

บทที่ 3

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน และหลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้ หัวข้อที่ 3.1 จะกล่าวถึงหลักการในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรกรองความถี่พื้นฐานแบบต่างๆ รวมทั้งวิธีการคำนวณกระแสรั่วไหลลงดินที่ใช้ในการวิจัย และหัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดการทำงานต่างๆ และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการออกแบบความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อตรวจสอบการอิมิตัวของแกนแม่เหล็กที่ใช้ในการวิจัย

3.1 หลักการทั่วไปของเทคนิคต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทั่วไปและทฤษฎีต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย เพื่อให้มีความเข้าใจการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และวิธีที่จะลดทอนสัญญาณรบกวน รวมทั้งวิธีการคำนวณกระแสรั่วไหลลงดินที่ใช้กับวงจรกรองสัญญาณรบกวน สามารถสรุปได้ดังนี้

3.1.1 การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จะหาได้จากสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ลดลง ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และในการหาค่าอัตราการกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (insertion loss: IL_{dB}) [12] จะหาได้จาก

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left| \frac{P_{L,WO}}{P_{L,W}} \right| = 10 \log \left| \frac{V_{L,WO}^2 / Z_L}{V_{L,W}^2 / Z_L} \right| \quad (3.1)$$

หรือ

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{V_{L,WO}}{V_{L,W}} \right| + 10 \log \left| \frac{Z_L}{Z_L} \right| \quad (3.2)$$

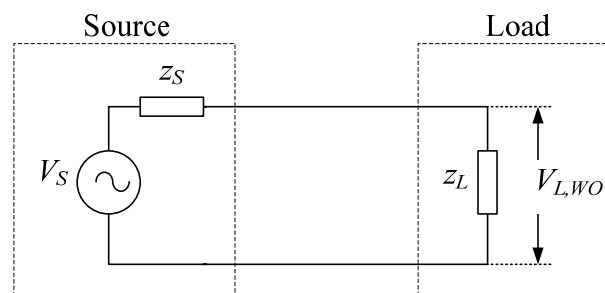
หรือ

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{I_{L,WO}}{I_{L,W}} \right| + 10 \log \left| \frac{Z_L}{Z_L} \right| \quad (3.3)$$

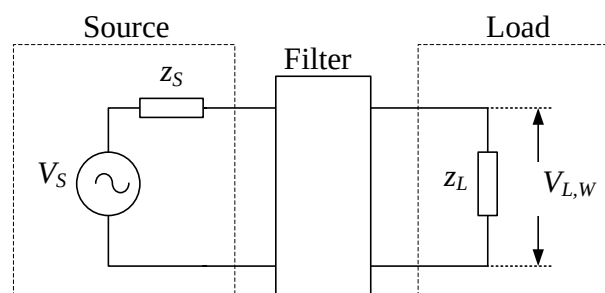
เมื่อ

- $V_{L,WO}$ คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดขณะไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
 $V_{L,W}$ คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
 $P_{L,WO}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดขณะไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
 $P_{L,W}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
 $I_{L,WO}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดขณะไม่มีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
 $I_{L,W}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดขณะมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน
 Z_L คือ อิมพีแดนซ์โหลด

ในการพิจารณา ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลด Z_L เป็นจำนวนจริงที่เท่ากัน ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนและไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน และระดับกำลังไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน ในหน่วยของ dB นั้น จะทำให้อัตราการกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ และจากรูปที่ 3.1 จะแสดงวงจรไฟฟ้าขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนและขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



(ก) วงจรไฟฟ้าขณะที่ไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน



(ข) วงจรไฟฟ้าขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้าขณะที่ใส่และไม่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน

3.1.2 กระแสรั่วไหลลงดิน

โดยปกติวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำโหมคผลรวมและตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง และตัวเก็บประจุ C_X และ C_Y ในส่วนตัวเก็บประจุ C_Y ที่ต่อระหว่างสายตัวนำและกราวด์ ซึ่งในการต่อตัวเก็บประจุลงกราวด์ C_Y นั้น จะต้องพิจารณาในเรื่องกระแสรั่วไหลลงดิน (earth leakage current) ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนหน้าที่ของตัวเก็บประจุ C_Y นี้จะเป็นตัวกำจัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนโหมคผลรวมที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และในการคำนวณหาค่ากระแสรั่วไหลลงดิน [13] จะคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$I_{lkg} = 2\pi f \times V \times (1.1) \times (1.2) \times C \quad (3.4)$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_Y ที่ 220 V

f คือ ความถี่ (50 Hz)

C คือ ค่าเก็บประจุ C_Y ทั้งหมด

ค่าคงที่ 1.1 และ 1.2 ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $\pm 10\%$ และตัวเก็บประจุ $\pm 20\%$ ตามลำดับ

สำหรับเหตุผลหลักของการป้องกันกระแสรั่วไหลลงดิน คือระวังผลกระทบจากระบบไฟฟ้าในสภาวะเกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงมีการกำหนดกระแสรั่วไหลลงดิน สำหรับเส้นลวดจำกัดกระแสรั่วไหลลงดินสำหรับมาตรฐานความปลอดภัยของอุปกรณ์ จะยอมให้กระแสไหลผ่านในตัวนำไฟฟ้าลงดินจะมีอยู่หลายมาตรฐาน แต่ละมาตรฐานที่มีความแตกต่างกันมาก จะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ จากตารางที่ 3.1 จะแสดงค่าขีดจำกัดกระแสรั่วไหลลงดินสำหรับมาตรฐานความปลอดภัยของอุปกรณ์ และในส่วนของกระแสรั่วไหลลงดิน จะแสดงค่าความต้องการสำหรับมาตรฐานความปลอดภัยของตัวอุปกรณ์ และในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ที่นำมาทำการทดสอบจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ดังนั้นค่าที่ได้จากตารางที่ 3.1 จะได้ค่ากระแสรั่วไหลลงดินจะมีค่าเท่ากับ 0.75 mA สำหรับอุปกรณ์ สามารถเคลื่อนย้ายได้ และเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.4 จะได้ค่าตัวเก็บประจุ C_Y สูงสุดเท่ากับ 4.7 nF

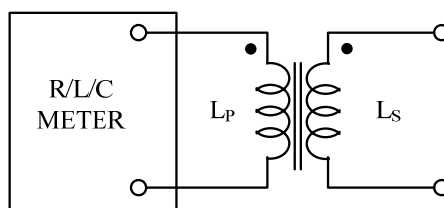
สำหรับทางการแพทย์ เครื่องมือที่สามารถเคลื่อนย้ายได้และเครื่องมือที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ กระแสรั่วไหลลงดินจะมีเส้นลวดจำกัดสัญญาณระดับที่ต่ำมาก ดังนั้นการใช้ตัวเก็บประจุ C_Y ไม่สามารถใช้งานได้เพราะค่าของตัวเก็บประจุที่มีอยู่จะมีค่ามาก ดังนั้นวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องเพิ่มค่าเหนี่ยวนำโหมคผลรวม หรือทำการเพิ่มวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า หรือทำการปรับปรุงค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมคผลรวม ดังนั้น จากแนวโน้ม จะมีแนวโน้มอาจจะทำให้วงจรกรองสัญญาณรบกวนมีขนาดใหญ่และแพงมากในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดกระแสรั่วไหลลงดินสำหรับมาตรฐานความปลอดภัยของอุปกรณ์

มาตรฐาน	Class I portable	Class II stationary	Class II
EN 60335-1 ที่พักอาศัย	0.75 mA	3.5 mA	0.25 mA
EN 60950 ITE	0.75 mA	3.5 mA	0.25 mA
EN 61010 เครื่องมือวัด & ควบคุม	Sinusoidal	Non-sinusoidal	DC
	0.5 mA	0.7 mA	2 mA
EN 60601-1 ทางกายภาพ	Type B	Type BF	Type CF
	0.5 mA earth leakage		
	0.1 mA	0.1 mA	0.01 mA

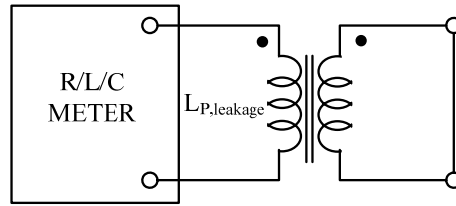
3.1.3 การวัดค่าเหนี่ยวนำและการวัดค่าเหนี่ยวนำรั่วไหล

การวัดค่าเหนี่ยวนำโดยส่วนมากจะวัดค่าโดยใช้มิเตอร์ที่สามารถวัดค่าเหนี่ยวนำได้ ในการวัดค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำหรือค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกัน และจากรูปที่ 3.2 จะแสดงการวัดค่าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ โดยที่ขั้วของขดลวดปฐมภูมิจะต่อกับขั้วของมิเตอร์ ในขณะที่ขดลวดทุติยภูมิจะมีลักษณะเปิดวงจร (open circuit) และในการวัดค่าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิจะทำเช่นเดียวกันในการวัดค่าเหนี่ยวนำที่ขดปฐมภูมิ สิ่งที่สำคัญในการวัดค่าเหนี่ยวนำ คือมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดจะต้องมีมาตรฐานรับรอง เพราะแรงดันที่ป้อนและความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้ค่าเหนี่ยวนำมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 3.2 การวัดค่าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ [14]

สำหรับการวัดค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดนั้นจะสามารถทำได้ดังในรูปที่ 3.3 จะแสดงการวัดค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิ ($L_{P,leakage}$) โดยที่ขั้วของขดลวดปฐมภูมิจะต่อกับมิเตอร์ ในขณะที่ขดลวดทุติยภูมิจะมีลักษณะปิดวงจร (short circuit) และเช่นเดียวกันการวัดค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ขดลวดทุติยภูมิ ($L_{S,leakage}$) โดยที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิจะต่อกับมิเตอร์ ในขณะที่ขดลวดปฐมภูมิจะมีลักษณะปิดวงจร (short circuit)



รูปที่ 3.3 การวัดค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิ

3.1.4 วงจรกรองความถี่แบบทั่วไป

วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (passive filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอ็กทีฟ (active filter) และในการกรองสัญญาณรบกวนส่วนมากจะใช้วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ เพราะมีตัวอุปกรณ์น้อยทำให้มีการสูญเสีย น้อยและง่ายต่อการใช้งานเพราะไม่จำเป็นต้องหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่ม ในทางปฏิบัติจะอธิบาย วงจรกรองความถี่ในรูปของการตอบสนองทางความถี่ โดยพิจารณาระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด สำหรับวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ ที่จะนำเสนอจะมี 5 วงจร ดังนี้

ก) วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ (inductor filter) หรือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือ วงจรที่ยอมให้สัญญาณรบกวนความถี่ต่ำผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณรบกวนความถี่สูงไว้ ดังแสดงใน รูปที่ 3.4 และในรูปที่ 3.4 (ก) จะแสดงทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $H(j\omega)$ ของแรงดันด้านออกและแรงดันด้านเข้าของวงจรกรองความถี่ ดังสมการที่ (3.5) และในการพิจารณานั้นจะพิจารณาเฉพาะขนาดของ $|H(j\omega)|$

$$H(p) = \frac{\hat{V}_{out}}{\hat{V}_{in}} \quad (3.5)$$

$$= \frac{R_L}{R_L + pL}$$

$$= \frac{1}{1 + pL/R_L}$$

$$H_{LP}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega L/R_L} \quad (3.6)$$

จากรูปที่ 3.4 จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน และผลการตอบสนองทางความถี่ในทางอุดมคติและทางปฏิบัติจะแสดงดังในรูปที่ 3.4 (ข) และที่จุด ω_c คือค่าจุดเปลี่ยนความถี่ (cut-off frequency) ของวงจรกรองความถี่ นั้น และในจุดนี้เมื่อพิจารณาที่จุด A โดยที่ A คือ ขนาดของ $|H(j\omega)|$ จะพบว่า ที่จุด ω_c ขนาดของ $|H(j\omega)|$ จะมีค่าลดลง $1/\sqrt{2}$ แล้วจะพบว่า

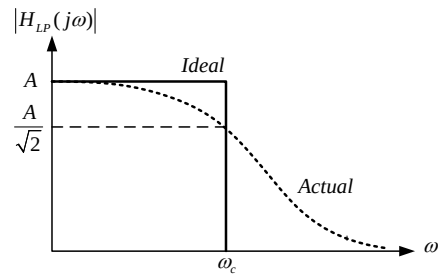
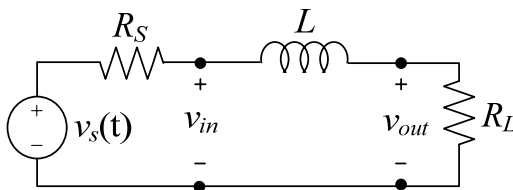
ที่จุดเปลี่ยนความถี่ จะมีค่าลดลง 3-dB หรือ ขนาดกำลังไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.6) เมื่อ $\omega \rightarrow 0$ จะทำให้ A มีค่าเท่ากับ 1 และถ้า $\omega \rightarrow \infty$ จะทำให้ A มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่จึงมีค่าเท่ากับ

$$\omega_c = \frac{R_L}{L} \quad (3.7)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.6) แล้วจะได้

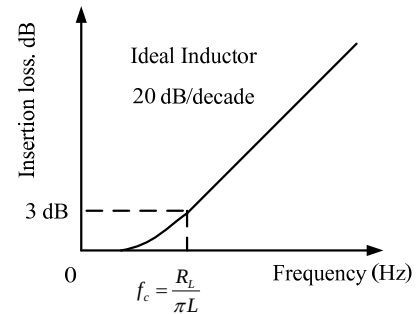
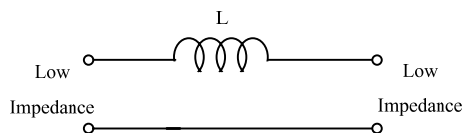
$$H(j\omega_c) = \frac{1}{1 + j1} \quad (3.8)$$

จะได้ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ ดังในรูปที่ 3.4 (ข)



(ก) วงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ



(ค) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

(ง) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 3.4 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบตัวเหนี่ยวนำ นั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 3.4 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ ดังในสมการที่ (3.9)

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_S + Z_L} \right| \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) จะเห็นว่าถ้าค่าอินดักติฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 3.4 (ค)

ในทางปฏิบัติ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านน่าจะใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูง เพราะเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนสูงขึ้น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามความถี่ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดคงที่ จะทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนจะสูงขึ้น และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 20 dB/decade ดังในรูปที่ 3.4 (ง)

ข) วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ (capacitor filter) หรือวงจรกรองความถี่สูงผ่าน คือวงจรที่ไม่ยอมให้สัญญาณรบกวนความถี่ต่ำผ่าน แต่จะให้สัญญาณรบกวนความถี่สูงผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และในรูปที่ 3.5 (ก) จะแสดงการต่อวงจรเพื่อหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน $H(j\omega)$ ของแรงดันด้านออกและแรงดันด้านเข้าของวงจรกรองความถี่ ดังสมการที่ (3.10) และในการพิจารณานั้นจะพิจารณาเฉพาะขนาดของ $|H(j\omega)|$ และ $H_{HP}(j\omega)$ จะหาได้จากสมการที่ (3.13)

$$H_{HP}(p) = \frac{R_L}{R_L + 1/j\omega C} \quad (3.10)$$

$$H_{HP}(j\omega) = \frac{j\omega R_L C}{1 + j\omega R_L C} \quad (3.11)$$

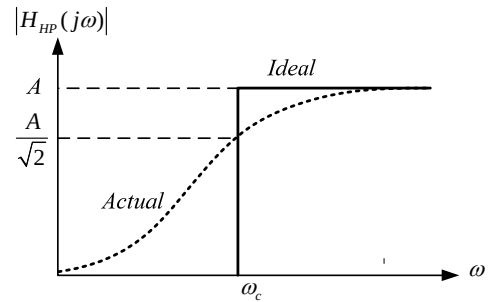
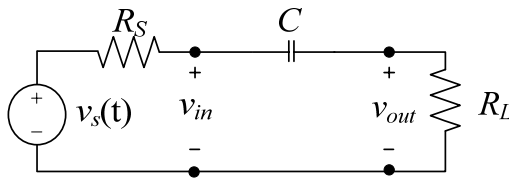
จากรูปที่ 3.5 จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน และผลการตอบสนองทางความถี่ในทางอุดมคติและทางปฏิบัติจะแสดงดังในรูปที่ 3.5 (ข) และที่จุด ω_c คือค่าจุดเปลี่ยนความถี่ของวงจรกรองความถี่นั้น และ เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.11) เมื่อ $\omega \rightarrow 0$ จะทำให้ $H_{HP}(j\omega)$ มีค่าเท่ากับ 0 และถ้า $\omega \rightarrow \infty$ จะทำให้ $|H_{HP}(j\omega)|$ มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1 ดังนั้นค่าจุดเปลี่ยนความถี่จึงมีค่าเท่ากับ

$$\omega_c = \frac{1}{R_L C} \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.11) แล้วจะได้

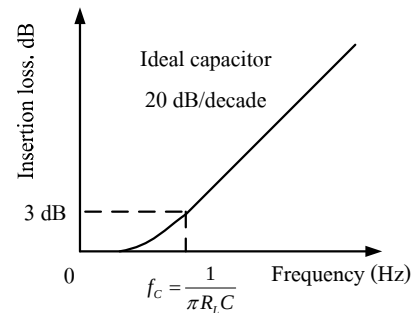
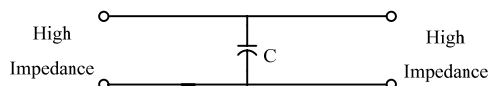
$$H_{HP}(j\omega_c) = \frac{j1}{1 + j1} \quad (3.13)$$

จะได้ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ ดังในรูปที่ 3.5 (ข) และที่จุด ω_c จะมีค่าลดลง 3-dB หรือ ขนาดกำลังไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่งของแต่ละความถี่



(ก) วงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ



(ค) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่ตัวเก็บประจุ

(ง) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.5 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุ

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบตัวเก็บประจุนั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 3.5 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ ดังในสมการที่ (3.14)

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_P}{Z_C} \right| \quad (3.14)$$

เมื่อ Z_P มีค่าเท่ากับ $\frac{Z_L \times Z_S}{Z_L + Z_S}$

จากสมการที่ (3.14) จะเห็นว่า ถ้าค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (capacitive reactance) มีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดที่นำมาต่อจะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนได้สูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 3.5 (ค)

ในทางปฏิบัติ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการลดทอนสัญญาณรบกวนสูงขึ้น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุลดลงตามความถี่ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดคงที่ จะทำให้การลดทอนสัญญาณรบกวนจะสูงขึ้น และวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 20 dB/decade ดังในรูปที่ 3.5 (ง)

ค) วงจรกรองความถี่แบบ LC

วงจรกรองความถี่แบบ LC (LC filter) คือวงจรกรองความถี่ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุและสามารถต่อวงจรกรองความถี่แบบ LC ได้ดังในรูปที่ 3.6 (ก) โดยที่วงจรกรองความถี่แบบ LC จะเหมาะสำหรับความต้องการที่จะเพิ่มอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนให้มีความถี่สูงขึ้น และค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าแตกต่างกัน และค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองความถี่แบบ LC สามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 3.6 (ข) และจากรูปที่ 3.6 (ก) จะแสดงการต่อวงจรเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $H(j\omega)$ ของแรงดันคัตเอาท์และแรงดันคัตเข้าของวงจรกรองความถี่แบบ LC นั้นจะได้ดังสมการที่ (3.16) และ เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.16) เมื่อ $\omega \rightarrow 0$ จะทำให้ $H_{HP}(j\omega)$ มีค่าเท่ากับ 1 และถ้า $\omega \rightarrow \infty$ จะทำให้ $|H_{HP}(j\omega)|$ มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นเมื่อแทนค่าการตอบสนองต่อความถี่แล้วจะพบว่าวงจรกรองความถี่แบบ LC จะมีการตอบสนองต่อความถี่เหมือนกับวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

$$H(p) = \frac{\hat{V}_{out}}{\hat{V}_{in}} \quad (3.15)$$

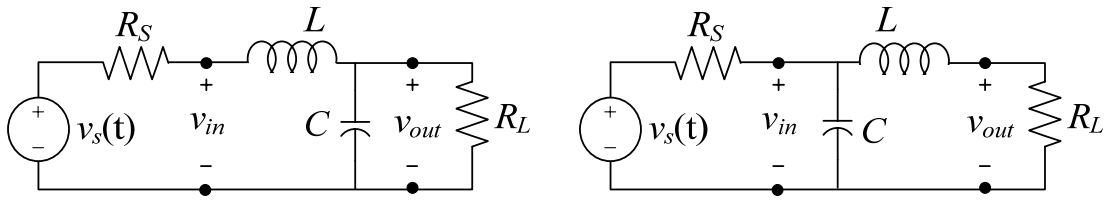
$$= \frac{RL \parallel 1/j\omega C}{RL \parallel 1/j\omega C + j\omega L}$$

$$= \frac{1}{LCj\omega^2 + j\omega L/R_L + 1}$$

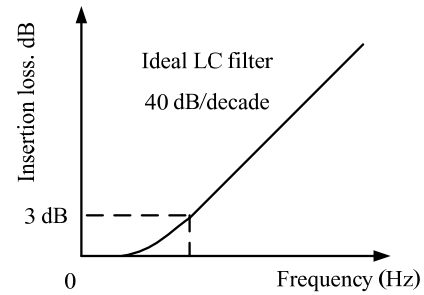
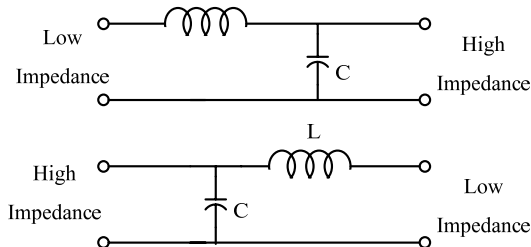
$$H(j\omega) = \frac{1}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega L/R_L} \quad (3.16)$$

เมื่อพิจารณาที่จุดเปลี่ยนความถี่ ω_c จะได้ดังสมการที่ (3.17)

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.17)$$



(ก) วงจรกรองความถี่แบบ LC ทั้ง 2 แบบ



(ข) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่แบบ LC

(ค) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ LC

รูปที่ 3.6 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบ LC

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ LC นั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 3.6 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ ดังในสมการที่ (3.18) โดยจะกำหนดให้ $Z_S = Z_L = R_o$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{(1-d)^2 F^2}{2d} + F^4 \right| \quad (3.18)$$

เมื่อ $d = \frac{L}{CR_o^2}$ คือค่า damping ratio

$$F = \frac{f}{f_o}$$

ในการพิจารณาค่า damping ratio ที่เกิดขึ้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

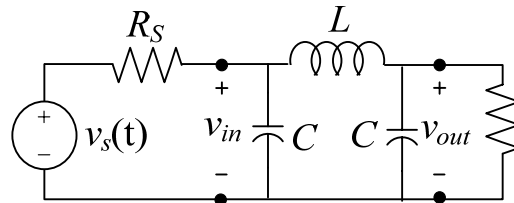
$$f_o = \frac{\sqrt{2}}{2\pi R_o C} = \frac{\sqrt{2} R_o}{2\pi L} \quad \text{เมื่อ } d = 1$$

$$f_o = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \sqrt{LC}} \quad \text{เมื่อ } d \neq 1$$

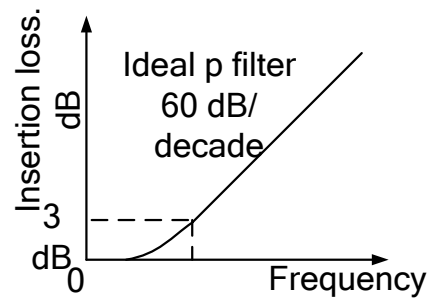
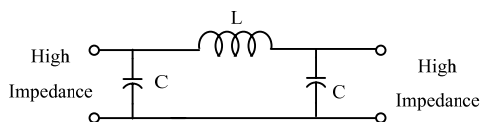
จากรูปที่ 3.6 (ค) จะแสดงค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ LC โดยที่วงจรจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 40 dB/decade

ง) วงจรกรองความถี่แบบ π

วงจรกรองความถี่แบบ π (Pi filter) เป็นวงจรที่ต้องการเพิ่มอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนให้มีความถี่ขึ้น และเหมาะสำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดสูง สามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 3.7 (ข)



(ก) วงจรกรองความถี่แบบ π



(ข) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่แบบ π

(ค) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ π

รูปที่ 3.7 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบ π

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ π นั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 3.7 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ ดังในสมการที่ (3.19) โดยจะกำหนดให้ $Z_S = Z_L = R_O$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left| 1 + F^2 \frac{(1-d)^2}{d^{2/3}} - 2F^4 \frac{1-d}{d^{1/3}} + F^6 \right| \quad (3.19)$$

เมื่อ $d = \frac{L}{CR_O^2}$ คือค่า damping ratio

$$F = \frac{f}{f_o}$$

ในการพิจารณาค่า damping ratio ที่เกิดขึ้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

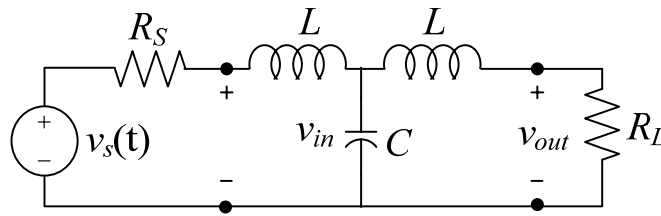
$$f_o = \frac{1}{\pi\sqrt{2LC}} = \frac{R_o}{\pi L} = \frac{1}{2\pi R_o C} \quad \text{เมื่อ } d=1$$

$$f_o = \frac{1}{\pi(4R_o LC^2)^{1/3}} \quad \text{เมื่อ } d \neq 1$$

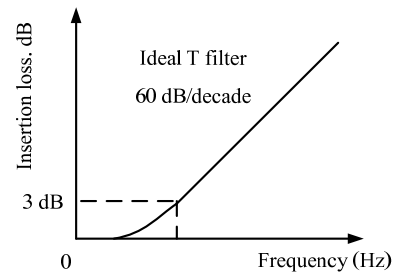
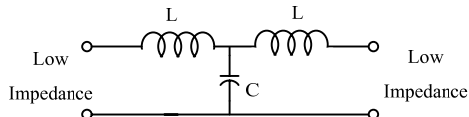
จากรูปที่ 3.7 (ค) จะแสดงค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ π โดยที่วงจรจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 60 dB/decade

จ) วงจรกรองความถี่แบบ T

วงจรกรองความถี่แบบ T (T filter) เป็นวงจรที่ต้องการเพิ่มอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนให้มีความมากขึ้น และเหมาะสำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดต่ำ สามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 3.8 (ข)



(ก) วงจรกรองความถี่แบบ T



(ข) การต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองความถี่แบบ T

(ค) ค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ T

รูปที่ 3.8 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แบบ T

ในการหาค่าการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ T นั้นจะหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (voltage transfer) ขณะที่ใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน ดังในรูปที่ 3.8 (ก) และเมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ ดังในสมการที่ (3.20) โดยจะกำหนดให้ $Z_S = Z_L = R_o$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left| 1 + F^2 \frac{(1-d)^2}{d^{2/3}} - F^4 \frac{(1-d)}{d^{1/3}} + F^6 \right| \quad (3.20)$$

เมื่อ $d = \frac{L}{CR_o^2}$ คือค่า damping ratio

$$F = \frac{f}{f_o}$$

ในการพิจารณาค่า damping ratio ที่เกิดขึ้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้

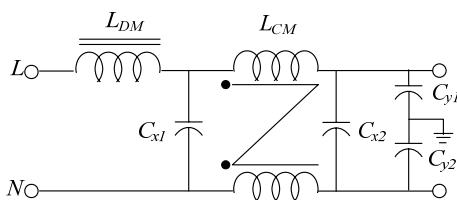
$$f_o = \frac{1}{\pi\sqrt{2LC}} = \frac{R_o}{2\pi L} = \frac{1}{\pi R_o C} \quad \text{เมื่อ } d = 1$$

$$f_o = \frac{1}{\pi} \left(\frac{R_o}{4L^2 C} \right)^{1/3} \quad \text{เมื่อ } d \neq 1$$

จากรูปที่ 3.8 (ค) จะแสดงค่าอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรกรองความถี่แบบ T โดยที่วงจรจะมีค่าอัตราการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 60 dB/decade

3.2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (emi filter) คือ วงจรกรองที่ใช้สำหรับลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หรืออุปกรณ์กำลังไฟฟ้า ในย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะการทำงานดังในรูปที่ 3.9 สำหรับโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีโครงสร้าง คือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (passive components) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างจะไม่เหมือนกัน ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะทิศทางการไหลของกระแสสัญญาณรบกวนของทั้งสองโหมดไม่เหมือนกันนั่นเอง โดยที่วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้แสดงไว้ในบทที่ 4 [16-22]



(ก) วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

(ข) วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้จริง

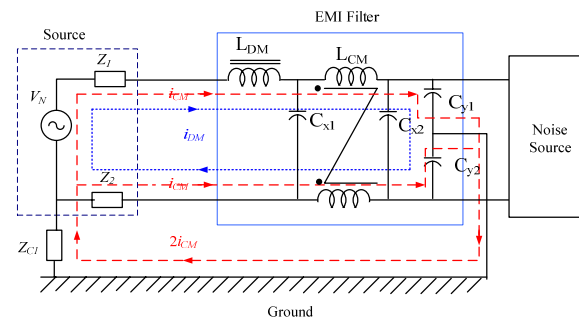
รูปที่ 3.9 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการอธิบายการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้ทฤษฎีการเกิดสัญญาณรบกวนในบทที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.2 รูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง จะสามารถอธิบายโหมดการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนได้ดังรูปที่ 3.10 จะแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง สำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

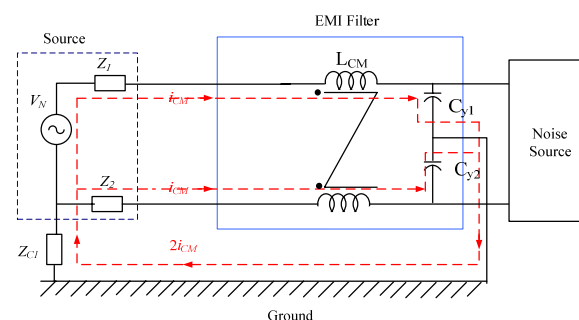
เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม (common mode current: i_{CM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งสายตัวนำและสถานนิวตรอนผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม (common mode inductance: L_{CM}) และตัวเก็บประจุ C_Y ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และผ่านตัวเก็บประจุแฝงลงกราวด์ดังในรูปที่ 3.11 และจากรูปเมื่อกระแสโหมดผลร่วมไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอน จะมองเห็นตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} 1 ตัว ที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} จะมีผลในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง เพราะกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ $i = V/Z$ เมื่อ $Z = XL = 2\pi fL$ และเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่ามากขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านลดลง เพราะฉะนั้นจึงสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงได้ ส่วนตัวเก็บประจุ C_Y จะเห็นว่ากระแสโหมดผลร่วมจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_Y ทั้ง 2 ตัว ลงกราวด์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วมจะมีองค์ประกอบ 2 ตัว ที่จะช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม คือ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} และตัวเก็บประจุ C_Y

เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง (differential mode current: i_{DM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง จะเป็นกระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายตัวนำของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง (differential mode: L_{DM}) และตัวเก็บประจุ C_X แล้วไหลกลับกรอบวงจรผ่านสายนิวตรอน โดยจะไม่ไหลผ่านกราวด์ดังในรูปที่ 3.12 และจากรูปจะเห็นว่ากระแสโหมดผลต่างที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} เกิดการหักล้างกันทำให้ไม่มีผลของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วม L_{CM} อย่างไรก็ตามที่ตัวเหนี่ยวนำโหมด L_{CM} นั้นก็ยังคงมีผลของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance: $L_{leakage}$) ของตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} อยู่ ดังในรูปที่ 3.13 ส่วนตัวตัวเก็บประจุ C_X ทั้ง 2 ตัว และตัวเก็บประจุ C_Y 2 ตัว ที่ต่ออนุกรมอยู่ จะมีผลเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ $i = V/Z$ เมื่อ $Z = XC = 1/2\pi fC$ ที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่ามากทำให้กระแสที่ไหลผ่านน้อย ทำให้สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่ำได้ และเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่าลดลงทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงได้

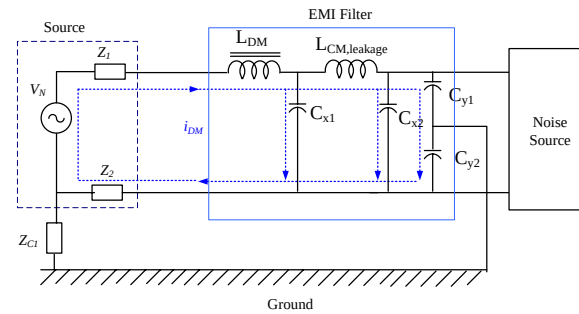
ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลร่วมมีหน้าที่หลักๆ คือการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โหมดผลร่วม คือจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมไหลผ่าน อย่างไรก็ตามค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล $L_{leakage}$ สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่างได้เช่นกัน เพราะตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} เกิดจากการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันบนแกนเดียวกัน โดยถ้าการพันดังกล่าวพันแบบชิดติดกันก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าน้อย ก็จะเป็นผลทำให้การกรองสัญญาณรบกวนโหมดผลต่างได้น้อยเช่นกัน ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำร่วมจึงนิยมพันขดลวดแบบไม่ชิดติดกัน เพื่อเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลและลดผลของตัวเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้างดังกล่าว จะมีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี แต่เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ จึงมีปัญหาเรื่องขนาด น้ำหนักและราคาที่ใช้ในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 ทิศทางกระแสโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างสำหรับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



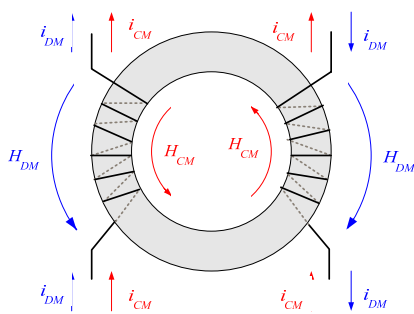
รูปที่ 3.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลร่วม



รูปที่ 3.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง

ในการอธิบายส่วนประกอบต่างๆ และคุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม L_{CM} ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง L_{DM} ตัวเก็บประจุ C_X และตัวเก็บประจุ C_Y สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม



(ก) ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

(ข) ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมที่ใช้จริง

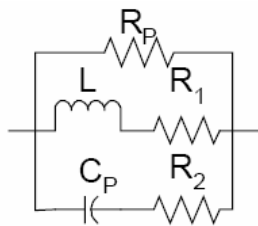
รูปที่ 3.13 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับกระแสโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง

ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม (common mode choke) จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง และในทางปฏิบัติ ตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวมจะมีค่าเหนี่ยวนำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของตัวเหนี่ยวนำโหมดผลต่าง ซึ่งโครงสร้างของแกนแม่เหล็กที่ใช้เป็นแบบ toroidal core ชนิดเฟอร์ไรต์ เพราะแกนแม่เหล็กชนิดนี้จะมีค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์สูง มีขนาดเล็ก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนแม่เหล็กต่ำ จึงเหมาะในการใช้พันตัวเหนี่ยวนำโหมดผลรวม และในการพันเส้นลวดตัวนำบนแกน toroidal สามารถทำได้ง่าย โดยการพันลวดตัวนำสองขด และจะต้องมีช่องว่างระหว่างขอลวดตัวนำ ก็เพื่อความปลอดภัย เพราะจะเป็นการแยกกันระหว่างสายตัวนำกับสายกราวด์ ดังในรูปที่ 3.13 จากรูปจะแสดงทิศทางของกระแสโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง รวมทั้งทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก จะเห็นว่าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลรวมผลของเส้นแรงแม่เหล็กโหมดผลรวม H_{CM} จะมีทิศทางเสริมกัน

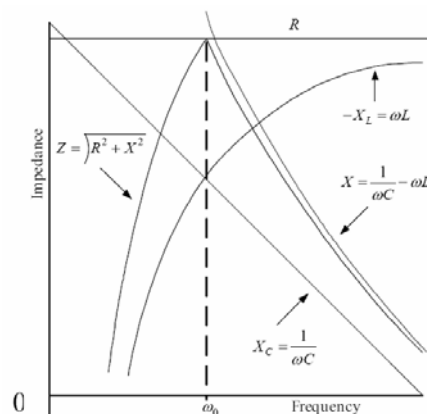
แต่เมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กโหมดผลต่าง H_{DM} จะหักล้างกัน [5] ดังรูปที่ 3.13

ในทางปฏิบัติ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อทำงานที่ย่านความถี่สูงจะปรากฏพฤติกรรมขององค์ประกอบแฝงเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะเสมือนเป็นตัวนำประกบกันอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานของลวดที่นำมาพันเป็นตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเช่นกัน โดยแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในทางปฏิบัติจะแสดงดังรูปที่ 2.14 (ก) และเมื่อความถี่ในการทำงานสูงขึ้นทำให้คุณสมบัติต่างๆของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า และองค์ประกอบแฝงจะเปลี่ยนไป โดยอิมพีแดนซ์ในทางอุดมคติจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความถี่ ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงดังรูปที่ 2.14 (ข)

เมื่อ ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและ C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์นั้น จะมีผลของค่าตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะเป็นการแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ ที่เปลี่ยนไปตามค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป



(ก) วงจรสมมูลของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

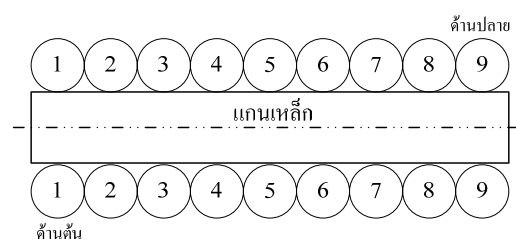


(ข) ผลของความถี่ที่มีต่ออิมพีแดนซ์

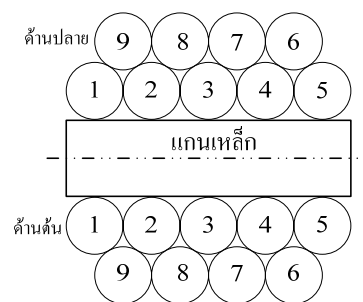
รูปที่ 3.14 คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในการพันขดลวดตัวนำบนแกนแม่เหล็กนั้นจะมี 4 เทคนิคการพันขดลวดตัวนำ [5] คือ การพันแบบที่หนึ่ง single layer แบบที่สอง double layer แบบที่สาม bank และแบบที่สี่ progressive ตามลำดับ และในการเลือกแบบการพันขดลวดจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการใช้งาน และค่าเก็บประจุแฝงระหว่างขดลวด และจากในรูปที่ 3.15 จะแสดงเทคนิคการพันขดลวดทั้งสี่แบบ และในรูปที่ 3.15 (ก) จะแสดงการพันแบบ single layer จะเป็นการพันขดลวดบนแกนแม่เหล็กประมาณ 3/4 ถึง 7/8 ของแกนแม่เหล็ก และจะเป็นการพันเพียงชั้นเดียวเท่านั้น สิ่งสำคัญในการพัน คือ การพันแบบ single layer นั้นจะมีค่ากระแสฟลักสูง (peak current) การพันแบบ double layer ดังในรูปที่ 3.15 (ข) การพันแบบนี้จะมีลักษณะการพันเหมือนกับ single layer แต่มี

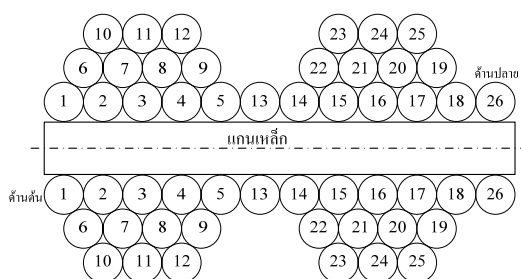
จำนวนรอบมากกว่า และในทางปฏิบัติจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์เป็นครึ่งหนึ่งของการพันแบบ single layer การพันแบบ bank และการพันแบบ progressive และการพันแบบ bank ดังในรูปที่ 3.15 (ค) จะเป็นการพันขดลวดขดเดียวกระจายรอบแกนแม่เหล็ก และสุดท้ายการพันแบบ progressive ในทางปฏิบัติจะมีความยากลำบากในการพัน ดังในรูปที่ 3.15 (ง) เพราะการพันแบบ progressive นี้จะต้องคำนวณจำนวนรอบของการพันที่แน่นอน และเหมาะกับการผลิตขดลวดที่มีจำนวนรอบมากๆ



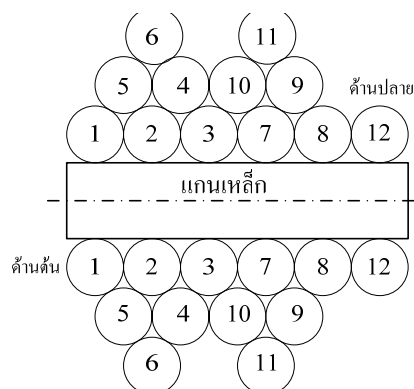
(ก) แบบ single layer



(ข) แบบ double layer



(ค) แบบ bank



(ง) แบบ progressive

รูปที่ 3.15 เทคนิคการพันขดลวดทั้งสี่แบบ

ข) ตัวเก็บประจุ C_Y

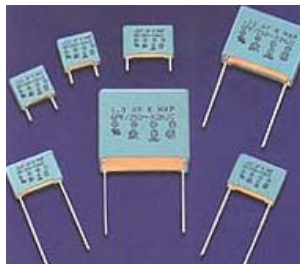
ตัวเก็บประจุ (Y Capacitor: C_Y) ที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวเก็บประจุที่ทำมาจากเซรามิก (ceramic) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและค่าเหนี่ยวนำที่ต่ำมาก และสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่สูง ดังภาคผนวก ข และในรูปที่ 3.16 จะแสดงตัวเก็บประจุ C_Y ที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ



รูปที่ 3.16 ตัวเก็บประจุ C_Y ที่ใช้จริง

ค) ตัวเก็บประจุ C_X

ตัวเก็บประจุ C_X ที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นตัวเก็บประจุที่ทำมาจากโพลีสทีรีน (polystyrene) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่จะมีค่าน้อยมาก ๆ ดังภาคผนวก ข



(ก) ตัวเก็บประจุ C_X ที่ใช้จริง

(ข) เครื่องหมายการค้าของตัวเก็บประจุ C_X

รูปที่ 3.17 ตัวเก็บประจุ C_X

3.3 สรุปภาพรวมของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ในบทนี้สามารถสรุปภาพรวมของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ดังนี้

- นำเสนอวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
- นำเสนอวิธีการคำนวณกระแสรั่วไหลลงดิน
- นำเสนอหลักการทำงานของวงจรกรองความถี่พื้นฐานต่าง ๆ
- นำเสนอการทำงานของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า