะเท่ากับ 11 รอบ และในทางปฏิบัติแล้วจะพันเท่ากับ 10 รอบ และค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 12.6 μH

4.2.3 ตรวจสอบการทำงานของแกนเหล็กที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

ในขั้นตอนนี้ จะเป็นการตรวจสอบการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย โดยแกนเหล็กที่ใช้จะมี 2 ชนิด คือแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ และแกนเหล็กชนิดผงโลหะ แต่วิธีในการหาค่าการอิ่มตัวของแกนเหล็กของทั้งสองแกนเหล็กจะมีวิธีเหมือนกัน

โดยเริ่มจากการตรวจสอบการอิ่มตัวของแกนเหล็กชนิดเฟอร์ไรต์ จะเป็น ferrite core ยี่ห้อ KAWATETSU FERRITE รุ่น R-63/44/13.5 เนื้อสารชนิด MA070 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากสมการที่ 3. ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $B_{\max}$ ในแกนเหล็กนั้น เกิดขึ้นจากผลรวมของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_{DC} , B_{AC} และ B_r จะได้

$$B_{\max} = B_{DC} + B_{AC} + B_r < B_{\text{Sat}}$$

โดยที่ค่า B_r คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H มีค่าเป็นศูนย์ หรือเมื่อกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำทำแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งข้อมูลจากผู้ผลิตจะได้ B_r มีค่าประมาณ 100 mT (ผนวก ข) และการหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ จะหาได้จาก

$$B_{AC} = \frac{34 \times 10 \times 10^{-6}}{7 \times 159} = 0.3 \mu\text{T}$$

และในการหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง จะหาได้จาก

$$B_{DC} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 7 \times 2}{0.170} = 0.1 \text{ mT}$$

และนำค่าทั้งหมดที่หาได้แทนลงในสมการที่ (3.21) เพื่อหาค่า $B_{\max}$ จะได้

$$\begin{aligned} B_{\max} &= 0.1 \text{ mT} + 0.3 \mu\text{T} + 100 \text{ mT} \\ &= 99 \text{ mT} \end{aligned}$$

จากข้อมูลของผู้ผลิตแกนเหล็กนั้น แกนเนื้อสาร MA070 นั้นมี B_{Sat} อยู่ที่ 440 mT โดยค่าที่คำนวณได้ $B_{\max}$ นั้นมีค่าเพียง 99 mT เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขณะวงจรทำงานแกนเหล็กจะไม่เกิดการอิ่มตัวขึ้น

การตรวจสอบการอิ่มตัวของแกนเหล็กชนิดผงโลหะจะเป็น toroidal core ยี่ห้อ MICROMETALS รุ่น T157-26 โดยที่ค่า B_r จากผู้ผลิตจะได้ B_r มีค่าประมาณ 175 mT (ผนวก ก) และการหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับ จะหาได้จาก

$$B_{AC} = \frac{34 \times 10 \times 10^{-6}}{10 \times 106} = 3 \mu\text{T}$$

และในการหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง จะหาได้จาก

$$B_{DC} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 7 \times 2}{0.101} = 0.17 \text{ mT}$$

และนำค่าทั้งหมดที่หาได้แทนลงในสมการที่ (3.21) เพื่อหาค่า $B_{\max}$ จะได้

$$\begin{aligned} B_{\max} &= 0.17 \text{ mT} + 3 \mu\text{T} + 175 \text{ mT} \\ &= 174.83 \text{ mT} \end{aligned}$$

จากข้อมูลจากผู้ผลิตแกนเหล็กนั้น แกนเนื้อสาร MA070 นั้นมี B_{Sat} อยู่ที่ 1380 mT โดยค่าที่คำนวณได้ $B_{\max}$ นั้นมีค่าเพียง 174.83 mT เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขณะวงจรทำงานแกนเหล็กจะไม่เกิดการอิ่มตัวขึ้น

4.3 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอทั้ง 3 แบบการพัน ดังนี้

แบบที่ 1) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบทั่วไป

อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ CM ดังแสดงในรูปที่ 2.29 เมื่อพิจารณารูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ CM ในรูปที่ 2.29 (ก) จะได้ว่าจลสมมูลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ CM ดังในรูปที่ 2.28 (ข) โดยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} ได้จากการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} อีกแกนหนึ่ง และตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} ได้จากรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมในรูปที่ 2.29 (ก)

ในการหาค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ CM นั้นสามารถหาได้จากรูปที่ 2.29 (ก) โดยจะได้ transfer function ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ดังสมการที่ (4.35) โดยที่ Z_S คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และ Z_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

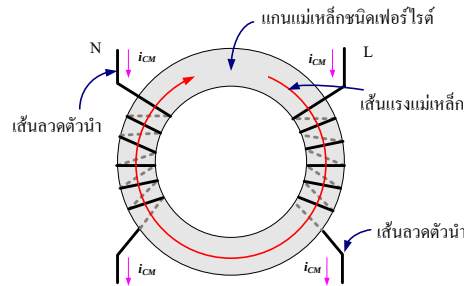
$$\frac{V_{OUT}}{V_S} = \frac{Z_L}{Z_S + Z_L + (j\omega L_{CM} + j\omega L_{DM})} \quad (4.35)$$

จากสมการที่ (4.35) แทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ CM ดังแสดงในสมการที่ (4.37) เมื่อค่า $Z_1 = j\omega L_{DM}, Z_2 = j\omega L_{CM}$

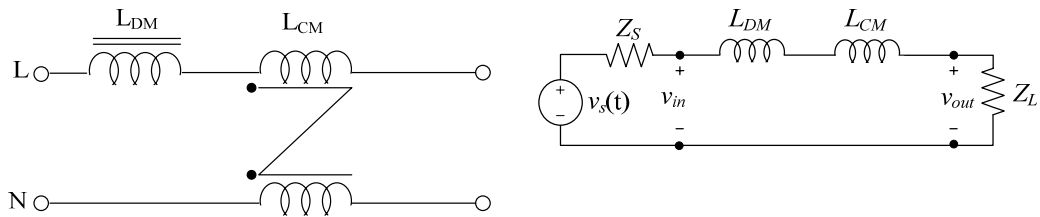
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{\frac{Z_L}{Z_S + Z_L}}{\frac{Z_L}{Z_S + Z_L + Z_1 + Z_2}} \right| \quad (4.36)$$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_S + Z_L} \right| \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.37) จะเห็นว่าถ้าค่าอินดักติฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) ของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Z_2) และโหมดผลต่าง (Z_1) มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง



(ก) รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมแบบ CM



(ข) วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ CM

(ค) อัตราการลดทอนของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ CM

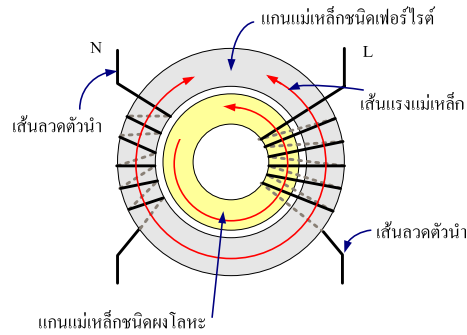
รูปที่ 4.28 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ CM

แบบที่ 2) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM

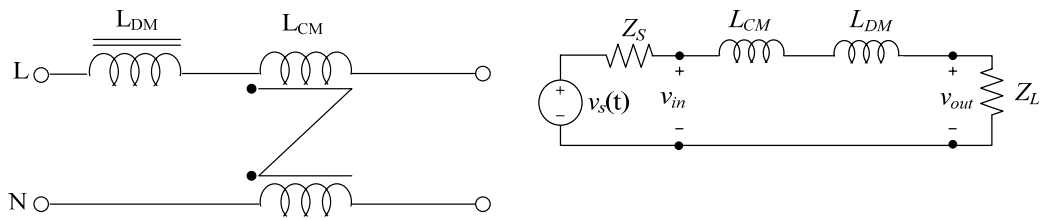
ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ ICM ดังแสดงในรูปที่ 2.30 เมื่อพิจารณารูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ ICM ในรูปที่ 2.30 (ก) จะได้วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ ICM ดังในรูปที่ 2.30 (ข)

ในการหาค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ ICM นั้นสามารถหาได้จากรูปที่ 2.30 (ค) โดยจะได้ transfer function ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ดังสมการที่ (4.38) โดยที่ Z_S คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และ Z_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

$$\frac{V_{OUT}}{V_S} = \frac{Z_L}{Z_S + Z_L + (j\omega L_{CM} + j\omega L_{DM})} \quad (4.38)$$



(ก) รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างแบบ ICM



(ข) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ ICM

(ค) อัตราการลดทอนของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ ICM

รูปที่ 4.29 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างที่มีการพันแบบ ICM

จากสมการที่ (4.38) แทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างที่มีการพันแบบ ICM ดังแสดงในสมการที่ (4.40) เมื่อค่า $Z_1 = j\omega L_{DM}$, $Z_2 = j\omega L_{CM}$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{\frac{Z_L}{Z_S + Z_L}}{\frac{Z_L}{Z_S + Z_L + Z_1 + Z_2}} \right| \quad (4.39)$$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_S + Z_L} \right| \quad (4.40)$$

จากสมการที่ (4.40) จะเห็นว่าถ้าค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) ของตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วม (Z_2) และโหมคผลต่าง (Z_1) มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง

จากสมการที่ (4.37) และ (4.40) จะเห็นว่าสมการจะเหมือนกัน แต่จะมีรูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมคผลร่วมและโหมคผลต่างมีความแตกต่างกัน

แบบที่ 3) การพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง แบบ PICM

ในการหาอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM จะแสดงในรูปที่ 2.31 เมื่อพิจารณารูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM ในรูปที่ 2.31 (ก) จะได้ว่าจลสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ PICM ดังในรูปที่ 2.31 (ข) เมื่อพิจารณาที่ตัวเหนี่ยวนำ L_{DM} จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการพันแบบ CM และ แบบ ICM

ในการหาค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ ICM นั้นสามารถหาได้จากรูปที่ 2.31 (ค) โดยจะได้ transfer function ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ดังสมการที่ (4.41) โดยที่ Z_S คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และ Z_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

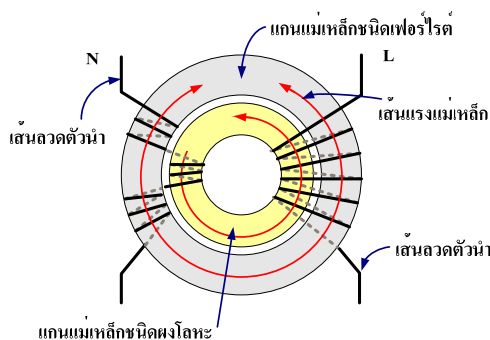
$$\frac{V_{OUT}}{V_S} = \frac{Z_L}{Z_S + Z_L + (j\omega L_{CM} + 2j\omega L_{DM})} \quad (4.41)$$

จากสมการที่ (4.41) แทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ PICM ดังแสดงในสมการที่ (4.43) เมื่อค่า $Z_1 = j\omega L_{DM}$, $Z_2 = j\omega L_{CM}$

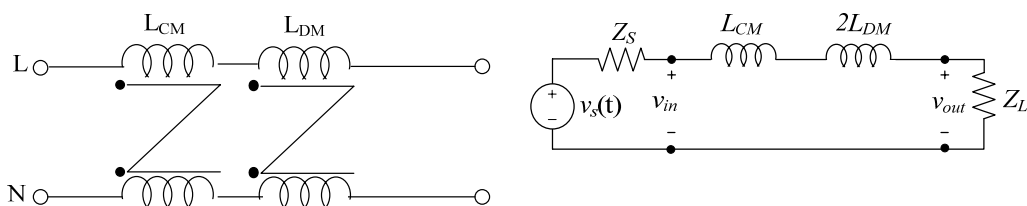
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{\frac{Z_L}{Z_S + Z_L}}{\frac{Z_L}{Z_S + Z_L + Z_1 + 2Z_2}} \right| \quad (4.42)$$

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_1 + 2Z_2}{Z_S + Z_L} \right| \quad (4.43)$$

จากสมการที่ (4.43) จะเห็นว่าถ้าค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) ของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (Z_2) และโหมดผลต่าง (Z_1) มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง



(ก) รูปแบบการพันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างแบบ PICM



(ข) วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ PICM

(ค) อัตราการลดทอนของตัวเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ PICM

รูปที่ 4.30 อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่มีการพันแบบ PICM

4.4 สรุปการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 สรุปการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วนประกอบของ วงจรกรอง		รูปแบบการพัน		
		การพันแบบ CM	การพันแบบ ICM	การพันแบบ PICM
L_{CM} (mH)	$L_{CM,L}$	0.38	0.422	0.401
	$L_{CM,N}$	0.38	0.418	0.419
L_{DM} และ $L_{leakage}$ (μH)	$L_{DM,L}$	23.2	19.13	50.47
	$L_{DM,N}$	10.2	19.16	52.76
$C_{X1,X2}$ (μF)		0.68	1.0	0.47
$C_{Y1,Y2}$ (pF)		3300	2700	2700
จำนวนรอบ (รอบ)	L_{CM}	7	7	7
	L_{DM}	10	-	10

สรุปการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (ต่อ)

ส่วนประกอบของ วงจรกรอง		รูปแบบการพัน		
		การพันแบบ CM	การพันแบบ ICM	การพันแบบ PICM
น้ำหนัก (กรัม)		204	197	210
ปริมาตร ของแกน เหล็ก	ชนิด เฟอร์ ไรต์	ferrite core ยี่ห้อ KAWATETSU FERRITE รุ่น R-63/44/13.5		
	ชนิดผง โลหะ	toroidal core ยี่ห้อ MICROMETALS รุ่น T157-26		
ลักษณะการพันตัว เหนี่ยวนำ		ง่าย	ง่าย	ยาก
ชนิดของตัวเก็บประจุ C_X		ตัวเก็บประจุที่ทำมาจากโพลีเอทิลีน		
ชนิดของตัวเก็บประจุ C_Y		ตัวเก็บประจุที่ทำมาจากเซรามิก		
insertion loss		$20 \log_{10} \left 1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_S + Z_L} \right $	$20 \log_{10} \left 1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_S + Z_L} \right $	$20 \log_{10} \left 1 + \frac{Z_1 + 2Z_2}{Z_S + Z_L} \right $
attenuation		40 dB/dec	40 dB/dec	40 dB/dec