หน่วยที่ 3
การวัดกำลังไฟฟ้า

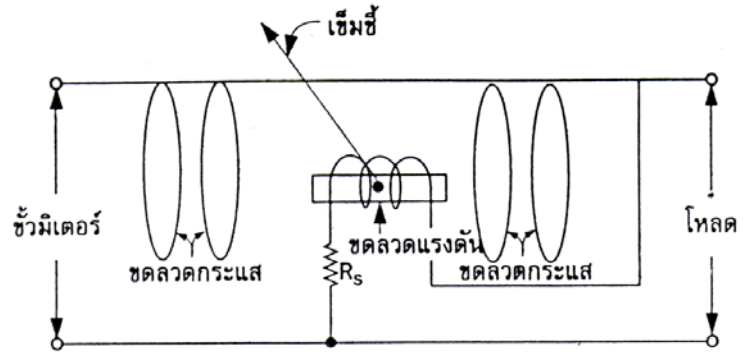
3.1 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Watt meter)

วัตต์มิเตอร์เป็นเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ส่วนมากวัตต์มิเตอร์แบบมีเข็มเบี่ยงเบนใช้วัดปริมาณกำลังไฟฟ้าได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ วัตต์มิเตอร์ที่เราพบมากที่สุดเป็นแบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แสดงวัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์

วัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ (Electrodynamometer Watt Meter) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ และขดลวดเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.1 ขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ (Stationary field coil) จะต่ออนุกรมกับไลน์ (Line)

ดังนั้น ฟลักส์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสนามแม่เหล็กนี้ จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าของโหลด ขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่กับที่เรียกว่า Stationary field coil ขดลวดเคลื่อนที่ (Moving coil) จะต่อคร่อมกับ Line ทำให้ฟลักส์แม่เหล็กของขดลวดเคลื่อนทีเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าในขดลวดเคลื่อนที่ ขดลวดเคลื่อนที่นี้โดยทั่วไปเรียกว่า Potential coil



รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของวัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์

การต่อวงจรของรูปข้างบนแสดงให้เห็นว่าแรงบิดชั่วขณะที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเข็มส่วนใหญ่เกิดจากผลคูณของกระแสไฟฟ้าชั่วขณะใน Stationary field coil (ขดลวดกระแส) กับแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่ Potential coil (ขดลวดแรงดัน) ดังนั้นสเกลของวัตต์มิเตอร์แบบอีเล็ปโทรไดนาโมมิเตอร์จึงมีขนาดช่องเท่าๆกัน (Linear scale) ต่างจากแอมมิเตอร์และโวลท์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ที่มีสเกลที่มีขนาดช่องไม่เท่ากัน (Non linear scale)

3.1.1. หลักการวัดกำลังไฟฟ้า

ในการใช้เครื่องวัดประเภทนี้วัดกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ การเบี่ยงเบนของเข็มไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าใน Stationary field coil (ขดลวดกระแส) และแรงดันไฟฟ้าใน Potential coil (ขดลวดแรงดัน) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ของโหลดที่ต้องการวัดอีกด้วย และสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$P = VI \cos\theta \qquad \text{.....(3-1)}$$

กำหนดสเกลของวัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ จะต้องมีการเทียบค่าระหว่างมุมที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของเข็มกับปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่ต้องการทราบค่า ค่าที่ได้จากสมการเทียบค่านี้เราเรียกว่าค่า คงที่ของเครื่องวัด (Instrument Constant : K_M) ดังนั้นถ้าเราทราบค่าปริมาณกำลังไฟฟ้า ค่าคงที่ของเครื่องวัดจะทำให้หาค่ามุมการเบี่ยงเบนของเข็มได้ดังสมการ

$$\theta_M = K_M VI \cos\theta \qquad \text{..... (3-2)}$$

เมื่อ

θ_M = มุมเบี่ยงเบนของเข็ม

V = ค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวด Potential coil

K_M = ค่าคงที่ของเครื่องวัด

I = ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าที่ขดลวด Current coil

Cos θ = Power factor

<u>ตัวอย่างที่ 3.1</u> วัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์มีค่า $K_M = 8^0$ /Watt เมื่อนำมาวัดกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่โหลดมีค่าแรงดันไฟฟ้า 110 V และกระแสไฟฟ้า มีค่า 0.05 A Power factor มีค่า 0.8 จงหามุมการเบี่ยงเบนของเข็มในเครื่องวัดนี้

<u>วิธีทำ</u> จากสมการ $\theta_M = K_M VI \cos\theta$

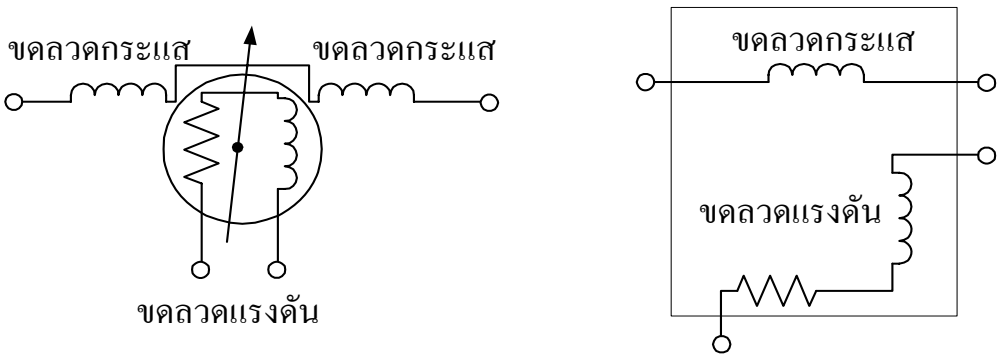
$= 8 \times 110 \times 0.05 \times 0.8$

$= 35.2^{\ 0}$

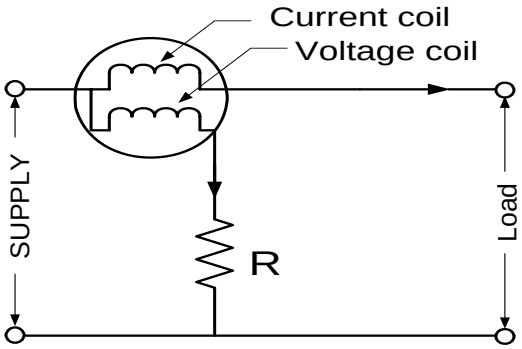
3.1.2 การต่อวัตต์มิเตอร์ในระบบไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส

1.) การต่อวัตต์มิเตอร์ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส

การต่อวัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ มีหลักการคือ ต้องพิจารณาทิศทางของกระแสไฟฟ้าชั่วขณะในขดลวดแต่ละตัว เพราะขดลวดดังกล่าวทำหน้าที่กำหนดทิศทาง ของฟลักส์แม่เหล็กส่วนฟลักส์แม่เหล็กกำหนดทิศทางของแรงบิดที่ทำให้เข็มเบี่ยงเบน



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรภายในวัตต์มิเตอร์แบบอีเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส



รูปที่ 3.4 แสดงการต่อวัตต์มิเตอร์ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส

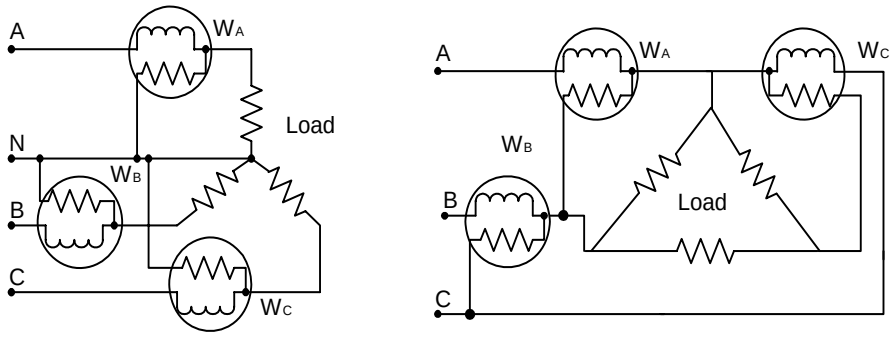
ถ้าต่อวัตต์มิเตอร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าที่มีโหลด โดยกระแสไฟฟ้าที่โหลด ไหลผ่าน Current coil และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม Potential coil วัตต์มิเตอร์จะอ่านค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดได้ การต่อวัตต์มิเตอร์แบบนี้ต้องให้กระแสไฟฟ้าที่โหลดเข้าที่ขั้วบวกของ Current coil ส่วนขั้วบวกของ Potential coil จะต่อไว้กับตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 3.4 จะทำให้ Potential coil มีแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองข้างแตกต่างกัน ทำให้เข็มของวัตต์มิเตอร์เคลื่อนตัวไปทางขวา หรืออ่านค่าเป็นบวก แต่ถ้าขั้ว Potential coil หรือ Current coil ผิดตำแหน่งจะทำให้เข็มเคลื่อนตัวไปทาง ซ้ายและอ่านค่าเป็นลบ

2.) การต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

การต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส กระทำได้ 2 วิธีคือ ใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส จำนวน 3 เครื่อง และใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส จำนวน 2 เครื่อง ดังนี้

2.1 การใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส จำนวน 3 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าระบบ 3 เฟส

การใช้วัตต์มิเตอร์ 3 เครื่องเพื่อวัดกำลังไฟฟ้าของวงจร ที่มีโหลดต่อแบบ สตาร์ ชนิด 3 เฟส 4 สาย ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่า Statinary field coil ของวัตต์มิเตอร์ทั้ง 3 ตัว ต่อแบบอนุกรมกับสาย A,B และ C เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ line ซึ่งเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสด้วย ส่วน potential coil ของวัตต์มิเตอร์ทั้ง 3 ตัว ต่อขั้วบวกเข้าที่สาย A,B และ C ส่วนขั้วลบต่อเข้ากับสาย Neutral ลักษณะเช่นนี้ Potential coil ของเครื่องวัดทั้ง สามเครื่องจะต่อแบบสตาร์ เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส ได้เช่นกัน



ก. การต่อแบบสตาร์ ข. การต่อแบบเดลต้า

รูปที่ 3.5 แสดงการต่อวัตต์มิเตอร์ 3 เครื่องในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

สมมุติว่า กระแสไฟฟ้าที่เฟส A ล้าหลังแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A_{AN} เป็นมุม θ_A และกระแสไฟฟ้าเฟส B และC นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ V_{AN} เป็นมุม θ_B และ θ_C ตามลำดับ จะเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.5 (ข) เมื่อนำสมการ $P = VI \cos\theta$ มาพิจารณาจะได้

$$W_A = V_{AN} I_A \cos \theta_A \quad \text{.....(3-25)}$$

$$W_B = V_{BN} I_B \cos \theta_B \quad \text{.....(3-25)}$$

$$W_C = V_{CN} I_C \cos \theta_C \quad \text{.....(3-27)}$$

จากสมการทำให้ทราบว่า วัตต์มิเตอร์ A,B,C จะอ่านค่ากำลังไฟฟ้าได้ที่เฟส A,B,C ตามลำดับ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟส จึงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_T = W_A + W_B + W_C \quad \text{.....(3-28)}$$

<u>ตัวอย่างที่ 3.2</u> จากรูปที่ 3.5 (ข) ถ้าวัตต์มิเตอร์ W_A W_B W_C อ่านค่าได้ 840 W , 915 W , -175 W ตามลำดับ จงหาค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดของวงจร

<u>วิธีทำ</u> จากสมการ $P_T = W_A + W_B + W_C$

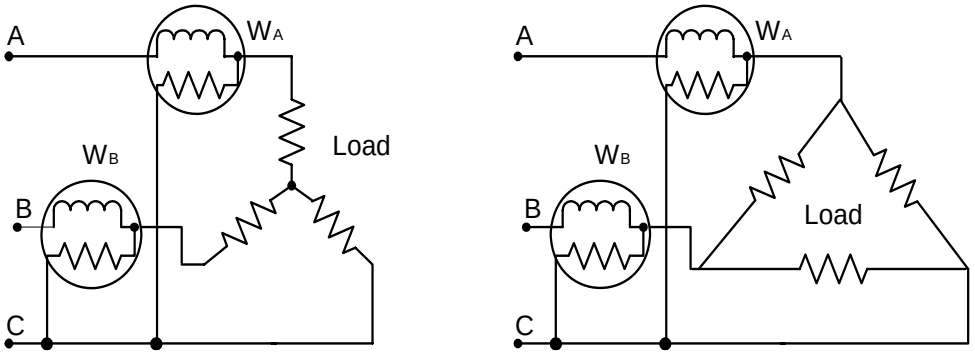
$= 840 + 915 - 175$

$= 1{,}580$ W

$= 1.58$ KW

2.2) การต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 2 เครื่อง วัดกำลังไฟฟ้าระบบ 3 เฟส

การต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 2 เครื่อง ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.6 ใช้วัดกำลังไฟฟ้าที่มีโหลดสมดุล หรือไม่สมดุลก็ได้ แต่กรณีนี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะแบบโหลดสมดุลเท่านั้น



ก. การต่อแบบสตาร์ **ข. การต่อแบบเดลต้า**

รูปที่ 3.6 แสดงการต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 2 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

จากรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นการต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 2 เครื่อง กับโหลดแบบสมดุลที่มีค่าอิมพิแดนซ์ของโหลดเท่ากับ $Z\angle\theta$ ทั้งสามเฟส ถ้าการเรียงลำดับเฟส ของวงจรเป็นแบบ ABC และกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม θ ทำให้เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูป ที่ 3.6 (ข)

เมื่อนำสมการ $P = VI \cos\theta$ มาพิจารณาจะได้ ค่าจากวัตต์มิเตอร์ A และ C จะได้

$$W_A = V_{AB}\ I_A \cos\frac{AB}{A}$$

และ

$$W_C = V_{CB}\ I_C \cos\frac{CB}{C}$$

กำหนดให้

$\angle\frac{AB}{A}$ = มุมต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าที่สาย A กับแรงดันไฟฟ้าที่สาย V_{AB}

$\angle\frac{CB}{C}$ = มุมต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าที่สาย C กับแรงดันไฟฟ้าที่สาย V_{CB}

จากในรูปที่ 3.6 จะได้ว่า

$$\frac{AB}{A} = (30^\circ + \theta) \text{ และ } \quad \frac{CB}{B} = (30^\circ - \theta)$$

แทนค่าในสมการ จะได้

$$W_A = V_{AB} I_A \cos (30 + \theta)$$

และ

$$W_C = V_{CB} I_C (\cos 30 - \theta)$$

จากสมการจึงสรุปได้ว่า การใช้วัตต์มิเตอร์วัดค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดแบบสมดุล วัตต์มิเตอร์ตัวหนึ่งจะอ่านค่าได้ $V_L I_L \cos (30^\circ + \theta)$ และอีกตัวหนึ่งอ่านค่า $V_L I_L \cos (30^\circ - \theta)$ ถ้ากำหนดให้ W_1 และW_2 แทนค่า W_A และ W_C

ในสมการ รวมทั้งหลักการทางตรีโกณมิติ

$$\cos(X \pm Y) = \cos X \cos Y \pm \sin X \sin Y$$

ทำให้ได้

$$W_1 = V_L I_L (\cos 30^\circ \cos \theta - \sin 30^\circ \sin \theta)$$
$$W_2 = V_L I_L (\cos 30^\circ \cos \theta + \sin 30^\circ \sin \theta)$$

จากสมการจะได้

$$W_1 + W_2 = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$
$$W_1 - W_2 = V_L I_L \sin \theta$$

และนำสมการ $W_1 + W_2$ หารด้วยสมการ $W_1 - W_2$ จะได้

$$\tan \theta = \sqrt{3} \left(\frac{W_2 \quad W_1}{W_1 + W_2} \right) \quad \text{.....(3-7)}$$

ในการติดตั้งตำแหน่งของวัตต์มิเตอร์จะติดตั้งที่เฟสคู่ใดคู่หนึ่งก็ได้ ถ้าการเรียงลำดับเป็นแบบ ABC อาจพิจารณาได้ดังนี้

$$\tan\theta = \sqrt{3}\left(\frac{W_C - W_A}{W_C + W_A}\right)$$

ถ้าการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบ CBA จะได้

$$\tan\theta = \sqrt{3}\left(\frac{W_A \quad W_C}{W_A + W_C}\right)$$

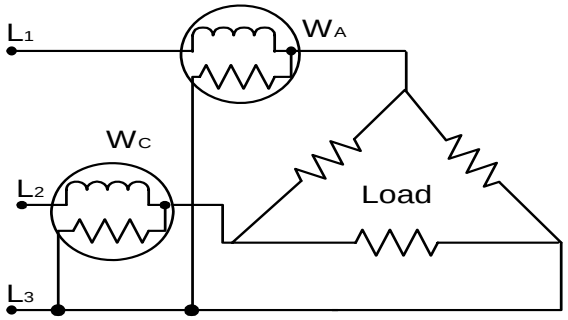
จากสมการช่วยให้หาค่า Power factor ของโหลดสมดุลได้ดังตัวอย่าง

$$\theta = \tan^{1}\sqrt{3}\left(\frac{W_C \quad W_A}{W_C + W_A}\right)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

Power factor = $\cos\theta$ .....(2.30)

ตัวอย่างที่ 3.3 จากรูป 3.7 เป็นการต่อวัตต์มิเตอร์เพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีโหลดสมดุล ถ้าค่าที่อ่านได้มีดังนี้คือ 6717 W 2658 W และการเรียงลำดับเฟสเป็นแบบ CBA จงหาค่า Power factor ของโหลด



การต่อแบบเดลต้า

รูปที่ 3.7 การวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวัตต์มิเตอร์ 2 เครื่องเมื่อโหลดต่อแบบเดลต้า

วิธีทำ จากสมการ

$$\tan\theta = \sqrt{3}\left(\frac{W_C - W_A}{W_C + W_A}\right)$$

$$= \sqrt{3}\left(\frac{2658 - 6717}{2658 + 6717}\right)$$

$$= -0.7499$$

หาค่า มุม θ ได้ดังนี้

$$\theta = \tan^{-1}\sqrt{3}\left(\frac{W_C - W_A}{W_C + W_A}\right)$$

$$= -36.86^\circ$$

ดังนั้น Power factor $= \cos(-36.86^\circ)$

$= 0.8$

3.2. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

กิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์เฟสเดียวแบบอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

เครื่องวัดที่อาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นแบบที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปในเครื่องวัดไฟฟ้ากระแสสลับ และมักจะได้พบเห็นเสมอทั้งในบ้านและในโรงงานอุตสาหกรรม มิเตอร์แบบนี้จะวัดพลังงานไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์ ฮาวร์ หรือกิโลวัตต์ชั่วโมงหลักการทำงานเหมือนกันกับเครื่องวัดไฟฟ้าที่ทำงานด้วยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่เหมือนกันก็คือเคอร์เร้นคอยล์ และโวลท์เตจคอยล์ ส่วนที่แตกต่างกันก็คือในเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าหรือวัตต์มิเตอร์แบบใช้สปริง และเข็มชี้ ส่วนวัตต์ฮาวร์มิเตอร์จะใช้แผ่นเหล็กหน่วง

จากสมการ

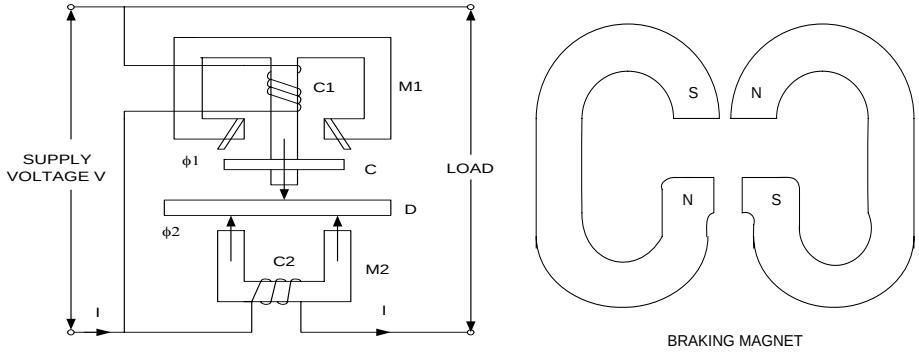
$$W_A = V_{AB}\ I_A \cos\angle\frac{AB}{A} \text{ และ } W_C = V_{CB}\ I_C \cos\angle\frac{CB}{C}$$

3.2.1 หลักการเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

แม่เหล็กหน่วงจะทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้น ในจานอลูมิเนียม ที่หมุนตลอดเวลา แทนที่จะให้จานเคลื่อนไปเป็นมุมหนึ่งมุมใด เหมือนวัตต์มิเตอร์ที่กล่าวมาแล้ว ส่วนประกอบ เครื่องวัดไฟฟ้าแบบนี้ประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ชุด คือแม่เหล็กไฟฟ้า M1 และ M2 แม่เหล็ก M1 แม่เหล็กขนาน (shunt magnet) ขดลวดที่ทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าชุดนี้จะต่อขนานกับแรงดันของโหลด

กระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านขดลวดชุดนี้ จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันของโหลด V แม่เหล็กอีกชุดหนึ่งคือ M2 เรียกว่าแม่เหล็กอันดับ (series magnet) ขดลวดที่ทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าชุดนี้ต่ออันดับกับโหลด กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดชุดนี้จะแปรผันโดยตรงกับกระแสของโหลด แม่เหล็ก M2 นี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi 2$ ขึ้นมา และแม่เหล็ก M1 จะสร้างเส้นแรงเหล็ก ϕ 1 ขึ้นมา

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า $\phi 2$ จะแปรผันโดยตรงกับกระแสของโหลด I และมีเฟสเดียวกับกระแสของโหลด I ด้วยส่วน $\phi 1$ จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันของโหลด V และมุมต่างเฟสกัน 90 องศา ล้าหลังแรงดันของโหลด มุมต่างเฟสอันนี้สามารถที่จะปรับแต่งได้โดยการปรับตำแหน่งของแหวนทองแดง C ที่สวมอยู่แกนกลางของแม่เหล็กขนาน M 1 ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงอินดักชั่นมิเตอร์

เส้นแรงแม่เหล็ก $\phi 1$ ส่วนใหญ่จะเคลื่อนผ่านช่องว่างไปยังแกนด้านข้างของแม่เหล็ก M1 แต่มีเส้นแรงแม่เหล็กอีกจำนวนหนึ่งที่มีจำนวนน้อยที่เคลื่อนที่ผ่านจาน D และจะเป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดบ่ายเบนขึ้น เส้นแรงแม่เหล็ก $\phi 1$ และ$\phi 2$ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในจาน D จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนขึ้นในจาน D ด้วย

ปฏิกิริยาระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองทั้งสองจำนวนกับกระแสไหลวนทั้งสอง จะทำให้เกิดแรงบิดหรือแรงขับขึ้นมาที่จาน D ส่วนแรงหน่วงหรือแรงบิดควบคุมเกิดขึ้นได้จากแม่เหล็กถาวรหนึ่งคู่ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งติดตั้งเป็นแนวเส้นตรงตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของจานและให้มีทิศทางของอำนาจแม่เหล็กของ M1 และ M2 ทั้งนี้เพื่อจะลด ปฏิกิริยาระหว่างอำนาจแม่เหล็กของ M1 และ M2

เมื่อขอบของจาน D เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างขั้ว N และขั้ว S ของแม่เหล็กหน่วงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนเหนี่ยวนำขึ้นในจาน กระแสไฟจำนวนนี้จะทำให้เกิดแรงหน่วงขึ้นซึ่งแรงหน่วง T_B จะมีค่าดังนี้

$$T_B = \frac{\Phi^2 N}{r} \qquad \text{.....(3-9)}$$

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กของเหล็กหน่วง

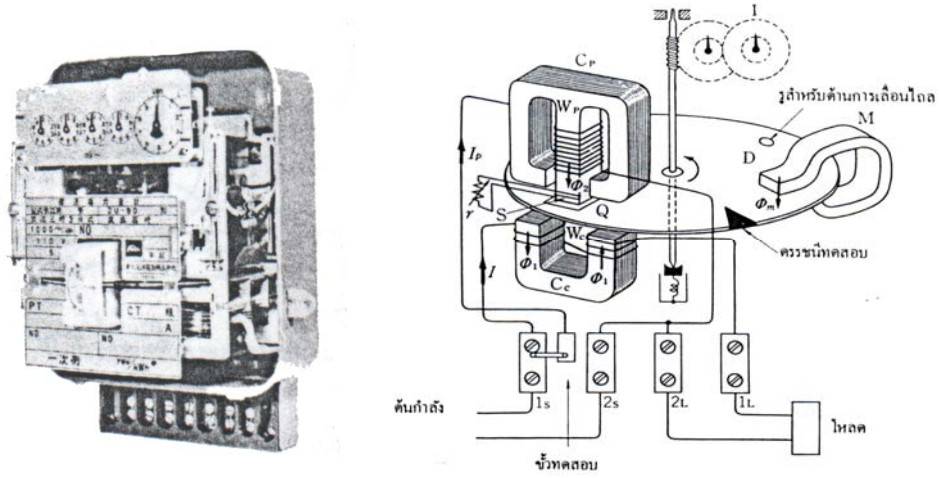
N = ความเร็วของจานหมุน

r = ความต้านทานของวงจรกระแสไหลวนในจาน

$\therefore$

$T_B \ \alpha \ N$ (เพราะว่า ϕ และ r มีค่าคงที่เสมอ)

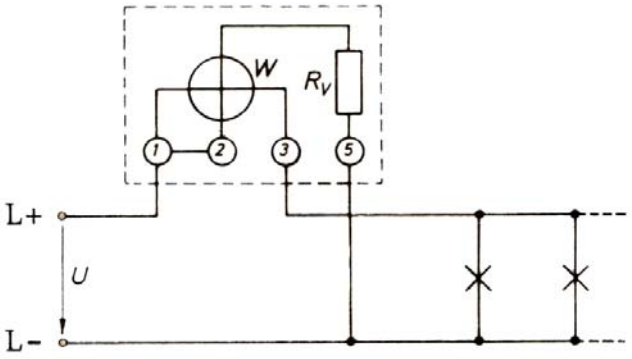
จากรูปที่ 3.9 เป็นส่วนประกอบของกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์แบบหนึ่งเฟส หน้าปัดเป็นแบบเข็มชี้ ส่วนรูป ที่ 3.11 เป็นวงจรการต่อกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์เพื่อใช้งาน



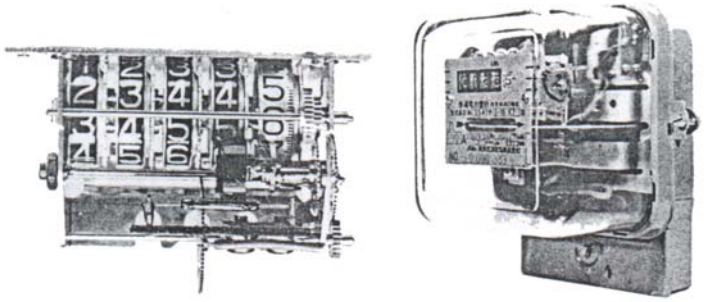
รูปที่ 3.9 แสดงคอยล์แม่เหล็ก จานหมุน แม่เหล็กหน่วง และชุดบอกปริมาณไฟฟ้า

3.2.2. การวัดพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส

1) การวัดพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส



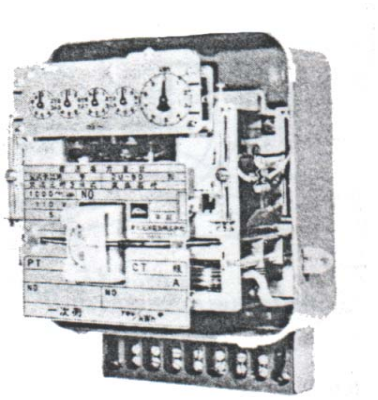
รูปที่ 3.10 แสดงการต่อกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ 1 เฟส



รูปที่ 3.11 ชุดบอกปริมาณของพลังงานไฟฟ้า

ชุดบอกปริมาณ ของพลังงานไฟฟ้า อาจเป็นแบบเข็มชี้ หรือแบบไซโคลมิเตอร์ (Cyclometor) ชุดบอกปริมาณไฟฟ้าแบบเก่าจะประกอบด้วยชุดเฟืองทด (เฟืองตัวเล็กขับเฟืองตัวใหญ่) 4-6 ตัวที่มีเข็มชี้ยึดติดอยู่ทุกตัว ให้เข็มชี้เคลื่อนที่ไปบนหน้าปัทม์ที่มีสเกลบอกไว้ สเกลบนหน้าปัทม์ของเฟืองหรือเข็มชี้เข็มชี้แต่ละตัวจะแบ่งออกไว้เป็น 10 ชุดเท่าๆ กัน

สเกลบนหน้าปัทม์ของเฟืองตัวใหญ่จะมีค่ามากกว่าสเกลบนหน้าปัทม์ของเฟืองตัวเล็ก 10 เท่า คือเมื่อเฟืองตัวเล็กหมุนไปได้ 10 รอบ เฟืองตัวใหญ่อยู่ถัดไปจะหมุนได้ 1 รอบ โดยเพลาของเฟืองตัวเล็กจะเป็นเพลาเดียวกัน กับเพลาของระบบเคลื่อนที่ของเครื่องวัดพลังงาน ดังเช่นรูปที่ 3.12 ลักษณะของกิโลวัตต์ฮาวร์ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์

ได้อธิบายมาแล้วว่า แรงบิดบ่ายเบนหรือแรงขับของเครื่องวัดแบบนี้จะเป็นสัดส่วนกำลังของไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้านั้น ๆ

$$\therefore \quad T_d \ \alpha \ VI \cos \phi \qquad \text{.....(3-10)}$$

เมื่อความเร็วของเครื่องวัดคงที่ (Steady speed)

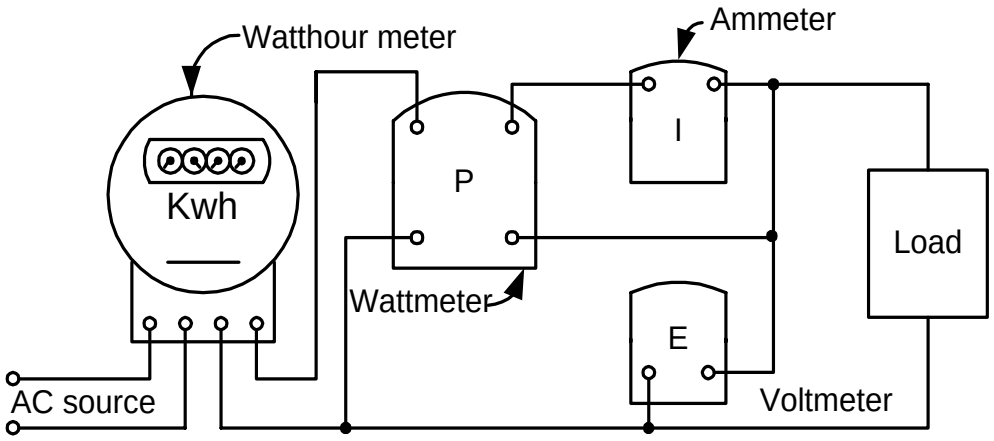
$$T_B = T_d$$

$$\because \quad T_B \ \alpha \ N$$

$$\therefore \quad N \ \alpha \ VI \cos \phi \ \alpha \ \text{กำลังไฟฟ้า (W)}$$

หรือ

$$N \ \alpha \ \frac{V.I. \cos \phi.t}{3600 \times 1000} \qquad \text{RPM}$$



รูปที่ 3.13 แสดงการต่อกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ร่วมกับวัตต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ และโวลท์มิเตอร์

$$\therefore \quad N = K\frac{V.I.\cos\phi.t}{3600\times 1000}$$

$$= K\frac{W.t}{3600\times 1000} \qquad \text{(รอบ)}$$

$$T = \frac{3600\times 1000}{K.W} \qquad \text{(วินาที)}$$

เมื่อ

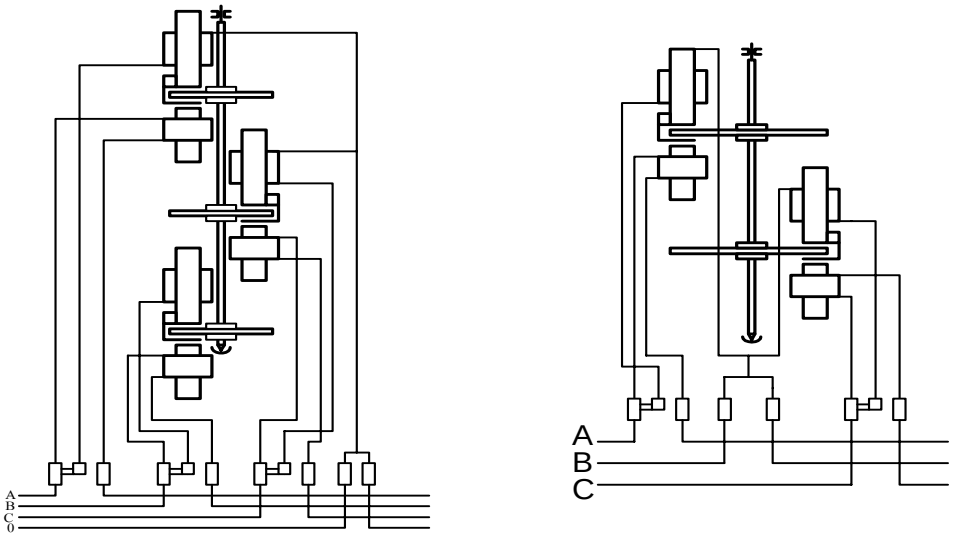
K = ค่าคงที่ของเครื่องวัด (จำนวนรอบ/กิโลวัตต์ชั่วโมง)

ดังนั้นจำนวนรอบทั้งหมดของเครื่องวัดจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานไฟฟ้าของจงจรไฟฟ้านั่นเอง วงจรสำหรับการปรับแต่งสเกลของเครื่องวัดวัตต์อาวร์มิเตอร์ดังรูปที่ 3.14

2. การวัดพลังงานไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส

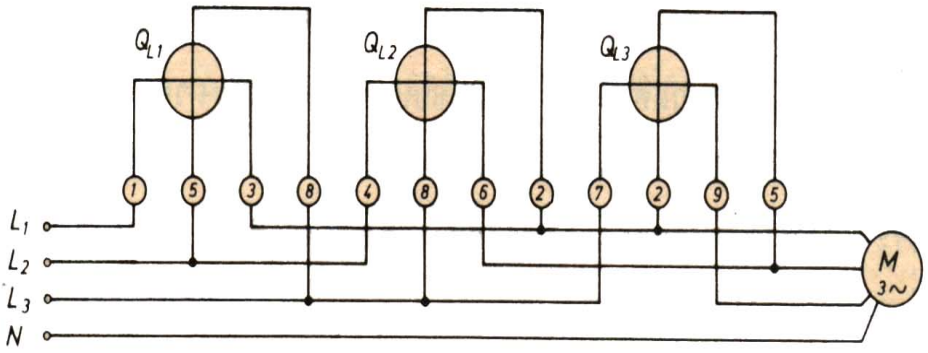
กิโลวัตต์อาวร์มิเตอร์สามเฟสแบบอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

เครื่องวัดแบบนี้เหมือนกับวัตต์มิเตอร์แบบ 1 เฟสที่กล่าวมาแล้วคืออาจจะเอากิโลวัตต์อาวร์มิเตอร์ 1 เฟส 3 ตัวมาประกอบร่วมกันเป็นกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์สามเฟสชนิดจานหมุน 3 จาน ดังรูปที่ 3.14 (ก) หรืออาจเอากิโลวัตต์อาร์วมิเตอร์หนึ่งเฟสสองตัวมาประกอบรวมกันเป็นกิโลวัตต์อาร์วมิเตอร์สามเฟสชนิดจานหมุน 2 จาน ดังรูปที่ 3.14 (ข)



ก. ใช้กิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ 3 ตัว ข. ใช้กิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ 2 ตัว

รูปที่ 3.14 แสดงกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ 3 เฟส



รูปที่ 3.15 การต่อเครื่องวัดไฟฟ้าเพื่อวัดกำลัง ไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยกิโลวัตต์อาวร์มิเตอร์ 3 ตัว

<u>ตัวอย่างที่ 3.4</u> วัตต์อาวร์มิเตอร์ 1 เฟสขนาด 220 โวลท์ กระแสไหลผ่านโหลด 5 แอมป์ตลอดเวลา 4 ชม.ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ 100% ถ้าจานของมิเตอร์หมุนได้ 1056 รอบ จงคำนวณหาค่าคงที่ของมิเตอร์ในหน่วย รอบ/กิโลวัตต์ชั่วโมง ถ้าเพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 อยากทราบว่าจะหมุนกี่รอบในเวลาเท่าเดิม

<u>วิธีทำ</u> ค่าพลังงานที่มิเตอร์อ่านได้ในเวลา 4 ชั่วโมง

$$= \frac{220 \times 5 \times 4}{1000}$$

$$= 4.4 \text{ kWh}$$

$$\therefore \text{ค่าคงที่ในหน่วยรอบ/kWh} = \frac{1056}{4.4} = 240 \text{ รอบ/kWh}$$

เพาเวอร์แฟคเตอร์ 1.0 มิเตอร์หมุนได้ 1056 รอบ

ถ้าเพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 มิเตอร์หมุนได้เท่ากับ

$$1056 \times 0.8 = 844.8 \text{ รอบ}$$

ตัวอย่างที่ 3.5 ค่าคงที่ของวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ขนาด 25 แอมป์ 220 โวลท์ = 500 รอบ/กิโลวัตต์ชั่วโมง ในขณะที่วัดกำลังไฟฟ้าที่โหลดเต็มที่ (full load) 4400 วัตต์ จานหมุนได้ 50 รอบในเวลา 83 วินาที จงคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของมิเตอร์

วิธีทำ พลังงาน 1 kWh มิเตอร์หมุนได้ = 500 รอบ

ถ้า $\frac{4400}{1000}$ kWh มิเตอร์จะหมุน $= \frac{500 \times 4400}{1000}$ รอบ

$= 2200$ รอบ

$\therefore$ ความเร็วใน 1 นาที $= \frac{2200}{60} = 36.7$ รอบ

ถ้าหากมิเตอร์หมุน 50 รอบจะใช้เวลา $= \frac{1 \times 50}{36.7}$ นาที

$= \frac{60 \times 50}{36.7}$ วินาที

$= 81.7$ วินาที

แต่เวลาที่ใช้ในการหมุนจริง ๆ 50 รอบ = 83 วินาที

$\therefore$ มิเตอร์หมุนช้ากว่าความเป็นจริง $= 83 - 81.7$

$= 1.3$ วินาที

$\therefore$ % ความคลาดเคลื่อน $= \frac{83 - 81.7}{81.7} \times 100$

$= 1.59$ %

ความคลาดเคลื่อนของกิโลวัตต์ฮาวมิเตอร์

สำหรับความคลาดเคลื่อนของกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ จะเกิดขึ้นเนื่องจากหลายแห่งด้วยกัน ดังนี้

1. **ความต่างเฟส** ได้กล่าวมาแล้วว่าเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กขนานจะมีมุมต่างเฟสกับแรงดัน 90 องศา แต่ที่จริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น เพราะว่าในขดลวดแม่เหล็กขนานนั้นยังมีค่าความต้านทานรวมอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นที่ค่าเพาเวอร์ศูนย์ แรงบิดจะมีค่าไม่เป็นศูนย์ ความคลาดเคลื่อนอันนี้แก้ไขด้วยการปรับแต่งตำแหน่งของแหวนทองแดง (Shading ring) ที่สวมอยู่บนแกนของแม่เหล็กขนาน ดังนั้นจึงเรียกแหวนทองแดงนี้ว่า เครื่องแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor compensatory)

2. **ความเร็ว** ถ้าใช้เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าไปวัดพลังงานไฟ้าในวงจรที่มีโหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว เครื่องวัดจะมีความเร็วสูงเกินไปจากความเป็นจริง แต่เราก็สามารถปรับความเร็วได้ โดยปรับตำแหน่งของแม่เหล็กหน่วง (braking magnet) ที่เป็นแม่เหล็กถาวรให้เลื่อนเข้าหรือเลื่อนออกจากจานได้ ถ้าปรับตำแหน่งของแม่เหล็กหน่วง ให้เข้าใกล้กับจุดศูนย์ของจานจะทำให้แรงหน่วง (braking torque) ลดลง และถ้าดึงแม่เหล็กออก จะทำให้แรงหน่วงเพิ่มขึ้น (full load adjustment)

พิกัดของวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ หรือกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์เช่นขนาดของแรงดัน กระแส และจำนวนรอบต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงจะมีบอกไว้ที่แผ่นป้าย (name plate)

3. ความเสียดทาน ความเสียดทานเกิดขึ้นได้ เนื่องจากแบริ่งที่รองรับระบบเคลื่อนที่ และเกิดจากชุดบอกปริมาณพลังงานไฟฟ้า แรงเสียดทานหรือความเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้ลดลงได้ โดยทำให้อัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi 1$และ$\phi 2$ มีค่ามากขึ้น โดยใช้แหวนทองแดง 2 ชุดเข้าช่วย แหวนทองแดงนี้จะสวมอยู่ที่ปลายของแกนสองแกนที่อยู่ด้านข้างทั้งสองของแม่เหล็กขนาน

ดังนั้นจะเห็นว่าจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นในแหวนทองแดงทั้งสองนี้ด้วย ผลดันนี้จะทำให้เกิดแรงบิดบ่ายเบนขึ้นที่จานด้วย แรงบิดบ่ายเบนที่ทำให้เกิดขึ้นเพื่อแก้แรงเสียดทานนี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการปรับตำแหน่งของแกนสองแกนที่อยู่ด้านข้างทั้งสองของแม่เหล็กขนาน วิธีแก้ความเสียดทานนี้จะต้องทดลองทำในขณะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับมิเตอร์อย่างเดียวเท่านั้น โดยจะต้องไม่ให้ระบบเคลื่อนที่หรือจานอลูมิเนียมหมุน (no-load adjustment)

4. **เมื่อระบบเคลื่อนที่หมุนช้า ๆ** (creeping or slow) แต่หมุนติดต่อกันเรื่อยไปในขณะที่ยังไม่มีกระแสของโหลด (ป้อนแต่แรงดันให้อย่างเดียว) อาการแบบนี้อาจจะเนื่องจากการแก้แรงเสียดทานไม่ถูกต้อง หรือการสั่น (vibration) จากที่อื่น หรือจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลจากที่อื่น หรือแรงดันที่ป้อนให้สูงกว่าปกติ วิธีแก้ไขคือ เจาะรูสองรูบนจานให้อยู่ในแนวเดียวกันแต่ลุด้านของเพลา การเจาะรูเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กขนานเกิดการบิดเบนตัว (distortion) เมื่อรูหนึ่งบนจานเคลื่อนที่ผ่านขั้วแม่เหล็กขนาน ซึ่งเป็นวิธีการที่ป้องกันไม่ให้จานหมุนเมื่อยังไม่มีโหลด

5. **อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง** แทบจะพูดได้ว่าไม่มีผลต่อการทำงานของเครื่องวัดแบบนี้เลย เพราะทุกอย่างจะเปลี่ยนแปลงไปพร้อม ๆ กันหมด

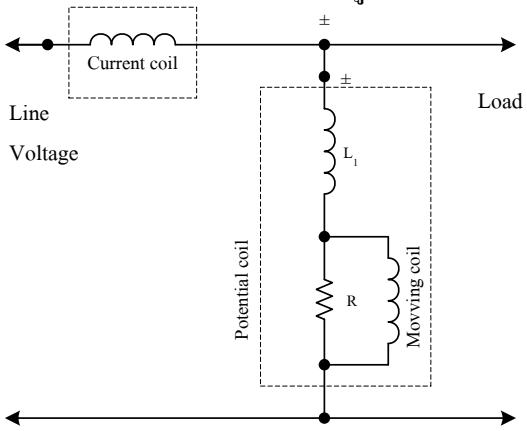
3.3 เครื่องวัดตัวประกอบกำลัง

3.3.1 หลักการวัดตัวประกอบกำลัง

1. การวัดกำลังรีแอกทีฟ

การวัดกำลังรีแอกทีฟ มีความสำคัญในการเฝ้าตรวจโหลด การวัดดังกล่าวทำให้ผู้ทำงานได้ข้อมูลเกี่ยวกับธรรมชาติของโหลด และทำหน้าที่เป็นตัวตรวจสอบสำหรับการวัดตัวประกอบกำลัง เพราะว่าอัตราส่วนของกำลังรีแอกทีฟต่อกำลังจริงคือ ค่าแทนเจนต์ของมุมตัวประกอบกำลัง (Tangent ของมุม ϕ) นอกจากนั้นเราสามารถได้ค่ากำลังปรากฏจากการวัดกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟอีกด้วย

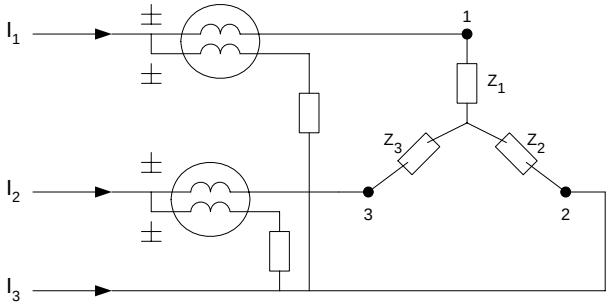
วาร์มิเตอร์หนึ่งเฟส ในวงจรเฟสเดียว จะสามารถวัดกำลังรีแอกทีฟโดยใช้วาร์มิเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบอิเล็กโตรไดนาโมมิเตอร์เช่นเดียวกับวัตต์มิเตอร์ โดยวงจรแรงดันจะมีรีแอกแตนซ์เชิงความเหนี่ยวนำค่ามากต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดเคลื่อนที่แทนความต้านทานค่าสูง เพื่อทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดเคลื่อนที่ตามแรงดันที่ป้อน 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วาร์มิเตอร์

การวัดกำลังรีแอกทีฟโดยวัตต์มิเตอร์สองเครื่อง

จากวงจรการต่อตามรูปที่ 3..17



รูปที่ 3.17 การต่อวัตต์มิเตอร์สองเครื่อง

และจากสมการผลต่างของกำลังไฟฟ้าของวัตต์มิเตอร์ทั้งสองเราจะได้

$$\tan \phi = \frac{\sqrt{3}(P_2 - P_1)}{(P_2 - P_1)} \qquad \text{.....(7-15)}$$

เพราะว่าแทนเจนต์ของมุมการตาม (Lag) ระหว่างกระแสเฟสและแรงดันเฟสของวงจร จะเท่ากับอัตราส่วนของกำลังรีแอกทีฟต่อกำลังจริง ดังนั้น $\sqrt{3}(P_2 - P_1)$ จะแทนกำลังรีแอกทีฟ ดังนั้นสำหรับโหลดแบบสมดุล กำลังรีแอกทีฟจะเท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของผลต่างของค่าที่อ่านจากวัตต์มิเตอร์สองเครื่องที่ใช้ในการวัดกำลัง 3 เฟส โดยวิธีวัตต์มิเตอร์ 2 เครื่อง

ซึ่งจาก $P_2 - P_1 = V_L I_L \sin \phi$ ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่า

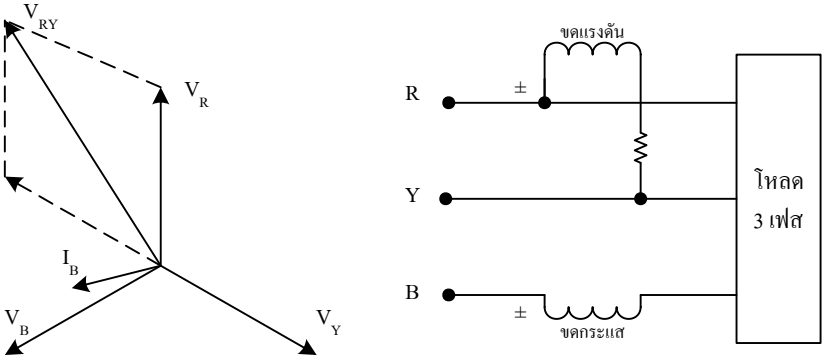
$$\sqrt{3}(P_2 - P_1) = V_L I_L \sin \phi \qquad \text{...(3-11)}$$

การวัดกำลังรีแอกทีฟด้วยวัตต์มิเตอร์หนึ่งเครื่อง โดยการต่อวัตต์มิเตอร์ ดังรูปที่ 3.18 ขณะนี้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดกระแสเท่ากับ I_B และขดลวดแรงดันคือ V_{RY} จากแผนภาพเฟสเซอร์จะเห็นว่ามุมระหว่าง V_{RY} กับ I_B คือ $90 - \phi$ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์คือ

$$P = V_{RY} I_B \cos(90 - \phi) = V_{RY} I_B \sin \phi \qquad \text{.....(3-12)}$$

สำหรับกรณีโหลดแบบสมดุล V_{RY} เท่ากับ V_L และ I_B เท่ากับ I_L ดังนั้น

$$P = V_L I_L \sin \phi \qquad \text{.....(3-13)}$$



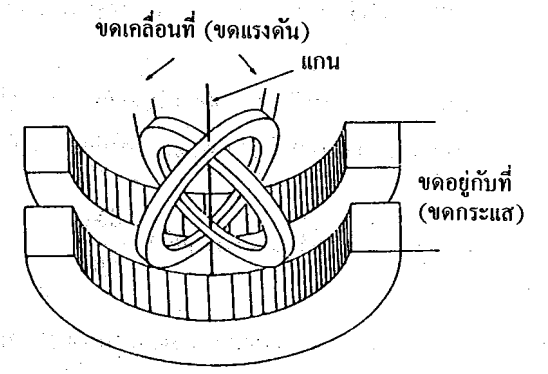
รูปที่ 3.18 การวัดกำลังรีแอกทีฟด้วยวัตต์มิเตอร์หนึ่งเครื่อง

เพราะว่า กำลังรีแอกทีฟทั้งหมดของโหลดเท่ากับ $\sqrt{3} V_L I_L \sin \phi$ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่ากำลังมีแอกทีฟทั้งหมด จะต้องคูณค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ด้วย $\sqrt{3}$

3.3.2 การวัดตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส

เครื่องวัดตัวประกอบกำลัง (Power Factor Meter)

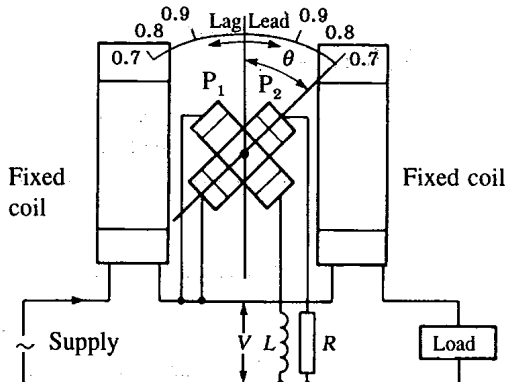
เป็นการดัดแปลงส่วนเครื่องวัดที่เป็นแบบลิเล็กโทรไดนาโมมิเตอร์ โดยติดตั้งขดลวดเคลื่อนที่ 2 ชุด ไขว้คร่อมตั้งฉากซึ่งกันและกันอยู่ในขดลวดที่อยู่กับที่ตามรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 โครงสร้างพื้นฐาน

โดยเหตุที่ไม่ใช้สปริงควบคุม ดังนั้นเมื่อขดลวดส่วนเคลื่อนที่อยู่ในตำแหน่งสมดุล แรงบิดที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเคลื่อนที่แต่ละชุดจะต้องเท่ากัน แต่มีทิศตรงข้ามกัน

การจัดเรียงในลักษณะนี้ จะเป็นพื้นฐานของเครื่องวัดค่าตัวประกอบกำลัง ตามรูปที่ 3.20 ขดลวดเคลื่อนที่ที่ติดตั้งฉากซึ่งกันและกัน ขดหนึ่ง (P_2) ต่ออนุกรมกับ R (Non - inductive Resistor) อีกขดหนึ่ง (P_1) ต่ออนุกรมกับ L ดังนั้นกระแสในขดลวดเคลื่อนที่ทั้งสองจะห่างกัน 90 องศา



รูปที่ 3.20 เครื่องวัดตัวประกอบกำลัง

ชุดขดลวดกระแส (Current Coil) จะต่ออนุกรมกับสาย ดังนั้นกระแสจะ Inphase กับกระแสสาย ถ้าหากตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 กระแสในขดลวดเคลื่อนที่ที่อนุกรมกับ R (P_2) จะ

Inphase กับกระแสในขดลวดกระแส แรงบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงระหว่างขดลวดทั้งสอง (P_2กับ C) จะทำให้ส่วนเคลื่อนที่หมุนไปจนกระทั่งระนาบของขดลวดทั้งสอง (P_2,C) ขนานกัน ที่ตำแหน่งนี้ ระนาบของ P_2 จะตั้งฉากกับสนามเนื่องจากขดกระแส และให้เข็มชี้ชี้ค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1.0 (เพราะว่ากระแสที่เข้าสู่ขดลวดอีกขดหนึ่งจะต่างเฟสไป 90 องศา ดังนั้นจะไม่มีแรงบิดเกิดที่ขดลวดนี้)

ที่ค่าตัวประกอบกำลังเป็นศูนย์ กระแสในขดลวดเคลื่อนที่ที่ต่ออนุกรมกับ L (P_1) จะ Inphase กับกระแสในขดลวดกระแส ทำให้ขดลวดเคลื่อนที่หมุนจะระนาบของขดลวดทั้งสอง (P_1,C) ขนานกัน กระแสในขดลวดเคลื่อนที่ที่ต่ออนุกรมกับ R (P_2) จะต่างเฟสไป 90 องศากับกระแสที่ผ่านขดลวดกระแส ดังนั้นขดลวดนี้จะไม่เกิดแรงบิด

ที่ค่าตัวประกอบกำลังกลาง ๆ การเบี่ยงเบนของเข็มจะขึ้นอยู่กับเฟสค่ามุม $\varnothing$ เนื่องจากไม่มีแรงบิดต้าน ดังนั้น ระบบส่วนเครื่องเคลื่อนที่จะต้องวางแนวตัวเองเพื่อจะไม่ให้มีแรงบิดลัพธ์ ดังนั้น

$$VI\cos\phi\frac{dM1}{d\varphi}+VI\cos\left(\phi\text{-}90^0\right)\frac{dM_2}{d\phi}=0 \qquad \text{.....(3-14)}$$

ถ้ากำหนดให้ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดกระแสกับขด P_1 เป็น

$$M_1 = k_1\cos\theta \text{ .....(3-15)}$$

และถ้ากำหนดให้ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดกระแสกับขด P_2 เป็น

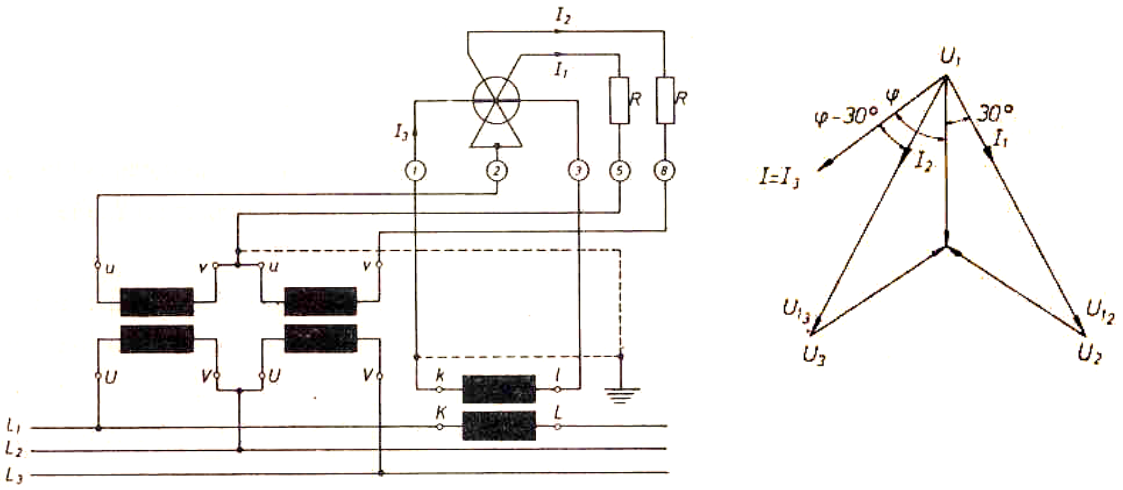
$$M_2 = k_1\sin\theta \text{ .....(3-16)}$$

ดังนั้นตำแหน่งหยุดของเครื่องวัดนี้ เกิดขึ้นเมื่อ

$$\theta = \phi \text{ .....(3-17)}$$

เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้า 3 - เฟส

เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3- เฟส นั้น แตกต่างไปจากเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 – เฟส โดยขดลวดแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้ง 2 ชุด มีเพียงการต่อความต้านทานเท่านั้น วงจรการต่อตามมาตรฐานดังรูปที่ 3.21 ก) $I_1 = I_2$ กระแสไฟฟ้า ไหลผ่านขดลวดแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองและอินเฟสกับ U_{12} และ U_{13} ตามลำดับ U_1 รูปที่ 3.21 ข)



ก) ข)

รูปที่ 3.21 วงจรภายในเครื่องวัดอิเล็กโทรไดนามิคแบบขดลวดไขว้ สำหรับเพาเวอร์แฟคเตอร์ของภาระไฟฟ้า 3 – เฟส ในระบบไฟฟ้า 3 – เฟส ก) การต่อเครื่องวัดทางอ้อม ข) เวคเตอร์ไดอแกรมกระแสไฟฟ้า I_1, I_2 และ I_3

จากสมการของเข็มชี้

$$F(\propto) = \frac{I_2.\cos(\varphi - 30^0)}{I_1.\cos(\varphi + 30^0)}$$

$$= 1.\frac{\cos(\varphi - 30^0)}{\cos(\varphi + 30^0)}$$

จากสมการข้างบนนี้แสดงให้เห็นว่า อย่างไรก็ตามเข็มชี้ของเครื่องวัดยังคงขึ้นอยู่กับมุมต่างเฟสระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถทำการคาลิเบรทสเกลให้อ่านเป็น $\cos\varphi$ ได้เช่นเดียวกัน

แบบฝึกหัดหน่วยที่ 3

1.