به نام خدا

عایق و فشارقوی

فصل ششم:
اندازه گیری ولتاژ فشارقوی

بهروز آدینه

بهار ۹۵

مقدّمه

برای آزمایش تجهیزات فشارقوی و نیز انجام کارهای تحقیقاتی در آزمایشگاه‌های فشار قوی، لازم است بتوانیم ولتاژهای بالا را اندازه‌گیری کنیم. همچنین در بهره‌برداری از خطوط انتقال و ایستگاه‌های برق فشار قوی، به‌منظور کنترل و نظارت بر مقادیر ولتاژها و جریان‌های فشار قوی، نیاز به اندازه‌گیری آن‌ها می‌باشد. برای اندازه‌گیری ولتاژهای بالا، روش‌های مختلفی وجود دارد که در این فصل به آن‌ها اشاره می‌کنیم.

اندازه‌گیری ولتاژهای DC

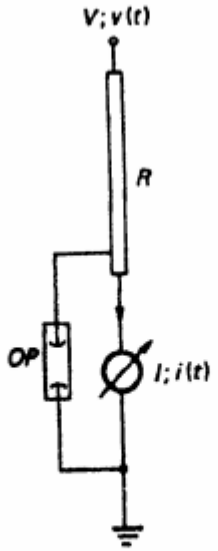
برای اندازه‌گیری ولتاژهای فشارقوی DC ، روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های مرسوم به شرح زیر است.

استفاده از مقاومت سری و میکروآمپرمتر

ساده‌ترین روش انداه‌گیری مقدار یک ولتاژ فشارقوی DC، استفاده از یک مقاومت اهمی بسیار بزرگ در سری با یک میکروآمپرمتر مطابق با شکل (۹-۱) است. در این روش، شدّت جریان عبوری از مقاومت اهمی بزرگ، توسّط میکروآمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود. برای به‌دست آوردن ولتاژ باید مقدار مقاومت را دقیقاً دانست تا بتوان ولتاژ را از رابطهٔ زیر محاسبه کرد.

$$V = R.I \qquad (۹-۱)$$

به‌سبب امپدانس بسیار کم میکروآمپرمتر، از افت ولتاژ دو سر آن صرف‌نظر می‌شود. عبور جریان از مقاومت R باعث گرم شدن و تغییر مقدار آن می‌شود؛ بنابراین، جنس مقاومت R باید از هادی‌هایی باشد که ضریب حرارتی آن‌ها خیلی کوچک و در حدّ صفر باشد (مانند مانگانین[۱])؛ زیرا در غیر این صورت، با توجّه به بزرگ بودن مقدار مقاومت R، خطای نسبی بزرگی در اندازه‌گیری ولتاژ پدید می‌آید. معمولاً مقاومت R از چند طبقه مقاومت سری تشکیل شده است. چنان‌چه از شکل (۹-۱) نیز ملاحظه می‌شود، از یک دیود زنر[۲] موازی با آمپرمتر جهت حفاظت آن استفاده می‌شود.



شکل(۹-۱): اندازه‌گیری ولتاژ DC با میکروآمپرمتر
(op حفاظت اضافه‌ولتاژ را به عهده دارد)

1- Manganin
2- Zener Diode

استفاده از مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر با امپدانس بالا

مقسّم ولتاژ مقاومتی از یک بازوی با مقاومت بسیار زیاد (R_1) و یک بازوی با مقاومت نسبتاً کم (R_2) تشکیل شده است. قسمت اعظم ولتاژ فشارقوی روی مقاومت بزرگ R_1 و ولتاژ نسبتاً کمی روی مقاومت کوچک R_2 می‌افتد. اکنون با استفاده از یک ولت‌متر و اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مقاومت R_2 (برابر با V_2) و دانستن نسبت مقاومت‌های R_1 و R_2 می‌توان به اندازه‌گیری مقدار ولتاژ فشارقوی دست یافت. این مدار در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.

$$V = V_1 + V_2 = R_1.i_1 + R_2.i_2$$

چون امپدانس داخلی ولت‌متر خیلی زیاد است، جریان مصرفی آن بسیار کوچک بوده و قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود؛ به‌طوری که $i \cong 0$ است و در نتیجه می‌توان نوشت:

$$i_1 \cong i_2$$

$$V = R_1.i_1 + R_2.i_1$$

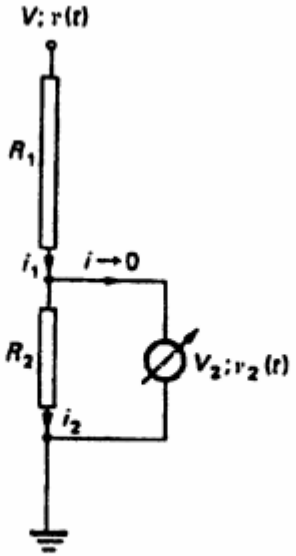
$$V_2 = R_2.i_1$$

آنگاه می‌توان نوشت:

$$\frac{V}{V_2} = \frac{R_1 i_1 + R_2 i_1}{R_2 i_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = (1 + \frac{R_1}{R_2})$$

در نتیجه،

$$V = (1 + \frac{R_1}{R_2})\, V_2 \qquad (۹-۲)$$



شکل (۹-۲): اندازه‌گیری ولتاژ DC با استفاده از ولت‌متر و مقسّم ولتاژ مقاومتی

با معلوم بودن مقاومت‌های R_1 و R_2 و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسّط ولت‌متر (V_2)، ولتاژ فشارقوی V به‌دست می‌آید.

جدای از دقّت ولتاژ اندازه‌گیری شده توسّط ولت‌متر (V_2)، دامنهٔ ولتاژ فشارقوی در این رابطه، فقط بستگی به نسبت مقاومت‌های R_1 و R_2 دارد. بنابراین، در این روش، دقّت بالاتری حاصل می‌شود؛ زیرا تغییر مقاومت‌های R_1 و R_2 در اثر تغییر درجه حرارت ناشی از عبور جریان، به یک نسبت می‌باشد. در نتیجه، اثر درجه حرارت در خطای اندازه‌گیری حذف می‌شود.

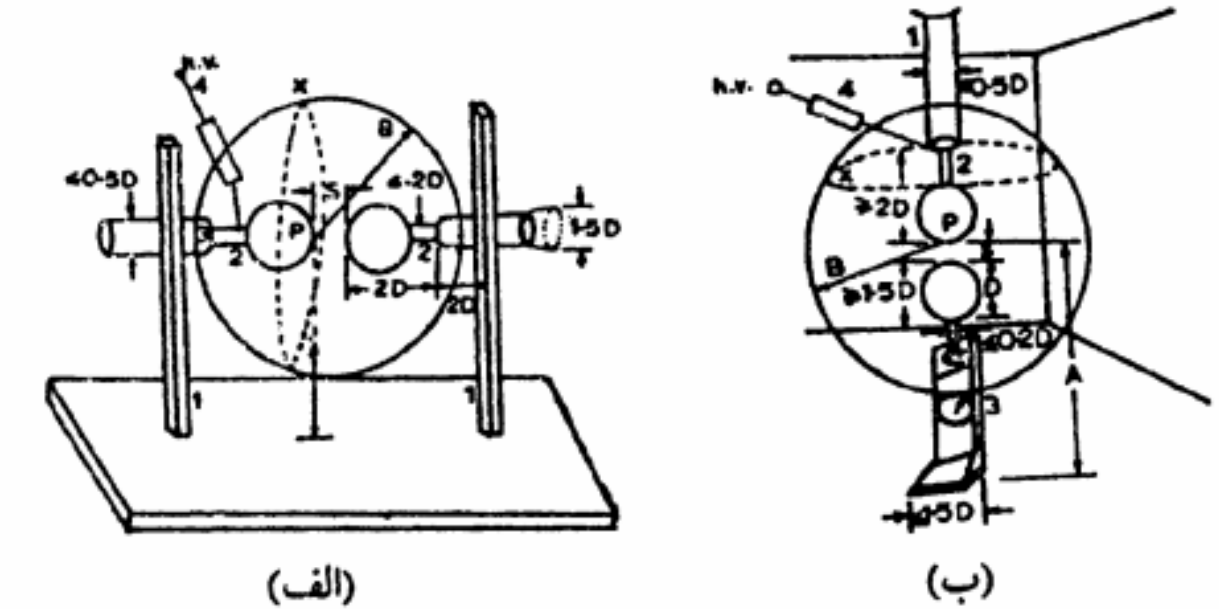
ولت‌مترهای الکترونیکی امروزی با امپدانس خیلی بالا و دقّت کافی، استفاده از این روش را امکان‌پذیر می‌سازد. در این مدار، به‌جای ولت‌متر، می‌توان از یک اسیلوسکوپ نیز استفاده نمود.

استفاده از دو الکترود کروی شکل فلزی

اندازه‌گیری ولتاژ به کمک دو الکترود کروی شکل فلزی بر این مبنا استوار است که در فاصلهٔ بین دو کره در اثر اعمال ولتاژ بین آن‌ها، میدان الکتریکی یکنواختی به‌وجود می‌آید. اگر فاصلهٔ بین کره‌ها به اندازه‌ای باشد که شدّت میدان ایجاد شده موجب شکست الکتریکی هوای موجود در فضای بین دو کره گردد، آنگاه به‌سبب معلوم بودن شدّت میدان شکست هوا (مثلاً در شرایط جوّی استاندارد برابر ۳۰kV/cm است) می‌توان مقدار ولتاژ اعمال شده را تعیین (اندازه‌گیری) نمود.

در این روش، دو الکترود کروی شکل به‌طور افقی و یا عمودی در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند. یکی از آن‌ها ثابت باقی می‌ماند و دیگری متحرّک می‌باشد و می‌توان با آن، فاصلهٔ بین دو الکترود (S) را تنظیم نمود. این روش در شکل (۹-۳) نشان داده شده است. در این روش، ولتاژ را بین دو الکترود کروی (که مقابل یکدیگر به‌صورت افقی یا عمودی قرار دارند)، متّصل می‌کنند. سپس دو کره را با سرعت کم (آهسته آهسته) به همدیگر نزدیک می‌نمایند. در یک فاصلهٔ معیّن S بین دو گوی جرقّه زده، که با وسیلهٔ اندازه‌گیری طول (مانند کولیس) اندازه‌گیری می‌شود. از روی جدول‌های مخصوص و روابط مربوط به آن، با داشتن رطوبت هوا، فشار هوا و درجه حرارت محیط، شدّت میدان الکتریکی لازم برای شکست هوای محیط آزمایشگاه (E_s) به‌دست می‌آید. حالا ولتاژ مجهول را از رابطهٔ مربوط به میدان‌های الکتریکی یکنواخت به‌دست می‌آورند.

$$V = E_s \,.\, S \qquad (۹-۳)$$



(الف) (ب)

شکل (۹-۳): اندازه‌گیری ولتاژ DC و AC و ضربه‌ای با استفاده از دو الکترود فلزی

این اندازه‌گیری معمولاً چندین بار تکرار می‌شود و میانگین ولتاژهای محاسبه شده از رابطهٔ بالا که به همدیگر نزدیک می‌باشند، به‌عنوان ولتاژ واقعی اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود.

عیب این روش در آن است که بر اثر جرقّه، اتّصال کوتاه برقرار شده و در نتیجه، به واسطهٔ جریان زیاد، رله‌ها ولتاژ را قطع می‌کنند. البتّه این روش دارای مزایایی از جمله سادگی، خطای نسبتاً کم و اطمینان به آن است.

در این روش اندازه‌گیری باید به نکات زیر توجّه نمود:

۱- فاصلهٔ بین دو کره (S)، باید کم‌تر از نصف قطر کره‌ها باشد $(S \leq \frac{1}{2} D)$ تا میدان یکنواخت بین دو کره ایجاد گردد. این مهم‌ترین شرط برای صادق بودن رابطهٔ (۹-۳) است.

۲- سطح کره‌ها باید کاملاً صاف و هموار باشد.

۳- سطح کره‌ها را باید کاملاً تمیز و خشک نمود.

۴- بسته به قطر کره‌ها و فاصلهٔ بین دو کره، مقادیر قطر میله‌های پایه کره‌ها، طول آن‌ها، و نیز فاصلهٔ کره‌ها از سطح زمین و حدّاقل فاصلهٔ شعاعی کره‌ها از محیط دیواره‌های اطراف و وسایل دارای پتانسیل زمین، باید طبق استاندارد رعایت شود تا شدّت میدان، کاملاً یکنواخت گردد.

استفاده از ولت‌مترهای الکترواستاتیکی

اگر با اعمال ولتاژ بین دو صفحهٔ فلزی، یک میدان الکتریکی را به‌وجود آوریم، در این صورت در این میدان الکترواستاتیکی ایجاد شده، نیروی جاذبه‌ای بین دو الکترود به‌وجود می‌آید. مقدار این نیرو از مشتق انرژی الکتریکی ذخیره شده نسبت به فاصلهٔ x در جهت الکترودها به‌دست می‌آید. یعنی،

$$F = \left| \frac{-dW}{dx} \right| \qquad (۴-۹)$$

با اعمال ولتاژ V بین دو صفحه با ظرفیت خازنی C، انرژی $W = \frac{۱}{۲} CV^۲$ در میدان ذخیره می‌شود. اگر سطح الکترودها برابر Aباشد آنگاه:

$$C = \varepsilon \frac{A}{x}$$

$$W = \frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x} V^۲ \qquad (۵-۹)$$

$$\frac{dW}{dx} = \frac{d}{dx}\left(\frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x} V^۲\right) = -\frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x^۲} . V^۲$$

در نتیجه،

$$F = \frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x^۲} V^۲ \qquad (۶-۹)$$

از رابطهٔ اخیر درمی‌یابیم که نیروی جاذبه بین الکترودها، همواره مثبت بوده و مستقل از پلاریتهٔ ولتاژ اعمال شده بین الکترودها است.

اگر ولتاژ اعمالی بین الکترودها به جای یک ولتاژ DC، یک ولتاژ متناوب AC باشد، ولتاژ V با زمان تغییر می‌کند ولی میانگین نیروی جاذبه بین الکترودها برابر است با:

$$\bar{F} = \frac{۱}{T}\int_{۰}^{T} F(t)dt = \frac{۱}{۲}\varepsilon\frac{A}{x^{۲}}\frac{۱}{T}\int_{۰}^{T} V^{۲}(t)\,dt = \frac{۱}{۲}\varepsilon\frac{A}{x^{۲}}V_{rms}^{۲} \qquad (۹-۷)$$

از ولت‌مترهای الکترواستاتیکی بر اساس معادلات (۹-۶) و (۹-۷) به ترتیب می‌توان برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ فشار قوی DC و یا مقدار مؤثّر ولتاژ فشارقوی متناوب AC بهره جست. لازم به‌ذکر است که در این روش، یکی از الکترودها را ثابت نگه می‌دارند و به الکترود دیگر یا به قسمتی از الکترود دیگر، اجازهٔ حرکت می‌دهند و از تغییر جزئی شدّت میدان در اثر تغییر مکان الکترودها نیز صرف‌نظر می‌شود.

این نوع دستگاه و دستگاه‌های مشابه آن را ولت‌متر الکترواستاتیکی می‌گویند. مزیّت این نوع ولت‌متر، پایین بودن ظرفیت خازنی و بالا بودن امپدانس آن‌ها است که در نتیجه، خطای آن‌ها نیز کم می‌شود.