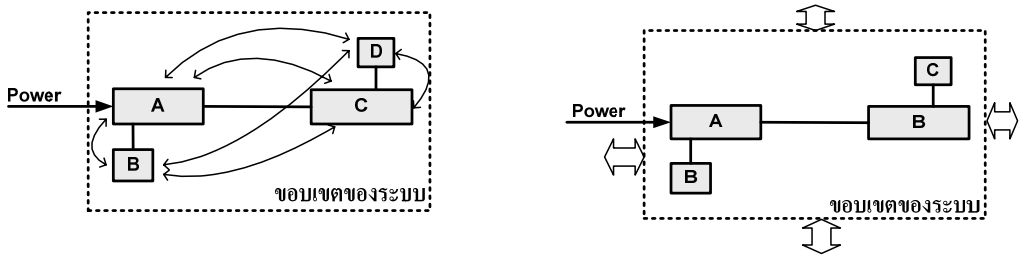
บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งนั้นจะสามารถอธิบายให้เข้าใจได้ก็ต่อเมื่อ ทราบถึงสาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และมีความเข้าใจพฤติกรรมการเกิดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วย ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงนิยามของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic compatibility: EMC) รูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งกล่าวถึงมาตรฐานในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสังเขป

2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของอุปกรณ์ (device) เครื่องมือ (equipment) หรือระบบ (system) ที่สามารถทำงานรวมกันได้เป็นปกติในสภาวะแวดล้อมที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย หรือผลกระทบใดๆ ต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน แต่เมื่อเกิดความเสียหายหรือการทำงานผิดพลาดจะเรียกว่า สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference: EMI) หมายถึง การที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ เกิดการทำงานผิดพลาด หรือเกิดความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติรูปแบบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบเดียวกัน (intra-system EMC) และ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก (inter-system EMC) [5] ดังในรูปที่ 2.1



(ก) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ

(ข) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก

รูปที่ 2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

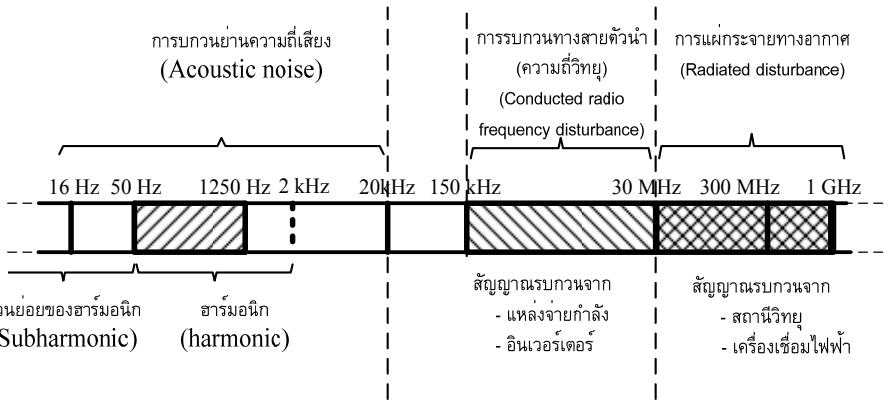
ก) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ คือความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบเดียวกันสามารถทำงานได้ ในสภาวะแวดล้อมที่เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากอุปกรณ์ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก)

ข) ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก คือความสามารถในการทำงานของระบบทั้งระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อม ที่เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบอื่น และตัวระบบเองไม่สร้างสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข)

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามย่านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะแสดงการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ในย่าน 0 Hz ถึง 2 kHz จะจัดอยู่ในย่านการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำหรือที่นิยมเรียกกันว่า “ฮาร์มอนิก” (harmonics) ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์และนอกจากนั้นยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย

สำหรับความถี่ในย่าน 1.25 kHz ถึง 150 kHz ในปัจจุบัน (ค.ศ. 2004) ยังไม่จัดว่าเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขด้วยวิศวกรทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC engineers) แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานนานาชาติหลายฉบับได้ขยายย่านความถี่ฮาร์มอนิก ให้ครอบคลุมถึงย่านความถี่ดังกล่าวบ้างแล้ว [6]

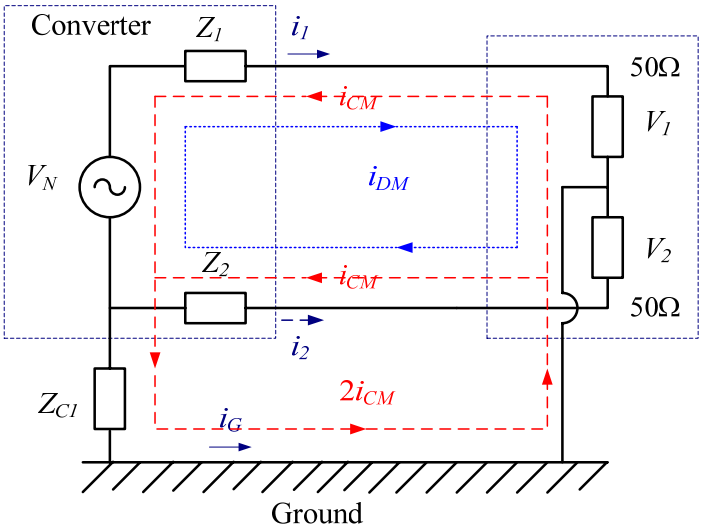
ส่วนย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือบางครั้งจะเรียกแทนว่า การรบกวนความถี่วิทยุ (radio frequency disturbance) จะจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโดยเริ่มพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1GHz สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ ที่ความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (conducted EMI) และย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (radiated EMI) ซึ่งทั้งสองแบบจะมีรูปแบบในการรบกวนและวิธีในการตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [6]

2.2 รูปแบบการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

การเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีการสวิตชิ่งที่ความถี่สูง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา (dv/dt) ซึ่งจะเกิดในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส และผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลา (di/dt) ซึ่งจะเกิดในช่วงเริ่มนำกระแส จะส่งผลให้การเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ โดยการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม (common mode: CM) และการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลต่าง (differential mode: DM)



รูปที่ 2.3 เส้นทางของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ [8-9]

จากรูปที่ 2.3 แสดงการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ และเพื่อให้ง่ายในการอธิบายจากรูป จึงแสดงทิศทางของกระแสในสายตัวนำและสายนิวตรอนเทียบกับสายกราวน์ โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ (V_N) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (noise source) โดยมีตัวต้านทาน 50 Ω จำนวน 2 ตัว เป็นโหลดของสัญญาณรบกวน โดยเส้นสีแดงจะแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม (common mode current: i_{CM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอน ผ่านทางตัวเก็บประจุแฝงลงกราวน์หรือ ผ่านทางส่วนอื่นๆ ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนกับกราวน์ และจากในรูปเส้นสีน้ำเงิน จะแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง (differential mode current: i_{DM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง จะเป็นกระแสที่ไหลจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนผ่านสายตัวนำ แล้วไหลกลับครบวงจรผ่านสายนิวตรอน โดยจะไม่

ไหลผ่านกราวน์ดังในรูปที่ 2.3 และกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมและกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่างที่ไหลจะสามารถหาได้ ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)

$$i_1 = -i_{CM} + i_{DM} \tag{2.1}$$

$$i_2 = -i_{CM} - i_{DM} \tag{2.2}$$

$$i_G = 2i_{CM} \tag{2.3}$$

เมื่อ i_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำ

i_2 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายนิวตรอน

i_G คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกราวน์

i_{CM} คือ กระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม

i_{DM} คือ กระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง

Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ

Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนิวตรอน

Z_{C1} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับกราวน์

สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 50 Ω คือแรงดันไฟฟ้า v_1 และ v_2 จะคำนวณได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานทั้งสอง ดังในสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$v_1 = 50 \times (-i_{CM} + i_{DM}) \tag{2.4}$$

$$v_2 = 50 \times (-i_{CM} - i_{DM}) \tag{2.5}$$

จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) จะได้แรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง ดังในสมการที่ (2.6) และ (2.7) โดยแรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วมจะคำนวณจากผลคูณของกระแสโหมดผลร่วมที่ไหลผ่านตัวต้านทาน 50 Ω และส่วนแรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง จะคำนวณจากผลคูณของกระแสโหมดผลต่างที่ไหลผ่านตัวต้านทาน 50 Ω ดังในสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$v_{CM} = -50i_{CM} = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{2.6}$$

$$v_{DM} = 50i_{CM} = \frac{v_1 - v_2}{2} \tag{2.7}$$

เมื่อ v_{CM} คือ แรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วม

v_{DM} คือ แรงดันไฟฟ้าโหมดผลต่าง

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า v_1 และ v_2 ได้จาก ผลรวมหรือผลต่างของแรงดันไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$v_1 = v_{CM} + v_{DM} \tag{2.8}$$

$$v_2 = v_{CM} - v_{DM} \tag{2.9}$$

ข้อสำคัญคือแรงดันไฟฟ้า v_1 และ v_2 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 50 Ω ทั้งด้านสายตัวนำและสายนิวตรอน ซึ่งขนาดแอมปลิจูดของสเป็กตรัม (spectrum) ของแรงดันทั้งด้านสายตัวนำและสายนิวตรอนในย่านความถี่การใช้งาน จะต้องไม่เกินเส้นขีดจำกัดมาตรฐาน (limit line) ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำกำหนด

2.3 มาตรฐานและการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เกือบจะทั้งหมดได้ผ่านการทดสอบที่เกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นการรบกวนทางสายตัวนำหรือแพร่ทางอากาศ และในการทดสอบและการวัดให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดและการทดสอบผลิตภัณฑ์ โดยมาตรฐานที่ใช้มีจะอยู่หลายมาตรฐาน มีทั้งมาตรฐานนานาชาติ มาตรฐานของภูมิภาคหรือมาตรฐานของประเทศนั้นๆ สำหรับวิธีการวัดและวิธีการติดตั้งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือตามมาตรฐานนานาชาติกำหนด และผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานนั้น ไม่ได้หมายความว่าไม่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เพียงแต่เป็นการจำกัดขนาดของสัญญาณรบกวนให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ตามมาตรฐานของประเทศนั้นๆ และในหัวข้อต่อไปจะแสดงตัวอย่างของมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2.3.1 ตัวอย่างมาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1) FCC REGULATIONS

FCC ย่อมาจาก Federal Communications Commission เป็นของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (wire and radio communications) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันกล่าวคือ Part 15 สำหรับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ (radio-frequency devices) Part 18 สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ และ Part 68 สำหรับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบโทรศัพท์ (telephone network)

2) CISPR

CISPR ย่อมาจากภาษาฝรั่งเศสคือ (Comite International Special des Perturbations Radioelectrique) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1933 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่าน

ความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ นอกจากนั้นตัว CISPR ไม่ได้เป็นกฎข้อบังคับหรือมาตรฐานบังคับใช้แต่อย่างใด แต่มาตรฐานดังกล่าวจะถูกดัดแปลงโดยรัฐบาลของแต่ละประเทศให้เป็นมาตรฐานบังคับใช้ภายในประเทศ จึงกลายเป็นมาตรฐานสากลไปโดยปริยาย โดยมาตรฐาน CISPR Publication 22 เป็นการออกมาเพื่อการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกรณีของบริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (information technology equipment)

3) มาตรฐานทางการทหาร (Military standards)

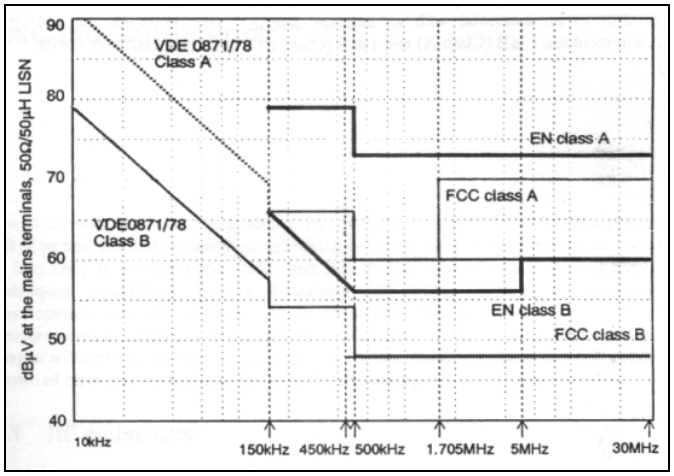
MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 เป็นมาตรฐานที่ออกโดยการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL-STD-461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL-STD-462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ โดยที่มาตรฐานดังกล่าวจะมีรายละเอียดมากกว่าและเข้มงวดกว่า FCC และย่านความถี่ที่พิจารณายังกว้างกว่าอีกด้วย

4) VDE

VDE ย่อมาจาก Verband Deutscher Elektrotechniker ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศเยอรมัน ซึ่งในประเทศเยอรมันได้กำหนดไว้ว่าอุปกรณ์ที่มีความถี่ในการทำงานสูงกว่า 10 kHz จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ถ้าไม่มีใบอนุญาต ทำให้โรงงานในประเทศเยอรมันทั้งหมดต้องมีการทดสอบสินค้าตามมาตรฐานดังกล่าว ซึ่งมาตรฐานของประเทศเยอรมันดังกล่าวจะคล้ายกับมาตรฐานของยุโรป ยกเว้นเพียงแต่ย่านความถี่ที่พิจารณาจะมีความแตกต่างกัน

5) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยได้มีการเริ่มต้นนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับปรุงแก้ไขโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 15 ที่เกี่ยวกับบริภัณฑ์ส่องสว่าง สำหรับ CISPR 22 ที่เกี่ยวข้องกับบริภัณฑ์ทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและมัลติมีเดีย และอยู่ในระหว่างการพิจารณาที่จะมีการบังคับใช้ในประเทศไทย



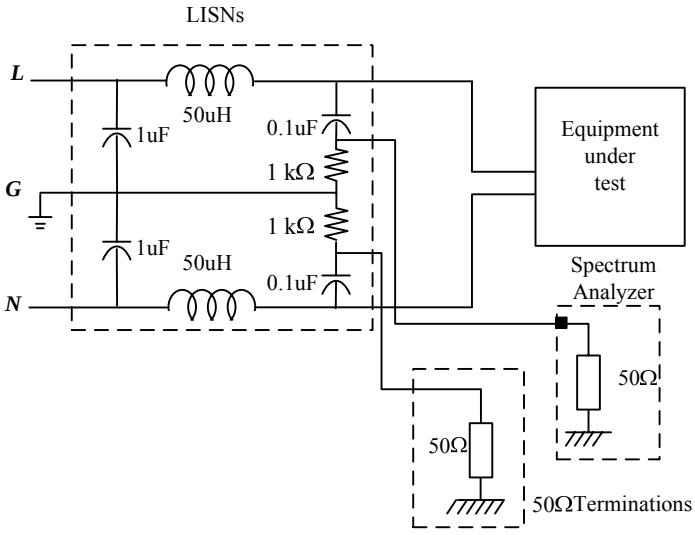
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัดและย่านความถี่ของมาตรฐานที่มาตามสายตัวนำ

จากรูปที่ 2.4 จะแสดงเส้นขีดจำกัดของมาตรฐาน VDE, FCC และ EN ทั้ง Class A และ Class B รวมทั้งย่านความถี่ที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 10 kHz – 30 MHz

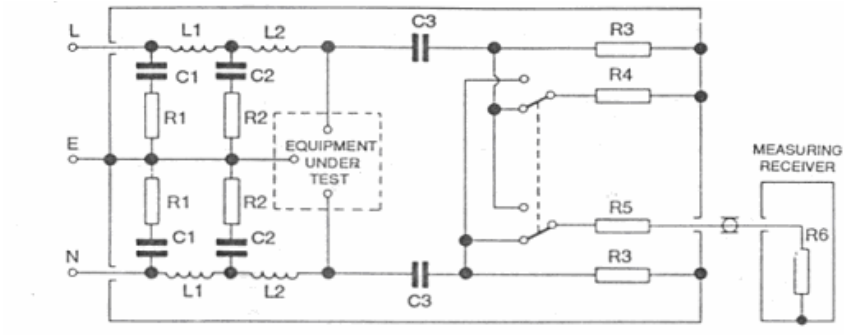
2.3.2 วิธีการวัดและทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการวัดและการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ พร้อมกับการใช้งานของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) ดังในรูปที่ 2.5 จะแสดงการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ LISN พร้อมกับการใช้เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (spectrum analyzer) และหน้าที่หลักของ LISN มีอยู่ 3 ด้าน คือ หนึ่ง กำหนดค่าอิมพีแดนซ์มาตรฐาน 50 Ω ที่ความถี่สูงสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ EUT (equipment under test) สอง ส่งผ่านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำไปยังผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ สาม กำจัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า อื่นๆ ที่ไม่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ ดังในรูปที่ 2.5 และจากรูปจะแสดงวิธีการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ spectrum analyzer และแสดงการต่อตัวความต้านทาน 50 Ω termination เพื่อที่จะรักษาอิมพีแดนซ์ระหว่างสายนิวตรอนกับกราวน์ให้คงที่ที่ 50 Ω

จากรูปที่ 2.6 จะแสดงวงจรของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR [10] กำหนดและแสดงค่าส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในวงจรของ LISN โดยจะใช้งานในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz และจากรูปความต้านทาน R6 ที่ต่ออยู่จะเป็นของเครื่องวัดสเปคตรัม หรือ measuring receiver พร้อมกับแสดงจุดต่อไปยังผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ และจากรูปที่ 2.7 จะแสดงกราฟค่าอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของ LISN และในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz จะมีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 50 Ω และมีค่าผิดพลาด ± 20 %



รูปที่ 2.5 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้ LISN



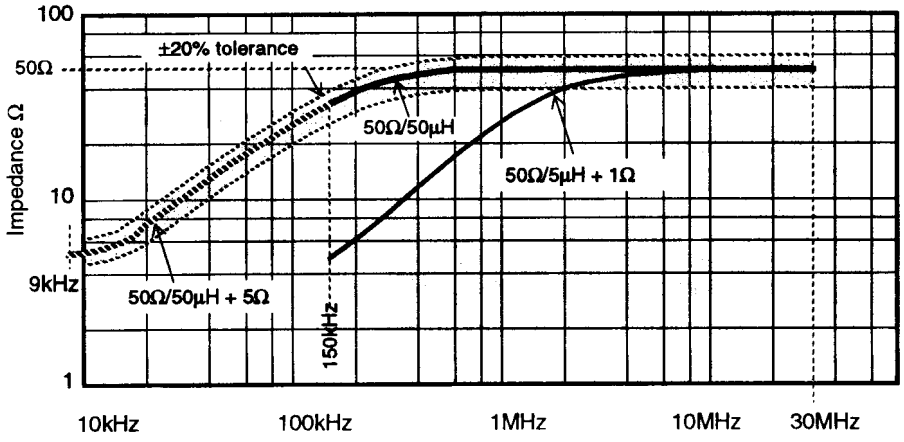
COMPONENT VALUES FOR 50 ohm / 50µH NETWORK

COMPONENT	VALUE	COMPONENT	VALUE
R1	10 ohms	C1	1.2µF
R2	5 ohms	C2	8µF
R3	1k ohm	C3	0.25µF
R4	50 ohm	L1	250µH
R5	(short)	L2	50µH
R6	50 ohms		

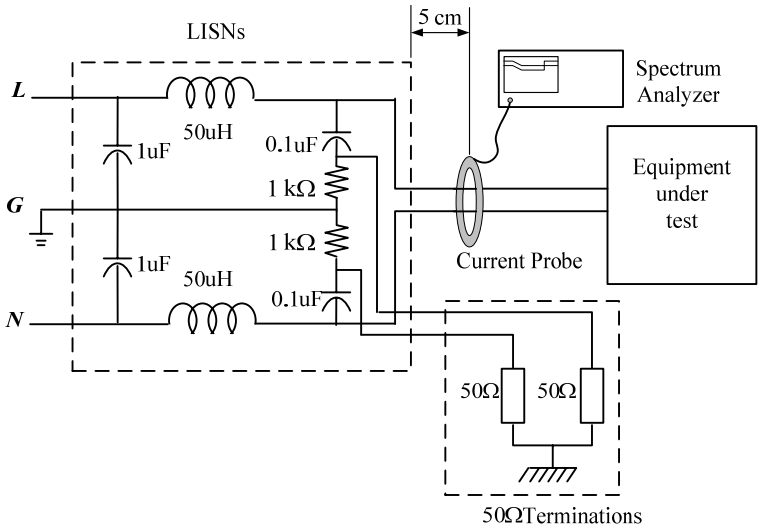
COMPONENT VALUES FOR 150 ohm NETWORK

COMPONENT	VALUE	COMPONENT	VALUE
R1	open	C1	open
R2	short	C2	0.25µF
R3	open	C3	0.1µF
R4	150 ohm	L1	short
R5	100 ohm	L2	short
R6	50 ohm		

รูปที่ 2.6 วงจรของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR [10]

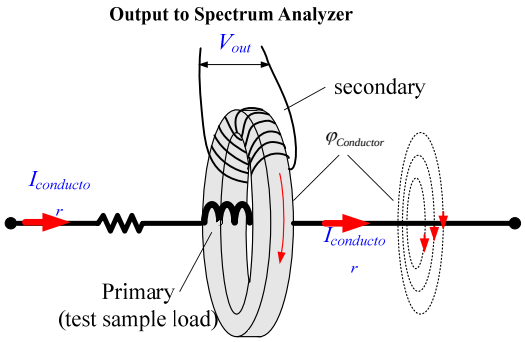


รูปที่ 2.7 อิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR [10]



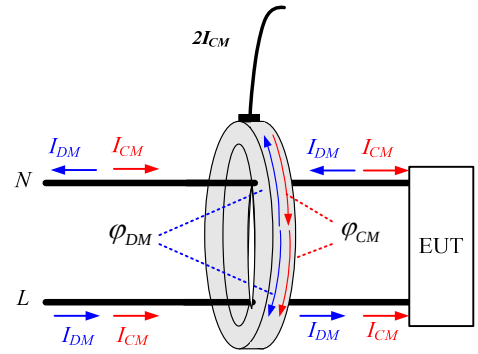
รูปที่ 2.8 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้โพรบกระแส [11]

จากรูปที่ 2.8 จะแสดงการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยใช้โพรบกระแส (Current Probe) [11] โดยโพรบกระแสที่ใช้วัดจะเป็นโพรบกระแสที่สามารถใช้งานในย่านความถี่สูง และสามารถรักษาค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ให้คงที่ในตลอดย่านความถี่ใช้งาน และการใช้โพรบกระแสสามารถวัดสัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม โหมดผลต่างและโหมดผลรวมได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์การเกิดสัญญาณรบกวน และการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และตามมาตรฐาน MIL STD 462 ในการวัดสัญญาณรบกวนโดยใช้โพรบกระแสนั้น จะต้องวางโพรบกระแสให้ห่างจาก LISN ประมาณ 5 cm และที่ขั้วของการวัดจะทำการต่อตัวต้านทาน 50 Ω termination 2 ตัว ที่ขั้วทั้งสองเพื่อให้ รักษาค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายตัวนำกับกราวน์ และสายนิวตรอนกับกราวน์เท่ากับ 50 Ω ดังในรูปที่ 2.8 และที่สำคัญในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำโดยการใช้โพรบกระแสนั้น จะต้องทำการใส่ค่าชดเชยของโพรบกระแสที่ใช้นั้นๆ เข้าที่เครื่องมือวัด spectrum analyzer และในการวัดสัญญาณรบกวนโดยใช้โพรบกระแสสามารถอธิบายได้ ดังในรูปที่ 2.9

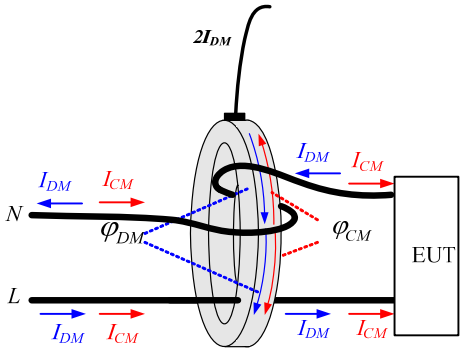


รูปที่ 2.9 การวัดโดยใช้โพรบกระแส

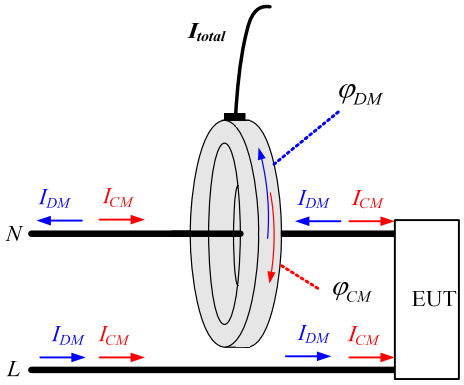
ในรูปที่ 2.9 จะแสดงโครงสร้างการทำงานและการวัดกระไฟฟ้าโดยใช้โพรบกระแส กล่าวคือ ขณะที่สายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหล $I_{conductor}$ จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก $\varphi_{conductor}$ ที่สายตัวนำที่มีทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังในรูปที่ 2.9 ตามกฎมือขวา (Right Hand's Rule) ที่เปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิ (primary) และเมื่อนำโพรบกระแส ที่เปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ (secondary) ไปคล้องที่สายตัวนำ นั้นจะทำให้เกิดการเกี่ยวคล้องของฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างสายตัวนำกับโพรบกระแส ทำให้เกิดสัญญาณในรูปของแรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่ขั้วด้านออกของขดลวดทุติยภูมิ แล้วส่งไปยังเครื่องมือวัด spectrum analyzer ซึ่งในวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่โหมด สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม โหมดผลต่าง และโหมดผลรวม โดยใช้ โพรบกระแสจะอธิบายได้จากรูปที่ 2.10



(ก) วัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม



(ข) วัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง



(ค) วัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวม

รูปที่ 2.10 การวัดกระแสไฟฟ้าโหมดต่างๆ โดยใช้โพรบกระแส

2.3.2.1 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วม

จากรูปที่ 2.10 (ก) จะแสดงการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมโดยใช้โพรบกระแส โดยที่โพรบกระแสจะคล้องทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอนดังรูป และจากรูปจะแสดงทิศทางของกระแสโหมดผลร่วม i_{CM} และโหมดผลต่าง i_{DM} ซึ่งการคล้องดังในรูปจะเห็นได้ว่าทิศทางของกระแสโหมดผลต่าง i_{DM} ที่ไหลในสายตัวนำและสายนิวตรอน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก φ_{DM} มีทิศทางหักล้างกันดังรูป และเมื่อพิจารณาทิศทางของกระแสโหมดผลร่วม i_{CM} ที่ไหลในสายตัว

นำและสายนิวตรอน จะทำให้เกิด ฟลักซ์แม่เหล็ก φ_{CM} จากทิศทางกระแสไฟฟ้าทั้งสองจะเสริมกัน ทำให้ผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำขดลวดทุติยภูมิมีค่าเป็น $2\varphi_{CM}$ ทำให้แรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่วัดได้จะเป็นค่าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ทำการวัด $I_{conductor} = 2i_{CM}$ ดังนั้น ผลจากการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมโดยใช้โพรบกระแสที่ส่งไปยังเครื่อง spectrum analyzer คือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมที่ไหลในสายตัวนำกับสายนิวตรอนเท่ากับ $2i_{CM}$ ที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

2.3.2.2 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าโหมดผลต่าง

จากรูปที่ 2.10 (ข) จะแสดงการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่างโดยใช้โพรบกระแส โดยที่โพรบกระแสจะคล้องทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอนดังรูป และจากรูปทิศทางของกระแสโหมดผลต่าง i_{CM} ที่ไหลในสายตัวนำและสายนิวตรอน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก φ_{CM} มีทิศทางหักล้างกันดังรูป และเมื่อพิจารณาทิศทางของกระแสโหมดผลต่าง i_{DM} ที่ไหลในสายตัวนำและสายนิวตรอน จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก φ_{DM} จากทิศทางกระแสไฟฟ้าทั้งสองจะเสริมกัน ทำให้ผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำขดลวดทุติยภูมิมีค่าเป็น $2\varphi_{DM}$ ทำให้แรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่วัดได้จะเป็นค่าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ทำการวัด $I_{conductor} = 2i_{DM}$ ดังนั้นผลจากการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่างโดยใช้โพรบกระแสที่ส่งไปยังเครื่องวัด spectrum analyzer คือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าโหมดผลต่างที่ไหลในสายตัวนำกับสายนิวตรอนเท่ากับ $2i_{DM}$ ที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

2.3.2.3 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าโหมดผลรวม

ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโหมดผลรวม จะทำการวัดที่สายตัวนำหรือสายนิวตรอนก็ได้ และตามมาตรฐาน MIL STD 462 จะต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอน จากรูปที่ 2.10 เมื่อจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมที่ไหลในสายนิวตรอน $(i_{Total,\,N})$ ทำได้โดยนำโพรบกระแสไปคล้องสายนิวตรอนเพียงสายเดียวดังรูปที่ 2.10 (ค) จากการคล้องลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กที่หักล้างกัน $(-\varphi_{CM} + \varphi_{DM})$ โดยฟลักซ์แม่เหล็กที่เหลือ จะไปเหนี่ยวนำขดลวดทุติยภูมิ ดังนั้นผลการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมที่ไหลในสายนิวตรอน ที่ส่งไปยังเครื่อง spectrum analyzer คือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่ไหลในสายนิวตรอน $(i_{Total,\,N} = -i_{CM} + i_{DM})$ หรือกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมที่ไหลในสายนิวตรอน ในรูปของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

ในขณะที่การวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมที่ไหลในสายตัวนำ สามารถทำได้เช่นเดียวกับการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมในสายนิวตรอน ด้วยการคล้องโพรบวัดกระแสไฟฟ้าในสายตัวนำเพียงสายเดียว โดยผลการวัดกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมที่ไหลในสายตัวนำ ที่ส่งไปยังเครื่อง spectrum analyzer คือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าโหมดผลร่วมและโหมดผลต่างที่ไหลในสายตัวนำ

($i_{Total,L} = -i_{CM} - i_{DM}$) หรือกระแสไฟฟ้าโหมดผลรวมที่ไหลในสายตัวนำ ในรูปของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

2.3.3 การจัดวางอุปกรณ์ (ตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 ข้อ 8.4)

ในการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้น จำเป็นต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ให้เป็นไปตาม มาตรฐานการวัด ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 ข้อ 8.4 ที่ว่าด้วยเรื่องการจัดวางอุปกรณ์ ดังนี้

(ก) ระนาบพื้น

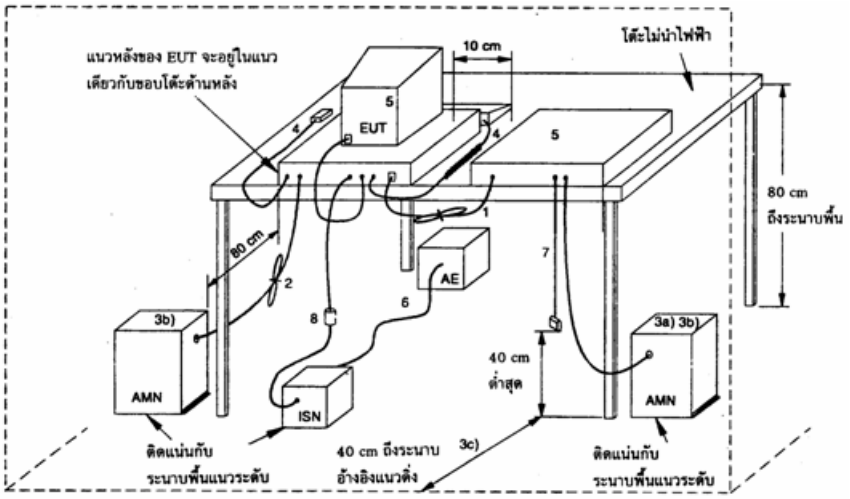
สำหรับระนาบพื้น (ground plane) สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนนั้นตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 ได้กำหนดไว้ดังนี้คือ

วางอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) ซึ่งประสงค์ให้ใช้งานบนโต๊ะ 0.4 เมตร ห่างจากระนาบอ้างอิงโลหะในแนวดิ่งที่มีขนาดอย่างน้อย 2 เมตร × 2 เมตร และต้องรักษาระยะอย่างน้อย 0.8 เมตร จากพื้นผิวโลหะอื่นๆ หรือระนาบพื้นอื่นที่ไม่ได้เป็นส่วนของ EUT

อุปกรณ์ทดสอบตั้งพื้นต้องวางบนระนาบพื้นโลหะในแนวระดับ จุดสัมผัสต้องสอดคล้องกับการใช้งานตามปกติ แต่ต้องไม่สัมผัสทางโลหะกับระนาบพื้น อาจแทนพื้นโลหะด้วยระนาบพื้นอ้างอิง ระนาบพื้นอ้างอิงต้องยื่นพ้นเส้นขอบของ EUT อย่างน้อย 0.5 เมตร และต้องมีขนาดอย่างน้อย 2 เมตร × 2 เมตร และจุดอ้างอิงของ LISN ต้องต่อเข้ากับระนาบพื้นอ้างอิงด้วยตัวนำที่สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

(ข) โครงแบบทดสอบ (ตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542)

อุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับการทำงานทั้งที่วางบนโต๊ะหรือวางบนพื้น โดยถ้าอุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับติดผนังต้องทดสอบในลักษณะเหมือนแบบวางบนโต๊ะ และการหันเหทิศทางของอุปกรณ์ต้องสอดคล้องกับการใช้งานตามปกติ โดยการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบจะเป็นไปตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.11 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบนโต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ)

เมื่อ AE คือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

EUT คือ อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ

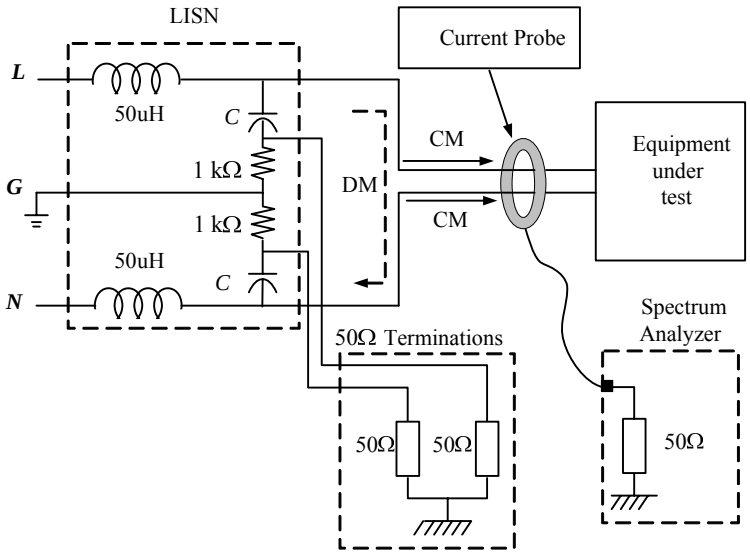
ISN (LISN) คือ โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

1. ถ้าสายเคเบิลที่ห้อยอยู่ใกล้ระนาบพื้นโลหะแนวระดับในระยะต่ำกว่า 40 เซนติเมตร และไม่สามารถทำให้สั้นลงเพื่อให้มีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินต้องม้วนทบให้เป็นมัด ด้านความยาวจะมีความยาวระหว่าง 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานที่ยาวเกินต้องม้วนทบให้เป็นมัดที่กลางสาย หรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวเหมาะสม
3. ให้ต่อ EUT เข้ากับ AMN เครื่องหนึ่ง AMN และ LISN ทุกเครื่องอาจเลือกติดตั้งกับระนาบอ้างอิงแนวดิ่ง หรือผนังโลหะ
   (ก) หน่วยอื่นทั้งหมดของระบบได้รับกำลังไฟฟ้าจาก AMN เครื่องที่ 2 อาจใช้เต้ารับชุดสำหรับสายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานหลายเส้น
   (ข) AMN และ LISN ห่างจาก EUT 80 เซนติเมตร และห่างจากหน่วยอื่นและระนาบโลหะอื่นอย่างน้อย 80 เซนติเมตร
   (ค) ต้องจัดตำแหน่งสายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานและสายเคเบิลสัญญาณตลอดความยาวของสายเท่าที่จะทำได้ ที่ระยะ 40 เซนติเมตร ห่างจากระนาบอ้างอิงแนวดิ่ง
4. สายเคเบิลของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยมือ เช่น แผงแป้นอักขระ เมาส์ ฯลฯ ต้องวางในลักษณะใช้งานปกติ
5. อุปกรณ์รอบข้างต้องวางที่ระยะ 10 เซนติเมตรจากเครื่องอื่นๆ และจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งถ้ายอมรับได้ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการติดตั้งก็ให้วางบนตัวควบคุมโดยตรง

6. สายเคเบิลสัญญาณเข้า/ออกซึ่งมีไว้สำหรับการต่อภายนอก
7. ปลายของสายเคเบิลสัญญาณเข้า/ออกซึ่งไม่ได้ต่อเข้ากับ AE อาจสิ้นสุดวงจรลงถ้าต้องการ โดยใช้อิมพีแดนซ์สิ้นสุดวงจรที่ถูกต้อง
8. ถ้าใช้โพรบกระแส ต้องวางอยู่ที่ระยะ 0.1 เมตรจาก LISN

2.4 การวัดและเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

ในการต่อวงจรเพื่อทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ โดยรูปที่ 2.12 แสดงการต่อวงจรและอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ใช้ในการวิจัยนี้



รูปที่ 2.12 การต่อวงจร เพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่โหมดการทำงานต่างๆ คือ สัญญาณรบกวนโหมดผลร่วม โหมดผลต่าง และโหมดผลรวม โดยการใช้โพรบกระแส แล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่องมือวัด spectrum analyzer หรือ EMI receiver และทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนในโหมดการทำงานต่างๆ ในย่านความถี่ที่พิจารณาคือ 150 kHz – 30 MHz และจะทำการทดสอบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 แบบการพัน โดย EUT ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนจะเป็นวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

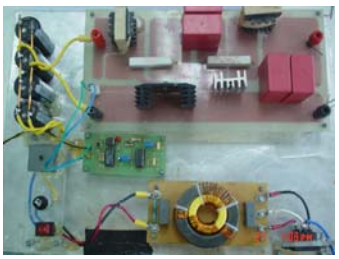
สำหรับเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้จริงในการวิจัย จะมีดังต่อไปนี้

1. EMC analyzer รุ่น Agilent E7401A ดังในรูปที่ 2.19 (ก) ซึ่งทำหน้าที่เป็น spectrum analyzer โดยย่านความถี่ที่สามารถวัดได้คือ 9 kHz – 1.5 GHz

2. LISNs ของ EMCO รุ่น Model 3810/2 ย่านความถี่ 9 kHz – 30MHz มีตัวต้านทาน 50 Ω อยู่ภายใน 1 ตัว และมีช่องสำหรับต่อกับตัวต้านทาน 50 Ω จากเครื่องวัดในตำแหน่งที่ทำการวัดและมีสวิตซ์สำหรับเลือกว่า จะให้เครื่องวัดทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งสายตัวนำกับกราวน์หรือสายนิวตรอนกับกราวน์ ดังในรูปที่ 2.13 (ข)
3. วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ใช้สำหรับวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ดังในรูปที่ 2.13 (ค) ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยนี้
4. โพรบกระแส (current probe) รุ่น 84310-80019 ของ Hewlett Packard ดังในรูปที่ 2.13 (ง) ย่านความถี่ใช้งาน 10 kHz – 250 MHz
5. วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของการพันทั้ง สาม แบบดังในรูปที่ 2.13 (จ)

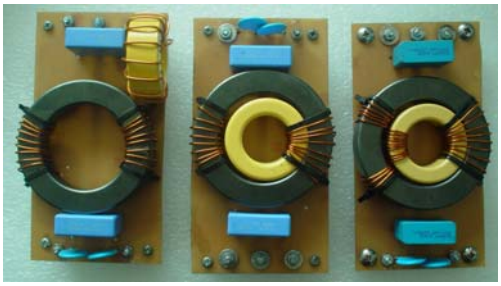
(ก) EMC Analyzer

(ข) LISN



(ค) วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์

(ง) โพรบกระแส



(จ) วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของการพันทั้ง สาม แบบ

รูปที่ 2.13 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

2.5 สรุปภาพรวมทฤษฎีพื้นฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และรูปแบบเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโหมดผลร่วมและโหมดผลต่าง รวมทั้งจะกล่าวถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการวัด และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้โพรบกระแสในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า พร้อมกับวิธีการใช้โพรบกระแสในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดผลร่วม โหมดผลต่าง และโหมดผลรวม และในหัวข้อท้ายจะแสดงเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้จริงในการวิจัย