การตรวจจับด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์
HALL EFFECT SENSORS

ชาญณรงค์ น้อยบางยาง

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

บทนำ

ปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมากว่า 100 ปี แต่ได้นำมาดัดแปลงใช้งานเมื่อ 60 ปีที่ผ่านมา ในการใช้งานภาคปฏิบัติเป็นครั้งแรกมีมาเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1950 เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กของคลื่นไมโครเวฟ และเมื่อเข้าสู่ยุคที่มีการผลิตสารกึ่งตัวนำ ก็ได้มีความเป็นไปได้ที่จะนำปรากฏการณ์ฮอลล์มาใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย โดยบริษัท Honeywell Micro Switch Sensing and Control ได้ปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมการผลิตคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนานใหญ่ในปี ค.ศ. 1968 โดยเปิดตัวโซลิดสเตทคีย์บอร์ดที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ ในช่วงแรกๆ นั้น ชิ้นส่วนในการตรวจวัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องจะถูกประกอบรวมกันเป็นวงจร IC วงจรเดียว ในปัจจุบันอุปกรณ์ปรากฏการณ์ฮอลล์จะรวมอยู่ในอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องเย็บผ้า รถยนต์ เครื่องบิน เครื่องจักรอุตสาหกรรม รวมถึงอุปกรณ์การแพทย์ เป็นต้น

ประวัติของปรากฏการณ์ฮอลล์

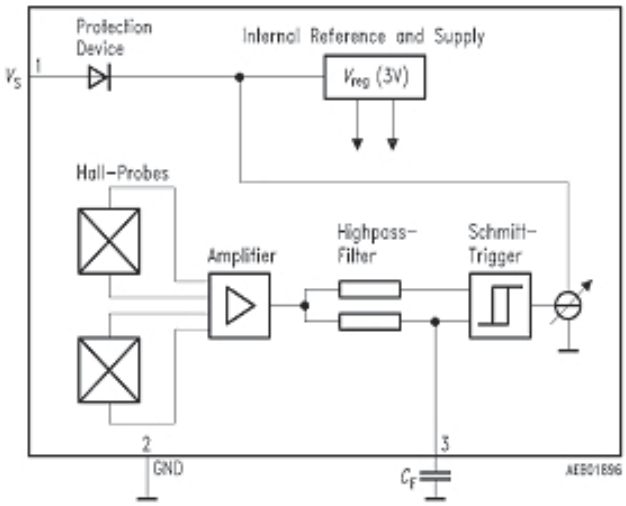
ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบโดย ดร.เอ็ดวิน ฮอลล์ (Dr.Edwin Hall) ในปี ค.ศ. 1879 ขณะที่เขากำลังทำปริญญาเอกอยู่ที่มหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปกิ้นส์ ในบัลติมอร์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ฮอลล์ต้องการที่จะตรวจสอบความเป็นจริงของทฤษฎีการไหลของอิเล็กตรอน ดร.ฮอลล์ค้นพบว่า เมื่อแท่งแม่เหล็กตัวนำถูกวางตรงตำแหน่งที่สนามของตัวมันตั้งฉากอยู่กับหน้าหนึ่งของแผ่นทองคำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้ประจุถูกแรงแม่เหล็กผลักให้เคลื่อนที่ไปอยู่ที่ด้านหนึ่งของตัวนำ ส่วนประจุชนิดตรงกันข้ามจะถูกผลักไปอยู่ด้านตรงข้าม เขาพบว่าความต่างศักย์นี้แปรผันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือการเหนี่ยวนำแม่เหล็กตั้งฉากกับตัวนำ ถึงแม้ว่าการทดลองของฮอลล์นั้นจะประสบความสำเร็จและได้รับการตอบรับเป็นอย่างดีแต่ก็ไม่ได้มีการนำมาใช้ในงานต่างๆ หลังจากที่ค้นพบผ่านมา 70 ปี

เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์

ปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่ใช้ในการตรวจจับนั้นทำจากสารกึ่งตัวนำจำพวก Silicon, Germanium และในปัจจุบันเป็นส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำ จำพวก SiGe, SiC, GaAs, AlGaAs, InP เป็นสารกลุ่มเดียวกันกับที่ใช้ทำ solar cell, led, transistor นอกจากนี้ยังมีการใช้กลุ่มธาตุในตารางธาตุ (In,Mn)As, (Ga,Mn)As หรือเราเรียกว่ากลุ่ม (III,Mn)V โดยมีธาตุ Manganese ร่วมกับธาตุกลุ่ม III และกลุ่ม V

ปรากฏการณ์ฮอลล์ ถูกสร้างจากแผ่นสารกึ่งตัวนำบางๆ โดยที่สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับทิศทางที่กระแสไหลเมื่อถูกสนามแม่เหล็กมากระทำ เป็นผลทำให้เกิดความต่างศักย์ที่เอ้าท์พุท ซึ่งเอาท์พุทที่ได้จะแปรผันกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ค่าความต่างศักย์เอ้าท์พุทจะมีค่าเล็กมาก (μV) จากนั้นจึงมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมที่จะนำเอาสัญญาณนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป และเมื่อชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นประกอบเข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติม ก็จะได้เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect sensor) ขึ้น หัวใจสำคัญของอุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นก็คือ วงจรขยายสัญญาณ ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฮอลล์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ปรับสัญญาณ ในรูปแบบ วงจรรวม (Integrated circuit) ที่เราเรียกว่า ไอซี (IC)

อย่างไรก็ตามเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นเป็นเซนเซอร์แม่เหล็ก ที่สามารถใช้เป็นชิ้นส่วนหลักในอุปกรณ์ตรวจวัดหลายๆ ชนิดเช่น วัดกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน ตำแหน่ง เป็นต้น เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น สามารถนำเข้าไปใช้ในอุปกรณ์การตรวจวัดได้หลายแบบ ซึ่งปริมาณที่จะตรวจวัดนั้นจะต้องเกี่ยวพันกับสนามแม่เหล็ก เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถทำงานได้ดังในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรม และอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ [1]

ในอุปกรณ์ตรวจวัดทั่วๆ ไป เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นจะตรวจจับสนามที่สร้างโดยระบบแม่เหล็ก ระบบแม่เหล็กนั้นจะตอบรับกับปริมาณทางกายภาพที่จะตรวจจับ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ตำแหน่ง ฯลฯ โดยผ่านการเชื่อมต่อสัญญาณทางด้านขาเข้า ส่วนการเชื่อมต่อของสัญญาณทางด้านขาออกนั้นจะแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าจากเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ไปเป็นสัญญาณที่เหมาะสมกับงานนั้นๆ

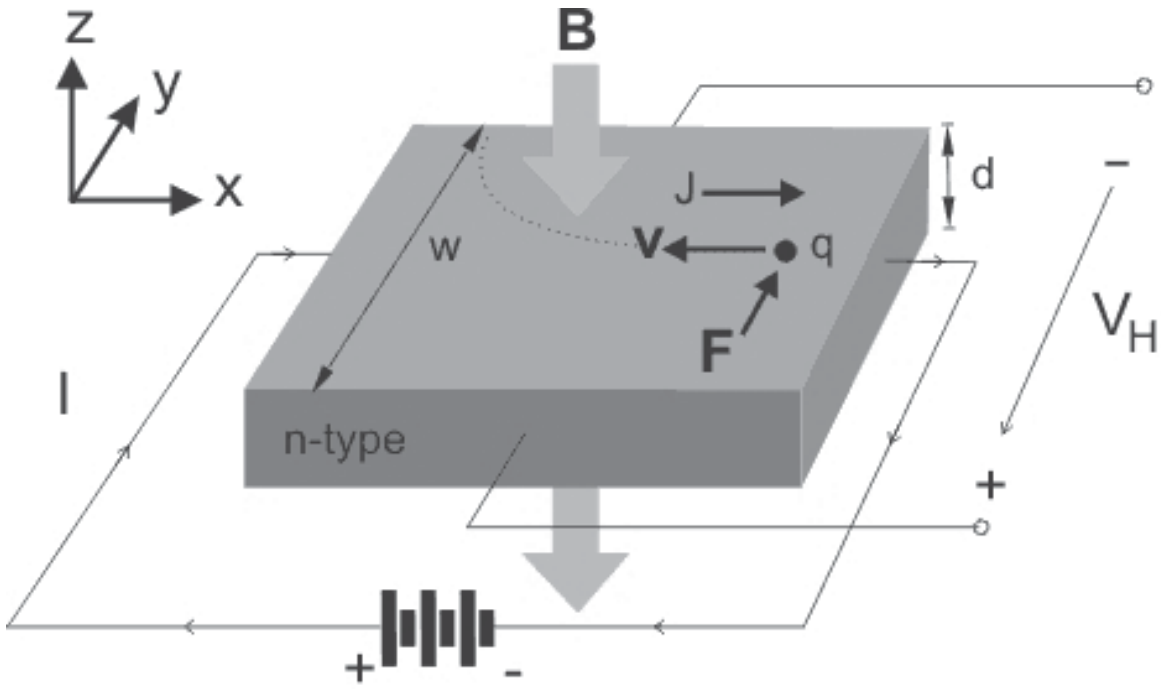
เหตุผลในการที่จะเลือกเทคโนโลยีใดๆ หรือเซนเซอร์ จะขึ้นอยู่กับการนำมาใช้งาน ราคา ประสิทธิภาพ และความเป็นไปได้ จุดเด่นและลักษณะของเทคโนโลยีต่างๆ เป็นข้อสำคัญอย่างยิ่งในการตัดสินใจเลือกนำมาใช้งาน ลักษณะโดยทั่วไปของเซนเซอร์ที่อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์

- เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำแบบโซลิดสเตท กลุ่มซิลิกอน
- มีอายุการใช้งานยาวนาน 30,000 ล้านครั้งในการทดสอบใช้งานต่อเนื่อง
- สามารถทำงานที่ความเร็วสูง ที่ความถี่มากกว่า 100 kHz
- สามารถทำงานที่ระยะของอินพุทคงที่ ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กได้
- สามารถเข้ากันได้กับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุทเพื่อให้เอ้าท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงตาม
- สามารถใช้กับสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ -40 ถึง 150 ˚C ต่างจากนี้จะทำให้มีผลต่อการวัดสนามแม่เหล็ก
- สามารถนำไปใช้งาน งานที่มีลักษณะเหมือนกันได้อย่างเที่ยงตรง

ทฤษฎีของปรากฏการณ์ฮอลล์

เมื่อลวดตัวนำที่มีกระแสไหลวางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นกับลวดในทิศที่ตั้งฉากกับทิศของกระแสและทิศของสนามแม่เหล็ก นี่คือหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์

จากรูปที่เมื่อแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กซึ่งเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะสม่ำเสมอ (Uniform) และไม่มีความต่างศักย์ออกทางเอ้าท์พุท (V_H) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงกระแสตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก [2]

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากขึ้นดังภาพที่ 2 แรงโลเร็นซ์ (Lorentz Force) จะเกิดบนกระแส แรงนี้จะไปรบกวนการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ขาเอ้าท์พุท ความต่างศักย์นี้เรียกว่าความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage, V_H)

ซึ่งผลกระทบของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ 1

$V_H \propto B * I$ (B และ I เป็นปริมาณ vector) ------1

Lorentz Force: $F= q*v*B$ ------2

$V_H = [B*KH*I] / z$ ------3

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก [Wb/m^2 or tesla (T)]

I = กระแสไหลในตัวนำ (A)

F = แรงโลเร็นซ์ (Lorentz Force)

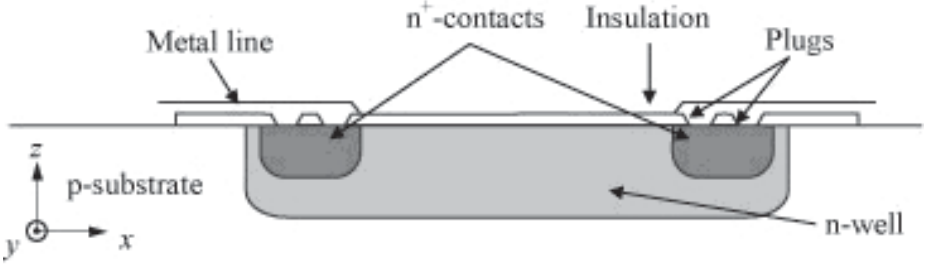
K_H = ค่าคงที่ของ Hall effect (m^3/number of electrons-C)

q = ประจุอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)

v = ความเร็วอิเล็กตรอน (m/s)

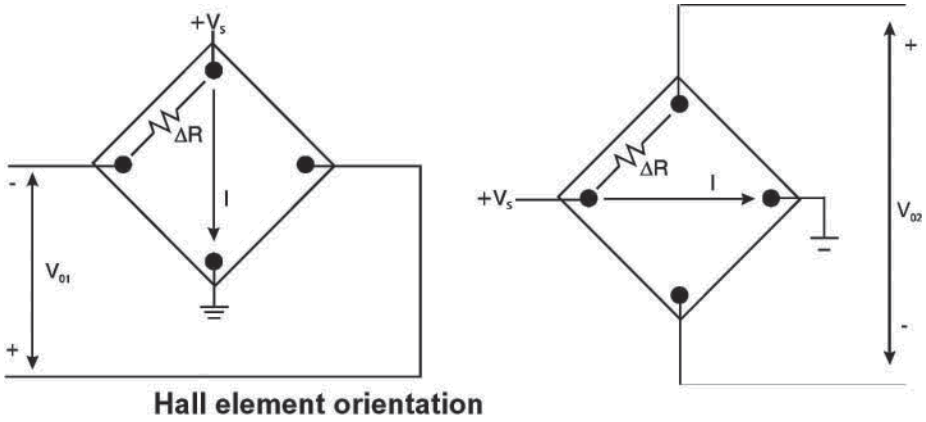
(d)z = ความหนาของแผ่นสารกึ่งตัวนำ (m)

ความต่างศักย์ฮอลล์จะแปรผันโดยตรงกับผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้า ($\vec{I}$) และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ($\vec{B}$) มีค่าประมาณ 7 μV ในซิลิกอนและต้องการการขยายสัญญาณในการใช้งาน ซิลิกอนจะสามารถแสดงปรากฏการณ์ความต้านทานของเพียโซ (Piezoresistance) คือการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางไฟฟ้าที่แปรผันกับความเค้นซึ่งจะเป็นตัวที่ลดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ในเซนเซอร์ การที่จะลดผลกระทบนี้ทำได้โดยจัดการวางตัวของส่วนที่เกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ ในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit) และใช้ชิ้นส่วนที่เกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สองตัวดังภาพที่ 3.1 และ 3.2



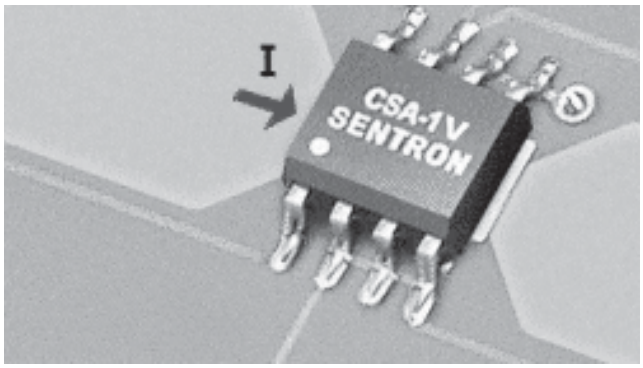
ภาพที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนสองชิ้นที่เกิดความต้านทานของเพียโซ (Piezoresistance) [3]

จากภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ฮอลล์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำกลุ่มซิลิกอน จะเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานของเพียโซภายใน ซึ่งเปลี่ยนจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับค่าของความเค้นทางกล ซึ่งจะมีค่าเพียงเล็กน้อยในอุปกรณ์ฮอลล์ ส่วนที่อยู่ในรูปของวงจรรวม (IC) ดังภาพที่ 4 นั้นจะมีผลทั้งความเค้นและความเครียดอยู่ภายในอุปกรณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถเขียนในรูปของวงจรไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แสดงชิ้นส่วนสองชิ้นจัดวางตัวใกล้ๆ กันใน IC [4]

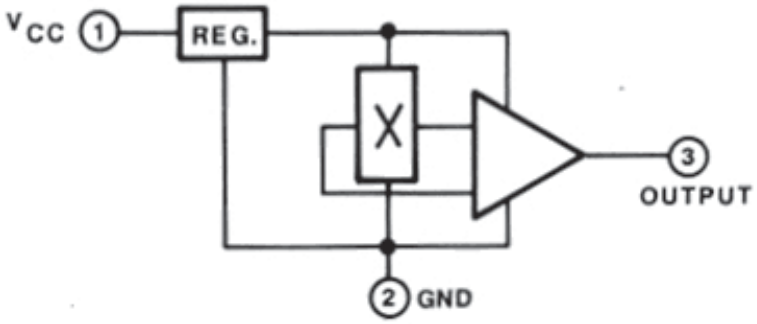
จากภาพที่ 3.2 การวางแบบนี้ก็เพื่อให้ทั้งสองส่วนได้รับความเค้นและเครียด (Stress) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแทนด้วยค่า ΔR ในชิ้นส่วนแรกนั้นถูกกระตุ้นในแนวดิ่งและตัวที่สองถูกกระตุ้นในแนวนอน เมื่อรวมค่า ΔR ของทั้งแนวตั้งและแนวนอน จะทำให้เกิดการหักล้างของสัญญาณที่เกิดจากความเค้นและเครียด



ภาพที่ 4 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์แบบภาชนะวงจรรวม (IC) [6]

พื้นฐานของเซนเซอร์ที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

ส่วนที่เกิดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น พื้นฐานของเซนเซอร์สนามแม่เหล็กจะต้องมีการปรับสัญญาณเพื่อที่จะให้เอ้าท์พุทนำมาใช้งานได้ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการปรับสัญญาณนั้นต้องมีการปรับค่าแรงดัน V_{cc} ก่อนเข้าส่วนกากบาทที่แทนด้วยองค์ประกอบของฮอลล์ (Hall Element) จากนั้นจึงเข้าสู่ส่วนขยายและส่วนชดเชยอุณหภูมิออกที่เอาท์พุท ซึ่งการควบคุมความต่างศักย์นี้จะใช้งานกับเครื่องกำเนิดที่ไม่ได้มีการควบคุมความต่างศักย์ ซึ่งสามารถแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ดังภาพที่ 5



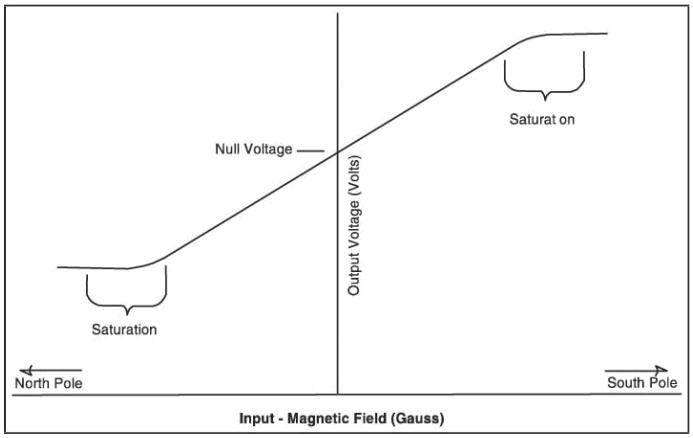
ภาพที่ 5 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ [5]

ถ้าค่าความต่างศักย์ฮอลล์ที่วัดได้ออกมาเป็น 0 (V_H=0) แสดงว่าไม่มีสนามแม่เหล็กดูตามภาพที่ 2 อย่างไรก็ตามถ้าค่าความต่างศักย์เอ้าท์พุทวัดเทียบกับกราวนด์แล้วได้ค่าความต่างศักย์ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เรียกว่า Common Mode Voltage (CMV) ซึ่งจะเหมือนกันทุกๆ ตำแหน่งเอ้าท์พุท ดังนั้น ความต่างศักย์แตกต่างระหว่างจุดเท่ากับศูนย์ ตัวขยายสัญญาณในภาพที่ 5 จะต้องเป็นวงจรขยายแบบผลต่าง (Differential Amplifier) ซึ่งจะขยายสัญญาณเฉพาะความต่างศักย์แตกต่างนั่นคือ ค่าความต่างศักย์ฮอลล์

ค่าความต่างศักย์ฮอลล์เป็นค่าสัญญาณที่มีค่าต่ำขนาดประมาณ 30 mV เมื่อมีสนามแม่เหล็ก 1 เกาส์ ค่าเอ้าท์พุทที่ต่ำๆ นี้ต้องการตัวขยายสัญญาณที่ต้องมีค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ต่ำๆ, อิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงๆ และเกนต่ำ วงจรขยายแบบผลต่างที่มีลักษณะแบบนี้จะถูกเอาไปรวมใน IC ที่มีชิ้นส่วนปรากฏการณ์ฮอลล์อยู่โดยใช้เทคโนโลยีทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์มาตรฐาน

จากที่เห็นได้ในสมการที่ 1 ค่าความต่างศักย์ฮอลล์นั้นเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าไหลเข้า จุดประสงค์ของตัวควบคุม (Regulator) ในภาพที่ 5 ใช้เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ใส่คงที่ ซึ่งจะทำให้เอ้าท์พุทของเซนเซอร์จะมีผลเฉพาะกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

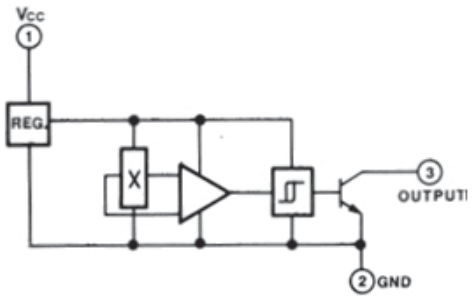
สนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้นั้น เอ้าท์พุทของวงจรขยายจะมีได้ทั้งค่าบวกหรือลบ ดังนั้น ทำให้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แหล่งพลังงานที่มีทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงที่จะต้องใช้แหล่งพลังงานสองตัวเป็นค่าชดเชย (Offset) แบบคงที่หรือไบแอสคงที่ ซึ่งจะนำมาใส่ในวงจรขยายแบบผลต่าง (Differential Amplifier) ค่าไบแอสที่ปรากฏที่เอ้าท์พุทเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กจะเรียกว่า ค่าความต่างศักย์ศูนย์ (Null Voltage) เมื่อสนามแม่เหล็กที่มีค่าเป็นบวกถูกตรวจจับได้ ค่าความต่างศักย์เอ้าท์พุทนั้นจะเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความต่างศักย์ศูนย์ (Null Voltage) ในทางตรงกันข้ามเมื่อสนามแม่เหล็กที่มีค่าเป็นลบค่าเอ้าท์พุทจะมีค่าที่ลดลงอยู่ใต้ค่าความต่างศักย์ศูนย์ (Null Voltage) แต่ยังมีค่าเป็นบวกอยู่ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงค่าความต่างศักย์ศูนย์ (Null Voltage) [4]

ค่าเอ้าท์พุทของวงจรขยายจะไม่สามารถเกินค่ากำหนดที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดพลังงาน ในทางปฏิบัติวงจรขยายจะอิ่มตัวก่อน ก่อนที่จะถึงค่ากำหนดจากแหล่งกำเนิดพลังงาน การอิ่มตัวนี้แสดงในภาพที่ 6 ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง การอิ่มตัวนี้จะเกิดในวงจรขยายไม่ใช่ตัวเซนเซอร์ ดังนั้น ในสนามแม่เหล็กความเข้มสูงๆ จะไม่สร้างความเสียหายใดๆ กับเซนเซอร์ แต่จะทำให้เกิดการอิ่มตัวของวงจรขยาย

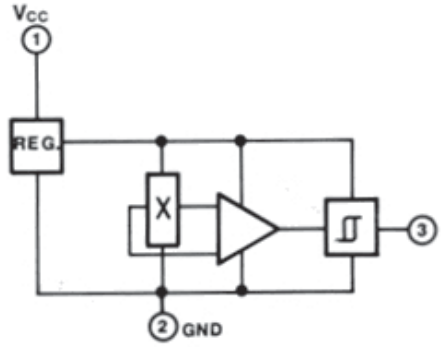
เพื่อที่จะเพิ่มความยืดหยุ่นของการใช้งานของอุปกรณ์จะเพิ่มวงจรขยายฮีสเตอร์ริซิส (Hysteresis Amplifier) และทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์เปิดคอลเลคเตอร์เปิดหรือทรานซิสเตอร์แบบพุชพูล เข้าไปที่เอ้าท์พุทของวงจรขยายแบบผลต่าง (Differential Amplifier) (ส่วนหมายเลข 2 และ 3) เพื่อให้เป็นเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์เอ้าท์พุทอนาลอกมีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์เอ้าท์พุทอนาลอก [5]

เซนเซอร์ที่ให้เอ้าท์พุทแบบดิจิตัล

เซนเซอร์แบบนี้จะให้สัญญาณเอ้าท์พุทแบบ 2 สถานะคือ เปิด (ON) หรือปิด (OFF) ในภาพที่ 5 แสดงเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์แบบพื้นฐาน โดยสามารถแปลงเป็นเซนเซอร์แบบดิจิตัลได้โดยเพิ่มวงจรชมิตซ์ทริกเกอร์เข้าไป (Schmitt trigger circuit) ดังภาพที่ 8



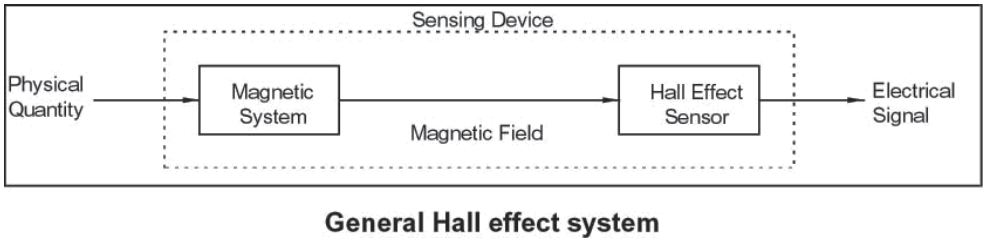
ภาพที่ 8 แสดงเซนเซอร์แบบดิจิตัล [5]

ชมิตซ์ทริกเกอร์จะเปรียบเทียบค่าเอ้าท์พุทของวงจรขยายแบบผลต่าง (Differential Amplifier) โดยกำหนดค่าเปรียบเทียบไว้ เมื่อค่าเอ้าท์พุทของวงจรขยายเกินขอบเขตที่กำหนด ชมิตซ์ทริกเกอร์จะเปิด (ON) โดยตรงกันข้ามเมื่อเอ้าท์พุทของวงจรขยายต่ำกว่าจุดอ้างอิง ชมิตซ์ทริกเกอร์จะปิด (OFF)

ฮิสเทอร์ริซิสจะมีอยู่ในวงจรชมิตซ์ทริกเกอร์ สำหรับการเปิดปิดที่มีระยะเวลาสมมาตรกันฮิสเทอร์ริซิสจะเป็นผลมาจากค่าอ้างอิงที่แตกต่างกันสองค่าที่ขึ้นอยู่กับว่าเซนเซอร์จะถูกเปิด (ON) หรือปิด (OFF)

ระบบแม่เหล็กในเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ [4]

โดยที่เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์จะแปลงสนามแม่เหล็กไปสู่สัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยทั่วไป ปริมาณทางกายภาพ เช่น ระยะห่างของตำแหน่งที่ตรวจจับ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ตรวจจับ และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ใช้งาน จะมีผลต่อการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์ ภาพที่ 9 แสดง Block diagram ของแนวคิดนี้

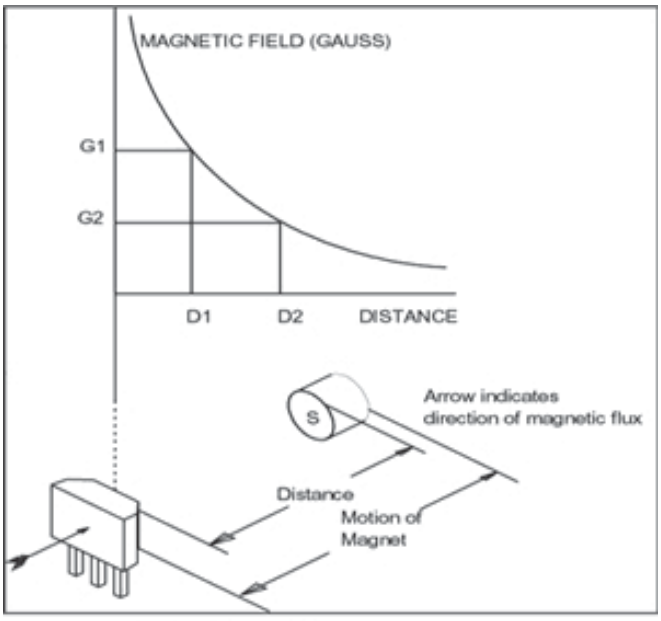


ภาพที่ 9 แสดงแนวคิดการตรวจวัดปริมาณทางกายภาพ

ปริมาณทางกายภาพส่วนใหญ่สามารถวัดได้โดยการเคลื่อนที่แล้วเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ยกตัวอย่างเช่น ทั้งความดันและอุณหภูมิสามารถตรวจวัดได้โดยการยืดและหดตัวของกระเปาะ (Bellow) ที่มีแม่เหล็กติดอยู่

กรณีขั้วเดียวทางหัว (Unipolar head-on)

กรณีขั้วเดียวทางหัว (Unipolar head-on) คำว่า Head-on นั้นหมายถึง การที่แม่เหล็กเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ ในกรณีนี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กจะวิ่งเข้าหาหรือออกจากเซนเซอร์ โดยที่เส้นของฟลักซ์แม่เหล็กจะผ่านเข้าสู่จุดอ้างอิงของเซนเซอร์ แม่เหล็กและเซนเซอร์จะจัดวางโดยที่ขั้วใต้ของแม่เหล็กจะหันหน้าเข้าหาหน้าตรวจจับของเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์



ภาพที่ 10 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์แบบกรณี Unipolar head-on

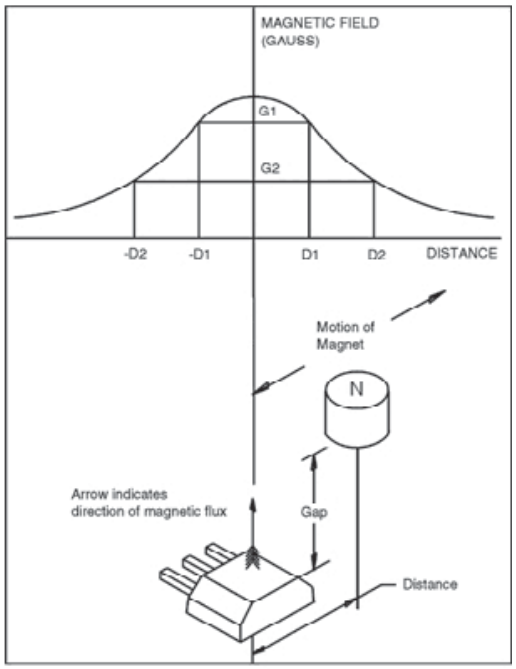
เส้นฟลักซ์จะเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศทางที่แน่นอน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีขั้วเป็นบวก ถ้าทิศทางของมันมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางอ้างอิงของเซนเซอร์ ลูกศรในภาพที่ 10 จะแสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ในรูปนี้เส้นฟลักซ์ในทิศทางที่กำหนดเท่านั้นที่จะถูกตรวจจับได้จึงเรียกกรณีนี้ว่า Unipolar (ขั้วเดียว)

ในกรณี Unipolar head-on จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (GAUSS) กับระยะห่าง (DISTANCE) โดยที่รูปกราฟแสดงในกฎยกกำลังสองผกผัน (Inverse square law) คือ เมื่อระยะห่างของเซนเซอร์กับแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าลดลง

การทำงานของกราฟ เซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Sensor) แบบดิจิตัล ที่ใช้ในการเปิดปิด (On/Off) ในตัวอย่างนี้เซนเซอร์จะทำงาน(On) ที่ระยะจุด G1 และหยุดทำงาน (Off) ที่ระยะจุด G2 เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนเข้าสู่เซนเซอร์เข้าสู่จุด D1 ที่ฟลักซ์แม่เหล็กสูงพอจะทำให้เซนเซอร์ On และเมื่อแนวการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กเข้าสู่จุด D2 ที่ซึ่งสนามแม่เหล็กจะลดลงจะทำให้ Sensor อยู่ที่สภาวะปิด (Off) ดังนั้นในกรณีของ Unipolar head-on ต้องเคลื่อนที่แม่เหล็กกลับไปกลับมา

กรณีขั้วเดียวทางข้าง (Unipolar slide-by)

กรณีขั้วเดียวทางข้าง (Unipolar slide-by) แม่เหล็กจะเคลื่อนที่ในทิศทางแนวระดับ การวัดระยะในกรณีนี้จะวัดอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างจุดศูนย์กลางของหน้าขั้วแม่เหล็กกับจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ดังภาพ โดยคงที่ที่ระยะ GAP ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นระยะที่ให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงที่สุด ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กเทียบกับระยะทางในกราฟนี้จะได้เป็นรูประฆังคว่ำ ดังภาพที่ 11



Unipolar slide-by mode

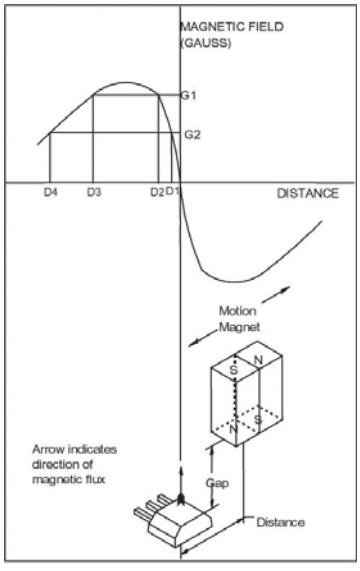
ภาพที่ 11 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์แบบกรณี Unipolar slide-by

การทำงานของกราฟนี้ เซนเซอร์จะมีจุดทำงาน (On) ที่ระยะจุด G1 ทั้งด้านบวกและลบ ส่วนจุดหยุดทำงาน (Off) ที่ระยะจุด G2 ทั้งด้านบวกและลบเช่นกัน เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ที่จุด D1 ที่เซนเซอร์จะทำงานได้เมื่อเคลื่อนที่ต่อไปก็ยังทำงานอยู่จนถึงค่า D2 จะหยุดทำงาน อย่างไรก็ตาม ในทางกลับกันเมื่อเคลื่อนแม่เหล็กกลับด้านเมื่อวิ่งสู่จุด –D1 เซนเซอร์จะทำงานจนกระทั่งแม่เหล็กวิ่งไปสู่จุด -D2 จึงหยุดทำงาน ดังนั้น กรณีนี้จะใช้ในการทำงานเมื่อมีการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องหรือกลับไปมาซ้ายขวา จุดที่เซนเซอร์ทำงานจะขึ้นอยู่กับทิศทางที่แม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาเซนเซอร์

กรณีสองขั้วทางข้าง (Bipolar slide-by)

กรณีสองขั้วทางข้าง (Bipolar slide-by) นั้นมี 3 แบบ ในแบบที่ 1 แสดงดังภาพที่ 12 ประกอบด้วยแม่เหล็กสองอันเคลื่อนที่ในแบบเดียวกันกับกรณี Unipolar slide-by ในกรณีนี้ระยะที่วัดจะวัดอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างจุดศูนย์กลางแม่เหล็กทั้งสองชิ้นกับจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ดังรูป ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะห่างของเซนเซอร์ ในกรณีนี้จะได้กราฟรูปตัว z ที่มีทั้งด้านที่เป็นลบและบวก ดังนั้นจึงเรียกว่า สองขั้ว (Bipolar) ซึ่งครึ่งลบและบวกของกราฟนั้นเป็นผลมาจากลำดับของขั้วแม่เหล็กเหนือใต้ในการเคลื่อนที่ออก-เข้าผ่านจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ แนะนำให้ใช้แม่เหล็กที่มีค่าความซึมซาบที่สูงในงานแบบนี้จะทำให้ค่าที่ได้มีความแน่นอนมากยิ่งขึ้น

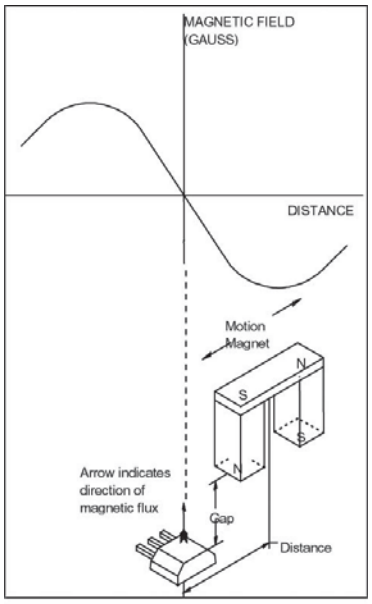
การทำงานของกราฟนี้ จากรูปกราฟเซนเซอร์ของระบบมีค่าจุดทำงาน (ON) และหยุดทำงาน (OFF) อยู่ที่ระยะจุด G1 และ G2 ตามลำดับ เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่จากขวามาซ้าย ที่จุด D1 เซนเซอร์จะยังไม่ทำงาน (Off) ถ้าเคลื่อนที่ต่อไปในทางเดิมเซนเซอร์จะทำงาน (ON) ที่จุด D2 จนกระทั่งถึงจุด D4 จึงจะหยุดทำงาน ดังนั้น เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่จากขวาไปสู่ซ้ายเซนเซอร์จะทำงานในช่วงที่สูงชันของกราฟ (ความชันมาก) และจะหยุดทำงานในช่วง (D4) สำหรับการเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาจะกลับกัน



Bipolar slide-by mode (1)

ภาพที่ 12 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์กรณี Bipolar slide-by แบบที่ 1

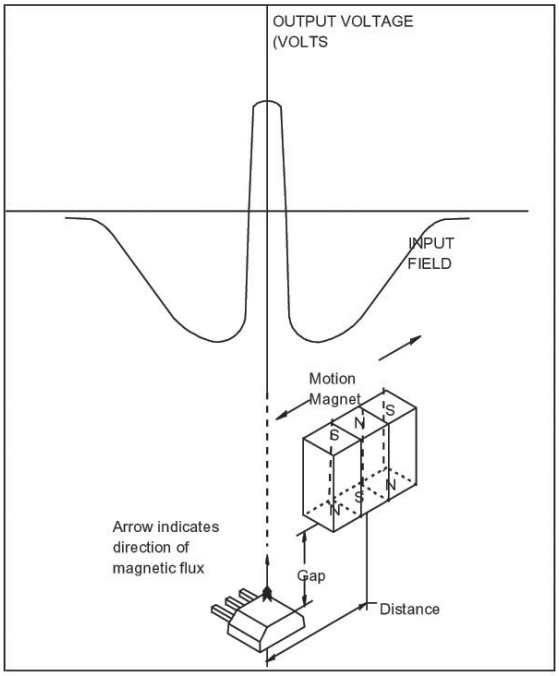
ส่วนกรณี Bipolar slide-by ในแบบที่ 2 แสดงดังภาพที่ 13 การทำงานจะเหมือนกับในแบบที่ 1 เพียงแต่ในแบบนี้แม่เหล็กสองอันจะประกอบห่างกัน ระยะที่วัดจะวัดอ้างอิงความสัมพัทธ์ระหว่างจุดศูนย์กลางช่วงกลางระหว่างแม่เหล็กทั้งสองชิ้นกับจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ดังรูป ซึ่งจะมีผลทำให้ช่วยในการลดความชันของกราฟช่วงกลางลง ทำให้ช่วงในการ On-Off อยู่ในลักษณะที่เท่ากัน



Bipolar slide-by mode (2)

ภาพที่ 13 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์กรณี Bipolar slide-by แบบที่ 2

ส่วนกรณี Bipolar slide-by ในแบบที่ 3 แสดงดังภาพที่ 14 จะแตกต่างกับแบบที่ 1 และ 2 อย่างมาก ระยะที่วัดอ้างอิงจะเหมือนกับแบบที่ 1 เพียงแต่มีแท่งแม่เหล็กประกอบกัน 3 แท่ง ระยะที่วัดจะวัดอ้างอิงความสัมพัทธ์ระหว่างจุดอ้างอิงที่แท่งกลางขั้วใต้กับจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะห่างของเซนเซอร์ ในกรณีนี้จะได้กราฟแบบลูกกลาง (Pulse-shaped) ซึ่งการวางแม่เหล็กแบบนี้จะได้กราฟที่สมมาตรและมีค่าแรงดันเอาท์พุทสูงสุดที่ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด เมื่อใช้เซนเซอร์แบบนี้กระตุ้นให้ทำงานจะเกิดทั้งในการเคลื่อนที่ทางซ้ายและทางขวา ความชันของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ ระยะระหว่างจุดทำงานสองจุดนั้นจะขึ้นอยู่กับความกว้างของแม่เหล็กแท่งกลางเป็นหลัก



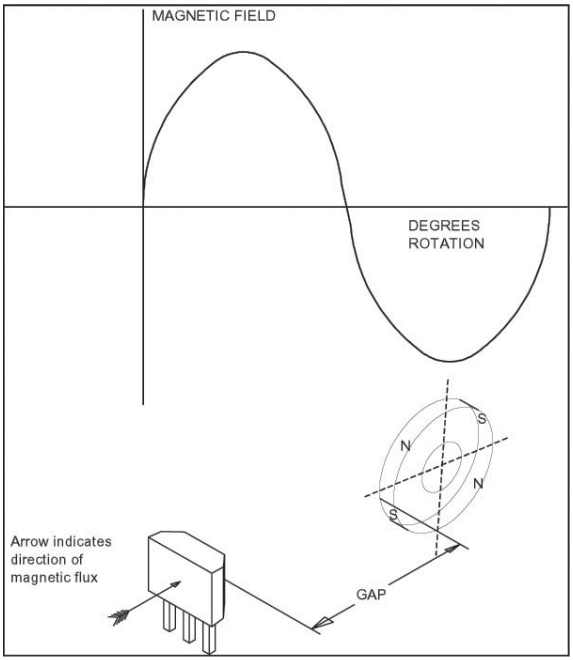
Bipolar slide-by mode (3)

ภาพที่ 14 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์กรณี Bipolar slide-by แบบที่ 3

กรณีสองขั้วด้านข้าง แบบวงแหวน (Bipolar slide-by : Ring magnet)

อีกกรณีหนึ่งของสองขั้วด้านข้าง (Bipolar slide-by) คือ แบบ Ring magnet เป็นการเลือกใช้แม่เหล็กแบบวงแหวนที่มีคู่เหนือใต้ตามวงแบ่งเป็นช่วงๆ ในกรณีนี้การหมุนจะทำให้สัญญาณเกิดเป็นสัญญาณลูกคลื่นไซน์ ดังภาพที่ 15 แม่เหล็กที่ใช้เป็นแบบมีสองคู่ของขั้ว การที่แม่เหล็กแบบวงแหวนจะมีคู่ของขั้วหลายคู่ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยต้องคำนึงว่าถ้ามีจำนวนคู่ของขั้วเยอะจะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์ลดลง เพราะด้วยความยากที่จะทำให้สารแม่เหล็กแบ่งส่วนขั้วได้แน่นอน ซึ่งในทางปฏิบัติกราฟไซน์ที่ได้จะมีน้อยมาก ที่จะเป็นกราฟไซน์จริงๆ

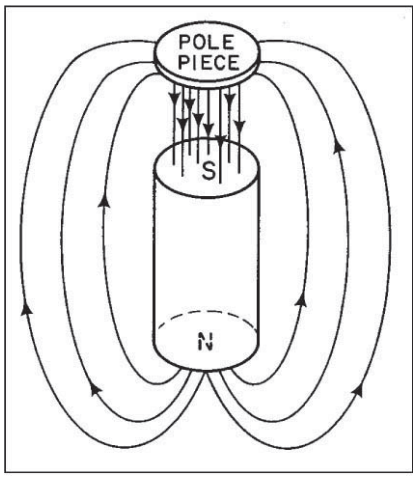
เมื่อแม่เหล็กวงแหวนใช้ร่วมกับเซนเซอร์ฮอลล์ เอ้าท์พุทของสัญญาณพัลส์จะถูกสร้างขึ้นจากคู่ของขั้วแต่ละคู่ ดังนั้นถ้าแม่เหล็กมี 30 คู่ของขั้ว จะทำให้เกิด 30 Pulse ต่อการหมุนหนึ่งรอบ

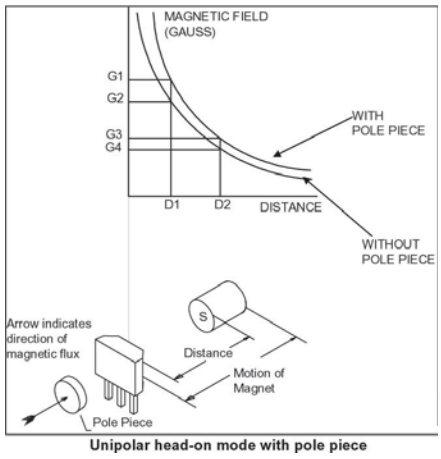


ภาพที่ 15 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์กรณี Bipolar slide-by แบบ Ring magnet

ระบบที่มีชิ้นขั้วแม่เหล็ก (Pole pieces)

การใช้สารแม่เหล็กอ่อนที่เรียกว่า ชิ้นขั้วแม่เหล็ก (Pole pieces) ทำให้เกิดฟลักซ์สม่ำเสมอ (Flux concentrators) กับแม่เหล็กที่เล็กกว่าการใช้แม่เหล็กก้อนใหญ่ๆ ก้อนเดียวดูจะเป็นการที่คุ้มค่ากว่า เมื่อประกอบรวมกับระบบแม่เหล็กจะทำให้เกิดความต้านทานที่ต่ำกับแนวทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้สนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น เมื่อขั้วแม่เหล็กอ่อนวางอยู่บนด้านบนของขั้วแม่เหล็กดังภาพที่ 16 จะทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศระหว่างสองอันมากขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นของฟลักซ์บนผิวของชิ้นขั้วแม่เหล็กลดลง





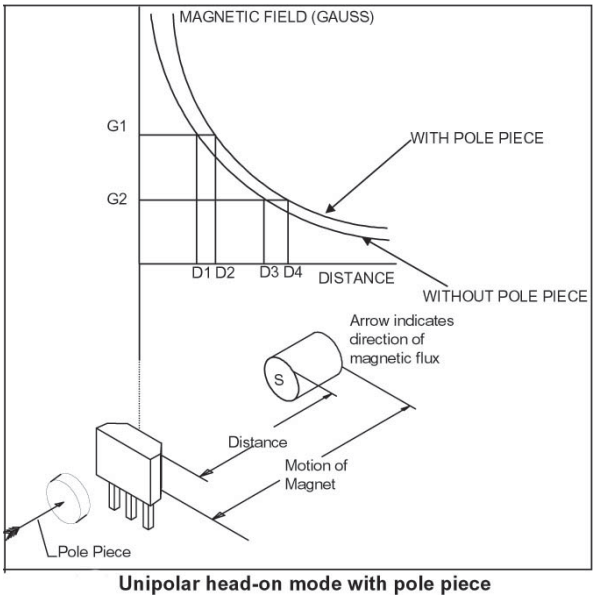
ภาพที่ 16 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์แบบที่มี Pole pieces

เมื่อชิ้นขั้วแม่เหล็กถูกประกอบรวมเข้าไปกับระบบแม่เหล็กที่ใช้งานในกรณี Unipolar head-on การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะเป็นดังภาพที่ 16 ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่ม และจะทำให้มากขึ้นไปอีกเมื่อแม่เหล็กใกล้จุดอ้างอิงของเซนเซอร์ เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเซนเซอร์จะมีข้อได้เปรียบ 3 ประการด้วยกัน คือ สำหรับการกระตุ้น (Actuation) ที่ระยะ D1 ชิ้นขั้วแม่เหล็กจะเพิ่มระดับสนามแม่เหล็ก (ความหนาแน่นฟลักซ์) ทำให้เลือกเซนเซอร์ที่มีความไวน้อยลงได้

ข้อดีข้อที่สองของการใช้ชิ้นขั้วแม่เหล็ก สำหรับเซนเซอร์ที่มีจุดทำงานที่ระยะจุด G1 เมื่อเพิ่มชิ้นขั้วแม่

เหล็กเข้าไป จะสามารถกระตุ้นที่จุดที่ไกลกว่าเดิมคือ D2 ดังภาพที่ 17

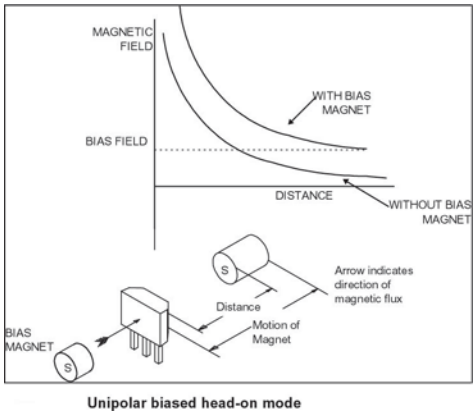
ข้อดีข้อสุดท้ายก็คือ การที่เราสามารถเลือกใช้แม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำลงได้ ในการเพิ่มชิ้นขั้วแม่เหล็ก จะทำให้เกิดความสม่ำเสมอของฟลักซ์แม่เหล็กสู่เซนเซอร์ที่มากขึ้น ดังนั้น ชิ้นขั้วแม่เหล็กจึงทำให้เลือกใช้แม่เหล็กที่มีขนาดเล็กลงได้หรือสามารถเลือกแม่เหล็กที่ทำจากสารอื่นเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการได้ และการเพิ่มชิ้นขั้วแม่เหล็กยังทำให้สร้างเซนเซอร์ที่มีความไวสูงๆ ได้ด้วย



ภาพที่ 17 แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์แบบที่มีชิ้นขั้วแม่เหล็ก กรณี Unipolar head-on

ระบบที่ประกอบด้วยแม่เหล็กไบแอส

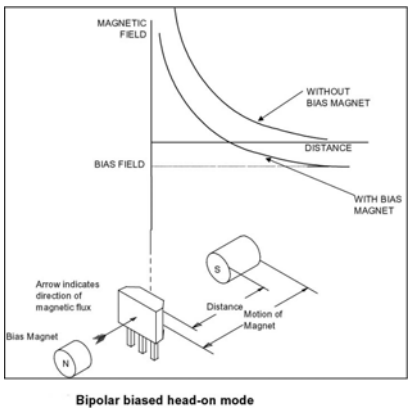
ระบบแม่เหล็กสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเพิ่มแม่เหล็กหยุดนิ่งหรือแม่เหล็กไบแอส ผลกระทบจากแม่เหล็กไบแอส คือ สามารถเพิ่มหรือลดความหนาแน่นของฟลักซ์ที่จุดอ้างอิงของเซนเซอร์ ในภาพที่ 18 แม่เหล็กไบแอสแทรกเข้าไปในกรณี Unipolar head-on แม่เหล็กไบแอสจะวางขั้วของมันดังเช่นขั้วของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ทำให้เกิดการเพิ่มของสนามแม่เหล็กที่จุดอ้างอิงของเซนเซอร์



ภาพที่ 18 แสดงแม่เหล็กไบแอสแทรกในกรณี Unipolar head-on

ส่วนในภาพที่ 19 เป็นการวางแม่เหล็กไบแอสกลับทาง ในการวางแบบนี้สนามไบแอสจะไปหักล้างกับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กเคลื่อนที่ทำให้เกิดเป็นกรณี Bipolar ขึ้น แม่เหล็กไบแอสกลับสามารถใช้ได้ในกรณีอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว ตำแหน่งของแม่เหล็กสามารถปรับแต่งได้ เพื่อทำการปรับละเอียดให้กับกราฟลักษณะสมบัติของแม่เหล็ก นอกจากนี้แม่เหล็กไบแอสสามารถใช้เพื่อปรับจุดสั่งการทำงานของเซนเซอร์ได้ด้วย

ข้อควรระวังในการเลือกใช้แม่เหล็กไบแอส คือ สนามแม่เหล็กที่ตรงกันข้ามสามารถทำให้เกิดการลดอำนาจแม่เหล็กชั่วขณะได้ (Partial demagnetization) จึงควรที่จะเลือกแม่เหล็กที่มีสภาพบังคับสูง (High coercively) เช่น พวกแม่เหล็กถาวร (Permanent earth magnets)



ภาพที่ 19 แสดงการวางแม่เหล็กไบแอสกลับ

เปรียบเทียบระบบแม่เหล็ก

ในภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบหลายกรณีที่กล่าวมาเข้าด้วยกัน

Magnetic systems comparison chart

Mode	Motion Type	Mechanical Complexity	Symmetry	Recommended Applications		
				Digital	Linear	Precision
Unipolar Head-on	Recipro-cating	Low	Not Applicable	Unipolar	No	Medium
Unipolar Slide-by	All*	Low-Medium	Yes	Unipolar	No	Low
Bipolar Slide-by (1)	All*	Low-Medium	No	Any	Yes	Medium
Bipolar Slide-by (2)	All*	Medium	No	Any	Yes	High
Bipolar Slide-by (3)	All*	Low-Medium	Yes	Any	Yes	High Medium
Bipolar Slide-by (Ring)	Rotational	Low	Yes	Any	Yes	Low

*Reciprocating, Continuous and Rotational

ภาพที่ 20 แสดงตารางเปรียบเทียบระบบแม่เหล็ก

Motion type หมายถึง ลักษณะของการเคลื่อนที่ของระบบแม่เหล็กซึ่งประกอบไปด้วย

- Continuous motion คือการเคลื่อนที่แบบไม่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่
- Reciprocating motion คือการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะกลับไปมา
- Rotational motion คือการเคลื่อนที่แบบหมุน

Mechanical complexity หมายถึง ความง่ายที่จะประกอบหรือจัดวางแม่เหล็กให้ได้การเคลื่อนที่ตามที่ต้องการ

Symmetry หมายถึง ความสามารถที่จะเคลื่อนที่แม่เหล็กกลับไปมาผ่านเซนเซอร์ในทิศทางใดก็ได้ เช่น ซ้ายหรือขวา โดยที่ไม่มีปัญหาเรื่องระยะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

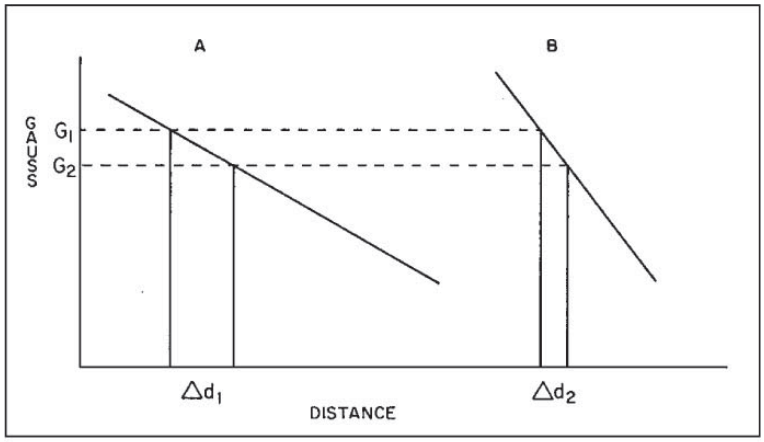
Digital หมายถึง ลักษณะของเซนเซอร์ทั้ง Unipolar หรือ Bipolar ที่เหมาะสมที่จะใช้กับแม่เหล็กที่ทำงานในกรณีนี้

Linear หมายถึง ความใกล้เคียงเส้นตรงของเส้นกราฟระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะห่างจากแม่เหล็ก

Precision หมายถึง ความไวของระบบแม่เหล็กแบบนี้ที่จะสามารถบอกถึงการเปลี่ยนที่ของแม่เหล็ก

ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างลักษณะของกราฟแม่เหล็กกับความเที่ยงตรง (Precision) สามารถบอกได้ โดยยกตัวอย่างกราฟดังภาพที่ 21

สมมุติกราฟความชันดังรูปเป็นส่วนหนึ่งของกราฟแม่เหล็กที่ต่างกัน โดยที่ G1 และ G2 แสดงขอบเขตของระดับการกระตุ้นสำหรับเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เป็นแบบดิจิตัล จากกราฟเส้นตรงที่ความชัน A และ B จะเห็นได้ว่าการที่ให้ช่วงการเคลื่อนที่กว้างนั้นจะทำให้เกิดการกระตุ้นได้ยากกว่าเมื่อกำหนดระดับความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ใช้กระตุ้น ดังนั้นเมื่อกราฟแม่เหล็กมีความชันมากๆ ความแม่นยำก็จะยิ่งมากตามไปด้วย



ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของกราฟแม่เหล็กกับความเที่ยงตรง

จากกราฟลักษณะสมบัติของแม่เหล็กแต่ละชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แม่เหล็กแต่ละชนิดก็จะมีกราฟความชันที่แตกต่างกัน ซึ่งในส่วนที่ชันที่สุดจะเป็นตัวบ่งบอกว่าเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์จะต้องถูกกระตุ้นเพื่อให้ได้ความเที่ยงตรง (Precision) สูง ซึ่งกราฟแม่เหล็กที่มีค่าความเที่ยงตรงสูงนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของระยะทางน้อยๆ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงที่มากๆ ของความหนาแน่นฟลักซ์จะครอบคลุมขอบเขตการทำงานการกระตุ้นการทำงานของอุปกรณ์ ดังนั้นกราฟแม่เหล็กที่มีช่วงความชันสูงๆ ยาวๆ จะบอกได้ว่ามีความเที่ยงตรงสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] Allegro MicroSystems, Inc. **High-Performance Power ICs and Hall-Effect Sensors**. [Online]. Available : http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/1202/index.asp. 2009.

[2] OPTEK Technology Inc. **Ratiometric Linear Hall-effect Sensor.** [Online]. Available : http://www.www.optekinc.com Issue. 2009.

[3] Melexis Microelectronic Systems. **MLX90215 Precision Programmable Linear Hall IC** . [Online]. Available :http://www.melexis.com/Sensor_ICs_Hall_effect/Linear_Hall_ICsMLX90215_12.aspx. 2008.

[4] Honeywell International, Inc. **HALL EFFECT SENSING AND APPLICATION**. [Online]. Available : http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/hallbook.pdf. 2008.

[5] Asahi Kasei Electronic. **Asahi Linear Hall Effect IC Magnetic Sensors**. [Online]. Available : http://www.gmw.com/magnetic_sensors/asahi/linear-hall-effect-ic.html. 2008.

[6] Sentron. **Hall effect current sensor IC.** [Online]. Available: http://www.gmw.com/magnetic_sensors/sentron/csa/CSA-1.html. 2008.