

اصول اندازه گیری الکتریکی

تالیف : سید محمد رضا رضوی زاده

1376



فهرست

فصل اول : مقدمات اندازه‌گیری اصولی و معرفی روشها و ابزارها

- 1 - 1 - تقسیم‌بندی دستگاهها
- 2 - 1 - دقت در اندازه‌گیری و پارامترهای کیفی یک دستگاه سنجش
 - 1-2-1) خطا
 - 1-2-2) کلاس دقت
 - 1-2-3) حساسیت دستگاههای اندازه‌گیری
 - 1-3) پردازش اطلاعات-رسم نمودارها
 - 1-4) استحکام عایقی
 - 1-5) نمادها

فصل دوم : دستگاههای اندازه‌گیری با قاب‌گردان

- 1 - 2 - دستگاه اندازه‌گیری با قاب سیم پیچ‌گردان - آهنربای دایم
- 2 - 2 - ساختمان داخلی گالوانومتر
 - (الف) اجزاء مکانیکی گالوانومتر
 - (ب) اجزاء الکتریکی گالوانومتر

فصل سوم : طراحی آمپر متر و ولت متر با استفاده از گالوانومتر

- 1 - 3 - ساخت آمپر متر جریان بالا
- 2 - 3 - آمپر متر مدار شنت تک حوزه‌ای
- 3 - 3 - ساخت آمپر متر با چند حوزه سنجش
 - (الف) آمپر متر شنت ساده با چند حوزه سنجش
 - (ب) آمپر متر چند حوزه‌ای شنت آیرتون
- 3 - 3 - ولت متر
- 5 - 3 - گسترش حوزه سنجش ولت مترها

فصل چهارم : ساختمان و ساختار اهم مترهای سری و موازی

- 1 - 4 - اهم مترهای سری
- 2 - 4 - اهم مترهای موازی
- 3 - 4 - روش درجه بندی اهم متر
- 4 - 4 - دستگاه سنجش مقاومتهای بالا (meger)

فصل پنجم : کاربرد دستگاههای اندازه‌گیری (قاب گردان) در سنجش کمیت‌های متناوب

- 1 - 5 - ساختمان میتر (meter) جریان متناوب ac
- 2 - 5 - میتر ac با یکسوساز نیم‌موج
- 3 - 5 - میتر ac با یکسوساز تمام‌موج

فصل ششم : معرفی دستگاههای الکترو دینامیکی

- 1 - 6 دستگاههای الکترو دینامیکی
- 2 - 6 مدار معادل آمپر متر الکترو دینامیکی
- 3 - 6 مدار معادل ولت متر الکترو دینامیکی
- 4 - 6 اندازه گیری توان (وات سنچها)
- (الف) توان در مدارات ac
- (ب) توان در مدارات dc
- 5 - 6 دستگاه سنجش القایی
- (الف) ساختمان داخلی کنتور جریان متناوب (تک فاز)
- (ب) اجزای فیزیکی دستگاه و مشخصات کلی

فصل هفتم : پلهای اندازه گیری

- 1 - 7 پل اندازه گیری الکتریکی
- 2 - 7 پلهای جریان مستقیم (dc)
- 3 - 7 پلهای جریان متناوب (ac)
- 4 - 7 پل اندازه گیری جریان خود القا (L)
- 5 - 7 پل اندازه گیری ظرفیت خازن (C)

فصل هشتم : اسیلوسکوپ Oscilloscope

- (8-1) اسیلوسکوپ Oscilloscope
- (8-3) استفاده های کاربردی اسیلوسکوپها در اندازه گیریهای AC
- (8-3-1) تست تقویت آمپلی فایر (اعوجاج دامنه)
- (8-3-2) تست فاز آمپلی فایر (اعوجاج فاز)

پیشگفتار

انسان علاوه بر نیروی عقلانی، از پنج ابزار اندازه‌گیری نیرومند و مهم دیگر نیز به نام "حواس پنجگانه" برخوردار است که طبیعت در اختیار او نهاده است: بینایی، شنوایی، بویایی، چشایی و لامسه. برای مثال، احساس بینایی ما را در تشخیص مکان و چگونگی وضعیت اشیاء یاری می‌دهد و احساس شنوایی سمت و سو و چگونگی منابع صوتی را به ما می‌شناساند. هدف این درس، معرفی اصول و ابزارهای اندازه‌گیری الکتریکی و نیز آموزش چند روش به منظور بالا بردن میزان دقت در اندازه‌گیری است.

همان طور که از عنوان "الکتریکی" استنباط می‌شود، این درس به کمیتهای قابل سنجش الکتریکی می‌پردازد، نظیر اختلاف پتانسیل دو نقطه، جریان گذرا از سیم هادی، توان مصرفی و تولیدی در مصرف کننده‌ها و مولدهای انرژی الکتریکی، تعداد نوسان در ثانیه (فرکانس) نوسانگر و غیره.

از نتایج به دست آمده از یک اندازه‌گیری سه استفاده مهم به عمل می‌آید:

1. طراحی نزدیک به واقعیت و عملی یک مدار الکتریکی؛
2. آزمایش و محک زدن مداری که طراحی شده است؛
3. شناسایی و کنترل کیفیت عملکرد مدار در کاربرد نهایی.

نمونه‌هایی از کاربردهای با اهمیت اندازه‌گیری در حیطه عملکرد فنی سازمان صدا و سیما به قرار زیر است :

- **صدا برداری و صدا – تصویر :** سنجش بلندی و کیفیت صدا هنگام ضبط و پخش به وسیله ابزاری به نام V.U متر (Volume Unit meter). سنجش سطح روشنایی و کیفیت نور صحنه به وسیله نورسنجهای الکتریکی مجهز به حسگرهای نوری (Lux meter).



- **فرستنده :** اندازه گیریهای متداول هنگام نصب و پس از نصب فرستنده‌های رادیویی یا تلویزیونی، که اصطلاحاً به آن مونیتورینگ (Monitoring) می‌گویند و نهایتاً اندازه‌گیری میزان هدایت و رسانایی زمین در انتقال امواج الکترومغناطیسی.



Satellite field strength meter



RF meter

از نظر الکتریکی دو نوع تقسیم‌بندی کلی و مهم وجود دارد:

1. کمیت‌های الکتریکی ثابت و نامتغیر با زمان، یا کمیت‌های DC (Direct current) ؛
2. کمیت‌های الکتریکی متغیر با زمان با تغییرات متناوب و منظم، یا کمیت‌های AC (Alternating current).

معرفی کمیت‌های DC و AC

در نخستین تقسیم‌بندی، یا حالت DC، مقادیر اختلاف پتانسیل الکتریکی (ولتاژ V (ولت))، جریان الکتریکی (جریان I (آمپر))، و توان مصرفی یا تولیدی (بر حسب Watt) یک مولد DC یا عنصر حرارتی سنجیده می‌شود. در حالت دوم یا حالت متناوب (AC) علاوه بر ولتاژ و جریان، دامنه موج (سیگنال) و فاز نسبی آن نیز قابل سنجش است. همچنین در این حالت، توان الکتریکی دارای دو مولفه می‌گردد: توان فعال یا "اکتیو" 1 که معرف تلفات مقاومتی و حرارتی است، و توان غیرفعال یا "راکتیو" 2 که از بارهای غیرمقاومتی در مدار، نظیر خازن و خودالقائ ناشی می‌شود. از مهمترین کمیت‌های قابل سنجش، مشخصه عنصرهای الکتریکی مدار است، یعنی: اندازه‌گیری مقدار اهمی عنصر مقاومتی (R) و میزان ظرفیت خازنی (C) و ضریب خودالقای سیم‌پیچ (L). برای سنجش کمیت هر کدام از این عناصر مداری، ابزاری ویژه و روشی مناسب با همان عنصر و کمیت مورد نیاز است. **اصولا ابزارهای اندازه‌گیری به گونه‌ای طراحی می‌شوند که کمیت‌های بالا را در دو تقسیم‌بندی کلی نمایش بدهند:**

1. نمایش کمیات به صورت مقادیر پیوسته یا دستگاههای آنالوگ (Analog) ؛

2. نمایش کمیات به صورت مقادیر گسسته یا دستگاههای دیجیتال (Digital).



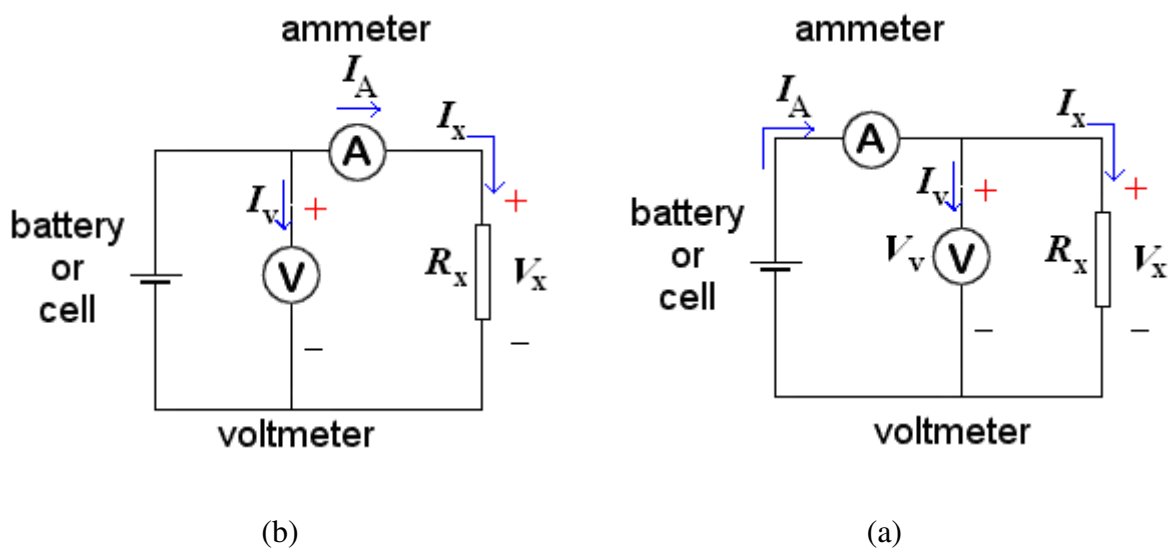
این درس به معرفی دستگاههای آنالوگ می‌پردازد.

از اصول حاکم بر فیزیک می‌دانیم که انواع انرژی قابل تبدیل به یکدیگر هستند، به عنوان مثال از انرژی الکتریکی می‌توان انرژی حرکتی (مکانیکی)، نورانی، حرارتی (ترمودینامیکی) و یا فشار مکانیکی را بوجود آورد. عکس این حالت نیز ممکن است. برای مثال، اگر یک جسم پیزوالکتریک 3 را تحت فشار قرار بدهیم، در دو سر آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ظاهر می‌شود. همچنین اگر فلز بی‌متال (Bimetal) را حرارت بدهیم، در دو سر پایانه آن ولتاژ پدید می‌آید (Thermo couple) یا با تاباندن نور به فلز سزیم، الکترونهای آزاد در فلز تحریک می‌شوند و جریان الکتریکی ضعیفی در فلز سزیم به وجود می‌آورند، حسگرهای نوری (Photo cell) از این جمله‌اند. به عنوان آخرین مثال، به قاب سیم‌پیچ حامل جریان در داخل میدان مغناطیسی نیروی مکانیکی وارد می‌شود که باعث چرخش آن می‌گردد و بالعکس، با چرخاندن قاب سیم‌پیچ در میدان مغناطیسی، در سیم‌پیچ جریان الکتریکی به وجود می‌آید.

ویژگیهای یک اندازه‌گیری دقیق و قابل اعتماد

در یک اندازه‌گیری قابل اعتماد موارد زیر باید رعایت شود تا علاوه بر سادگی کار خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری به حداقل ممکن کاهش بیابد:

- (الف) درک نظریه حاکم بر پدیده یا کمیت مورد اندازه‌گیری و دانستن روابط موجود.
 - (ب) شناخت و فراهم آوری دستگاههای مناسب برای اندازه‌گیری و استفاده صحیح از آن دستگاهها.
 - (ج) اطمینان از سالم بودن دستگاهها و تجهیزات اندازه‌گیری.
 - (د) گزینش روش مناسب در اندازه‌گیری.
- برای روشن شدن قسمت (د) به دو مدار الکتریکی زیر توجه کنید. می‌خواهیم با استفاده از یک آمپر متر و یک ولت‌متر، مقدار مقاومت مجهول یعنی R_x را محاسبه کنیم.



با توجه به اینکه آمپر متر و ولت‌متر در چه وضعیتی در مدار قرار بگیرند، دقت اندازه‌گیری تفاوت می‌کند. در مدار (a) عامل خطا، جریان I_V است که ولت‌متر به علت ایده‌آل نبودن از خود عبور می‌دهد. جریانی که آمپر متر می‌سنجد، (I_A) به علت برابر نبودن جریان I_A و I_x همان جریانی نیست که از مقاومت می‌گذرد. لیکن ولتاژی که ولت‌متر نشان می‌دهد دقیقاً مساوی با ولتاژ منبع است: $V_V = V_X$ به این ترتیب اگر این مدار را برای سنجش مقاومت‌های کم به کار ببریم، چون $I_A \approx I_x$ است، با تقریب نزدیک به یقین می‌توانیم

نتیجه: مدار (a) برای اندازه‌گیری **مقاومت‌های کم** مناسب بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

در مدار (b) عامل خطا، ولتاژ ظاهر شده در دو پایانه آمپر متر (V_A) است. در این حالت ولتاژ ولت‌متر V_V و ولتاژ مقاومت مجهول V_X برابر نیستند دلیل آن نیز صفر نبودن مقاومت داخلی آمپر متر می‌باشد.

$$V_V \neq V_X$$

اگر در این مدار مقاومت R_x زیاد باشد، به همان نسبت V_X بزرگتر از V_A خواهد شد و با تقریب قابل قبولی می‌توان از V_A در مقابل V_X صرف‌نظر کرد.

نتیجه: مدار (b) برای اندازه‌گیری **مقاومت‌های زیاد** مناسب بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

خواندن و پردازش یافته‌های اندازه‌گیری

اگر مراحل چهارگانه بالا با دقت رعایت شود، گام بعدی خواندن اطلاعات ارائه شده توسط ابزارهای اندازه‌گیری و اطمینان یافتن از صحت آنهاست. بنابراین باید خطاهای احتمالی در آزمایش را شناخت و از تأثیر آنها بر نتایج آگاه شد. خطاها را بر اساس منشاء، نحوه و میزان تأثیرشان بر نتایج بدست‌آمده از آزمایش طبقه‌بندی می‌کنند. خطاها بر دو نوعند :

الف) خطاهای اصولی یا سیستماتیک : به خطاهایی گفته می‌شود که منبع مشخصی دارند و از قاعده و قانون خاصی پیروی می‌کنند. این گونه خطاها را می‌توان با گزینش روش و تدبیرهای مناسب تا حد ممکن کاهش داد. شاخص خطاهای اصولی ثابت ماندن حد آنها در تکرار اندازه‌گیری است.

منابع خطاهای اصولی عمدتاً عبارتند از :

1 - ساختمان داخلی دستگاه مورد اندازه‌گیری; 2 - اشتباههای کلی; 3 - عوامل محیطی; 4 - نامناسب بودن روش آزمایش; 5 - بی دقتی شخص آزمایش‌کننده در خواندن شاخص اندازه‌گیری (عقربه).

ب) خطاهای اتفاقی : خطاهای اتفاقی بی قاعده رخ می‌دهند و از قانون خاصی نیز پیروی نمی‌کنند. میزان این خطاها نوسانات نامنظم دارد و معمولاً پس از چند بار تکرار آزمایش پی به وجود آنها نمی‌بریم. منابع این خطا بسیارند، از جمله :

الکتریسیته ساکن بدن شخص آزمایش‌کننده، امواج الکتریکی و مغناطیسی موجود در مکان آزمایش مانند پارازیت اتومبیل یا روشن و خاموش کردن لامپ یا قطع و وصل کلید برق شهر، امواج ناشی از ژنراتوری که در دور دست کار می‌کند و از این قبیل.

فصل اول

مقدمات یک اندازه گیری اصولی ، معرفی روشها و ابزارها

1-1- دستگاههای اندازه گیری آنالوگ

در تقسیم بندی بر اساس نحوه کار، دو نوع دستگاه اندازه گیری آنالوگ وجود دارد :

- الف - دستگاههایی که بر اساس انحراف عقربه عمل می کنند، نظیر دستگاه اندازه گیری با قاب گردان - آهن ربای دایم، دستگاه اندازه گیری قاب با سیم پیچ ثابت و آهن ربای گردان و سرانجام دستگاههای اندازه گیری با آهن نرم گردان (جذبی - دفعی)، دستگاههای انحرافی ؛
- ب - دستگاههایی که بر اساس مقایسه کمیت مورد اندازه گیری با یک یا دو کمیت واسطه عمل می کنند. دستگاههای الکترو دینامیکی، فرو دینامیکی، الکتروستاتیکی، حرارتی و القایی از این جمله اند، دستگاههای مقایسه ای.

1-2- دقت اندازه گیری و پارامترهای کیفی دستگاه سنجش

(1-2-1) خطا

میزان خطا و خطای نسبی هر کمیت مورد سنجش مانند / ، به صورت زیر تعریف می شود :

اگر فرض کنیم / مقدار واقعی کمیت مورد اندازه گیری و x_1 مقدار اندازه گیری شده همان کمیت باشد، در این صورت میزان خطا، خطای نسبی و درصد خطای نسبی به صورت زیر تعریف می شود :

$$\Delta x = x - x_1 \quad \text{میزان خطا}$$

$$\frac{\Delta x}{x} \quad \text{خطای نسبی}$$

$$\frac{\Delta x}{x} \times 100 \quad \text{درصد خطای نسبی}$$

به این ترتیب، اگر / را در بدترین حالت، یعنی $x_1 = 0$ در نظر بگیریم، درصد خطای نسبی اندازه گیری / و در بهترین حالت، یعنی / درصد خطای نسبی / می شود. زیرا :

$$x_1 = 0 \Rightarrow \frac{\Delta x}{x} = 1 \quad \text{Error : 100\%} \quad \text{در بدترین حالت:}$$

$$x_1 = x \Rightarrow \frac{\Delta x}{x} = 0 \quad \text{Error : 0\%} \quad \text{در بهترین حالت:}$$

(1-2-2) کلاس دقت (Accuracy class)

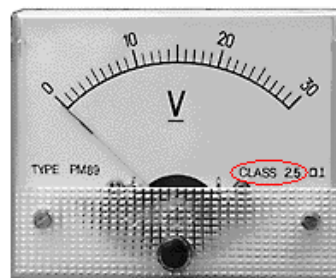
در دستگاههای آنالوگ سه نوع کلاس دقت تعریف می شود :

تعریف 1 : کلاس دقت بر حسب درصد خطای نسبی نسبت به حداکثر مقداری که دستگاه قادر به سنجش آن است؛ این حداکثر مقدار قابل سنجش روی دستگاه به شکل اعداد 0.1, 0.2, ... و غیره نمایش داده می شود.

تعریف 2 : کلاس دقت بر حسب درصد خطای نسبی نسبت به طول خط مدرج دستگاه، که روی دستگاه به شکل اعداد 0.1, 0.2, ... نمایش داده می شود.

تعریف 3 : کلاس دقت بر حسب درصد خطای نسبی، که روی دستگاه به شکل اعداد (0.1), (0.2), ... نمایش داده می شود.

• **تذکر :** بدترین کلاس دقت 5 % و بهترین کلاس دقت 0.1 % می باشد.



مثال (مطابق تعریف 1) :

در این دستگاه (آمپر متر) میزان خطا در اندازه گیری جریان 3A چنین محاسبه می شود :



▪ حداکثر جریان قابل اندازه گیری: 10A

▪ جریان مورد اندازه گیری: 3A

▪ کلاس دقت (مطابق تعریف 1): 0.2

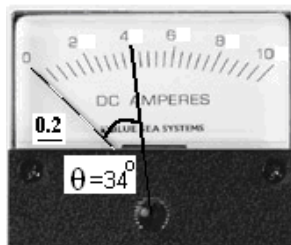
$$\frac{\Delta x}{10} = 0.002 \Rightarrow \Delta x = \pm 0.02$$

خطای نسبی در حداکثر جریان قابل اندازه گیری

$$\frac{\Delta x}{3} \times 100 = \pm 0.66\% \text{ برابر است با :}$$

(1-2-3) حساسیت دستگاههای اندازه گیری (Sensitivity)

حساسیت دستگاه اندازه گیری (S) عبارتست از نسبت انحراف در دستگاه به عاملی که باعث این انحراف شده است. به عنوان مثال در آمپر متر شکل زیر، درجه انحراف عقربه نسبت به حالت "صفر" سنجیده می شود که 34° است و عامل انحراف دهنده عقربه، جریان مورد اندازه گیری، یعنی 4 Amp است.



به این ترتیب حساسیت آمپر متر (S_I) بنابه تعریف عبارت است از نسبت زاویه انحراف عقربه (θ) بر حسب رادیان به مقدار

$$S_I = \frac{\theta}{I} \quad \text{جریان مورد اندازه گیری (I)، یعنی:}$$

$$\theta = 34 \left(\frac{\pi}{180} \right) = 0.593 \quad \text{در مثال بالا، زاویه انحراف } 34^\circ \text{ است که در تبدیل به رادیان داریم:}$$

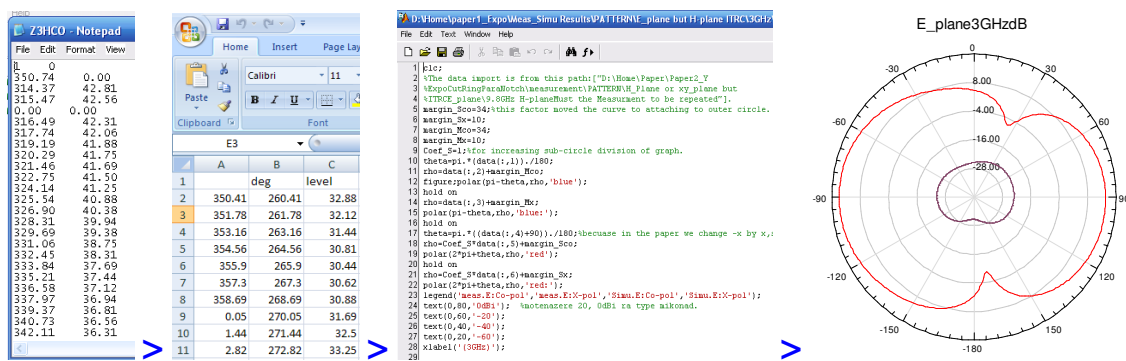
و جریان مورد اندازه گیری $I = 4 \text{ Amp}$ می باشد.

بنابراین در یک جریان ثابت دستگاهی که بیشترین انحراف را نشان بدهد از حساسیت بیشتری برخوردار است؛ زیرا S_I و θ نسبت مستقیم دارند.

(1-3) پردازش اطلاعات-رسم نمودارها

امروزه دستگاههای اندازه گیری غالباً نتایج اندازه گیری را میتوانند به صورت فایل هایی با فرمت *.txt و *.CSV در اختیار قرار دهند. در تهیه گزارش های مقایسه ایی لازم است چند نمودار در یک سیستم رسم و ارایه شوند که با وجود نرم افزارهایی چون Excel و MATLAB اینکار بسادگی قابل اجراست.

در شکل زیر نمونه ایی ازین نمودار ها و داده های عددی خام بهمراه کد MATLAB آن آورده شده است.



دادهای حاصل از اندازه گیری پترن تشعشی آنتن در سیستم مختصات قطبی (θ, ϕ)

(1-4) استحکام عایقی

با توجه به نوع عایق الکتریکی که در خود دستگاه و اتافک آن استفاده می‌شود، حداکثر ولتاژ قابل تحمل دستگاه را به صورت ستاره‌ای با عددی در داخل آن نمایش می‌دهند.



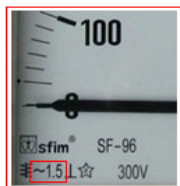
عدد داخل ستاره بر حسب کیلو ولت (Kilo - Volt) است.



5-1- نمادها

علائم مختلف در دستگاههای آنالوگ به قرار زیر است :

1-5-1. کلاس دقت



1-5-2. طرز کار دستگاه

نماد دستگاه	نحوه کار
	قاب گردان - آهن ربای دائم
	آهن ربای گردان - سیم پیچ ثابت
	آهن نرم گردان
	الکترو دینامیکی
	القائی
	Thermocouple
	Galvanometer
	Ammeter
	Voltmeter
	AC / DC

3-4-1. نحوه استقرار دستگاه



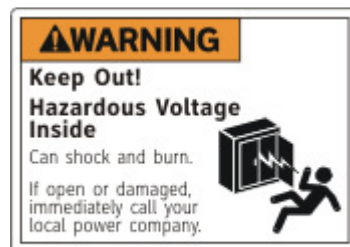
┐ افقی

└ عمودی

∠30° مایل

4-4-1. علامت هشدار :

دستگاه بسیار دقیق است یا امکان برق گرفتگی و آسیب می‌رود.

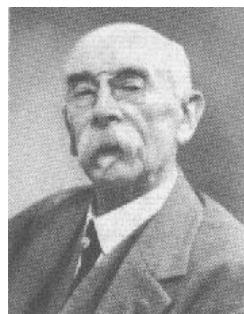


Horizontal English



فصل دوم

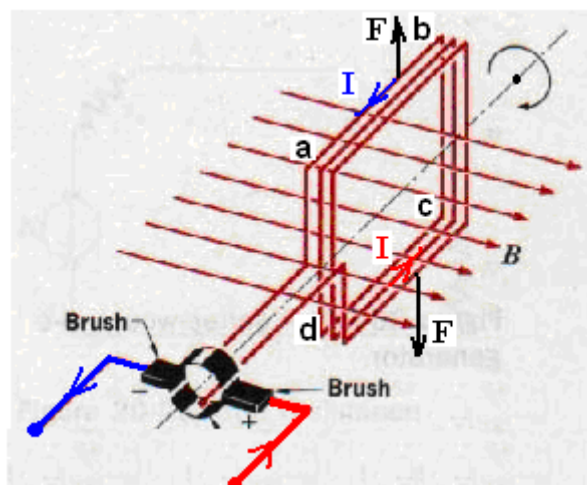
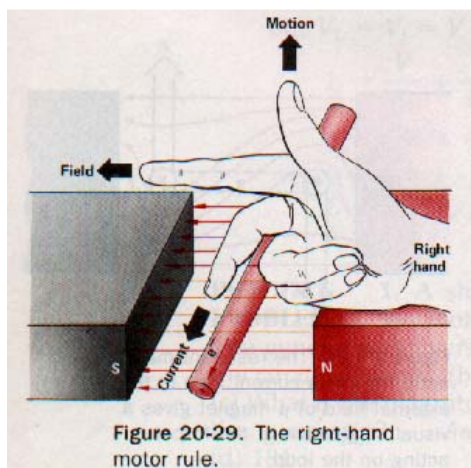
دستگاههای اندازه گیری با قاب گردان



D.Arsenval

1 - 2 - دستگاههای اندازه‌گیری با قاب گردان - آهن ربای دائم (گالوانومترها)

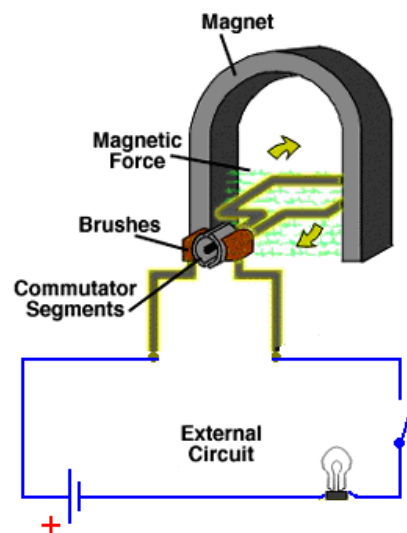
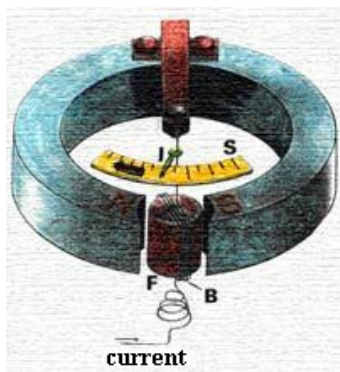
اگر یک قاب سیم پیچ حامل جریان نظیر شکل که قادر باشد حول محوری دوران کند، در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گیرد، به هر بازوی قاب نیرویی وارد می‌شود که در نهایت هر کدام گشتاوری به قاب وارد می‌کند و موجب چرخش قاب می‌شود.



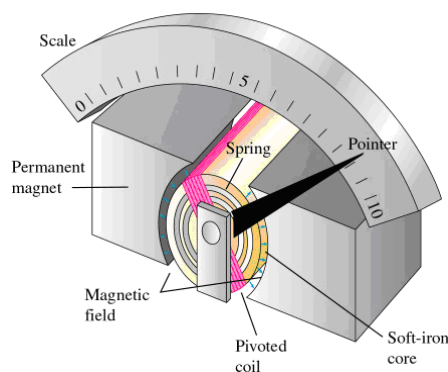
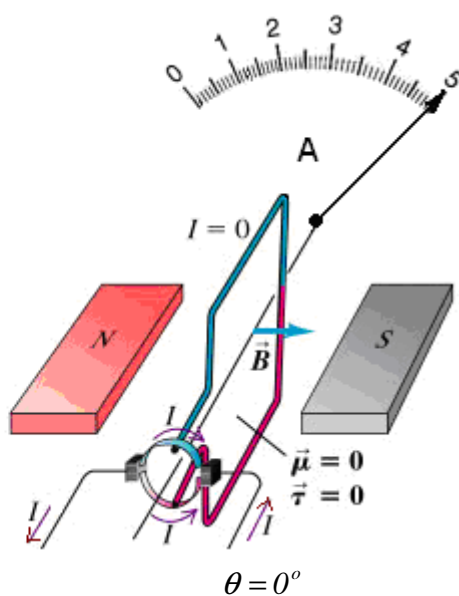
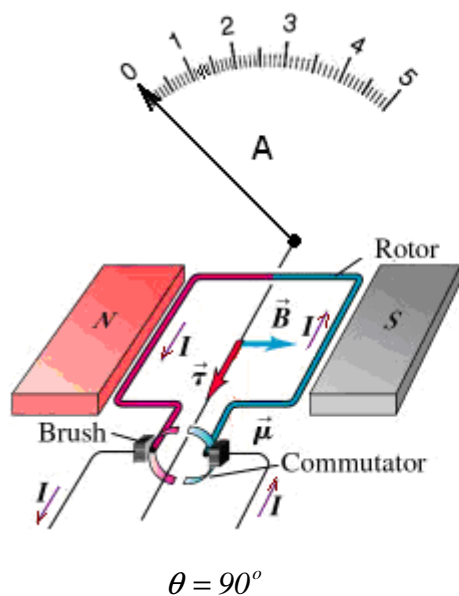
شکل 1 - 2 - تصویر قاب و میدان از نمای جانبی

$$\left\{ \begin{aligned} \tau &= \left(\frac{L}{2} \right)_{a,b} \times \vec{F} + \left(\frac{L}{2} \right)_{c,d} \times \vec{F} = L \times \vec{F} = L \parallel F \parallel \sin \theta \quad (2-1-1) & \text{گشتاور وارد بر هر بازو :} \\ |F| &= I \vec{a} \cdot \vec{B} \quad (2-1-2) & \text{نیروی وارد بر هر بازوی قاب :} \\ (2-1-1,2) \Rightarrow \tau &= ISB \sin \theta \quad (2-2) & \text{کوپل (گشتاور) محرک :} \end{aligned} \right.$$

طبق روابط (1 - 2) و (2 - 2) با اعمال جریان I به قاب سیم پیچ (در حالت مطلوب بدون اصطکاک) حتی با کوچکترین جریانی شروع به دوران می‌کند تا اینکه در وضعیت $\theta = 0^\circ$ قرار گیرد و گشتاور برآیند $\tau = 0$ شود. بدیهی است سواى اینکه I چقدر باشد، قاب می‌تواند از $\theta = 0^\circ$ تا $\theta = 90^\circ$ دوران کند، به عبارتی با کمترین جریانی که از سیم پیچ بگذرد، قاب دوران می‌کند و چون کوپل مقاومی وجود ندارد در وضعیت تعادل $(\sum \tau_i = 0, \sum F_i = 0)$ یعنی $\theta = 0^\circ$ متوقف خواهد شد. در $\theta = 0^\circ$ تعادل ناپایدار، بنابراین قاب دارای یک وضعیت به ازای تمام جریانه‌ها خواهد بود و لذا با آن نمی‌توان هیچ گونه جریانی را اندازه‌گیری کرد.

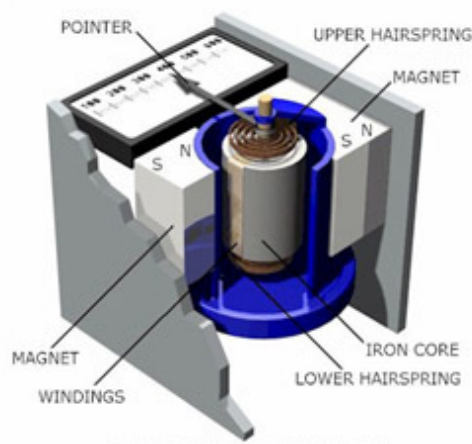


به منظور استفاده از این دستگاه به عنوان وسیله‌ای برای اندازه‌گیری جریان باید یک کوپل مقاوم تعریف شده (معمولاً خطی یا لگاریتمی) ایجاد کرد که این عمل با استفاده از فنرهای حلقوی متصل به محور تحقق می‌پذیرد. پس از این کار، می‌توان متناسب با هر جریانی و متناظر با درجه انحراف محور قلاب از $\theta = 0^\circ$ تا $\theta = 90^\circ$ کار درجه بندی دستگاه را انجام داد. (درجه بندی صفحه نمایش)

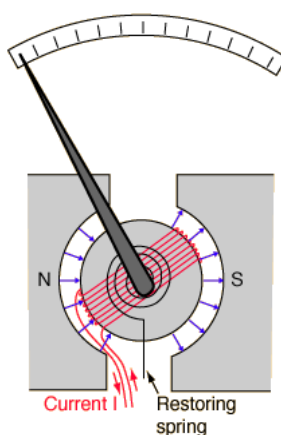


شکل 2-2 درجه بندی صفحه نمایش گالوانومتر

2-2 - ساختمان داخلی گالوانومتر



همانطور که دیدیم، همواره گشتاور $\tau = N \cdot I \cdot B \cdot S \cdot \sin \theta$ عامل چرخش قاب در میدان مغناطیسی (B) می‌شود. به عبارتی گشتاور تابعی از θ است و در تمام گستره تغییرات θ رابطه گشتاور $\tau = K(\theta) \cdot I$ با جریان (کمیت مورد سنجش) رابطه‌ای خطی نیست، لذا صفحه نمایش به طور غیر یکنواخت با مقدار I درجه بندی می‌شود. به منظور اینکه صفحه نمایش با تقسیم‌های مساوی و یکنواخت بر حسب جریان عبوری از قاب سیم پیچ مدرج شود - به عبارتی $\tau = K \cdot I$ باشد - از نوع قاب با هسته آهنی استوانه‌ای شکل (آهن نرم) استفاده می‌کنیم. (نظیر شکل (2-3))



شکل 2-3 - نمایش توزیع میدان مغناطیسی با وجود هسته آهنی درون قاب سیم پیچ

استوانه‌ای از آهن نرم (Core، هسته) که به صورت ثابت مابین کفشد قطب‌های N و S قرار دارد تعبیه می‌کنیم، بطوریکه قاب سیم پیچ بتواند حول محور استوانه بچرخد. (زیرا وزن هسته موجب گشتاور اینرسی مقاوم و بازدارنده می‌شود).

همان طور که در شکل (2-4) دیده می‌شود، همواره میدان $\vec{B}$ در تمام حوزه چرخشی قاب، هم‌راستای r محور چرخش قاب است. لذا در تمام محدوده، گشتاور وارده به قاب برابر مقدار ثابت $|\tau| = N \cdot B \cdot I \cdot S$ است در نهایت $|\tau| = K \cdot I$ است که در آن $K = NBS$ مقدار یست ثابت.

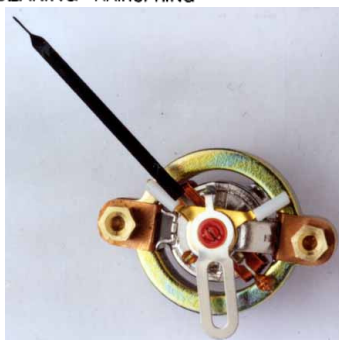
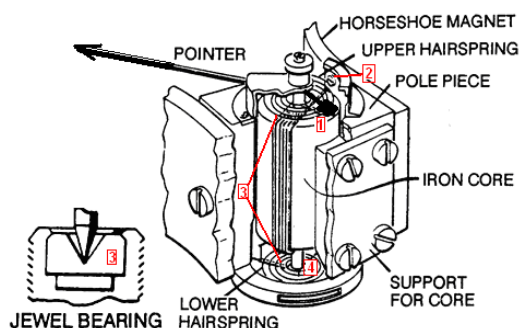


شکل 4-2 - شمای واقعی دستگاه گالوانومتر آرسنوال

در واقع همان طور که در شکل می بینیم، تمام محدوده دوران عقربه به طور مساوی به قسمتهایی بر حسب I قابل مدرج کردن است.

(1-2-2) قسمتهای مکانیکی یک گالوانومتر

به منظور تسهیل در امر حرکت گالوانومتر و نیز تسهیل امر تنظیمات، قسمتهای مکانیکی متعددی برای دستگاههای اندازه گیری تدارک می شود که عمده آنها را در شکل (5-2) مشاهده می کنید.



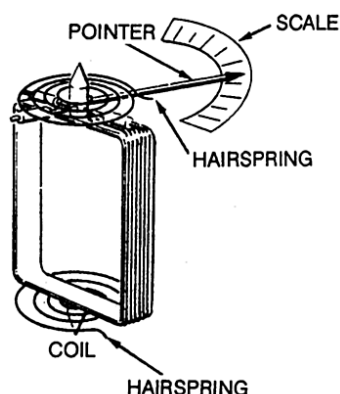
شکل 5-2 - قسمتهای مکانیکی گالوانومتر

همان طور که ملاحظه می شود، بخش های مکانیکی اصلی دستگاه به قرار زیر است :

- 1) وزنه تنظیم
 - 2) پیچ تنظیم صفر
 - 3) تکیه گاهها در دو انتهای محور ؛ فنر مقاوم
 - 4) پیچ های تنظیم صفر و انتهای رنج؛ تکیه گاهها
- فنر حلزونی؛ محور، صفحه مدرج؛ عقربه، وزنه های تعادل، آهن ربای دایمی؛ تنظیم صفر اول با فنر بطریقه مکانیکی و تنظیم صفر آخر بطریقه الکتریکی.

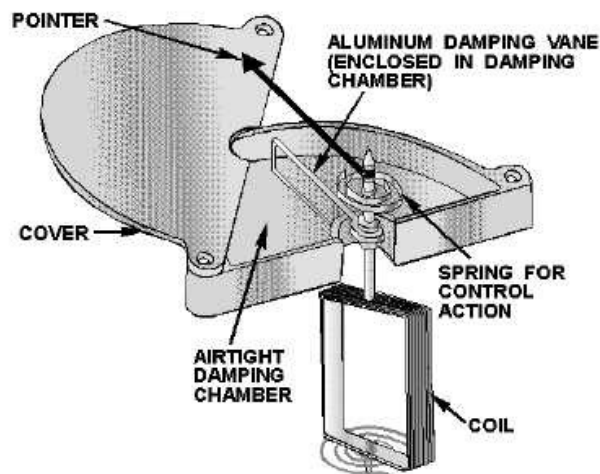
(2-2-2) قسمت‌های الکتریکی یک گالوانومتر

در شکل (6 - 2) قسمت‌های الکتریکی نظیر قاب سیم پیچ و ترمینال‌های ورودی و خروجی قاب‌نشان داده شده است.



شکل 6 - 2 - قسمت‌های الکتریکی گالوانومتر

یک سر فنری که در طرف پیچ تنظیم صفر دستگاه قرار دارد، به محور و سر دیگر به بازوی تنظیم صفر عقربه وصل شده است که بازوی تنظیم صفر عقربه از نظر مکانیکی با امکان حرکت حول محور قاب‌گردان برای تنظیم صفر به بدنه دستگاه وصل و از نظر الکتریکی از آن عایق است. به این ترتیب یکی از ترمینال‌های اتصال جریان به قاب گردان محسوب می‌شود؛ فنر دوم که در طرف دیگر محور قاب قرار دارد، از یک طرف به محور و از طرف دیگر از نظر مکانیکی به بدنه دستگاه ثابت شده ولی از نظر الکتریکی از آن عایق بوده و ترمینال دیگر اتصال جریان به قاب را تشکیل می‌دهد.

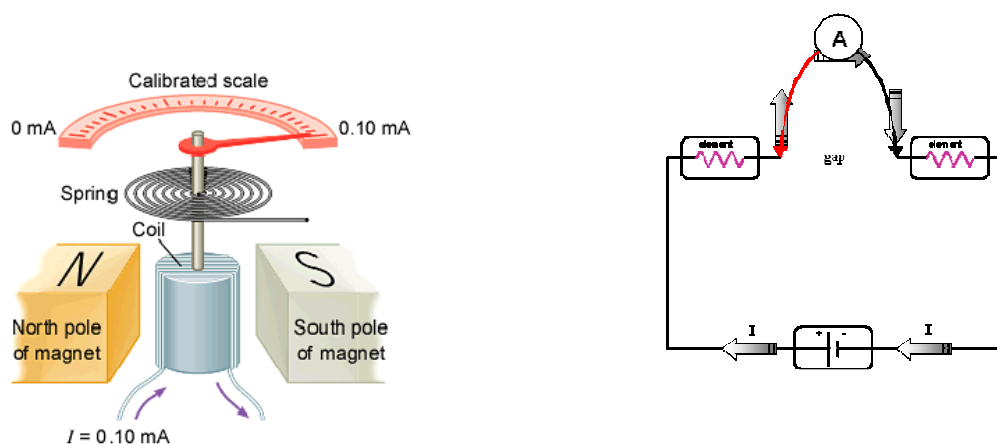


فصل سوم

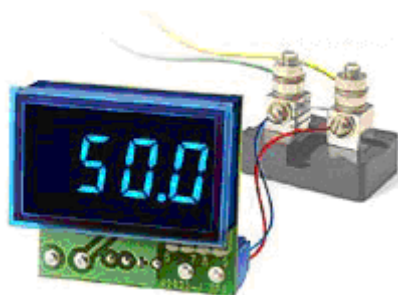
طراحی آمپر متر و ولت متر با استفاده از گالوانومتر

1-3- ساخت آمپر متر جریانهای زیاد

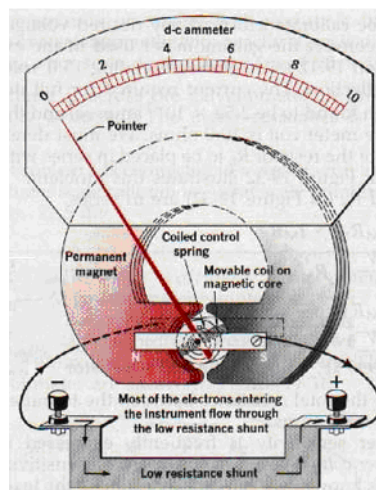
قبل از اینکه به تشریح عملکرد و بیان نحوه محاسبات آمپر متر بپردازیم نخست یاد آوری میکنیم که آرایش قرارگیری "آمپر متر" در هر مدار بصورت سری میباشد:



گالوانومترها تنها قادر به سنجش جریانهای کم هستند و به روش مستقیم قادر به سنجش جریانهای زیاد نیستند. به منظور حل این مشکل با استفاده از یک مدار مقاومت "شنت"¹ (موازی) با گالوانومتر می توان سنجش جریانهای زیاد را نیز امکان پذیر ساخت.



b



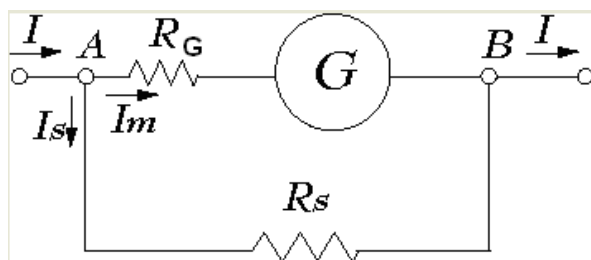
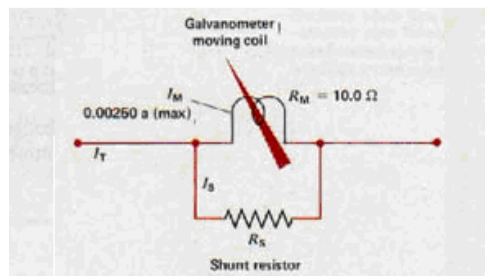
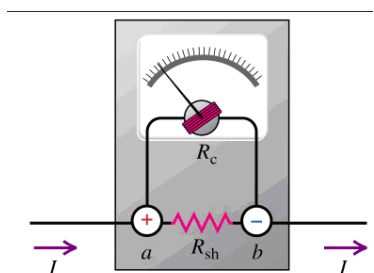
a

شکل 1-3 (a) مدار شماتیک آمپر متر شنت، (b) کاربرد مقاومت شنت در دیجیتال

¹ Shunt

2-3. ساخت آمپر متر مدار شنت یک حوزه‌ای

همان طور که از مدار شکل (2-3) مشخص است، با موازی کردن یک مقاومت مناسب (R_S کم) می‌توان جریان ناشی به گالوانومتر، یعنی سهم جریان گالوانومتر از جریان I مورد نظر برای سنجش را کنترل کرد.



شکل 2-3 - آمپر متر یک حوزه‌ای شنت

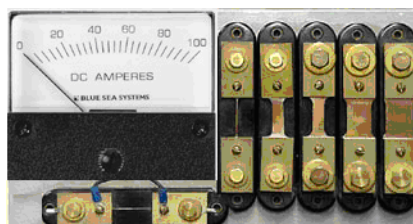
به عنوان مثال، اگر حداکثر جریان مجاز و قابل سنجش گالوانومتر I_m باشد و ما بخواهیم جریان I (که k برابر I_m است) را بسنجیم، مقدار R_S چنین به دست می‌آید:

$$V_{AB} = V_{AB} \Rightarrow I_m R_G = I_S R_S \Rightarrow I_S = I - I_m = k I_m - I_m$$

$$I_m R_G = R_S (k I_m - I_m) \Rightarrow R_S = \frac{I}{k - 1} R_G \quad (3-1)$$

3-3- ساخت آمپر متر با چند حوزه سنجش

معمولا با دو مدار این کار قابل تحقق است که در اینجا به ذکر معایب و مزایای هر کدام می‌پردازیم

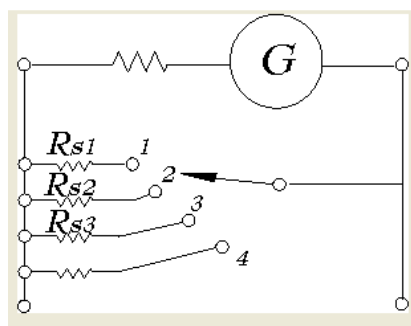


(3-3-1) آمپر متر شنت ساده با چند حوزه مشخص (نوع اول)

همان طور که در شکل (3-3) نشان داده شده است، با استفاده از چند مقاومت متنوع و یک کلید سلکتوری گردان می‌توان تا چند رنج جریان را اندازه گرفت.



(b) کلید انتخابگر گستره سنجش
(Range Selector Switch)

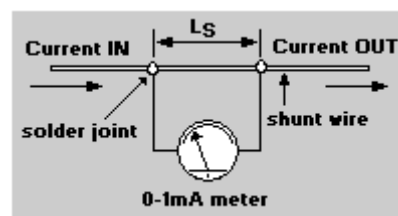


شکل 3-3. (a) آمپر متر چند حوزه‌ای، شنت ساده - نوع اول.

مقدار R_{Si}	وضعیت کلید سلکتوری	حوزه سنجشی
$\frac{R_G}{k_1 - 1}$	1	$0 < I < k_1 I_m$
$\frac{R_G}{k_2 - 1}$	2	$0 < I < k_2 I_m$
$\frac{R_G}{k_3 - 1}$	3	$0 < I < k_3 I_m$
$\frac{R_G}{k_4 - 1}$	4	$0 < I < k_4 I_m$

میتوان بجای مقاومت از سیم ، نظیر شکل زیر و مطابق جدول استاندارد سیمها طول مناسب مقاومت شنت را محاسبه و آنرا در مدار قرار داد.

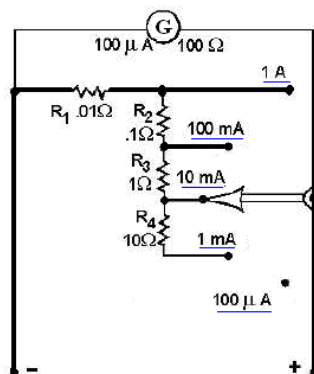
AWG	Diam. Mills	Circular Mills	Ohms/1000ft at 25 °C	mm	Closest British SWG
18	40.3	1624.09	6.3860	1.024	20
20	32.0	1024.00	10.1280	0.813	22
21	28.5	812.25	12.7700	0.724	23
22	25.3	640.09	16.2000	0.643	24
24	20.1	404.01	25.6700	0.511	26
26	15.9	252.81	41.0200	0.404	29
28	12.6	158.76	65.3100	0.320	31
30	10.0	100.00	103.7100	0.254	34
32	8.0	64.00	162.0000	0.203	37
34	6.3	39.69	261.3000	0.142	38-39
36	5.0	25.00	414.8000	0.127	41
38	4.0	16.00	648.2000	0.102	43



$$\text{Length (in feet)} = R_{\text{shunt}} / [R_{\text{wire}} / 1000]$$

(2-3-3) آمپرمتر شنت ساده با چند حوزه مشخص (نوع دوم)

بمنظور صرفه جوئی در مقاومت های شنت استفاده شده ترکیب دیگری توصیه میشود.



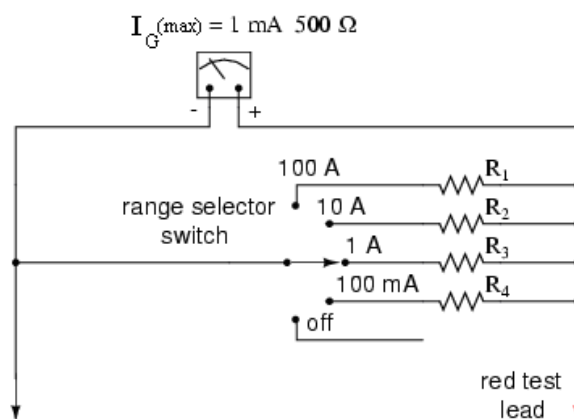
شکل 3-3. آمپرمتر چند حوزه‌ای، شنت ساده - نوع دوم.

تمرین 1: گالوانومتری با مقاومت داخلی 3Ω و حداکثر افت ولتاژ مجاز $90mV$ (میلی ولت) موجود است.

اولا : حداکثر جریان مجاز گالوانومتر را مشخص کنید.

ثانیا : مداری طراحی کنید که با استفاده از این گالوانومتر بتوان جریانهای $(0-1A)$ ، $(0-3A)$ و $(0-10A)$ را اندازه گیری کرد.

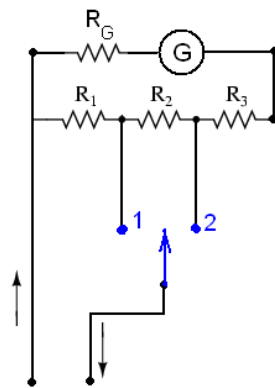
تمرین 2: مقادیر مقاومت‌های شنت R_1 ، R_2 ، R_3 و R_4 را تعیین کنید.



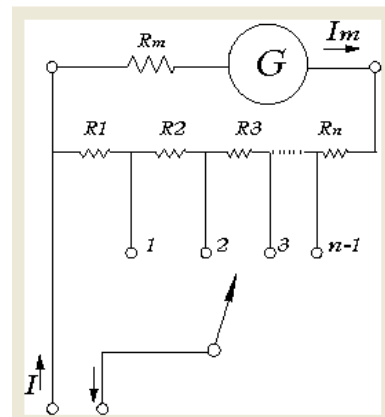
(3-3-3) آمپر متر چند حوزه‌ای شنت آیرتون



مشکل مدار شنت ساده وجود مقاومت‌های خیلی کوچک در تحقق آمپر متر برای جریانهای ماکزیمم بالاست. (گاهی اوقات مقادیر مقاومت حدود چند هزار اهم می‌باشد). که با ترکیب ابتکاری دانشمند انگلیسی **William Edward Ayrton** (1847-1908)، نظیر آنچه در مدار شکل (4-3) مشاهده میکنید، مشکل فوق مرتفع گردید.



آمپر متر دو حوزه‌ای

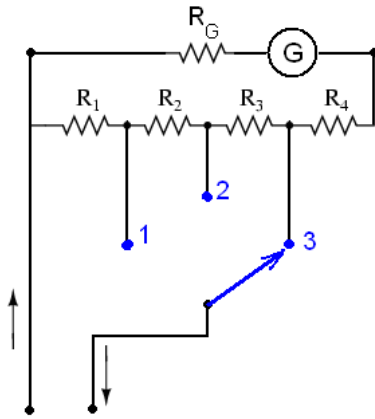


شکل 3-4، آمپر متر آیرتون n حوزه‌ای

همان طور که از ترکیب مدار **شکل (3-4)** مشخص است، همواره یک مقاومت به صورت سری با گالوانومتر حتی در آخرین رنج قرار می‌گیرد.

تحلیل مداری آمپرمتر سه حوزه‌ای شنت آیرتون

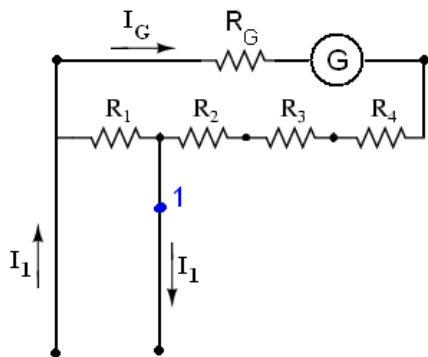
مدار شکل (3-5) قادر است حداکثر سه جریان I_1 و I_2 و I_3 را اندازه‌گیری کند. برای تحقق این امر چهار مقاومت نیاز داریم که نخست به ذکر آنها می‌پردازیم. مجموع مقاومت‌های $\sum_{i=1}^4 R_i$ را به طور دلخواه با انتخاب می‌کنیم و سه معادله دیگر را متناظر با جریانهای I_1 ، I_2 و I_3 مشخص می‌شود.



شکل 3-5 - آمپرمتر سه حوزه‌ای شنت آیرتون

$$\sum R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 30 \quad (2-3) \quad (\text{مقداری دلخواه})$$

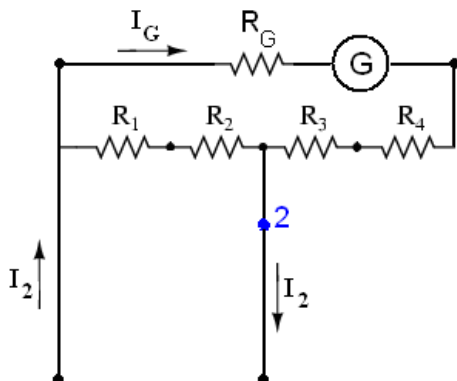
کلید در حالت (1):



$$(I_1 - I_m)R_1 = I_m(R_m + R_2 + R_3 + R_4) \Rightarrow$$

$$I_1 = \frac{I_m}{R_1} (R_m + \sum_{i=1}^4 R_i) \quad (3-3)$$

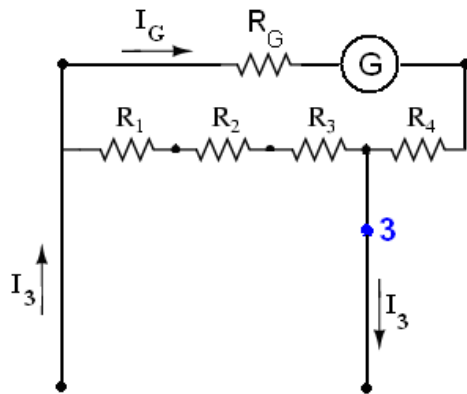
کلید در حالت (2):



$$(I_2 - I_m)(R_1 + R_2) = I_m(R_m + R_3 + R_4) \Rightarrow$$

$$I_2 = \frac{I_m}{R_1 + R_2} (R_m + \sum_{i=1}^4 R_i) \quad (3-4)$$

کلید در حالت (3) :



$$(I_3 - I_m)(R_1 + R_2 + R_3) = I_m(R_m + R_4) \Rightarrow$$

$$I_3 = \frac{I_m}{R_1 + R_2 + R_3} (R_m + \sum_{i=1}^4 R_i) \quad (3-5)$$

از تقسیم رابطه (3-4) بر (3-5) :

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} = 1 + \frac{R_3}{R_1 + R_2} \quad (3-6-1)$$

از تقسیم رابطه (3-3) بر (3-4) :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3-6-2)$$

از رابطه (3-3)

$$R_1 = \frac{I_m}{I_1} (R_m + \sum_{i=1}^4 R_i) \quad (3-6-3)$$

و در نهایت

$$R_1 = \frac{I_m}{I_1} (\sum_{i=1}^4 R_i - (R_1 + R_2 + R_3)) \quad (3-6-4)$$

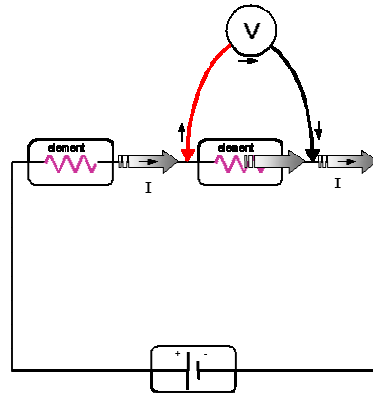
به این ترتیب از روابط (3-6) مقاومت‌های $R_1, \dots, R_4$ را به دست می‌آوریم.

تمرین: مطلوبست طراحی آمپرمتري با قابليت اندازه‌گيري جريانهاي $30mA, 300mA$ و $3A$ به‌شرطي كه مشخصات گالوانومتر $R_m = 10\Omega$ و $I_m = 3mA$ باشد. آمپرمتري را به دو طريق شنت ساده و آيرتون بسازيد (در حالت آيرتون $\sum R_i = 20\Omega$ مي‌باشد).

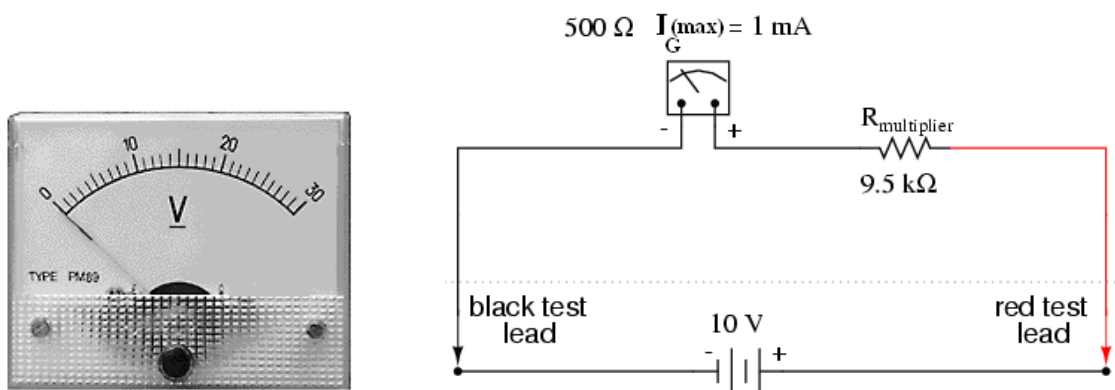
4-3- ولت متر (Voltmeter)

(1-4-3) مقدمه

ولت متر یا ابزاری که به وسیله آن بتوان اختلاف ولتاژ میان دو نقطه را اندازه گیری کرد از جمله وسایلی است که می توان به وسیله گالوانومتر ساخت ، آرایش قرار گیری "ولتمتر" در هر مدار بصورت موازی میباشد:



از آنجایی که میزان انحراف عقربه متناسب با جریان عبوری I از گالوانومتر است و حداکثر انحراف متناسب با عبور حداکثر جریان مجاز یا I_m است، در این حالت اختلاف ولتاژ دو سر گالوانومتر برابر $V_m = I_m R_G$ خواهد بود، به عبارتی دیگر اگر صفحه مدرج را بر حسب اختلاف ولتاژ گالوانومتر مدرج کنیم (از ۱ ولت تا ۱ ولت) یک ولت متر حساس خواهیم داشت.



مثال : با گالوانومتری با مقاومت $R_G = 10\Omega$ ، $I_m = 5mA$ و ۱ چه ولت متری می توان ساخت ؛ حداکثر چه ولتاژی را می تواند اندازه بگیرد ؟

پاسخ:

از آنجا که $V_m = I_m R_G$ است " $V_m = I_m R_G$ " ، بنابراین می توان ولت متری با صفحه مدرج 0 تا 50mV را محقق ساخت.

می توان چنین نتیجه گرفت که هر گالوانومتر با مشخصات R_G و I_m به طور همزمان :
 الف) میلی آمپر متری است با حداکثر جریان قابل اندازه گیری I_m میلی آمپر ؛
 ب) میلی ولت متری است با حداکثر ولتاژ قابل اندازه گیری $V_m (R_G I_m)$ میلی ولت.

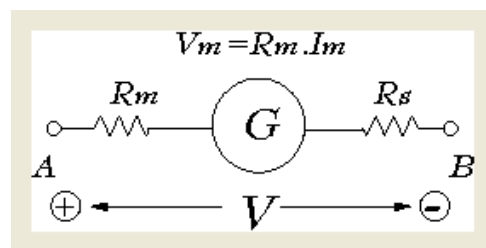
همان طور که قبلاً در ساخت آمپر متر از گالوانومتر بهره گرفتیم می توان گالوانومتر را به عنوان ابزاری برای سنجش ولتاژهای بالا نیز بکار گرفت. به طور مشابه دو مدار برای این منظور تعریف می شود:

(2-4-3) مدار سری ساده

در این ساختار با استفاده از یک مقاومت سری با گالوانومتر می توان حوزه سنجش آن را از چندین میلی ولت به ولتاژ دلخواه تغییر داد.

V : حداکثر ولتاژ مورد نظر به منظور اندازه گیری.

R_G : مقاومتی که باید به طور سری با گالوانومتر همراه کرد.



شکل 5-3- مدار معادل ولت متر

محاسبه R_S :

$$V = I_m R_G + I_m R_S \Rightarrow R_S = \left(\frac{V}{I_m} - R_G \right)$$

حال فرض کنیم ولتاژ مورد نظر برای اندازه گیری n برابر V_m باشد، در این صورت داریم :

$$V = n V_m \Rightarrow R_S = \left(\frac{n V_m}{I_m} - R_G \right) = (n-1) R_G \Rightarrow R_S = (n-1) R_G \quad (3-7)$$

نتیجه: اگر بخواهیم از میلی ولت متری با حداکثر ولتاژ مجاز V_m ، ولت متری با قابلیت سنجش تا حداکثر $V = n V_m$ بسازیم، باید آن را با مقاومت R_S (n برابر مقاومت گالوانومتر) سری کنیم.

مثال: می خواهیم با میلی آمپر متری با جریان مجاز $10mA$ و مقاومت قاب سیم پیچ متحرک 20Ω ، ولت متری با قابلیت اندازه گیری تا حداکثر 200 Volt طراحی کنیم. مقاومت سری مورد نیاز را تعیین کنید.

$$V_m = I_m R_G = 20 \times 10 = 200m\text{Volt} \quad V = n V_m \quad 200 = n \times 0.2V \Rightarrow n = 1000$$

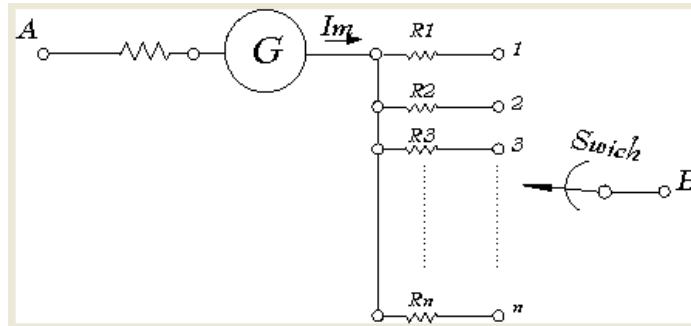
$$R_S = \left(\frac{n V_m}{I_m} - R_G \right) = (n-1) R_G \Rightarrow R_S = (1000-1) 20 = 19980\Omega = 19.98k\Omega$$

5-3- گسترش حوزه سنجش ولت مترها

1-5-3) مدار ولت متر با چند حوزه سنجش (نوع اول)

مطابق شکل (6-3) با استفاده از یک کلید سلکتوری و چند مقاومت سری می‌توان ولت متری با چند حوزه سنجش ساخت.

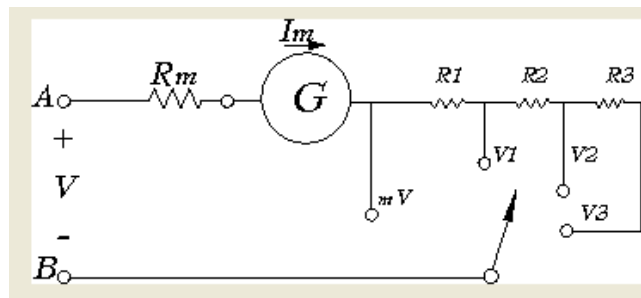
$$R_k = \left(\frac{kV_m}{I_m} - R_G \right) = (k-1)R_G \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$



شکل 6-3- ولت متر با n حوزه سنجش

2-5-3) مدار ولت متر با چند حوزه سنجش (نوع دوم)

مدار چند حوزه‌ای که قبلاً توضیح داده شد، یک عیب عمده داشت و آن عدم استفاده بهینه از مقاومت‌های سری است، زیرا در هر حالت تنها یک مقاومت در مدار قرار دارد. در مدار شکل (7-3) ضمن ارائه چندین مقادیر زیاد با مقدار مقاومت رابطه مستقیم دارد.



مدار در حالت V_1 :

$$V_1 = (R_G + R_1)I_m \Rightarrow V_1 - V_m = R_1 I_m$$

$$\Rightarrow R_1 = \left(\frac{V_1 - V_m}{V_m} \right) R_G \quad (3-8-1)$$

مدار در حالت V_2 :

$$V_2 = (R_G + R_1 + R_2)I_m \Rightarrow V_2 = (R_G + R_1)I_m + R_2 I_m \Rightarrow V_2 = V_1 + R_2 I_m$$

$$\Rightarrow R_2 = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_m} \right) R_G \quad (3-8-2)$$

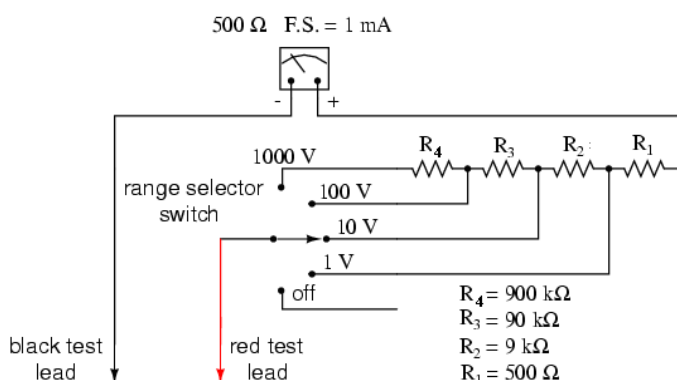
مدار در حالت V_3 :

$$V_3 = (R_G + R_1 + R_2 + R_3)I_m \Rightarrow V_3 = V_2 + R_3 I_m$$

$$\Rightarrow R_3 = \left(\frac{V_3 - V_2}{V_m} \right) R_G \quad (3-8-3)$$

مقادیر V_1 ، V_2 و V_3 مقادیر حداکثری حوزه های سنجش ولت متر میباشد.

مثال: می‌خواهیم با میلی آمپر متری با جریان مجاز 1mA و مقاومت قاب سیم پیچ متحرک 500Ω ولت متری با قابلیت اندازه‌گیری بترتیب تا حداکثر $1, 10, 100, 1000\text{ Volts}$ طراحی کنیم، مقاومتهای سری مورد نیاز را تعیین کنید



شکل 7 - 3 - ولت متر با چند حوزه سنجش

پاسخ:

$$R_1 = \left(\frac{V_1 - V_m}{V_m} \right) R_G = \left(\frac{1 - 0.5}{0.5} \right) 500 = 500 \quad (1)$$

$$R_2 = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_m} \right) R_G = \left(\frac{10 - 1}{0.5} \right) 500 = 9\text{ k}\Omega \quad (2)$$

$$R_3 = \left(\frac{V_3 - V_2}{V_m} \right) R_G = \left(\frac{100 - 10}{0.5} \right) 500 = 90\text{ k}\Omega \quad (3)$$

$$R_4 = \left(\frac{V_4 - V_3}{V_m} \right) R_G = \left(\frac{1000 - 100}{0.5} \right) 500 = 900\text{ k}\Omega \quad (4)$$

تمرین 1: به کمک یک میلی آمپر متر با قاب گردان و با جریان مجاز 10mA ، مقاومت قاب سیم پیچ و فنرهای کوپل سیمهای اتصال (مقاومت داخلی آمپر متر) برابر 15Ω ، ولت متری با سه حوزه سنجشی متنوع " $V_1\text{ olts}$ " $V_2 = 50\text{Volts}$ ، $V_3 = 200\text{Volts}$ و به شیوه ساده (نوع اول) طراحی کنید.

تمرین 2: به کمک یک میلی آمپر متر با قاب گردان و با جریان مجاز 1mA ، مقاومت قاب سیم پیچ و فنرهای کوپل سیمهای اتصال (مقاومت داخلی آمپر متر) برابر 100Ω ، ولت متری با پنج حوزه سنجشی متنوع " $V_1\text{ olts}$ " $V_2 = 5\text{Volts}$ ، $V_3 = 10\text{Volts}$ ، $V_4 = 50$ ، $V_5 = 100\text{Volts}$ و به شیوه (نوع دوم) طراحی کنید.

فصل چهارم

ساختمان و ساختار اهم مترهای سری و موازی

(4-1) مقدمه

اهم متر یا دستگاه سنجش مقاومت از جمله وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده مهندسان و تکنسین‌های برق است. معمولاً قسمت اصلی آنها را همان گالوانومتر (میلی آمپر متر) تشکیل می‌دهد، دو مداربندی برای اهم مترها معرفی می‌شود که به شرح آنها می‌پردازیم:

(4-2) اهم مترهای سری

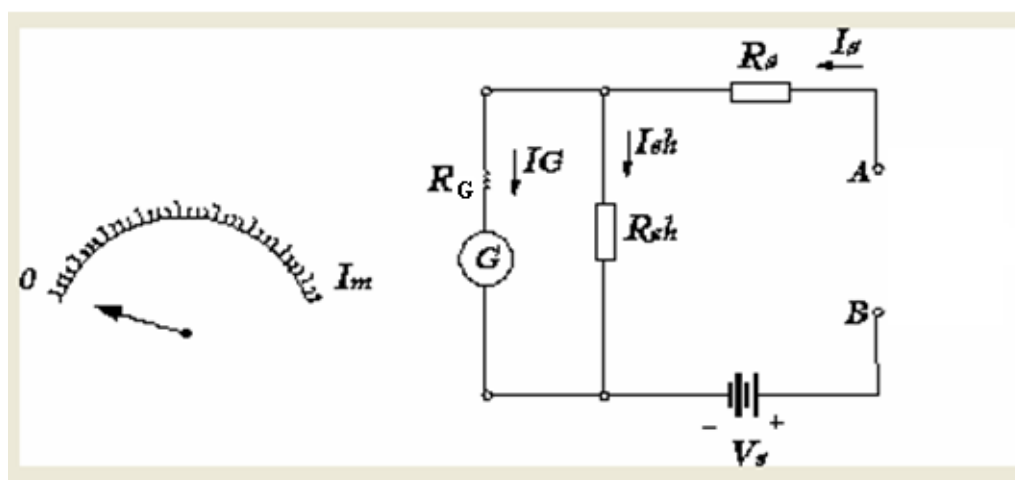
اساس کار چنین است که از یک گالوانومتر با پارامترهای معلوم (I_m, R_m) به همراه یک منبع تغذیه ولتاژ ثابت و دو مقاومت مشخص مداری پدید آوریم که با اتصال دو ترمینال این مدار به هر مقاومت R_x ، عقربه گالوانومتر متناظر با مقدار مقاومت فوق منحرف شود.

(4-2-1) طراحی اهم متر سری

وضعیت‌های مختلف مدار اهم متر به شرح زیر است:

حالت اول: اهم متر به هیچ مقاومتی وصل نباشد (Open Circuit) بنابراین نقطه "0" صفحه مدرج گالوانومتر معادل $(R_x = \infty)$ را توصیف می‌کند.

$$R_x = \infty \Rightarrow I_G = 0$$



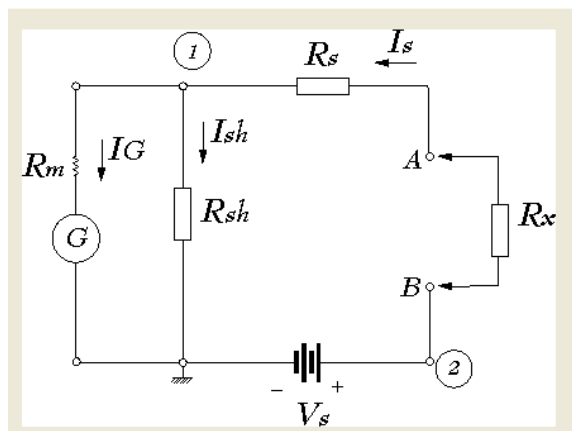
شکل (4-1-1) مدار اهم‌متر سری در حالتی که ترمینالهای خروجی باز می‌باشند.

حالت دوم: خروجی اهم متر اتصال کوتاه، Short Circuit، شود. ($R_x = 0$)

با توجه به اینکه در این وضعیت منبع تغذیه / کاملاً (بدون هیچ واسطه مقاومتی) به مدار تحمیل می‌شود، شرط اول طراحی اهم متر با توجه به جریان مجاز قابل تحمل گالوانومتر تعیین می‌شود.

در نتیجه:

$$R_x = 0 \Rightarrow I_G = I_m$$



شکل (2-1-4) مدار اهم متر سری در حالت اتصال

بنابراین صفحه مدرج گالوانومتر بین دو حد " $(0, \infty)$ " اهم قابل درجه بندی است. رابطه (2-4) اولین معادله لازم جهت محاسبه R_s و R_{sh} را در اختیارمان می‌گذارد.

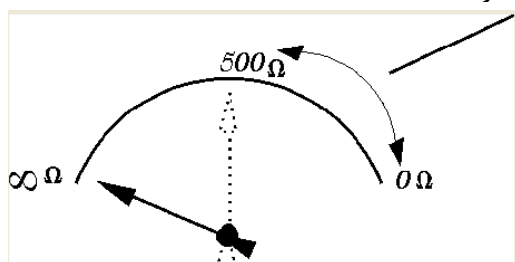
با توجه به مدار شکل (2-1-4) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} KCL1: I_s = \frac{V_1}{R_{sh}} + I_m \\ KVL1: V_s + R_s I_s + V_1 = 0 \\ V_1 = R_m I_m = V_m \end{cases} \Rightarrow -V_s + R_s \left(\frac{V_m}{R_{sh}} + I_m \right) + V_m = 0 \quad (4-3)$$

معادله (3-4) جواب منحصر بفردی برای G_s و G_{sh} نخواهد داشت. بنابراین لازم است تا معادله دیگری (که مستلزم معرفی یک شرط اضافی است) ارائه شود. با توجه به اینکه اهم مترها همگی در ابتدای حوزه سنجش $\infty \Omega$ و در انتها 0Ω را معرفی می‌کنند، عملاً درجه بندی دقیق بین 0 تا ∞ امکان پذیر نیست. از طرف دیگر حساسیت اهم متر برای تمام حوزه سنجش صفر خواهد بود. زیرا:

$$S_R = \frac{\theta}{\infty} = 0$$

اگر نقطه میانی حوزه سنجش، حد نهایی قابلیت سنجش اهم متر تصور شود می‌توان اهم مترهایی با حساسیت بالا ساخت. برای مثال در شکل زیر نمونه‌ای از یک اهم متر با حساسیت بالا در نیمه دوم انحراف حداکثر گالوانومتر بیان شده است. محدوده سنجش قابل اطمینان اهم متر:



شکل 2-4 - نمای صفحه مدرج یک اهم متر

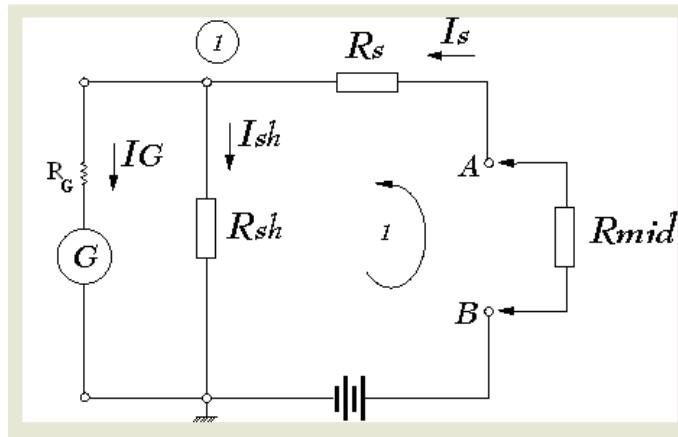
حساسیت اهم متر به ازای مقاومت‌های قابل سنجش حداکثر 500Ω :

$$S_R = \frac{\frac{\pi}{2}}{500} = 0.00314$$

بدیهی است هر چه مقاومت میانه حوزه سنجش $R_{M.R}$ را بیشتر اختیار کنیم، حساسیت اهم متر کمتر خواهد بود. با توجه به مطالب اخیر شرط سوم توسط طراح و متناسب با حساسیت مطلوب اختیاری می‌شود.

حالت سوم: اگر خروجی اهم متر به مقاومت $R_{M.R}$ اتصال یابد سپس عقربه گالوانومتر به اندازه نصف انحراف ماکزیمم منحرف شود :

$$R_x = R_{M.R} \Rightarrow I_G = \frac{1}{2} I_m \quad (4-4)$$



شکل 3-4 - مدار اهم متر سری با اتصال $R_{M.R}$

دراین حالت با توجه به شکل (3-4) به نتایج زیر می‌رسیم :

$$\begin{cases} KCLI: & I_S = \frac{V_l}{R_{Sh}} + \frac{I}{2} I_m \\ KVL1: & V_S + (R_{M.R} + R_S) I_S + V_l = 0 \end{cases} \Rightarrow V_l = \frac{I}{2} R_m I_m = \frac{I}{2} V_m \Rightarrow$$

$$-V_S + (R_{M.R} + R_S) \left(\frac{V_m}{2R_{Sh}} + \frac{I}{2} I_m \right) + \frac{I}{2} V_m = 0 \Rightarrow$$

$$-\frac{V_S}{2} - \frac{V_S}{2} + \frac{I}{2} R_S \left(\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m \right) + \frac{I}{2} R_{M.R} \left(\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m \right) + \frac{I}{2} V_m = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{I}{2} \left[-V_S + R_S \left(\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m \right) + V_m \right] - \frac{V_S}{2} + \frac{I}{2} R_{M.R} \left(\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\text{from (4-3)} \Rightarrow -V_S + R_S \left(\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m \right) + V_m = 0 \Rightarrow R_{Sh} = \frac{V_m}{\frac{V_S}{R_{M.R}} - I_m} \quad (4-4)$$

با ملاحظه رابطه (4-4) مشاهده می‌شود که اگر انتخاب V_S ، $R_{M.R}$ و گالوانومتر مناسب نباشد،

امکان منفی شدن R_{Sh} و لذا عملی نبودن اهم متر وجود دارد. بنابراین همواره باید شرط $\frac{V_S}{R_{M.R}} - I_m > 0$

برقرار باشد.

محاسبه R_S :

با استفاده از رابطه (3 - 4) خواهیم داشت :

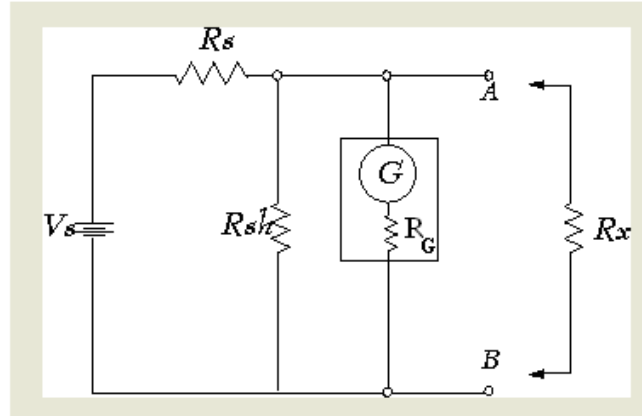
$$R_S = \frac{V_S - V_m}{\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m} \quad (4 - 5)$$

در عمل V_m خیلی کوچکتر از ولتاژ تغذیه V_S خواهد بود، لذا با تقریب از V_m در برابر V_S صرفنظر می کنیم و در نتیجه مقدار R_S چنین مشخص می شود:

$$R_S \cong \frac{V_S}{\frac{V_m}{R_{Sh}} + I_m} \quad (4 - 6)$$

3-4 - اهم مترهای موازی

با بررسی مدار اهم متر سری ملاحظه می‌شود در اثر سری قرار گرفتن مقاومت مورد سنجش R_x با مقدار گالوانومتر و نیز مقاومت بالای R_S (نسبت به R_G) این مقدار برای سنجش مقاومت‌های خیلی کوچکتر از R_S مناسب نخواهد بود. در نتیجه مدار دیگری با بهره‌گیری از گالوانومتر به نام مدار اهم متر موازی (مقاومت مورد سنجش با ترکیب موازی با گالوانومتر) ارائه می‌شود.



شکل 4-4 - نمای مدار اهم متر موازی

به موجب ترکیب موازی R_x با گالوانومتر، به ازای R_x های محدود در حدود R_G (مقاومت‌های کم) گالوانومتر نسبت به تغییر R_x حساسیت بالایی از خود نشان می‌دهد و لذا پاسخ اهم متر نسبت به R_x حساس تر و دقیق تر خواهد بود.

1-3-4 طراحی اهم متر موازی

داده‌های مسأله : مشخصات گالوانومتر (R_G, V_m, I_m) ; منبع تغذیه ولتاژ (V_S, I_S) مقدار مقاومت نیم‌اشل $R_{M.R}$ (Mid Range Resistance).

خواسته‌های مسأله :

حالت اول : در مدار اهم متر موازی به ازای $(R_x = \infty)$ گالوانومتر از نظر مقدار عبور جریان در بحرانی‌ترین حالت قرار دارد، پس باید R_S, R_{Sh} به گونه‌ای باشند تا جریان فوق از مقدار I_m تجاوز نکند.

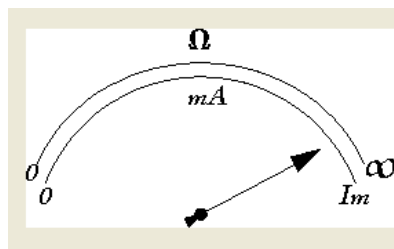
معادلات حالت اول

$$KCL1: I_S = I_{Sh} + I_G \Rightarrow G_S(V_S - V_1) = G_{Sh}V_1 + G_GV_1 \quad (4-7-1)$$

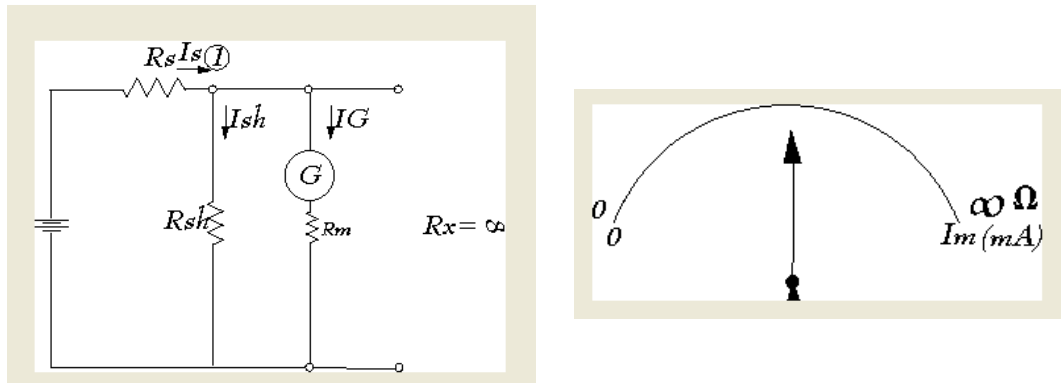
$$I_G = I_m \Rightarrow V_1 = I_m R_G = V_m \quad (4-7-2)$$

$$(4-7-1,2) \Rightarrow G_S(V_S - V_m) = V_m(G_{Sh} + G_G) \quad (4-8)$$

حالت دوم : در مدار فوق به ازای $(R_x = 0)$ جریان گالوانومتر صفر ($I_G = 0$) بوده، لذا انتها و ابتدای گستره سنجش اهم متر همانند اهم متر سری 0 و ∞ خواهد بود.



حالت سوم: برای تعیین دو مجهول R_S و R_{Sh} ، علاوه بر معادله (8 - 4)، نیاز به یک معادله دیگر نیز می‌باشد که به ازای $(R_x = R_{M.R})$ ، با شرط انحراف در وسط گستره سنجش ، تأمین می‌شود.



شکل 5-4 - مدار اهم متر موازی با اتصال ترمینالها به $R_{M.R}$

$$KCL1: I_S = I_{Sh} + I_G + I_{M.R} \Rightarrow G_S(V_S - V_1) = G_{Sh}V_1 + G_GV_1 + G_{M.R}V_1 \quad (4-9-1)$$

$$I_G = \frac{1}{2}I_m \Rightarrow V_1 = \frac{1}{2}I_m R_G = \frac{1}{2}V_m \quad (4-9-2)$$

$$(4-9-1,2) \Rightarrow G_S(V_S - \frac{1}{2}V_m) = \frac{1}{2}V_m(G_{Sh} + G_G + G_{M.R}) \quad (4-10)$$

$$\frac{1}{2}G_S V_S + \frac{1}{2}G_S V_m - \frac{1}{2}G_S V_m = \frac{1}{2}V_m(G_{Sh} + G_G + G_{M.R}) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2}G_S V_S + \frac{1}{2}G_S(V_S - V_m) = \frac{1}{2}V_m(G_{Sh} + G_G + G_{M.R}) \quad (4-11)$$

حال با جایگذاری معادل رابطه (8 - 4) در طرف اول رابطه (11 - 4) خواهیم داشت :

$$\frac{1}{2}G_S V_S + \frac{1}{2}(G_{Sh} + G_m)V_m = \frac{1}{2}V_m(G_{Sh} + G_G + G_{M.R}) \Rightarrow \frac{1}{2}G_S V_S = \frac{1}{2}G_{M.R}V_m \Rightarrow$$

$$R_S = \frac{V_S}{V_m} R_{M.R} \quad (4-12)$$

حال از رابطه (8 - 4) داریم :

$$G_S = \frac{G_{Sh} + G_m}{V_S - V_m} V_m \Rightarrow (G_{Sh} + G_m) = \left(\frac{V_S}{V_m} - 1\right)G_S \Rightarrow G_{Sh} = \left(\frac{V_S}{V_m} - 1\right)G_S - G_m \quad (4-13)$$

$$(4-12), (4-13) \Rightarrow G_{Sh} = \left(\frac{V_S}{V_m} - 1\right)\frac{V_m}{V_S}G_{M.R} - G_m = \left(1 - \frac{V_m}{V_S}\right)G_{M.R} - G_m \Rightarrow$$

$$G_{Sh} \cong G_{M.R} - G_m \quad (4-14)$$

(البته معمولاً $V_S \gg V_m$ می‌باشد، $\frac{V_m}{V_S} \ll 1$)

شرط قابل ساخت بودن اهم متر موازی عبارتست از حقیقی و مثبت بودن عناصر آن، یعنی :

$$G_S : \frac{V_m}{V_S} G_{M.R} > 0$$

$$G_{Sh} : G_{M.R} - G_G > 0 \Rightarrow G_{M.R} > G_G$$

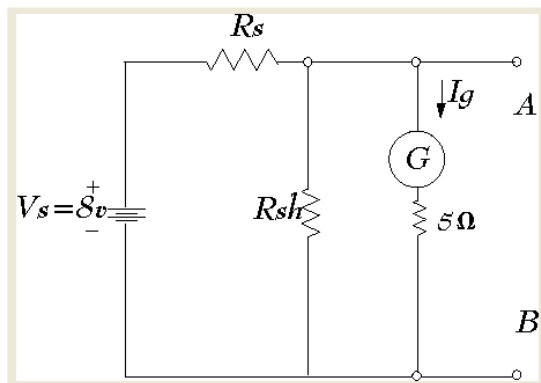
مثال : میلی آمپرمتری با حداکثر جریان مجاز $10mA$ و مقاومت داخلی 5Ω مفروض است ($V_S = 3V$) :

الف) چه اهم متری و با چه مشخصه مقاومت نیم اشل $R_{M.R}$ قابل طراحی است ؟

ب) اگر بخواهیم به ازای اتصال اهم متر به $R_x = 0.5\Omega$ عقربه گالوانومتر تا نصف انحراف ماکزیمم حرکت کند، مقادیر R_S و R_{Sh} چقدر خواهد بود ؟

الف)

$$G_{M.R} > G_G : G_{M.R} > 0.2 \Omega^{-1} \Rightarrow R_{M.R} < 5 \Omega$$



ب)

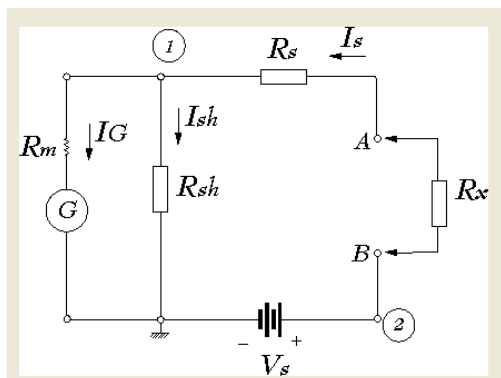
$$R_S = \frac{V_S}{V_m} R_{M.R}$$

$$V_m = I_m R_G = 50mV \Rightarrow R_S = \frac{3}{50 \times 10^{-3}} \times 0.5 \Rightarrow R_S = 30 \Omega$$

$$G_{M.R} = 2 \Omega^{-1} \Rightarrow G_{Sh} \cong G_{M.R} - G_G = 2 - 0.2 = 1.8 \Omega^{-1} \Rightarrow R_{Sh} = 0.53 \Omega$$

4-4 - نحوه درجه بندی اهم متر

به منظور درجه بندی اهم متر لازم است رابطه میان / و جریان عبوری از گالوانومتر مشخص شود. با استفاده از - شکل (6 - 4) خواهیم داشت



شکل 6-4 - مدار اهم متر سری

$$KCL1: I_s = I_{sh} + I_G$$

$$I_G = \left(\frac{I}{R_G} \right) V_l = G_G V_l \Rightarrow V_l = I_G R_G$$

$$I_{sh} = \left(\frac{I}{R_{sh}} \right) V_l = G_{sh} V_l = G_{sh} I_G R_G$$

$$I_s = \left(\frac{I}{R_s + R_x} \right) (V_s - I_G R_G) = \left(\frac{I}{R_s + R_x} \right) (V_s - I_G R_G)$$

$$KCL1: \left(\frac{I}{R_s + R_x} \right) (V_s - I_G R_G) = G_{sh} I_G R_G + I_G \Rightarrow \frac{V_s}{R_s + R_x} - \frac{R_G}{R_s + R_x} I_G = G_{sh} I_G R_G + I_G \Rightarrow$$

$$\frac{V_s}{R_s + R_x} = I_G \left(\frac{R_G}{R_s + R_x} + G_{sh} R_G + 1 \right) \Rightarrow I_G = \frac{V_s}{R_G + (G_{sh} R_G + 1)(R_s + R_x)} \quad (4-15)$$

چنانچه از رابطه (15 - 4) مشاهده می شود، جریان گالوانومتر با مقاومت مجهول رابطه عکس دارد، لذا صفحه گالوانومتر به طور غیر یکنواخت مدرج می شود.

مثال : الف) اهم متری طراحی کنید که با دو باتری 1.5V کار کند، مشروط به اینکه به ازای اتصال به مقاومت 2kΩ عقربه آن به اندازه نصف انحراف ماکزیمم منحرف شود. ب) اگر افت ولتاژ حداکثر باتری ها 10% باشد، مقادیر جدید را محاسبه کنید. (مشخصات آمپر متر: $R_G = 50\Omega$, $I_m = 1mA$).

الف)

$$V_s = 1.5 + 1.5 = 3V$$

$$R_{M.R} = 2k\Omega, \quad V_m = 50\Omega \times 10mA = 50mV$$

$$R_{sh} = \frac{V_m}{\frac{V_s}{R_{M.R}} - I_m} = \frac{50 \times 10^{-3}}{\frac{3}{2 \times 10^3} - 1 \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{sh} = 100\Omega$$

$$R_s \cong \frac{V_s}{\frac{V_m}{R_{sh}} + I_m} = \frac{3}{\frac{50 \times 10^{-3}}{100} + 10^{-3}} \Rightarrow R_s = 2000\Omega$$

ب)

$$V'_s = V_s - 10\% V_s = 2.7V$$

$$R'_{sh} = \frac{V_m}{\frac{V'_s}{R_{M.R}} - I_m} = \frac{50 \times 10^{-3}}{\frac{2.7}{2 \times 10^3} - 1 \times 10^{-3}} \Rightarrow R'_{sh} = 143\Omega$$

$$R_s \cong \frac{V'_s}{\frac{V_m}{R'_{sh}} + I_m} = \frac{2.7}{\frac{50 \times 10^{-3}}{143} + 10^{-3}} \Rightarrow R_s \cong 2000.5\Omega$$

تذکر 1 : برای اینکه بتوان اهم مترها را با هم مقایسه کرد، از آنجا که تمامی آنها ابتدا و انتهای رنج 0 تا ∞ اهم رابه طور مشترک دارند، لذا اگر وسط رنج $R_{M.R}$ مشخص باشد، امکان مقایسه آنها میسر می شود.

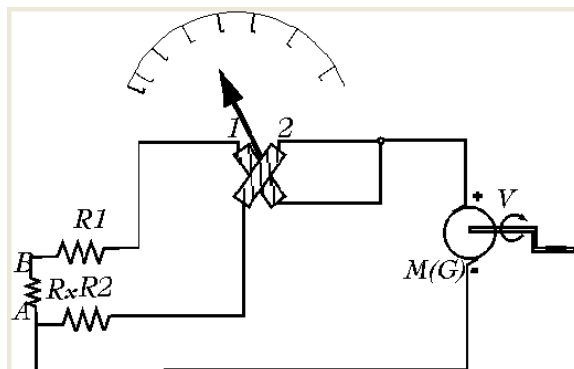
تذکر 2 : معمولا در منابع ولتاژ عملی تشخیص r_s مشکل است. (مثلا باطری های قلمی و ...) لذا می توان چنین فرض کرد که یک منبع V_S با مقداری افت متغیر نیروی محرکه در اختیار داریم.

$$\begin{cases} V_S = \mathcal{E} - \Delta\mathcal{E} \\ \Delta\mathcal{E} \geq 0 \end{cases}$$

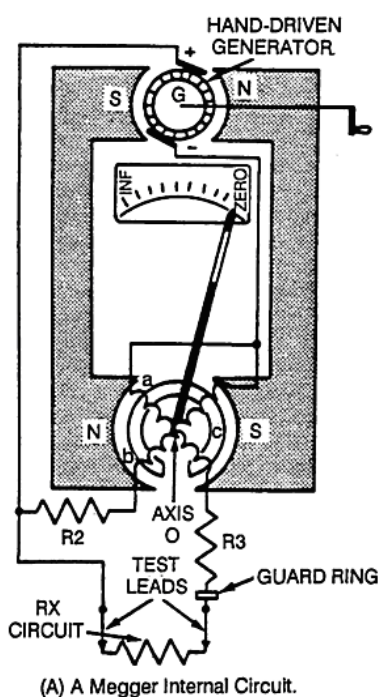
به این ترتیب تنها $\Delta\mathcal{E}_{\max}$ (درصد افت منبع ولتاژ) را به طور مشخص داریم و اگر تنها یک مقاومت R_1 در مدار باشد و R_2 نباشد، درجه بندی اهم متر غیر قابل جبران از نظر خطای ناشی از Δ خواهد بود. لذا با وجود R_2 و طبق رابطه (1) می بینیم با توجه به اینکه I_m و R_G و R_{th} مقادیری ثابت می باشند، می توان تغییرات افت منبع ولتاژ را با R_2 جبران کرد.

5_4_ دستگاه سنجش مقاومت‌های بالا (Megger)

یک اهم متر ساده به علت کمی ولتاژ باتری تغذیه کننده خودش قادر به سنجش مقاومت‌های خیلی زیاد (مثلا مقاومت عایق بین دو هادی یک خط دو سیم، مقاومت عایقی وسایل خانگی، هدایت زمین و ...) نیست، و در این موارد برای ما اندازه‌گیری دقیق این مقاومتها نیز مهم است.

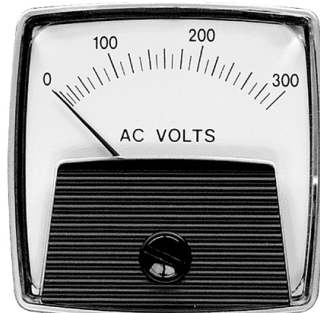


با استفاده از مدار زیر و به کارگیری گالوانومتری با دو سیم پیچ قاب متعامد (1 و 2) در یک میدان مغناطیسی دایمی که به نام دستگاه با قاب صلیبی مشهور است، هر مقاومت مجهول / خیلی زیاد را می‌توان سنجید. با استفاده از یک ژنراتور مولد ولتاژ (dc G) که قادر است متناسب با مقدار مقاومت مجهول ولتاژ مناسبی ایجاد کند، بدیهی است اگر / باشد، تمام ولتاژ از طریق / روی قاب شماره 2 می‌افتد و با توجه به اینکه قاب فوق با میدان مغناطیسی دایمی دستگاه موازی است، در اثر گشتاور وارده صفر عقربه بی حرکت باقی می‌ماند. با قرار دادن / یا اتصال کوتاه و یا قرار دادن 1 مناسبی جریان از هر دو قاب می‌گذرد و نیمه اول انحراف توسط بوبین (1) و در نیمه دوم انحراف بوبین (2) وارد عمل می‌شود و عقربه کاملاً تا انتها منحرف می‌شود. برای / های کاملاً زیاد بسته به مقدار 1 جریان انحراف اصلی 1 کنترل می‌شود. ولتاژ مناسب برای سنجش مقاومت ایزولاسیون خطوط تلفنی حدود / است. ولتاژ مناسب برای سنجش مقاومت عایقی لوازم خانگی / است. ولتاژ مناسب برای دکل‌های فشار قوی بسته به کاربرد آنها / ، 1 و 1 است.



فصل پنجم

دستگاههای اندازه گیری سنجش کمیت‌های متناوب



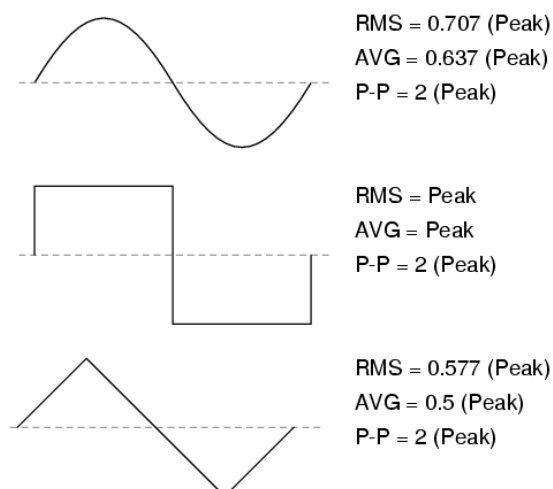
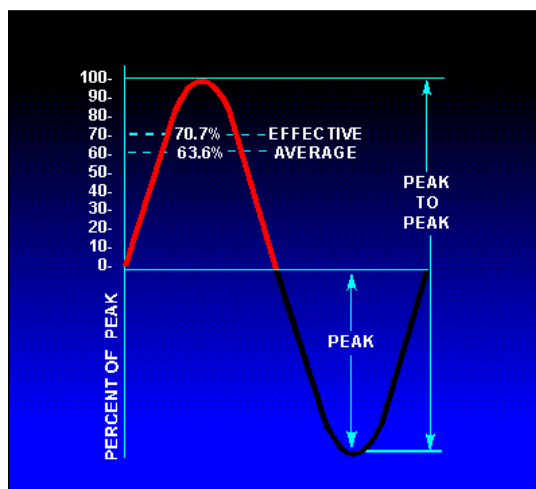
(5-1) مقدمه

همان طور که می‌دانیم، در بسیاری از موارد به اندازه‌گیری ولتاژ متناوب نظیر برق شهر و یا جریان مصرف کننده‌ای که از برق متناوب تغذیه می‌کند نیازمندیم. قبل از هر چیز لازم است به مبانی سیگنال شناسی حالت AC آشنا شویم.

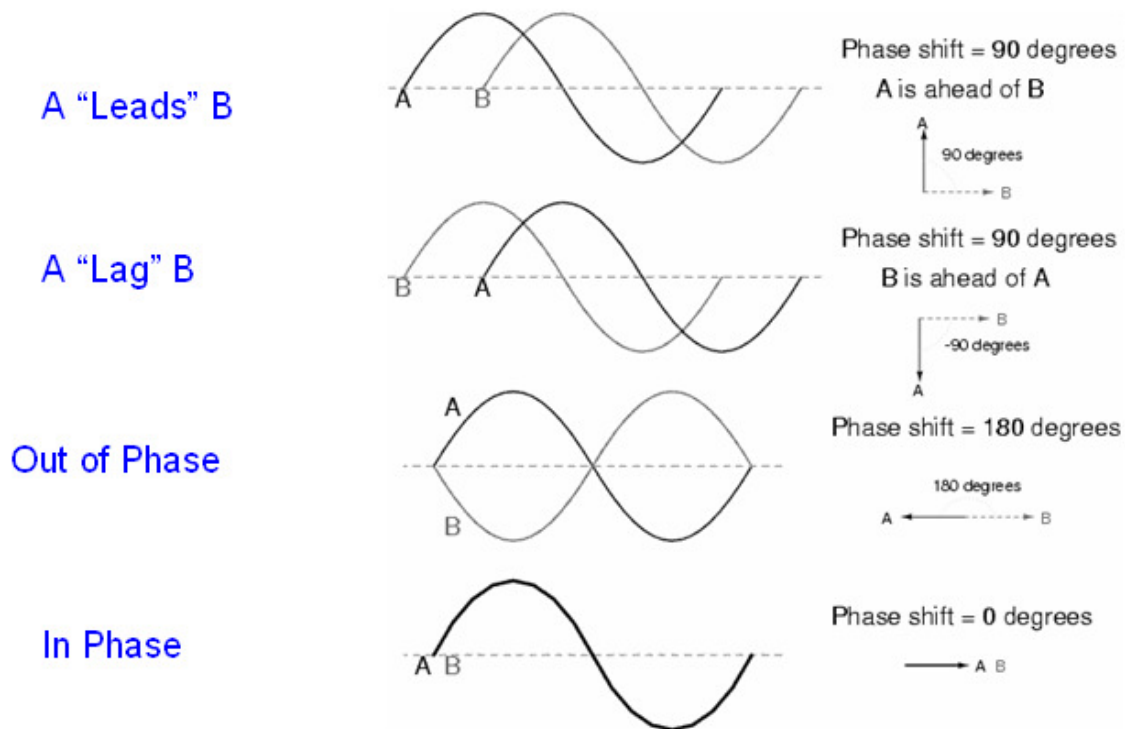
$V(t)$: Alternative Current

(5-1-1) مشخصه های مقداری

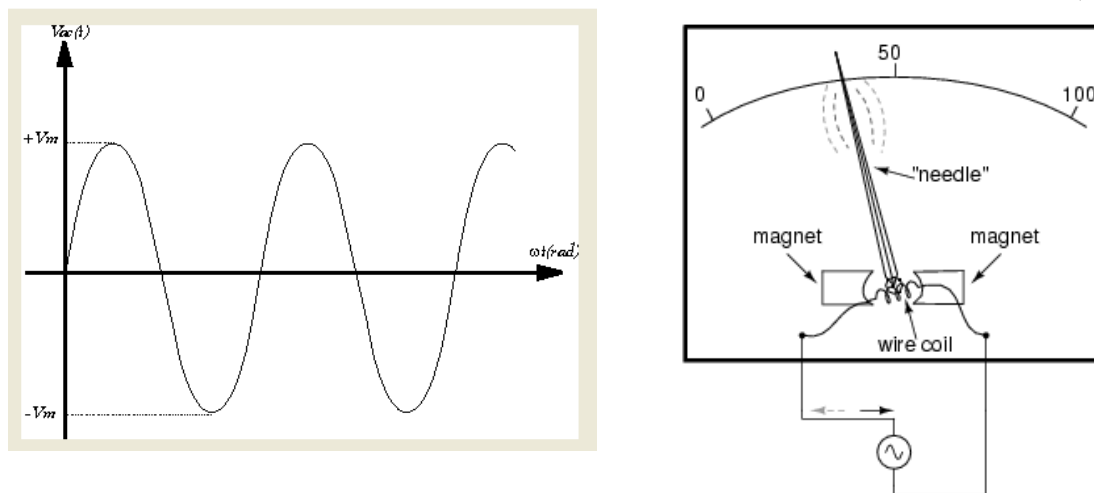
Max to Min	Peak / Peak to Peak (P-P)	مقدار پیک / مقدار پیک تا پیک
$V_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$	Peak (AVG) Average	مقدار متوسط
$V_{RMS} \text{ or } V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V(t)]^2 dt}$	(RMS) Effective	مقدار موثر



(2-1-5) مشخصه های فازی



ابتدا بررسی می‌کنیم، اگر ولتاژ متناوبی از نوع مثلاً سینوسی به ولت متر dc از نوع قاب گردان اعمال شود، انحراف عقربه دستگاه چگونه خواهد بود.



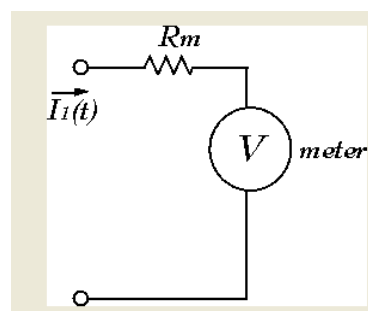
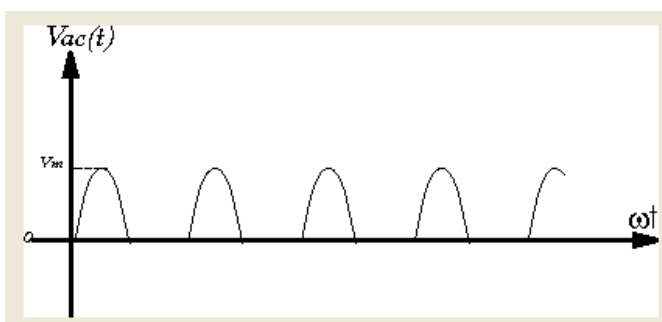
شکل 1-5

همان طور که قبلاً اشاره شد، آنچه موجب انحراف عقربه می‌شود گشتاوری است که به واسطه عبور جریان از سیم پیچ دستگاه بر قاب وارد و موجب جمع شدن فنر مقاوم و در نهایت انحراف عقربه می‌شود.

$$\begin{cases} \tau = N \cdot B \cdot i(t) \cdot S & \text{Mover Torque} \\ \tau_R = K \cdot \theta & \text{Re sist Torque} \end{cases} \Rightarrow \theta = \left(\frac{1}{K} N \cdot B \cdot S \right) \cdot i(t) \Rightarrow \theta = K' \cdot i(t) \quad (5-1)$$

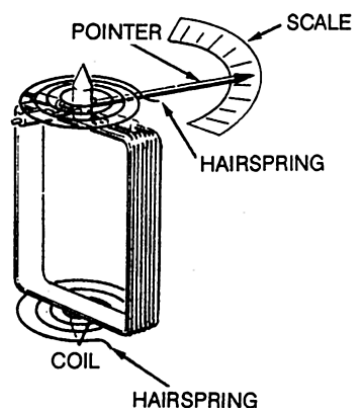
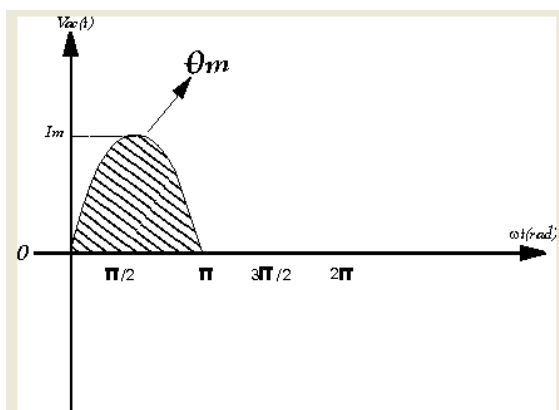
θ : میزان انحراف عقربه، زاویه‌ای که به فنر به همان میزان جمع می‌شود؛ K : ثابت فنر حلزونی)

از روابط اخیر در می‌یابیم که عقربه دائماً علاقه دارد حول $\theta=0$ در جهت + و - نوسان کند و چون معمولاً در میترهای dc عقربه به دلیل وجود ضامن نمی‌تواند به سمت (-) منحرف شود و از سویی اگر فرکانس بالا باشد بالطبع تعداد حرکات نوسانی عقربه در ثانیه زیاد خواهد بود و در نتیجه فنر مقاوم حلزونی باید با همین تعداد در ثانیه فشرده و رها شود، لیکن چون فنر قادر نیست با همان سرعت به تغییرات جریان پاسخ دهد، همیشه عقربه میتر روی عدد صفر باقی می‌ماند. حال برای غلبه بر این عیب (تناوب $i(t)$ و مثبت و منفی شدن پیاپی آن) اگر ترتیبی دهیم تا همیشه $i(t) > 0$ باشد، احتمال دارد که مسأله سنجش تحقق یابد. این حالت را دوباره بررسی می‌کنیم.



شکل 2-5

در این حالت جریان $i_i(t)$ حاصل از یک نیم سیکل‌های مثبت موجی شکل سینوسی مطابق شکل (2-5) و یک دنباله از پالس‌های جریان که در نیم پریود on و در نیم پریود دیگر off و فاقد انرژی می‌باشد. برای تحلیل این موضوع که دنباله فوق چگونه و به چه مقدار عقربه میتر را منحرف می‌کند، ابتدا رفتار میتر را به هنگام تغذیه با یک پالس بررسی می‌کنیم.



شکل (3-5)

همان طور که از رابطه گشتاور می‌بینیم، $\tau = N \cdot B \cdot i(t) \cdot S$ همین که I زیاد می‌شود، τ افزایش می‌یابد و بالطبع فنر جمع و عقربه منحرف می‌شود.

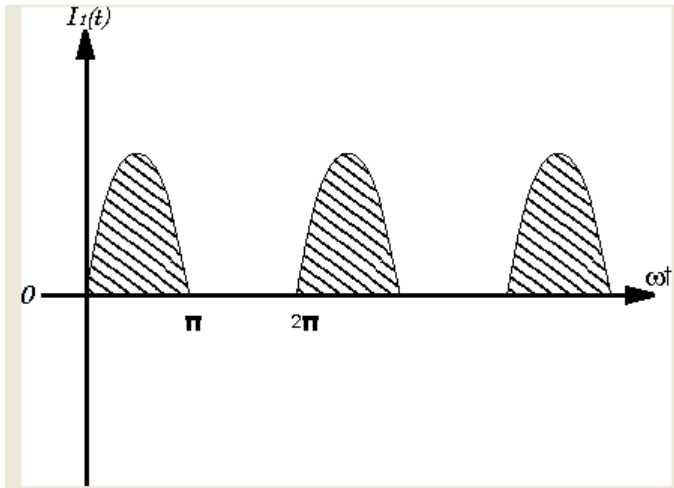
$$\tau_R = K \cdot \theta \Rightarrow K \cdot \theta = N \cdot B \cdot S \cdot i_i(t) \quad (5-2)$$

از رابطه (2-5) مشخص است زمانی که $i_i(t) = I_m$ شود، فنر به اندازه θ_m (که $\theta_m = \frac{NBS}{k} I_m$) جمع می‌شود.

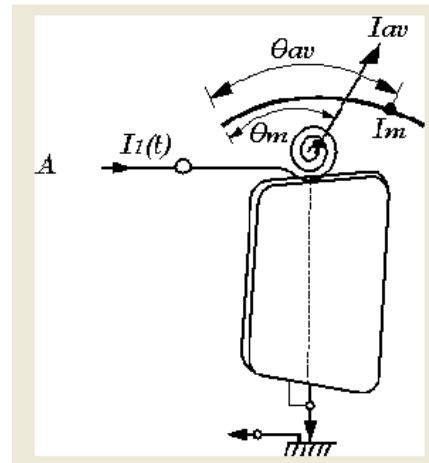
جریان پس از این لحظه $\omega t = \frac{\pi}{2}$ شروع به کاهش می‌کند لیکن فنر به صورت نمایی شروع بازگشت به حالت $\theta = 0$ می‌کند.

$$\theta(t) = \theta_m e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (5-3)$$

معمولا فنر در مقایسه با پریود زمانی $i(t)$ بسیار کندتر و با حرکتی آرام بازمی‌گردد و همین کندی حرکت موجب می‌شود دوباره پالس بعدی جریان سر برسد و مجدداً $\theta(t)$ را به θ_m تغییر دهد. در نتیجه همواره عقربه روی عددی کمتر از θ_m (θ_{av}) متوقف خواهد ماند.



الف - 4 - 5 - جریان یکسو شده متناوب



ب - 4 - 5 - زاویه انحراف عقربه میتر

محاسبه جریانی که میتر نشان می‌دهد و ارتباط آن با جریان متناوب ac به شرح زیر است :
طبق شکل (ب - 4 - 5) بدیهی است سطح زیر منحنی $\theta(t)$ با θ_{av} برابر است و در نتیجه جریانی که میتر dc نشان می‌دهد، I_{av} است (I_{av} : متوسط جریان سینوسی یکسو شده $i(t)$).

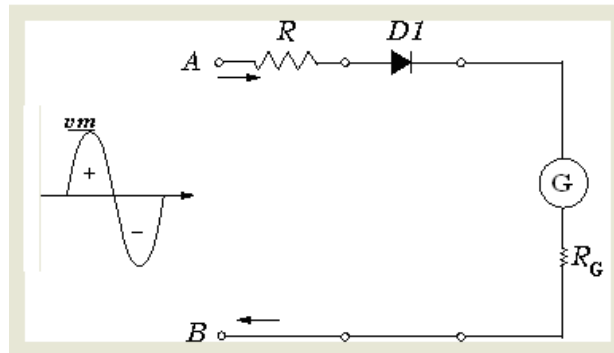
$$I_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\pi} \Rightarrow I_{av} = \frac{I_m}{\pi} \quad (5-4)$$

نتیجه: اگر هر کمیت سینوسی متناوب (جریان یا ولتاژ) را به صورت نیم موج یکسو کنیم و حاصل را به میترهای با قاب گردان اعمال کنیم، آنچه روی صفحه مدرج خوانده می‌شود، مقدار متوسط کمیت در نیم پریود است. (توجه داریم که مقدار متوسط تمام پریود هر موج سینوسی صفر است).

2-5- ساختمان یک متر ac (ولتاژ یا جریان)



کمیت ac (جریان یا ولتاژ) $\Rightarrow$ یکسوساز (Rectifier) $\Rightarrow$ آمپر متر یا ولت متر DC



شکل 5-5- دیاگرام تبدیل متر dc به ac

تغییر صفحه مدرج متناسب با مقادیر مشخصه کمیت ac :
همان طور که ملاحظه می‌شود، روی صفحه مدرج عددی که نشان داده می‌شود در حال حاضر مقدار کمیت مورد سنجش در نیم پریود است حال آنکه هر کمیت سینوسی مقادیر مشخصه‌ای به قرار زیر دارد :

I_m : دامنه مقدار حداکثر

$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$: دامنه مقدار مؤثر

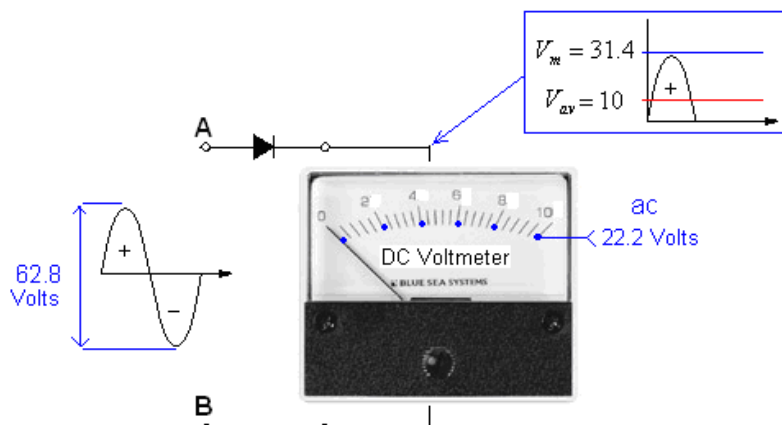
$I_{av} = 0$: مقدار متوسط تمام پریود

به همین دلیل ترجیحاً صفحه مدرج را بر حسب I_{eff} (مقدار مؤثر) درجه بندی می‌کنیم.

رابطه I_{av} و I_{eff} در نیم پریود به صورت زیر است :

$$\begin{cases} I_{av} = \frac{I_m}{\pi} \\ I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \end{cases} \Rightarrow \frac{I_{eff}}{I_{av}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \approx 2.22 \Rightarrow \begin{cases} I_{eff} = 2.22 I_{av} \\ I_{av} = 0.45 I_{eff} \end{cases}$$

مثال : ولت متری داریم که قادر است DC (0 – 10Volts) را بسنجد، اگر دیود را مطلوب فرض کنیم (فاقد مقاومت مستقیم) درجه بندی مجدد صفحه مدرج برای زمانی که این ولت متر به منظور سنجش ولتاژ ac به کار می رود را انجام دهید.



شکل 6-5. با توجه به تبدیل $V_{eff} = 2.22V_{av}$ ، 10 ولت DC ، متناظر با 22.2 ولت مؤثر ac خواهد بود
 $(V_m = 31.4 , V_{av} = \frac{31.4}{\pi} = 10 , V_{eff} = \frac{31.4}{\sqrt{2}} \cong 22.2)$

ملاحظات عملی :

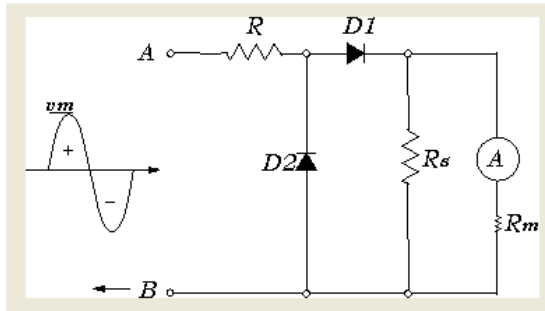
در عمل به کار بردن دیود در میتر دو محدودیت ایجاد می کند :
 اول اینکه اگر جای + و - را اشتباه کنیم، بسته به تحمل ولتاژ معکوس امکان دارد دیود آسیب ببیند.

دوم اینکه دیودها همگی ایده آل نیستند و دارای مقاومت داخلی هستند که باید در طرح اولیه میتر (آمپر متر و ولت متر) منظور شود و محاسبات با وجود دیود یا دیودها و احتساب مقاومت داخلی آنها صورت گیرد.

تحمل ولتاژ معکوس انواع دیودها :

دیودها بسته به جنس آنها، حداکثر جریان و ولتاژ مجاز معکوس قابل تحمل متنوعی دارند، معمولاً این مقادیر در نوع ژرمانیم $V_{rev.} = 300V$ و $I_{max} = 100mA$ و در نوع سیلیکونی $V_{rev.} = 1000V$ (Si) و $I_{max} = 500mA$ می باشند.

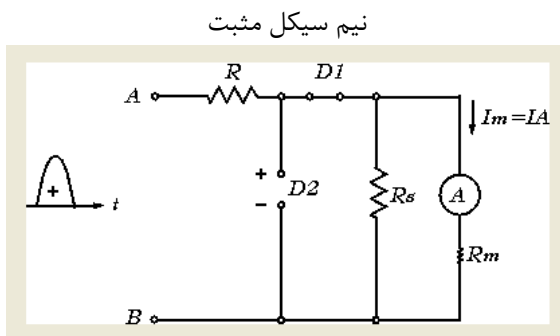
3-5. مدار آمپر متر AC با یکسو ساز نیم موج (AC Ammeter)



عملاً در مدار میتر (ولت متر یا آمپر متر) از دو دیود $D1$ و $D2$ نظیر شکل (7-5) استفاده می‌شود که دیود $D2$ در نیم سیکل مثبت اتصال باز و $D1$ اتصال کوتاه است، لذا گالوانومتر نظیر حالت DC در مدار قرار می‌گیرد. در نیم سیکل منفی اگر تنها $D1$ در مدار باشد ما فقط مجازیم تا حداکثر 300V (ژرمانیوم) دو سر $D1$ قرار دهیم و همین ما را در طراحی ولت مترهای ac با پیک 300V محدود می‌کند.

شکل 7-5. مدار عملی یک میتر ac نیم موج.

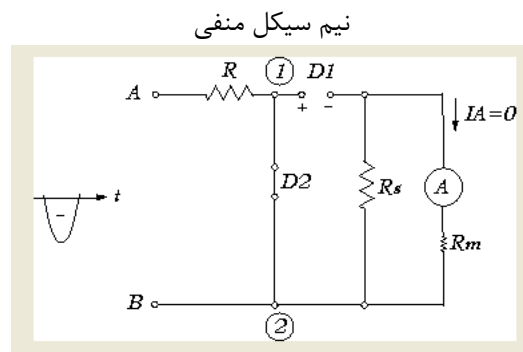
به همین دلیل دیود $D2$ را قرار می‌دهیم تا در نیم سیکلهای منفی جریان ترمینالهای میتر (A, B) (جریان ورودی) از طریق مقاومت R بسته شود.



(ولتاژ معکوس روی دیود /)

شکل ب- 8-5

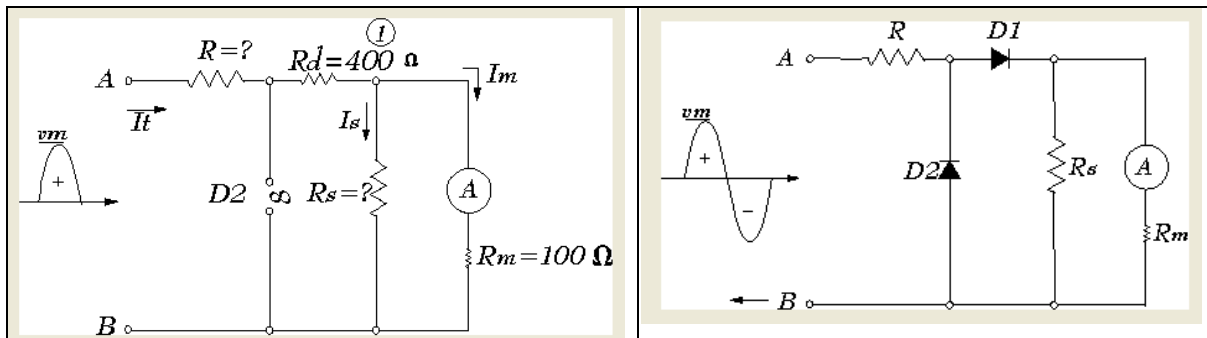
به سبب وجود مقاومت R حتی برای زمانی که $V_{in} = V_m$ یا مقدار پیک ولتاژ ورودی است آمپر متر جریان حداکثر را می‌گذراند لذا ولتاژ معکوس (Revers) روی $D2$ حداکثر همان افت ولتاژ دو سر گالوانومتر می‌باشد



شکل الف- 8-5

در حالت $V_{D1} = 0$ ، در بایاس مستقیم Forward می‌باشد لذا در هیچ زمانی ولتاژ عکس روی $D1$ نخواهیم داشت.

مثال : ولت متر متناوبی (ac) از نوع نیم موج را طراحی کنید که قادر باشد حداکثر ولتاژ مؤثر $10V$ (V_{eff}) را بسنجد. در آمپر متر مورد استفاده $R_G = 100\Omega$ و $I_m = 1mA$ است. دیودها مقاومت حالت مستقیم 400Ω و حالت معکوس ∞ دارند.



شکل 9-5 - مدار در نیم سیکل مثبت

$$KCL1: I_t^{av} = I_S^{av} + I_m^{av} \quad (5-6)$$

$$V_{eff} = 10V \Rightarrow V_{av} = 0.45V_{eff} = 4.5V \quad (5-7)$$

بر اساس یک ملاحظه عملی، اگر بخواهیم دستگاه از حساسیت قابل قبولی برخوردار باشد، باید جریان کل، قابل مقایسه با جریان آمپر متر باشد لذا بهترین حالت این تقارب زمانی است که I_m^{av} برابر I_S^{av} باشد. پس

$$I_S^{av} = I_m^{av} = 1mA \quad (5-8)$$

$$(5-6, 8) \Rightarrow I_t^{av} = 1+1 = 2mA$$

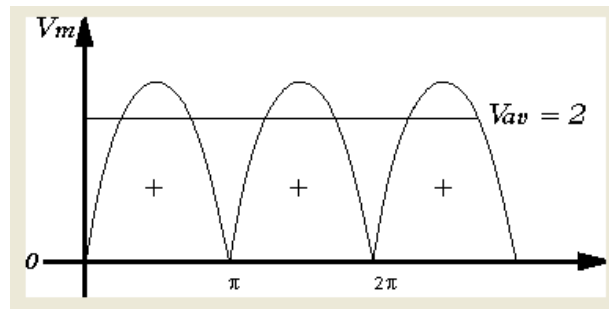
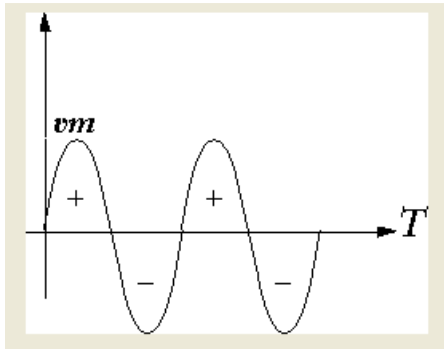
$$KVL: -V_{BA}^{av} + (R + R_d)I_t^{av} + V_m^{av} = 0 \Rightarrow -4.5 + (R + 400) \times 2 + 1 \times 100 = 0 \Rightarrow R = 1800\Omega$$

$$R_S I_S^{av} = V_m^{av} \Rightarrow R_S (1) = 1 \times 100 \Rightarrow R_S = 100\Omega$$

5-4. مدار آمپر متر AC با یکسو ساز نیم موج (AC Ammeter)



کمیت ac (جریان یا ولتاژ) $\Rightarrow$ یکسو ساز تمام موج (Rectify) $\Rightarrow$ آمپر متر یا ولت متر DC



شکل 10 - 5. شکل موج یکسو شده بطریقه تمام موج

در حالت نیم موج گالوانومتر به دلیل وجود اینرسی فنر مقاوم از کمیت یکسو شده متوسط گیری انجام می دهد و مقدار متوسط نیم موج برابر $V_{av} = \frac{V_m}{\pi}$ بود، حال اینجا که سطح زیر منحنی در حالت تمام موج دو برابر می شود، پس قطعاً مقادیر متوسط و مؤثر به صورت زیر تغییر می یابند :

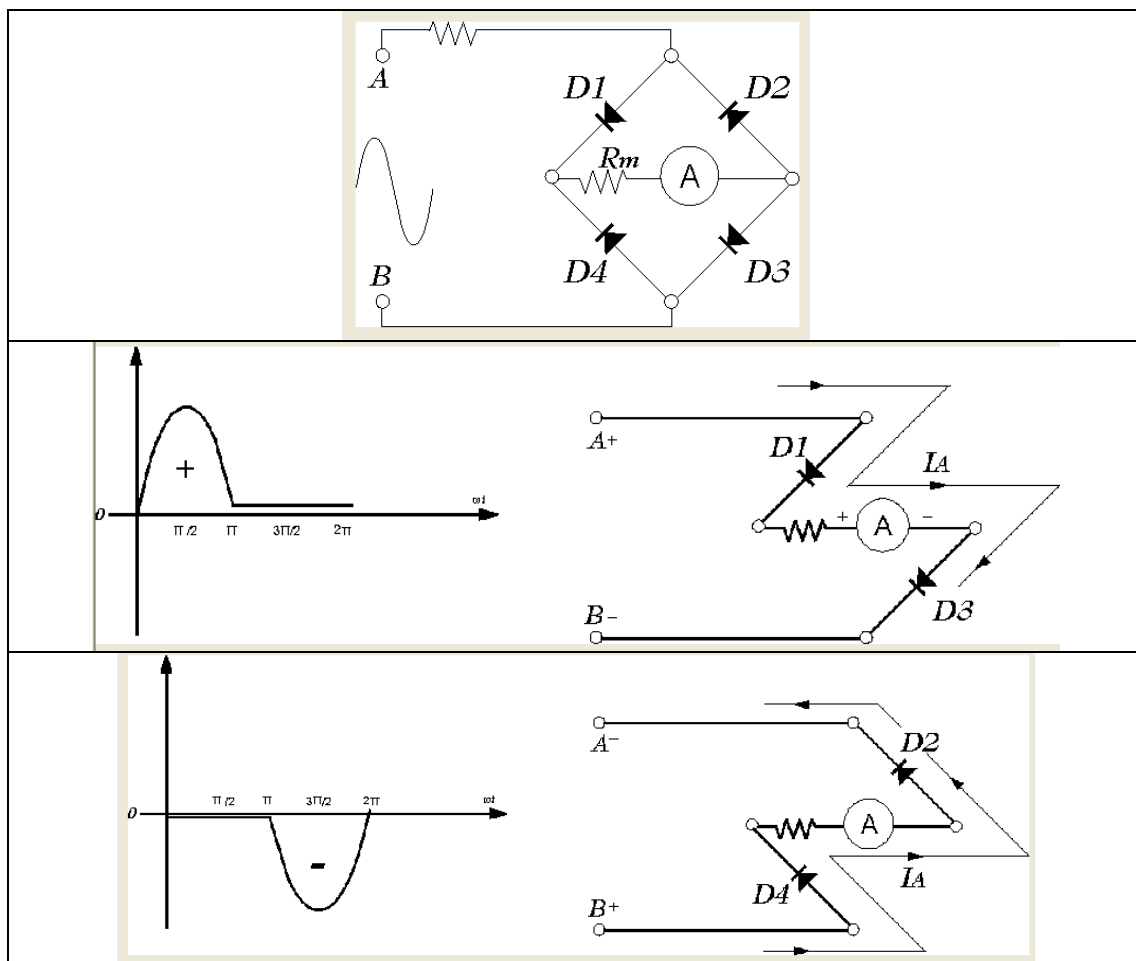
$$V_{av} = 2 \times (\text{Average Magnitude in half rectified wave}) \Rightarrow$$

$$V_{av} = 2 \left(\frac{V_m}{\pi} \right) \Rightarrow V_m = \frac{\pi V_{av}}{2} \quad (5-9)$$

$$V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi V_{av}}{2\sqrt{2}} = \begin{cases} V_{eff} = 1.11 V_m & (5-10-1) \\ V_{av} = 0.9 V_{eff} & (5-10-1) \end{cases}$$

5-5 مدار AC meter با یکسو ساز تمام موج

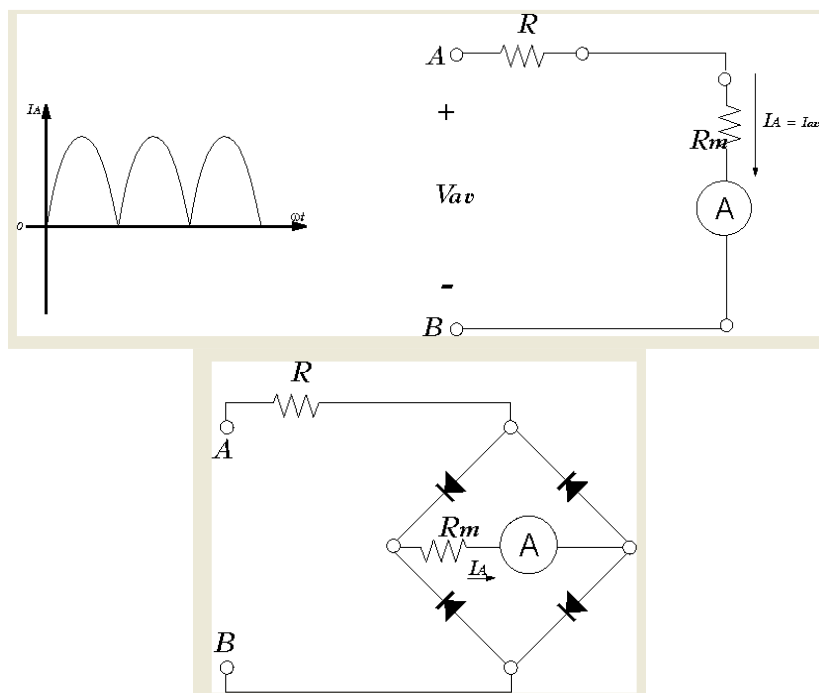
با استفاده از یک یکسو ساز پل (Bridge) مرکب از 4 دیود، جریان عبوری از میتر به صورت تمام موج خواهد بود.



شکل 11-5 نحوه عملکرد دیودها برای نیم سیکل مثبت و منفی سیگنال ورودی

همان طور که مشاهده می شود، همیشه جریان گذرنده از آمپر متر I_A از چپ به راست می باشد و در نتیجه همواره I_A مثبت است.

مثال : ولت متری از نوع ac با یکسوساز تمام موج (دیود پل) طراحی کنید بطوریکه در حداکثر انحراف، /
 رابسنجد (مشخصات آمپر متر مورد استفاده / و ۱ است، دیودها مطلوب (Ideal) فرض شوند).



$$V_{eff} = 10V \Rightarrow V_{av} = 0.9V_{eff} \Rightarrow V_{av} = 9$$

$$V_{av} = (R + R_G)I_{av} \Rightarrow 9 = (R + 50) \times 10^{-3} \Rightarrow R = 8950\Omega$$

برای حالتی که شکل موج ورودی غیر سینوسی (مربعی، مثلثی، ...) باشد، ضرایب مابین V_m و V_{av} و V_{eff} تغییر خواهد کرد؛ البته طریقه محاسبه به همان شیوه‌ای است که برای موج سینوسی انجام گردید.

$$V_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt, \quad V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$$

تمرین: رابطه میان $(V_m$ و $V_{av})$ ، $(V_{eff}$ و $V_{av})$ را برای حالتی که

الف) شکل موج مربعی،

ب) مثلثی باشد

محاسبه کنید.

فصل ششم

معرفی دستگاههای اندازه‌گیری الکترودینامیکی

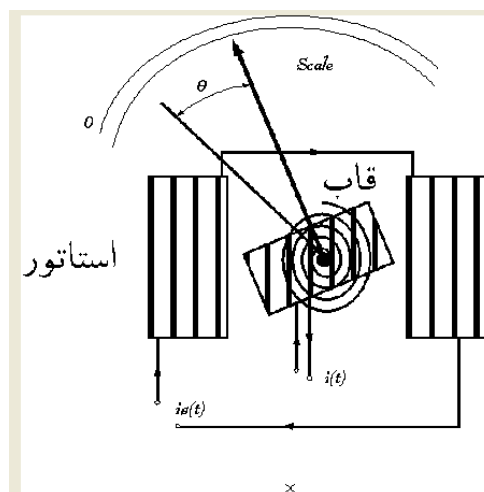
1-6- دستگاههای اندازه‌گیری الکترودینامیکی

مقدمه :

همان طور که در فصل قبل دیدیم به منظور سنجش کمیات ac با استفاده از میتر از نوع (قاب گردان - آهن ربای دایم) باید از مدار یکسو ساز مناسب استفاده کرد. در این فصل دستگاههای میتر از نوع قاب گردان - آهن ربای موقت (سیم پیچ ثابت) را بررسی می‌کنیم.

چون این نوع دستگاه به تنهایی قادر است کمیات ac را بسنجد نام دستگاه الکترودینامیکی را پذیرفته است.

تحلیل عملکرد دستگاه الکترودینامیکی :



شکل 1-6- ساختار نمادین یک دستگاه الکترودینامیکی (قاب گردان - بوبین ثابت)

$$B(t) = N \cdot \mu_s \cdot i_s(t) \quad (6-1-1) \quad \text{میدان تولید شده در هسته آهن ربای موقت (Stator) :}$$
$$\tau(t) = i_f(t) \cdot S \cdot B(t) \quad (6-1-2)$$

ک: سطح قاب سیم پیچ گردان ، $i_f(t)$: جریان قاب سیم پیچ گردان ، $\tau(t)$: گشتاور وارده به قاب سیم پیچ گردان

اگر $i_s(t) = I_m^S \cos \omega t$ و $i_f(t) = I_m^f \cos \omega t$ باشد، مقدار گشتاور لحظه‌ای وارده بر قاب به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau(t) = N \cdot \mu_s \cdot (I_m^S I_m^f \cos^2 \omega t) > 0 \quad \text{for all times } " \forall t > 0 " \quad (6-2)$$

از آنجا که وجود فنر مقاوم دستگاه همان طور که قبلاً دیدیم به صورت یک متوسط گیر عمل می‌کند به سبب اینکه گشتاور همواره مقداری مثبت است، متوسط گشتاور وارده بر قاب مقداری غیر صفر خواهد بود.

$$\tau_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T \tau(t) dt, \quad \tau_{av} \neq 0 \quad (6-3)$$

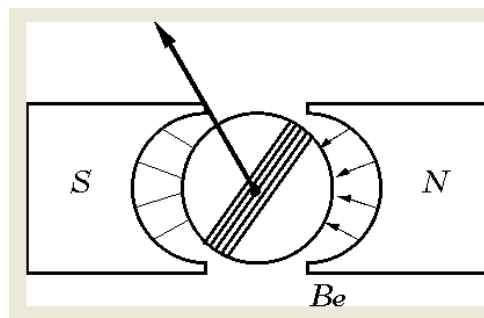
$$\tau_{av} = k I_m^S I_m^f \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2 \omega t dt \Rightarrow \tau_{av} = k I_m^S I_m^f \left(\frac{1}{2} \right) \Rightarrow$$

$$\tau_{av} = k \frac{I_m^S}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m^f}{\sqrt{2}} = k I_e^S I_e^f \Rightarrow \tau_{av} = k I_e^S I_e^f \quad (k = N \cdot \mu_s \cdot S) \quad (6-4)$$

$$\tau_{av} = N \cdot \mu_s \cdot S \cdot I_e^S I_e^f = S \cdot I_e^f (N \cdot \mu_s \cdot I_e^S) \Rightarrow \tau_{av} = S \cdot I_e^f \cdot B_e \quad (6-5)$$

از رابطه (5 - 6) می‌توان چنین نتیجه گرفت که دستگاه فوق معادل با یک دستگاه قاب گردان با آهن ربای داریم است که مقدار آهن ربای آن B_e و جریان قاب آن نیز I_e^f باشد.

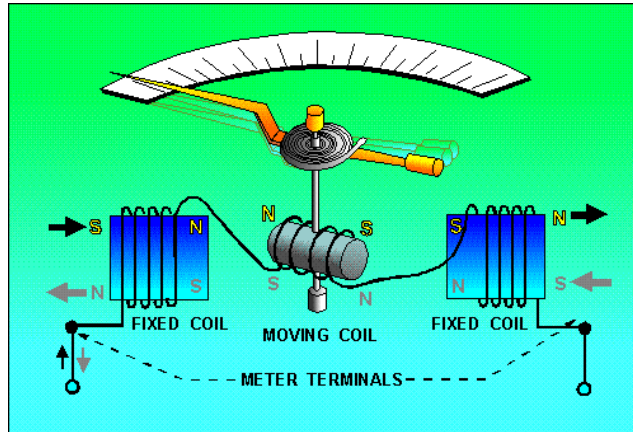
باید توجه داشت معمولاً دستگاههای الکترو دینامیکی را به دو علت بدون هسته آهنی می‌سازند:



1 - تلفات ناشی از جریان سرگردان (eddy) داخل هسته. 2 - پسماند مغناطیسی هسته و پدیده (Hysteresis). که این دو عامل معمولاً خطاهایی را متوجه دستگاه می‌سازند.

2-6. مدار معادل آمپر متر الکترو دینامیکی

لازم است جریان استاتور (سیم پیچ ثابت) و جریان قاب یکی باشد تا گشتاور وارد بر قاب تابع مستقیمی از جریان مورد اندازه گیری گردد، برای تحقق این امر مدار (2-6) شکل می گیرد :

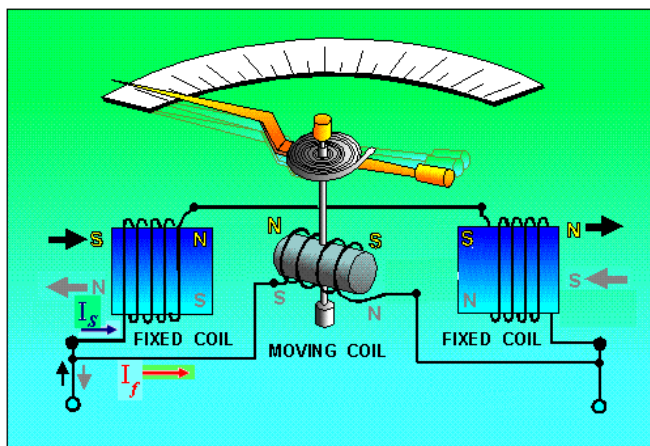


شکل 2-6 - طریقه اتصال سیم پیچ گردان و ثابت به منظور تحقق آمپر متر متناوب

مطابق شکل (2-6) برابری I_e^f و I_e^s محرز است و متعاقب آن گشتاور متوسط وارده بر قاب چنین به دست می آید :

$$(6-4) \Rightarrow \tau_{av} = k I_e^f I_e^f = k (I_e^f)^2 = k I_e^2 \quad (6-6)$$

3-6 - مدار معادل ولت متر الکترو دینامیکی



شکل 3-6 - طریقه اتصال سیم پیچ گردان و ثابت به منظور تحقق ولت متر متناوب

در عمل هر بوبین را می توان با یک مقاومت و خود القاء معادل دانست. که بطور معادل بوبین های فریم و استاتور با مقادیر ضریب خودالقائی و مقاومت اهمیک R_f, L_f و R_s, L_s قابل توصیف میباشند.

stator coil : L_s, R_s , fram coil : L_f, R_f

$$\begin{cases} i_s(t) = I_s \cos \omega t \\ i_f(t) = I_f \cos(\omega t - \phi) \end{cases} \quad (6-7)$$

$$V_e = I_f \sqrt{R_f^2 + (\omega L_f)^2} \quad , \quad V_e = I_s \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2} \quad (6-8)$$

همان طور که قبلا دیدیم، گشتاور متوسط اعمال شده به محور قاب برابر است با :

$$\tau_{av} = k I_e^s I_e^f \cos \phi \quad \Rightarrow \quad \tau_{av} = k \frac{V_e}{\sqrt{R_f^2 + (\omega L_f)^2}} \frac{V_e}{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}} \cos \phi \quad \Rightarrow$$

$$\tau_{av} = \frac{k V_e^2 \cos \phi}{\sqrt{R_f^2 + (\omega L_f)^2} \times \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}} \quad \Rightarrow \quad \text{if Define : } \frac{V_e^2 \cos \phi}{\sqrt{R_f^2 + (\omega L_f)^2} \times \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}} = K_0$$

$$\tau_{av} = K_0 V_e^2 \quad (6-9)$$

در نتیجه می توان صفحه مدرج را بر حسب V_e درجه بندی کرد.

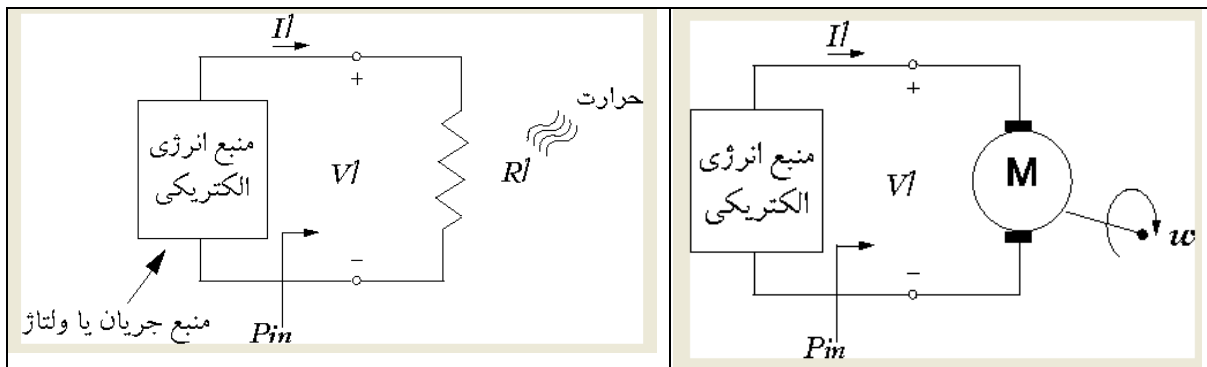
شایان ذکر است که علاوه بر استفاده از دستگاه قاب گردان - سیم پیچ ثابت به عنوان ولت متر یا آمپر متر کاربرد عمده و مهم آن وات متر (Wattmeter) است.

4-6 - اندازه‌گیری توان - وات سنج‌ها

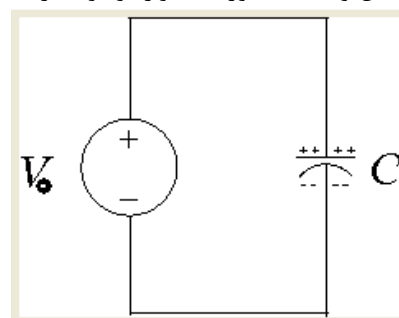
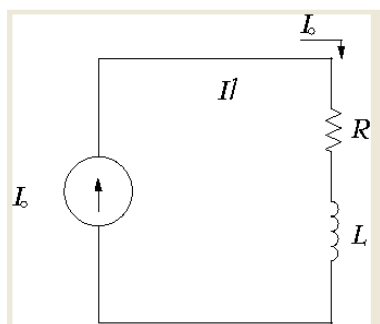
تعریف توان : میزان کار انجام شده در واحد زمان را بر حسب وات، توان گویند.

(الف) توان در مدارات DC :

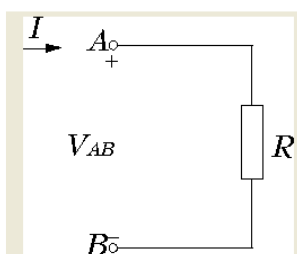
در مدارات الکتریکی خصوصاً DC انرژی یا به مصرف می‌رسد و یا ذخیره می‌شود. انرژی مصرفی می‌تواند تحویلی از یک باتری و تبدیل آن به حرارت باشد و یا تبدیل انرژی به طریقه مکانیکی به واسطه یک موتور DC انجام پذیرد. در هر دو مدار با گذشت زمان انرژی مدار تغییر می‌کند.



خازن و خودالقاء (سلف یا بوبین) عناصری هستند که انرژی را برای مدتی ذخیره می‌کنند، به‌طوری‌که امکان برگشت انرژی به طور کامل و دست نخورده همواره وجود دارد.



1-4-6) محاسبه توان حرارتی مصرف شده در یک مدار مقاومت



اگر ولتاژ V_{AB} دو سر مقاومت ایجاد شود، موجب تغییر میزان بار نسبت به زمان یا "جریان الکتریکی" می‌گردد. طبق مفاهیم فیزیک الکتریسیته روابط I ، ΔQ ، ΔE و V_{AB} به قرار زیر خواهد بود :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta E = \Delta Q \cdot V_{AB} \quad (6-10)$$

با توجه به روابط توان و انرژی، توان مصرف شده توسط یک مقاومت چنین به دست می‌آید.

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta Q \cdot V_{AB}}{\Delta t} = I \cdot V_{AB} \text{ (watt)} \quad \text{or} \quad P = \frac{V_{AB}^2}{R} = RI^2 \quad (6-11)$$

(6-4-2) محاسبه انرژی ذخیره شده در یک سلف یا خازن

سلف و خازن به دلیل اینکه عناصری صرفاً ذخیره کننده و نه مبدل انرژی می باشند، با مرور زمان تغییرات انرژی برای این دو معنی نخواهد داشت. لذا "میزان انرژی ذخیره شده" مطرح می شود.

$$E = \int_0^{T_0} P dt = \int_0^{T_0} v(t)i(t)dt$$

$$V = L \frac{di}{dt} \Rightarrow E = \int L \frac{di}{dt} dt = \int_0^{I_0} L \cdot i di = \frac{1}{2} L I_0^2 \text{ (joul)} \quad (6-12)$$

$$i = C \frac{dV}{dt} \Rightarrow E = \int C \frac{dV}{dt} dt = \int_0^{V_0} C \cdot V dV = \frac{1}{2} C V_0^2 \text{ (joul)} \quad (6-13)$$

(6-5) سنجش توان

(6-5-1) سنجش توان مدار ac

در مدار متناوب به دلیل اینکه V و I هر دو کمیتی متغیر با زمان می‌باشند توان نیز کمیتی متغیر با زمان می‌باشد. هر مدار متناوب از دو طبقه عناصر تلف کننده انرژی (مقاومتی) و ذخیره کننده انرژی (سلف و خازن) ایجاد می‌شود. با توجه به تحلیل فازوری می‌توان برای هر شبکه تک قطبی توان ورودی را به صورت دو مؤلفه توان تلف شده و توان ذخیره شده بیان کرد.

$$Z_L = a + jb \quad \begin{cases} b > 0 & : \text{Inductive} \\ b < 0 & : \text{Capasitive} \end{cases} \quad |Z_L| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad , \quad \angle Z_L = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \phi$$

$$P(t) = V_L(t) I_L(t) \quad \text{توان لحظه ای} \Rightarrow P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) \cdot I_L(t) dt$$

$$V_L(t) = V_m \sin(\omega t) \quad , \quad I_L(t) = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

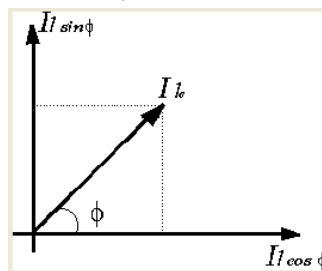
$$I_m = \frac{V_m}{|Z_L|} \quad , \quad \phi = \angle Z_L \quad (6-14)$$

$V_L(t)$ و $I_L(t)$ بترتیب ولتاژ و جریان لحظه ای بار Z_L می‌باشند.

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \cdot I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_m \cdot I_m}{2} \{ \cos \phi - \cos(2\omega t - \phi) \} dt \Rightarrow$$

$$P_{av} = \frac{V_m \cdot I_m}{2} \cos \phi = V_e \cdot I_e \cos \phi = P_{active} \quad (\text{Active Power}) \quad (6-15)$$

توان در یک مدار ac همواره با دو مؤلفه بیان می‌شود، توان مصرفی (active) و توان ظاهری یا غیر فعال (Reactive). خازن و سلف گرچه مقدار متوسط توان لحظه‌ای غیر صفر دارند، لیکن این توان، غیر فعال و مجازی است؛ به عبارتی عناصر فوق در نیم سیکل انرژی را ذخیره و در نیم سیکل بعدی عیناً به مدار پس می‌دهند. مقاومت‌های حرارتی، موتورهای الکتریکی ac و سایر عناصری که انرژی ac را دریافت و به طور برگشتناپذیر تبدیل می‌کنند، همگی از مؤلفه توان مصرفی (active) برخوردارند. اگر در یک امپدانس ولتاژ و جریان برداری، نظیر شکل (4-6) رسم شوند، توان فعال و غیر فعال به قرار زیر بیان می‌شوند:

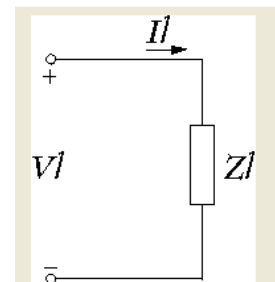


شکل 4-6 - نمودار ولتاژ جریان یک امپدانس اسمی

$$P_{active} = V_{Le} \cdot I_{Le} \cos \phi = \quad (\text{Active Power}) \quad (6-15)$$

$$P_{re-active} = V_{Le} \cdot I_{Le} \sin \phi = \quad (\text{Re-Active Power}) \quad (6-16)$$

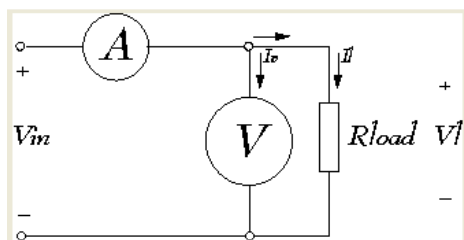
ϕ is phase between V_{Le} & I_{Le}



$$PF = \frac{\text{Total Power}}{\text{Effective Power}} = \frac{V_e I_e \cos \varphi}{V_e I_e} = \cos \varphi$$

(6-5-2) سنجش توان در مدار DC

با استفاده از یک ولت متر و آمپر متر مناسب و شناخته شده می توان با دقت بالا توان مصرفی هر بار مقاومتی را اندازه گیری کرد شکلهای زیر مدار مناسب سنجش توان را توصیه می کنند.



(ب) مناسب برای سنجش توان مقاومت بار کم

6-4. (الف) مناسب برای سنجش توان مقاومت بار زیاد

$I_L \gg I_V$: Low Load

Voltmeter Voltage Read : V_L

Ammeter Current Read : $I_L - I_V$

$P = V \cdot I = V_L \cdot (I_L - I_V) = V_L \cdot I_L - V_L \cdot I_V$

error : $V_L \cdot I_V$

$I_L \ll I_V$: High Load

Voltmeter Voltage Read : $V_L + V_A$

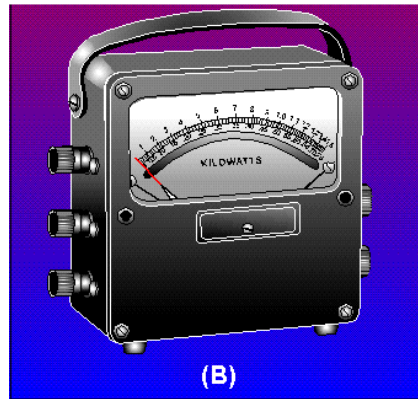
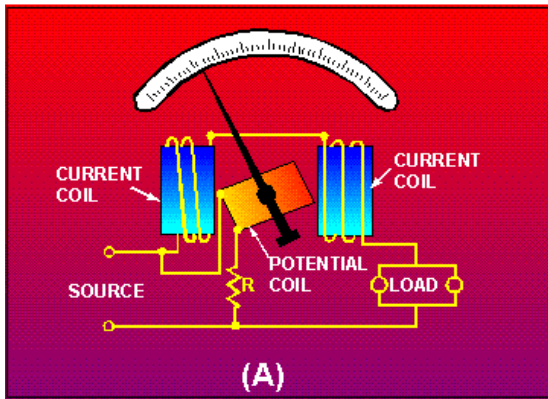
Ammeter Current Read : I_L

$P = V \cdot I = (V_L + V_A) \cdot I_L = V_L \cdot I_L + V_A \cdot I_L$

error : $V_A \cdot I_L$

وات مترهای الکترودینامیکی (Wattmeter) :

با ترکیب خاص سیم پیچ‌های ثابت و قاب گردان دستگاه الکترودینامیکی بین امپدانس بار موردنظر و مولد به انضمام یک مقاومت مناسب R ، مدار وات متر محقق می‌شود. (شکل 5.A - 6)



شکل 5 - 6 . ساختار مداری و نمای وات متر ac با استفاده از دستگاه الکترودینامیکی

واتمترهای AC از جمله دستگاه‌های مهم اندازه‌گیری تلقی میشوند که خصوصا در فرکانسهای بالای رادیویی (RF) ابزاری در جهت کنترل صحت عملکرد آمپلی فایرهای قدرت تلقی می‌گردند، در شکل زیر نمونه‌ای از این واتمترها ارائه شده است.



نمونه‌ای از یک واتمتر RF

همان‌طور که می‌دانیم در دستگاه‌های انحرافی مطلوب چنین است که میزان انحراف قاب گردان، یا به عبارتی گشتاور وارده به قاب، رابطه مشخص و ترجیحا خطی با کمیت مورد سنجش داشته باشد لذا در مورد وات متر نیز باید این رابطه برقرار باشد.

from coil : L_f, R_f

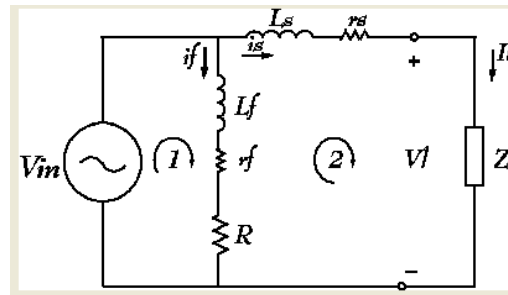
Z_L : Load impedance

stator coil : L_s, R_s

V_L, I_L : Voltage & Current of Load

تحلیل مدار وات متر :

از تساوی جریان بار و بوبین، تساوی مقادیر مؤثر و فاز جریانه‌ها نتیجه می‌شود :



$$i_s = i_L \Rightarrow I_{eS} = I_{eL} \text{ \& } \angle i_s = \angle i_L \quad (6-17)$$

$$KVL2: V_L - ([R + r_f] + jx_f)i_f + (r_s + jx_s)i_s = 0 \Rightarrow V_L - (R + r_f)i_f + [r_s i_s + j(x_s i_s - x_f i_f)] = 0$$

اگر مقدار R را به اندازه کافی (نسبت به مقدار عبارت داخل کروشه) بزرگ انتخاب کنیم به رابطه تقریبی زیر خواهیم رسید :

$$\begin{aligned} |(R + r_f)i_f| &\gg |r_s i_s + j(x_s i_s - x_f i_f)| \Rightarrow V_L \cong [R + r_f]i_f \\ \begin{cases} V_{eL} = [R + r_f]I_{ef} \\ \angle V_L = \angle(R + r_f) + \angle i_f \end{cases} &\Rightarrow \angle V_L = 0 + \angle i_f \Rightarrow \angle V_L = \angle i_f \\ \begin{cases} I_{ef} = \frac{1}{[R + r_f]} V_{eL} \\ \angle i_f = \angle V_L \end{cases} &\end{aligned} \quad (6-18)$$

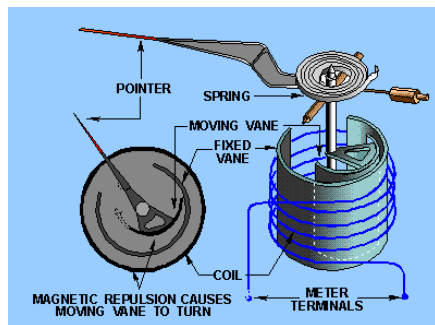
می‌دانیم گشتاور متوسط وارده به محور قاب بر حسب جریان قاب و بوبین ثابت چنین می‌باشد :

$$\begin{aligned} \tau_{av} &= k I_{eS} I_{ef} \cos \varphi, \quad \varphi: \angle i_s, i_f \\ \tau_{av} &= k (I_{eL}) \left(\frac{V_{eL}}{R + r_f} \right) \cos \varphi = \left(\frac{k}{R + r_f} \right) V_{eL} I_{eL} \cos \varphi \end{aligned} \quad (6-19)$$

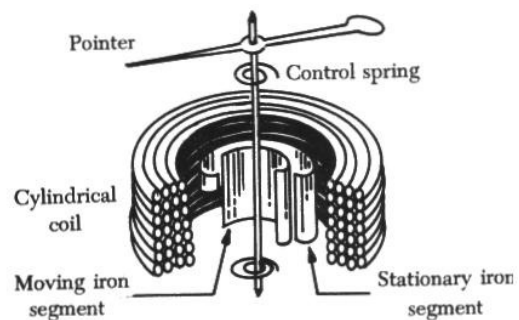
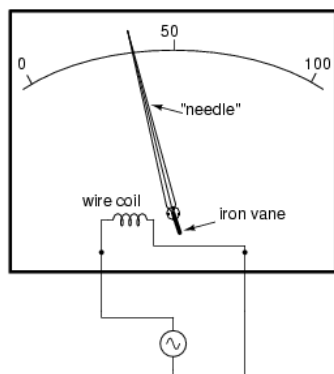
بنابراین عقربه دستگاه الکترو دینامیکی تحت گشتاور متوسطی متناسب با توان مصرفی فعال (Active Power) بار خروجی Z_L منحرف می‌شود.

معرفی دستگاههای اندازه گیری آهن نرم گردان moving iron-vane meter

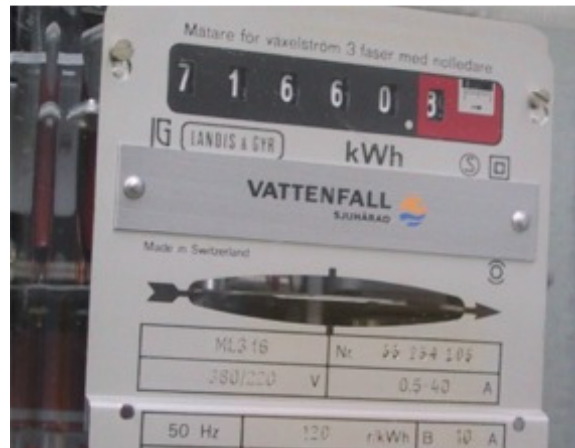
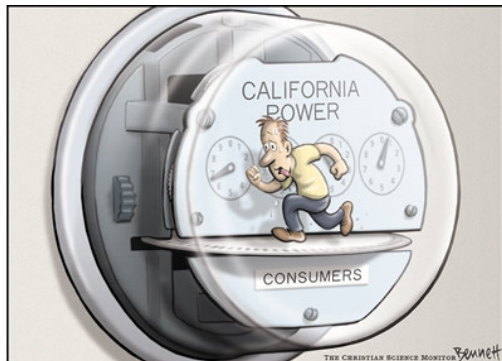
این نوع دستگاهها مبتنی بر خاصیت دفع قطبهای هم نام عمل کرده و غالباً بمنظور اندازه گیری های ac مورد استفاده قرار میگیرند.



Iron-vane electromechanical meter movement

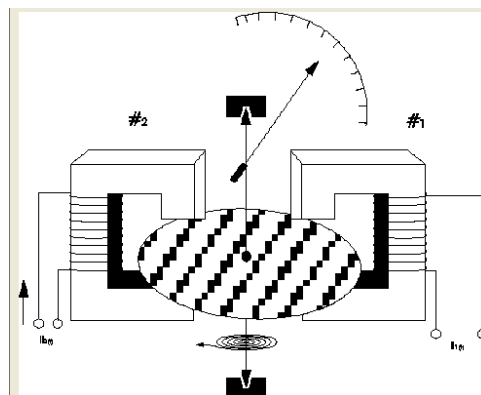
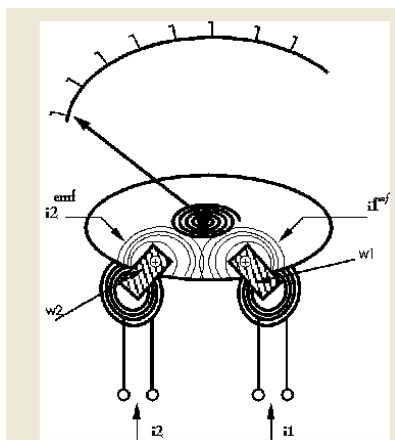


5-6 - دستگاه‌های سنجش القایی ϕ (Induction Instrument)



این نوع دستگاه‌ها بر اساس پدیده القای الکترومغناطیسی (جریان متناوب) کار می‌کنند و به منظور سنجش ac (آمپر متر، ولت متر، وات متر، وارو متر، / متر و فرکانس متر) و بالاخره از همه مهم‌تر سنجش توان برق تک فاز و سه فاز استفاده می‌شود.

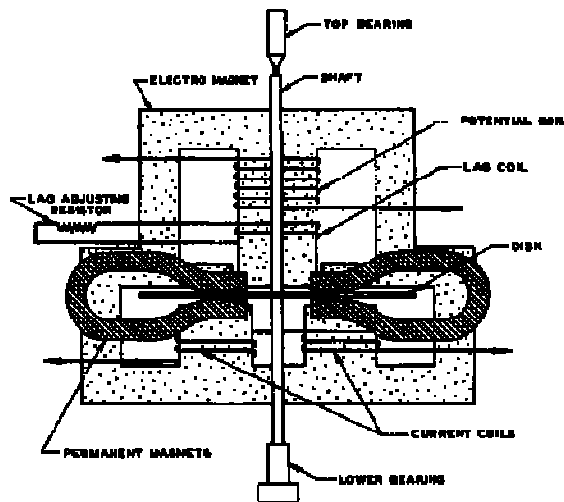
اگر جریانهای سیم پیچ 1 و 2 (شکل 6-6) با توجه به فاصله‌ای که قطبین آنها دارند، اختلاف فاز داشته باشند، به طوریکه سیم پیچ 2 دیسک را جذب و سیم پیچ 1 دیسک را دفع کند، دیسک متصل به محور و به این ترتیب عقربه منحرف می‌شود.



شکل 6-6 - ساختار نمادین یک دستگاه سنجش القایی

ϕ_1 شار ایجاد شده توسط بوبین 1 روی دیسک، ϕ_2 شار ایجاد شده توسط بوبین 2 روی دیسک.
 I_1 جریان القایی روی دیسک حاصل از ϕ_1 ، I_2 جریان القایی روی دیسک توسط ϕ_2 .

(الف) ساختمان داخلی کنتورهای جریان متناوب (تک فاز) :



تشریح نحوه کار :

دو هسته متورق از آهن نرم (1 و 2) مطابق شکل (6 - 7) به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که فاصله‌ای هوایی ایجاد می‌کنند، تا دیسک دوار (صفحه مدور) قادر باشد در این فاصله قرار گیرد.

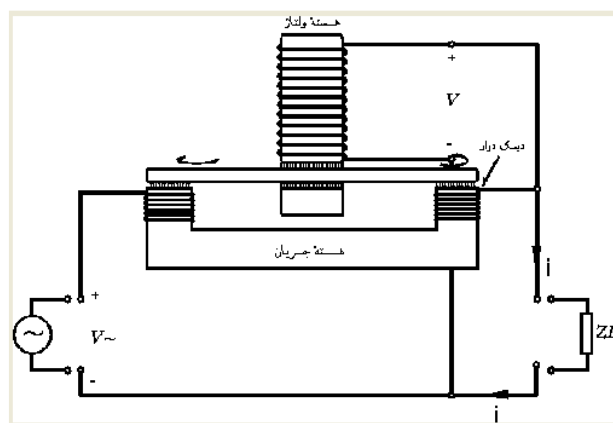
شکل 6 - 7 - ساختار داخلی کنتور تک فاز

دو هسته، دو شار مغناطیسی Φ_v و Φ_i روی صفحه مدور به طور عمود بر آن ایجاد می‌کنند، بطوریکه Φ_v توسط بوبین ولتاژ 4 (موازی با ولتاژ خط) و Φ_i توسط بوبین جریان 3 (سری با بار یا مصرف کننده) تولید می‌شوند.

از آنجایی که Φ_v و Φ_i به اندازه 90° اختلاف فاز دارند، دیسک به طور متناوب توسط قطبین a، b و c جذب و دفع می‌شود و همین امر موجب چرخش دیسک می‌شود. هر چه جریان قوی‌تر باشد، (مصرف زیاد) جذب و دفع قطبین a و c شدیدتر (جذب و دفع قطب b ثابت است) و لذا سرعت دوران بیشتر می‌شود. با استفاده از یک مغناطیس دائمی (6) سرعت دوران دیسک تنظیم می‌شود.

(ب) اجزای فیزیکی سیستم با مشخصات کلی :

سیم پیچ ولتاژ : سیمی با قطر نسبتاً نازک و دور زیاد؛ سیم پیچ جریان : سیمی با قطر زیاد و دور کم است؛ دیسک دوار : از جنس مواد مغناطیسی (آهن نرم)؛ آهن ربای دائم : همواره دیسک را در حالت جذب خود نگه می‌دارد و حرکت دیسک را ترمز می‌کند. مکانیزم شمارنده : با استفاده از چرخ دنده‌هایی که به محور دیسک متصل است، سیستم شمارنده به ازای هر 375 (یا 1200) دور یک شماره محسوب می‌کند.



شکل 8-6 - نمایش اجزاء مهم کنتور تک فاز

فاصله هوایی بین دیسک و قطبین : در شدت کوپل و گشتاور وارده به دیسک مؤثر است و به نحوی انتخاب می‌شود تا مقدار کوپل، ضمن محافظت دیسک در سرعتهای بالا از برخورد قطبین، حداکثر باشد.

فصل هفتم

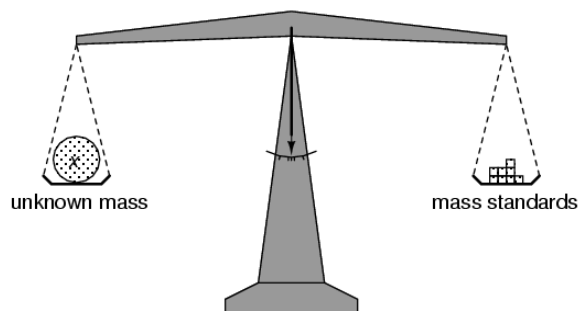
پلهای اندازه‌گیری

1 - 7 - پلهای اندازه‌گیری

پلهای اندازه‌گیری به دو دسته "پلهای جریان مستقیم" و "پلهای جریان متناوب" تقسیم می‌شوند که البته نوع سومی از تلفیق این دو نیز میسر است.

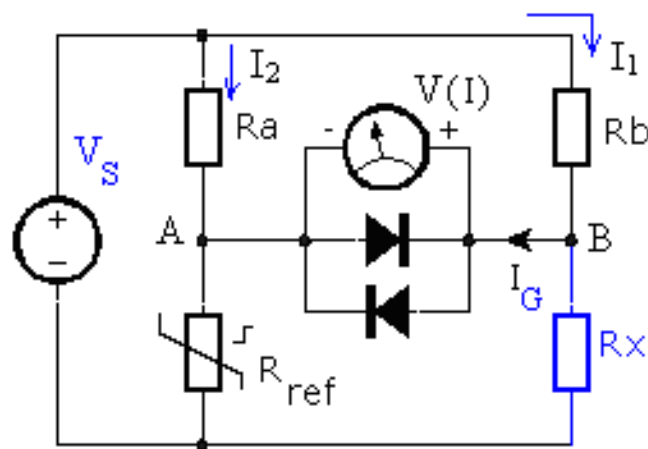
2 - 7 - پلهای جریان مستقیم DC

همان طور که پل و استحکام پل زمانی مؤثر است که در حالت تعادل باشد، برای پلها عموماً حالت تعادلی مطرح می‌شود و لفظ "پل" از این لحاظ اتخاذ شده است که همیشه دستگاه اندازه‌گیری به‌طور عرضی در مسیر جریان الکتریکی قرار می‌گیرد و زمانی پل در وضعیت تعادل است که دو انتهای آن از حیث پتانسیل دارای وضعیت مشابه باشند. هرگاه منبع تغذیه پل، مولد DC (باتری) باشد و وسیله تشخیص وضعیت تعادل نیز گالوانومتر قاب گردان با آهن ربای ثابت، پل را "پل DC" می‌گوییم.



پل وتستون :

این پل در سنجش مقاومتهای مجهول مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل 1-7 - مدار پل وتستون

همان طور که از شکل (1-7) استفاده می شود، فرض کنیم V_S ، R_a ، R_b معلوم و R_{ref} پتانسیومتری از نوع پله ای و قابل تنظیم است که بعنوان مرجع بمنظور به تعادل رساندن پل استفاده میشود. اگر گالوانومتر در عرض دو جریان I_1 و I_2 قرار گیرد (A و B)، بدیهی است در موقعی که ارتفاع پتانسیل نقاط A و B یکسان باشد، $I_G=0$ (یا $V_{AB}=0$) خواهد بود، در این وضعیت می گوییم پل در حالت تعادل است.

شرط تعادل :

$$I_G = 0, \quad V_{AB} = 0$$

$$V_{AB} = 0 \Rightarrow V_A - V_B = 0$$

حال رابطه مقاومت مجهول R_X با معلومات مدار به صورت زیر است :

$$\begin{cases} V_A = R_{ref} I_2 \\ V_B = R_X I_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_2 = \frac{V_S}{R_a + R_{ref}} \\ I_1 = \frac{V_S}{R_b + R_X} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_A = \frac{R_{ref}}{R_a + R_{ref}} V_S \\ V_B = \frac{R_X}{R_b + R_X} V_S \end{cases}$$

$$V_A - V_B = 0 \Rightarrow \frac{R_{ref}}{R_a + R_{ref}} V_S = \frac{R_X}{R_b + R_X} V_S \Rightarrow R_{ref} R_b = R_a R_X \Rightarrow$$

$$R_X = \frac{R_{ref} R_b}{R_a} \quad (7-1)$$

نتیجه : با تنظیم R_{ref} و معلوم بودن R_a و R_b هنگامیکه شرط تعادل برقرار باشد، گالوانومتر جریان 0A را نشان بدهد) می توان R_X را تعیین کرد.

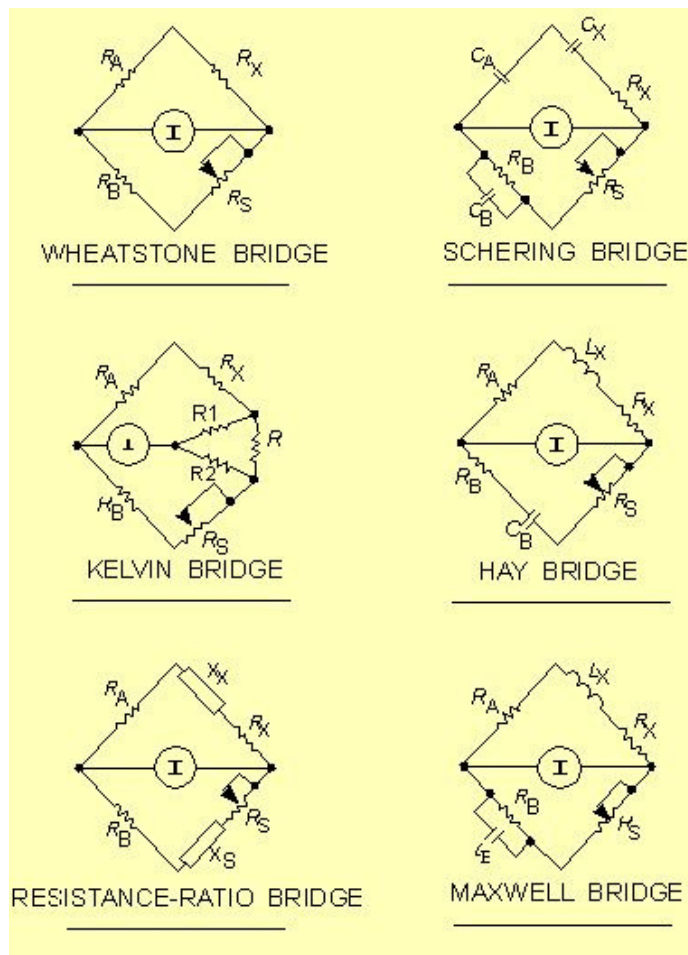
اصول دستگاههای اندازه گیری المانهای غیرفعال (Passive)



Vector Impedance Meter

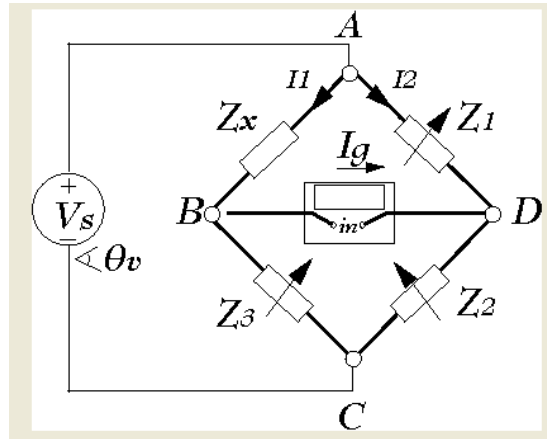
3-7. پلهای جریان متناوب

هرگاه منبع تغذیه مدار پل یک مولد ac با فرکانس مشخص f باشد، پل را متناوب گویند. در این پلها وضعیت تعادل به وسیله اسیلوسکوپ (نوسان نگار) یا گوسی و یا هر آشکار ساز مناسب دیگری قابل تشخیص است. در شکل زیر نمونه هایی از معروفترین پلهای ac ارایه شده است.



پلهای اندازه گیری مشخصه امپدانسی مجهول :

مانند پل DC شرط تعادل، نداشتن اختلاف پتانسیل بین نقاط B و D است، منتها در این مدار چون مداری AC است و از طرفی هر ولتاژ متناوب سینوسی دو مشخصه دامنه و فاز می باشد لازم است هر دو مقایسه شوند، بنابراین شرط تعادل پل نیز چنین خواهد شد :



شکل 2-7 - مدار پل متناوب

شرط تعادل پل ac :

$$V_{BC} = V_{DC} \Rightarrow |V_{BC}| e^{j\alpha} = |V_{DC}| e^{j\beta} \Rightarrow \begin{cases} |V_{BC}| = |V_{DC}| \\ \angle V_{BC} = \angle V_{DC} \end{cases} \Rightarrow \alpha = \beta$$

لذا شرط تعادل، تساوی دامنه و نیز فاز ولتاژهای نقاط B و D خواهد بود. از روابط بالا کاملاً مشخص می شود که مقایسه نقطه B و D باید هم از حیث دامنه و هم فاز صورت گیرد، حال آنکه ولت متر ac تنها قادر است به مقایسه دامنه مؤثر ولتاژها بپردازد و به همین دلیل از اسیلوسکوپ که ابزاری است با قابلیت نمایش دامنه و فاز، دو ولتاژ را مقایسه می کنیم. : با برقراری شرط تعادل

$$\begin{cases} V_{BC} = V_{DC} \\ V_{AB} = V_{AD} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_3 I_1 = Z_2 I_2 \\ Z_X I_1 = Z_1 I_2 \end{cases} \Rightarrow \frac{Z_3}{Z_X} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

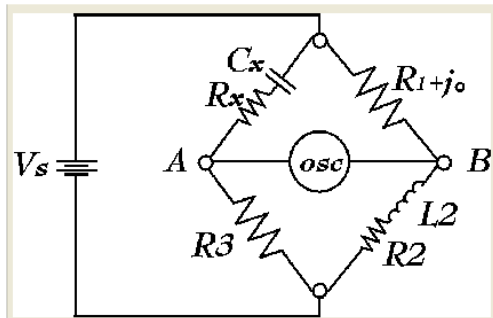
$$Z_3 Z_1 = Z_X Z_2 \quad \text{if} \quad \begin{cases} |Z_i| = |Z_i| \angle \varphi_i \\ i = 1, 2, 3 \end{cases}$$

$$|Z_1| \parallel |Z_3| \angle \varphi_1 + \varphi_3 = |Z_X| \parallel |Z_2| \angle \varphi_X + \varphi_2 \Rightarrow$$

$$\text{Amplitude: } |Z_1| \parallel |Z_3| = |Z_X| \parallel |Z_2| \Rightarrow |Z_X| = \frac{|Z_1| \parallel |Z_3|}{|Z_2|} \quad (7-2)$$

$$\text{Phase: } \angle \varphi_1 + \varphi_3 = \angle \varphi_X + \varphi_2 \Rightarrow \varphi_X = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad (7-3)$$

مثال: آیا در مدار زیر امکان تعادل برای پل وجود دارد ؟



شکل 3-7. پل متناوب سنجش خازن مجهول

پاسخ:

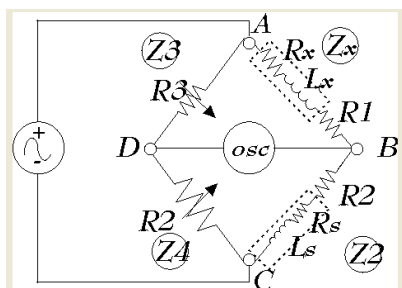
شکل (3 - 7) نمونه‌ای از یک پل متناوب مناسب برای اندازه‌گیری خازن مجهول می‌باشد. حال اگر به جای C_x ، L_x داشتیم، شرط تعادل فاز به صورت زیر به دست می‌آید :

$$\tan^{-1}\left(\frac{\omega L_x}{R_x}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega L_2}{R_2}\right) \Rightarrow \frac{\omega L_x}{R_x} = -\frac{\omega L_2}{R_2}$$

به عبارتی $\frac{L_x}{R_x}$ مقداری منفی به دست می‌آید لذا در این صورت امکان تعادل میسر نمی‌باشد. به همین دلیل به منظور اندازه‌گیری المانهای مداری ac (سلف یا ضریب خودالقایی، ظرفیت خازن) و فرکانس مدار پلهای خاصی با دقت قابل قبول به صورت زیر معرفی می‌شود.

4-7. پل اندازه‌گیری ضریب خودالقایی

مطابق شکل زیر مداری را تشکیل می‌دهیم و با استفاده از آن، سلف مجهولی به مشخصات R_x و L_x را مشخص می‌کنیم.

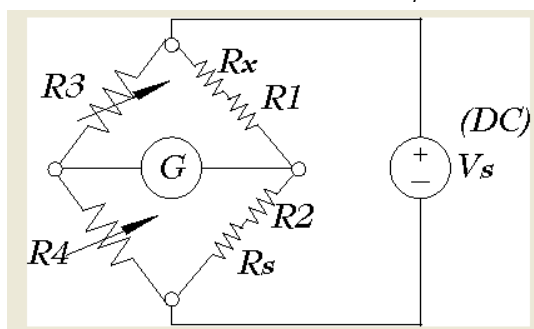


شکل (4-7) مدار پل ac

از آنجا که در پل شکل (1-4-7) فقط خودالقائه و مقاومت داریم، اگر پل را به یک منبع DC وصل کنیم، بدیهی است L_s و L_x اتصال کوتاه عمل می‌کنند و شکل (2-4-7) حاصل می‌شود.

در این صورت اگر پل را به منبع DC وصل کنیم، به راحتی از شرط تعادل این پل به دست می‌آید:
(البته به جای اسیلوسکوپ از گالوانومتر بهره می‌بریم.)

$$R_3(R_2 + R_s) = R_4(R_1 + R_x) \Rightarrow R_x = \frac{R_3 R_2 + R_3 R_s - R_4 R_1}{R_4} \quad (7-6)$$



شکل (5-7) مدار پل dc

بدیهی است از شرط تعادل پل ac نیز مقدار ضریب خود القایی مجهول چنین به دست می‌آید:

$$Z_2 Z_3 = Z_x Z_4 \Rightarrow R_3(R_2 + R_s + j\omega L_s) = R_4(R_1 + R_x + j\omega L_x) \Rightarrow$$

$$R_3(R_2 + R_s) + j\omega L_s R_3 = R_4(R_1 + R_x) + j\omega L_x R_4 \Rightarrow$$

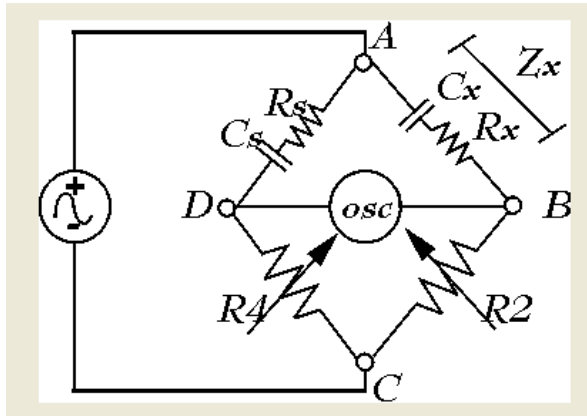
$$\begin{cases} R_3(R_2 + R_s) = R_4(R_1 + R_x) & \text{Real :} \quad (7-7-1) \\ j\omega L_s R_3 = j\omega L_x R_4 & \text{Imajinary :} \quad (7-7-2) \end{cases}$$

ملاحظه می‌شود رابطه (1-7-7) همان شرط تعادل پل DC اخیر است. و به منظور درک این شرط، یعنی برابری فازها، باید از مدار پل AC استفاده کرد و با بهره‌گیری از اسیلوسکوپ با تغییر مجدد ω به منظور برقراری این شرط اقدام کنیم، در این صورت ۱ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$L_x = \frac{R_3}{R_4} L_s \quad (7-1)$$

نتیجه: با داشتن یک خودالقایی استاندارد مشخص (R_s و L_s معلوم) و بهره‌گیری از دوپتانسیومتر دقیق R_3 و R_4 با یک مدار ترکیبی پل DC و AC می‌توان هر سلفی را با هر مقدار خودالقایی معلوم کرد.

5-7. پل اندازه‌گیری خازن مجهول (ظرفیت الکتریکی)



مطابق شکل (5-7) با بهره‌گیری از یک خازن استاندارد (با ظرفیت معلوم G_S و مقاومت ثابت داخلی R_S) به همراه دو مقاومت متغیر R_2 و R_4 با استفاده از مدار مناسب با شرط برقراری پل در حال تعادل (یعنی "OSC" مقدار V_{AB} را از لحاظ فاز و دامنه برابر V_{DC} نشان بدهد) مقادیر و مقاومت داخلی آن R_X مشخص می‌شود:

شکل 6-7 - مدار مناسب برای اندازه‌گیری خازن مجهول

$$Z_4 Z_X = Z_2 Z_S \Rightarrow R_4 \left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) = R_2 \left(R_S + \frac{1}{j\omega C_S} \right) \Rightarrow$$

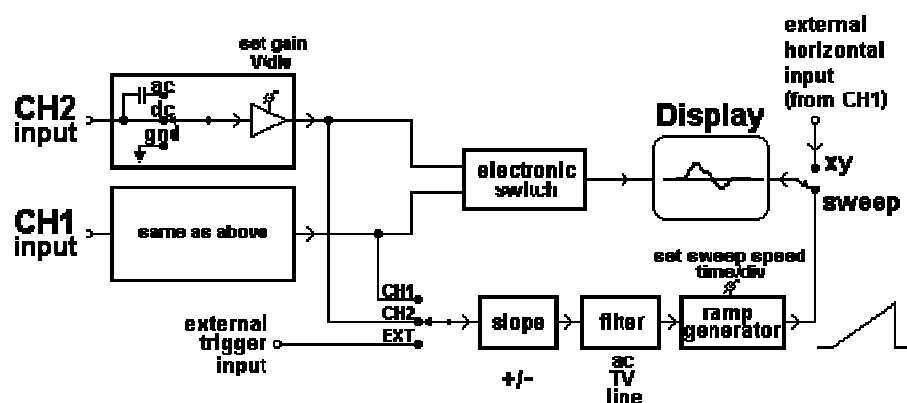
$$R_4 R_X + \frac{-jR_4}{\omega C_X} = R_2 R_S + \frac{-jR_2}{j\omega C_S} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} R_4 R_X = R_2 R_S \\ \frac{R_4}{\omega C_X} = \frac{R_2}{\omega C_S} \end{cases}$$

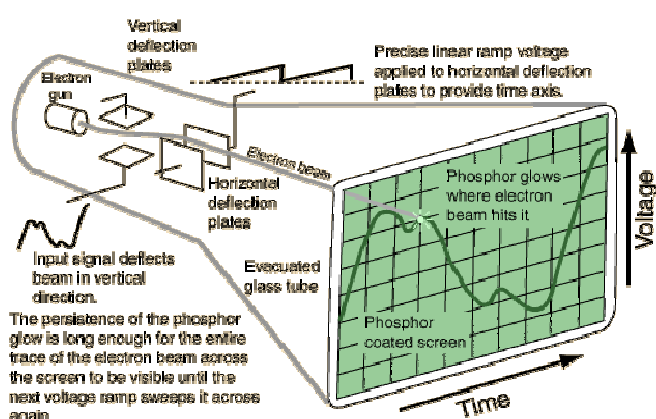
$$\begin{cases} R_X = \left(\frac{R_2}{R_4} \right) R_S & (7-9-1) \\ C_X = \left(\frac{R_4}{R_2} \right) C_S & (7-9-2) \end{cases}$$

Oscilloscope (8-1) اسیلوسکوپ

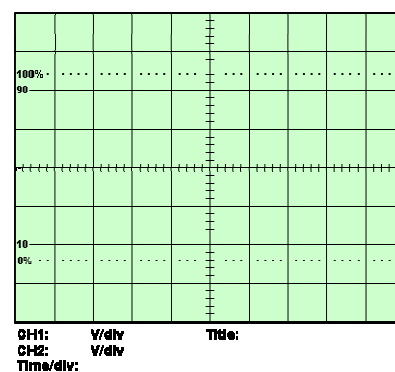
اسیلوسکوپ ولتمتری است که با قابلیت رسم شکل موج امکان درک تصویری واقعی شکل موجها را آنگونه که هستند برای کاربر فراهم میکند.



بلوک دیاگرام و بخشهای اصلی اسیلوسکوپهای آنالوگ

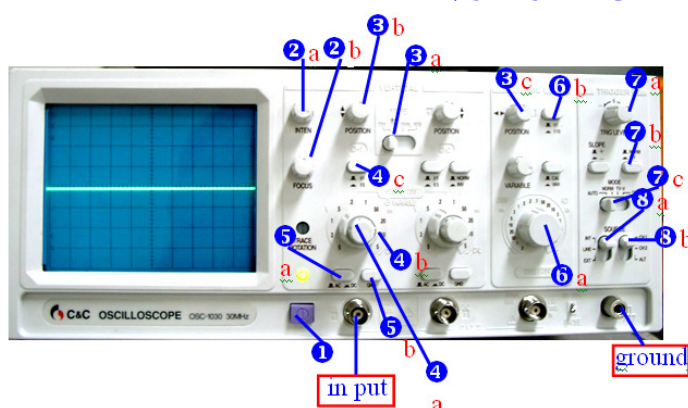


نحوه عملکرد اسیلوسکوپ



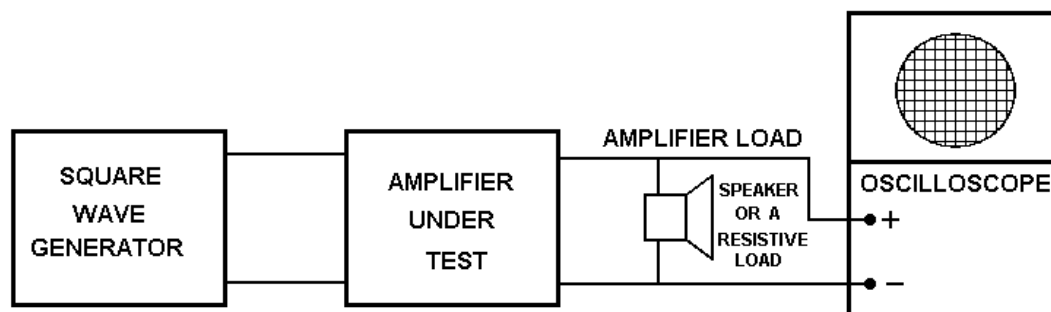
صفحه نمایش اسیلوسکوپ

(8-2) تشریح قابلیت های اسیلوسکوپ (features)

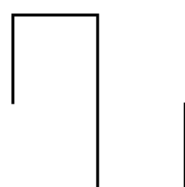


Initial Oscilloscope Settings, Function Setting	
روشن و خاموش کردن دستگاه	1
تنظیم شدت روشنایی بیم CRT	2a
تنظیم نازکی بیم بمنظور دقت بیشتر قرائت کمیت مشاهده شده	2b
تغییر مد نمایش ولتاژ	3a
سیگنال ورودی کانال 1 روی CRT نمایش داده میشود.	Ch1
سیگنال ورودی کانال 2 روی CRT نمایش داده میشود	Ch2
نمایش توأم سیگنال ورودی کانال 1 و سیگنال ورودی کانال 2 روی CRT	dual
تقسیم زمانی 1mS ~ 0.2S	chop
تقسیم زمانی 0.2μS ~ 0.5mS	ALT
نمایش جمع جبری سیگنال ورودی کانال 1 و سیگنال ورودی کانال 2 روی CRT	add
تغییر موقعیت عمودی بیم از نظر حرکت به بالا و پایین	3b
تغییر و انطباق نقطه شروع و خاتمه بیم بر صفحه نمایش	3c
در حالت کالیبره باید در منتهی الیه سمت راست باشد و برای کاربرد لیسازو و بمنظور هم دامنه کردن کانال ها دیگر مورد استفاده آن است.	4a
تغییر مقیاس تقسیمات عمودی بصورت پله ای صفحه نمایش	4b
دکمه امکان نمایش سیگنال ch1 در حالت ac (حذف سطح dc همراه) یا dc همراه	5a
دکمه قطع سیگنال ورودی و اتصال زمین داخلی به	5b
انتخاب مقیاس تقسیمات زمانی پله ای افقی CRT	6a
تغییر مقیاس TIME/DIV به میزان $\times 10$	6b

(8-3) استفاده های کاربردی اسیلوسکوپها در اندازه گیریهای AC
(8-3-1) تست تقویت آمپلی فایر(اعوجاج دامنه)



A TYPICAL SETUP FOR TESTING AN AUDIO AMP USING SQUARE WAVES.



PERFECT RESPONSE



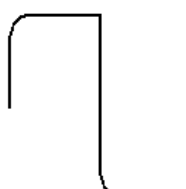
POOR LOW FREQUENCY RESPONSE



FAIR LOW FREQUENCY RESPONSE



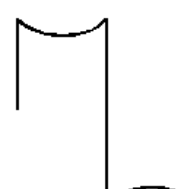
POOR
HIGH FREQUENCY
RESPONSE



IMPROVED
HIGH FREQUENCY
RESPONSE



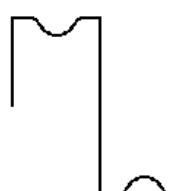
EMPHASIZED
LOW FREQUENCY
AMPLIFICATION



REDUCED
LOW FREQUENCY
AMPLIFICATION



A FREQUENCY,
OR A
BAND OF FREQUENCIES
BEING EMPHASIZED



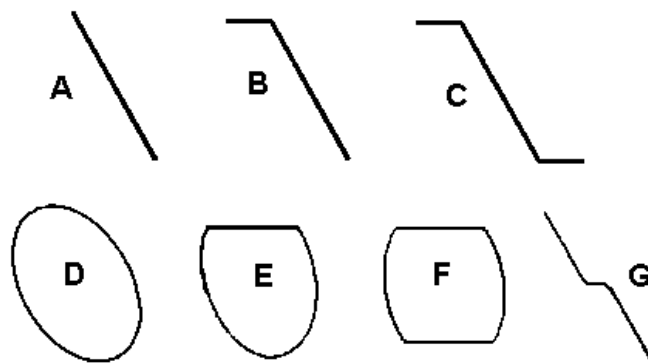
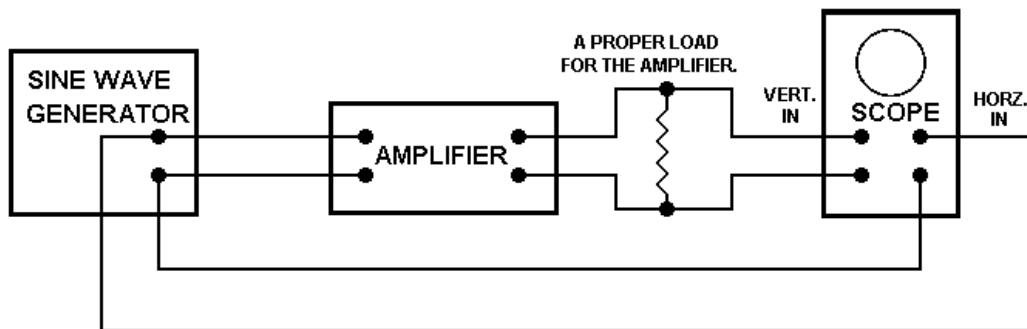
A FREQUENCY,
OR A
BAND OF FREQUENCIES
BEING ATTENUATED



OSCILLATION OR "RINGING"

(2-3-8) تست فاز آمپلی فایر (اعوجاج فاز)

A USEFUL METHOD TO ANALYZE DISTORTION, USING A SCOPE AND LISSAJOUS PATTERNS. THIS TEST SHOULD BE DONE AT THE FULL RATED OUTPUT POWER OF THE AMPLIFIER.



A = NO OVERLOAD OR DISTORTION.

B = OVERLOAD DISTORTION, NO PHASE SHIFT.

C = DRIVING THE AMP INTO FULL SATURATION, PAST CUTOFF BUT NO PHASE SHIFT.

D = PHASE SHIFT.

E = OVERLOAD DISTORTION AND PHASE SHIFT.

F = PHASE SHIFT, DRIVING INTO CUTOFF AND INTO SATURATION.

G = CROSSOVER DISTORTION.

یادداشت :
