فصل ۳

اندازه‌گیری توان، انرژی و اختلاف فاز

هدف کلّی

شناخت مفاهیم توان، انرژی و اختلاف فاز

و نحوهٔ اندازه‌گیری آن‌ها

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیرنده انتظار می‌رود که:

ـ توان الکتریکی و واحد آن را تعریف کند.
ـ نحوهٔ اتصال وات‌متر به مدار را شرح دهد.
ـ انتخاب صحیح حوزهٔ کار (رِنج) را در یک وات‌متر، توضیح دهد.
ـ نکات ایمنی برای حفاظت وات‌متر در برابر خطرات را بیان کند.
ـ مقدار توان اندازه‌گیری شده توسط وات‌متر را بخواند.
ـ تفاوت بین توان DC و AC را شرح دهد.
ـ انرژی الکتریکی و واحد آن را تعریف کند.
ـ نحوهٔ اتصال کنتور را، در یک مدار، شرح دهد.
ـ اختلاف فاز را تعریف کند.
ـ عوامل ایجاد اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان را، در یک مدار، شرح دهد.
ـ فعالیت‌های کلاسی را با اعتماد به نفس و به طور دقیق انجام دهد.
ـ نظم و ترتیب و حضور به موقع در کلاس را رعایت کند.
ـ مسئولیت‌های واگذار شده را به طور دقیق اجرا کند.
ـ در موقعیت‌های مناسب از آزمایشگاه مجازی استفاده کند.
ـ از امکانات فراهم شده به خوبی حفاظت و نگهداری کند.
ـ ابهامات و سؤالات خود را در زمان مقتضی بپرسد.
ـ به سؤالات مطرح شده در زمان مقتضی پاسخ دهد.
ـ در امور مختلف حضور فعال و داوطلبانه داشته باشد.
ـ توانمندی‌های خود را در موقعیت‌های مناسب بروز دهد.
ـ در کار گروهی مشارکت فعال و همکاری مؤثر داشته باشد.
ـ نسبت به حل مشکلات سایر هنرجویان حساس و فعال باشد.
ـ سایر هنرجویان را در ارتباط با اجرای نظم و مقررات، راهنمایی و تشویق کند.

مفاهیم اساسی

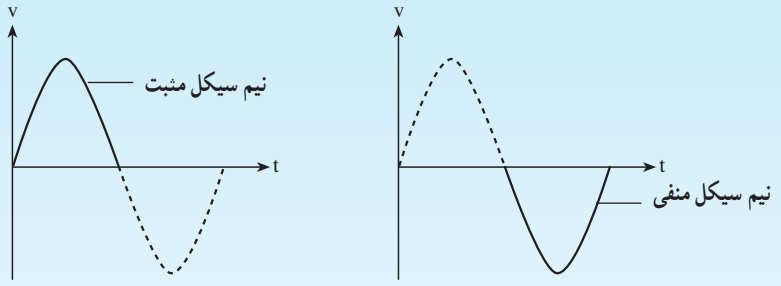
قبل از شروع این مبحث مفاهیم زیر را به‌خاطر بسپارید :

۱ــ موج سینوسی : همان‌طور که در مبحث قبل اشاره شد، موج سینوسی دارای قسمت مثبت و منفی است.

۲ــ معادله ریاضی موج سینوسی : معادله ریاضی موج سینوسی به‌صورت $V = V_m \sin 2\pi ft$ تعریف می‌شود. می‌خوانیم V مساوی است با V_m سینوس دوپی ضربدر f ضربدر t. اگر با استفاده از قوانین ریاضی شکل موج معادله بالا را رسم کنیم یک شکل موج سینوسی به ما می‌دهد.

۳ــ هر موج سینوسی بعد از دو نیم‌سیکل (یک **نیم سیکل مثبت** و یک **نیم سیکل منفی**) تکرار می‌شود.

۴ــ نیم سیکل : عبارت است از فاصله‌ای که موج از صفر به ماکزیمم یا مینیمم و سپس به صفر می‌رسد.

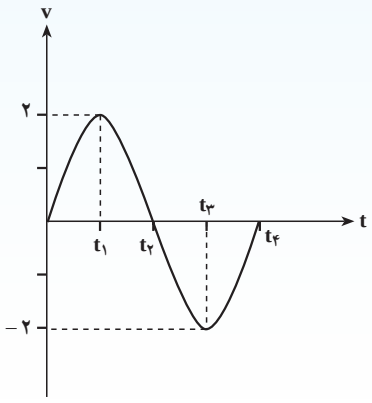


۵ــ سیکل : مجموعهٔ یک نیم‌سیکل منفی و یک نیم‌سیکل مثبت را سیکل یا دورهٔ تناوب می‌گویند.

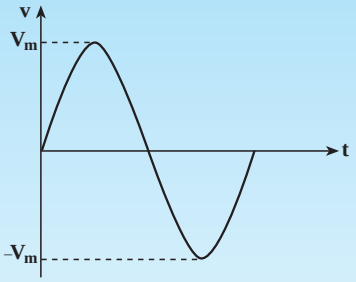
۶ــ شکل موج : امواج می‌توانند شکل موج‌های مختلفی مانند : مربعی، مثلثی و دندانه اره‌ای داشته باشند. این امواج نیز دارای نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی هستند و تعریف سیکل نیز برای آن‌ها صدق می‌کند.

۷ــ فرکانس : تعداد سیکل‌ها در یک ثانیه را فرکانس می‌نامند و آن را با f نشان می‌دهند.

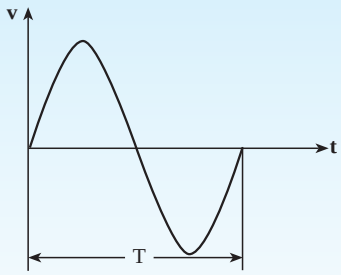
۸ــ مقدار لحظه‌ای : به مقدار موج در هر لحظه از زمان مقدار لحظه‌ای می‌گویند. مثلاً در شکل زیر در t_1 مقدار دامنه ۲ ولت و در لحظه t_4 مقدار دامنه ۲ – ولت است.



۹ــ مقدار V_m : در لحظه‌ای از هر نیم‌سیکل که موج سینوسی بیشترین مقدار را دارد، آن را V_m یا ولتاژ ماکزیمم می‌نامند.



۱۰ــ زمان تناوب : زمان یک سیکل را زمان تناوب می‌نامند.



قابل توجه هنرآموزان محترم

در صورت امکان ضمن نشان‌دادن تجهیزات واقعی در کلاس و نحوهٔ استفاده از آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار مولتی‌سیم موارد آموزش را برای هنرجویان به صورت آزمایشگاه مجازی به نمایش درآورید.

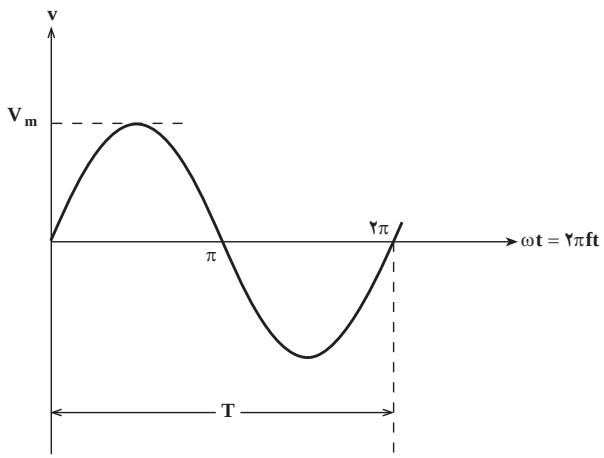
مقدمه

همهٔ ما در زندگی روزمره خود از برق استفاده می‌کنیم. از یک منزل مسکونی ساده تا صنایع عظیم چون فولادسازی، همه‌جا، برق یک نیروی حیاتی است. برق در نیروگاه‌ها تولید می‌شود و بین مصرف‌کننده‌ها در سراسر کشور توزیع می‌شود. شکل ولتاژ تولید شده در تمامی نیروگاه‌ها به صورت سینوسی بوده و همین شکل موج ولتاژ بین تمامی مصرف‌کننده‌ها توزیع می‌گردد.

معادلهٔ ریاضی ولتاژ سینوسی به صورت رابطهٔ ۱ــ۳ است.

$$V = V_m \sin 2\pi ft \qquad (۱ــ۳)$$

در رابطهٔ ۱ــ۳، v مقدار ولتاژ در هر لحظه برحسب ولت، V_m دامنهٔ ولتاژ یا ماکزیمم مقدار ولتاژ برحسب ولت و f فرکانس یا تعداد سیکل‌ها در ثانیه است؛ که با واحد هرتز (Hertz ـ Hz) بیان می‌شود . در شکل ۱ــ۳ یک سیکل کامل از برق شهر نشان داده شده است. فرکانس برق شهر در ایران ۵۰ هرتز است.



شکل ۱ــ۳ــ یک سیکل کامل برق شهر

مدت زمانی را که طول می کشد تا ولتاژ یا جریان یک سیکل کامل را طی کند زمان تناوب می‌نامند و آن را با حرف T نشان می‌دهند. رابطهٔ T و f به صورت زیر است :

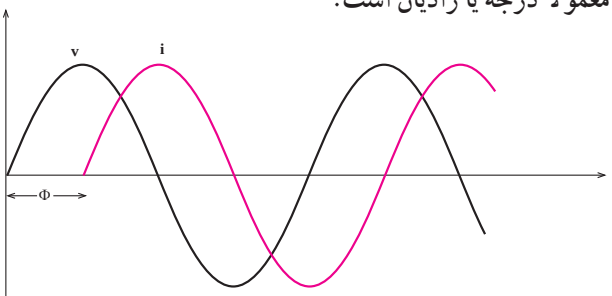
$$f = \frac{۱}{T} \qquad (۳_۲)$$

با توجه به این‌که مقدار ولتاژ در هر لحظه تغییر می کند برای بیان مقدار ولتاژ، از پارامتری به نام مقدار مؤثر استفاده می کنند. مقدار مؤثر هر ولتاژ متناوب، برابر است با مقدار ولتاژ مستقیم یا DC که به همان مقدار کار، حرارت یا کمیت دیگر تولید می‌نماید؛ به‌عبارت دیگر، مقدار جریان مستقیمی را که تولید حرارتی آن در یک مدت معین برابر با تولید حرارتی ولتاژ متناوب مورد نظر باشد، مقدار مؤثرِ (Effective) آن ولتاژ متناوب می گویند. رابطهٔ ولتاژ مؤثر و دامنه (پیک) به صورت زیر است :

$$V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{۲}} = ۰/۷۰۷V_m \qquad (۳_۳)$$

اگر به یک مدار ولتاژ متناوب سینوسی اعمال گردد در آن مدار جریان سینوسی جاری می گردد؛ فقط ممکن است به خاطر بعضی از عناصر موجود در مدار مانند سلف و یا خازن، شکل جریان مدار با شکل ولتاژ مدار، که هر دو سینوسی هستند، روی‌هم منطبق نباشند یعنی هر دو در یک لحظه با هم صفر و ماکزیمم نشوند؛ در این صورت گوییم بین جریان و ولتاژ سینوسی اختلاف فاز وجود دارد. شکل ۲ــ۳ دو شکل موج سینوسی را نشان می دهد که با یکدیگر اختلاف فاز (به اندازه Φ) دارند :

اختلاف فاز را با حرف Φ (فی) نشان می‌دهند و واحد آن معمولاً درجه یا رادیان است.



شکل ۲ــ۳ــ اختلاف فاز بین ولتاژ (v) و جریان (i)

ویژه هنرجویان علاقه‌مند

حال اگر بخواهیم رابطهٔ ریاضی بین ولتاژ و جریان را در ارتباط با یکدیگر نشان دهیم آن را باید به صورت زیر بنویسیم:

$$v = V_m \sin(۲\pi ft) \qquad (۳_۴)$$

$$i = I_m \sin(۲\pi ft \pm \Phi) \qquad (۳_۵)$$

۱ــ۳ــ اندازه‌گیری توان

حاصل‌ضرب ولتاژ لحظه‌ای در جریان لحظه‌ای را **توان الکتریکی** گویند. اگر جریان و ولتاژ از نوع DC باشد رابطهٔ توان به صورت زیر در می‌آید :

$$P = V.I \qquad (۳_۶)$$

ویژه هنرجویان علاقه‌مند

اگر ولتاژ و جریان هر دو سینوسی، با اختلاف فاز (Φ) باشند رابطهٔ توان به صورت زیر خواهد بود:

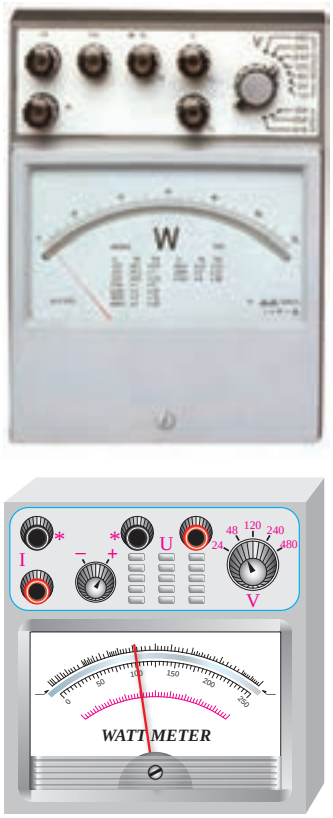
$$P = v.i = V_m \sin\omega t . I_m \sin(\omega t \pm \Phi) \qquad (۳_۷)$$

و برای توان مؤثر خواهیم داشت:

$$P = V_{eff}.I_{eff}.\cos(\Phi) \qquad (۳_۸)$$

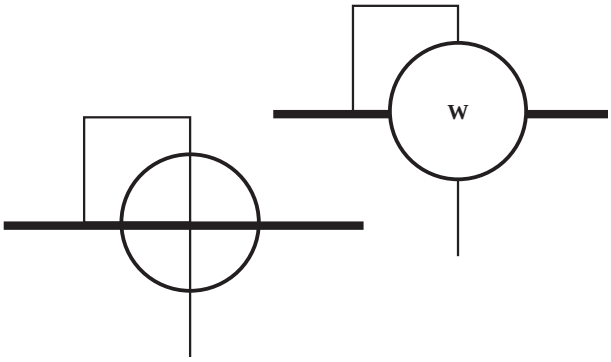
واحد توان الکتریکی وات می‌باشد. در الکترونیک از واحدهای کوچک‌تر مانند میلی‌وات ($\frac{1}{1000}$ W) و در الکتروتکنیک از واحدهای بزرگ‌تر آن مانند کیلووات (۱۰۰۰W) و مگاوات (۱،۰۰۰،۰۰۰W) استفاده می‌شود.

دستگاهی که توان را اندازه می‌گیرد **وات‌متر** نام دارد. شکل ۳ــ۳ دو نمونه وات‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۳ ــ دو نمونه وات‌متر

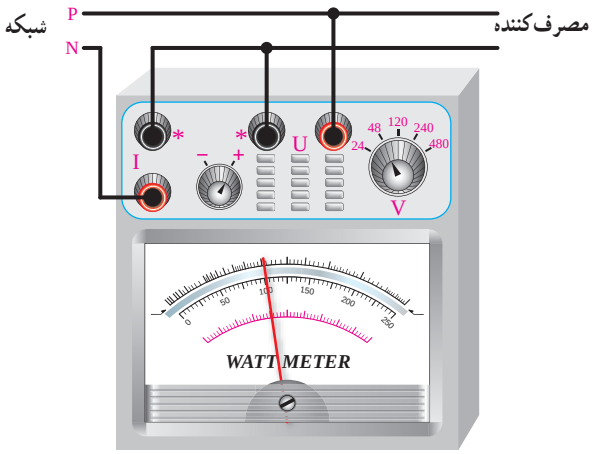
علامت فنی وات‌متر در مدارها به صورتی است که در شکل ۴ــ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۳ــ علامت فنی وات‌متر

چنانچه ولتاژِ دو سر بار و جریان آن، هر دو DC باشند انحراف عقربهٔ وات‌متر نشان‌دهندهٔ حاصل‌ضرب این دو کمیت است، و اگر ولتاژ و جریان سینوسی باشند این انحراف حاصل‌ضرب دو کمیت مؤثر ولتاژ و جریان سینوسی را نشان می‌دهد.

بنابراین به هر وات‌متر باید ولتاژ دو سر بار و نیز جریان مصرف‌کننده را اعمال نمود. به همین منظور روی وات‌متر دو ترمینال، هر دو به نام I، که جریان مصرف‌کننده را با آن سری می‌کنند و دو ترمینال دیگر هر دو به نام u، (با V هم نشان داده می‌شود) که ولتاژ دو سر مصرف‌کننده را (به صورت موازی) به آن اعمال می‌نمایند وجود دارد. شکل ۵ــ۳ نحوهٔ ارتباط یک وات‌متر به شبکهٔ برق شهر و مصرف‌کننده را نشان می‌دهد.



شکل ۵ــ۳ــ نحوهٔ اتصال یک وات‌متر به شبکهٔ برق شهر و مصرف‌کننده

روی اکثر وات‌مترها سلکتوری (کلید ولت‌متر) وجود دارد که با توجه به ولتاژ مصرف‌کننده‌ها تنظیم می‌گردد. مثلاً در شکل ۵ــ۳ رنج ولتاژ این کلید به صورت ۲۴، ۴۸، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۴۸۰ ولت می‌باشد. روی برخی از وات‌مترها سلکتور جریان نیز وجود دارد که هنگام کار، با توجه به جریان مصرف‌کننده، باید روی عدد مناسبی قرار گیرد؛ امّا امروزه تعداد زیادی از وات‌مترها فاقد کلید جریان بوده و معمولاً دارای جریان نامی ۵ آمپر می‌باشند.

هر وات‌متر در هر رنج ولتاژ معمولاً دارای یک مقدار ماکزیمم ولتاژ نیز می‌باشد، مثلاً در رنج ۴۸۰ ولت، ممکن است وات‌متر بتواند تا ۷۵۰ ولت را نیز تحمل نماید. به این مقدار ولتاژ، مقدار ماکزیمم مجاز می‌گویند. در کاتالوگ هر وات متر برای هر رنج مقدار

ماکزیمم آن نیز قید شده است و همین‌طور برای هر رنج جریان، یک مقدار ماکزیمم درنظر گرفته می‌شود. در وات‌مترهایی که فقط دارای یک رنج جریان (۵A) می‌باشند مقدار ماکزیمم جریان معمولاً ۷ آمپر است.

برای خواندن توان مصرف‌کننده از روی صفحهٔ مدرج وات‌متر، از ضریب ثابت‌سنجش استفاده می‌شود. در ابتدا باید ببینیم هر قسمت درجه‌بندی، چند وات را نشان می‌دهد. برای این کار رنج ولتاژ ولت‌متر را در عدد رنج جریان وات‌متر (در صورت نداشتن رنج جریان همان ۵A را درنظر می‌گیریم) ضرب می‌کنیم. عددی که به دست می‌آید نشان دهندهٔ حداکثر توانی است که در انحراف کامل حاصل می‌شود. حال اگر این عدد را بر تعداد کل تقسیمات وات‌متر تقسیم نماییم، مقدار توان را به ازای انحراف هر قسمت یافته‌ایم که به آن **ضریب ثابت‌سنجش** می‌گویند. در روی صفحهٔ مدرج اکثر وات‌مترها ضریب ثابت سنجش به ازای هر ولتاژ نوشته شده است. بنابراین می‌توان با توجه به انحراف عقربه مقدار توان مصرف‌کننده را به صورت رابطهٔ زیر بدست آورد :

مقدار توانی که وات‌متر نشان می‌دهد برابر است با :

تعداد قسمت‌های منحرف شدهٔ عقربه × ضریب ثابت سنجش

(۳ــ۹)

مثال : در یک وات‌متر کل صفحه به ۱۲۰ قسمت تقسیم شده است و کلید ولت‌متر روی ۴۸۰ولت قرار دارد. اگر جریان نامی روی عدد ۵A باشد و عقربه ۳۸/۵ قسمت منحرف شده باشد وات‌متر چه توانی را نشان می‌دهد :

حل : $P = ۴۸۰ \times ۵ = ۲۴۰۰W$

ضریب ثابت سنجش $C = \frac{۲۴۰۰}{۱۲۰} = ۲۰W$

مقدار توانی که وات‌متر نشان می‌دهد برابر است با :

$P = ۳۸/۵ \times ۲۰ = ۷۷۰W$

اگر هنگام اتصال وات‌متر به شبکه و مصرف‌کننده، ولتاژ خط و یا جریان مصرف‌کننده مشخص نباشد باید رنج ولتاژ را در حداکثر مقدار خود قرار داد، و چنانچه رنج جریان قابل تنظیم باشد باید حداکثر رنج را برای آن در نظر گرفت تا آسیبی به وات‌متر وارد نیاید.

۲ــ۳ــ اندازه‌گیری مقدار انرژی

انرژی الکتریکی عبارت است از حاصل‌ضرب توان در زمان یعنی :

$$W = P.t \qquad (۳ــ۱۰)$$

در رابطهٔ فوق P توان الکتریکی برحسب وات، t زمان برحسب ثانیه، W مقدار انرژی بر حسب وات ــ ثانیه یا ژول می‌باشد.

در عمل از واحدهای بزرگ‌تری مانند کیلووات ساعت (P برحسب کیلووات و t بر حسب ساعت) و یا مگاوات ساعت (P برحسب مگاوات و t بر حسب ساعت) نیز استفاده می‌کنند.

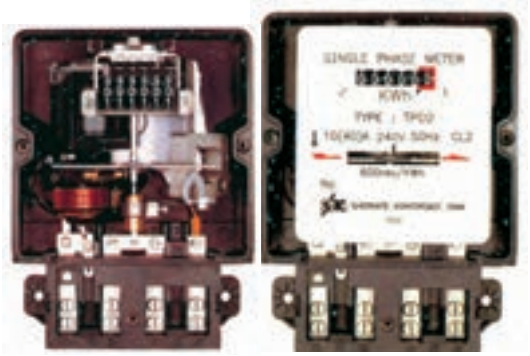
برای اندازه‌گیری مقدار انرژی مصرف شده توسط یک مصرف‌کنندهٔ الکتریکی، احتیاج به یک شمارنده داریم، زیرا با توجه به رابطهٔ

$$W = P.t$$

مقدار W نسبت به زمان دائماً در حال زیاد شدن است. کار این شمارنده شمارش و نمایش مقدار انرژی مصرف شده از یک لحظهٔ به‌خصوص تا زمان حال می‌باشد.

اگر بتوانیم یک محور و یا یک صفحهٔ دوار داشته باشیم به طوری‌که سرعت آن متناسب با توان باشد، تعداد دورهایی که این محور یا صفحهٔ دوار در یک فاصلهٔ زمانی می‌زند متناسب با کل انرژی مصرف شده در آن مدت می‌باشد که این دستگاه خود نمونه‌ای از یک شمارشگر است.

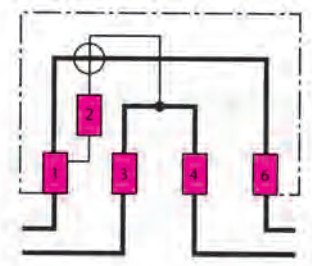
معمول‌ترین وسیلهٔ اندازه‌گیری انرژی الکتریکی، دستگاه **کیلووات ساعت متر** یا **کنتور** می‌باشد. شکل ۶ــ۳ نمای ظاهری و داخلی یک نمونه کنتور تک‌فاز را که در منازل برای اندازه‌گیری انرژی مصرف شده به کار می‌رود نشان می‌دهد.



شکل ۶ ــ ۳ــ یک نمونه کنتور تک‌فاز

کنتور انرژی الکتریکی را برحسب کیلووات ساعت به کمک رقم‌های یک شمارندهٔ مکانیکی که در روی آن نصب شده است، نشان می‌دهد. نحوهٔ اتصال کنتور به شبکه و مصرف‌کننده همانند وات‌متر است، به این معنی که باید ولتاژ و جریان مصرف‌کننده را به آن اعمال نمود؛ زیرا سرعت چرخش صفحهٔ گردان متناسب با توان مصرف‌کننده می‌باشد.

شکل ۷ــ۳ شمای الکتریکی (سمبل) کنتور را، همراه با یک مصرف کننده و شبکهٔ برق شهر، نشان می‌دهد.



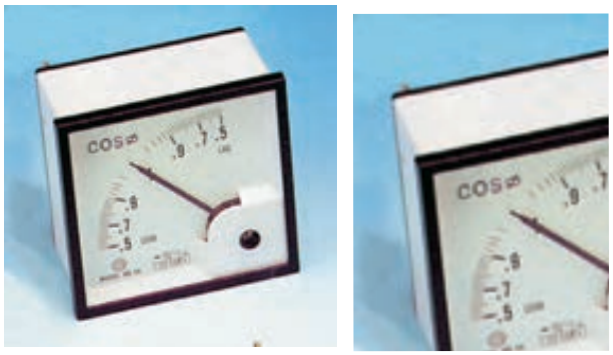
شکل ۷ــ۳ــ نحوهٔ اتصال کنتور به شبکهٔ برق و مصرف‌کننده

کنتورها، برای جریان‌ها و ولتاژهای مختلف، به صورت تک‌فازه و سه فازه ساخته می‌شوند. معمول‌ترین آن‌ها کنتور ۲۲۰ ولت تک‌فازه ۲۵A است که ادارهٔ برق در منازل مسکونی جهت اندازه‌گیری مصرف برق نصب می‌کند.

۳ــ۳ــ اندازه‌گیری اختلاف فاز

اختلاف زمانی بین دو کمیت الکتریکی را اختلاف فاز می‌نامند. چون اختلاف فاز بین دو سیگنال سینوسی هم فرکانس مطرح می‌باشد (مفهوم می‌دهد) و از طرفی هر سیکل کامل سینوسی را می‌توان معادل 360° یا 2π رادیان در نظر گرفت (روی محور زمان) لذا اختلاف زمانی بین دو کمیت الکتریکی را نیز می‌توان برحسب درجه یا رادیان مطرح نمود. بحث ما در اینجا اندازه‌گیری اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ در یک مدار الکتریکی می‌باشد، همان‌طور که می‌دانید وجود بارهای سلفی (مانند موتورهای الکتریکی و ...) و یا وجود بارهای خازنی (در عمل، بار، به ندرت خازنی است) باعث ایجاد اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ می‌شود.

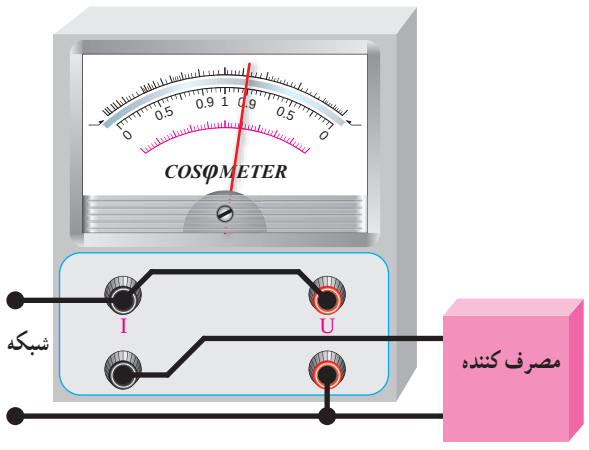
دستگاهی که می‌تواند اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ را اندازه بگیرد **cosΦ متر** نام دارد. پس می‌توان گفت : کسینوس فی‌متر دستگاهی است که حرکت عقربهٔ آن نشان دهندهٔ مقدار اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ می‌باشد. بر روی صفحهٔ مدرّج کسینوس فی‌مترها، معمولاً مقدار اختلاف فاز برحسب درجه و نیز کسینوس اختلاف فاز را می‌نویسند. شکل ۸ ــ۳ یک نمونه کسینوس فی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۸ ــ۳ــ یک نمونه cosΦ متر

با توجه به این‌که کسینوس فی‌متر باید اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ را اندازه بگیرد لذا باید نمونهٔ جریان مصرف‌کننده و نیز نمونهٔ ولتاژ را به آن اعمال نمود.

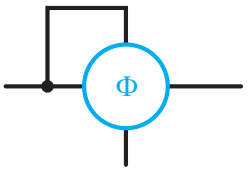
شکل ۹ــ۳ نحوهٔ اتصال کسینوس فی‌متر به مصرف‌کننده و شبکهٔ برق شهر را نشان می‌دهد. این اتصال همانند وات‌متر می‌باشد.



شکل ۹ــ۳ــ نحوهٔ اتصال کسینوس فی‌متر به شبکهٔ برق شهر و مصرف‌کننده

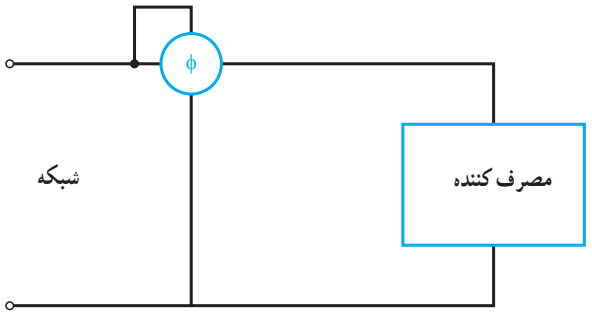
اکثر کسینوس فی مترها ضمن نشان دادن اختلاف فاز، نوع بار (سلفی یا خازنی) را نیز مشخص می‌کنند. اگر عقربه از وسط صفحه به سمت راست یا سمت (ind) حرکت کند نوع بار سلفی است، یعنی جریان به اندازهٔ Φ درجه، که عقربه نشان می‌دهد، عقب‌تر است (تأخیر فاز دارد) و چنانچه عقربه از وسط صفحه به سمت چپ یا سمت (cap) حرکت نماید جریان از ولتاژ به اندازهٔ Φ درجه، که عقربه نشان می‌دهد، جلوتر است (تقدم فاز دارد).

کسینوس فی مترها را در مدارهای الکتریکی به صورت شکل ۱۰ــ۳ نمایش می‌دهند.



شکل ۱۰ــ۳ــ علامت فنی کسینوس فی‌متر

شکل ۱۱ــ۳ شمای الکتریکی اتصال یک کسینوس فی متر را به یک مصرف‌کننده و شبکهٔ برق شهر نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ــ۳ــ شمای الکتریکی اتصال یک کسینوس فی‌متر به مصرف کننده و برق شهر

استفاده از آزمایشگاه‌های مجازی موجب عمق بخشیدن به آموزش و صرفه‌جویی در زمان و تجهیزات می‌شود.

۴ــ۳ــ الگوی پرسش

تشریحی

۱ــ توان الکتریکی و واحد آن را تعریف کنید.

۲ــ نحوهٔ اتصال یک وات‌متر به یک شبکهٔ الکتریکی و مصرف‌کننده را رسم کنید و دربارهٔ آن توضیح دهید.

۳ــ نحوهٔ خواندن مقادیر روی صفحهٔ مدرّج وات‌متر چگونه است؟

۴ــ انرژی و واحد آن را تعریف کنید.

۵ــ نحوهٔ اتصال کنتور به شبکهٔ برق و مصرف کننده را رسم کرده و آن را شرح دهید.

۶ــ اختلاف فاز را تعریف کنید.

۷ــ نحوهٔ اتصال یک کسینوس فی‌متر به یک شبکهٔ الکتریکی و مصرف کننده را رسم نموده و راجع به آن توضیح دهید.

محاسباتی

۸ــ در یک وات متر کل صفحه به ۲۵۰ قسمت تقسیم شده است. کلید رنج ولت متر روی ۵۰ ولت و کلید رنج آمپر روی ۵ آمپر قرار دارد. عقربه روی صفحه مدرج ۷۵ قسمت منحرف شده است. توانی که وات متر اندازه می‌گیرد را محاسبه کنید.