3 ดีซีแอมมิเตอร์
DC AMMETER

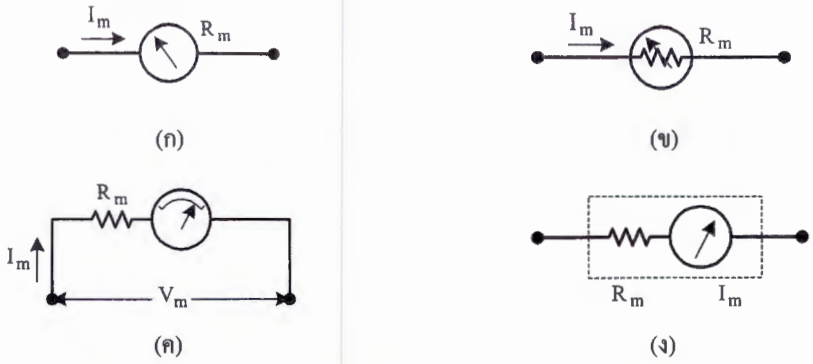
3.1 บทนำ

แอมมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Ammeter) หรือดีซีแอมมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) ดีซีแอมมิเตอร์นั้นจัดเป็นเครื่องมือวัดแบบอะนาลอก (Analog Instrument) หรืออาจจะเรียกว่าเครื่องมือวัดแบบเข็มชี้ (Indicating Instrument) เข็มมิเตอร์จะติดอยู่กับขดลวดเคลื่อนที่แบบดาร์สันวัลโดยจะหมุนไปพร้อมกันเพื่อชี้ค่าบนสเกลของหน้าปัดตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

ดีซีแอมมิเตอร์จะต้องต่อแบบอนุกรม (Series) ในวงจรนั้นๆและต้องให้ขั้วของแอมมิเตอร์เหมือนกันกับศักย์ไฟฟ้าของวงจรหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้านั่นคือให้ต่อขั้วบวกของแอมมิเตอร์กับศักย์ไฟฟ้าบวกและขั้วลบของแอมมิเตอร์กับศักย์ไฟฟ้าลบเสมอ แต่ถ้าต่อแอมมิเตอร์ผิดขั้วแล้วจะทำให้เข็มมิเตอร์ตีกลับอาจเกิดการชำรุดเสียหายได้เช่นบิดงอทำให้อ่านค่าที่วัดได้มีค่าความผิดพลาดมากขึ้น

3.2 วงจรเทียบเท่าของขดลวดเคลื่อนที่ (Equivalent Circuit of Moving Coil)

ขดลวดเคลื่อนที่แบบดาร์สันวัลจะพันด้วยลวดตัวนำขนาดเล็กจึงมีความต้านทานขดลวด (Moving Coil Resistance : R_m) เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าจะมีขีดจำกัดตามกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล (Full Scale Current : I_{fs}) หรือกระแสไฟฟ้าขดลวด (Moving Coil Current : I_m) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เข็มมิเตอร์เบี่ยงเบนเต็มสเกล (Full Scale Deflection : FSD) และมีแรงดันไฟฟ้าขดลวด (Moving Coil Voltage : V_m) ตกคร่อม ดังนั้นจึงเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าของขดลวดเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรเทียบเท่าแบบต่างๆของขดลวดเคลื่อนที่ดาร์สันวัล (PMMC)

จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนวงจรเทียบเท่าของขดลวดเคลื่อนที่ได้หลายลักษณะซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการขยายย่านวัดให้เป็นแอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์

จากวงจรเทียบเท่าของขดลวดเคลื่อนที่เขียนสมการได้ดังนี้

$$I_m = \frac{V_m}{R_m} \qquad \text{.....(3.1)}$$

เมื่อ I_m คือกระแสไฟฟ้าขดลวด...แอมแปร์ (A)

V_m คือแรงดันไฟฟ้าขดลวด...โวลต์ (V)

R_m คือความต้านทานขดลวด...โอห์ม (Ω)

โดยทั่วไปแล้วกระแสไฟฟ้าขดลวดหรือกระแสไฟฟ้าเต็มสเกลจะมีค่าน้อยมากเป็น μA การใช้ขดลวดเคลื่อนที่วัดกระแสไฟฟ้าให้ได้มากกว่านี้จะต้องทำการขยายย่านวัดให้กับขดลวดเคลื่อนที่เพื่อทำเป็นแอมมิเตอร์หลายย่านวัดได้ตามต้องการ

3.3 การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์ (Extension of Ranges of Ammeter)

การขยายย่านวัดของขดลวดเคลื่อนที่ให้เป็นแอมมิเตอร์มี 2 วิธีคือ

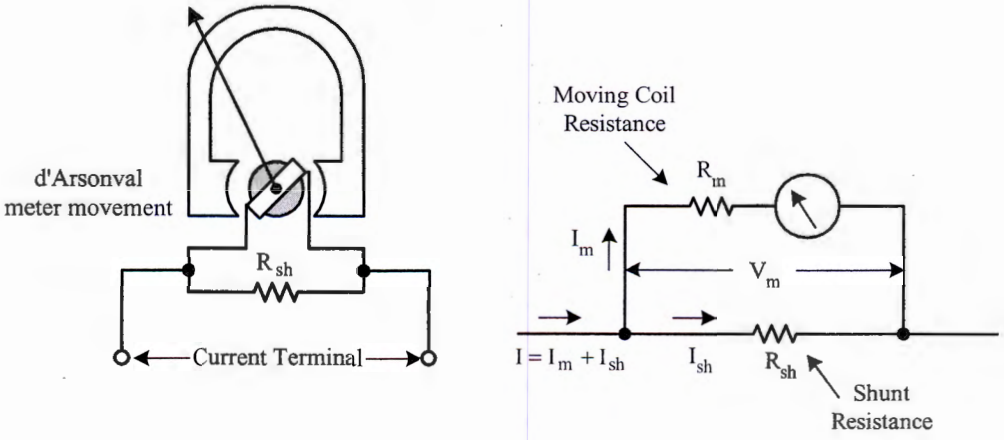
1. การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์แบบตัวต้านทานชันท์ตัวเดียวหรือซิงเกิลชันท์ (Single Shunt Type) หรือแบบอินดิวิดวลชันท์ (Individual Shunt Type)

2. การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์แบบอาร์ตันชันท์ (Ayrton Shunt Type) หรือแบบยูนิเวอร์แซลชันท์ (Universal Shunt Type)

3.3.1 การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์แบบซิงเกิลชันท์

(Single Shunt Type of Ammeter)

การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์แบบมีตัวต้านทานชันท์ตัวเดียวหรือซิงเกิลชันท์นั้นจะใช้หลักการของวงจรขนาน (Parallel Circuit) โดยการนำตัวต้านทานชันท์ (Shunt Resistor : R_{sh}) มาต่อขนานกับขดลวดเคลื่อนที่เพื่อแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าแอมมิเตอร์ไม่ให้เกินกระแสไฟฟ้าเต็มสเกลของขดลวดเรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่ากระแสไฟฟ้าชันท์ (Shunt Current : I_{sh}) และมีกระแสไฟฟ้ารวม (Total Current : I) ไหลเข้าแอมมิเตอร์ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้า I เป็นย่านวัด (Range) ของแอมมิเตอร์



(ก) โครงสร้างของดีซีแอมมิเตอร์ (ข) วงจรดีซีแอมมิเตอร์

รูปที่ 3.2 การขยายย่านวัดของดีซีแอมมิเตอร์โดยการต่อตัวต้านทานชันท์ขนานกับขดลวด

สมการการออกแบบวงจร

จากวงจรขนาน $R_{sh} // R_m$

จะได้ $V_{sh} = V_m$

$$I_{sh}R_{sh} = I_mR_m$$

$$R_{sh} = \frac{I_mR_m}{I_{sh}} \qquad \text{.....(3.2)}$$

$$I_{sh} = I - I_m \qquad \text{.....(3.3)}$$

แทนสมการ (3.3) : $I_{sh} = I - I_m$ ในสมการ (3.2) จะได้

$$R_{sh} = \frac{I_m R_m}{I - I_m} \qquad \text{.....(3.4)}$$

เมื่อ R_{sh} คือตัวต้านทานชันท์...โอห์ม (Ω)

R_m คือความต้านทานขดลวดเคลื่อนที่...โอห์ม (Ω)

I_m คือกระแสไฟฟ้าขดลวด...แอมแปร์ (A)

I คือกระแสไฟฟ้าย่านวัด (Range)...แอมแปร์ (A)

I_{sh} คือกระแสไฟฟ้าชันท์...แอมแปร์ (A)

V_m คือแรงดันไฟฟ้าขดลวด...โวลต์ (V)

V_{sh} คือแรงดันไฟฟ้าชันท์...โวลต์ (V)

ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานชันท์อีกวิธีหนึ่งโดยการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าย่านวัดมีค่าเป็น n เท่าของกระแสไฟฟ้าขดลวด ดังนั้นจะได้ $I = nI_m$ และโดยให้ n เป็นแฟกเตอร์ตัวคูณ (Multiplier Factor)

แทนค่า $I = nI_m$ ในสมการ (3.4)

$$R_{sh} = \frac{I_m R_m}{nI_m - I_m} = \frac{I_m R_m}{I_m (n-1)}$$

$$R_{sh} = \frac{R_m}{n-1} \qquad \text{.....(3.5)}$$

$$n = \frac{I}{I_m} \qquad \text{.....(3.6)}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 ขดลวดเคลื่อนที่ตัวหนึ่งมีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล 100μA ความต้านทานภายใน 800Ω ต้องการทำเป็นแอมมิเตอร์ขนาด 100mA จงคำนวณหาค่าตัวต้านทานชันท์

วิธีทำ

$$R_{sh} = \frac{I_m R_m}{I - I_m}$$

$$R_{sh} = \frac{(100\times10^{-6}\,A)\times800\Omega}{(100\times10^{-3}\,A)-(100\times10^{-6}\,A)}$$

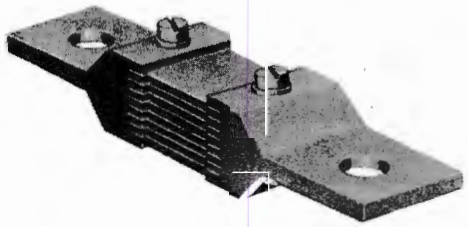
$$R_{sh} = 0.80\Omega \text{ ..... \#}$$

กรณีใช้วิธีแฟกเตอร์ตัวคูณ n

$$n = \frac{I}{I_m} = \frac{100\times10^{-3}A}{100\times10^{-6}A} = 1000$$

$$R_{sh} = \frac{R_m}{n-1} = \frac{800\Omega}{1000-1} = 0.80\Omega \text{ .....\#}$$

ตัวต้านทานชันท์นั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient) ต่ำมากเช่นทำด้วยทองแดงหรือแมงกานิน (Copper : Cu or Manganin : Mn) ในรูปที่ 3.3 เป็นตัวต้านทานชันท์ภายนอก (External Shunt) ต่อกับขดลวดเคลื่อนที่โดยมีความต้านทานต่ำมากใช้กับกระแสไฟฟ้าสูงถึง 8,000 แอมแปร์ซึ่งจะใช้ในแผงสวิตช์บอร์ด (Switchboard)



รูปที่ 3.3 ตัวต้านทานชันท์กระแสไฟฟ้าสูงที่ใช้กับเครื่องมือวัดในแผงสวิตช์บอร์ด

ตัวอย่างที่ 3.2 แอมมิเตอร์เครื่องหนึ่งขดลวดเคลื่อนที่มีความต้านทานภายใน 99Ω กระแสไฟฟ้าเต็มสเกล 0.1mA ต่อขนานกับตัวต้านทานชันท์ 1Ω จงคำนวณหากระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลเข้าแอมมิเตอร์ ก) FSD ข) 0.5FSD ค) 0.25FSD

วิธีทำ

ก) ที่ FSD หากระแสไฟฟ้ารวม I

$$V_m = I_m R_m = 0.1mA \times 99\Omega = 9.9mV$$

$$I_{sh} R_{sh} = V_m$$

$$I_{sh} = \frac{V_m}{R_{sh}} = \frac{99mV}{1\Omega} = 9.9mA$$

$$I = I_{sh} + I_m = 9.9mA + 0.1mA = 10mA \text{ .....\#}$$

ข) ที่ 0.5FSD หากระแสไฟฟ้ารวม I

$$I_m = 0.5 \times 0.1mA = 0.05mA$$

$$V_m = I_m R_m = 0.05mA \times 99\Omega = 4.95mV$$

$$I_{sh} = \frac{V_m}{R_{sh}} = \frac{4.95mV}{1\Omega} = 4.95mA$$

$$I = I_{sh} + I_m = 4.95mA + 0.05mA = 5mA \text{ .....\#}$$

ค) ที่ 0.25FSD หากระแสไฟฟ้ารวม I

$$I_m = 0.25 \times 0.1mA = 0.025mA$$

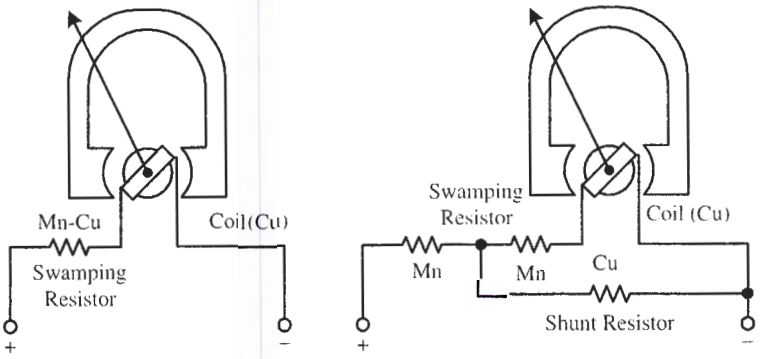
$$V_m = I_m R_m = 0.025mA \times 99\Omega = 2.475mV$$

$$I_{sh} = \frac{V_m}{R_{sh}} = \frac{2.475mV}{1\Omega} = 2.475mA$$

$$I = I_{sh} + I_m = 2.475mA + 0.025mA = 2.5mA \text{ .....\#}$$

ความต้านทานสแวพปิ้ง (Swamping Resistance)

ขดลวดเคลื่อนที่แบบดาร์สันวัลหรือ PMMC นั้นจะพันด้วยลวดทองแดงมีข้อเสีย คือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุให้ความต้านทานขดลวดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย แต่สปริงก้นหอยซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไปป้อนให้ขดลวดจะลดความเครียดลง จึงทำให้เข็มมิเตอร์อ่านค่ากระแสไฟฟ้าต่ำกว่าค่าจริง



(ก) การชดเชยอุณหภูมิแบบพื้นฐาน (ข) การชดเชยอุณหภูมิที่มีการต่อตัวต้านทานชันท์

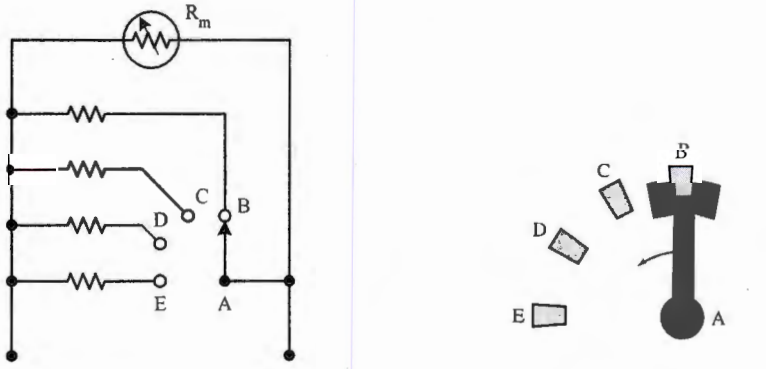
รูปที่ 3.4 การต่อตัวต้านทานสแวพปิ้งเพื่อชดเชยอุณหภูมิให้ขดลวด

การแก้ปัญหานี้ด้วยการต่อตัวต้านทานสแวพปิ้งอนุกรมกับขดลวดเพื่อชดเชยอุณหภูมิดังในรูปที่ 3.4 ซึ่งตัวต้านทานสแวพปิ้งนั้นจะทำด้วยทองแดง (Cu) หรือแมงกานิน (Mn) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำมากจนมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลรวมค่าความต้านทานของขดลวดกับตัวต้านทานสแวพปิ้งจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเพียงพอต่อการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของสปริงก้นหอยซึ่งผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขดลวดนั้นจึงได้รับการชดเชยด้วยตัวต้านทานสแวพปิ้ง

แอมมิเตอร์หลายย่านวัดแบบซิงเกิลชันท์

(Single Shunt Type Multi-Range of Ammeter)

แอมมิเตอร์หลายย่านวัดแบบซิงเกิล ชันท์นั้นในแต่ละย่านวัดต่างจะมีตัวต้านทานชันท์แยกอิสระต่อกันและจะเปลี่ยนย่านวัดโดยการใช้สวิตช์เลือก (Selector Switch) แต่มีข้อเสียเมื่อนำแอมมิเตอร์ไปวัดกระแสไฟฟ้า ของวงจรใดๆแล้วในขณะเปลี่ยนย่านวัดหนึ่งไปอีกย่านวัดหนึ่งขณะสวิตช์ยังต่อไปไม่ถึงย่านวัดใหม่จะทำให้กระแสไฟฟ้าของวงจรไหลเข้าขดลวดเคลื่อนที่จนเกิดการเสียหายได้จะแก้ปัญหานี้ โดยการใช้สวิตช์เลือกย่านวัดแบบต่อก่อนตัด (Make before Break Switch) ดังรูปที่ 3.5 (ข)



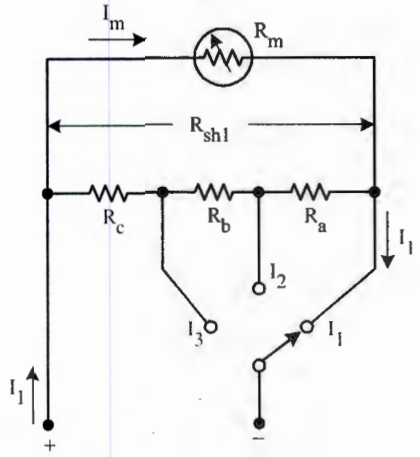
(ก) วงจรแอมมิเตอร์แบบหลายย่านวัด (ข) สวิตช์เลือกแบบต่อก่อนตัด

รูปที่ 3.5 แอมมิเตอร์แบบหลายย่านวัดที่มีตัวต้านทานแบ่งแยกอิสระกันของแต่ละย่านวัด

3.3.2 การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์แบบอาร์ตันชันท์

(Ayrton Shunt Type Ammeter)

การขยายย่านวัดของแอมมิเตอร์แบบอาร์ตันชันท์ จะใช้หลักการของวงจรขนานเช่นกัน โดยตัวต้านทานชันท์ของย่านวัดต่ำสุดจะถูกแบ่งให้ย่านวัดถัดไปตามลำดับจนถึงย่านวัดสูงสุด ลักษณะเช่นนี้จะไม่มีปัญหาการเปลี่ยนย่านวัดเหมือนแอมมิเตอร์หลายย่านวัดแบบซิงเกิลชันท์ เพราะเหตุว่าจะมีตัวต้านทานชันท์ต่อขนานอยู่กับขดลวดเคลื่อนที่เพื่อแบ่งกระแสไฟฟ้าส่วนเกินตลอดเวลา จึงไม่มีกระแสไฟฟ้าของวงจรไหลเข้าขดลวดเคลื่อนที่จนทำให้เกิดการเสียหาย



รูปที่ 3.6 วงจรดีซีแอมมิเตอร์แบบอาร์ตันชันท์

สมการการออกแบบวงจร

ย่านวัด I_1 หา R_{sh1}

จากสมการ (3.4) : $R_{sh} = \frac{I_m R_m}{I - I_{in}}$

จะได้ $$R_{sh1} = R_a + R_b + R_c = \frac{I_m R_m}{I_1 - I_m} \qquad \text{.....(3.7)}$$

ย่านวัด I_2 หา R_a, R_{sh2}

$$R_{sh2} = R_c + R_b \qquad \text{.....(3.8)}$$

จากสมการ (3.7) จะได้

$$R_a = R_{sh1} - (R_c + R_b) \quad \text{.....(3.9)}$$

แทนสมการ (3.8) : $R_{sh2} = R_c + R_b$ ในสมการ (3.9)

$$R_a = R_{sh1} - (R_c + R_b) = R_{sh1} - R_{sh2} \quad \text{.....(3.10)}$$

จากวงจรขนาน R_{sh2} //$(R_m + R_a)$

จะได้ $V_{sh2} = V_{(R_m + R_a)}$

$$(I_2 - I_m)R_{sh2} = I_{rn}(R_m + R_a) \quad \text{.....(3.11)}$$

แทนสมการ (3.10) : $R_a = R_{sh1} - R_{sh2}$ ในสมการ (3.11)

$$(I_2 - I_m)R_{sh2} = I_{rn}(R_m + R_{sh1} - R_{sh2})$$

$$I_2R_{sh2} - I_mR_{sh2} = I_mR_m + I_mR_{sh1} - I_mR_{sh2}$$

ดังนั้น $$R_{sh2} = \frac{I_m(R_m + R_{sh1})}{I_2} \quad \text{.....(3.12)}$$

จากสมการ (3.10) , (3.12) หา R_a

ดังนั้น $$R_a = R_{sh1} - R_{sh2} \quad \text{.....(3.13)}$$

ย่านวัด I_3 หา R_b และ R_c

$$R_{sh3} = R_c \quad \text{.....(3.14)}$$

จากวงจรขนาน R_{sh3} //$(R_m + R_a + R_b)$

จะได้ $V_{sh3} = V_{(R_m + R_a + R_b)}$

$$(I_3 - I_m)R_{sh3} = I_m(R_m + R_a + R_b) \quad \text{.....(3.15)}$$

จากสมการ (3.7) จะได้

$$R_a + R_b = R_{sh1} - R_c \quad \text{.....(3.16)}$$

แทนสมการ (3.14) : $R_c = R_{sh3}$ ในสมการ (3.16)

$$R_a + R_b = R_{sh1} - R_{sh3} \quad \text{.....(3.17)}$$

แทนสมการ (3.17) : $R_a + R_b = R_{sh1} - R_{sh3}$ ในสมการ (3.15)

$$(I_3 - I_m)R_{sh3} = I_m(R_m + R_{sh1} - R_{sh3})$$

$$I_3R_{sh3} - I_mR_{sh3} = I_mR_m + I_mR_{sh1} - R_{sh3}$$

$$R_{sh3} = R_c = \frac{I_m(R_m + R_{sh1})}{I_3} \quad \text{.....(3.18)}$$

จากสมการ (3.8) และ (3.18) หา R_b

$$R_b = R_{sh2} - R_c$$
$$R_b = R_{sh2} - R_{sh3} \quad \text{.....(3.19)}$$

สรุปการออกแบบดีซีแอมมิเตอร์แบบอาร์ตันชันท์

ย่านวัด I_1

$$R_{sh1} = R_a + R_b + R_c = \frac{I_m R_m}{I_1 - I_m}$$

ย่านวัด I_2

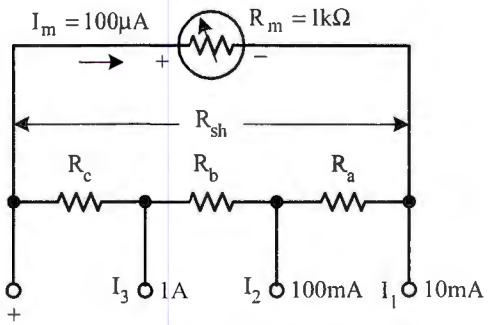
$$R_{sh2} = R_b + R_c = \frac{I_m (R_m + R_{sh1})}{I_2}$$
$$R_a = R_{sh1} - R_{sh2}$$

ย่านวัด I_3

$$R_{sh3} = R_c = \frac{I_m (R_m + R_{sh1})}{I_3}$$
$$R_b = R_{sh2} - R_{sh3}$$

จะสังเกตได้ว่าสมการหา R_{sh2} และ R_{sh3} จะมีเศษเหมือนกันแต่ส่วนจะต่างกันเท่านั้นซึ่งส่วนจะเป็นค่าของย่านวัดคือ I_2 และ I_3 ตามลำดับ ดังนั้นในทำนองเดียวกันแล้วถ้าแอมมิเตอร์มีย่านวัดเพิ่มเป็น I_4 และ I_5 สมการหา R_{sh4} และ R_{sh5} จะมีเศษเหมือนกันกับ R_{sh2} และ R_{sh3} ด้วยโดยส่วนจะเป็น I_4 และ I_5 ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 3.3 จงคำนวณหาตัวต้านทานแบบอาร์ตันชันท์ของแอมมิเตอร์ในวงจรที่กำหนดให้



วิธีทำ

ย่านวัด I_1 =10mA

หา $R_{sh1} = R_a + R_b + R_c$

$$n = \frac{I}{I_m} = \frac{10mA}{100\mu A} = 100$$

$$R_{sh1} = R_a + R_b + R_c = \frac{R_m}{n-1} = \frac{1k\Omega}{100-1} = 10.1\Omega$$

ย่านวัด I_2 =100mA

หา R_a และ R_{sh2}

$$R_{sh2} = R_b + R_c = \frac{I_m(R_m + R_{sh1})}{I_1}$$

$$R_{sh2} = \frac{100\mu A(1k\Omega + 10.1\Omega)}{100mA} = 1.01\Omega$$

$$R_a = R_{sh1} - R_{sh2} = 10.1\Omega - 1.01\Omega = 9.09\Omega \text{ .....\#}$$

ย่านวัด I_3 =1A

หา R_c : R_{sh3} และ R_b

$$R_{sh3} = R_c = \frac{I_m(R_m + R_{sh1})}{I_3}$$

$$R_{sh3} = \frac{100\mu A(1k\Omega + 10.1\Omega)}{1A} = 0.101\Omega$$

$$R_b = R_{sh2} - R_{sh3} = 1.01\Omega - 0.101\Omega = 0.909\Omega \text{ .....\#}$$

$$R_c = R_{sh3} = 0.101\Omega \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 3.4 ถ้าแอมมิเตอร์หลายย่านวัดแบบอาร์ดันชันท์เหมือนวงจรในตัวอย่างที่ 3.3 มี $R_c = 0.05\Omega, R_b = 0.45\Omega, R_a = 4.5\Omega$ และขดลวดเคลื่อนที่ PMMC มี $R_m = 1k\Omega$, $I_{fs} = 50\mu A$ จงคำนวณหาย่านวัดทั้ง 3 ย่านวัดของแอมมิเตอร์

วิธีทำ

หาย่านวัด I_1

$$V_m = I_m R_m = 50\mu A \times 1k\Omega = 50mV$$

$$I_{sh1} = \frac{V_m}{R_c + R_b + R_a} = \frac{50mV}{0.05\Omega + 0.45\Omega + 4.5\Omega} = 10mA$$

$$I_1 = I_m + I_{sh1} = 50\mu A + 10mA = 10.05mA \approx 10mA \text{ .....\#}$$

หาย่านวัด I_2

$$V_{sh2} = I_m(R_m + R_a) = 50\mu A(1k\Omega + 4.5\Omega) \approx 50mV$$

$$I_{sh2} = \frac{V_{sh2}}{R_c + R_b} = \frac{50mV}{0.05\Omega + 0.45\Omega} = 100mA$$

$$I_2 = I_m + I_{sh2} = 50\mu A + 100mA = 100.05mA \approx 100mA \text{ .....\#}$$

หาย่านวัด I_3

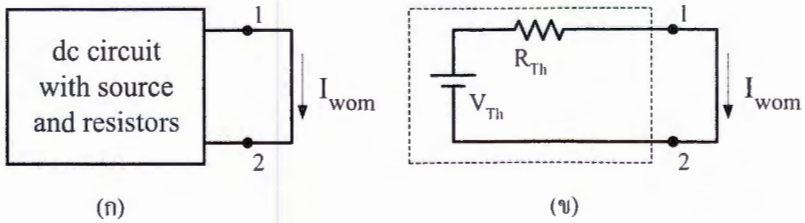
$$V_{sh3} = I_m(R_m + R_a + R_b) = 50\mu A(1k\Omega + 4.5\Omega + 0.45\Omega) = 50mV$$

$$I_{sh3} = \frac{V_{sh3}}{R_c} = \frac{50mV}{0.05\Omega} = 1A$$

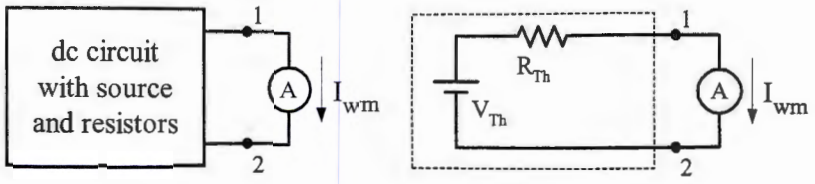
$$I_3 = I_m + I_{sh3} = 50\mu A + 1A = 1.00005A \approx 1A \text{ .....\#}$$

3.4 ผลการโหลดของแอมมิเตอร์ (Ammeter Loading Effects)

แอมมิเตอร์ทางอุดมคติ (Ideal Ammeter) จะพิจารณาให้ค่าความต้านทานภายใน (R_{in}) ของย่านวัดเท่ากับศูนย์โอห์ม เมื่อนำแอมมิเตอร์นี้ไปวัดกระแสไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าใดๆจะวัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำไม่เกิดค่าความผิดพลาดจากการวัด แต่ในความเป็นจริงแล้วแอมมิเตอร์จะมีความต้านทานภายในซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อต่อในวงจรไฟฟ้าจะทำให้เพิ่มค่าความต้านทานเป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าจริง โดยค่าความผิดพลาดจากการวัดนี้เกิดจากผลการโหลดของแอมมิเตอร์ การลดผลการโหลดของแอมมิเตอร์ โดยการเปลี่ยนย่านวัดให้สูงขึ้นเพื่อลดค่าความต้านทานภายในของย่านวัด ทั้งนี้เพราะว่าย่านวัดสูงกว่าจะมีค่าความต้านทานภายในต่ำกว่าความต้านทานภายในของย่านวัดต่ำและอีกวิธีหนึ่งคือการใช้วงจรเทียบเท่าเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit) พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเทียบเท่าเทวินินของวงจรไฟฟ้านั้นกับความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์



รูปที่ 3.7 วงจรเทียบเท่าเทวินินของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อไม่ต่อแอมมิเตอร์



(ก) (ข)

รูปที่ 3.8 วงจรเทียบเท่าเทวินของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อต่อแอมมิเตอร์

การคำนวณค่าความถูกต้องและค่าความผิดพลาด

หลักการคือหาวงจรเทียบเท่าเทวินของวงจรไฟฟ้าที่ต้องการวัดหากระแสไฟฟ้า ดังนี้

จากรูปที่ 3.7 (ข) หา I_{wom}

$$I_{wom} = \frac{V_{Th}}{R_{Th}} \qquad \text{.....(3.20)}$$

จากรูปที่ 3.8 (ข) หา I_{wm} โดยให้ R_{in} เป็นความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์

$$I_{wm} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_{in}} \qquad \text{.....(3.21)}$$

สมการ $\frac{(3.20)}{(3.21)}$ จะได้เป็นค่าความถูกต้องจากการวัด (Accuracy : A) คือ

$$\text{Accuracy} = \frac{I_{wm}}{I_{wom}} = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}} \qquad \text{.....(3.22)}$$

เปอร์เซ็นต์ค่าความถูกต้องจากการวัดคือ

$$\%\text{Acc} = \frac{I_{wm}}{I_{wom}} \times 100\%$$
$$\%\text{Acc} = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}} \times 100\% \qquad \text{.....(3.23)}$$

เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดจากการวัดคือ

$$\%\text{Error} = 1 - \%\text{Acc} = \left|\frac{X_t - X_m}{X_t}\right| \times 100\%$$
$$\%\text{Error} = \left|\frac{I_{wom} - I_{wm}}{I_{wom}}\right| \times 100\% \qquad \text{.....(324)}$$

เมื่อ I_{wm} คือกระแสไฟฟ้ามีมิเตอร์ (Current with Meter)
หรือค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (X_m) ...แอมแปร์ (A)
I_{wom} คือกระแสไฟฟ้าไม่มีมิเตอร์ (Current without Meter)
หรือค่ากระแสไฟฟ้าจริง (X_t) ...แอมแปร์ (A)
R_{Th} คือความต้านทานเทียบเท่าเทวินิน... โอห์ม (Ω)
R_{in} คือความต้านทานภายในของมิเตอร์... โอห์ม (Ω)
%Accuracy คือเปอร์เซ็นต์ค่าความถูกต้องจากการวัด
%Error คือเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดจากการวัด

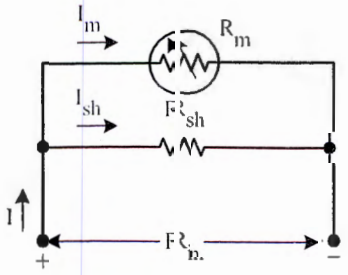
3.5 ความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์ (Internal Ammeter Resistance : R_{in})

ความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์ ถ้ากรณีเป็นขดลวดเคลื่อนที่จะพิจารณาจากความต้านทานขดลวดแต่ถ้าเป็นแอมมิเตอร์ที่มีการขยายย่านวัดแล้วความต้านทานภายในจะพิจารณาจากความต้านทานของย่านวัดนั้นๆ โดยเป็นไปตามชนิดตัวต้านทานชันท์ไม่ว่าจะเป็นแบบซิงเกิลชันท์หรืออาร์ตันชันท์

พิจารณาความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์แบบซิงเกิลชันท์จากรูปที่ 3.9 ซึ่งมีย่านวัด I จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้า I ของย่านวัดจะเป็นกระแสไฟฟ้ารวม (I_t) ที่ไหลเข้าแอมมิเตอร์

$$R_{in} = R_m // R_{sh} = \frac{R_m R_{sh}}{R_m + R_{sh}} \qquad \text{.....(3.25)}$$

ในทำนองเดียวกันความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์แบบอาร์ตันชันท์จะเท่ากับผลรวมความต้านทานชันท์ของแต่ละย่านวัด ถ้าย่านวัดสูงสุดจะมีความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์จะต่ำสุด



รูปที่ 3.9 ความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์แบบซิงเกิลชันท์

การคำนวณค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์

จากรูปที่ 3.9 หาค่าความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์

จะได้ $$R_{in} = \frac{V_m}{I_{range}} = \frac{V_m}{I} = \frac{I_m R_m}{I} \quad \text{.....(3.26)}$$

จากสมการ (3.6) : $n = \frac{I}{I_m}$

จะได้ $$I = nI_m \quad \text{.....(3.27)}$$

จากสมการ (3.27) กระแสไฟฟ้าของย่านวัด I มีค่ามากกว่ากระแสไฟฟ้าขดลวด I_m เท่ากับ n เท่า

แทนสมการ (3.27) : $I = nI_m$ ในสมการ (3.26)

จะได้ $$R_{in} = \frac{I_m R_m}{I} = \frac{I_m R_m}{nI_m}$$

$$R_{in} = \frac{R_m}{n} \quad \text{.....(3.28)}$$

จากสมการ (3.28) จะได้ความต้านทานภายใน R_{in} มีค่าลดลงเท่ากับ n เท่าของความต้านทานขดลวด R_m หรือกล่าวได้ว่าความต้านทานขดลวด R_m เท่ากับ n เท่าของความต้านทานภายใน R_{in} ดังนี้

$$R_m = nR_{in} \quad \text{.....(3.29)}$$

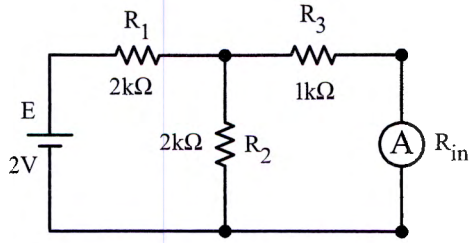
ตัวอย่างที่ 3.6 ถ้าขดลวดเคลื่อนที่มีความต้านทาน 50Ω และกระแสไฟฟ้าขดลวด 1mA ต้องการขยายย่านวัดเป็น 10mA จะทำให้แอมมิเตอร์มีความต้านทานภายในเท่าไร

วิธีทำ

$$R_{in} = \frac{I_m R_m}{I} = \frac{1mA}{10mA} R_m = \frac{1}{10} R_m$$

$$R_{in} = \frac{50\Omega}{10} = 5\Omega \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 3.7 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงกำหนดให้ $R_1 = 2k\Omega$, $R_2 = 2k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$ แรงดันไฟฟ้า $E = 2V$ ให้วัดกระแสไฟฟ้า I_{R3} ด้วยแอมมิเตอร์ที่มีความต้านทานภายใน $R_{in} = 100\Omega$ และจงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและความผิดพลาดจากการวัด



วิธีทำ

หา R_{Th}, V_{Th}

$$R_{Th} = R_1 // R_2 + R_3 = 2k\Omega // 2k\Omega + 1k\Omega = 2k\Omega$$

$$V_{Th} = (\frac{E}{R_1 + R_2})R_2 = (\frac{2V}{2k\Omega + 2k\Omega}) \times 2k\Omega = 1V$$

หา I_{wom} ,I_{wm}

$$I_{wom} = \frac{V_{Th}}{R_{Th}} = \frac{1V}{2k\Omega} = 500\mu A$$

$$I_{wm} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_{in}} = \frac{1V}{2k\Omega + 100\Omega} = 476.19\mu A \text{ .....\#}$$

หา %Acc

$$\%Acc = \frac{I_{wm}}{I_{wom}} \times 100\%$$

$$\%Acc = \frac{476.19\mu A}{500\mu A} \times 100\% = 95.24\% \text{ .....\#}$$

หรือ $$\%Acc = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}} \times 100\%$$

$$\%Acc = \frac{2k\Omega}{2k\Omega + 100\Omega} \times 100\% = 95.24\% \text{ .....\#}$$

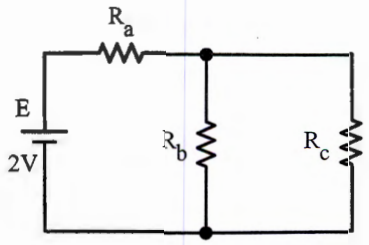
หา %Error

$$\%Error = 1 - \%Acc = 1 - 95.24\% = 4.76\% \text{ .....\#}$$

หรือ $$\%Error = \left| \frac{I_{wom} - I_{wm}}{I_{wom}} \right| \times 100\%$$

$$\%Error = \left| \frac{250\mu A - 238.095\mu A}{250\mu A} \right| \times 100\% = 4.76\% \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 3.8 แอมมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีความต้านทานภายใน 78Ω ใช้วัดกระแสไฟฟ้าของ R_c จงคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากผลการโหลดของแอมมิเตอร์



วิธีทำ

หา R_{Th} , V_{Th}

$$R_{Th} = R_a // R_b + R_c = 1k\Omega // 1k\Omega + 1k\Omega = 1.5k\Omega$$

$$V_{Th} = (\frac{E}{R_a + R_b})R_b = (\frac{3V}{1k\Omega + 1k\Omega})\times 1k\Omega = 1.5V$$

หา Accuracy , Error

$$Accuracy = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}} = \frac{1.5k\Omega}{1.5k\Omega + 78\Omega} = 0.95 = 95\% .....\#$$

$$Error = 1 - Accuracy = 1 - 0.95 = 0.05 = 5\% .....\#$$

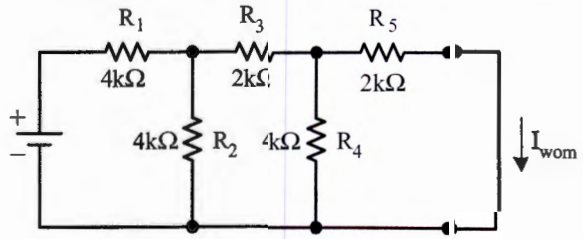
หา I_{wom} , I_{wm}

$$I_{wom} = \frac{V_{Th}}{R_{Th}} = \frac{1.5V}{1.5k\Omega} = 1mA .....\#$$

$$I_{wm} = (\frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}})I_{wom}$$

$$I_{wm} = (\frac{1.5k\Omega}{1.5k\Omega + 78\Omega})\times 1mA = 0.95mA .....\#$$

ตัวอย่างที่ 3.9 แอมมิเตอร์มีความต้านทานภายใน 1kΩ ใช้วัดกระแสไฟฟ้าในวงจรที่กำหนดให้ ถ้าอ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากมิเตอร์ได้ 40μA จงคำนวณหา I_{wom} , %Acc และ %Error



วิธีทำ

หา R_{Th} , I_{wom}

$$R_{Th} = (R_1 // R_2 + R_3) // R_4 + R_5$$
$$R_{Th} = (1k\Omega // 4k\Omega + 2k\Omega) // 4k\Omega + 2k\Omega = 4k\Omega$$
$$I_{wom} = \frac{I_{wm}(R_{Th} + R_{in})}{R_{Th}}$$
$$I_{wom} = \frac{40\mu A(4k\Omega + 1k\Omega)}{4k\Omega} = 50\mu A \text{ .....\#}$$

หา %Acc

$$\text{Accuracy} = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}}$$
$$\text{Accuracy} = \frac{4k\Omega}{4k\Omega + 1k\Omega} = 0.80 = 80\% \text{ .....\#}$$

หา %Error

$$\text{Error} = 1 - \text{Accuracy} = 1 - 0.80 = 0.20 = 20\% \text{ .....\#}$$

จากตัวอย่างที่ 3.9 ได้ค่าความถูกต้อง 80% หมายถึงแอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าได้ 80% ของกระแสไฟฟ้าจริงในวงจรและที่ได้ค่าความผิดพลาด 20% จะหมายถึงแอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าได้ต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าจริงในวงจร 20%

3.6 การเลือกแอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าให้ได้ค่าความถูกต้องสูงสุด

การวัดกระแสไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าใดๆนั้น จะมีปัญหาจากผลการโหลดของแอมมิเตอร์ซึ่งมีมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานภายใน R_{in} และความต้านทานเทียบเท่าเทวินิน R_{Th} ของวงจรที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้านั้น ดังนั้น ค่าความถูกต้องจากการวัดจะขึ้นอยู่กับว่า R_{Th} มีค่ามากกว่า R_{in} เป็นกี่เท่า

ตัวอย่างที่ 3.10 ถ้ากำหนดให้ R_{Th} เท่ากับ $100\,R_{in}$ จะมีค่าความถูกต้องจากการวัดเท่าไร

วิธีทำ

$$\text{Accuracy} = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_{in}}$$
$$\text{Accuracy} = \frac{100R_{in}}{100R_{in} + R_{in}} = 0.99 = 99\% \text{ .....\#}$$

แบบฝึกหัดที่ 3

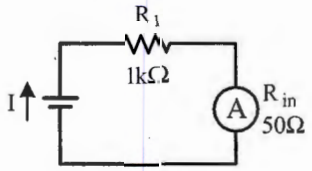
1. จงคำนวณหาค่าตัวต้านทานชันท์ที่เปลี่ยนขดลวดเคลื่อนที่มีความต้านทานภายใน 105Ω และกระแสเต็มสเกล 1mA ให้เป็นแอมมิเตอร์ที่มีย่านวัดเป็น 150mA

2. แอมมิเตอร์แบบชิงเกิลชันท์มีกระแสเต็มสเกล 1mA ความต้านทานภายใน 50Ω จงคำนวณหา
   ก) ตัวต้านทานขนานที่ย่านวัด 3mA และความต้านทานภายใน
   ข) ตัวต้านทานขนานที่ย่านวัด 1A และความต้านทานภายใน

3. แอมมิเตอร์หลายย่านวัดแบบชิงเกิลชันท์ กำหนดให้ขดลวดเคลื่อนที่มีความต้านทานภายใน 2kΩ กระแสไฟฟ้าเต็มสเกล 50μA ต้องการขยายย่านวัดเป็น 5, 50 และ 500mA จงคำนวณหา
   ก) ตัวต้านทานขนานของแต่ละย่านวัด
   ข) ความต้านทานภายใน

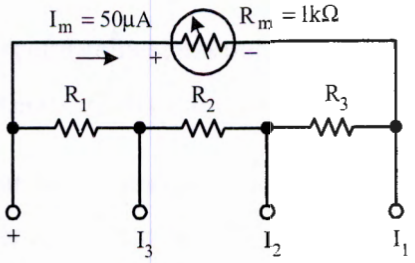
4. แอมมิเตอร์มีย่านวัดเป็น 1mA ถูกกำหนดจากโรงงานมีค่าผิดพลาดการปรับแต่ง (Calibration Error) ±5% ของ FSD ถ้าอ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากการวัดโหลดของวงจรได้ 0.35mA จงคำนวณหาค่าย่านของกระแสไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านมิเตอร์

5. ถ้าแอมมิเตอร์มีความต้านทานขดลวด 50Ω และกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล 1mA ถ้าให้แอมมิเตอร์มี Calibration Error ±5% of FSD จงคำนวณหาช่วงของกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์

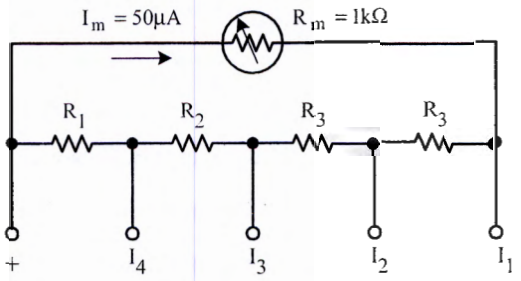


6. แอมมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสร้างจากการต่อตัวต้านทาน 133.3Ω ขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ 1.2kΩ, 30μA FSD จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ ก) FSD ข) 0.5FSD ค) 0.33FSD

7. จงคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_1 ถึง R_3 ในวงจรแอมมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อให้ขดลวดมี $R_m = 1k\Omega, I_m = 50\mu A$ และ $I_1 = 1mA, I_2 = 10mA, I_3 = 100mA$



8. จงแสดงคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_1 ถึง R_4 ของแอมมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถ้าขดลวด PMMC มี $R_m = 1k\Omega, I_m = 50\mu A$ และ $I_1 = 100\mu A, I_2 = 1mA, I_3 = 10mA, I_4 = 100mA$



9. วงจรไฟฟ้ากระแสตรงมี $E = 1V, R = 1k\Omega$ ให้วัดกระแสไฟฟ้าของวงจรด้วยแอมมิเตอร์มีค่าความต้านทานภายใน 200Ω จะอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้เท่าไร

10. ถ้าขดลวดเคลื่อนที่มีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล 1mA ความต้านทานภายใน 50Ω ต่อกับตัวต้านทานชันท์ 1Ω จงคำนวณหา

    ก) ความต้านทานภายในของแอมมิเตอร์

    ข) ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แอมมิเตอร์จะวัดได้

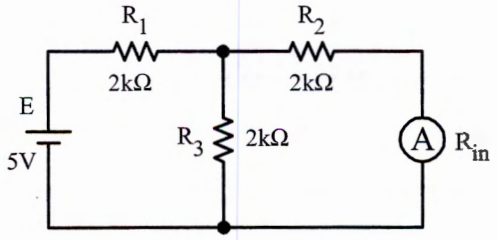
    ค) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแอมมิเตอร์เมื่อกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล

11. ในการวัดกระแสไฟฟ้าให้ได้ค่าความถูกต้องจากการวัดเท่ากับ 95% จะต้องให้ค่า R_{Th} ของวงจรที่ต้องการวัดเป็นกี่เท่าของค่า R_{in} ของแอมมิเตอร์

12. จากวงจรที่กำหนดให้ถ้าต้องการให้ได้ %Error จากการวัดด้วยแอมมิเตอร์เท่ากับ 5%

ก) จะต้องใช้แอมมิเตอร์มีความต้านทานภายในเท่าไร

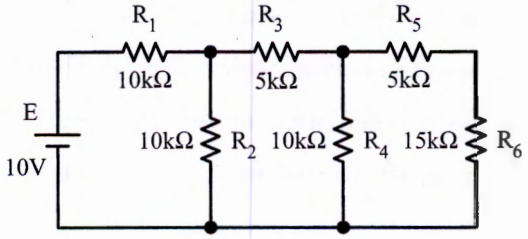
ข) ถ้าแอมมิเตอร์มีความต้านทานภายใน 100Ω จะเกิดเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเท่าไร



13. จงคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_6 เมื่อวัดด้วยแอมมิเตอร์ที่มีความต้านทานภายใน 2kΩ

ก) จะอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้เท่าไร

ข) ถ้าต้องการวัดกระแสไฟฟ้าในข้อ ก) ให้มีค่าความถูกต้องจากการวัดได้ 99% จะต้องใช้แอมมิเตอร์มีความต้านทานภายในเท่าไร



14. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12V, 25A ป้อนให้โหลดตัวหนึ่ง จงคำนวณกระแสไฟฟ้าของโหลดเมื่อวัดด้วยแอมมิเตอร์ที่มีความต้านทานภายใน ก) 0.12Ω ข) 0.52Ω ค) 0.002Ω

15. แอมมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมี PMMC 1.2kΩ, 100μA FSD ต่อขนานกับตัวต้านทานอาร์ตันชันท์ 0.1Ω โดยมีตัวต้านทาน 4 ตัวต่ออนุกรมกัน จงคำนวณหาค่าย่านวัดของแอมมิเตอร์