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

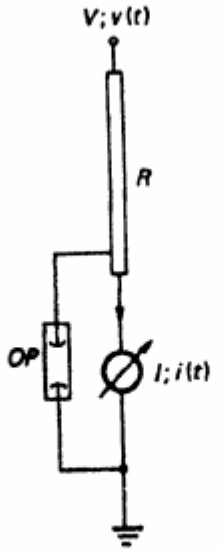
برای اندازه‌گیری ولتاژهای فشارقوی DC ، روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های مرسوم به شرح زیر است.

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:

$$i_1 \cong i_2$$

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

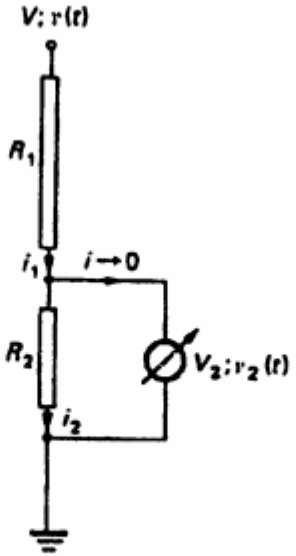
$$V_2 = R_2.i_1$$

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.

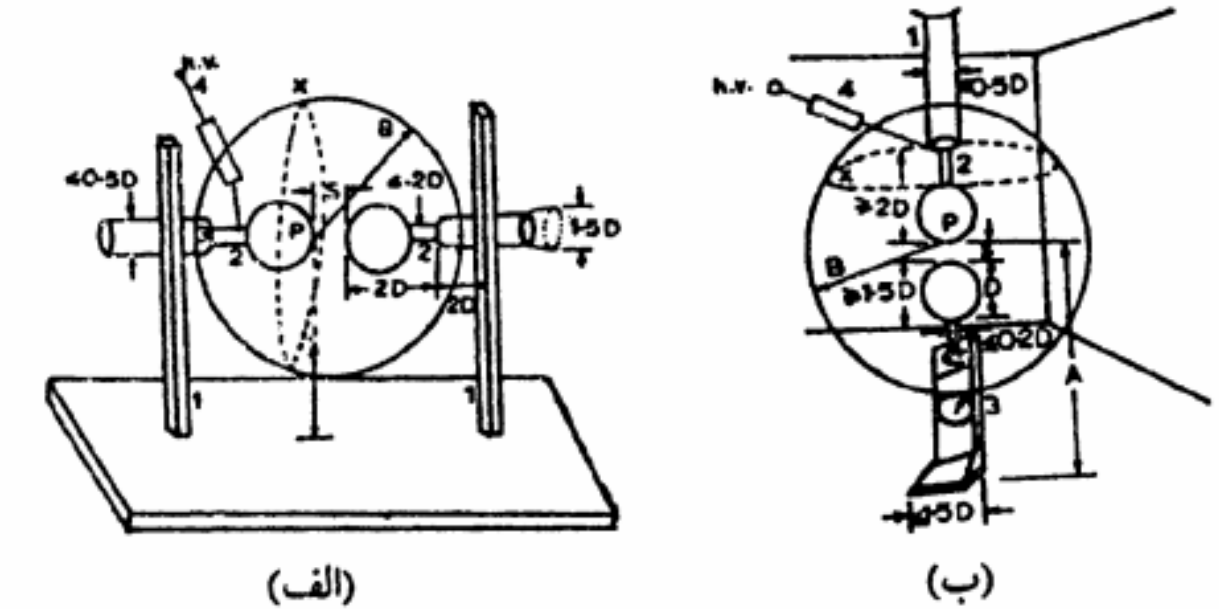
ولت‌مترهای الکترونیکی امروزی با امپدانس خیلی بالا و دقّت کافی، استفاده از این روش را امکان‌پذیر می‌سازد. در این مدار، به‌جای ولت‌متر، می‌توان از یک اسیلوسکوپ نیز استفاده نمود.

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،

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

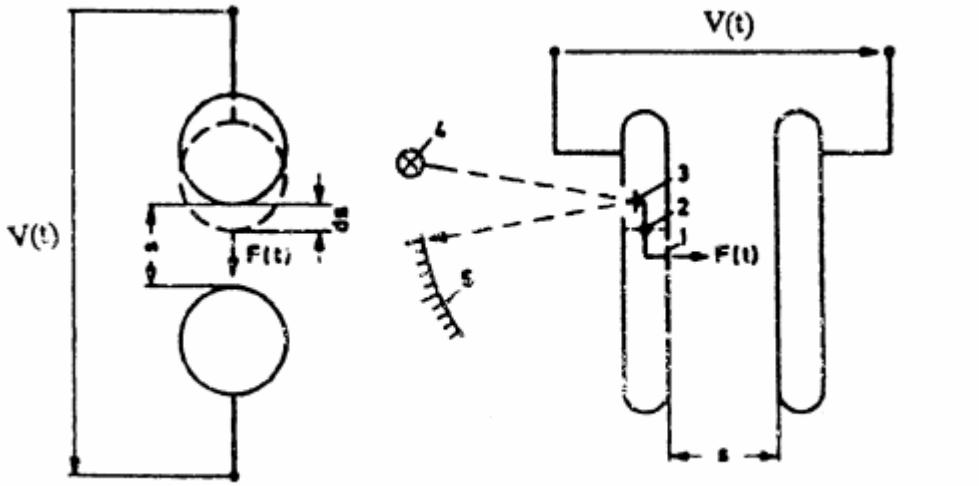
از رابطهٔ اخیر درمی‌یابیم که نیروی جاذبه بین الکترودها، همواره مثبت بوده و مستقل از پلاریتهٔ ولتاژ اعمال شده بین الکترودها است.

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.

برای اندازه‌گیری با دقّت بیشتر، دو الکترود صفحه‌ای می‌سازند تا بین آن‌ها یک میدان یکنواخت به‌وجود آید و در وسط یکی از این دو صفحه، یک ورقهٔ کوچک متحرّک قرار می‌دهند (شکل ۹-۴ را ببینید). میدان الکتریکی بین دو صفحه، کاملاً یکنواخت است و بر اثر حرکت ورقهٔ کوچک، یکنواختی میدان به‌مقدار کمی تغییر می‌کند. بر اثر میدان الکتریکی ایجاد شده، ورقهٔ کوچک می‌تواند حول محور افقی خود حرکت کند. یک آینه به این ورقهٔ متحرّک متّصل می‌شود که همزمان با چرخش صحفهٔ متحرّک می‌چرخد. آنگاه، به‌وسیلهٔ یک چراغ، نور به سطح آینه تابیده می‌شود که بازتاب نور از روی سطح آینه به صفحهٔ مدرّج منتقل می‌شود. با اعمال ولتاژ مورد نظر بین دو صفحه، در اثر نیروی F، صفحهٔ متحرّک به حرکت در آمده و به دنبال آن، آینه نیز حرکت می‌کند و نور بازتاب را روی صفحهٔ مدرّج تغییر مکان می‌دهد. درجه‌بندی روی صفحه مدرّج را متناسب با ولتاژهای اعمالی مختلف انجام می‌دهند. 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.



شکل (۹-۴): اندازه‌گیری ولتاژ DC و AC با استفاده از ولت‌متر الکترواستاتیکی

۹-۳- اندازه‌گیری ولتاژهای AC

در اندازه‌گیری ولتاژهای فشار قوی AC، روش‌های مختلفی از قبیل دو الکترود کروی شکل، ولت‌متر الکترواستاتیکی، مقاومت سری و میکروآمپرمتر، مقسّم مقاومتی و ولت‌متر، خازن سری و آمپرمتر، مقسّم‌های خازنی و ترانسفورماتورهای ولتاژ وجود دارند. بعضی از روش‌ها برای اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ فشار قوی AC و بعضی برای اندازه‌گیری مقدار مؤثّر می‌باشد.

۹-۳-۱- استفاده از دو الکترود کروی شکل فلزی

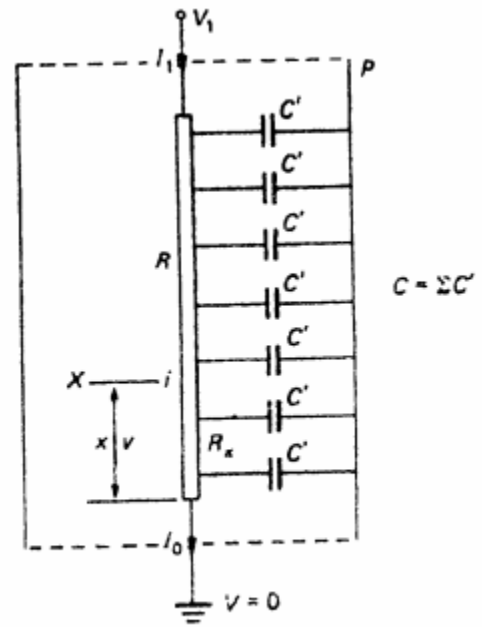
روش اندازه‌گیری مانند بخش ۹-۲-۳ می‌باشد. در این روش، مقدار دامنهٔ ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود.

۹-۳-۲- استفاده از ولت‌متر الکترواستاتیکی

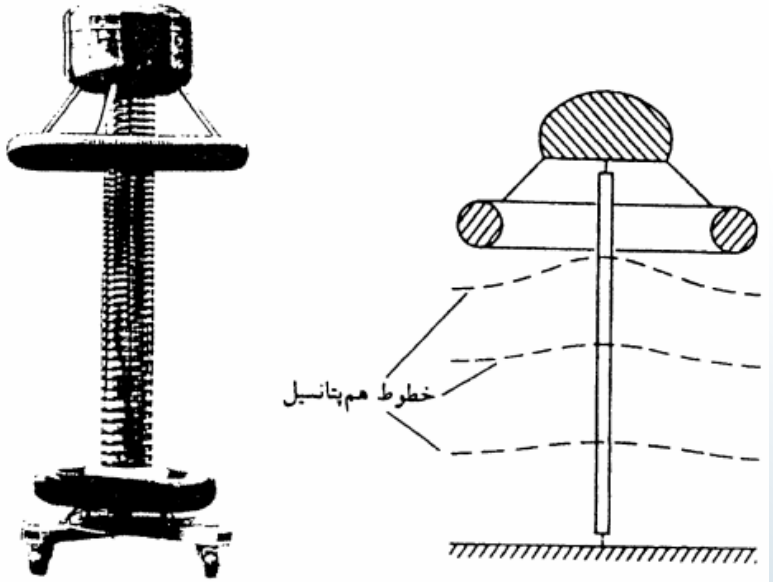
این روش اندازه‌گیری نیز در بخش ۹-۲-۴ قبلاً توضیح داده شده است. در این روش، مقدار مؤثّر ولتاژ با استفاده از رابطهٔ (۹-۷) اندازه‌گیری می‌شود.

۹-۳-۳- استفاده از مقاومت سری و میکروآمپرمتر

طریقه اندازه‌گیری مشابه بخش ۹-۲-۱ می‌باشد، لیکن به‌جای آمپرمتر DC از آمپرمتر AC که مقدار مؤثّر جریان را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده می‌شود. بنابراین، ولتاژ مؤثّر با این روش اندازه‌گیری خواهد شد. در این روش، به‌علّت ظرفیت خازنی بین طبقات مختلف مقاومت‌ها و زمین (شکل ۹-۷ را ببینید) و جاری شدن جریان در این خازن‌های ناخواسته (شبیه به حالت زنجیرهٔ مقره‌های آویزان)، توزیع پتانسیل روی طبقات مختلف به‌صورت یکنواخت نخواهد بود. در نتیجه، این جریان‌های ناخواسته، خطای زیادی را در تعیین ولتاژ فشار قوی با این روش به‌وجود می‌آورند. برای این‌که توزیع پتانسیل را یکنواخت نماییم، مطابق با شکل (۹-۸) از یک حلقهٔ محافظ در الکترود بالایی استفاده می‌شود. علّت استفاده از حلقهٔ محافظ این است که ظرفیت خازنی ایجاد شده بین طبقات مختلف مقاومت‌ها و این حلقه، اثر خازن‌های ناخواستهٔ مذکور را کاهش داده و توزیع پتانسیل یکنواخت گردد. در واقع شدّت میدان، کنترل می‌شود و خطای آزمایش کم‌تر می‌شود.



شکل (۹-۷): مدار معادل اثر خازنی یک مقاومت در ولتاژ فشار قوی AC



شکل (۹-۸): استفاده از حلقهٔ محافظ برای توزیع میدان یکنواخت برای مقاومت در ولتاژ AC

۹-۳-۴- استفاده از مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر با امپدانس بالا

این روش نیز، مشابه آنچه در بخش ۹-۲-۲ در مورد اندازه‌گیری ولتاژ DC ارائه گردید، می‌باشد؛ ولی به‌جای ولت‌متر DC ، ولت‌متر AC که مقدار ولتاژ مؤثّر را اندازه‌گیری می‌کند، جایگزین می‌گردد. در این روش نیز، اثر خازن‌های ناخواسته که در بخش قبل به آن اشاره شد، موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در خطای اندازه‌گیری می‌شوند. برای کاهش این خطا، در اینجا نیز از حلقهٔ محافظ در الکترود بالایی مانند شکل (۹-۸) استفاده می‌شود.

استفاده از خازن سری و آمپرمتر

با توجّه به مشکلات استفاده از مقاومت سری در جریان متناوب (به‌علّت وجود خازن‌های ناخواسته)، می‌توان از خازن‌های سری و آمپرمتر در اندازه‌گیری مقدار مؤثّر ولتاژ فشار قوی AC به‌جای مقاومت‌های سری و آمپرمتر استفاده کرد. این روش در شکل (۹-۹) نشان داده شده است.

$$I = J\omega CV$$

$$|V_{rms}| = \frac{|I_{rms}|}{\omega C} \qquad (۹-۱۳)$$

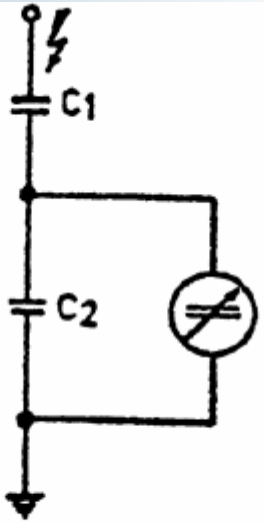
جریان I، جریان عبوری از خازن است که توسّط آمپرمتر AC، مقدار مؤثّر آن اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری جریان مؤثّر و با استفاده از رابطهٔ (۹-۱۳) ولتاژ مؤثّر AC محاسبه می‌شود.

شکل (۹-۹): اندازه‌گیری ولتاژ AC با خازن سری و آمپرمتر

استفاده از مقسّم ولتاژ خازنی و ولت‌متر الکترواستاتیکی

خطای ناشی از وجود خازن‌های ناخواسته در روش مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر می‌تواند با استفاده از مقسّم‌های ولتاژ خازنی و ولت‌متر الکترواستاتیکی یا یک دستگاه اندازه‌گیری با امپدانس بالا حذف شود. اگر وسیلهٔ اندازه‌گیری از طریق یک کابل طولانی وصل شده‌باشد، ظرفیت آن باید در کالیبره کردن دستگاه، مدّ نظر قرار گیرد. معمولاً در این مدار (شکل ۹-۱۰)، خازن C_1، یک خازن گازی (پر شده از گاز) یا یک خازن با هوای فشردهٔ استاندارد و خازن C_2 یک خازن با ظرفیت بزرگ می‌باشد (خازن با عایق‌های میکا، کاغذ یا هر خازن با تلفات کم). خازن C_1 از طریق یک کابل پوشش یافته، به C_2 متّصل می‌شود. در نتیجه، ولتاژ فشار قوی بین خازن‌های C_1 و C_2 تقسیم می‌گردد. قسمت اعظم ولتاژ فشار قوی روی خازن C_1 قرار می‌گیرد. با استفاده از یک ولت‌متر الکترواستاتیکی می‌توان ولتاژ نسبتاً کم دو سر خازن C_2 (مقدار V_2) و در نهایت ولتاژ فشار قوی V را به‌دست آورد. با توجّه به نوع ولت‌متر، جریان عبوری از هر دو خازن یکسان است و در نتیجه رابطهٔ زیر صادق خواهد بود.

$$j\omega C_1 V_1 = j\omega C_2 V_2$$



شکل (۹-۱۰): اندازه‌گیری ولتاژ AC با مقسّم خازنی

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \qquad (۹-۱۴)$$

در نهایت، ولتاژ فشار قوی AC به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$V = V_1 + V_2$$

$$V_1 = V - V_2$$

با جایگزینی در رابطهٔ (۹-۱۴) داریم:

$$C_1 (V - V_2) = C_2 V_2$$

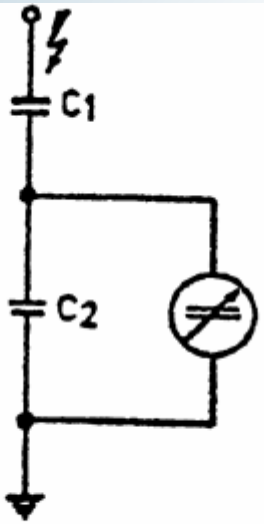
$$C_1 V = (C_1 + C_2) V$$

$$V = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_2 \qquad (۹-۱۵)$$

اگر ظرفیت خازنی ولت‌متر الکترواستاتیکی، کابل اتّصال و سیم‌ها C_v باشد، آن‌گاه می‌توان نوشت:

$$V = \frac{C_1 + C_2 + C_v}{C_1} V_2 \qquad (۹-۱۶)$$

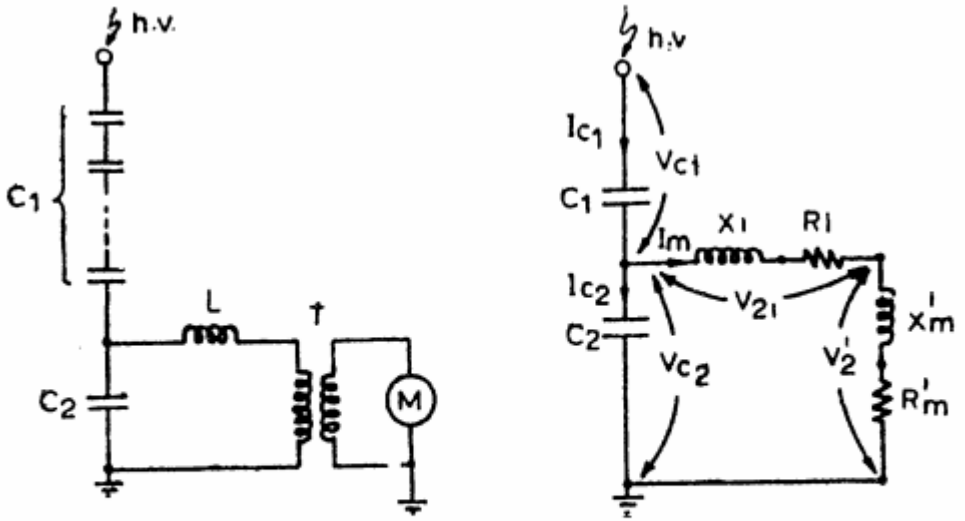
معمولاً مقدار C_v خیلی کوچک بوده و قابل صرف‌نظر کردن است.



شکل (۹-۱۰): اندازه‌گیری ولتاژ AC با مقسّم خازنی

استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT)[1]

در ایستگاه‌های برق فشار قوی، برای اندازه‌گیری ولتاژ شین‌ها و خطوط انتقال، اغلب از مقسّم خازنی همراه با یک ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ و ولت‌متر مطابق شکل (۹-۱۱-الف) استفاده می‌شود. این دستگاه اساس یک CVT را تشکیل می‌دهد. برای جبران اثر خازن C_2 در مقسّم خازنی، از اندوکتانس القایی L استفاده می‌شود تا مدار به‌صورت اهمی خالص درآید. مدار معادل CVT در شکل (۹-۱۱-ب) نشان داده شده است. خازن معادل C_1 از چندین واحد خازن سری مشابه ولتاژ بالا ساخته شده است و ظرفیت کلّ آن، حدود چند هزار پیکوفاراد است.



شکل (۹-۱۱): ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT) ؛الف)طرح کلّی مدار؛ ب)مدار معادل

1- Capacitor Voltage Transformer

وسایل اندازه‌گیری در قسمت فشار ضعیف از قبیل وات‌متر، کنتور و نیز وسایل حفاظتی مانند رله‌ها، به توانی در حدود چند صد ولت‌آمپر نیاز دارند که این توان را نمی‌توان مستقیماً از یک مقسّم ولتاژ خازنی به‌دست آورد؛ بلکه باید ولتاژ V_2 را توسّط یک ترانسفورماتور ولتاژ القایی به حدود ۱۰۰ تا ۱۱۰ ولت کاهش داد. مقدار ولتاژ فشار قوی نامی طرف اوّلیهٔ این ترانسفورماتور هم در حدود ۱۰ تا ۳۰کیلو ولت می‌باشد. برای این‌که ترانسفورماتور، اختلاف فازی ناشی از جریان خازنی نداشته باشد، در حالت بی‌باری ترانسفورماتور، تعادلی بین C_2 و چوک L به‌وجود می‌آورند. مقدار تنظیم شدهٔ چوک L، در ساخت مدار CVT منحصراً برای مقاومتی شدن مدار، یا برای رساندن شرایط رزونانس مدار انتخاب می‌شود. این شرایط وقتی مهیّا می‌شود که،

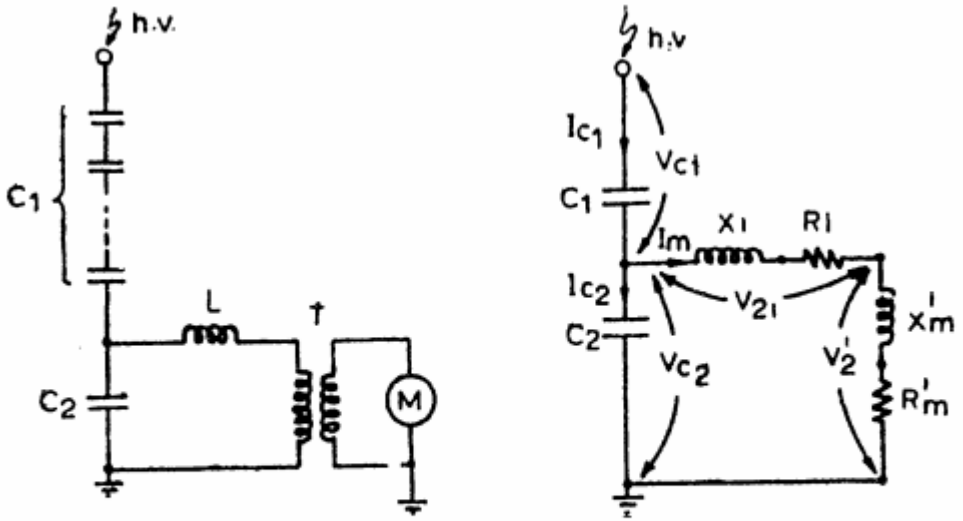
$$\omega(L+L_T)=\frac{1}{\omega(C_1+C_2)} \qquad (۹-۱۷)$$

که در این رابطه،

L = اندوکتانس چوک

L_T = اندوکتانس معادل ترانسفورماتور منتقل شده به طرف اوّلیهٔ آن

چوک به‌عنوان سیم‌پیچی که در فرکانس‌های بالاتر از حدّ یک مدار، امپدانس بالایی از خود نشان داده و در نتیجه به‌منظور صاف کردن جریان‌های ضربانی و جلوگیری از عبور فرکانس‌های زیاد به‌کار می‌رود.



(الف) (ب)

شکل (۹-۱۱): ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT) ؛الف)طرح کلّی مدار؛ ب)مدار معادل

اگر نسبت دورهای اوّلیه به ثانویّهٔ ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ (که برابر با نسبت تبدیل ولتاژ نامی اوّلیه به ثانویّهٔ آن می‌باشد)، برابر K_1 و نسبت تبدیل مقسّم خازنی نیز بر اساس معادلهٔ (۹-۱۵) برابر،

$$K_2 = \frac{V_1}{V_{c2}} = \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)$$

باشد، آنگاه نسبت تبدیل مجموعهٔ CVT برابر خواهد بود با:

$$K = \frac{V_1}{V_2} = K_1 \times K_2 \qquad (۹-۱۸)$$

مزایای CVT را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

۱- طرّاحی ساده و نصب آسان،

۲- از CVT به دو صورت می‌توان استفاده نمود، هم به‌عنوان یک وسیلهٔ اندازه‌گیری ولتاژ برای ثبت متغیّرهای اندازه‌گیری و برای سیستم‌های حفاظتی، و هم به‌عنوان یک خازن در سیستم‌های مخابراتی خطوط قدرت (PLC[1])؛

۳- در CVT بر خلاف ترانسفورماتورهای ولتاژ مغناطیسی معمولی، توزیع ولتاژ وابسته به فرکانس صورت نمی‌گیرد؛

۴- ایجاد سیستم عایقی بین ولتاژ فشار قوی سیستم و دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ.

همچنین معایب CVT عبارتند از:

۱- نسبت تبدیل ولتاژ با تغییرات دما حسّاس است؛

۲- ایجاد مسئلهٔ فرورزونانس در سیستم‌های قدرت.

1- Power Line Carier

- استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ (نوع مغناطیسی PT[1])

ترانسفورماتورهای ولتاژ مغناطیسی، قدیمی‌ترین وسایل برای اندازه‌گیری‌های ولتاژ AC هستند. آن‌ها از نظر ساختمانی ساده‌اند و فقط برای ولتاژهای کم‌تر از ۵۰ کیلوولت، به شکل یک ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ طرّاحی می‌شوند. برای ولتاژهای بالاتر، ساخت این نوع ترانسفورماتورها غیر اقتصادی است و به‌جای آن‌ها از CVT استفاده می‌شود.

نسبت تبدیل این ترانسفورماتور برابر $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$ است که V_1 و V_2 ولتاژهای نامی اوّلیه و ثانویّه و N_1 و N_2 تعداد دور سیم‌پیچ‌های اوّلیه و ثانویّه هستند. ولتاژ فشار قوی، به اوّلیهٔ ترانسفورماتور اعمال می‌شود و در ثانویّهٔ آن، یک ولت‌متر فشار ضعیف، ولتاژ را قرائت می‌کند. ولتاژ فشار قوی بر اساس مقدار ولتاژ قرائت شده از ولت‌متر و نسبت تبدیل ترانسفورماتور ($V_1 = a.V_2$) به‌دست می‌آید. به‌دلیل فوق‌العاده پایین بودن جریان در اوّلیه و ثانویّهٔ این ترانسفورماتورها، قطر سیم‌های آن بسیار نازک بوده و عایق‌بندی آن‌ها نیز معمولاً به‌صورت خشک و از جنس اپوکسی‌رزین است.

خطای این روش از خطاهای نسبت تبدیل و زاویهٔ فاز توسّط امپدانس‌های نشتی و مغناطیسی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به‌وجود می‌آید. این خطاها را می‌توان با تنظیم نسبت دورها جبران نمود.

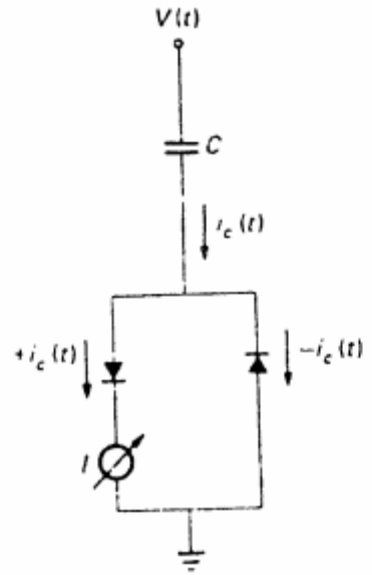
1- Potential Transformer

استفاده از خازن سری، آمپرمتر DC و دیودهای یکسوساز

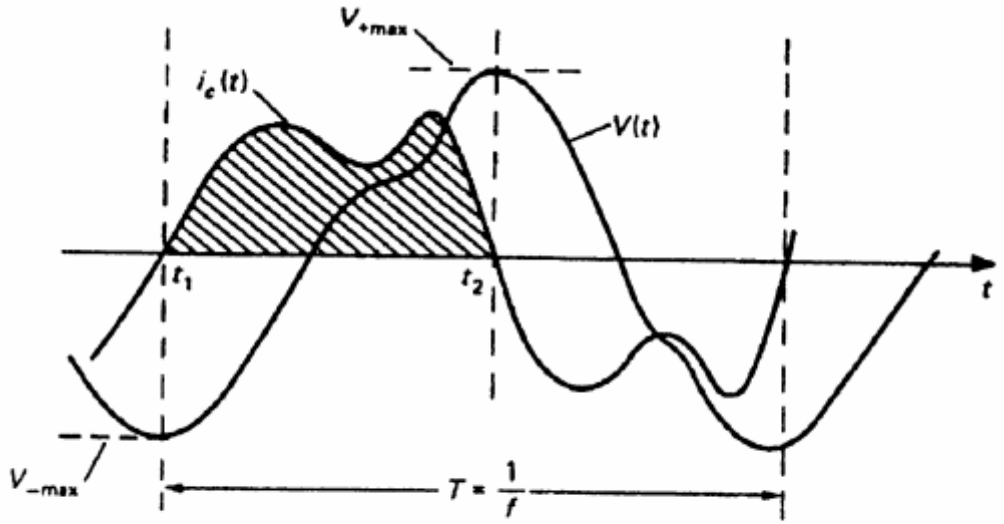
ساده‌ترین مدار برای اندازه‌گیری مقدار دامنهٔ ولتاژ فشار قوی AC ، استفاده از یک خازن، دو دیود و یک دستگاه قاب‌گردان (آمپرمتر DC) مطابق شکل (۹-۱۳) است.

جریان خازنی $i_c(t)$ به دو مؤلّفهٔ مثبت و منفی به‌وسیلهٔ دو دیود که در دو جهت مخالف با هم موازی شده‌اند، تقسیم می‌شوند. هر یک از دیودها در یک نیم سیکل جریان را هدایت می‌کنند. یک آمپرمتر DC نیز در یکی از شاخه‌ها برای اندازه‌گیری مقدار متوسّط جریان در یک نیم سیکل قرار می‌دهیم. دیود D_1 برای یکسو کردن جریان شارژ خازن C ، و دیود D_2 برای دشارژ نمودن خازن C در نیم پریود بعدی است. مقدار متوسّط جریان عبوری در نیم پریود در شاخهٔ دیود D_1 ، متناسب با مقدار دامنهٔ ولتاژ فشارقوی AC است (شکل ۹-۱۴ را ببینید). مقدار متوسّط جریان در نیم پریودی که توسّط آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود، برابر است با:

$$I = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} i_c(t)\cdot dt = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} C\frac{dV_c(t)}{dt}\,dt \qquad (۹-۱۹)$$



شکل (۹-۱۳): روش اندازه‌گیری مقدار دامنهٔ ولتاژ AC



شکل (۹-۱۴): شکل موج ولتاژ و جریان AC

$$I = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} C dV_c(t) = \frac{C}{T}\left[V_{max} - (-V_{max})\right]$$

$$I = \frac{2CV_{max}}{T} \qquad (۲۰-۹)$$

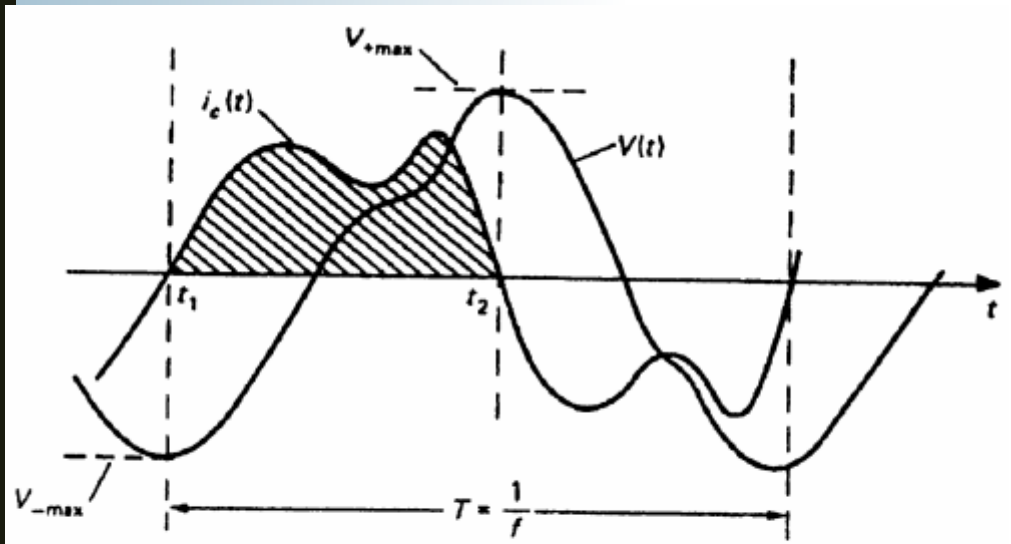
$$V_{max} = \frac{IT}{2C}$$

چون $T = \frac{1}{f}$، دامنهٔ ولتاژ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{max} = \frac{I}{2fC} \qquad (۲۱-۹)$$

در این روش، خطای اندازه‌گیری، ناشی از تلفات خازن و آمپرمتر و کابل ارتباطی آن دو می‌باشد. لازم به ذکر است که خازن دستگاه از نوع عایق گازی SF6 با فشار بالا است.

برای بعضی از آزمایش‌ها، مقدار دامنهٔ ولتاژ AC خیلی مهم است (مثلاً برای به‌دست آوردن حدّاکثر استقامت الکتریکی عایق‌ها و غیره)، اگر شکل موج کاملاً سینوسی خالص نباشد، مقدار دامنهٔ آن دقیقاً $\sqrt{2}$ برابر مقدار موثّر آن نیست. در نتیجه، مطلوب است تا بتوانیم مقدار دامنهٔ موج را به‌طور مجزّا و مستقیم اندازه‌گیری کنیم.



شکل (۹-۱۴): شکل موج ولتاژ و جریان AC