



การลดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงของเครื่องเชื่อมความแม่นยำสูง โดยการปรับปรุงระบบสายดิน

High Frequency Noise Reduction of High-Precision Machine Grounding System

สิทธิศักดิ์ สมรฤทธิ์ และ จีรนุช เสงี่ยมศักดิ์*

Sittisak Samornrit and Chiranut Sa-ngiamsak

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Correspondent author: chiranut@kku.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องเชื่อมความแม่นยำสูงโดยส่วนใหญ่ควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้มอเตอร์แบบเชิงเส้น (Linear Motor) และใช้เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาสูง ก่อให้เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และส่งผลให้เพิ่มความสับสนในการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตต่ออุปกรณ์ที่ไวต่อสัญญาณรบกวนเช่นหัวอ่านเป็นต้น การวิจัยครั้งนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการคายประจุไฟฟ้าสถิตของเครื่องเชื่อมความแม่นยำสูงอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนจากตัวมอเตอร์ โดยการวิเคราะห์และออกแบบระบบสายดินในย่านความถี่สูง โดยเพิ่มการพิจารณาผลของกระแสผิว (Skin Effect) ในแบบจำลองทางไฟฟ้า ความถูกต้องของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบสายดินย่านความถี่สูงนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบผลจำลองทางไฟฟ้ากับผลการทดลองจริง การลดระดับแรงดันในระบบสายดินนั้นได้วิเคราะห์สองรูปแบบด้วยกันคือ 1. การลดแรงดันโดยการลดความต้านทานในสายดินโดยการเพิ่มสายตัวนำ 2. การลดแรงดันโดยการใช้ตัวเก็บประจุ ผลการจำลองทางไฟฟ้าพบว่าวิธีที่หนึ่ง นั้นลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่หัวเชื่อมต่อได้เพียง 4 % ในขณะที่วิธีที่สองนั้นสามารถลดได้ถึง 76 %

Abstract

High-precision machine mostly employs linear motors controlled by PWM (Pulse Width Modulation) technique. PWM technique inherits high instantaneous rate of voltage change over time (dV/dt); consequently electromagnetic emission has generated a noisy environment and leads to Electrostatic Discharge (ESD) events that pollutes sensitive devices such as recording heads for Hard Disk Drive (HDD) industry. This work proposes the noise reduction technique through grounding modification specifically for high frequency noise by using SPICE simulations and experiments. The high frequency modeling concern was taken into an account by including the Skin Effect of the high-precision machine on the SPICE model. Model accuracy was verified with the comparison between the simulations and experimental results. The electrical model was later on used as a core

for analysis and redesigning the grounding system with two approaches to handle high frequency noise. First is to reduce resistance to ground by adding and reconfiguring the ground path using wires. Second is to introduce a capacitive path. The first approach can reduce the induced voltage at machine down to 4%; on the other hand, the second method can drain the voltage down to 76%.

คำสำคัญ: หัวอ่าน อัดโนมิติ ระบบสายดิน ลดแรงดันไฟฟ้า สัญญาณรบกวนความถี่สูง

Keywords: Recording Heads, Automation, Grounding System, Voltage Reduction, High Frequency Noise

1. บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาและความต้องการทางด้านการเก็บข้อมูลมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลในเชิงพื้นที่ (Aral Density) ของแผ่นจานบันทึกแม่เหล็ก (Media disk) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของบิตในการเก็บข้อมูลเล็กลง ดังเช่นเป้าหมายของสถาบันวิจัย New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ที่ประเทศญี่ปุ่นตั้งเป้าการวิจัยให้ได้ความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 5Tb/in² ในปี 2013 (1) ส่งผลให้หัวอ่าน (Read head) ที่มีขนาดเล็กลงไปด้วยผลที่ตามมาคือหัวอ่านมีความทนทานต่อกระแสคายประจุไฟฟ้าสถิต (electrostatic discharge, ESD) ที่ต่ำลง (2) ส่งผลให้เกิดการทะลุ (Breakdown) และการแพร่ (Diffusion) ของชั้นแผ่นฟิล์มหัวอ่านหรือการผิดปกติของโครงสร้างทางแม่เหล็กของหัวอ่านเป็นต้น (3)

เครื่องจักรสำหรับการหยิบจับชิ้นงานอัดโนมิติเป็นเครื่องจักรที่ทำงานโดยอัดโนมิติในการผลิตอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การทำงานของเครื่องจักรต้องมีการสัมผัสโดยตรงกับชิ้นงาน เป็นเหตุให้มีความเสี่ยงต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตกับชิ้นงานได้ (4) เครื่องจักรสำหรับการหยิบจับชิ้นงานอัดโนมิติอีกประเภทหนึ่งคือเครื่องเชื่อมต่องจรด้วยลูกบอลทองคำสำหรับเชื่อมต่อวงจรทางไฟฟ้าระหว่างหัวอ่าน (Slider pad) กับสายนำสัญญาณ (Suspension trace) ซึ่งในการทำงานของเครื่องจักรจะต้องมีการสัมผัสกันของลูกบอลทองคำของหัวอ่านและสายนำสัญญาณ กระบวนการดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตเข้าไปถึงหัวอ่าน ด้วยหัวอ่านมีขนาดเล็กลงการควบคุมตำแหน่งของเครื่องเชื่อมต้องความแม่นยำสูงใน

ระดับไมโครเมตร (Micrometer, μm) มอเตอร์เชิงเส้น (Linear motor) ถูกนำมาใช้ระบุตำแหน่งได้อย่างรวดเร็ว และมีความแม่นยำสูง โดยการพิจารณาสัญญาณรบกวนจากตัวมอเตอร์และระบบควบคุมมอเตอร์จึงไม่แตกต่างกับการพิจารณาในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ (5) ระบบควบคุมมอเตอร์เชิงเส้นด้วยสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) นั้นมีประสิทธิภาพและเป็นที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ผลเสียที่ตามมาคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลา (dv/dt) ที่สูง ซึ่งสามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความอ่อนไหวใกล้เคียงได้ (6) อีกทั้งยังมีปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น กระแส Common mode (CM), Differential mode (DM), Leakage current, Bearing current, Shaft voltage วิธีหนึ่งในการลดปัญหาดังกล่าวได้แก่การใส่วงจรกรองสัญญาณ (Filters) ทั้ง Active filters และ Passive filters โดยการออกแบบทั้งระบบควบคุมมอเตอร์ ซึ่งค่อนข้างมีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้งาน (7, 8, 9, 10) ปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้งานสัญญาณ PWM ในการควบคุมมอเตอร์เพื่อระบุตำแหน่งในการเชื่อมต่อลูกบอลทองคำนั้น ส่งผลเหนี่ยวนำไปถึงผลต่างของแรงดันที่หัวเชื่อมต่อลูกบอล (Bond head) กับฐานวางหัวอ่าน (Dock station) ดังนั้นเครื่องเชื่อมต่องจรด้วยลูกบอลทองคำนั้นควรที่จะมีการตรวจสอบผลต่างของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่ส่งผลเสียหายต่อหัวอ่าน การวัดแรงดันกระแสสลับ (AC Voltage) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ยืดหยุ่นและสะดวกในการวัดระดับแรงดันและพิจารณาหาความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในสายดิน (Resistance to ground) หรือ R_{tg}

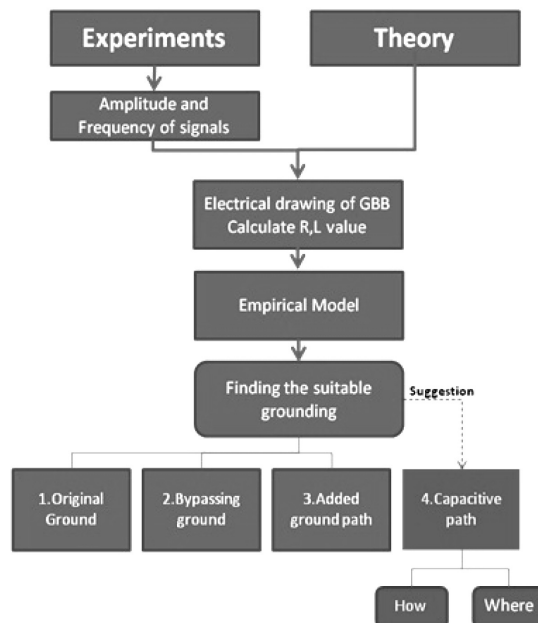
ซึ่งการลดค่า R_{tg} ก็สามารถลดระดับแรงดันได้โดยการต่อเพิ่มสายสายดินตามจุดต่างๆ อย่างไรก็ตาม การลดค่า R_{tg} โดยวิธีดังกล่าวเป็นการพิจารณาเฉพาะย่านความถี่ต่ำ (11, 12) ซึ่งในวิธีนี้อาจจะไม่เหมาะสมกับกรณีที่สัญญาณรบกวนอยู่ในย่านความถี่สูง (kHz เป็นต้นไป)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาคายประจุไฟฟ้าสถิตของเครื่องเชื่อมตอวงจรด้วยลูกบอลทองคำโดยการปรับปรุงระบบสายดินเพื่อลดผลต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างหัวเชื่อมต่อกับฐานจับชิ้นงานที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนจากตัวมอเตอร์ โดยการวิเคราะห์และออกแบบระบบสายดินในย่านความถี่สูงและพิจารณาผลของกระแสผิวที่ผิว (Skin Effect) ด้วยแบบจำลองทางไฟฟ้า ผลที่ได้จากแบบจำลองทางไฟฟ้าจะทำการเปรียบเทียบกับผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าจริงจากจุดต่างๆ ของเครื่องจักรเพื่อทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

2. วิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการทดลอง

แบบจำลองทางไฟฟ้าที่ได้มาจากการวัดจริงบางส่วน (Empirical model) ของเครื่องเชื่อมตอวงจร



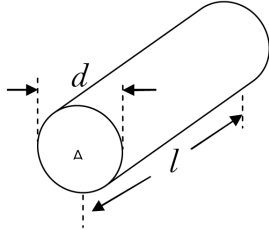
รูปที่ 1. ขั้นตอนในการทดลอง

จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือจากทฤษฎีและจากการทดลองวัดสัญญาณจริง ผลที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบถึงรูปแบบระบบสายดินของเครื่อง ระดับสัญญาณและความถี่ในส่วนต่างๆ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากสัญญาณจริงโดยใช้เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope) Tektronix รุ่น TDS5104B 1GHz มาเป็นข้อมูลในการออกแบบและคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ เนื่องจากโครงสร้างโดยส่วนใหญ่ของเครื่องเชื่อมตอวงจรประกอบด้วยแท่งโลหะขนาดใหญ่ ผลจากการเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการออกแบบจำลองทางไฟฟ้าจึงคิดเฉพาะผลของค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทาน หลังจากที่ได้แบบจำลองแล้วเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ออกแบบขึ้น จะทำการนำสัญญาณจากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับสัญญาณจริงที่จับได้บนเครื่องจักรกรณีระบบสายดินมีการต่อในรูปแบบต่างๆ และเสนอแนะการลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงในระบบสายดินโดยวิธีการใช้ตัวเก็บประจุแทนการต่อสายตัวนำ ซึ่งต้องคำนึงถึงตำแหน่งในการต่อและค่าของตัวเก็บประจุที่จะนำมาต่ออีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของแบบจำลองทางไฟฟ้า

2.2.1 กรณีสายตัวนำแบบทรงกลม(Round conductors)

ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสายตัวนำคำนวณค่าความต้านทานของสายตัวนำ แสดงในสมการที่ 1 (13)



$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

โดยที่ ρ = ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ($\Omega \cdot m$), l = ความยาวมีหน่วยเป็น m, A = พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็น m^2

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำที่เป็นเส้นตรงจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาว คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ และความถี่ของสัญญาณ (14) ซึ่งสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ 2

$$L = 0.002l \left[\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + 0.5 + 0.2235 \left(\frac{w+t}{l} \right) \right] (nH) \quad (4)$$

โดยที่

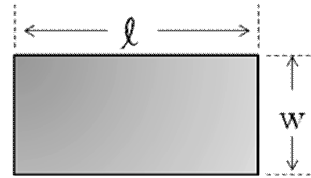
L มีหน่วยเป็น nH, l = ความยาวมีหน่วยเป็น cm, w = ความกว้างมีหน่วยเป็น cm, t = ความหนา มีหน่วยเป็น cm

$$L_{self} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{2l}{r} \right) - 0.75 \right) \quad (2)$$

โดยที่ L มีหน่วยเป็น nH, r = รัศมีทรงกลม มีหน่วยเป็น cm, l = ความยาวมีหน่วยเป็น cm

2.2.2 กรณีตัวนำแบบแท่งโลหะสี่เหลี่ยม (Rectangular conductors)

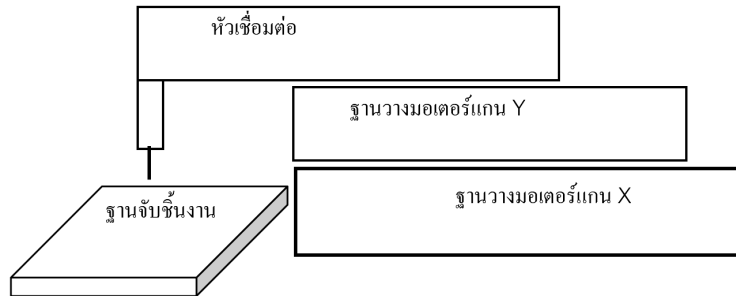
ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของฐานวางมอเตอร์ในแบบจำลองสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 3 (13, 14)



$$R_{dc} = \frac{\rho}{wl} \quad (\Omega / m) \quad (3)$$

โดยที่ ρ = ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ($\Omega \cdot m$) l = ความยาวมีหน่วยเป็น m, w = ความกว้างมีหน่วยเป็น m

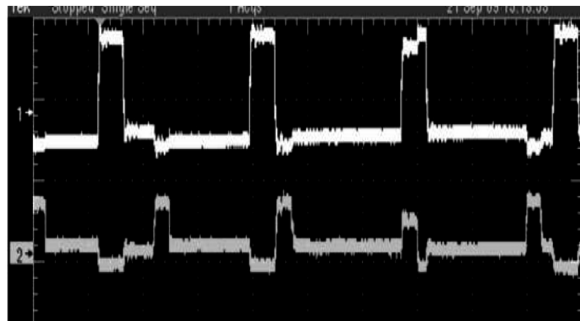
ค่าความเหนี่ยวนำของฐานวางมอเตอร์สามารถหาได้ในสมการที่ 4



รูปที่ 2. โครงสร้างของเครื่องเชื่อมต่อวงจรด้วยลูกบอลทองคำ

จากรูปที่ 2 เครื่องเชื่อมต่อประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่เรียกว่าฐานของเครื่องจะประกอบด้วยฐานวางมอเตอร์แกน X ฐานวางมอเตอร์แกน Y หัวเชื่อมต่อและฐานจับชิ้นงาน ฐานวางมอเตอร์แกน X ฐานวางมอเตอร์แกน Y เป็นแท่งโลหะที่เคลื่อนที่ในแนวแกน X และแกน Y ตามลำดับ โดยอาศัยการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ที่มีการควบคุมด้วยสัญญาณ PWM เพื่อเคลื่อนที่ระบุตำแหน่งในการเชื่อมต่อของหัวเชื่อมต่อโดยที่ชิ้นงานหรือหัวอ่านจะวางที่ฐานจับชิ้นงาน แรงดันสัญญาณ

รบกวนที่วัดได้จากมอเตอร์ในแนวแกน X และ Y ดังแสดงในรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากมอเตอร์ในแนวแกน X มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากมอเตอร์ในแนวแกน Y เนื่องจากมอเตอร์ในแนวแกน X เป็นฐานด้านล่างสุดที่รับน้ำหนักของฐานวางมอเตอร์แกน Y และหัวเชื่อมต่อ ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในแนวแกน X จึงมีขนาดที่สูงกว่ามอเตอร์ในแนวแกน Y ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากมอเตอร์ในแนวแกน X มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากมอเตอร์ในแนวแกน Y

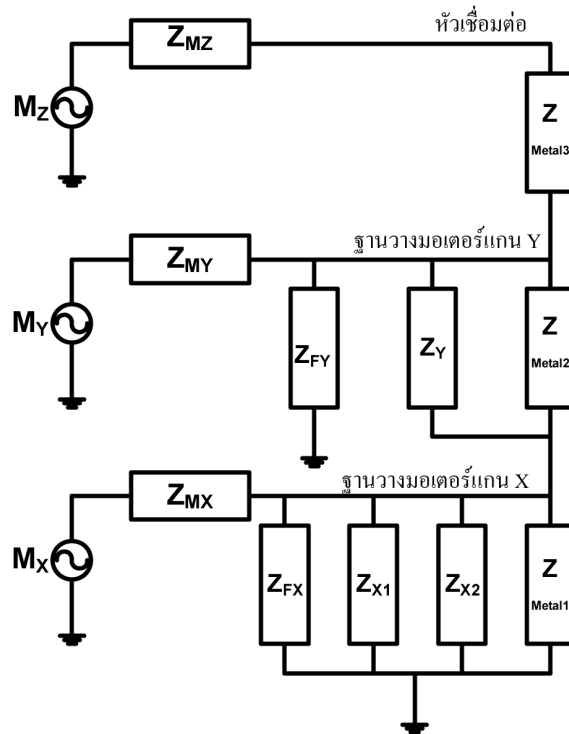


$$T/D = 40\mu s, V/D = 100V$$

รูปที่ 3. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์ โดยที่ CH1) แนวแกน X , CH2) แนวแกน Y

รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองระบบสายคินของเครื่องเชื่อมต่อวงจรด้วยลูกบอลทองคำประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ที่สำคัญได้แก่ ฐานวางมอเตอร์แกน X (Station X) ฐานวางมอเตอร์แกน Y (Station Y) และส่วนหัวเชื่อมต่อลูกบอล (Bond Head) หน้าที่และชนิดของมอเตอร์ในแต่ละแกนมีความแตกต่างกัน โดยชนิดของ

มอเตอร์ในแนวแกน X และ Y เป็นมอเตอร์ชนิดมอเตอร์เชิงเส้น (linear motor) ทำหน้าที่เคลื่อนที่ระบุตำแหน่งในแนวแกนดังกล่าว ส่วนมอเตอร์ในแนวแกน Z ที่ใช้ในการยิงลูกบอลทองคำเพื่อเชื่อมต่อนั้นจะเป็นชนิดคอลลีขดลวด (voice coil motor) มอเตอร์ทั้ง 3 แกนถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนจะให้เป็นแหล่งจ่ายของวงจรที่ต่อไว้ในแต่ละฐาน



รูปที่ 4. รูปแบบจำลองระบบสายดินของเครื่องเชื่อมต่อวงจร

ตารางที่ 1. แสดงความหมายของอุปกรณ์ต่างๆ ในแบบจำลอง

อุปกรณ์	นิยาม
M_x	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แกน X
M_y	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แกน X
M_z	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แกน Z
Z_{FX}	อิมพีแดนซ์ที่ช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำมอเตอร์แกน X
Z_{FY}	อิมพีแดนซ์ที่ช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำมอเตอร์แกน Y
Z_{X1}	อิมพีแดนซ์ช่วยลดระดับแรงดันฐานวางมอเตอร์แกน X1
Z_{X2}	อิมพีแดนซ์ช่วยลดระดับแรงดันฐานวางมอเตอร์แกน X2
Z_Y	อิมพีแดนซ์ช่วยลดระดับแรงดันฐานวางมอเตอร์แกน Y
Z_{metal1}	อิมพีแดนซ์ของฐานวางมอเตอร์แกน X
Z_{metal2}	อิมพีแดนซ์ของฐานวางมอเตอร์แกน Y
Z_{metal3}	อิมพีแดนซ์ของฐานวางมอเตอร์แกน Z
Z_{MX}	อิมพีแดนซ์ของสายมอเตอร์แกน X
Z_{MY}	อิมพีแดนซ์ของสายมอเตอร์แกน Y
Z_{MZ}	อิมพีแดนซ์ของสายมอเตอร์แกน Z

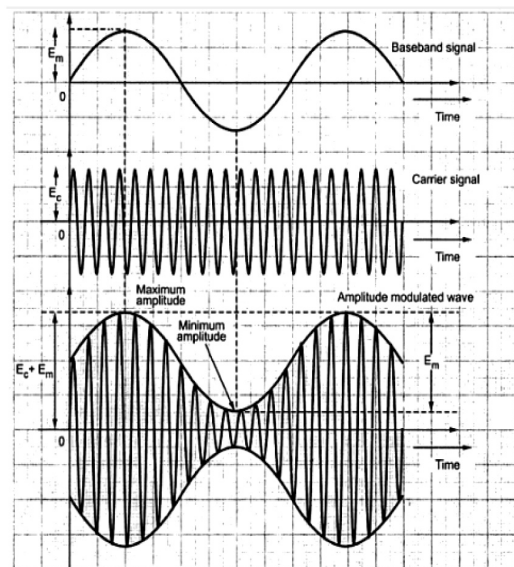
ความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในส่วน จำลองสามารถหาได้จากสมการที่ 1-4 ผลการคำนวณและค่าต่างๆ ของเครื่องเชื่อมต่องจรด้วยลูกบอลทองคำในแบบ ค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2. แสดงค่าต่างๆ ในแบบจำลองของเครื่องเชื่อมต่องจรด้วยลูกบอลทองคำ

Parts	Dimension			Property			Value	
	t, Diameter (mm)	Length (cm)	Width (cm)	Material	Resistivity ρ (m Ω)	Permeability μ_r	R (m Ω)	L (uH)
Z metal3 (Z axis)	100	30	20	Steel	4.6×10^{-7}	4000	0.0069	0.00008499
Z metal2 (Y axis)	250	80	50	Steel	4.6×10^{-7}	4000	0.0029	0.0002348
Z metal1 (X axis)	300	100	60	Steel	4.6×10^{-7}	4000	0.0026	0.0002999
Z Y	5	50	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	1.290	0.5241
Z X1	5	100	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	2.580	1.1874
Z X2	5	80	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	2.070	0.9142
Z FY	3	150	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	6.860	2.0555
Z FX	3	150	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	6.860	2.0555
Z MZ	3	10	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	0.460	0.0830
Z MY	3	30	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	1.370	0.3140
Z MX	3	10	-	Copper	1.72×10^{-8}	0.999994	0.460	0.0830

2.2 การจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์

หลักการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์จะใช้หลักการของการมอดูเลชันเชิงขนาด (Amplitude modulation) เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงของมอเตอร์ลักษณะรูปสัญญาณเปลี่ยนแปลงในทางขนาด โดยทั่วไปแล้วการมอดูเลชันเชิงขนาดจะนิยมใช้งานรับ-ส่งข้อมูลด้านการสื่อสาร ซึ่งการมอดูเลชันเชิงขนาด หมายถึงการนำสัญญาณเบสแบนด์หรือสัญญาณข่าวสาร (Baseband signal) ที่ต้องการส่งผสมเข้ากับสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) โดยทำให้ขนาดของคลื่นพาห์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสัญญาณเบสแบนด์ โดยที่ความถี่ของคลื่นพาห์ยังคงที่ตลอดเวลา ดังแสดงในภาพที่ 5



รูปที่ 5. หลักการมอดูเลชันเชิงขนาด

จากรูปที่ 5 สัญญาณเบสแบนด์และสัญญาณคลื่นพาหะที่มีลักษณะเป็นไซน์ (sinusoidal) ที่มีความถี่เดียว ซึ่งสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังสมการที่ 5 (15)

$$V_{AM}(t) = \underbrace{V_c \sin(\omega_c t)}_{\text{Carrier}} + \underbrace{\frac{mV_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t}_{\text{LSB}} - \underbrace{\frac{mV_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t}_{\text{USB}} \quad (5)$$

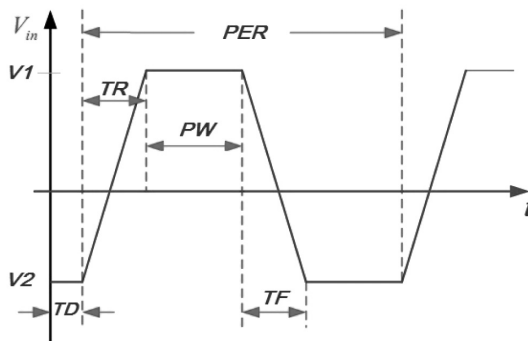
โดยที่ m คือดัชนีการมอดูเลต (Modulation index) มีค่าเท่ากับ $\frac{V_m}{V_c}$

LSB (Lower side band) คือความถี่ข้างต่ำกว่าความถี่คลื่นพาหะ ω_c

USB (Upper side band) คือความถี่ข้างสูงกว่าความถี่คลื่นพาหะ ω_c

โดยที่ V_1 คือ แรงดันซีกบวก, V_2 คือ แรงดันซีกลบ, T_D คือ ช่วงเวลาหน่วง (Delay time)

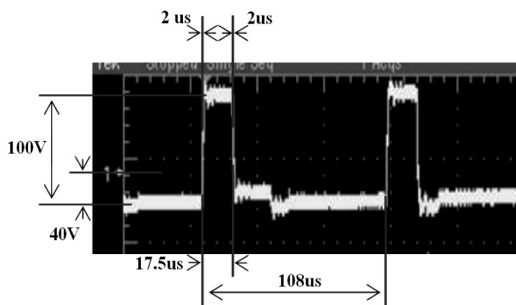
T_R คือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise time), T_F คือ ช่วงเวลาลง (Fall time), PW คือ ความกว้างของสัญญาณ (Width of the pulse), PER คือ ช่วงคาบของสัญญาณ (Period of the pulse)



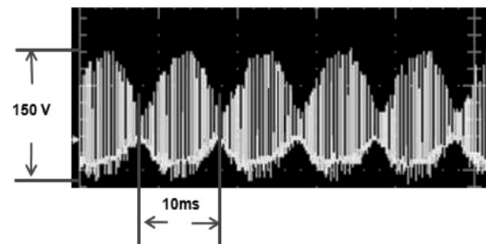
รูปที่ 6. แสดงค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสร้างสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์

2.2.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน X

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน X ดังแสดงในรูปที่ 7 ใช้หลักการในการจำลองสัญญาณเช่นเดียวกันกับข้างต้น โดยใช้ Tektronix รุ่น TDS5104B 1GHz ทำการจับสัญญาณรบกวนจริงจากเครื่องเชื่อมต่องจรเพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต่อไป



(ก)



(ข)

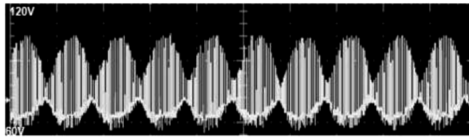
รูปที่ 7. แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน X

ก) T/D = 40 us ข) T/D = 10 ms

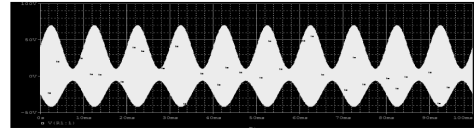
$$\begin{aligned} f(\text{carrier}) &= 1/T \\ &= 1/(108\mu\text{s}) \\ &= 9.26 \text{ KHz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\text{mod}) &= 1/T \\ &= 1/(10\text{ms}) \\ &= 100 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$T/D = 10 \text{ ms}$$



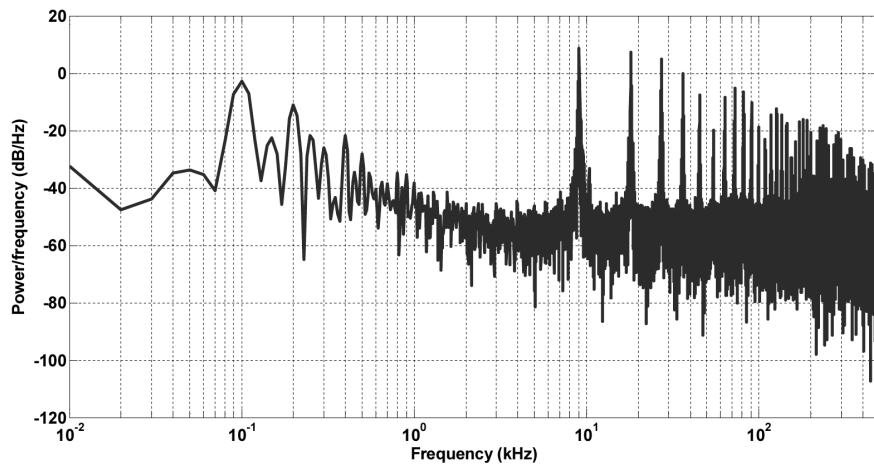
(ก)



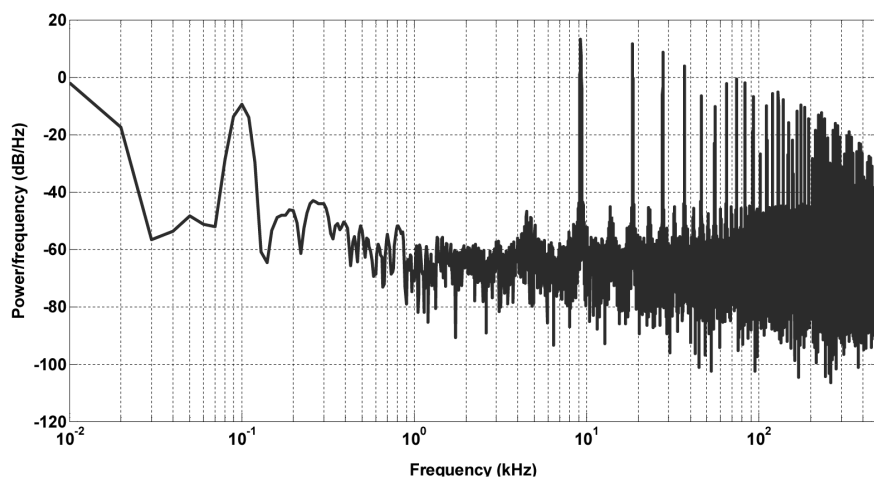
(ข)

รูปที่ 8. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน X

ก) สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องเชื่อมต่อวงจร ข) สัญญาณจากแบบจำลอง



(ก)



(ข)

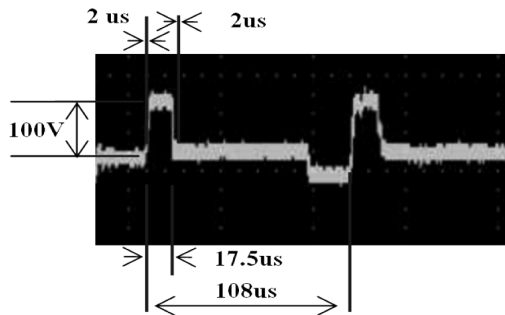
รูปที่ 9. แสดงการเปรียบเทียบทางความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน X

ก) สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องเชื่อมต่อวงจร ข) สัญญาณจากแบบจำลอง

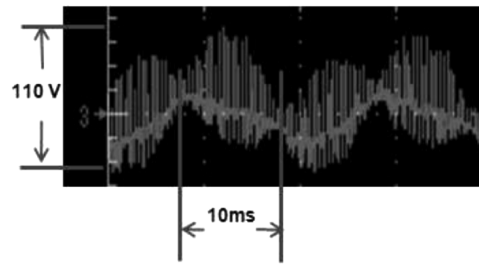
2.2.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก

ตัวมอเตอร์แนวแกน Y

ในส่วนของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน Y รูปร่างของสัญญาณจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 10



(ก)



(ข)

รูปที่ 10. แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน Y

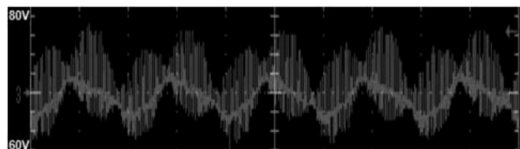
ก) $T/D = 40 \text{ us}$ ข) $T/D = 10 \text{ ms}$

$$\begin{aligned} f(\text{carrier}) &= 1/T \\ &= 1/(108 \text{ us}) \\ &= 9.26 \text{ KHz} \end{aligned}$$

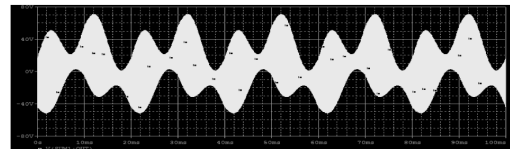
$$\begin{aligned} f(\text{mod}) &= 1/T \\ &= 1/(10 \text{ ms}) \\ &= 100 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\text{sum}) &= 1/T \\ &= 1/(20 \text{ ms}) \\ &= 50 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$T/D = 10 \text{ ms}$



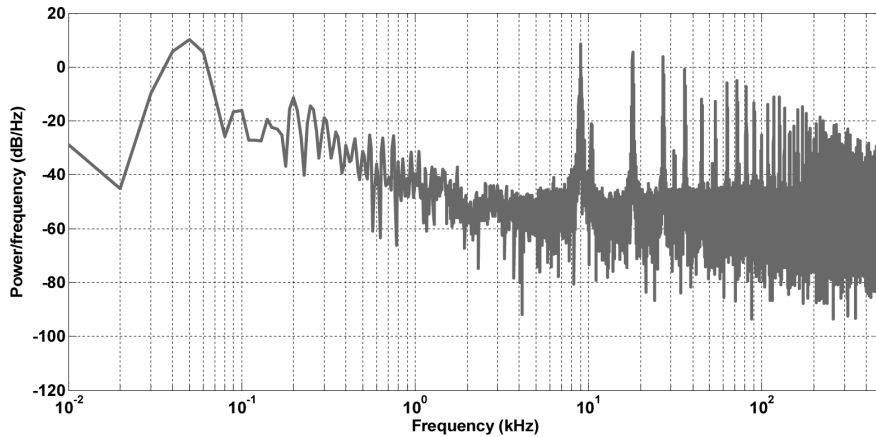
(ก)



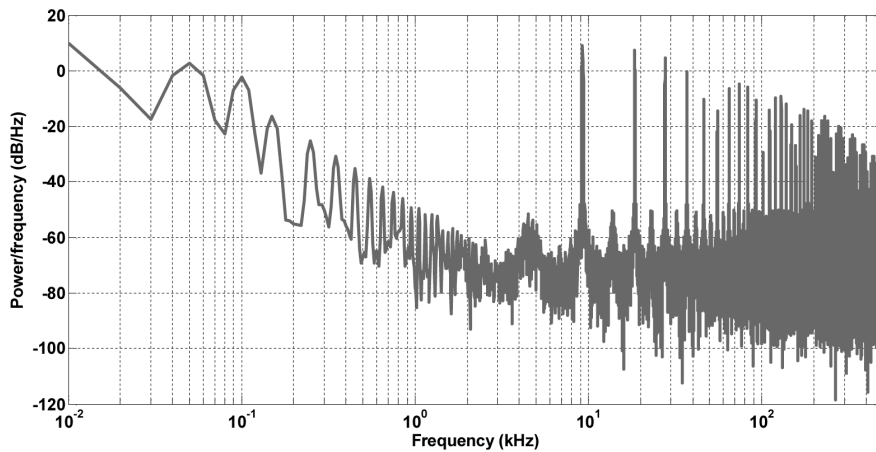
(ข)

รูปที่ 11. สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน Y

ก) สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องเชื่อมต่อวงจร ข) สัญญาณจากแบบจำลอง



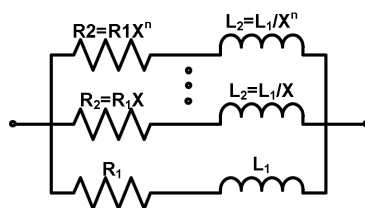
(ก)



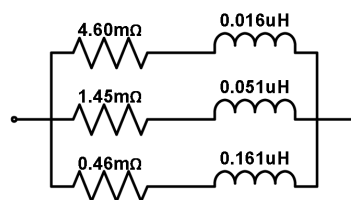
(ข)

รูปที่ 12. แสดงการเปรียบเทียบทางความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แนวแกน Y
ก) สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องเชื่อมต่อวงจร ข) สัญญาณจากแบบจำลอง

2.3 การพิจารณาผลอันเนื่องมาจาก Skin Effect (skin depth) มีค่าลดลง ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดยังผล (effective area) ของตัวนำลดลงตามไปด้วยทำให้ค่าความต้านทานยังผล (effective resistance) มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความหนาแน่นของกระแสบริเวณที่ผิวของตัวนำนั้นมากกว่าบริเวณอื่น และเมื่อความถี่สูงขึ้นความลึกผิว



(ก)

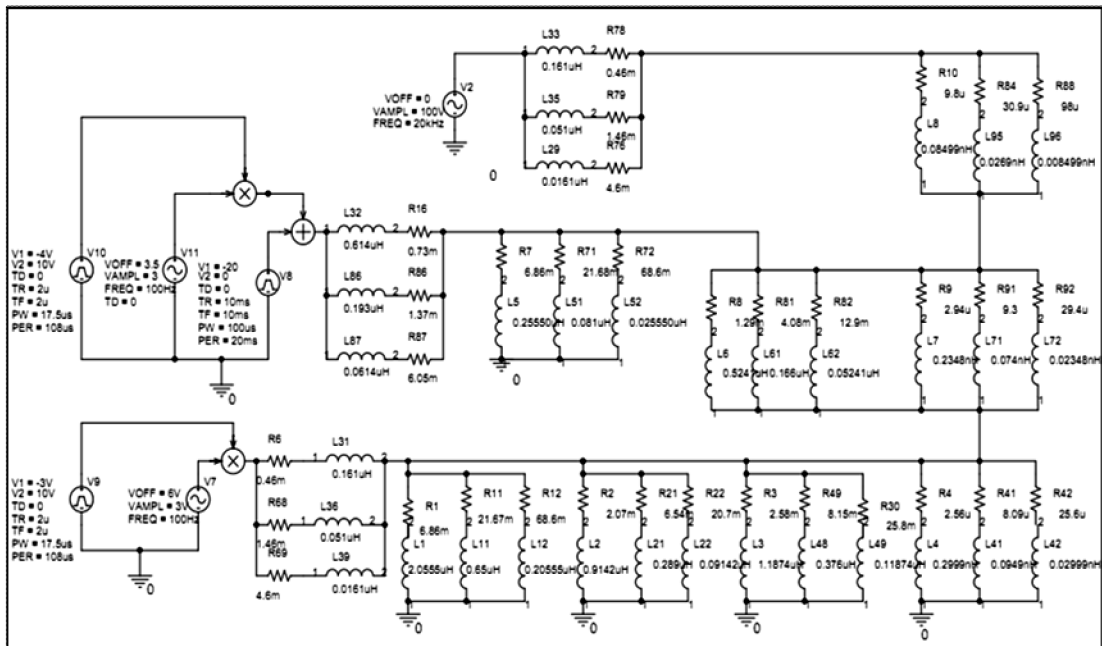


(ข)

รูปที่ 13. แสดงแบบจำลองกรณีพิจารณาผลอันเนื่องมาจาก Skin Effect

วงจร R-L ladder จากการคิดผลของ Skin Effect ดังแสดงในรูปที่ 13 (ก) การได้มาซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ สามารถหาได้โดย (16) $R_1 = 1.42R_{dc}$ และ $L_1 = 1.94L_{self}$ เมื่อ R_{dc} คือค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง และ L_{self} คือค่าความเหนี่ยวนำภายในของสาย เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าความต้านทานจะสูงขึ้นเป็นจำนวนเท่าของ X ซึ่งค่าความ

ต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10dB/decade แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความเหนี่ยวนำภายในจะลดลงด้วยค่าที่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่นตัวนำกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm ยาว 10 cm สามารถจำลองโดยคิดผลอันเนื่องมาจาก Skin Effect ได้ดังแสดงในรูปที่ 13 (ข) และโมเดลทางไฟฟ้าของเครื่องจักรที่คิดผลของ Skin Effect แสดงดังรูปที่ 14

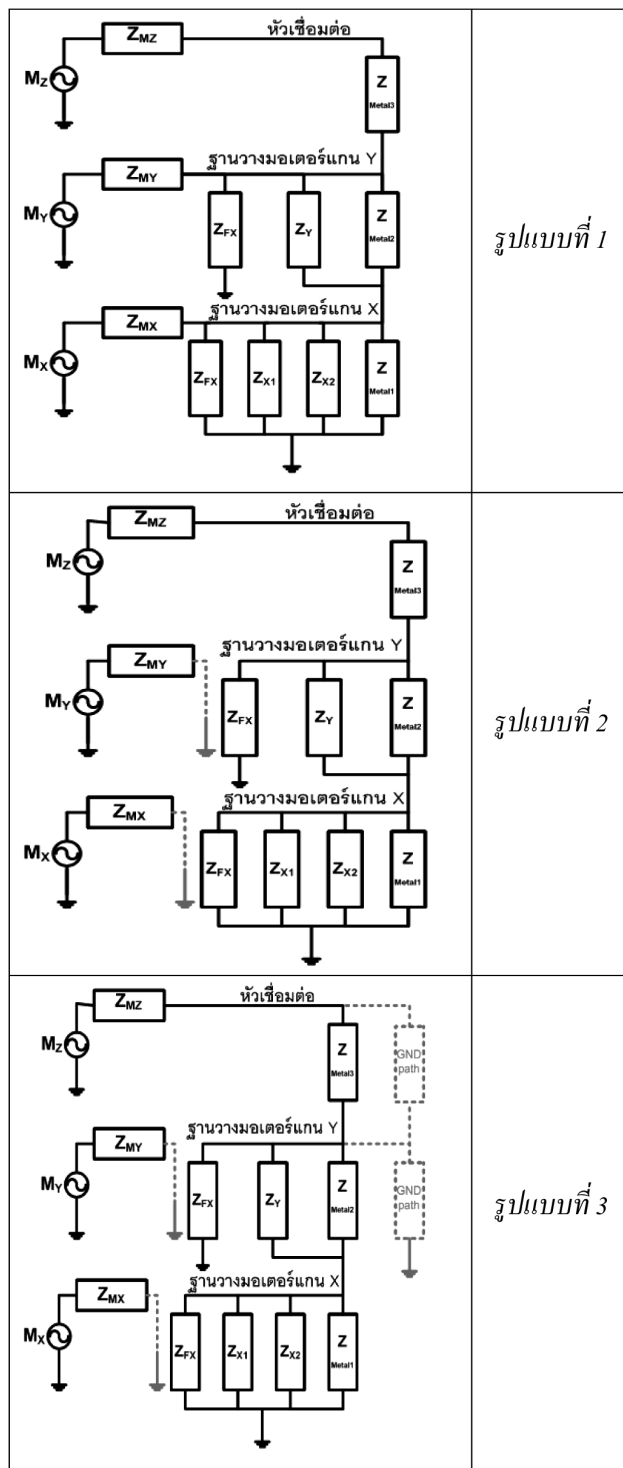


รูปที่ 14. แบบจำลองระบบสายดินของเครื่องเชื่อมตอวงจร

3. รูปแบบระบบสายดินและการวัดแรงดันไฟฟ้า

ทั้งในแบบจำลองทางไฟฟ้าและการทดลองวัดสัญญาณจากเครื่องเชื่อมตอวงจรจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 รูปแบบตามรูปแบบระบบสายดิน คือ รูปแบบ 1

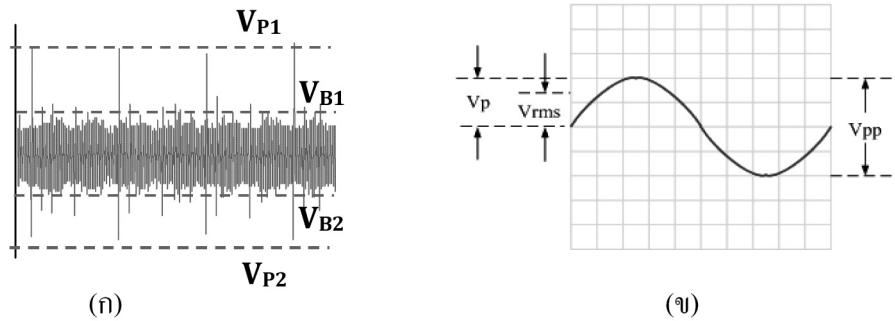
ต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขอมอเตอร์ที่ฐานของเครื่องเชื่อมตอวงจรในแนวแกน X และแกน Y รูปแบบที่ 2 ทำการต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากมอเตอร์ลงสายดินโดยตรง และรูปแบบที่ 3 ต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากมอเตอร์ลงสายดินโดยตรงและเพิ่มสายตัวนำระหว่างหัวเชื่อมต่อกับจุดสายดิน ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15. แสดงรูปแบบระบบสายดิน

การวัดแรงดันไฟฟ้าในจุดต่างๆ ของเครื่องเชื่อม
 ต่อจะใช้เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope)
 Tektronix รุ่น TDS5104B 1GHz แล้วทำการเปรียบเทียบ
 ในรูปแบบระบบสายดินทั้ง 3 รูปแบบรูปร่างของสัญญาณ
 แรงดันไฟฟ้าอยู่ในรูปสัญญาณชั่วขณะ (Transient) เพื่อ

ทำการเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจนจะประมาณค่า
 สัญญาณชั่วขณะ (V_{P1} และ V_{P2}) เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณ
 (V_{B1} และ V_{B2}) ดังแสดงในรูปที่ 16 (ก) จากนั้นนำค่าที่ได้
 มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square)
 ดังแสดงในรูปที่ 16 (ข)



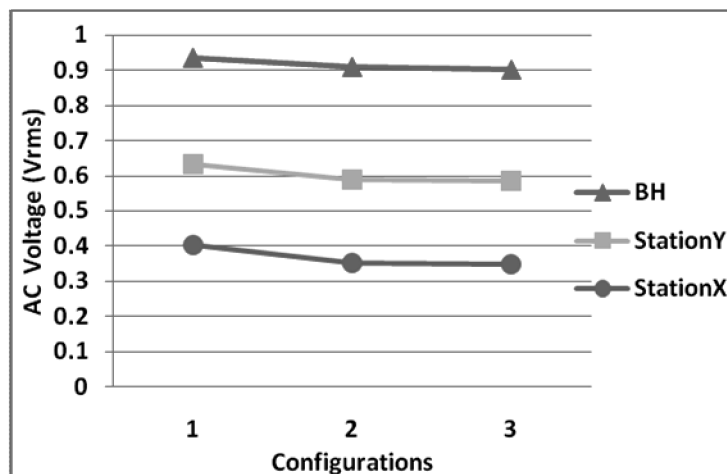
รูปที่ 16. ก) ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ข) ค่าเฉลี่ยกำลังสอง

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

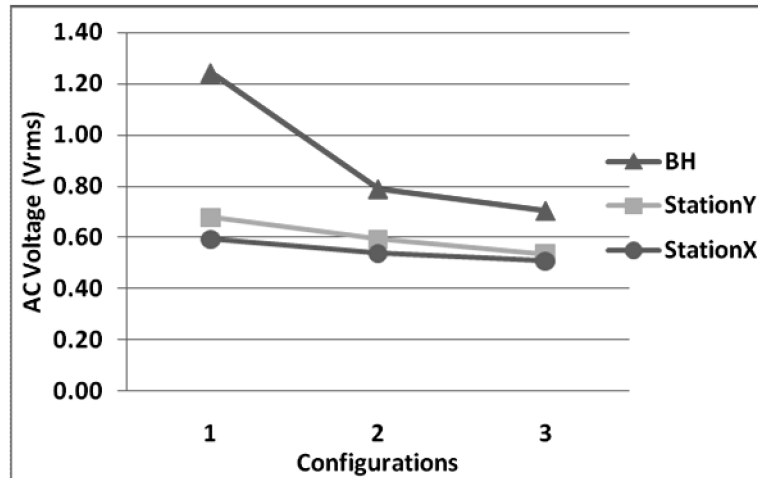
4.1 การลดแรงดันจากสัญญาณรบกวนโดยการ ใช้ลวดตัวนำ

จากรูปที่ 17 แสดงผลแรงดันไฟฟ้าจากแบบ
 จำลองในรูปแบบระบบสายดินทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งผลการ
 ทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนจากรูปแบบที่ 1 เป็นรูปแบบที่
 2 มีระดับแรงดันต่ำลง เนื่องจากการกำจัดแหล่งกำเนิด

สัญญาณรบกวนของระบบโดยแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
 จากมอเตอร์ทั้งแกน X และ Y ลงสายดินโดยตรง ทำให้
 ผลที่เกิดขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากมอเตอร์ในแนวแกน Z
 อย่างเดียว ส่วนการเปลี่ยนจากรูปแบบที่ 2 เป็นรูปแบบ
 ที่ 3 มีระดับแรงดันใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์
 ของฐานวางมอเตอร์ในแต่ละแกนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบ
 กับสายตัวนำที่ต่อเพิ่มระหว่างหัวเชื่อมต่อกับจุดสายดิน
 ทำให้กระแสส่วนใหญ่ไหลผ่านฐานวางมอเตอร์



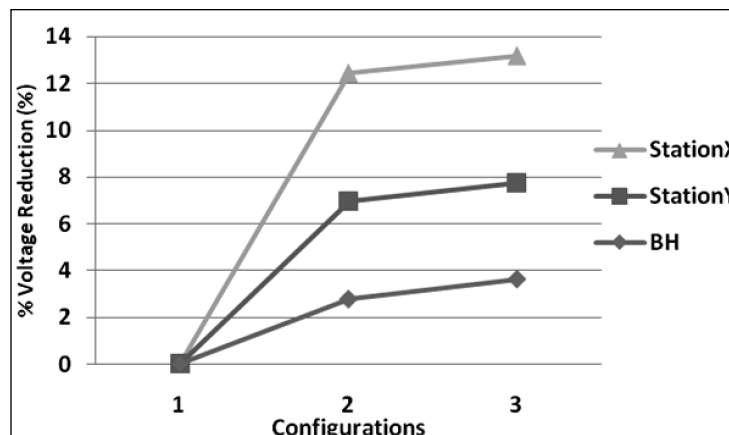
รูปที่ 17. ผลจากแบบจำลองในแต่ละรูปแบบระบบสายดิน



รูปที่ 18. ผลการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องเชื่อมต่อวงจร

จากรูปที่ 18 แสดงผลจากการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าในจุดต่างๆ ของเครื่องเชื่อมต่อวงจรด้วยลูกบอลทองคำในรูปแบบระบบสายดินทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าระดับแรงดันลดลงตามรูปแบบระบบสายดินที่เปลี่ยนไปและเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือแรงดันไฟฟ้าที่หัวเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าที่ฐานวางมอเตอร์แนวแกน Y และ X ตามลำดับถือได้ว่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับที่มีค่าใกล้เคียงกับในแบบจำลอง

เมื่อนำผลแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลองในจุดต่างๆ ในรูปแบบระบบสายดินทั้ง 3 รูปแบบมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ระดับแรงดันที่ลดลงได้เมื่อเทียบกับระบบสายดินรูปแบบที่ 1 ผลที่ได้พบว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถลดได้ที่หัวเชื่อมต่ออยู่ที่ประมาณ 4 % ดังแสดงในรูปที่ 19



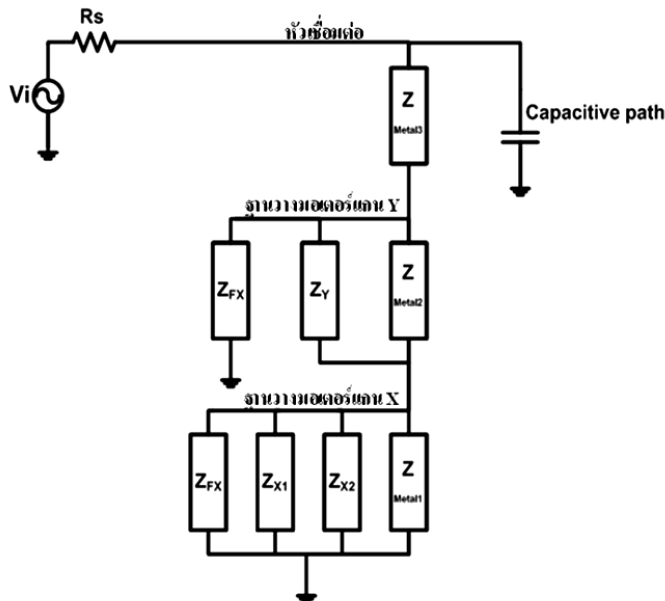
รูปที่ 19. แสดงเปอร์เซ็นต์การลดแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ในแต่ละรูปแบบสายดิน

4.2 การลดแรงดันจากสัญญาณรบกวนโดยการ ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

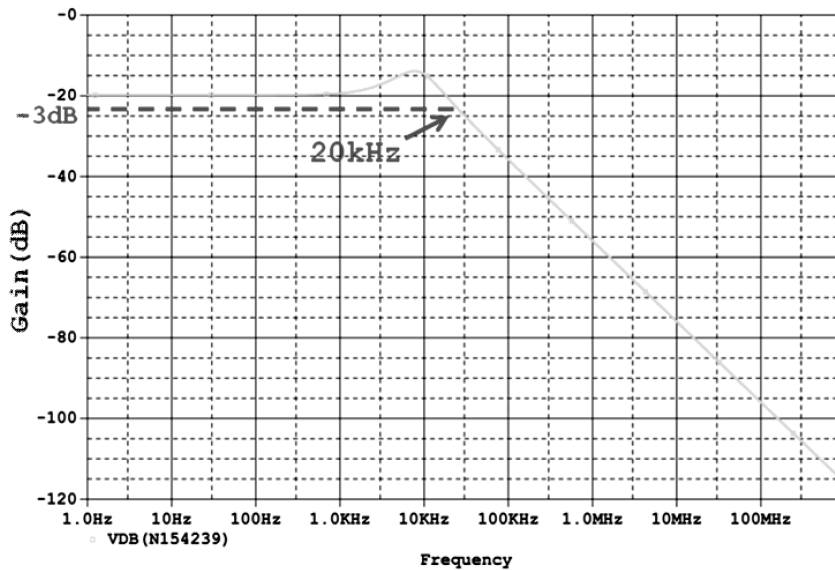
จากผลการลดแรงดันไฟฟ้าที่หัวเชื่อมต่อเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดเหตุการณ์คายประจุของเครื่องเชื่อมต่อวงจรขึ้นต้น พบว่าสามารถลดแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 4 % เทียบกับระบบสายดินรูปแบบที่ 1 การเพิ่มสายตัวนำระหว่างหัวเชื่อมต่อกับจุดสายดินเปรียบได้กับการต่อเพิ่มอิมพีแดนซ์ที่สูง (อินดักแตนซ์) เข้าไปในระบบสายดินของเครื่องเชื่อมต่อที่มีการใช้งานที่ความถี่สูงเนื่องจากการควบคุมตำแหน่ง จากผลดังกล่าวการที่จะช่วยกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกไปนั้น ควรเพิ่มเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำเมื่อความถี่สูงขึ้น นั่นก็คือเส้นทางสายดินแบบตัวเก็บประจุ (สายดินแบบตัวเก็บประจุ) ซึ่งการหาค่าตัวเก็บประจุและการกำหนดความถี่คัตออฟ (Cutoff frequency) นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ 6 (17)

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางด้านความถี่ของสัญญาณเหนี่ยวนำจากตัวมอเตอร์แล้วสามารถประมาณการจุดความถี่คัตออฟได้อยู่ที่ประมาณ 10 kHz และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรในแบบจำลองประมาณ 0.2 uH นำค่าทั้งสองมาแทนค่าในสมการที่ (6) จะได้ค่าตัวเก็บประจุเพื่อต่อเข้ากับระบบสายดินในแบบจำลองของเครื่องเชื่อมต่อวงจรประมาณ 1F จากนั้นทำการเพิ่มสายดินแบบตัวเก็บประจุเข้าไปในแบบจำลองในรูปแบบที่ 1 เพื่อยืนยันการคำนวณ พบว่าจุดที่ -3dB อยู่ที่ความถี่เท่ากับ 20 kHz มีความคลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณเล็กน้อย แบบจำลองการเพิ่ม สายดินแบบตัวเก็บประจุและผลตอบสนองด้านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 20 และ 21 ตามลำดับ



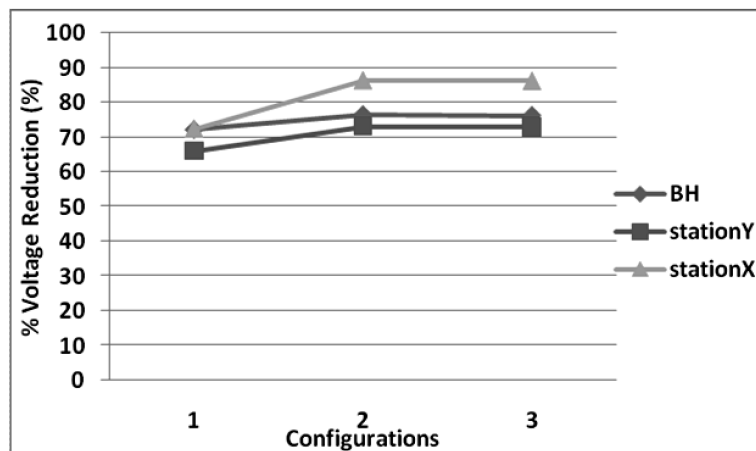
รูปที่ 20. รูปแบบในการเพิ่มสายดินแบบตัวเก็บประจุ



รูปที่ 21. ผลตอบสนองด้านความถี่ของแบบจำลองเมื่อเพิ่มสายดินแบบตัวเก็บประจุ

เมื่อทำการเพิ่มสายดินแบบตัวเก็บประจุในแบบจำลองเพื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง ดันไฟฟ้าที่หัวเชื่อมต่อได้ถึง 76 % เทียบกับการต่อเพิ่มสายตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 22

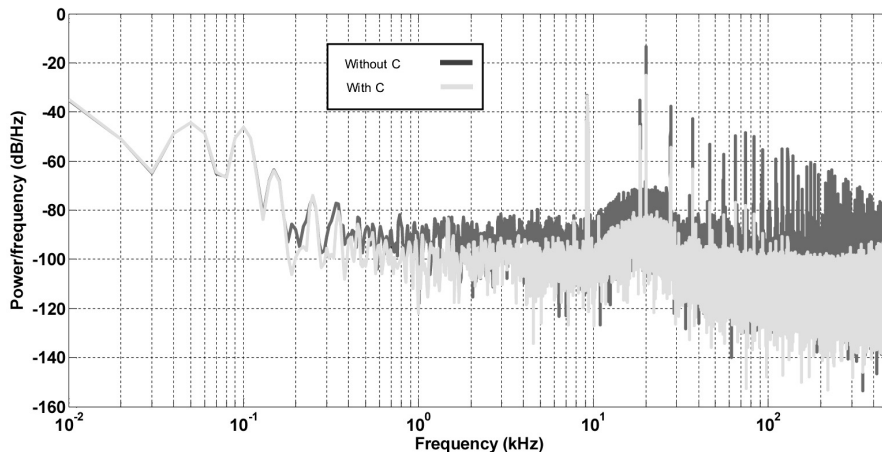
เปรียบเทียบทั้ง 3 รูปแบบ ผลทำให้พบว่าสามารถลดแรง



รูปที่ 22. แสดงเปอร์เซ็นต์การลดแรงดันไฟฟ้าหลังจากเพิ่มสายดินแบบตัวเก็บประจุในแบบจำลองเทียบกับการต่อเพิ่มสายตัวนำ

เมื่อนำผลแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบที่ 1 มาการเก็บประจุแสดงให้เห็นการลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงเปรียบเทียบผลตอบสนองทางด้านความถี่ของแรงดันที่จากมอเตอร์ได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 23

หัวเชื่อมต่อเปรียบเทียบก่อน-หลังเพิ่ม สายดินแบบตัว



รูปที่ 23. ผลตอบสนองทางความถี่ของแรงดันที่หัวเชื่อมต่อเปรียบเทียบก่อน-หลังเพิ่ม สายดินแบบตัวเก็บประจุ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการเกิด การคายประจุไฟฟ้าสถิตเครื่องเชื่อมต่อวงจรด้วยลูกบอล ทองคำอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนจาก ตัวมอเตอร์โดยการวิเคราะห์และออกแบบระบบสายดิน ในย่านความถี่สูงและพิจารณาผลของ Skin Effect ใน แบบจำลองทางไฟฟ้าด้วย ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลอง จะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในส่วนต่างๆ ของ เครื่องเชื่อมต่อวงจรด้วยลูกบอลทองคำผลที่ได้จากแบบ จำลองทางไฟฟ้าพบว่า การเพิ่มสายตัวนำปกติเปรียบ เสมือนการเพิ่มอินดักแตนซ์ให้กับระบบ ส่งผลให้ไม่ สามารถลดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงได้อย่างที่ คาดหวัง ซึ่งการลดแรงดันไฟฟ้าที่หัวเชื่อมต่อได้ประมาณ 4 % หากเทียบกับการต่อเพิ่มสายดินแบบตัวเก็บประจุ พบว่าสามารถลดแรงดันไฟฟ้าที่หัวเชื่อมต่อได้ถึง 76 % ในอนาคตอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีแนวโน้มที่ จะเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลในเชิงพื้นที่ นั้นหมายความว่าความต้องการระบบที่มีประสิทธิภาพ สูงในกระบวนการผลิตสูงขึ้น ระบบดังกล่าวจึงต้องใช้ งานที่ความถี่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยง ไม่ได้จากสัญญาณรบกวนความถี่สูงในระบบสายดิน จึงควรตระหนักและให้ความสำคัญกับระบบสายดิน ที่ใช้งานในย่านความถี่สูง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วม เฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิส ไดรฟ์ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ใน การสนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท ซีเกด(ประเทศไทย) จำกัด ในการสนับสนุนเครื่องมือทั้งหมดที่ใช้ในการ ทดลองในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- (1) Shiroishi Y, Fukuda K, Tagawa I, Iwasaki H, Takenoiri S, Tanaka H, et al. Future Options for HDD Storage. Magnetics, IEEE Transactions on. 2009;45(10):3816-22.
- (2) Behkam B, Yang Y, Asheghi M. Thermal property measurement of thin aluminum oxide layers for giant magnetoresistive (GMR) head applications. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005;48(10):2023-31.

- (3) Siritaratiwat A. Electrostatic Discharge Effects in Recording Heads. Pathumthani: National Electronics and Computer Technology Center; 2006. p.66-94. Thai.
- (4) Bellmore DG, editor. Controlling ESD in Automated Handling Equipment. 2002 Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, 2002 EOS/ESD '02; 2002 6-10 Oct. 2002.
- (5) Budig PK, editor. The application of linear motors. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference 2000 Proceedings IPEMC 2000; 2000.
- (6) Meng J, Zhang L, Ma W, Zhao Z, Pan Q, editors. Common-mode current inductively coupled emission of AC PWM drives. Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Asia-Pacific Symposium on 2008 APEMC 2008; 2008.
- (7) Takahashi I, Ogata A, Kanazawa H, Hiruma A, editors. Active EMI filter for switching noise of high frequency inverters. Proceedings of the Power Conversion Conference - Nagaoka 1997; 1997.
- (8) Rendusara D, Enjeti P, editors. A method to reduce common mode and differential mode dv/dt at the motor terminals in PWM rectifier/PWM inverter type adjustable speed drive systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition, Thirteenth Annual APEC '98 Conference Proceedings 1998; 1998.
- (9) Schiferl RF, Melfi MJ, Wang JS, editors. Inverter driven induction motor bearing current solutions. Petroleum and Chemical Industry Conference, 2002 Industry Applications Society 49th Annual; 2002.
- (10) Skibinski GL, Kerkman RJ, Schlegel D. EMI emissions of modern PWM AC drives. Industry Applications Magazine, IEEE. 1999;5(6):47-80.
- (11) Yan KP, Gaertner R, editors. An alternative method to verify the quality of equipment grounding. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, 2005 EOS/ESD '05; 2005.
- (12) Yan KP, Gaertner R, Wong CY, Ong CT, editors. Automatic handling equipment-the role of equipment maker on ESD protection. 31st EOS/ESD Symposium; 2009.
- (13) Ott HW. Electromagnetic compatibility engineering. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons; 2009.
- (14) Wadell BC. Transmission Line Design Handbook; Artech House; 1991.p.382-383.
- (15) Amplitude modulation [Internet] 2012 May 31 [updated 2012 Aug 1; cited 2012 May 31]. Available from: <http://www.ee43.com/basicmod/conven1.htm>
- (16) Sen BK, Wheeler RL, editors. Skin effects models for transmission line structures using generic SPICE circuit simulators. Electrical Performance of Electronic Packaging, 1998 IEEE 7th Topical Meeting on; 1998 26-28 Oct 1998.
- (17) Parallel resonance [Internet] 2012 May 31 [updated 2012 Aug 1; cited 2012 May 31]. Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/parres.html>