บทที่ 6
การวัดปริมาณทางไฟฟ้า

การวัดเป็นการหาค่าทางไฟฟ้าและที่ไม่ใช่ไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดไฟฟ้า ค่าที่วัดได้จะได้รับการบันทึกไว้ หรือนำไปใช้หาค่าอื่นๆ หรือใช้ในการควบคุมเครื่องจักร ค่าทางไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มองไม่เห็น แต่สามารถทราบค่าต่างๆ ได้โดยอาศัยเทคนิคการวัดที่ถูกต้อง

เนื่องจากเราไม่สามารถทราบถึงปริมาณของกระแส แรงดัน และปริมาณอื่นๆ ทางไฟฟ้าได้เพียงแต่จากประสาทสัมผัสโดยตรงของเรา เราจึงจำต้องอาศัยประสบการณ์ทางกายภาพ เพื่อเปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้าเหล่านี้ให้เป็นปริมาณที่เราสามารถรับทราบได้โดยประสาทสัมผัส เช่น เปลี่ยนให้แสดงออกเป็นขนาดของมุม หรือ จำนวนรอบของวัตถุที่หมุนไป เป็นต้น ซึ่งเป็นบางแบบของวิธีการที่ใช้ในการวัดปริมาณทางไฟฟ้า เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า เครื่องวัดทางไฟฟ้า เครื่องวัดทางไฟฟ้าในปัจจุบันได้รับการพัฒนาอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้การวัดค่าที่ถูกต้องและรวดเร็ว

6.1 นิยามหน่วยรากฐานทางไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ได้แก่กระแสไฟฟ้าคงที่ซึ่งเมื่อไหลในตัวนำที่ขนานกันเป็นเส้นตรงสองเส้นที่มีความยาวมากๆ ไม่จำกัด และมีหน้าตัดทรงกลมที่เล็กไม่ต้องคำนึงถึงแล้ว เมื่อวางตัวนำนี้ห่างกัน 1 เมตรในสุญญากาศ จะทำให้เกิดแรงมีค่าเท่ากับ 2×10^{-7} นิวตันต่อเมตรขึ้นระหว่างตัวนำทั้งสอง

ในการอธิบายเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าตลอดจนในการทำการวัดทางไฟฟ้านั้น แต่เดิมได้มีการใช้หน่วยไฟฟ้าระบบต่างๆ หลากหลายระบบ บางระบบก็ใช้โดยนักทฤษฎี และบางระบบก็เป็นเรื่องของประวัติศาสตร์ มีอยู่ระบบหนึ่งซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกในวงการวัดทางวิศวกรรม นั่นก็คือ หน่วยสัมบูรณ์ระบบเอ็มเคเอสเอ (MKSA) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบนานาชาติเอสไอ สำหรับใช้ในการวัดมาตราเมตริก คำว่า MKSA เป็นคำย่อมาจาก **Meter** (เมตร) **Kilogram** (กิโลกรัม) **Second**(วินาที) และ **Ampere**(แอมแปร์) ซึ่งทั้งสี่หน่วยเหล่านี้สามารถใช้วัดปรากฏการณ์

ทางไฟฟ้าได้ทั้งหมด ระบบ MKSA นั้น ค่าของแอมแปร์กำหนดจากการให้เพอร์มิอะบิลิตี้ของระวางเปล่า (μ, permeability of free space) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$

นอกจากนี้ยังมีหน่วยอนุพัทธ์ที่มีชื่อและสัญลักษณ์เฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่

โวลต์ (volt) เป็นหน่วยของความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า มีนิยามว่า **ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดของตัวนำที่มีกระแสคงตัวหนึ่งแอมแปร์ เมื่อมีกำลังที่ใช้ไประหว่างจุดทั้งสองนั้นเท่ากับหนึ่งวัตต์**

$$V = W/A$$

$$W = J/s$$

$$J = Nm$$

$$N = kg\ m/s^2$$

ซึ่ง w = วัตต์

A = แอมแปร์

J = จูล

s = วินาที

kg = กิโลกรัม

m = เมตร

โอห์ม (ohm) เป็นหน่วยของความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีนิยามดังนี้ **ความต้านทานไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดของตัวนำ เมื่อทำให้มีความต่างศักย์ระหว่างจุดทั้งสองคงตัวเท่ากับหนึ่งโวลต์ จะเกิดกระแสในตัวนำหนึ่งแอมแปร์ โดยที่จะต้องไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นในตัวนำอีกเลย**

$$R = V/A$$

ซึ่ง R = ความต้านทาน เป็นโอห์ม

$$V = W/A$$

A = แอมแปร์ , W = วัตต์

ฟารัด (Farad) เป็นหน่วยของความจุไฟฟ้า (capacitance) มีนิยามว่า ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นเท่ากับหนึ่งโวลต์ เมื่อประจุด้วยปริมาณไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์

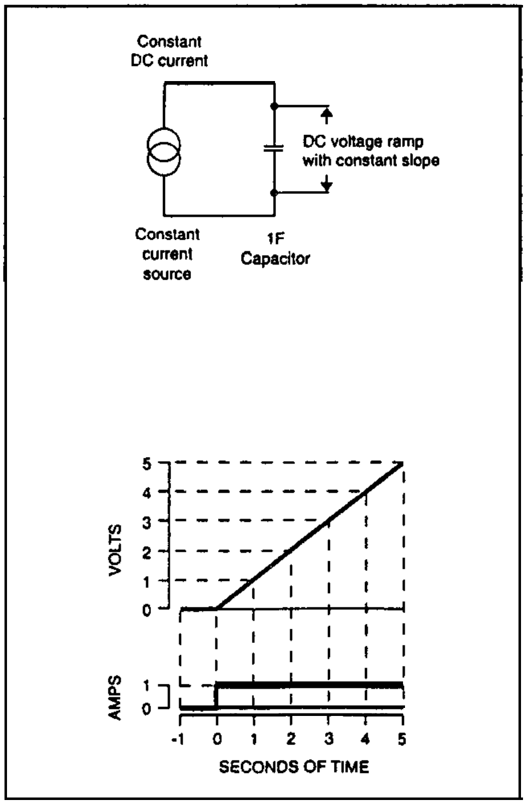
$$1\ F = 1\ C / 1\ V$$

$$1\ C = 1\ A \times 1\ s$$

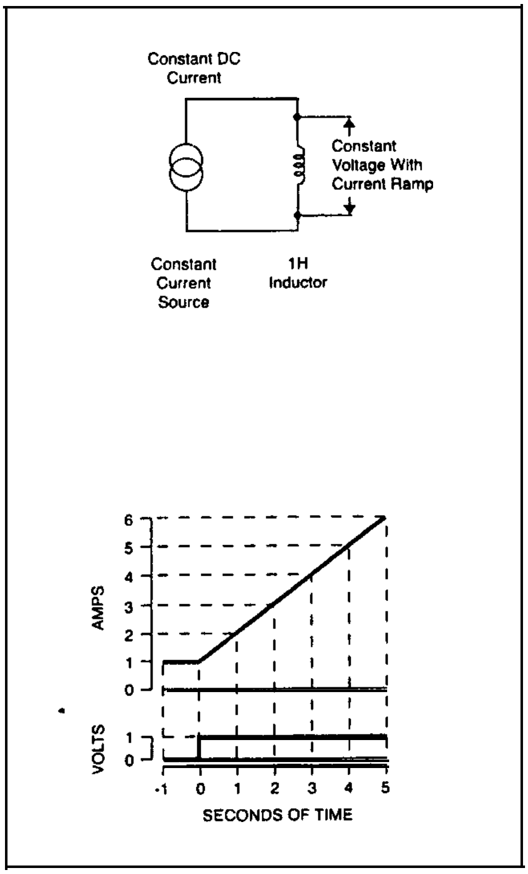
เฮนรี (henry) เป็นหน่วยของความเหนี่ยวนำ (inductance) มีนิยามดังนี้ ความเหนี่ยวนำของวงจรปิดที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสหนึ่งแอมแปร์ต่อวินาทีในอัตราสม่ำเสมอทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าหนึ่งโวลต์

$$1\ H = 1\ Wb / LA$$

$$1\ Wb = 1\ V \times 1\ s$$



รูปที่ ๘.1 นิยามของฟารัด



รูปที่ ๘.2 นิยามของเฮนรี

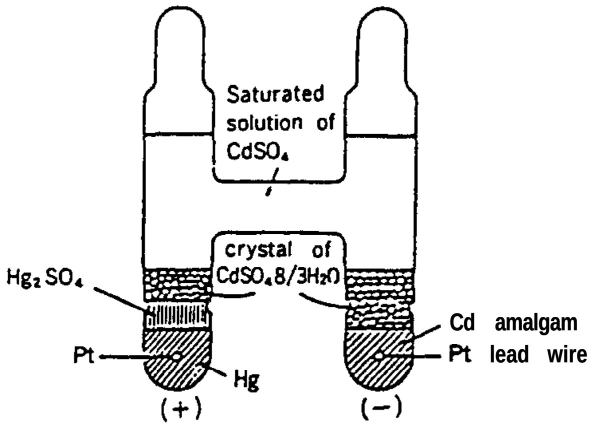
วิธีที่จะตรวจสอบหรือวัดปริมาณไฟฟ้าใดๆ ก็คือ การวัดแรงหรือวัดการเปลี่ยนรูปพลังงานซึ่งเกิดจากปริมาณไฟฟ้านั้นๆ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งปกติอยู่เองที่วิศวกรพยายามที่จะแสดงค่าปริมาณไฟฟ้าด้วยหน่วยเชิงกล (mechanical units) ซึ่งใช้กันมานานแล้วในการประเมินค่าของแรงและพลังงาน (หรืองาน) และระบบของหน่วยไฟฟ้าที่ได้มานี้ ก็ควรจะเข้าด้วยกันได้ (compatible) กับระบบของหน่วยเชิงกล กล่าวคือ ปริมาณ เช่น แรง แรงบิด (torque) กำลังหรืองาน ซึ่งใช้ร่วมกันระหว่างสองระบบนั้น ควรจะแสดงได้ด้วยหน่วยเดียวกันทุกประการ ไม่ว่าต้นตอจะมาจากแหล่งไหนก็ตาม

ด้วยหลักการสำคัญดังกล่าวข้างต้นนี้ ซึ่งได้แก่การเข้าด้วยกันระหว่างหน่วยไฟฟ้ากับหน่วยเชิงกล จึงทำให้หน่วยไฟฟ้าระบบ MKSA ถูกกำหนดขึ้นจากหน่วยเชิงกลรากฐานของความยาว มวลสาร และเวลา ซึ่งได้แก่ เมตร กิโลกรัม และวินาที นั่นเอง ระบบที่เข้าด้วยกันได้ระหว่างหน่วยไฟฟ้ากับหน่วยเชิงกลนั้นได้ถูกนำมาใช้เมื่อ 100 ปีเศษมาแล้ว

6.2 มาตรฐานทางไฟฟ้า

6.2.1 **มาตรฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้า** (Standard of Voltage) มาตรฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีอยู่สองชนิด คือ เซลล์มาตรฐานและแหล่งไฟฟ้าต้นกำลังที่ใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) อย่างไรก็ตาม เซลล์มาตรฐานมีความถูกต้องสูงกว่าซีเนอร์ไดโอดมากในการวัดในห้องปฏิบัติการที่ต้องการความถูกต้องสูง จึงนิยมใช้เซลล์มาตรฐานกันเป็นส่วนใหญ่

1. **เซลล์มาตรฐาน** (Standard Cell)



รูปที่ 6.3 เซลล์มาตรฐานชนิดอิ่มตัว

รูปที่ 6.3 แสดงโครงสร้างของเซลล์มาตรฐาน เป็นกระเปาะรูปเอช (H) ทำด้วยแก้ว โดยมีสายแพลทตินัมใต้ปลายล่างของขา สำหรับต่อเข้ากับวงจรภายนอก ในเซลล์มาตรฐานชนิดอิ่มตัวจะมีผลึกแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) อิ่มตัวอยู่ในเซลล์เพื่อรักษาสภาพอิ่มตัวให้คงไว้ ส่วนชนิดไม่อิ่มตัวนั้นสารละลายจะไม่อิ่มตัวภายใต้อุณหภูมิห้อง

สำหรับเซลล์มาตรฐานชนิดอิ่มตัวนั้น ความแตกต่างระหว่างเซลล์แต่ละตัวมีน้อยมาก แต่เนื่องจากระหว่างขาทั้งสองของเซลล์นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 3.3 ไมโครโวลต์ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ 0.01 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องรักษาเซลล์ให้อยู่ในที่ๆ มีอุณหภูมิสม่ำเสมอมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (temperature coefficient) ประมาณ -40 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส นอกจากนั้นเซลล์ชนิดอิ่มตัวยังมีการสนองตอบช้าในการปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จึงทำให้เกิดฮิสเตอริซิสขึ้นได้ ถ้าเซลล์ได้รับความร้อนขึ้นแล้วกลับเย็นลง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิอย่างใกล้ชิดโดยการใช้อ่างอากาศ (air bath)

โดยปกติสถาบันมาตรฐานแห่งชาติจะวัดเซลล์มาตรฐานชนิดอิ่มตัวได้ละเอียดถึง 0.1 ไมโครโวลต์ที่อุณหภูมิตามกำหนด โดยค่าที่วัดได้มีความถูกต้องถึง 1 ไมโครโวลต์ ในการขนส่งนั้นต้องระวังอย่าให้เซลล์เอียงเกิน 30 องศา โดยทั่วไปจึงใช้วิธีให้คนถือไปเอง

ส่วนเซลล์มาตรฐานชนิดที่ไม่อิ่มตัว มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับเซลล์ชนิดอิ่มตัว เพียงแต่ไม่มีผลึกแคดเมียมซัลเฟตอยู่ และสารละลายก็ไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้อง อัตราการขยับเคลื่อนที่จะมีค่าประมาณ -3 ไมโครโวลต์ต่อเดือน ปกติจะมีตัวจับอิเลกโตรดแต่ละข้างไว้ จึงสามารถจะถือไปไหนมาไหนก็ได้ นอกจากนั้นสัมประสิทธิ์อุณหภูมิก็มีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของชนิดอิ่มตัว คือ มีค่า -3 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส จึงสามารถใช้เซลล์ชนิดไม่อิ่มตัวนี้ภายใต้อุณหภูมิรายรอบได้ โดยปกติความถูกต้องของเซลล์ชนิดไม่อิ่มตัวจะมีค่าระหว่าง ± 0.005%

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเซลล์มาตรฐาน มีดังนี้

$$E_t = E_{20} - 39.9\times10^{-6}(t - 20) - 0.84\times10^{-6}(t - 20)^2$$

โดยที่ E_t = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ t องศาเซลเซียส (หน่วยเป็นโวลต์)

E_{20} = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ 20 องศาเซลเซียส (หน่วยเป็นโวลต์)

ในการพิจารณาว่าเซลล์มาตรฐานตัวใดมีคุณภาพดีหรือไม่นั้น ให้พิจารณาจากตารางที่ 6.1 ดังนี้

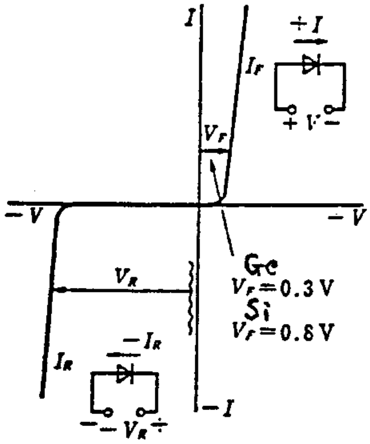
ตารางที่ 6.1 ลักษณะของเซลล์มาตรฐานที่มีคุณภาพดี

รายการ	คุณสมบัติ
ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ 20 องศาเซลเซียส	เป็นกลาง 1.018650 โวลต์ ± 30 ไมโครโวลต์ เป็นกรด 1.018630 โวลต์ ± 30 ไมโครโวลต์
ความคงตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อเวลา	เปลี่ยนแปลงไม่เกินปีละ ±1 ไมโครโวลต์ เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (ค่าแตกต่างระหว่างค่าอ่านได้สูงสุดกับค่าอ่านได้ต่ำสุดในปีหนึ่ง) ±2 ไมโครโวลต์ การเปลี่ยนแปลงขณะทำการวัด ไม่เกิน 1 ไมโครโวลต์
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส	-37.9 ถึง -43.8 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส
การทดสอบอุณหภูมิ	ฮิสเตอริซิสในการขึ้นลงของอุณหภูมิ ที่ 20 องศาเซลเซียส ±5 ไมโครโวลต์ ที่ 25 องศาเซลเซียส ±10 ไมโครโวลต์ การกลับคืนสู่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิมหลังการทดสอบ +5 ไมโครโวลต์ใน 1 สัปดาห์
การทดสอบการปล่อยประจุ	การกลับคืนสู่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิมหลังการปล่อยประจุ ±5 ไมโครโวลต์ใน 2 นาที หลังจากการปล่อยประจุ 3 นาที (กระแสที่ไหล 0.1 ไมโครแอมแปร์

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ
ความต้านทานภายใน	ความต้านทานภายในกระแสตรงไม่เกิน 1,000 โอห์ม อัตราส่วนความต้านทานภายในกระแสตรงกับกระแสสลับไม่เกิน 1.30
การทดสอบอื่นๆ	การเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากการเคลื่อนไหวปกติหรือการสั่นสะเทือนเล็กน้อย ±5 ไมโครโวลต์ ลักษณะภายนอกควรปกติ

2. **ซีเนอร์ไดโอด** ถ้าเรานำเอาคุณสมบัติเบรกดาวน์ด้านหลัง (backward breakdown characteristics) ของซีเนอร์ไดโอด (ทำด้วยซิลิคอน พี-เอ็น จังก์ชัน) มาใช้ จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 6.4

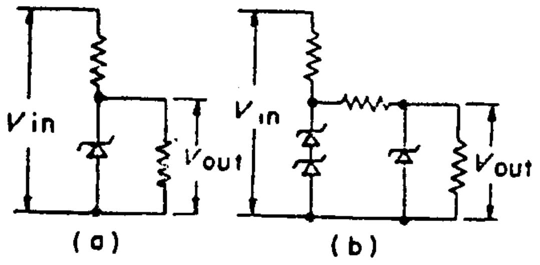


รูปที่ 6.4 คุณลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอดมีอยู่ 2 ประเภทคือ ชนิดเดี่ยวและชนิดชดเชยอุณหภูมิ (ประกอบด้วยไดโอด 2 ตัวขึ้นไป) มาตรฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะใช้ชนิดชดเชยอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีคุณลักษณะ ดังนี้ คือ

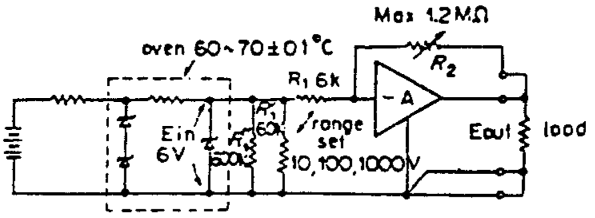
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	+20 ส่วนในล้านส่วนต่อองศาเซลเซียส
แรงเคลื่อนไฟฟ้าซีเนอร์	6-11 โวลต์
กระแสใช้งานปกติ	10 มิลลิแอมแปร์
ความต้านทานไดนามิค	R_z = V/I = 10-30 โอห์ม

ในวงจรที่แสดงในรูปที่ 6.5 สามารถรักษาความคงตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ถึง 1 ส่วนในล้านส่วน ถ้าหากว่าสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ภายใน 30-100 ส่วนในล้านส่วน แต่ความคงตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในระยะยาวและนอยส์ความถี่ต่ำนั้น ย่อมสู้ของเซลล์มาตรฐานไม่ได้ คือ เลวกว่าประมาณ 10 เท่าหรือกว่านั้น



รูปที่ 6.5 วงจรแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่

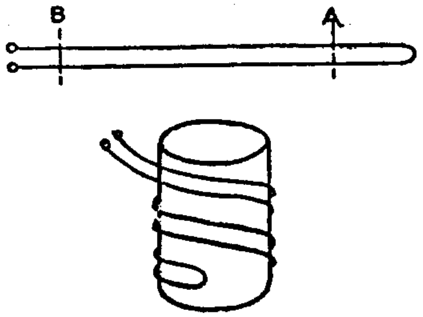
รูปที่ 6.6 แสดงมาตรฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดกับฟีดแบ็คแอมปลิไฟเออร์ ซึ่งให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดถึง 1000 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 100 มิลลิแอมแปร์ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านส่งออก E_o เท่ากับ $-(R_2/R_1)E_1$ และ E_1 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด



รูปที่ 6.6 มาตรฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้าปรับได้

6.2.2 **มาตรฐานความต้านทาน** (Standard of Resistance) วัสดุที่ใช้ในการทำตัวต้านทานมาตรฐาน ได้แก่ เส้นลวดแมงกานิน (manganin wire) ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่าง ทองแดง แมงกานีส และนิเกิล แมงกานินมีคุณสมบัติที่เหมาะสำหรับการทำมาตรฐานความต้านทานมาก เช่น มีความต้านทานจำเพาะสูง (45 ถึง 50 ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร) มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่ำซึ่งมีค่าเกือบเป็นศูนย์ที่จุดซึ่งสามารถเลือกได้ระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อทองแดงที่มีค่าต่ำมาก คือประมาณ -1.5 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส

ตามปกติ ความต้านทานที่ใช้สำหรับการวัดกระแสตรงนั้น มักจะทำด้วยเส้นลวดหุ้มฉนวนที่ทำขึ้นเป็นพิเศษ และพันแบบไบไฟลาร์ (bifilar) รอบแกนเซรามิกหรือโลหะเคลือบเอนาเมล ส่วนความต้านทานที่ใช้สำหรับการวัดกระแสสลับ ใช้วิธีสานเส้นลวดความต้านทานเข้าไปในแบบที่ทำขึ้นพิเศษ และตั้งไว้บนแกนเซรามิกอีกทีหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีแบบอื่นๆ อีกซึ่งใช้เพื่อจุดประสงค์พิเศษ ข้อสำคัญ คือ ต้องพิจารณาเกี่ยวกับเส้นลวดและการหุ้มฉนวนเป็นพิเศษเพื่อให้แน่ใจว่า ค่าจะไม่เปลี่ยนแปลง

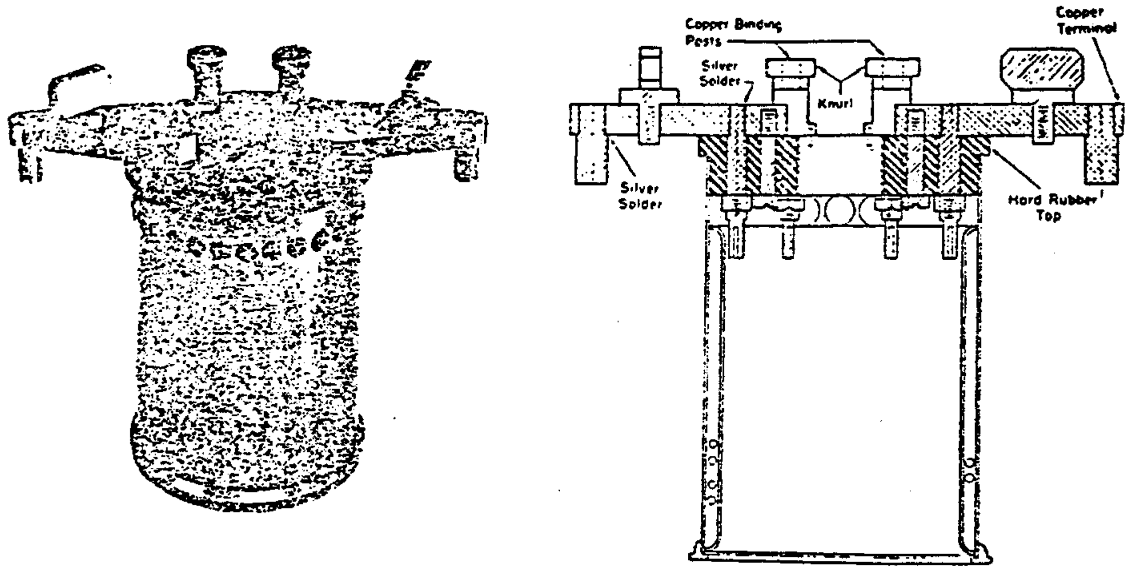


รูปที่ 6.7 การพันแบบไบไฟลาร์

หลังจากกรรมวิธี เพื่อให้ค่าของความต้านทานอยู่ตัวแล้ว ความต้านทานแต่ละตัวควรจะได้รับการปรับให้ได้ค่าความต้านทานที่กำหนด (nominal) และมีความถูกต้องตามต้องการ โดยการเปรียบเทียบกับมาตรฐานใช้งาน หลังจากนั้นความต้านทานแต่ละตัวจะได้รับการบ่ม (aged) แล้วปรับใหม่หรือตรวจสอบใหม่หลังจากใส่เข้าไปในตัวถังเรียบร้อยแล้ว

เนื่องจากในการใช้กล่องความต้านทานหรือแชนรีโอสตัทของวีทสโตนบริดจ์ ความต้านทานทั้งหมดของแท่งขั้วต่อ นอกจากจะรวมค่าของความต้านทานแล้ว ยังรวมถึงการต่อสายภายในและหน้าสัมผัสของสวิทช์ด้วย ความต้านทานที่ดีจึงต้องออกแบบโครงสร้างให้สามารถลดความต้านทานของเส้นลวดต่อและหน้าสัมผัสลงได้ด้วย

มาตรฐานหนึ่งโอห์มแบบโทมัส เป็นมาตรฐานชั้นมูลฐานสำหรับใช้ในการรักษาค่าของโอห์ม มีความถูกต้องหนึ่งส่วนในล้านส่วน ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย ดร. เจ แอล โทมัส แห่งสถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (National Bureau of Standard) สำหรับใช้เป็นมาตรฐานอุเทศในห้องปฏิบัติการที่ต้องการความถูกต้องสูงมากเป็นพิเศษ ตัวต้านทานทำด้วยลวดแมงกานิน และบรรจุอยู่บนทรงกลมทองเหลืองที่หุ้มฉนวนช่องว่างทรงกลมระหว่างตัวทรงกระบอกสำหรับใส่ลวดความต้านทานกับเปลือกทองเหลืองที่ห่อหุ้มอยู่ภายนอกนั้น ใช้วิธีเชื่อมปิดสนิทไม่ให้มีอากาศเข้าไปได้ ส่วนเส้นลวดนั้นนำออกสู่ภายนอกโดยผ่านซีลโลหะกับแก้ว ค่าวัดที่ให้นั้น ปกติให้ละเอียดจนถึง 1 ส่วนใน 10 ล้านส่วน (0.00001%) ที่ 25 องศาเซลเซียส ตัวมาตรฐานจะได้รับการปรับให้มีค่าหนึ่งโอห์มเป็นตัวต้านทานที่มี 4 ขั้ว (terminals) คือ ขั้วกระแสสองขั้วและขั้วศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองขั้ว



รูปที่ 6.8 ความต้านทานมาตรฐานแบบโทมัส 1 โอห์ม

ข้อกำหนดรายละเอียด มีดังนี้

ความต้านทาน 1 โอห์ม

ขีดจำกัดของความคลาดเคลื่อน ปรับให้ได้ค่าภายใน 5 ส่วนในล้านส่วน หรือ 0.0005% ของค่าที่กำหนด ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าวัดที่สถาบันมาตรฐานแห่งชาติวัดได้นั้นบอกได้ละเอียดถึง 1 ส่วนใน 10 ล้านส่วน หรือ 0.00001% และมีความถูกต้องถึง 1 ส่วนในล้านส่วน

ความคงตัว ปกติการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน จะไม่มากกว่า 1 ส่วนในล้านส่วนต่อปี

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ผู้ผลิตมักจะบอกค่าแอลฟากับเบต้าที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความต้านทานของมาตรฐานนี้ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิที่ใช้ในขณะสอบเทียบ

กระแสที่กำหนด 0.1 แอมแปร์เมื่อจุ่มอยู่ในน้ำมันที่มีการกวนอยู่ตลอดเวลา

การต่อสาย มี 4 ขั้วสำหรับกระแส 2 ขั้ว และความต่างศักย์ 2 ขั้ว ขั้วต่อกระแสและความต่างศักย์มีความต้านทานประมาณ 0.0011 ถึง 0.0013 โอห์ม

ขนาด กว้าง 7 นิ้ว สูง 6.5 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 นิ้ว

สำหรับมาตรฐานความต้านทานค่าสูงๆ นั้น เส้นลวดที่ใช้จะเป็นเส้นลวดโลหะผสมนิเกิล-โครเมียม-อะลูมิเนียม (Ni-Cr-Al) ซึ่งมีความต้านทานจำเพาะสูง คือประมาณ 133 ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร และมีลักษณะเป็นความต้านทานสามขั้ว คือ ขั้วหนึ่งจะเป็นขั้วการ์ด (guard)

6.2.3 มาตรฐานความจุและความเหนี่ยวนำ

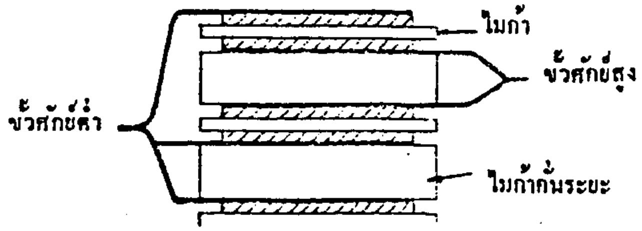
6.2.3.1 **มาตรฐานความจุ** (Standard of Capacitance) ในระยะหลังๆ นี้ได้มีการสร้างตัวจุคำนวณได้ (calculable capacitor) โดยอาศัยหลักทฤษฎีของทอมป์ซันกับแลมปาร์ค (Thompson and Lampard) แห่งออสเตรเลีย ซึ่งทำให้สามารถทราบค่าของความจุ (capacitance) ได้โดยการวัดค่าความยาวอย่างละเอียดเพียงค่าเดียว ดังนั้นการหาค่าตัวจุจากแม็กซ์เวลล์-คอมมิวเตเตอร์บริดจ์ ซึ่งกำหนดค่าของความจุจากหน่วยของเวลาและความต้านทาน จึงได้เลิกใช้ไป การใช้ตัวจุคำนวณค่าได้นั้น จะสามารถให้ค่าวัดของความจุได้ถึง 0.1 ปิโคฟารัด (pF) โดยมีความถูกต้อง 0.25 ส่วนในล้านส่วน จากค่า 0.1 ปิโคฟารัดนี้เราสามารถจะยืดค่าจนถึง 1 ไมโครฟารัด (μF) ได้ ส่วนการเปรียบเทียบค่าความจุทำได้โดยใช้ทรานซฟอร์มเมอร์บริดจ์ (transformer bridge)

มาตรฐานความจุมีอยู่หลายชนิด ดังนี้

1. **ตัวจุไดอิเล็กตริกอากาศหรือแก๊ส** มีข้อดีที่มีการสูญเสียน้อยและมีค่าฉนวนสูงตลอดจนไม่เปลี่ยนค่าตามความถี่ อย่างไรก็ดีชนิดไดอิเล็กตริกอากาศนั้นมีข้อเสียที่มีค่าไม่คงตัว มีขนาดใหญ่เทอะทะและราคาแพง ส่วนชนิดไดอิเล็กตริกแก๊สใช้แก๊สไนโตรเจนแห้งซีลกันอากาศและความชื้น จึงมีค่าคงตัวมากและเหมาะเป็นมาตรฐานถ่ายทอดค่า

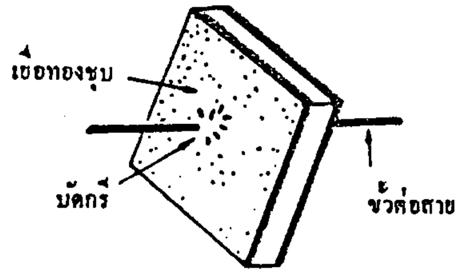
2. **ตัวจุไมก้า** ใช้เงินชุบบนผิวหน้าทั้งสองด้านของแผ่นไมก้าตามรูปที่ 6.9 ตัวจุชนิดนี้มีความคงตัวดีมากและมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิประมาณ 10 ส่วนในล้านส่วนต่อองศาเซลเซียส และค่าความจุเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ ไม่กี่ส่วนในล้านส่วนต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลต์ จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นมาตรฐานตัวจุที่มีค่าปานกลาง ตั้งแต่ 100 ปิโคฟารัด จน

ถึง 1 ไมโครฟารัด

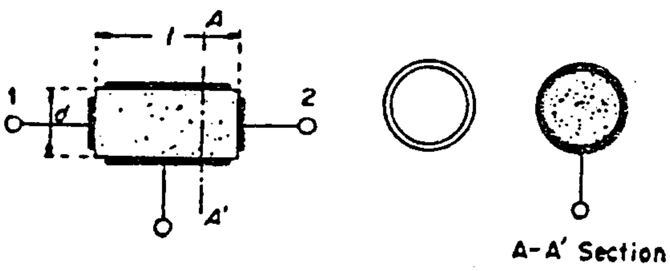


รูปที่ ๖.๙ ตัวจุ เงิน-ไมก้า

3. **ตัวจุฟิวซ์คว็อทซ์** ฟิวซ์คว็อทซ์ (fused quartz) เป็นสารที่คงตัวทั้งเชิงฟิสิกส์และเชิงเคมี และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นไดอิเล็กตริกได้ดี ชนิดแผ่น (plate) แสดงไว้ในรูปที่ 6.10 ซึ่งมีเยื่อบางๆ ของทองระเหยชุบอยู่บนแผ่นฟิวซ์คว็อทซ์ทั้งสองด้าน และมีค่าความจุตั้งแต่ 2-3 ปิโคฟารัดจนถึง 200 ปิโคฟารัด ถ้าต้องการมาตรฐานที่มีค่าต่ำกว่า 10 ปิโคฟารัด ก็ใช้ชุบอิเล็กโตรดการ์ดเข้าไปอีกขั้วหนึ่งดังในรูปที่ 6.11 ความถูกต้องของตัวจุฟิวซ์คว็อทซ์ ประมาณ 0.01%

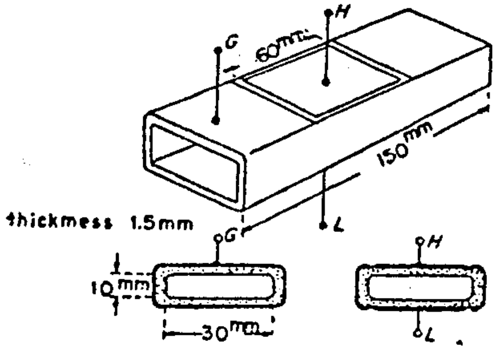


รูปที่ ๖.๑๐ ตัวจุฟิวซ์คว็อทซ์ชนิดแผ่น



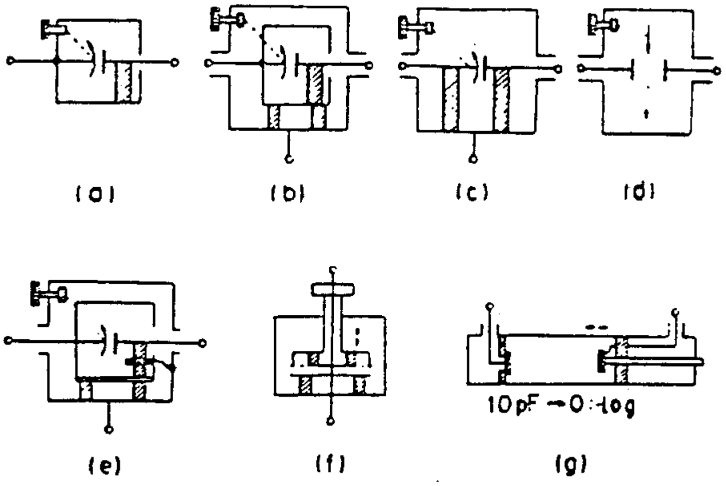
รูปที่ ๖.๑๑ ตัวจุฟิวซ์คว็อทซ์พร้อมการ์ด

ส่วนตัวจุที่ทำจากท่อฟิวซ์คว็อทซ์ (Fused Quartz Tubing Capacitor) ตามรูปที่ 6.12 มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำมาก คือน้อยกว่า 2 ส่วนในล้านส่วนต่อองศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุก็น้อยกว่า 1 ส่วนในล้านส่วนต่อปี จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวจุมาตรฐานค่าน้อยๆ ที่ต้องการความถูกต้องสูง



รูปที่ 6.12 ตัวจุท่อฟิวซ์คว็อทซ์

4. **ตัวจุเปลี่ยนค่าได้** ในวงจรวัด บางครั้งจำเป็นต้องใช้ความจุที่เปลี่ยนค่าได้อย่างต่อเนื่องกัน ตัวจุเปลี่ยนค่าได้จึงมีประโยชน์และมีหลายชนิด ดังรูปที่ 6.13



รูป 6.13 ตัวจุเปลี่ยนค่าได้

6.2.3.2 มาตรฐานความเหนี่ยวนำ (Standard of Inductance) ที่มีค่าแน่นอน มีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดพันหลายชั้น (multi-layer) กับชนิดพันแกนกลม (toroidal) ตามรูปที่ 6.14 ชนิดพันแกนกลมนั้นพันยากแต่ให้ความคงตัวดีและมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำ โดยปกติค่าความเหนี่ยวนำกับค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไหลวนและความจุไฟฟ้าของขดลวดที่พันอยู่ ตลอดจนการฉนวนไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นถ้าขนาดหรืออุณหภูมิเปลี่ยนไป ค่าความเหนี่ยวนำก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

(a) Multilayer (b) Toroidal

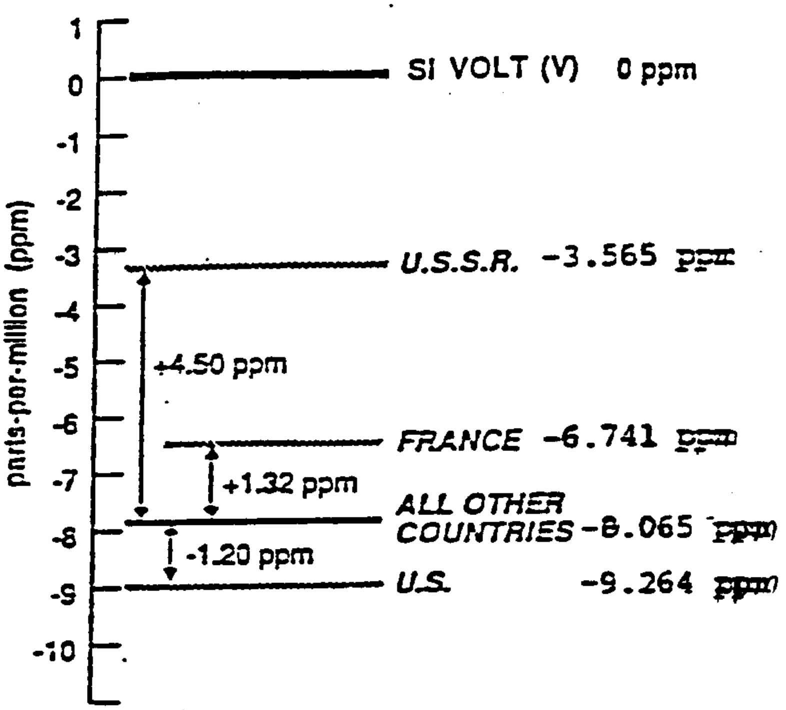
รูปที่ 6.14 ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าแน่นอน

เนื่องจากมีการเปลี่ยนปริมาณของหน่วยวัดทางไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างประเทศโดยยึด SI เป็นหลัก จะมีผลใช้บังคับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 เป็นต้นไป ประเทศต่างๆ ทั่วโลกที่มีปริมาณของหน่วยวัดทางไฟฟ้าแตกต่างกันจำเป็นต้องปรับมาตรฐานอ้างอิงทางไฟฟ้าของตนเสียใหม่ เพื่อให้มีหน่วยวัดเดียวกันจะได้มีปริมาณเท่ากันทุกประเทศทั่วโลกตามเวลาที่กำหนด

ปริมาณของหน่วยวัดทางไฟฟ้าที่ใช้อยู่ตามหน่วยงานต่างๆ ในประเทศไทยต่างก็ได้รับการถ่ายทอดมาตรฐานมาจากมาตรฐานแห่งชาติของหลายประเทศ เช่น อเมริกา อังกฤษ ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย เป็นต้น ซึ่งประเทศต่างๆ เหล่านี้ ต่างก็รักษามาตรฐานของปริมาณการวัดแตกต่างกันอยู่แล้ว ทำให้เป็นการยากที่จะกำหนดว่าประเทศไทยควรจะเปลี่ยน

แปลงปริมาณการวัดทางไฟฟ้าหน่วยใดด้วยปริมาณเท่าใด

ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางของแต่ละหน่วยงาน เพื่อจะใช้เป็นหลักในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงข้างต้น จะขอยกตัวอย่างเฉพาะผู้ที่รักษาหน่วยวัดมาตรฐานตามมาตรฐานอเมริกาของ NIST หรือ NBS เดิมเป็นหลักต่อไป



รูปที่ 6.15 แสดงค่าความแตกต่างของโวลต์ของประเทศต่างๆ เมื่อเทียบกับของ SI

ตารางที่ 6.2 **แสดงความแตกต่างของหน่วยทางไฟฟ้าหลังวันที่ 1 มกราคม ค.ศ.1990 ตาม SI**

หน่วย	อเมริกา	ประเทศอื่นๆ
โวลต์	+ 9.264 ppm	+ 8.065
โอห์ม	+ 1.69 ppm	+ 0.09
แอมแปร์	+ 7.57 ppm	+ 7.975
วัตต์	+ 16.84 ppm	+ 16.04
ฟารัด	- 0.14 ppm	-

1. การเปลี่ยนแปลงค่าโวลต์ (volt)

1.1 การเปลี่ยนแปลงค่า Josephson constant ของ NIST จาก Kj 483 593.4 GHz/V เป็นค่าใหม่ Kj 483 597.9 GHz/V ตามข้อตกลงระหว่างชาติ ทำให้ปริมาณมาตรฐานอ้างอิงของหน่วยวัดโวลต์ที่ NIST มีค่าต่ำลง 9.264 ppm เป็นผลให้ voltage อ้างอิงของผู้ใช้งานที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 30 ppm ต้องได้รับการกำหนดค่าใหม่ให้ถูกต้อง การเปลี่ยนแปลงค่าใหม่นี้จะต้องกระทำกับ voltage อ้างอิงที่ทั้งสามารถปรับค่าได้ เช่น Solid State Voltage Reference และที่ปรับค่าไม่ได้ เช่น เซลล์มาตรฐาน (Standard Cell) ซึ่งจะมีวิธีการแตกต่างออกไป

1.2 การเปลี่ยน Voltage ของ Standard Cell Standard

Cell ที่ใช้เป็น voltage มาตรฐานอ้างอิงไม่สามารถจะปรับเปลี่ยนค่าได้ การกำหนดค่าใหม่ให้สอดคล้องกับค่าโวลต์ที่เปลี่ยนไปจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด ซึ่งวิธีการเปลี่ยนค่าโวลต์ใหม่ของ Standard Cell นี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

1 V (NBS-72) = 0.999 990 736 V (NIST-90)

ในกรณีของ Standard Cell อันหนึ่ง ซึ่งมีค่า 1.018 120 91 V ก่อนวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 หลังจากวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 เซลล์นี้จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็น

1.018 120 91 V (NBS-72) x 0.999 990 736 V (NIST-90)

= 1.018 111 48 V (NIST-90)

จะเห็นว่า voltage ค่าใหม่ของ Standard Cell ที่ยกตัวอย่างมานี้จะลดลงประมาณ 9.43 UV โดยไม่ทำให้ความไม่แน่นอน (uncertainty) ของเซลล์ผิดไปจากเดิมแต่อย่างใด

ในทางปฏิบัติ voltage ของ Standard Cell สามารถกำหนดใหม่ได้ใน 2 กรณี กล่าวคือ

1.2.1 **เมื่อไม่คำนึงถึง Drift Rate** ในกรณีเช่นนี้ท่านจะใช้ค่าของ voltage ของ cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ผ่านมาเสมอ โดยไม่นำ Drift Rate มารวมด้วย ดังตัวอย่าง เช่น เมื่อวันที่ 1 เมษายน ค.ศ. 1989 Standard Cell ของท่านได้รับการรับรอง และมีค่า 1.018 121 66 V (NBS-72) ท่านได้ใช้ค่า voltage นี้มาตลอดจนถึงวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 ท่านเพียงแต่ใช้วิธีดังกล่าวมาแล้วคำนวณหาค่า voltage ใหม่ได้เลย ซึ่งจะเป็นผลให้ Cell มีค่า voltage ลดลงประมาณ 9.43 UV

1.2.2 **เมื่อนำ Drift Rate มารวมด้วย** เพื่อให้ได้ค่า voltage ของ Standard Cell ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาจำนวนมาก ได้นำ Drift Rate ระหว่างปีมาคำนวณหาค่า voltage ของ Cell ณ วันที่ใช้งานจริงด้วย ดังนั้นเมื่อจะกำหนดค่าของ Cell ใหม่ในวันที่ 1 มกราคม ค.ศ.1990 ก็สามารถกระทำได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

สมมติว่าท่านได้นำ Cell ของท่านไปสอบเทียบที่ NBS เมื่อวันที่ 1 เมษายน ค.ศ.1989 และได้รับการรับรองว่ามี voltage 1.018 121 66 V (NBS-72) และตามประวัติพบว่า Cell นี้มี Drift 1 ppm/ปี ดังนั้น เมื่อวันที่ 1 เมษายน ค.ศ.1990 Cell นี้จะมี voltage

1.018 121 66 V (NBS-72) - 1 UV/ปี x 0.75 ปี = 1.018 120 91 V(NBS-72)

หลังจากนั้นจะเป็นการคำนวณ voltage ใหม่หลังปรับค่าแล้วตามตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.2

1.3 การเปลี่ยนค่ามาตรฐานอ้างอิงของ Solid State Reference

แรงเคลื่อนของ Solid State Reference สามารถปรับแต่งค่าได้บ้างตามข้อกำหนดของผู้ผลิต การปรับ voltage ของ Solid State Reference **เพิ่มขึ้น** 9.264 ppm ก็จะได้ค่า voltage ใหม่ที่ถูกต้องตามต้องการ

แต่ขอแนะนำไม่ให้ใช้วิธีดังกล่าวกับ Solid State Reference ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

1.3.1 การปรับค่า voltage ของ Solid State Reference จะเป็นสาเหตุให้ voltage ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องต่อไปหลังจากการปรับแต่งแล้วเนื่องจากการไม่อยู่ตัวของโพเทนชิโอมิเตอร์ ดังนั้นจึงเป็นการยากอย่างยิ่งที่จะปรับ voltage ให้ได้ค่าที่แน่นอนตามต้องการ อีกทั้งยังต้องคอยตรวจสอบการ drift อยู่ตลอดเวลาอีกด้วย

1.3.2 Solid State Reference ทุกแบบไม่มีที่ปรับให้กว้างพอที่จะเพิ่มค่า voltage ได้ตามต้องการ ยกตัวอย่าง มีอยู่แบบหนึ่งซึ่งยอมให้ปรับได้เพียง ± 5 ppm เท่านั้น และถึงแม้ว่าบางแบบจะมีช่วงกว้างพอ แต่ขณะนี้อาจถูกปรับให้เกือบสุดไปทางด้านใดด้านหนึ่งแล้วก็ได้

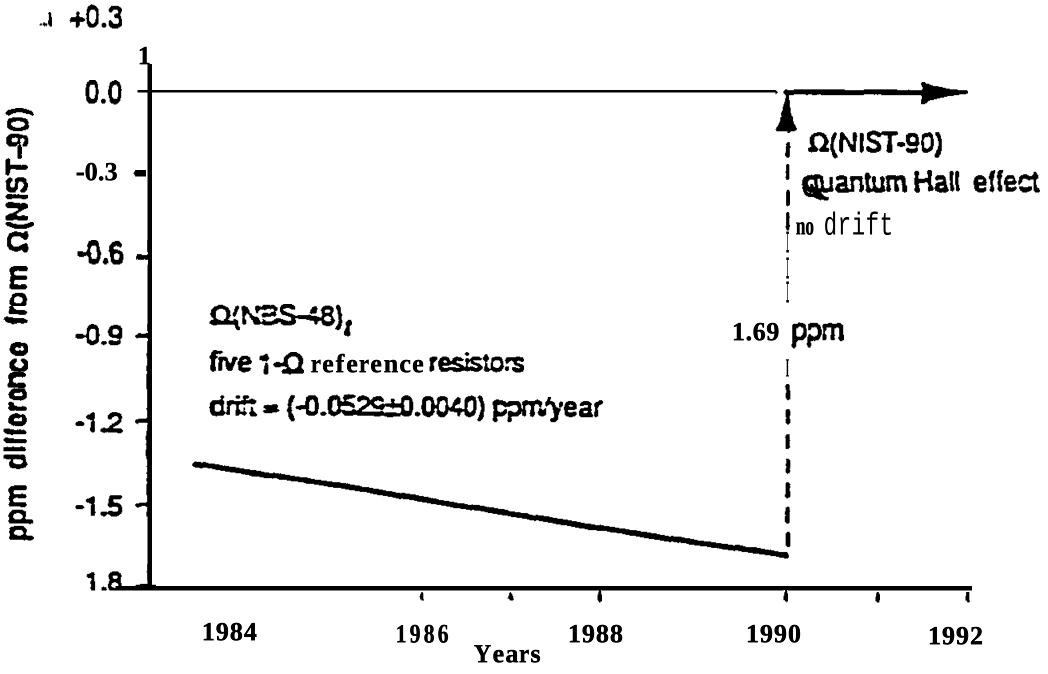
ดังนั้น จึงแนะนำให้ใช้วิธีกำหนดค่าของ voltage เช่นเดียวกับที่ใช้ใน Standard Cell โดยการเอาค่า voltage ของ Solid State Reference ตาม V (NBS-72) คูณด้วย 0.999 990 736 เพื่อให้ได้ค่า voltage วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 ตาม V (NIST-90)

10.000 054 3 V (NBS-72) x 0.999 990 736 V (NIST-90)/V (NBS-72)

= 9.999 961 7 V (NIST-90)

2. การเปลี่ยนแปลงค่าโอห์ม (ohm) ปริมาณหน่วยวัดความต้านทานซึ่งถูกนำไปอ้างอิงกับ Quantum Hall Effect (QHE) โดยกำหนดให้ Von Klitzing Constant, R_k-90 ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าคงที่ h/e^2 มีค่าเท่ากับ 25812.807 โอห์ม ค่า R_k-90 ใหม่นี้จะมีผลให้ค่าความต้านทานอ้างอิงของอเมริกามีค่าต่ำลง 1.69 ppm ดังนั้น ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990

1 Ω (NBS-48) = 0.999 998 31 Ω(NIST-90)



รูปที่ 6.16 US ohm ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

สำหรับประเทศอื่นๆ เช่น ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น อังกฤษ เหล่านี้ ซึ่งรักษาค่าความต้านทานโดยอ้างอิง Calculable cross capacitor ซึ่งอ้างอิงมาจากหน่วยความยาวตาม SI อยู่แล้ว จะมีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงจากเดิมน้อยกว่า 0.1 ppm ซึ่งน้อยมาก จนไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าใหม่แต่อย่างใด

สำหรับผู้ที่รักษามาตรฐานความต้านทานตาม NBS และมีมาตรฐานที่มีความไม่แน่นอนน้อยกว่า 20 ppm ก็สามารถกำหนดค่าความต้านทานมาตรฐานอ้างอิง

3. **ความจุ (capacitance) และความเหนี่ยวนำ (inductance)** ห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศต่างๆ ได้ใช้ Calculale cross capacitor เพื่อกำหนดค่าความจุตาม SI ฟารัดอยู่แล้ว อาจมีบางแห่งที่ผิดจาก SI บ้าง แต่น้อยกว่า 1 ppm ดังนั้น ความจำเป็นในการปรับแต่งในขณะนี้สำหรับประเทศไทยจึงไม่จำเป็นแต่อย่างใด สำหรับค่าความเหนี่ยวนำซึ่งได้มาจากค่าตัวจุ (capacitor) และตัวต้านทาน (resistor) อ้างอิง จะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 3.24 ppm แต่ค่าตัวเหนี่ยวนำมาตรฐาน (standard inductor) ทั่วๆ ไปจะผิดพลาดประมาณ 200 ppm การเปลี่ยนแปลงเพียง 3.24 ppm จะไม่มีผลแต่อย่างใดเช่นกัน

6.3 การวัดทางไฟฟ้า

6.3.1 การวัดกระแสไฟฟ้า เครื่องมือวัดจะมี เครื่องมือวัดไฟตรงและเครื่องมือวัดไฟกระแสสลับ

เครื่องมือวัดไฟตรง (DC Ammeter) แบ่งออกได้ ดังนี้

1. กัลวานอมิเตอร์ (Galvanometer) เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้สำหรับวัด หรือบางครั้งเพื่อตรวจจับกระแสไฟฟ้า เป็นเครื่องวัดที่มีความไวที่สุด และเป็นพื้นฐานของอุปกรณ์วัดอื่นๆ

2. เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ (Permanent-magnet moving-coil : PMMC)

เครื่องมือวัดไฟกระแสสลับ (AC Ammeter) จำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. **แบบเหล็กเคลื่อนไหว** (moving iron type)
2. **แบบแรงกระแสไฟฟ้า** (electrodynamo-meter type)
3. **แบบแปรสภาพกระแส** (rectifier type)
4. แบบเทอร์โมคับเปิล (thermocouple type)

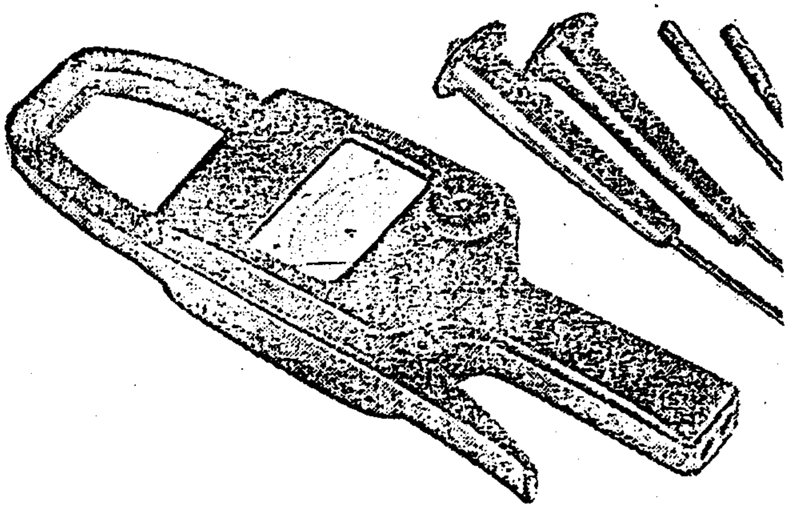
เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าแบบคล้องเกี่ยว มีชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษที่นิยมใช้กันอยู่ 2 ชื่อ คือ คลิปออน แอมมิเตอร์ (Clip-on Ammeter) กับ ไลน์ เคอร์เร้นท์ (Line Current Tester) เหมาะสำหรับใช้วัดกระแสสลับโดยไม่ต้องหยุดการถ่ายไฟฟ้าหรือถอดสายไฟออกจากวงจร เช่น ใช้วัดกระแสในวงจรไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ เป็นต้น

ส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นหม้อแปลงกระแส (ไฟฟ้า) (current transformer) กับ ส่วนที่เป็นเข็มชี้วัดกับหน้าปัทม์ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้อาจจะอยู่รวมเป็นเครื่องมือวัดเดียวกัน หรืออาจจะแยกจากกันเป็นคนละส่วนก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสะดวก และความละเอียดที่ต้องการวัด

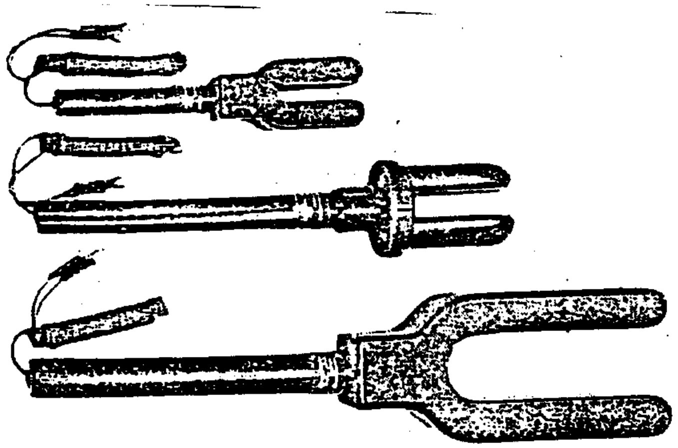
การวัด : ในกรณีที่เป็นชนิดมีส่วนที่เป็นหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า กับส่วนที่เป็นเข็มวัดรวมอยู่เป็นเครื่องมือวัด(ตัว)เดียวกัน การวัดนั้นทำได้ง่ายมาก เพียงแต่บิดสวิทช์ลูกบิดเลือกใช้ช่องวัด (scale range) ให้ถูกต้องตามขนาดกระแสที่ต้องการวัด แล้วจึงคล้องก้ามปูเข้ากับสายไฟที่มีกระแสไหลผ่าน ก็จะอ่านค่าของกระแสได้โดยตรงตามที่เข็มชี้บนหน้าปัทม์

แต่ในกรณีที่ส่วนที่เป็นหม้อแปลงกระแสกับส่วนที่เป็นเข็มวัดแยกจากกันเป็นคนละส่วน นอกจากจะต้องต่อสายจากหม้อแปลงกระแสไปยังส่วนของเข็มวัดแล้ว ยังจะต้องตรวจดูขั้วสายสำหรับช่องวัดให้ถูกต้องตามขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการจะวัดอีกด้วย

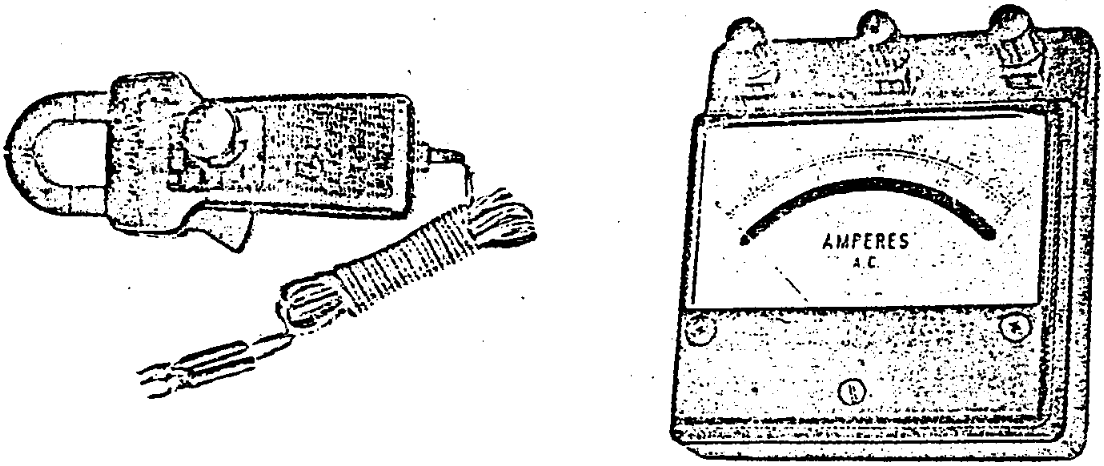
รูปที่ 6.17



รูป ก. เครื่องมือวัดกระแสแบบคล้องเกี่ยว ชนิดหม้อแปลงกระแส และส่วนของเข็มวัดอยู่รวมเป็นเครื่องเดียวกัน



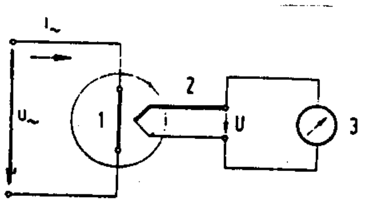
รูป ข. หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าชนิดรูปตัว "ยู" (ซึ่งต้องใช้กับส่วนของเข็มวัดของรูป ค.)



รูป ค. ส่วนที่เป็นหม้อแปลงกระแส (ไฟฟ้า) และส่วนของเข็มวัดกับหน้าปัทม์

6.3.2 **การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า** การนำเครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่มาวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งาน หรือกระแสไฟฟ้าใช้งานของรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับได้เฉพาะรูปคลื่นไซน์เท่านั้น (คาลิเบรท สเกลจากรูปคลื่นไซน์) เมื่อต้องการวัดค่าใช้งานของรูปคลื่นไฟฟ้าอื่นๆ จะทำให้เป็นสิ่งยุ่งยากในการคำนวณมาก

เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ประกอบด้วยลวดความร้อน (Hot wire) สามารถใช้ในการวัดค่าใช้งานของรูปคลื่นไฟฟ้าทุกรูปคลื่น เพราะเป็นการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมอิลิเมนต์ที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนของลวดความร้อน



รูปที่ 6.18 เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ประกอบด้วยลวดความร้อน ใช้ในการวัดค่าไฟฟ้าใช้งานของไฟฟ้ากระแสสลับ

1) ลวดความร้อน

2) เทอร์โมอิลิเมนต์

3) เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่

เมื่อต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่ต้องการวัดค่าใช้งานเข้ากับลวดความร้อนของเครื่องวัด ซึ่งทำด้วยโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เนื่องจากความร้อนน้อยมาก เช่น แมงกานิน แรงเคลื่อนไฟฟ้า U ทำให้ได้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านลวดความร้อน R ลวดความร้อนจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน Q

$$Q = P.T$$
$$= I^2.R.t$$
$$= (U^2/R).t$$

การถ่ายเทพลังงานความร้อนของลวดความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $\Delta\theta$ การนำความร้อน λ และเวลา t

$$Q_{out} = \Delta\theta.\lambda.t$$

เมื่อความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าเท่ากับความร้อนที่ส่งออก

$$Q_{out} = Q$$
$$\Delta\theta.\lambda.t = (U^2/R).t$$
$$\Delta\theta \sim U^2$$

อุณหภูมิที่สูงขึ้น $\Delta\theta$ ทำให้เทอร์โมอิลิเมนต์เกิดมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า U_θ แปรตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

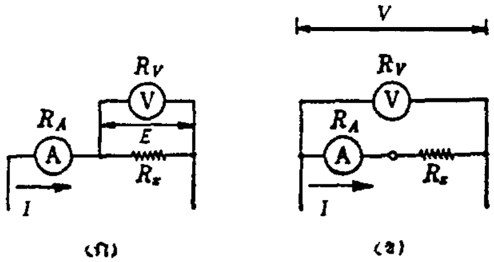
$$U_\theta \sim \Delta\theta$$
$$\therefore U_\theta \sim U^2$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องวัดวัดได้ U_θ แปรผันตามแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำการวัดยกกำลังสอง เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับใดๆ ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดจึงเป็นค่าใช้งานของรูปคลื่นนั้น โดยการคาลิเบรทสเกลด้วยกรณีที่สอง

เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ประกอบด้วยลวดความร้อนสามารถใช้วัดค่าใช้งานของรูปคลื่นไฟฟ้าทุกรูปที่มีความถี่ไฟฟ้าได้สูงถึง 1 MHz ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเคลื่อนที่ไม่มีผลต่อการวัด เพราะเทอร์โมอิลิเมนต์ได้เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ข้อเสียของเครื่องวัดนี้คือใช้เวลามากในการแสดงค่าที่วัด เนื่องจากจะต้องรออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของลวดความร้อนและใช้กำลังไฟฟ้ามากในการวัด คือประมาณ 10^{-3} VA ถึง 1 VA

6.3.3 การวัดความต้านทาน

6.3.3.1 การวัดโดยโวลต์และแอมมิเตอร์ (Ammeter - Volmeter Method) เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการวัด โดยใช้โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ต่อเป็นวงจร ดังรูปที่ 6.19 แสดงวงจรสำหรับต่อวัดค่าความต้านทาน R_x โดยความถูกต้อง ในความถูกต้องของการวัดจะถูกจำกัดด้วยความถูกต้องของมิเตอร์ที่ใช้งาน



รูปที่ 6.19 การวัดค่าความต้านทานด้วยโวลต์และแอมมิเตอร์

การต่อวงจรเพื่อวัดค่าความต้านทาน ดังรูปที่ 6.19 (ก) จะเหมาะในกรณีที่ R_x มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ R_V ทั้งนี้ค่าความต้านทาน R_x สามารถหาได้จากสมการ

$$R_x = E/[I - (E/R_V)] \qquad ..... (6.1)$$

ส่วนวงจรในรูปที่ 6.19 (ข) จะเหมาะในกรณีที่ R_x มีค่ามากเมื่อเทียบกับ R_v ทั้งนี้ค่าความต้านทาน R_x ในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$R_x = (V/I) - R_A \qquad ..... (6.2)$$

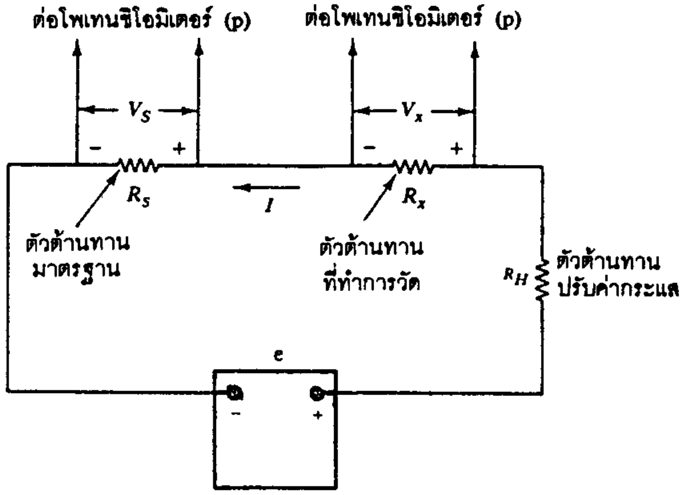
6.3.3.2 การวัดโดยใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer Method) วิธีการวัดนี้อาศัยหลักการสมดุล (balancing method) ซึ่งให้ความถูกต้องได้ดีที่สุดวิธีหนึ่ง เรามักใช้วิธีนี้ในการวัดเพื่อสอบเทียบค่าความต้านทานในห้องปฏิบัติการ รูปที่ 6.20 แสดงไดอะแกรมโดยสังเขปของการวัดโดยโพเทนชิโอมิเตอร์

ในวงจร มี R_s เป็นตัวต้านทานมาตรฐาน (standard resistor)

e เป็นแหล่งแรงดันที่มีเสถียรภาพ

p เป็นโพเทนชิโอมิเตอร์

R_H เป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้



รูปที่ 6.20 การวัดความต้านทานด้วยโพเทนชิโอมิเตอร์

เมื่อเราปรับค่ากระแสที่ไหลในวงจรให้เหมาะสม แล้ววัดแรงดันตกคร่อม R_S, R_X ด้วยโพเทนชิโอมิเตอร์ สมมติอ่านค่าได้ V_S, V_X ตามลำดับ เราสามารถคำนวณหาค่า R_X ได้โดย

$$V_S = IR_S$$

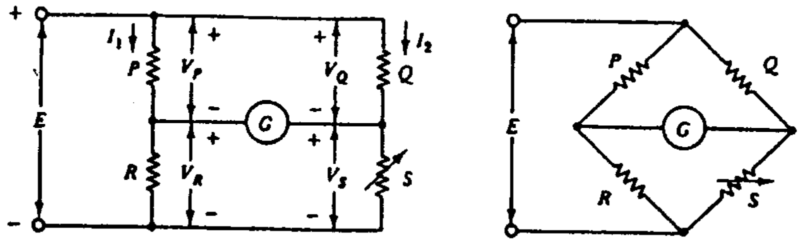
$$V_X = IR_X$$

$$\therefore \quad I = V_S/R_S = V_X/R_X$$

$$R_X = (V_X/V_S).R_S \qquad \text{..... (6.3)}$$

6.3.3.3 **การวัดด้วยวีตสโตนบริดจ์** (Wheatstone Bridge Method) วีตสโตนบริดจ์เป็นบริดจ์กระแสตรงที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในการวัดความต้านทานขนาดกลาง การวัดค่าความต้านทานโดยใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ดังกล่าวในหัวข้อ 6.3.3.2 จะต้องมีแหล่งจ่ายแรงดันที่มีเสถียรภาพ จึงจะวัดได้แม่นยำถูกต้อง ในกรณีของการวัดด้วยวีตสโตนบริดจ์ ความแม่นยำในการวัดไม่ขึ้นต่อเสถียรภาพของแหล่งจ่ายแรงดัน จึงเป็นวิธี

วัดที่ได้รับความนิยม บริดจ์ชนิดนี้สามารถวัดค่าความต้านทานทั่วไปจนถึงการสอบเทียบตัวต้านทานมาตรฐาน โดยมีความถูกต้องสูง สามารถวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 10 โอห์มถึง 1 เมกะโอห์มได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 6.21 การวัดค่าความต้านทานด้วยวีตสโตนบริดจ์

วงจรของวีตสโตนบริดจ์สามารถแสดงได้ดังไดอะแกรมในรูปที่ 6.21 จากรูปจะเห็นว่า บริดจ์ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงค่า E กัลวานอมิเตอร์สำหรับตรวจสอบสภาพสมดุล และความต้านทานที่เป็นแขน 4 ข้างของบริดจ์

ในการวัดหาค่าความต้านทาน R ที่ไม่ทราบค่า เราจะปรับค่าของตัวต้านทานแปรค่าได้ (S) และสัดส่วน P/Q เพื่อให้กัลวานอมิเตอร์ชี้สภาพสมดุล ในสภาวะที่บริดจ์สมดุล

$$V_P = V_Q \qquad \text{..... (6.4)}$$

และ

$$V_R = V_S \qquad \text{..... (6.5)}$$

เนื่องจากในสภาวะสมดุลจะไม่มีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ ดังนั้น

$$V_1R = I_2S \qquad \text{..... (6.6)}$$

$$I_1P = I_2Q \qquad \text{..... (6.7)}$$

จากสมการ (6.6) และ (6.7)

$$I_1R/I_1P = I_2S/I_2Q$$

$$\therefore \quad R = SP/Q \qquad \text{..... (6.8)}$$

ในที่นี้ ตัวต้านทาน S เรียกว่า แขน(ความต้านทาน)มาตรฐาน (standard arm)

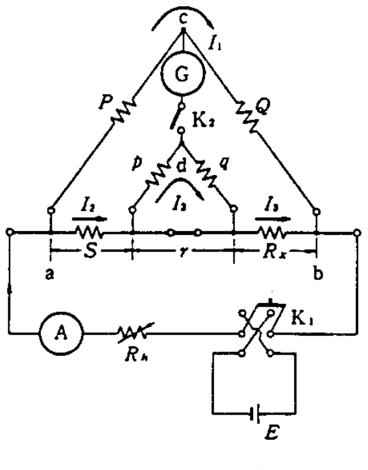
R_2 และ R_1 เรียกว่า แขนสัดส่วน (ratio arms)
ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถวัดค่าของ R ได้ โดยการเปลี่ยนค่าสัดส่วน P/Q

6.3.3.4 **การวัดด้วยเคลวินบริดจ์** (Kelvin Bridge Method) การใช้วีตสโตนบริดจ์เพื่อวัดความต้านทานที่มีค่าต่ำๆ นั้นจะมีความคลาดเคลื่อนได้มาก เนื่องจากความต้านทานของเส้นลวดที่ใช้ต่อและความต้านทานสัมผัสจะมีผลต่อการวัดมาก จึงควรใช้เคลวินบริดจ์แทน วงจรเคลวินบริดจ์ก็คือวงจรวีตสโตนบริดจ์ที่ดัดแปลงเพื่อให้สามารถวัดความต้านทานต่ำๆ เช่น ที่เป็นเส้นลวด แท่งหรือชิ้น หรือ แปรงถ่าน และขดลวดในมอเตอร์ ในบางกรณีก็เรียกวงจรนี้ว่า **วงจรบริดจ์คู่** (double bridge) เนื่องจากมีแขนเรโช 2 ชุดซึ่งทำหน้าที่ลดผลของความต้านทานจากเส้นลวดต่อหรือจุดสัมผัส โดยทั่วไปเคลวินบริดจ์จะสามารถวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1 มิลลิโอห์มจนถึงประมาณ 10 โอห์ม โดยมีความถูกต้องดีกว่า 0.2%

วงจรบริดจ์คู่ของเคลวิน (Kelvin's double bridge) ดังในรูปที่ 6.22 บริดจ์ชนิดนี้ใช้ในการวัดความต้านทานต่ำโดยเฉพาะ เนื่องจากจะต้องให้ความสัมพันธ์

$$P/Q = p/q \qquad \ldots\ldots (6.9)$$

เป็นจริงเสมอ P กับ p และ Q กับ q จะต้องมีแกนร่วมกันและเปลี่ยนไปด้วยกัน p และ q เรียกว่า แขนอัตราส่วนช่วย (auxiliary ratio arms)



รูป 6.22 การวัดความต้านทานค่าต่ำโดยวิธีใช้บริดจ์คู่ของเคลวิน

กระแสไหลไปตามทิศทางที่แสดงไว้ในรูป ภายใต้สภาวะสมดุล จะได้

$$PI_1 = SI_2 + pI_3 \qquad ..... (6.10)$$

$$QI_1 = R_xI_2 + qI_3 \qquad ..... (6.11)$$

สมการ (6.10) x Q $PQI_1 = SQI_2 + pQI_3$ ..... (6.12)

สมการ (6.11) x P $PQI_1 = PR_xI_2 + qPI_3$ ..... (6.13)

สมการ (6.12) และสมการ (6.13) ลบกันจะได้

$$(SQ - R_xP)I_2 + (pQ - qP)I_3 = 0 \qquad ..... (6.14)$$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการ (6.9) จะได้

$$R_x = (Q/P).S \qquad ..... (6.15)$$

ความต้านทานของขั้วแรงดันสำหรับ S และ R_x ให้รวมอยู่ในค่าของ P, Q และ p, q โดยปกติค่าของ P และ Q มักเป็นประมาณ 10 โอห์ม และค่าของ p และ q มักเป็นประมาณ 100 โอห์ม

ในทางปฏิบัติเป็นการสุดวิสัยที่จะคงความสัมพันธ์ในสมการ(6.9) ไว้ให้แน่นอนได้โดยการต่อแกนของมันร่วมกัน เมื่อแก้สมการ (6.14) แล้ว เราจะได้

$$R_x = (Q/P).S + p[(Q/P - q/p)](I_3/I_2) \qquad ..... (6.16)$$

และ I_3 เป็นส่วนหนึ่งของ I_2 โดยอัตราส่วน r ต่อ (p+q) นั่นคือ

$$I_3/I_2 = r/(p+q+r) \qquad ..... (6.17)$$

ดังนั้น

$$R_x = (Q/P)S + (Q/P - q/p)[pr/(p+q+r)] \qquad ... (6.18)$$

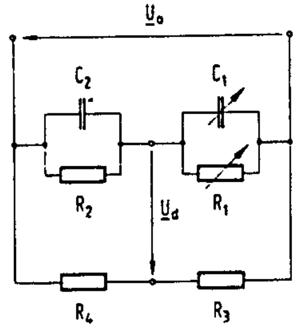
ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้ดุลโดยแน่นอน โดยทั่วไปแล้ว r มีค่าประมาณ 10 มิลลิโอห์มหรือต่ำกว่านั้น p และ q มีค่าประมาณ 100 โอห์ม ดังนั้นเทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการก็อาจจะละทิ้งได้เมื่อสภาวะที่เป็นจริงใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ในสมการ (6.9)

ในกรณีของบริดจ์คู่ ตัวต้านทานมาตรฐาน S โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 0.1 โอห์มหรือน้อยกว่านั้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะทำให้เป็นชนิดเปลี่ยนค่าได้ อีกวิธีหนึ่งที่จะทำได้ก็คือ สร้างแขนอัตราส่วน P, Q และแขนอัตราส่วนช่วย p, q ให้เป็นแบบหลายหลักและเปลี่ยนค่าได้ ส่วน S ก็ให้เปลี่ยนค่าได้เป็น 1 mΩ, 10 mΩ, ..., 1Ω, ...,

100Ω ฯลฯ โดยใช้ตัวต้านทานมาตรฐานหลายๆ ตัว เพื่อให้เปลี่ยนย่านของการวัดได้

6.3.4 การวัดความจุ

6.3.4.1 วงจรบริดจ์หาค่าความจุของวีน (Wien) จากวงจรบริดจ์ตามรูปที่ 6.23 ใช้ในการหาค่าสูญเสียของคอนเดนเซอร์ ซึ่งตัวคอนเดนเซอร์ที่มีค่าสูญเสียสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงแบบขนานได้เป็น C และ R ในวงจรตามรูป ให้ C_2 และ R_2 ของตัวคอนเดนเซอร์ที่ต้องการเทียบหาค่า และคอนเดนเซอร์ C_1 ต่อขนานกับ R_1 สามารถปรับค่าความจุและค่าความต้านทานได้ (บ่อยครั้งที่ให้ R_1 ต่ออนุกรมกับ C_1)



รูปที่ 6.23 วงจรบริดจ์หาค่าความจุของวีน

เมื่อวงจรบริดจ์สมดุลจะได้

$$Z_4/Z_2 = Z_3/Z_1 \quad \text{... (6.19)}$$

$$R_4.[1/R_2 + jwC_2] = R_3.[1/R_1 + jwC_1] \quad \text{... (6.20)}$$

$$R_4/R_2 + jwC_2R_4 = R_3/R_1 + jwC_1R_3$$

สมการในเทอมของภาคจริง :

$$R_4/R_2 = R_3/R_1 \quad \text{... (6.21)}$$

$$\therefore \quad R_2 = (R_1.R_4)/R_3 \quad \text{... (6.22)}$$

ในเทอมของภาคจริง สามารถปรับค่าความต้านทาน R_1 เพื่อให้เกิดความสมดุล

สมการในเทอมของภาคจินตภาพ :

$$wC_2R_4 = wC_1R_3 \quad \text{... (6.23)}$$

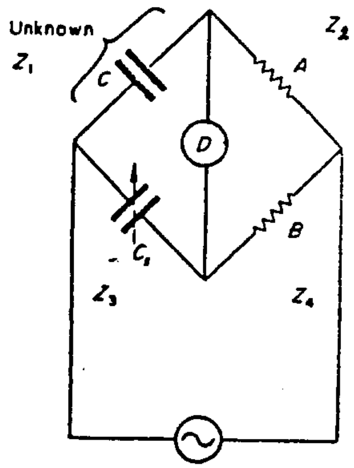
$$C_2 = C_1(R_3/R_4) \quad \ldots (6.24)$$

ในเทอมของภาคจินตภาพ สามารถปรับค่าความจุ C_1 เพื่อให้เกิดความสมดุล ค่าสูญเสียของคอนเดนเซอร์สามารถหาได้จากมุมสูญเสีย (loss angle) เมื่อบริดจ์สมดุล tan ของ Z_1 และ Z_2 จะเท่ากัน

$$\tan = 1/(wC_1R_1)$$

$$= 1/(wC_2R_2) \quad \ldots (6.25)$$

6.3.4.2 **แคปะซิแตนซ์บริดจ์** วัดความจุโดยอาศัยความเหนี่ยวนำที่ทราบค่า และเป็นการสะดวกกว่าที่จะวัดความจุที่ไม่ทราบค่าด้วยการเปรียบเทียบกับความจุที่ทราบค่า เนื่องจากมุมสูญเสีย (loss angle) ของความเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าของความจุมาก



รูปที่ 6.24 วงจรบริดจ์สำหรับวัดความจุ

ในรูปที่ 6.24 A กับ B เป็นความต้านทานค่าตายตัว C_S เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐานปรับค่าได้ และ C เป็นตัวเก็บประจุที่ไม่ทราบค่า การปรับให้สมดุลนั้นใช้ C_S เป็นตัวปรับ

$Z_1 = 1/(jwC)$ $\quad Z_2 = A$ $\quad Z_3 = 1/(jwC_S)$ $\quad Z_4 = B$

เมื่อวงจรบริดจ์ได้ดุล

$$Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4 \quad \ldots (6.26)$$

$$(1/jwC)/A = (1/jwC_s)/B \quad \ldots (6.27)$$

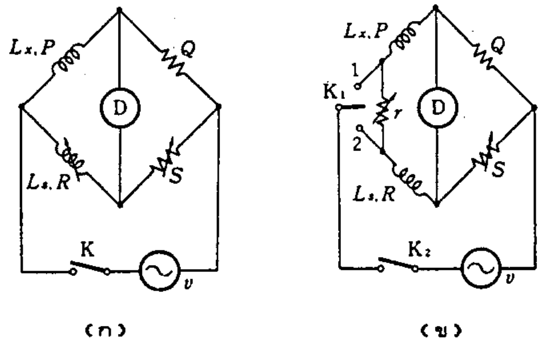
$$\therefore \quad jwCA = jwC_sB$$

ดังนั้น $$C = C_s.(B/A) \quad \ldots (6.28)$$

ถ้าจะให้ได้ดุลที่สมบูรณ์จริงๆ แล้ว ความจุทั้งสองตัวจะต้องไม่มีการสูญเสียเลย (loss free) ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก แต่สำหรับความจุไดอิเล็กตริกอากาศ กระดาษ และไมก้าแล้ว ก็สามารถจะปรับให้ได้ดุลด้วยความถูกต้องพอสมควร คือประมาณ 1%

6.3.5 การวัดความเหนี่ยวนำ

6.3.5.1 แมกซ์เวลล์บริดจ์ (Maxwell Bridge)



รูปที่ 6.25 วงจรแมกซ์เวลล์บริดจ์

รูปที่ 6.25 (ก) เป็นวงจรที่เรียกว่า แมกซ์เวลล์บริดจซึ่งใช้วัดค่าความเหนี่ยวนำ L_x ออกมาในเทอมของความเหนี่ยวนำ L_s ที่ทราบค่าแล้ว P และ R ในรูปคือส่วนที่เป็นความต้านทานอนุกรมของ L_x และ L_s ตามลำดับ

สภาวะสมดุลของบริดจ์ จะได้

$$(P + jwL_x)S = (R + jwL_s)Q \quad \ldots (6.29)$$

w คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi f$ เป็นค่าที่มุมของ

เฟสของสัญญาณกระแสสลับเดินหน้าไปต่อวินาที และมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

ในสมการ (6.29) ภาคจริงและภาคจินตภาพ (หรืออีกนัยหนึ่งส่วนที่เป็นความต้านทานและส่วนที่เป็นรีแอคทีฟ) ในทั้งสองข้างของสมการต้องมีค่าเท่ากันภาคต่อภาค จึงจะได้สภาวะสมดุล และแยกออกได้ ดังนี้

$$PS = RQ$$

$$L_xS = L_sQ$$

ถ้ารวมสภาวะทั้งสองนี้เข้าด้วยกัน จะได้

$$L_x/L_s = P/R = Q/S \qquad \ldots (6.30)$$

ดังนั้น สภาวะสมดุลของบริดจ์นี้จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่

L_s และ S เป็นตัวที่เปลี่ยนค่าและปรับได้ดังแสดงในรูปเพื่อการจัดดุลของบริดจ์ ถ้าเรารู้ค่า Q/S, L_s และ R เราก็จะหาค่าของ L_x และ P ได้ จากสมการ

$$L_x = (Q/S)L_s$$

$$P = (Q/S)R \qquad \ldots (6.31)$$

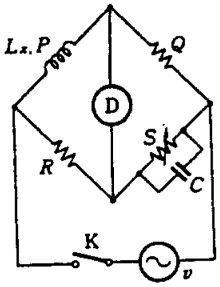
ในรูปที่ 6.25 (ก) ใช้ตัวเหนี่ยวนำมาตรฐานชนิดปรับค่าได้ (หรืออินดัคโตมิเตอร์) เป็นตัวจัดดุล หากหาไม่ได้ก็อาจใช้วงจรที่แสดงในรูปที่ 6.25 (ข) แทนได้ เมื่อบริดจ์ได้ดุล โดยการปรับค่า r และ S ในขณะที่สวิทช์ K_1 อยู่ในตำแหน่ง 1 แล้ว จะได้

$$L_x/L_s = P/(R+r) = Q/S$$

หรืออีกทางหนึ่งเมื่อได้ดุลแล้วในขณะ K_1 อยู่ในตำแหน่ง 2 จะได้

$$L_x/L_s = (P+r)/R = Q/S$$

6.3.5.2 <u>แมกซ์เวลล์–วีนบริดจ์</u> (Maxwell-Wien Bridge) ใช้สำหรับวัดค่า L_x (หรือ C) โดย C (หรือ L_x) เป็นตัวที่ทราบค่าแล้ว ส่วน Q, R และ S ถือว่าเป็นตัวที่ต้องทราบค่าอยู่แล้ว เนื่องจากความต้านทานเป็นค่าที่สามารถวัดได้ง่ายกว่าค่า L และ C มาก จึงไม่จำเป็นจะต้องใช้บริดจ์กระแสสลับวัดความต้านทานของตัวต้านทานที่บริสุทธิ์ นอกจากจะได้บ่งไว้เป็นกรณีพิเศษ แต่ส่วนที่เป็นความต้านทานอนุกรมของตัวเหนี่ยวนำ หรือ ส่วนที่เป็นความต้านทานต่อขนานของคอนเดนเซอร์เป็นสิ่งที่ต้องการวัดของบริดจ์นี้



รูปที่ 6.26 วงจรแมกซ์เวลล์-วีนบริดจ์

สภาวะสมดุลของแมกซ์เวลล์-วีนบริดจ์ จะเป็นดังนี้

$$\left.\begin{aligned} PS &= QR \\ L_x &= CQR \end{aligned}\right\} \quad \ldots (6.32)$$

โดยที่สมการแรกได้มาจากภาคจริง และสมการหลังได้มาจากภาคจินตภาพ

การวัดดุลของบริดจ์ ทำได้โดยการปรับค่าของ S และ C (หรือ L_x) ถ้า L_x และ C ถูกกำหนดให้เป็นตัวคงที่ ก็อาจทำได้โดยการปรับค่า S และ Q หรือ R

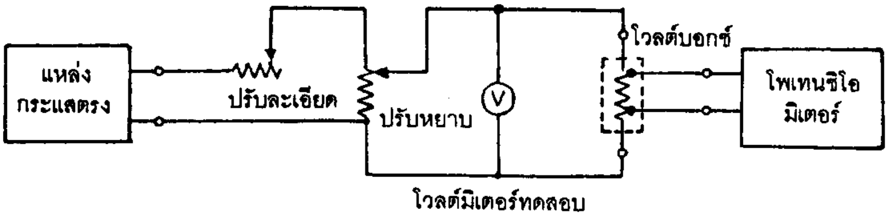
6.4 การสอบเทียบเครื่องวัดทางไฟฟ้า

เนื่องจากโพเทนชิโอมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดแรงดันที่มีความถูกต้องสูงที่สุดประเภทหนึ่ง จึงมักใช้งานในห้องปฏิบัติการวัด และการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญอันหนึ่งก็คือ เพื่อสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆ ได้แก่ โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และวัตต์มิเตอร์ ฯลฯ

6.4.1 การสอบเทียบโวลต์มิเตอร์โดยใช้โพเทนชิโอมิเตอร์กับกล่องโวลต์

รูปที่ 6.27 แสดงวิธีสอบเทียบโวลต์มิเตอร์กระแสตรงโดยใช้กล่องโวลต์ (Volt Box) ช่วย เนื่องจากช่วงวัดของโพเทนชิโอมิเตอร์ไม่สามารถคลุมช่วงวัดของโวลต์มิเตอร์ได้ ในการสอบเทียบนั้น ก่อนอื่นต้องตั้งกล่องโวลต์ไว้ที่ช่วงที่ต้องการ แล้วปรับแรงดันไฟฟ้าจ่ายเข้าโดยใช้รีโอสตัทเป็นตัวปรับ จนกระทั่งได้ค่าอ่านที่ต้องการบนโวลต์มิเตอร์ แล้วจึงใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ปรับให้ได้ดุล เมื่อปรับได้ดุลแล้ว ให้คูณค่าตัวคูณของกล่องโวลต์เข้ากับค่าที่ปรับได้ เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของโวลต์มิเตอร์ ในการนี้อาจเขียนค่าคลาดเคลื่อนลงบนตารางหรือทำการปรับโวลต์มิเตอร์ให้อ่านค่าถูกต้องก็ได้ ในการสอบเทียบด้วยวิธีนี้ผล

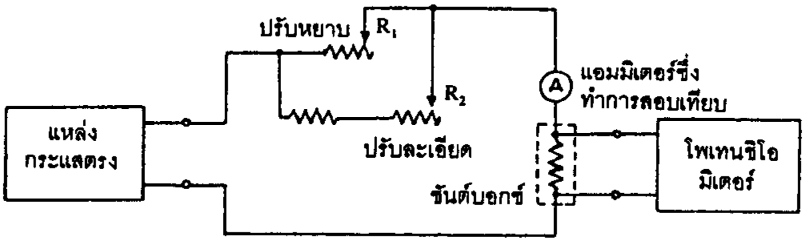
จากการเป็นภาระของกล่องโวลต์จะไม่มีอิทธิพลต่อผลการสอบเทียบมากนัก



รูปที่ 6.27 ไดอะแกรมวงจรการสอบเทียบโวลต์มิเตอร์กระแสตรง

6.4.2 การสอบเทียบแอมมิเตอร์กระแสตรงโดยใช้โพเทนชิโอมิเตอร์กับชันต์

การสอบเทียบแอมมิเตอร์สามารถทำได้โดยต่อแอมมิเตอร์อย่างอนุกรมเข้ากับตัวต้านทานความถูกต้องสูง ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจะถูกวัดโดยโพเทนชิโอมิเตอร์อย่างถูกต้อง ค่ากระแสจริงที่ไหลผ่านตัวต้านทาน(และไหลผ่านแอมมิเตอร์ซึ่งต่ออนุกรมอยู่ด้วย) สามารถคำนวณโดยหารค่าแรงดันตกคร่อมนี้ด้วยค่าความต้านทาน เนื่องจากค่าแรงดันตกคร่อมสามารถวัดได้ถูกต้องโดยโพเทนชิโอมิเตอร์ ขณะที่ค่าความต้านทานก็มีความถูกต้องสูง กระแสที่คำนวณได้จึงสามารถนำไปสอบเทียบความถูกต้องของแอมมิเตอร์ได้



รูปที่ 6.28 ไดอะแกรมวงจรการสอบเทียบแอมมิเตอร์กระแสตรง

ความต้านทานชันต์ที่ใช้จึงต้องสามารถรับกระแสที่ต้องการได้ และมีค่าความต้านทานที่จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม มีค่าเหมาะสำหรับการวัดด้วยโพเทนชิโอมิเตอร์ ชันต์มาตรฐานจะมี 4 ขั้ว โดยขั้วหนัก 2 ขั้วมีไว้สำหรับต่อเข้ากระแส ส่วนขั้วเล็ก 2 ขั้ว สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ชันต์มาตรฐานมีตั้งแต่สำหรับช่วงไมโครแอมแปร์จนถึงหลายพันแอมแปร์ ถ้าไม่ใช้ชันต์มาตรฐานก็อาจใช้กล่องชันต์ (shunt box) แทนได้ และยังมีข้อดีที่สามารถปรับได้ ทำให้ใช้วัดกระแสในช่วงต่างๆ ได้

ในรูปที่ 6.28 ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ เพื่อควบคุมกระแสที่ไหลผ่านแอมมิเตอร์ กระทั่งเข็มของแอมมิเตอร์ชี้สเกลตามต้องการ R_1 จะใช้ในการปรับค่าหยาบๆ ขณะที่ R_2 จะทำการปรับค่าโดยละเอียดกว่า

ผลการวัดจะถูกบันทึกเป็นตาราง โดยแบ่งเป็นกระแสที่อ่านได้ตามสเกลของแอมมิเตอร์ กับกระแสจริงที่คำนวณจากค่าที่อ่านโดยโพเทนชิโอมิเตอร์