หน่วยที่ 3
เครื่องวัดไฟฟ้ากระแสสลับ

บทนำ

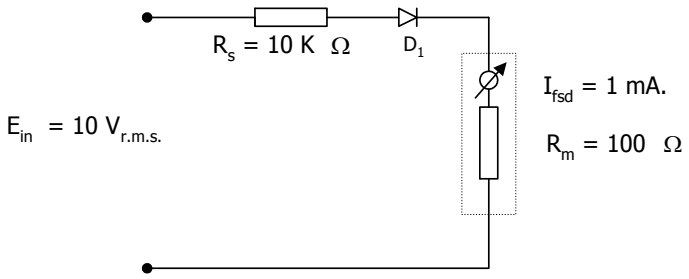
เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ (PMMC) จะใช้วัดกระแสสลับโดยตรงไม่ได้ เนื่องจากขีดจำกัดด้านขนาดพิกัดกำลังและมีความไวสูง (ใช้ปริมาณกระแสต่ำ) และโมเมนต์ความเฉื่อยเป็นสำคัญ หากต้องนำมาใช้วัดเพื่อแสดงค่ากระแสสลับจะต้องเปลี่ยนกระแสสลับเป็นกระแสตรงขนาดที่เหมาะสมก่อนป้อนให้กับระบบขดลวดเคลื่อนที่และทำการปรับเทียบให้แสดงค่าปริมาณกระแสสลับต่อไป เช่น เครื่องวัดแบบเรียงกระแส เครื่องวัดแบบไฟฟ้าความร้อน นอกจากนี้ยังมีเครื่องวัดกระแสสลับ เช่นโวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ที่ใช้หลักการทำงานที่ต่างจากแบบขดลวดเคลื่อนที่ที่สามารถใช้กับไฟกระแสสลับได้อีกหลายแบบ เช่น เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่ แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบเหนี่ยวนำ และแบบไฟฟ้าสถิต เป็นต้น ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้วัดปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับได้ดังจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 โวลต์มิเตอร์แบบเรียงกระแส

เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์มิเตอร์แบบเรียงกระแสจะมีส่วนเคลื่อนที่เป็นแบบขดลวดเคลื่อนที่ที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Moving Coil : PMMC) ซึ่งได้กล่าวแล้วในหน่วยที่ 2 เป็นเครื่องวัดแบบมีขั้วตายตัว และตอบสนองต่อปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่ต่ำ เช่น 0.1 เฮิร์ทซ ผ่านเครื่องวัดแบบ PMMC เข็มของเครื่องวัดจะเบี่ยงเบนตามค่าชั่วขณะที่เพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสสลับ แต่สำหรับกระแสสลับที่มีความถี่สูงกว่านี้ เช่น 50-60 เฮิร์ทซ กลไกหน่วงแรงและโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเคลื่อนที่ของเครื่องวัดทำให้เข็มเคลื่อนที่ไม่ทันการเปลี่ยนแปลงของกระแสสลับ และจะทำให้เข็มของมิเตอร์ชี้บอกค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเคลื่อนที่แทน กรณีที่กระแสสลับเป็นรูปคลื่นหรือฟังก์ชันของไซน์จะได้ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ เข็มชี้ของเครื่องมือวัดแบบนี้จึงชี้ค่าศูนย์ แม้ว่ามีกระแสสลับไหลผ่านขดวดเคลื่อนที่อยู่ก็ตาม ดังนั้นเมื่อต้องการให้เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนสามารถวัดกระแสสลับได้ จำเป็นจะต้องเปลี่ยนไฟกระแสสลับให้เป็นปริมาณที่เครื่องวัดสามารถตอบสนองและแสดงค่าได้ถูกต้องโดยการต่อวงจรเรียงกระแสเข้ากับระบบเคลื่อนที่และปรับเทียบให้อ่านค่ากระแสสลับได้ถูกต้อง

3.1.1 โวลต์มิเตอร์กระแสสลับแบบเรียงกระแส

โวลต์มิเตอร์แบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier Voltmeter)



รูปที่ 3.1 เครื่องมือวัดแบบ D' Arsonval ต่อแบบครึ่งคลื่น

จากรูปที่ 3.1 ความไวของโวลต์มิเตอร์ (DC. Sensitivity) คือ

$$S = \frac{1}{I_{fsd}} = \frac{1}{1mA} = 1k\Omega/V \qquad (3.1)$$

สมมติว่าไดโอดที่ใช้เป็นไดโอดแบบอุดมคติ และระบบเคลื่อนที่ต้องการค่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ย 10 โวลต์ จึงจะทำให้เข็มชี้แสดงค่าเบี่ยงเบนเต็มสเกลต่อวงจรดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นถ้าแทน 10 V_{dc} ด้วยแรงดันรูปไซน์ 10 V_{rms} ด้านขาเข้า แรงดันที่ตกคร่อมมิเตอร์จะเป็นแรงดันครึ่งบวกหรือครึ่งลบของรูปคลื่นเท่านั้นเพราะรูปคลื่นไซน์ผ่านไดโอดเรียงกระแสซึ่งจะยอมให้กระแสไหลผ่านทิศทางเดียว ค่ายอดสูงสุดของคลื่นไซน์ 10 V_{rms}หาได้จากสมการ

$$E_p = 10\ V_{rms} \times \sqrt{2} = 14.14\ V$$

เนื่องจากมิเตอร์แบบ PMMC เป็นมิเตอร์กระแสตรงดังนั้นจะตอบสนองกับค่าเฉลี่ยคลื่นไซน์ของไฟสลับ (เทียบเท่าค่าไฟฟ้ากระแสตรง) ซึ่งมีค่าเป็น 0.318 เท่าของค่าสูงสุด เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$E_{ave} = E_{dc} = \frac{E_p}{\pi} = 0.318\ E_p$$

หรือ

$$E_{ave} = E_{ave} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{rms}}{\pi} = 0.45\ E_{rms} \qquad (3.2)$$

ไดโอดจะทำให้มีแรงดันคร่อมระบบเคลื่อนที่ของมิเตอร์เพียงครึ่งคลื่น จะเห็นว่าถ้าต่อระบบเคลื่อนที่นี้เป็นเครื่องวัดกระแสสลับ จะมีความไวต่ำกว่าเครื่องวัดกระแสตรงประมาณ 45 % ของความไวกระแสตรง เช่น ต้องการให้เข็มเบี่ยงเบนเต็มสเกลโดยใช้แรงดันขาเข้าเป็น 10 V_{rms} ต้องลดค่าความต้านทานจำกัดกระแสลง 45 % ของค่าที่ใช้ในเครื่องวัดกระแสตรงด้วย สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$R_s = \frac{E_{dc}}{I_{dc}} - R_m$$

หรือ $R_s = \frac{0.45E_{rms}}{I_{dc}} - R_m$ (3.3)

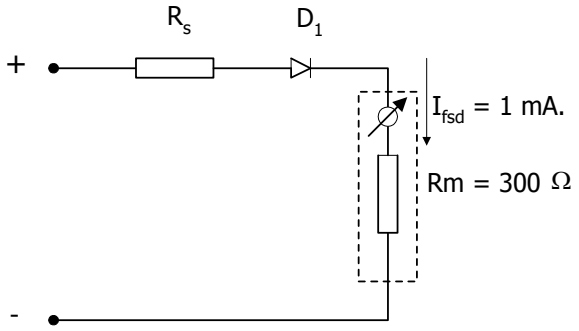
ดังนั้น $S_{ac} = 0.45\ S_{dc}$ (3.4)

ตัวอย่างที่ 3.1 จงหาค่าความต้านทานสำหรับพิสัย $10\ V_{rms}$ จากรูปที่ 3.2 โดยใช้สมการต่อไปนี้

1) $s = \frac{1}{I_{fsd}}$ สมการ (3.1)

2) $S_{ac} = 0.45\ S_{dc}$ สมการ (3.4)

3) $R_s = \frac{0.45\ E_{rms}}{I_{fsd}} - R_m$ สมการ (3.3)



รูปที่ 3.2

วิธีคิด 1) $S = \frac{1}{I_{fsd}}$

$= \frac{1}{1mA.} = 1k\Omega/V$

$\therefore R_s = S_{ac} \times Range - R_m$

$= 1\ K\Omega/V \times 0.45\ E_{rms} - R_m$

$= 1\ K\Omega/V \times 4.5\ V - 300\ \Omega$

$= 4.2\ K\Omega$

2) $S_{ac} = 0.45\ S_{dc}$

$= 0.45 \times \frac{1}{I_{fsd}} = 0.45 \times \frac{1}{1\,mA}$

$= 450\ \Omega/V$

$R_s = S_{ac} \times Range - R_m$

$= 450\ \Omega/V \times 10\ V - 300\ \Omega$

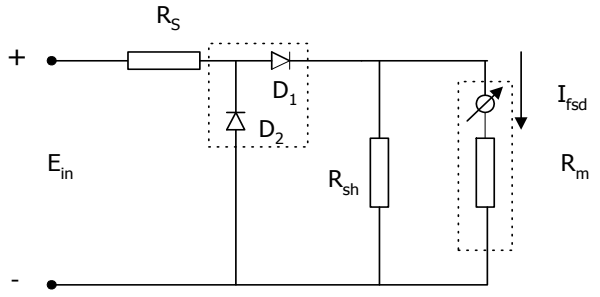
$$= 4.2\ \text{K}\Omega$$

3) $$R_s = \frac{0.45\,E_{rms}}{I_{fsd}} - R_m$$

$$= \frac{0.45 \times 10\ V_{rms}}{1\text{mA.}} - 300\Omega$$

$$= \frac{4.5\ V}{1\text{mA.}} - 300\Omega = 4.5\ \text{k}\Omega$$

ในทางการค้าจะจัดให้ไดโอดอยู่ในชุดเดียวกันเรียกว่า “Instrument Rectifier” ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขณะด้านเข้าเป็นคลื่นครึ่งบวก D_2 จะได้รับไบอัสกลับ และเมื่อคลื่นลบเข้าจะได้รับไบอัสตรงเป็นทางผ่านให้กระแสรั่วไหลของ D_1 แทนที่จะต้องผ่านระบบเคลื่อนที่ของมิเตอร์ และความต้านทานขนาน (Shunt) ซึ่งค่าความต้านทานขนานจะต่อไว้เพื่อให้มิเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้นดีขึ้นที่พิสัยต่ำ ๆ แต่ความไวของมิเตอร์ก็จะลดลงด้วยซึ่งเป็นข้อเสียของการต่อความต้านทานชันท์นี้ ลักษณะการต่อวงจรจะเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3

ตัวอย่างที่ 3.2 จากรูปที่ 3.3 กำหนดให้ D_1,D_2 มีค่าความต้านทานเฉลี่ยขณะได้รับไบอัสตรง 50 โอห์ม และขณะได้รับไบอัสกลับ เป็น ∞ จงคำนวณหา

1) ค่าความต้านทาน R_s
2) ความไวกระแสสลับ
3) ความไวกระแสตรง

เมื่อ $R_{Sh} = 200\ \Omega$, $I_{fsd} = 100\ \mu\text{A.}$ และ $R_m = 200\ \Omega$, $E_{in} = 10\ V_{rms}$

วิธีคิด 1) $$I_{sh} = \frac{I_m R_m}{R_{sh}} = \frac{100\mu\text{A} \times 200\Omega}{200\Omega} = 100\ \mu\text{A}$$

$$I_T = I_{sh} + I_m = 200\ \mu\text{A} + 200\ \mu\text{A} = 200\ \mu\text{A}$$

$$E_{dc} = 0.45\ E_{rms} = 0.45 \times 10\ \text{V} = 4.5\ \text{V}$$

ค.ต.ท. ทั้งหมดของมิเตอร์คือ

$$R_T = R_S + R_d + \frac{R_m R_{Sh}}{R_m + R_{Sh}}$$

$$= \frac{E_{dc}}{I_T} = \frac{4.5V}{200\mu A} = 22.5\ k\Omega$$

ดังนั้น

$$R_s = R_T - R_d - \frac{R_m R_{Sh}}{R_m + R_{Sh}}$$

$$= 22.5\ k\Omega - 50\Omega - \frac{200\Omega \times 200\Omega}{200\Omega + 200\Omega}$$

$$= 22.35\ k\Omega$$

2) ความไวกระแสสลับ

$$S_{ac} = \frac{R_T}{Range} = \frac{22.5k\Omega}{10V} = 2.25\ k\Omega / V$$

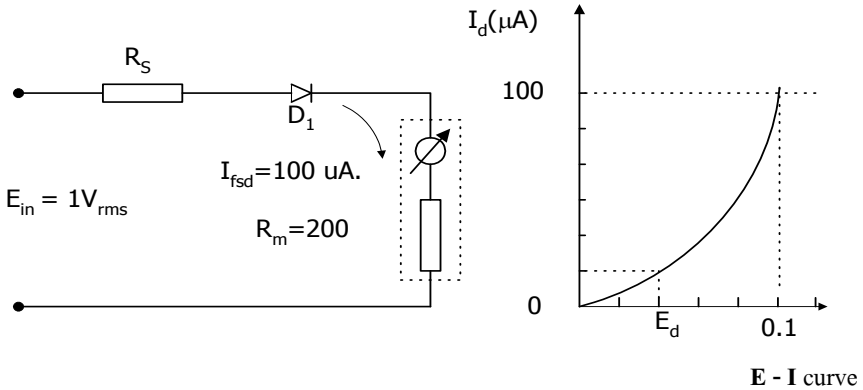
3) ความไวกระแสตรง

$$S_{dc} = \frac{1}{I_T} = \frac{1}{200\mu A} = 5\ k\Omega / V$$

หรือ

$$S_{dc} = \frac{S_{ac}}{0.45} = \frac{22.5k\Omega / V}{0.45} = 5\ k\Omega / V$$

ตัวอย่างที่ 3.3 จากรูปที่ 3.4 ไดโอดมี ค.ต.ท. สถิตย์ 1 kΩ เมื่อกระแสเบี่ยงเบนเต็มสเกล 100 μA. ไหลผ่านตัวมัน จาก E-I Curve จงคำนวณหาค่า R_S โดยคิดค่าความต้านทานของไดโอด และหาค่าความต้านทานไดโอดเมื่อกระแสผ่านตัวมัน 20 μA. พร้อมทั้งค่าแรงดันอินพุตที่ทำให้กระแส 20 μA. ไหลในเครื่องวัด



รูปที่ 3.4

วิธีคิด ค่าความต้านทาน R_s หาได้คือ

$$R_s = \frac{0.45E_{rms}}{I_{dc}} - (R_m + R_d)$$

$$= 4.5\ k\Omega - 1.2\ k\Omega = 3.3\ k\Omega$$

ค่าความต้านทานสถิตที่ 20 μA. คือ

$$R_d = \frac{E_d}{I_d} = \frac{0.04\,V}{20\mu A} = 2\ k\Omega$$

ความต้านทานรวมของวงจรคือ

$$R_T = R_S + R_d + R_m$$

$$= 3.3\ k\Omega + 2\ k\Omega + 200\ \Omega = 5.5\ k\Omega$$

แรงดันไฟตรงที่ทำให้กระแสไหล 20 μA. คือ

$$E_{dc} = I_{dc} \times R_T$$

$$= 20\ \mu A \times 5.5\ k\Omega = 0.11\ V$$

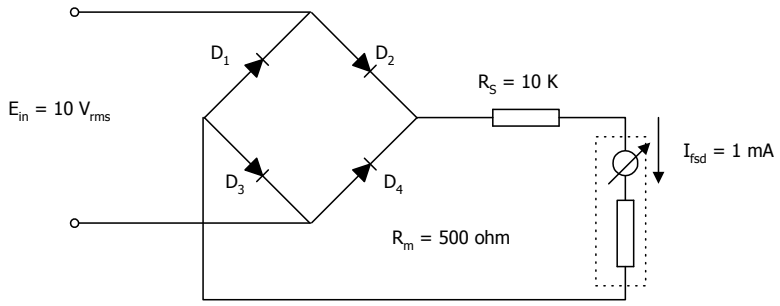
แรงดันด้านเข้าที่ทำให้กระแสไหล 20 μA. คือ

$$E_{in} = \frac{E_{dc}}{0.45} = \frac{0.11V}{0.45} = 0.23\ V_{rms}$$

ถ้าค่าความต้านทาน R_d ไม่เปลี่ยนแปลงจะได้ค่าแรงดัน $E_{in} \approx 0.04 / 0.45 = 0.09$ V ผิดพลาดไป = 22 %

โวลต์มิเตอร์แบบเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full-Wave Rectifier Voltmeter)

เมื่อต่อเครื่องวัดกับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น จะทำให้มีความไวเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบครึ่งคลื่นสองเท่า โดยต่อเป็นวงจรแบบบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นร่วมกับระบบเคลื่อนที่ แบบ D' Arsonval

จากรูปที่ 3.5 ค่าแรงดันยอด (Peak Value) ของ 10 V_{rms} จะคำนวณได้เช่นเดียวกับการต่อแบบครึ่งคลื่นคือ

$$E_p = \sqrt{2}\ E_{rms} = \sqrt{2} \times 10 = 14.14\ V_{peak}$$

ค่าเฉลี่ยหรือ V_{dc} ของรูปคลื่นก็จะมีค่าเป็นสองเท่าของการต่อแบบครึ่งคลื่นดังนี้

$$E_{av} = 2\sqrt{2}\ E_{rms} = \frac{2E_p}{\pi}$$

$$= 0.636 \times 14.14 = 8.99\ V. \approx 9\ V.$$

หรือ $E_{av} = 0.9 \times E_{rms} = 0.9 \times 10\ V = 9\ V.$

$$S_{ac} = 0.9\ S_{dc} \qquad (3.5)$$

จะเห็นว่าแรงดัน 10 V_{rms} มีค่าเทียบเท่ากับแรงดันไฟตรง 9 V เมื่อใช้วงจรแบบเต็มคลื่น ซึ่งจะทำให้เข็มชี้เบี่ยงเบนไปเพียง 90 % ของค่าเต็มสเกล นั่นหมายความว่าเครื่องวัดมีความไว = 90 % ของค่าความไวกระแสตรง ดังนั้นวงจรจะใช้ค่าความต้านทาน R_s = 90 % ของค่า R_s ที่ใช้สำหรับแรงดัน 10 V_{dc} หาค่าได้จากสมการ

$$R_s = S_{ac} \times \text{Range} - R_m \qquad (3.6)$$

ตัวอย่างที่ 3.4 จากรูปที่ 3.5 จงคำนวณหาค่า R_s สำหรับพิสัย 10 V_{rms} ของมิเตอร์

วิธีคิด

$$S_{dc} = \frac{1}{I_{fsd}} = \frac{1}{1mA} = \frac{1k\Omega}{V}$$

$$S_{ac} = 90\ \%\ \text{ของ}\ S_{dc}$$

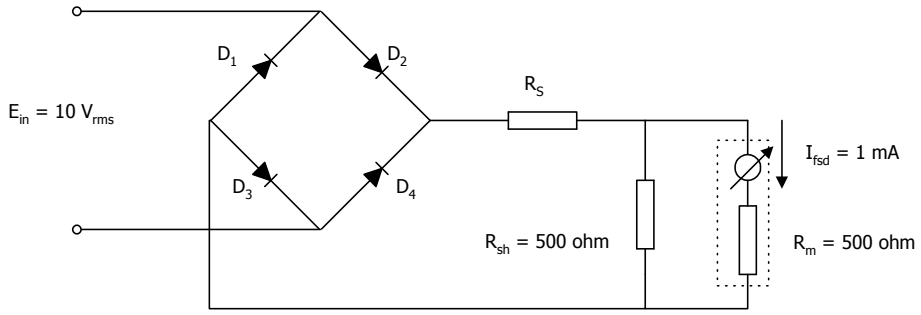
$\therefore$ $S_{ac} = 0.9\ S_{dc} = 0.9 \times 1\ k\Omega / V = 900\ \Omega / V$

$$R_s = S_{ac} \times \text{Range} - R_m$$

$$= 900\ \Omega / V \times 10\ V_{rms} - 500\ \Omega = 8.5\ k\Omega$$

ตัวอย่างที่ 3.5 จากรูปที่ 3.6 เมื่อไดโอดได้รับไบอัสตรง $R_d = 50\ \Omega$ และเมื่อได้รับไบอัสกลับทาง $R_d = \infty$ จงคำนวณหา

1) ความต้านทาน R_s
2) ความไวกระแสสลับ
3) ความไวกระแสตรง



รูปที่ 3.6

วิธีคิด 1) ความต้านทาน R_s

$$I_{sh} = \frac{E_m}{R_{sh}} = \frac{1\text{mA} \times 500\Omega}{500\Omega} = 1\text{ mA}$$

และ $$I_T = I_{sh} + I_m = 1\text{mA} + 1\text{mA} = 2\text{ mA}$$

$$E_{dc} = 0.9 \times 10\ V_{rms} = 9\text{ V}$$

$$R_T = \frac{E_{dc}}{I_T} = \frac{9\text{V}}{2\text{mA}} = 4.5\text{ k}\Omega$$

$$R_s = R_T - 2R_d - \frac{R_m R_{sh}}{R_m + R_{sh}}$$

$$= 4.5\text{ k}\Omega - 2 \times 50\ \Omega - \frac{500\Omega \times 500\Omega}{1000\Omega} = 4.15\text{ k}\Omega$$

2) ความไวไฟฟ้ากระแสสลับ (S_{ac})

$$S_{ac} = \frac{R_T}{\text{Range}} = \frac{4500\Omega}{10\text{V}} = 450\ \Omega/\text{V}$$

3) ความไวไฟฟ้ากระแสตรง (S_{dc})

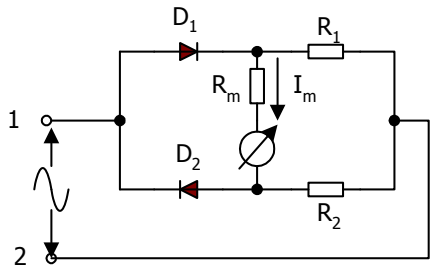
$$S_{dc} = \frac{1}{I_T} = \frac{1}{2\text{mA}} = 500\ \Omega/\text{V}$$

หรือ $$S_{dc} = \frac{S_{ac}}{0.9} = \frac{450\Omega/\text{V}}{0.9} = 500\ \Omega/\text{V}$$

ซึ่งค่าต่าง ๆ จะใช้ได้กับรูปคลื่นไซน์ สำหรับสัญญาณที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม, สามเหลี่ยม หรือ ฟันเลื่อยหากใช้สมการต่าง ๆ เหล่านี้จะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง

โวลต์มิเตอร์ต่อแบบเรียงกระแสครึ่งบริดจ์ (Half–Bridge Full–Wave Rectifier Voltmeter)

โวลต์มิเตอร์กระแสสลับที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งบริดจ์ เนื่องจากใช้ไดโอดเพียงสองตัวและอีกสองตัวที่เหลือจะแทนด้วยความต้านทานจึงเรียกว่าเป็นแบบครึ่งบริดจ์วงจรนี้จะทำให้มิเตอร์มีกระแสผ่านเต็มคลื่นแต่ขณะเดียวกันก็มีกระแสบางส่วนไม่ผ่าน (Bypases) ระบบเคลื่อนที่ของมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7

การทำงาน

การทำงานของวงจรรูปที่ 3.7 อธิบายได้โดยเริ่มจากเมื่อมีคลื่นกระแสสลับครึ่งด้านบวกเข้ามาระหว่างขั้ว 1 และ 2 ไดโอด D_1 จะนำกระแสเนื่องจากได้รับไบอัสตรงและ D_2 จะกั้นไม่ให้กระแสไหลเนื่องจากได้รับไบอัสกลับทาง กระแสจะไหลจากขั้วหมายเลข 1 ผ่านไดโอด D_1 และระบบเคลื่อนที่ R_m จากบนลงล่าง (บวกไปลบ) ผ่านความต้านทาน R_2 ไปยังขั้วหมายเลข 2 ขณะเดียวกันจะเห็นว่าความต้านทาน R_1 ขนานอยู่กับระบบเคลื่อนที่ R_m ที่ต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทาน R_2 สรุปได้ว่ากระแสจำนวนมาก จะไหลผ่านไดโอด D_1 ผ่าน ความต้านทาน R_1 และบางส่วนขนาดไม่เกินพิกัดของระบบเคลื่อนที่ไหลผ่านระบบเคลื่อนที่ R_m และความต้านทาน R_2

เมื่อมีคลื่นกระแสสลับครึ่งด้านลบเข้ามาระหว่างขั้ว 1 และ 2 ไดโอด D_2จะนำกระแสเนื่องจากได้รับไบอัสตรงส่วน D_1 จะกั้นไม่ให้กระแสไหลเนื่องจากได้รับไบอัสกลับทาง กระแสจะไหลจากขั้วหมายเลข 2 ผ่าน R_1 ผ่านระบบเคลื่อนที่ R_m จากบนลงล่าง (บวกไปลบ) ผ่านไดโอด D_2 ไปยังขั้วหมายเลข 1 ขณะเดียวกันจะเห็นว่าความต้านทาน R_2 ขนานอยู่กับระบบเคลื่อนที่ R_m ที่ต่ออนุกรมกับความต้านทาน R_1 ดังนั้นกระแสจำนวนมากจะไหลผ่านความต้านทาน R_2 ผ่านไดโอด D_2 เหลือบางส่วนที่ไม่เกินพิกัดของระบบเคลื่อนที่ผ่าน R_1 และ R_m นั่นเอง

ความต้านทาน R_1 และความต้านทาน R_2 จะเปลี่ยนกันทำหน้าที่เป็น R_{sh} คล้ายกับในรูปที่ 3.6 (ตัวอย่างที่ 3.5) ซึ่งมีข้อดีคือช่วยให้ไดโอดทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้น แต่ก็จะทำให้ความไวของเครื่องมือวัดลดลงด้วยเช่นกัน

3.1.2 ความต้านทานขยายพิสัย

ค่าความต้านทานที่ใช้ขยายย่านการวัดในเครื่องวัดกระแสสลับที่ใช้ระบบเคลื่อนที่แบบ D'Arsonval ร่วมกับวงจรเรียงกระแส**แบบครึ่งคลื่น** จะหาได้จากสมการ (3.3) โดยที่ E_{rms} ในสมการคือย่านหรือพิสัยการวัด ส่วนR_m คือความต้านทานรวมของระบบเคลื่อนที่ D'Arsonval

$$R_s = \frac{E_{dc}}{I_{dc}} - R_m$$

หรือ

$$R_s = \frac{0.45E_{dc}}{I_{dc}} - R_m \qquad (3.3)$$

สำหรับค่าความต้านทานที่ใช้ขยายย่านการวัดในเครื่องวัดกระแสสลับที่ใช้ระบบเคลื่อนที่แบบ D'Arsonval เมื่อใช้ร่วมกับวงจรเรียงกระแส**แบบเต็มคลื่น** จะหาได้จากสมการ (3.5) และ (3.6) โดยที่ Range ในสมการ (3.6) คือ E_{rms} หรือย่านการวัดนั่นเอง

$$S_{ac} = 0.9\, S_{dc} \qquad (3.5)$$

$$R_s = S_{ac} \times \text{Range} - R_m \qquad (3.6)$$

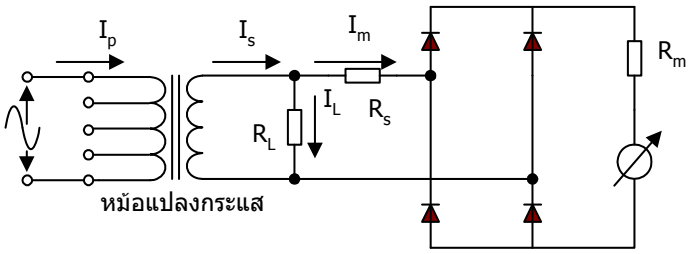
3.2 แอมมิเตอร์แบบเรียงกระแส

แอมมิเตอร์กระแสตรงจะมีค่าความต้านทานต่ำเช่นกัน แอมมิเตอร์กระแสสลับก็ต้องการให้มีความต้านทานค่าต่ำ ๆ ด้วย เพราะการวัดกระแสจะต้องต่ออนุกรมกับวงจรเพื่อให้มีแรงดันตกคร่อมแอมมิเตอร์มีค่าต่ำมาก ๆ โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณไม่เกิน 100 มิลลิโวลต์ ดังนั้นหากใช้วงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดแบบเยอรมันเนียมจะมีแรงดันตกคร่อมไดโอดอย่างน้อย 0.3 โวลต์ และ 0.7 โวลต์ถ้าเป็นซิลิคอนไดโอด เมื่อต่อวงจรเป็นแบบเต็มคลื่นจะมีแรงดันตกคร่อมไดโอด 0.3 ถึง 1.4 โวลต์ จะเห็นว่าแรงดันตกเกินค่าที่ต้องการ (100 มิลลิโวลต์) ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้เครื่องมือวัดแบบเรียงกระแสนี้สำหรับใช้วัดกระแสสลับโดยตรง

การใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) จะทำให้ความต้านทานของแอมมิเตอร์ และแรงดันตกคร่อมที่ขั้วต่อมีค่าต่ำลง หม้อแปลงจะช่วยเพิ่มแรงดันด้านเพื่อให้ได้แรงดันสูงพอที่จะให้วงจรเรียงกระแสทำงานได้ ขณะเดียวกันก็จะลดกระแสจากด้านเข้าให้เป็นกระแสด้านออกที่มีขนาดที่ไม่เกินพิกัดของระบบเคลื่อนที่ของมิเตอร์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบ D'Arsonval หรือ PMMC และสิ่งสำคัญเมื่อใช้หม้อแปลงกระแสในวงจรแอมมิเตอร์คือจะต้องคำนึงถึงอัตราส่วนหม้อแปลง $I_p/I_s = N_s/N_p$ ด้วย

3.2.1 การทำงานและการคำนวณค่าความต้านทานขยายพิสัย

การขยายย่านการวัดทำได้โดยการต่อความต้านทานขนานเข้ากับระบบเคลื่อนที่ที่ต่ออยู่กับวงจรเรียงกระแส โดยต่อความต้านทานค่าเที่ยงตรงสูง R_L ทางด้านออกของหม้อแปลงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แอมมิเตอร์ใช้หม้อแปลงกระแส วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและระบบเคลื่อนที่ PMMC

การเลือกค่าความต้านทาน R_L ใช้วิธีคำนวณเหมือนกับการขยายพิสัยกระแสของแอมมิเตอร์กระแสตรง (หัวข้อ 2.3.2 หน่วยที่ 2) เพื่อใช้เป็นทางผ่านของกระแสส่วนเกินความต้องการ (สูงสุด) ของระบบเคลื่อนที่

ตัวอย่างที่ 3.6 เครื่องมือวัดแบบ PMMC ต้องการกระแส (เฉลี่ย) เต็มสเกลเพียง 100 ไมโครแอมแปร์ หม้อแปลงกระแสมี N_s = 2000 รอบ และ N_p = 5 รอบ ถ้ากระแสด้านขดลวดปฐมภูมิคือ 1 มิลลิแอมแปร์ กระแสใช้งาน (rms) ด้านปฐมภูมิเป็น 100 มิลลิแอมแปร์ จงหากระแสใช้งานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงว่ามีค่าเท่าไร ?

วิธีคิด

$$I_s = \frac{5}{2000} \times 100\text{mA} = 250\ \mu\text{A}$$

หรือ

$$I_{s(avg)} = \frac{1}{1.11} \times 250\mu\text{A} = 225.2\ \mu\text{A}$$

จากตัวอย่างที่ 3.6 ระบบเคลื่อนที่ต้องการกระแสเพียง 100 ไมโครแอมแปร์ เพื่อให้เข็มชี้เบี่ยงเบนเต็มสเกล ส่วนกระแสที่เกินคือ 225.2 – 100 = 125.2 ไมโครแอมแปร์ จะไหลผ่านความต้านทาน R_L ที่ได้จากวิธีการคำนวณ ซึ่งศึกษาได้จากตัวอย่างที่ 3.7 คล้ายกับหัวข้อที่ 2.3.2 ในหน่วยที่ 2

ตัวอย่างที่ 3.7 แอมมิเตอร์แบบเรียงกระแสดังรูปที่ 3.8 เมื่อมีกระแสด้านปฐมภูมิ 250 มิลลิแอมแปร์ จะทำให้เข็มชี้เบี่ยงเบนเต็มสเกล เมื่อระบบเคลื่อนที่ PMMC ใช้ค่ากระแสเต็มสเกล I_{fsd} = 1 มิลลิแอมแปร์ มีค่าความต้านทานภายใน R_m = 1700 โอห์ม ส่วนหม้อแปลงกระแสมีขดลวดทุติยภูมิ 500 รอบ และขดลวดปฐมภูมิ 4 รอบ ไดโอดแต่ละตัวมีแรงดันคัตอิน 0.7 โวลต์ และความต้านทานอนุกรม R_s มีค่า = 20 กิโลโอห์ม จงคำนวณหาค่า R_L ที่ใช้ว่ามีค่ากี่โอห์ม ?

วิธีคิด กระแสมิเตอร์สูงสุด

$$I_m = \frac{I_{(av)}}{0.637} = \frac{1\text{mA}}{0.637}$$

$$= 1.57\ \text{mA}$$

แรงดันสูงสุดด้านทุติยภูมิ

$$V_{sec(p)} = I_m (R_s+R_m)+2 V_d$$
$$= 1.57 \text{ mA}(20 \text{ k}\Omega + 1700 \Omega) + 1.4 \text{ V}$$
$$= 35.5 \text{ V}$$

แรงดันใช้งานด้านทุติยภูมิ

$$V_{sec(rms)} = (0.707 \times 35.5 \text{ V})$$
$$= 25.1 \text{ V}$$

กระแสใช้งานของมิเตอร์

$$I_{m(rms)} = 1.11 I_{m(avg)}$$
$$= 1.11 \times 1 \text{ mA}$$

กระแสใช้งานด้านทุติยภูมิ

$$I_{s(rms)} = I_p \frac{N_p}{N_s}$$
$$= 250 \text{ mA} \times \frac{4}{500}$$
$$= 2 \text{ mA}$$

$$I_L = I_s - I_m$$
$$= 2 \text{ mA} - 1.11 \text{ mA}$$
$$= 0.89 \text{ mA}$$

$$R_L = \frac{V_{sec(rms)}}{I_L}$$
$$= \frac{25.1\text{V}}{0.89\text{mA}}$$
$$= 28.2 \text{ k}\Omega$$

พิสัยของเครื่องวัดสามารถเปลี่ยนได้โดยใช้สวิตช์เลือกเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_L ให้เป็นค่าที่เหมาะสมค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณซึ่งจะทำให้สามารถใช้วัดกระแสในแต่ละพิสัยได้ นอกจากวิธีนี้เรายังสามารถเปลี่ยนพิสัยของการวัดกระแสของเครื่องวัดได้อีกวิธีหนึ่ง คือ ทำการเปลี่ยนตำแหน่งขั้วต่อแยก (Tap) ของขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลงกระแสให้มีจำนวนรอบต่างกัน ดังแสดงขั้วต่อแยกในรูปที่ 3.8

3.3 เครื่องวัดแบบอิเล็กโตรไดนามิค

3.3.1 หลักการทำงานและการใช้งานวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า

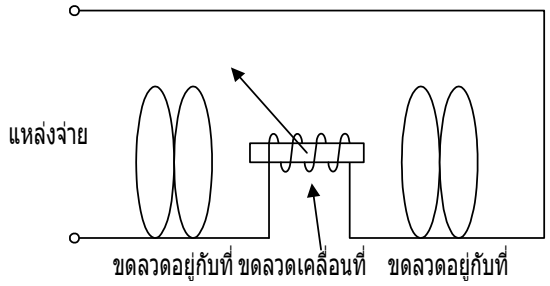
อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์

อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์ประกอบด้วยขดลวดอยู่กับที่ 2 ชุดใช้แทนขั้วแม่เหล็กถาวรในเครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ และมีชุดขดลวดเคลื่อนที่ต่ออนุกรมกันดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อปล่อยให้กระแสผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวดเคลื่อนที่จะเกิดแรงจากแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนเคลื่อนที่ เรานิยมเรียกเครื่องวัดชนิดนี้ว่า **อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์**

เครื่องวัดชนิดนี้ใช้วัดได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับใช้ทำเป็นแอมมิเตอร์มาตรฐานต่าง ๆ เช่น โวลต์มิเตอร์ วาร์มิเตอร์ เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์ มิเตอร์วัดความถี่ และเครื่องมือวัดถ่ายทอด (Transfer Instruments) แต่เนื่องจากมีการใช้กำลังสูง ไม่นิยมใช้เป็นแอมมิเตอร์หรือโวลต์มิเตอร์ ปัจจุบันนิยมเพียงใช้ทำเป็นวัตต์มิเตอร์

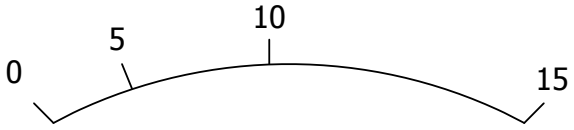
เครื่องวัดถ่ายทอด หมายถึงเครื่องวัดที่ทำการปรับเทียบ (Calibrated) ด้วยปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงแล้วสามารถนำไปใช้วัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยไม่ต้องปรับปรุงแก้ไขแล้ว ซึ่งสามารถนำไปใช้วัดแสดงค่าได้ถูกต้องทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยมีความถูกต้องของการวัดอยู่ในช่วงความถี่ 0 - 125 เฮิร์ทซ

อิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์จะมีชุดขดลวดเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถทนกระแสสูงถึง 100 mA โดยไม่ต้องต่อความต้านทานแบ่งกระแส (Shunt) นั่นคือขนาดตัวนำที่ใช้ก็จะต้องโตพอและจะทำให้มีน้ำหนักมากกว่าระบบเคลื่อนที่ธรรมดาเป็นสาเหตุให้มีความไวต่ำลงด้วย โดยทั่วไปจะมีความไวประมาณ 20 - 100 Ω / V เท่านั้น



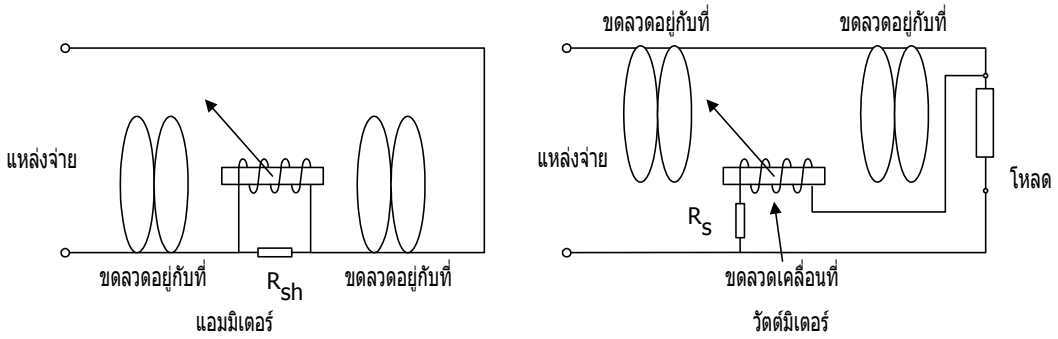
รูปที่ 3.9

สามารถใช้ทำเป็นแอมมิเตอร์หรือโวลต์มิเตอร์ได้โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเข็มชี้จะเบี่ยงเบนตามค่าของกระแสยกกำลังสอง (I^2) ทำให้สเกลของมิเตอร์เตอร์ถูกกำหนดเป็นแบบ Square - Law Meter Scale ดังรูปที่ 3.10



สเกลแบบ Squre - Law meter

รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11

สมการแรงบิด

แรงบิดแม่เหล็กทำให้เข็มบ่ายเบนไปบนสเกลแทนได้ด้วยสมการแรงบิดที่เป็นสัดส่วนกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้งสองชุด

$$T_D(t) \propto \phi_1(t)\,\phi_2(t) \qquad (3.7)$$

เมื่อ $\phi_1(t)$ = เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

$\phi_2(t)$ = เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดเคลื่อนที่

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเป็นสัดส่วนตามกระแสจะได้

$$\phi_1(t) \propto i_1(t)$$

$$\phi_2(t) \propto i_2(t)$$

เมื่อ $i_1(t)$ = กระแสในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

$i_2(t)$ = กระแสในขดลวดเคลื่อนที่

ขดลวดแรงดัน (ส่วนเคลื่อนที่) จะมีความต้านทาน R_p สูงมาก ส่วนกระแสผ่านขดลวดกระแส (ส่วนอยู่กับที่) จะประมาณเท่ากับกระแสที่ผ่านโหลด เขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$i_1(t) = i(t)$$

เมื่อ $i(t)$ = กระแสโหลด

และกระแสผ่านขดลวดแรงดันจะเป็น

$$i_2(t) = \frac{v(t)}{R_p} \tag{3.8}$$

แรงบิดขับ T_D สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$T_D(t) \propto \frac{v(t)i(t)}{R_p}$$

$$\therefore \quad T_D(t) = Kp(t) \tag{3.9}$$

การเคลื่อนที่ของเข็มชี้จะขึ้นกับขนาดของแรงบิดเฉลี่ย ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะขึ้นกับค่าแรงบิดเฉลี่ยตลอดคาบเวลาของคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าที่อ่านได้จะประมาณเท่ากับค่ากำลังเฉลี่ยด้วย เขียนเป็นสมการได้คือ

ค่าที่อ่านได้ = ค่าเฉลี่ยตลอดคาบเวลาของคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ

$$\therefore \quad \text{ค่าที่อ่านได้} = \frac{1}{T}\left[\int_0^T T_D(t)dt\right] = \frac{1}{T}\left[\int_0^T v(t)\cdot i(t)dt\right] \tag{3.10}$$

$$= \frac{1}{T}\left[\int_0^T p(t)dt\right]$$

$$= KP_{(avg)}$$

แรงบิดควบคุมได้จากแรงสปริง ดังนั้นเมื่อแรงบิดเบี่ยงเบนเท่ากับแรงบิดควบคุมจะได้

$$c\theta_m = KP_{(avg)}$$

$$\theta_m = [KP_{(avg)}]/c$$

$$= K_m VI\cos\theta$$

นั่นคือค่าที่อ่านได้เป็นสัดส่วนกับกำลังเฉลี่ย และวัตต์มิเตอร์สามารถปรับเทียบให้แสดงค่าบนสเกลเป็นวัตต์ได้โดยตรง และมีสเกลเป็นแบบเชิงเส้นแสดงได้ดังสมการ

$$\theta_m = K_m VI\cos\theta \tag{3.11}$$

โดย θ_m = มุมของการเบี่ยงเบนของเข็มชี้

K_m = ค่าคงที่ของเครื่องวัด, องศา/วัตต์

V = ค่าแรงดัน RMS ของแหล่งจ่าย

I = ค่ากระแส RMS ของแหล่งจ่าย

$\cos\theta$ = เพาเวอร์แฟคเตอร์

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับกระแสภาระอาจนำหน้า (Lead) หรือล้าหลัง (Lag) แรงดันที่ภาระเป็นมุม θ และวัตต์มิเตอร์จะเบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนกับกระแสส่วนที่เฟสตรงกันกับแรงดัน นั่นคือเป็นสัดส่วนกับ $VI\cos\theta$ เมื่อกำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในภาระได้จากแหล่งจ่ายกระแสสลับคือ $VI\cos\theta$ แสดงว่า วัตต์มิเตอร์แบบอิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์**วัดกำลังไฟฟ้าจริง**

ตัวอย่างที่ 3.8 วัตต์มิเตอร์แบบอิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์มี $K_m = 8^{\circ}$ / W วัดกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟสลับ 110 V_{rms} กระแส 0.05 A เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 จงหาว่าเข็มมิเตอร์จะเบี่ยงเบนไปกี่องศา ?

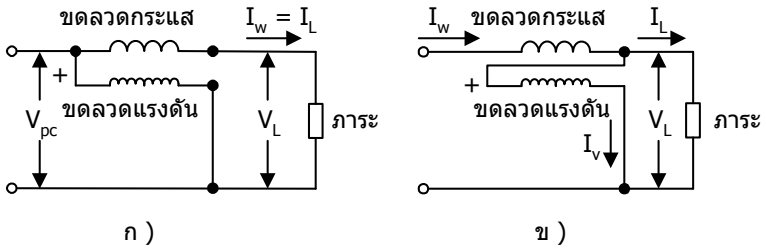
วิธีคิด จาก $\theta_m = K_m VI\cos\theta$

$$= \frac{8^0}{w} \times 110V_{rms} \times 0.05A \times 0.8$$

$$= 35.2^{\circ}$$

มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า[1]

ขดลวดอยู่กับที่จะพันด้วยลวดเส้นโตต่ออนุกรมกับภาระไฟฟ้า เรียกว่า ขดลวดกระแส (Current Coil) ส่วนขดลวดเคลื่อนที่จะพันด้วยลวดเส้นเล็กต่อขนานกับภาระไฟฟ้า เรียกว่าขดลวดแรงดัน (Potential Coil) พิสัยการวัดมาตรฐานของขดลวดกระแส คือ 5 แอมแปร์ หรือ 1 แอมแปร์ ส่วนขดลวดแรงดันจะเป็นไปตามระบบแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน เช่น 110 220 440 และ 550 โวลต์ โดยกำหนดพิสัยการวัดแรงดันไฟฟ้าเป็น 120 240 และ 480 โวลต์ เป็นต้น ทิศทางการเคลื่อนที่ของเข็มชี้จะขึ้นกับทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดทั้งสอง ดังนั้นการต่อขั้วไฟฟ้า ต้องต่อทั้งขดลวดกระแสและขดลวดแรงดันให้ถูกต้อง นอกจากนี้ในการวัดจะต้องระวังเกี่ยวกับวิธีการต่อวงจรการวัดว่าจะใช้แบบกระแสถูกต้อง (Correct ampere) หรือ แบบแรงดันถูกต้อง (Correct Voltage) ดังรูปที่ 3.12 ด้วย



รูปที่ 3.12 วัตต์มิเตอร์แบบอิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์
ก) ต่อแบบกระแสถูกต้อง ข) ต่อแบบแรงดันถูกต้อง

สาเหตุที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาด[2]ในวัตต์มิเตอร์เมื่อต่อวงจรการวัดดังรูปที่ 3.12 ก) ขดลวดแรงดันต่ออยู่กับแหล่งจ่ายและด้านต้นของขดลวดสนามแม่เหล็กดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านขดลวดกระแสจะมีค่าเท่ากับกระแสภาระอย่างเดียว ขณะที่ขดลวดแรงดันขนานอยู่กับแหล่งจ่ายและวัดแรงดันของขดลวดกระแสรวมกับแรงดันของ

---

[1] วิบูล เขมรังสฤษฎ์. **ทฤษฎีเครื่องวัดไฟฟ้าการวัดขนาดทางไฟฟ้า**. 2528. หน้า 224-227.

[2] Bell, David A. **Electronic Instrumentation and Measurements**. 1994. P. 76-80.

เมื่อต่อวงจรการวัดดังรูปที่ 3.12 ข) ส่วนของขดลวดแรงดันต่อขนานกับภาระ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามคือกระแสภาระและกระแสของขดลวดแรงดัน ($I + I_V$) ทำให้วัตต์มิเตอร์แสดงค่าของกำลังไฟฟ้า (VI) และกำลังของขดลวดแรงดัน (VI_V) เมื่อกระแสภาระมีค่ามากกว่า I_V มาก ๆ เราสามารถไม่คิดกำลังส่วนนี้ได้ ในกรณีที่กระแสภาระมีค่าต่ำ ค่าผิดพลาดนี้จะมีผลต่อความถูกต้องของค่าที่แสดงจะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นค่าที่สำคัญอันหนึ่ง

การใช้เป็นเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าต้องระวังไม่ให้ขดลวดแต่ละชุดมีกระแสไฟฟ้าเกินพิกัด ขดลวดกระแสไฟฟ้าพันด้วยลวดเส้นโตสามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าเกินพิกัดได้ถึง 20 % ตลอดเวลาการใช้งานและเกินได้ถึง 1000 % ในระยะเวลาสั้น ๆ โดยไม่เกิดความเสียหาย ส่วนขดลวดแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งพันด้วยลวดเส้นเล็กสามารถใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกินพิกัดถึง 20 % ตลอดเวลาการใช้งาน และเกินได้ 100 % ในช่วงเวลาสั้น ๆ

ตัวอย่างที่ 3.9 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าตัวหนึ่ง พิกัดกระแสไฟฟ้า 1 และ 5 แอมแปร์ พิกัดแรงดัน 120 และ 240 โวลต์ ใช้วัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้แรงดัน 160 โวลต์ มอเตอร์นี้จะต้องขับภาระทางกลสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดเข็มชี้ของเครื่องวัดแสดงที่เต็มสเกลพอดี 120 ส่วน

จงหาค่า 1) กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ไป

2) ขนาดกระแสที่ไหลผ่านขดลวดกระแสของมิเตอร์

วิธีคิด เนื่องจากไม่ทราบค่ากระแสของมอเตอร์จึงต้องเลือกพิสัยแรงดันเป็น 240 โวลต์และขดลวดกระแส 5 แอมแปร์จะได้

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องวัดแสดงได้สูงสุด $P_{max} = VI$

$= (240\ V)(5\ A)$

$= 1200\ VA$ หรือ $1200\ w$

นั่นคือเมื่อคิดที่แรงดัน 240 โวลต์ กระแส 5 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าเต็มสเกล 120 ส่วนจะเท่ากับ 1200 วัตต์ ขณะที่แรงดันตกของมอเตอร์ใช้เพียง 160 โวลต์ จะเห็นได้ชัดว่ากระแสที่ทำให้มอเตอร์แสดงเต็มสเกลจะต้องเกินพิกัดของขดลวดกระแส (เกิน 5 แอมแปร์) หากระแสได้จากสมการ

$$I = \frac{P_{max}}{V}$$

$$= \frac{1200W}{160V} = 7.5 \text{ แอมแปร์}$$

กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในมอเตอร์ 1200 วัตต์ และกระแส 7.5 แอมแปร์

จากตัวอย่างที่ 3.9 เครื่องวัดแสดงกำลังไฟฟ้าไม่เกินสเกล แต่กระแสที่ผ่านขดลวดกระแสมีขนาดเกินพิกัดถึง 2.5 แอมแปร์ (ประมาณ 50 %) เข็มมิเตอร์จึงจะชี้เต็มสเกลซึ่งเกิน 20 % ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงต้องระมัดระวังในเรื่องนี้ด้วย โดยปกติขณะใช้งานจริงจะเพิ่มเครื่องวัดกระแสและเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าเข้าในวงจรการวัด เพื่อจะได้ทราบว่าขดลวดชุดใดของวัตต์มิเตอร์เกิดการใช้งานเกินพิกัด แต่ในกรณีที่ทราบค่าแรงดันของระบบแล้วก็ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดกระแสหรือแรงดันเพิ่มอีกก็ได้

การชดเชยวัตต์มิเตอร์

เราสามารถขจัดค่าผิดพลาดจากการต่อวงจรการวัดกำลังไฟฟ้าได้ โดยผู้ผลิตจะพันขดลวดสนามแม่เหล็กกับขดลวดชดเชยซึ่งเป็นขดลวดเส้นเล็ก ๆ ไปพร้อมกับขดลวดสนาม โดยขดลวดนี้จะต่อให้เป็นส่วนของขดลวดแรงดันซึ่งขดลวดแรงดันจะต่อจากจุดเข้าภาระโดยตรง ดังนั้นกระแสของขดลวดเคลื่อนที่จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันที่ภาระเสมอ ขณะที่กระแสผ่านขดลวดสนามคือ $I_L + I_v$ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดสนามที่เกิดขึ้นจะแปรตาม $I_L + I_v$ แต่เนื่องจากขดลวดชดเชยพันอยู่กับขดลวดสนามมีกระแส I_v ไหลในทิศตรงข้ามซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กในทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามที่เกิดจากกระแส $I_L + I_v$ ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส I_v หักล้างกับสนามแม่เหล็กจาก $I_L + I_v$ ทำให้เหลือสนามแม่เหล็กในขดลวดสนามเป็นผลจาก I_L อย่างเดียวขณะที่แรงดันก็เป็นแรงดันคร่อมภาระอย่างแท้จริง ทำให้วัตต์มิเตอร์แสดงค่ากำลังที่ภาระใช้ไปอย่างแท้จริงด้วย เราสามารถตรวจสอบว่ามีการชดเชยสมบูรณ์หรือไม่โดยการเปิดวงจรทางด้านภาระของวัตต์มิเตอร์ออก หากชดเชยได้สมบูรณ์ค่าที่อ่านได้ควรเป็นศูนย์

3.3.2 การขยายพิสัย

ทำได้โดยการต่อความต้านทานชันท์ ขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ในกรณีของแอมมิเตอร์ และต่อความต้านทานจำกัดกระแสอนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่เมื่อทำเป็นวัตต์มิเตอร์ (รูปที่ 3.11) ส่วนโวลต์มิเตอร์จะขยายพิสัยได้โดยหาค่า R_s มาต่ออนุกรมซึ่งหาค่าได้โดยวิธีคำนวณเหมือนกับการหาค่า R_s ในมิเตอร์ที่ใช้ระบบเคลื่อนที่แบบ D'Arsonval

ตัวอย่างที่ 3.10 ใช้มิเตอร์ขนาด 10 mA.ทำเป็นโวลต์มิเตอร์ 10 V. ถ้า $R_m = 50\,\Omega$ จงคำนวณหาค่าR_s

วิธีคิด

$$S = \frac{1}{I_{fsd}} = \frac{1}{10\text{mA.}} = 100\,\frac{\Omega}{\text{V}}$$

$$R_s = S \times \text{Range} - R_m = 100\,\frac{\Omega}{\text{V}} \times 10\,\text{V} - 50\,\Omega = 950\,\Omega$$

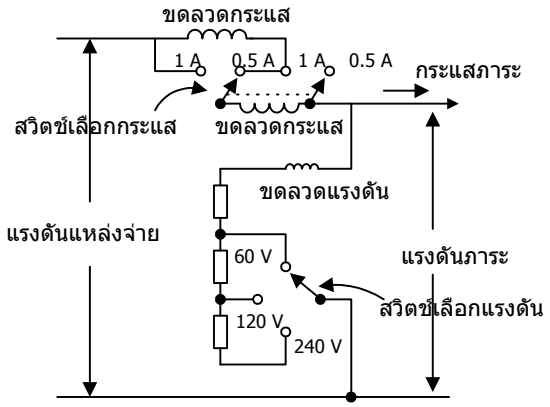
ตัวอย่างที่ 3.11 ระบบเคลื่อนที่แบบอิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์ มีค.ต.ท. $R_m = 40\ \Omega$ ขนาดกระแสเบี่ยงเบนเต็มสเกล 10 มิลลิแอมแปร์ ต้องการขยายพิสัยการวัดเป็นแอมมิเตอร์พิสัย 1 แอมแปร์ จงหาค่า ค.ต.ท. R_{sh} ?

วิธีคิด

$$R_{sh} = \frac{R_m}{n-1} = \frac{40\Omega}{100-1} = \frac{40\Omega}{99} = 0.404\ \Omega$$

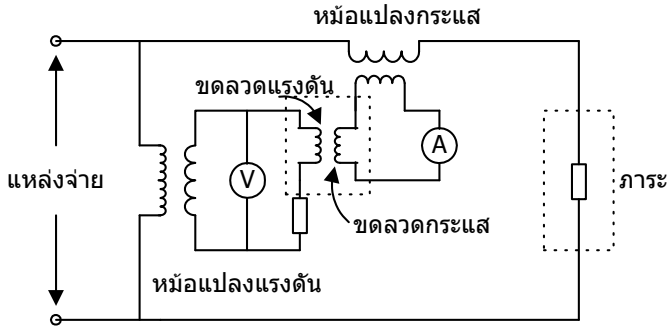
เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายและมีกระแสตรงไหลผ่าน 1 แอมแปร์ เข็มของมิเตอร์จะชี้เต็มสเกล และทำนองเดียวกันเมื่อต่อกับแหล่งจ่ายกระแสสลับ 1 แอมแปร์เข็มจะชี้เต็มสเกลเช่นเดียวกัน

พิสัยของแรงดันของวงจรขดลวดเคลื่อนที่ในวัตต์มิเตอร์สามารถเปลี่ยนได้โดยใช้สวิตช์เลือกค่าความต้านทานจำกัดกระแสค่าต่าง ๆ จากภายในหรือภายนอกวงจรเหมือนกับการขยายย่านการวัดของโวลต์มิเตอร์ สำหรับพิสัยของกระแสสามารถเปลี่ยนได้ง่าย โดยสับสวิตช์เลือกต่อขดลวดสนามสองชุดที่ต่อแบบอนุกรมกันอยู่ให้ต่อกันแบบขนานดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วัตต์มิเตอร์หลายพิสัย

นอกจากนี้สำหรับวัตต์มิเตอร์ที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับยังสามารถขยายพิสัยการวัดโดยใช้หม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน ซึ่งเป็นวิธีการวัดกำลังไฟฟ้าทางอ้อมวิธีหนึ่ง ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของหม้อแปลงที่ใช้โดยการลดขนาดกระแสสูง ๆ ลงให้เหลือค่ากระแสมากสุดเพียง 5 แอมแปร์ เนื่องจากหากให้กระแสค่ามาก ๆ แม้ทำได้ก็ตามจะทำให้มีสนามแม่เหล็กมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กรณีที่แรงดันที่จะวัดเกินพิกัดของมิเตอร์ก็จะใช้หม้อแปลงแรงดันสำหรับลดแรงดันลงมาให้พอดีกับพิกัดแรงดันของวัตต์มิเตอร์ รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะการต่อใช้ร่วมกับหม้อแปลงทั้งสองอย่าง



รูปที่ 3.14 การต่อหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันร่วมกับวัตต์มิเตอร์

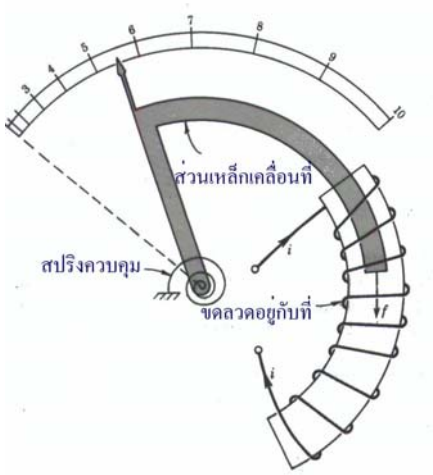
อย่างไรก็ตามหม้อแปลงกระแสไม่สามารถใช้ได้กับวงจรที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอาจต้องใช้วิธีการอื่น ๆ เช่น ใช้ฮอลเอฟเฟคตรวจจับและนำไปขยายและปรับแต่งสัญญาณต่อไป

3.4 เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่

Iron-vane Meter Movement นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานมาก แต่มีความถูกต้องไม่สูงมากนัก นิยมนำไปวัดไฟฟ้ากระแสสลับที่แผงสวิตช์หรือแผงควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในรถยนต์ นอกจากนี้เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่จะมีใช้ในเครื่องมือวัดราคาถูก เช่น ใช้สำหรับวัดการอัดประจุและคายประจุในรถยนต์ สำหรับกรณีใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น สำหรับงานวัดกระแสไฟฟ้าจะยอมให้มีค่าผิดพลาดในช่วง 5 % - 10 % เป็นต้น แบ่งตามผลของแรงที่ใช้ในการขับส่วนเคลื่อนที่เป็น 3 แบบคือ แบบแรงดูด แบบแรงผลัก และแบบแรงดูดแรงผลักร่วมกันดังนี้

เครื่องวัดแบบแรงดูด (Attraction Movement)

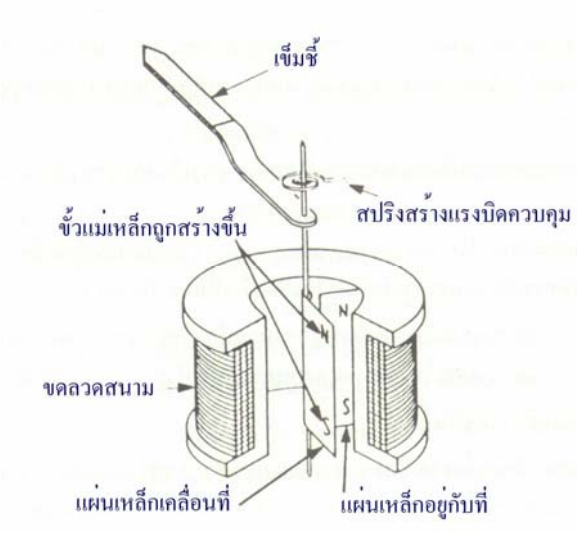
กระแสที่วัดจะผ่านขดลวดอยู่กับที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) และเกิดการเหนี่ยวนำดูดให้ส่วนเคลื่อนที่ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กอ่อน (Soft Iron Plunger) ที่ประกอบเป็นกลไกเชื่อมกับสปริงควบคุม (Control Spring) ดังรูปที่ 3.15 เคลื่อนที่เข้าไปและทำให้เข็มของเครื่องวัดเบี่ยงเบนไปได้ เมื่อเกิดสมดุลของแรงดูดของขดลวดสนามและแรงสปริงเข็มจึงจะหยุดนิ่งชี้แสดงค่าได้



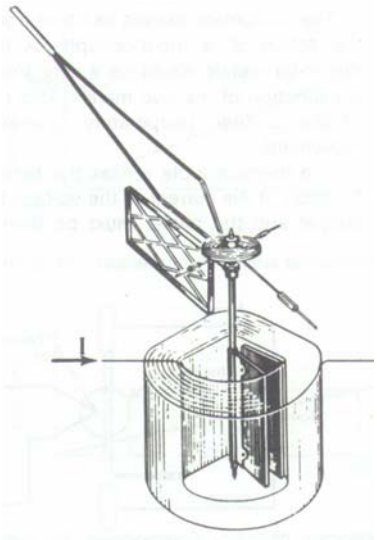
รูปที่ 3.15 เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่ใช้แรงดูด

เครื่องวัดแบบแรงผลัก (Repulsion Movement)

การเบี่ยงเบนของเข็มในเครื่องวัดชนิดนี้เกิดจากแรงผลักของแผ่นเหล็กอ่อน 2 แผ่นซึ่งแผ่นหนึ่งอยู่กับที่ อีกแผ่นเคลื่อนที่และมีขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากขดลวดสนามเหมือนกัน แสดงส่วนประกอบดังรูปที่ 3.16 ทำให้เกิดแรงผลักซึ่งแปรตามค่ากำลังสองของกระแส (I^2) ดังนั้นสเกลมิเตอร์แบบนี้จะเป็นแบบ Square - Law Scale เหมือนกับแบบอิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งขดลวดอยู่กับที่สามารถออกแบบให้ตอบสนองแบบเชิงเส้นได้โดยออกแบบให้มีรูปร่างขดลวดเป็นส่วนของวงกลมดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่ใช้แรงผลัก

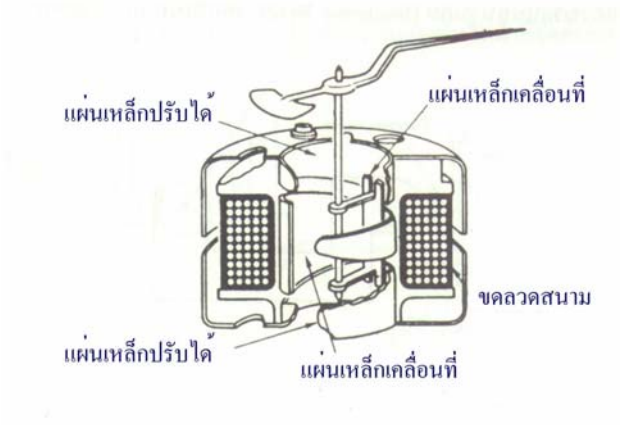


รูปที่ 3.17 ขดลวดสนามเป็นส่วนของวงกลม (Radial-type Iron-vane)

เครื่องวัดแบบแรงดูดและแรงผลักร่วมกัน

เข็มชี้ในเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่แบบแรงดูดหรือแรงผลักจะสามารถเบี่ยงเบนได้ประมาณ 90 องศาเท่านั้น เมื่อต้องการให้เบี่ยงเบนได้มากกว่าจะใช้แบบแรงดูดและแรงผลักร่วมกันซึ่งทำให้สามารถเบี่ยงเบนได้ถึง 250 องศา มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 3.18 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กอ่อน 2 คู่ วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนาม โดยคู่หนึ่งจะออกแบบผลัก และอีกคู่จะออกแรงดูดให้เข็มเบี่ยงเบนไป

เมื่อขดลวดสนามได้รับไฟฟ้ากระแสสลับ การเบี่ยงเบนของเข็มจะอาศัยแรงผลักของแผ่นเหล็กอยู่กับที่กับแผ่นเหล็กเคลื่อนที่ แต่เมื่อเบี่ยงเบนถึงช่วงปลายสเกลแผ่นเหล็กปรับแต่งได้จะดูดแผ่นเหล็กเคลื่อนที่ เพื่อชดเชยแรงผลักในตอนเริ่มต้น ทำให้เข็มชี้เบี่ยงเบนได้มุมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนใช้แรงดูดและแรงผลักร่วมกัน

สมการมุมการเคลื่อนที่ของเข็มชี้และผลของความถี่ไฟฟ้า

เข็มชี้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ด้วยแรงที่เกิดจากแผ่นเหล็กภายในทรงกระบอก เขียนเป็นความสัมพันธ์คือ

$$F \sim B^2$$

เมื่อ F = แรงบิดที่ทำให้เข็มชี้เคลื่อนที่ (N)

B = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบนแผ่นเหล็ก Vs/m^2

ขณะที่แผ่นเหล็กเคลื่อนที่ห่างออกจากแผ่นเหล็กอยู่กับที่ จะทำให้แรงระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองลดลง

$$F_a \sim B^2 K\theta$$

เมื่อ $K\theta$ เป็นสมการมุมของเข็มชี้ เมื่อมุมมากขึ้น ระยะระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองจะมากขึ้นด้วย ทำให้แรงอ่อนลง ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่แผ่นเหล็กทั้งสอง จะขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวดที่อยู่กับที่ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดนั่นคือ

$$B \sim I_m$$

ดังนั้นแรงที่ทำให้เข็มชี้เคลื่อนที่เป็น

$$F_a \sim I_m^2 f'(\theta)$$

หาแรงบิดที่ทำให้เข็มชี้เคลื่อนที่ได้จากแรงคูณระยะ r จากกลางเพลาถึงแผ่นเหล็กเคลื่อนที่

$$T_D \sim I_m^2 f'(\theta)\, r$$

เมื่อเข็มชี้เคลื่อนที่สปริงก้นหอยที่ติดอยู่กับเพลาของเข็มชี้จะถูกบิดไปด้วย ทำให้เกิดแรงบิดควบคุม T_C

$$T_C \sim c\theta$$

เมื่อ θ = มุมของเข็มชี้ที่เบี่ยงเบนไป

c = ค่าคงที่ในการยืดตัวของสปริง

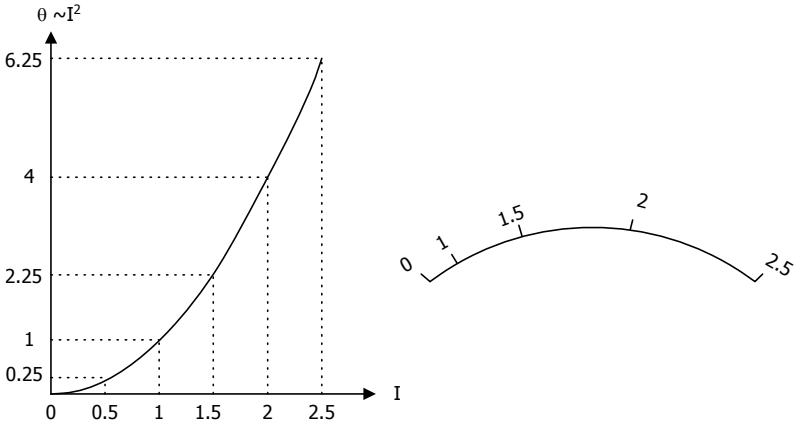
เข็มชี้จะหยุดนิ่งเมื่อแรงบิดขับเท่ากับแรงบิดควบคุม

$$T_C = T_D$$

$$c\theta \sim I_m^2 f'(\theta)\, r$$

$$\theta = \frac{f'(\theta)_r}{c} I_m^2$$

จะเห็นว่ามุมเบี่ยงเบนของเข็มชี้ขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ทำการวัดยกกำลังสอง ดังนั้นสเกลที่หน้าปัทม์ของเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่จะถูกแบ่งไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง เนื่องจาก θ ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ ๆ จะได้มุมน้อยกว่าที่ค่ากระแสสูง ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การแบ่งสเกลบนหน้าปัทม์และลักษณะสเกลเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่

การวัดกระแสไฟฟ้าใช้งาน

เนื่องจากเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่นิยมใช้วัดกระแสซึ่งพิสัยอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 50 แอมแปร์ หากต้องการวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งสูงกว่านี้จะต้องใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าประกอบการวัดด้วย เข็มชี้ของเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่จะแปรตามกระแสไฟฟ้าที่วัดยกกำลังสอง เมื่อเป็นกระแสสลับเข็มชี้จะไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นตามค่าชั่วขณะของกระแสยกกำลังสองได้ เข็มจึงแสดงค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง

$$\theta = \frac{1}{T}\int_0^T i^2(i)dt$$

เมื่อพิจารณาสมการมุมของเข็มชี้ที่กระทำได้ จะเห็นว่าเป็นสมการเดียวกันกับสมการของการหาค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานยกกำลังสอง

$$(I_{eff})^2 = \frac{1}{T}\int_0^T i^2(i)dt$$

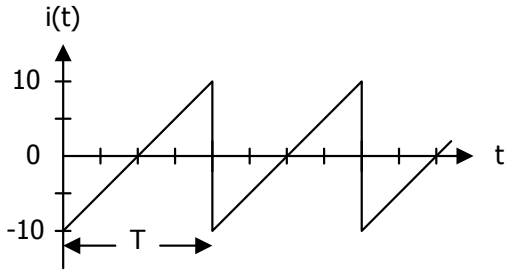
สำหรับคลื่นไซน์ $$(I_{eff})^2 = \frac{I_{max}^2}{2}$$

ดังนั้นเข็มของเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่จะเคลื่อนที่ตามค่าใช้งานของกระแสไฟฟ้าที่ทำการวัดยกกำลังสองนั่นเอง การอ่านค่าบนหน้าปัทม์ของเครื่องวัดตามความต้องการให้อ่านค่าเป็นค่าใช้งาน เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่จึงมีการคาลิเบรทสเกลด้วย $\sqrt{\ }$

กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ $$= \sqrt{I_{eff}^2}$$

$$= I_{eff}$$

ตัวอย่างที่ 3.12 ใช้เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่วัดกระแสไฟฟ้ารูปฟันเลื่อย (Sawtooth Voltage) ตามรูปที่ 3.20 จงหาค่าที่อ่านได้บนหน้าปัทม์ของเครื่องวัดนี้



รูปที่ 3.20 รูปคลื่นฟันเลื่อย

วิธีคิด จากรูปที่ 3.20 เขียนสมการกระแสรูปคลื่นฟันเลื่อยได้คือ

$$i(t) = 5t - 10 \text{ A}$$

เข็มชี้เคลื่อนที่ตามค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง นั่นคือ

$$i^2(t) = (I_{eff})^2 = \frac{1}{T}\int_0^T i^2(i)dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T (5t-10)^2 dt$$

$$= \frac{1}{T}[\frac{25t^3}{3} - \frac{100t^2}{2} + 100t]_0^T$$

$$= [\frac{25T^2}{3} - \frac{100T}{2} + 100]$$

ในเวลา 1 คาบ T ใช้เวลา 4 หน่วย

$$\therefore \quad (I_{eff})^2 = [\frac{25(4)^2}{3} - \frac{100(4)}{2} + 100]$$

$$= 33.3 \text{ A}$$

$$\therefore \quad I_{eff} = \sqrt{33.3}$$

$$= 5.77 \text{ A}$$

ผลของความถี่ไฟฟ้า

เครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่สามารถไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นมีความถี่ต่ำ ๆ จนสูงถึง 1 kHz โดยที่ความถี่ไฟฟ้ามีผลต่อการวัดแรงดันไฟฟ้ามาก เนื่องจากวงจรของเครื่องวัดประกอบด้วยความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำรวมเป็นอิมพีแดนซ์คือ

$$Z_s = R_s + j\omega L$$

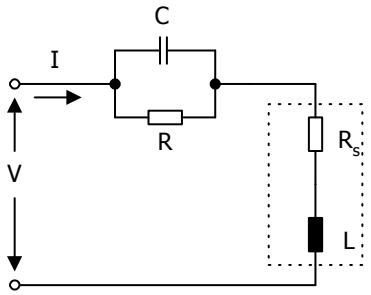
เมื่อ Z_s = ขนาดอิมพีแดนซ์ภายในวงจรเครื่องวัด (โอห์ม)

R_s = ความต้านทานภายในเครื่องวัด (โอห์ม)

ωL = ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดอยู่กับที่ (โอห์ม)

ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดเมื่อใช้วัดแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสที่ไหลเข้าเครื่องวัดขึ้นกับค่าของแรงดันไฟฟ้า และแปรผกผันกับอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้อิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดสูงขึ้นด้วย และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าเครื่องวัดจะต่ำลง ทำให้เข็มชี้ของเครื่องวัดเคลื่อนที่ได้น้อยลงกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับแต่ความถี่ไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่จำเป็นต้องคาลิเบรทสเกลในการใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ต่าง ๆ

เราสามารถทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรไม่ขึ้นกับความถี่ได้ โดยการต่อความต้านทานขนานกับความจุไฟฟ้าแล้วนำไปอนุกรมกับขดลวดของเครื่องวัดดังรูปที่ 3 . 2 1



รูปที่ 3.21 อิมพีแดนซ์ของขดลวดในเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่ไม่ขึ้นกับความถี่ไฟฟ้า

จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรระหว่างขั้วเป็น

$$Z = R_s + j\omega L + \left(\frac{R}{1 + j\omega CR}\right)$$

$$= R_s + \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} + j\omega\left(L - \frac{CR^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}\right)$$

เมื่อให้ $\omega^2 C^2 R^2 << 1$ เราสามารถไม่คิดเทอมของ $\omega^2 C^2 R^2$ ได้สมการเหลือเป็น

$$Z = R_s + R + j\omega (L - CR^2)$$

เมื่อทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของขดลวดมีค่าเท่ากับ CR^2

$$L = CR^2$$

จะเขียนสมการอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียวดังสมการ

$$Z = R_s + R$$

ดังนั้นเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่นี้ค่าความต้านทานจะไม่ขึ้นกับความถี่ไฟฟ้า

ลักษณะพิเศษของเครื่องวัดแบบแผ่นเหล็กเคลื่อนที่

1. ขดลวดมีค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self–inductance : L) เมื่อใช้กับความถี่สูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะสูงขึ้น กระแสจะไหลผ่านได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น เข็มชี้จะแสดงค่าได้ต่ำกว่า หรือผิดไปจากค่าที่เป็นจริง (I = V/Z)

2. ถ้าบริเวณรอบ ๆ เครื่องวัดมีสนามแม่เหล็กอาจมีผลกระทบต่อจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กภายในเครื่องวัดได้

3. เมื่อนำ Iron–vane วัดไฟฟ้ากระแสตรงค่ามากเกินไปจะเกิดความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซีสที่แผ่นเหล็กจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้

การขยายพิสัยการวัดสามารถนำไปใช้เป็นโวลต์มิเตอร์ได้โดยต่อค่า R_S ขยายพิสัยเหมือนกับ D'Arsonval และไวต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าได้ถูกต้องเมื่อใช้งานอยู่ในย่านความถี่ 25 - 125 Hz เท่านั้น

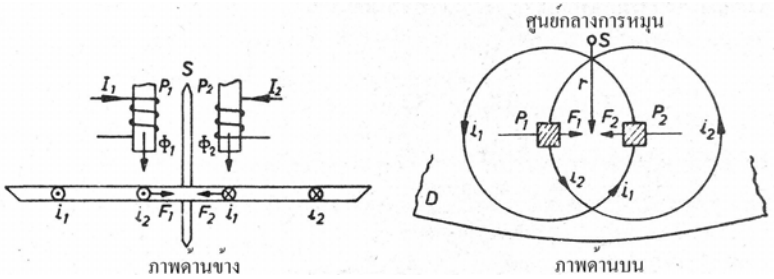
3.5 เครื่องวัดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Induction type Instruments)

เครื่องวัดชนิดเหนี่ยวนำ คือเครื่องวัดที่อาศัยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกริยาระหว่างกระแสไหลวนที่เกิดจากการชักนำของสนามแม่แหล็กที่ได้จากไฟฟ้ากระแสสลับ โดยที่ตัวนำอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดมีกระแสไหลวนในตัวนำ และเมื่อมีกระแสจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นอีกชุดหนึ่งทำกริยากับสนามแม่เหล็กจากกระแสสลับอีกทอดหนึ่ง หากตัวนำดังกล่าวทำเป็นจานอิสระจะเกิดการเคลื่อนที่ไปตามแรงลัพธ์ สามารถใช้เป็นตัวชี้บอกปริมาณไฟฟ้าได้

เครื่องวัดแบบเหนี่ยวนำสามารถทำเป็นเครื่องวัดมุมกว้างได้ง่าย มีแรงบิดมาก ใช้วัดเฉพาะไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น มีใช้ในเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการทำงาน

3.5.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดแบบเหนี่ยวนำ

พิจารณาการทำงานได้จากรูป 3.22



รูปที่ 3.22 แรงบนจานโลหะเกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเครื่องวัดแบบเหนี่ยวนำ