سخنی با همکاران

محاسبه‌ی تجهیزات تولید، انتقال، توزیع و پخش انرژی الکتریکی و مدارهای تجهیزات الکترونیکی مستلزم آشنایی با روش‌های تحلیل مدارهای الکتریکی است. برای آشنایی هنرجویان و گسترش توانایی و افزایش مهارت آن‌ها در محاسبه‌های الکتریکی، لازم است مدارهای الکتریکی در جریان متناوب و مستقیم و رفتار عناصر سلفی و خازنی و اهمی و ترکیب این عناصر مورد بررسی قرار گیرد. بدین‌منظور، محاسبه‌ی ساده‌ی مدارهای الکتریکی در حالت‌های ماندگار به‌عنوان مجموعه‌ی تحلیل مدارهای جریان الکتریکی ارایه می‌شود. در این مجموعه، علاوه بر مدارهای جریان مستقیم و جریان متناوب یک‌فاز، مدارهای سه‌فاز و محاسبه‌های آن‌ها نیز بررسی شده است.

برای ارایه‌ی مطلوب سرفصل‌های این درس، هدف‌های رفتاری مورد انتظار از هنرجو در ابتدای هر فصل مطرح شده است. بدیهی است ارزش‌یابی این درس باید با هدف‌های رفتاری آن مطابقت داشته باشد. از آن‌جا که این درس نظری و محاسبه‌ای است، بیش‌تر سؤال‌های ارزش‌یابی باید به محاسبه‌های مربوط به مدار اختصاص یابد. بهتر است که هنرجویان در طول سال تحصیلی به‌طور مرتّب مورد ارزش‌یابی قرار گیرند. مدرس این درس می‌تواند مطالب ارایه شده با به‌کارگیری نرم‌افزارهای مناسب از طریق اندازه‌گیری و مشاهده‌ی پارامترهای تحلیل‌شده‌ی مدار، درک بهتر و ملموس‌تری را برای هنرجویان ایجاد کند. از مدرسان محترم و عزیزانی که این کتاب را مطالعه و تدریس می‌کنند، خواهشمندیم نظرات و پیشنهادهای اصلاحی خود را از طریق دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های فنی و حرفه‌ای و کاردانش وزارت آموزش و پرورش در اختیار ما قرار دهند. در پایان از همکاری‌های گروه‌های آموزشی سراسر کشور که در اصلاح کتاب‌های درسی به خصوص کتاب مدارهای الکتریکی با ما همکاری نموده‌اند سپاسگزاری می‌نماییم، هم‌چنین از همکاری‌ها و پیشنهادهای آقای رضا باغ شیخی که به صورت خودجوش در زمینه‌ی بهبود کتاب ما را یاری داده‌اند تشکر و قدردانی می‌نماییم.

مؤلفان

هدف کلی درس

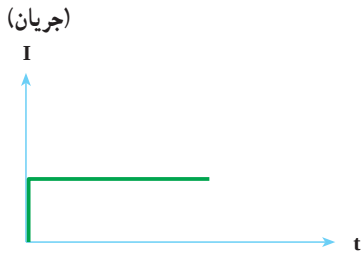
تحلیل مدارهای جریان مستقیم و مدارهای R - L - C در جریان متناوب یک‌فاز و مدارهای سه فاز ساده.

جدول زمانی پیشنهادی برای تدریس کتاب

فصل	عنوان فصل	زمان تدریس (ساعت)
اول	مدارهای الکتریکی جریان مستقیم	۲۸
دوم	بردار	۱۲
سوم	مدارهای R-L جریان متناوب	۱۶
چهارم	مدارهای R-C جریان متناوب	۱۶
پنجم	مدارهای L-C جریان متناوب	۱۲
ششم	مدارهای R-L-C جریان متناوب	۲۰
هفتم	جریان‌های سه فازه	۱۶

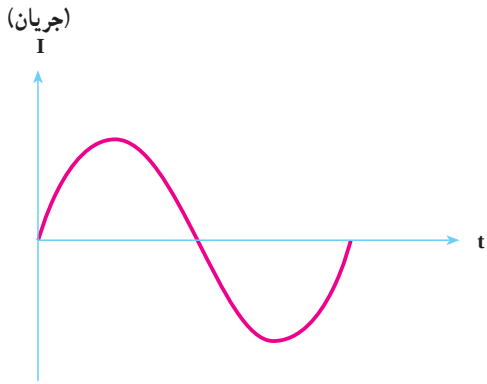
بنا به درخواست هنرآموزان محترم در دوره‌های بازآموزی، گردهمایی‌ها و ارزشیابی این کتاب، مباحث و روابط مورد نیاز برای درس مدارهای الکتریکی از کتاب مبانی برق در قالب یادآوری در ابتدای کتاب گنجانده شده است. همکاران محترم می‌توانند در صورت نیاز از مطالب اشاره شده در این قسمت به‌جهت تشریح مسایل هر بحث درسی که احساس نیاز می‌کنند استفاده نمایند. ضروری است از هنرجویان خواسته شود تا مطالب تئوری این موارد را با تعمق بیشتری از کتاب مبانی برق مطالعه کنند. لازم به ذکر است آموزش مستقیم مباحث یادآوری ضرورت ندارد.

یاد آوری



جریان مستقیم (DC)

جریانی است که جهت و مقدار آن نسبت به زمان تغییر نمی‌کند. باتری را به‌عنوان یک مولد جریان مستقیم می‌توان در نظر گرفت که شکل موج آن به صورت مقابل است.



جریان متناوب (AC)

جریانی است که جهت و دامنه آن نسبت به زمان تغییر می‌کند. از جمله جریان‌های متناوب، می‌توان به برق شهر اشاره کرد که یک جریان متناوب سینوسی است. و شکل موج آن به صورت مقابل است.

تعریف جریان الکتریکی

به حرکت الکترون‌های آزاد در یک هادی که در طی مدت زمانی مشخص از آن عبور می‌نماید جریان الکتریکی گفته می‌شود و می‌توان آن را از رابطه زیر برحسب آمپر محاسبه کرد.

$$I = \frac{q}{t}$$ (جریان الکتریکی برحسب آمپر ــ A) (بار الکتریکی بر حسب کولن ــ C) / (مدت زمان عبوری برحسب ثانیه ــ S)

تعریف ولتاژ

مقدار کار انجام شده بر ذره باردار را ولتاژ می‌گویند و از رابطه $V = \frac{W}{q}$ برحسب ولت به‌دست می‌آید. معمولاً ولتاژ دو سر هر عنصری در مدار از مقایسه اختلاف ولتاژ دو سر آن به‌دست می‌آید به همین دلیل این عامل را اختلاف پتانسیل می‌نامند.

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

تعریف توان الکتریکی

به مقدار کار انجام شده بر واحد زمان توان می‌گویند و مقدار آن را می‌توان از رابطه $P = \frac{W}{t}$ برحسب وات به‌دست آورد. مقدار توان الکتریکی مدارها را در شکل کلی از روابط زیر می‌توان حساب کرد.

$$P = (\text{ولتاژ}) \times (\text{جریان}) = VI$$
$$P = (\text{مقاومت}) \times (\text{جریان})^2 = RI^2$$
$$P = (\text{ولتاژ})^2 / (\text{مقاومت}) = V^2/R$$

تعریف مقاومت الکتریکی

هر قطعه‌ای که در مقابل عبور جریان الکتریکی (حرکت الکترون‌ها) از خود ایستادگی (مخالفت) نشان دهد «مقاومت الکتریکی» نامیده می‌شود. خاصیت مقاومت الکتریکی در مدارها به سه صورت دیده می‌شود.

الف ــ مقاومت اهمی R (رزیستانس)

ب ــ مقاومت سلفی X_L (راکتانس سلفی)

ج ــ مقاومت خازنی X_C (راکتانس خازنی)

تذکر: مقاومت‌های سلفی (X_L) و خازنی (X_C) فقط در زمان استفاده از سلف و خازن در جریان متناوب وجود دارند. بر همین اساس می‌توان راکتانس‌ها، را به صورت زیر تعریف کرد :

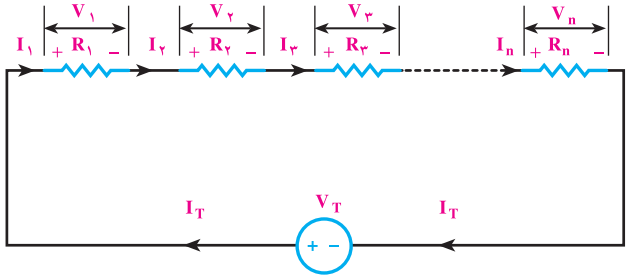
به خاصیت مقاومتی سلف و خازن در جریان متناوب راکتانس سلفی یا خازنی گویند.

بررسی مدارهای اهمی (R)

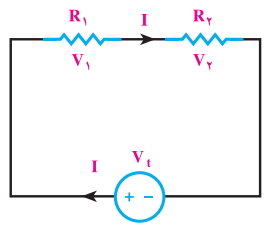
اثر مقاومتی عناصر اهمی (R) در مدارهای جریان مستقیم و متناوب یکسان است این عناصر را به دو صورت سری و موازی اتصال می‌دهند که هر یک دارای ویژگی‌هایی به شرح صفحه‌ی بعد است :

اتصال سری مقاومت‌ها

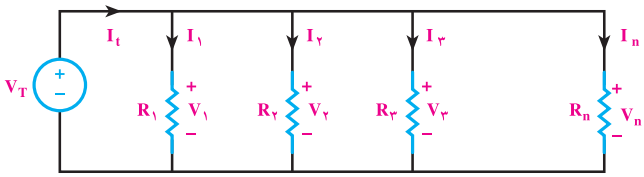
هرگاه دو یا چند مقاومت مطابق شکل مقابل به یکدیگر اتصال داده شوند. اتصال مدار را سری گویند.



ویژگی‌های مدارهای سری مقاومتی

جریان	جریان عبوری از همه مقاومت‌های سری مساوی است. $I_T = I_1 = I_2 = I_3 = I_n$
ولتاژ	در مدارهای سری ولتاژ به نسبت مقدار مقاومت‌ها در دو سر مقاومت‌های مدار تقسیم می‌شود. $V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$ طبق قانون اهم $\begin{cases} V_1 = R_1 . I_1 \\ V_2 = R_2 . I_2 \\ V_3 = R_3 . I_3 \\ V_n = R_n . I_n \end{cases}$
مقاومت معادل	$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$
توان و انرژی	توان هر یک از مقاومت‌ها $\begin{cases} P_1 = V_1 I_1 = R_1 I_1^2 = \frac{V_1^2}{R_1} \\ P_2 = V_2 I_2 = R_2 I_2^2 = \frac{V_2^2}{R_2} \\ P_3 = V_3 I_3 = R_3 I_3^2 = \frac{V_3^2}{R_3} \\ P_n = V_n I_n = R_n I_n^2 = \frac{V_n^2}{R_n} \end{cases}$ $P = \frac{W}{t}$ $P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$ $W_T = W_1 + W_2 + W_3 + \cdots + W_n$
حالت خاص	هرگاه n مقاومت مساوی به صورت سری بسته شوند مقاومت معادل از رابطه زیر محاسبه می‌شود. $R_T = n.R =$ (تعداد مقاومت‌ها) $\times$ (مقدار اهم یک مقاومت) هرگاه دو مقاومت به صورت سری بسته شوند تقسیم ولتاژ در دو مقاومت از روابط زیر به‌دست می‌آید. $V_{R_1} = V_t \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ $V_{R_2} = V_t \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 

اتصال موازی مقاومت‌ها



هرگاه دو یا چند مقاومت مطابق شکل روبه‌رو به یکدیگر اتصال داده شوند اتصال مدار را موازی گویند.

ویژگی‌های مدارهای موازی مقاومتی

جریان

در مدارهای موازی جریان به نسبت عکس مقاومت‌ها و متناسب با مقدار مقاومت‌ها در بین آن‌ها تقسیم می‌شود.

براساس قانون اهم

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$
$$I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$
$$I_3 = \frac{V_3}{R_3}$$
$$I_n = \frac{V_n}{R_n}$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_n$$

ولتاژ

ولتاژ دو سر هر یک از مقاومت‌ها با هم برابر است.

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 = V_n$$

مقاومت معادل

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots\dots, \frac{1}{R_n}}$$

توان و انرژی

توان هر یک از مقاومت‌ها

$$P_1 = V_1 . I_1 = R_1 I_1^2 = \frac{(V_1)^2}{R_1}$$
$$P_2 = V_2 . I_2 = R_2 I_2^2 = \frac{(V_2)^2}{R_2}$$
$$P_3 = V_3 . I_3 = R_3 I_3^2 = \frac{(V_3)^2}{R_3}$$
$$P_n = V_n . I_n = R_n . I_n^2 = \frac{(V_n)^2}{R_n}$$

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

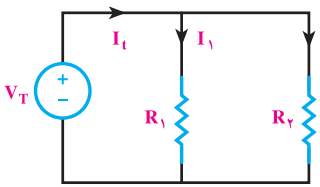
$$W_T = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n$$

حالت خاص

هرگاه n مقاومت مساوی موازی باشند مقاومت معادل از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$R_t = \frac{R}{n} \quad \frac{\text{(مقدار اهم یک مقاومت)}}{\text{(تعداد مقاومت‌ها)}}$$

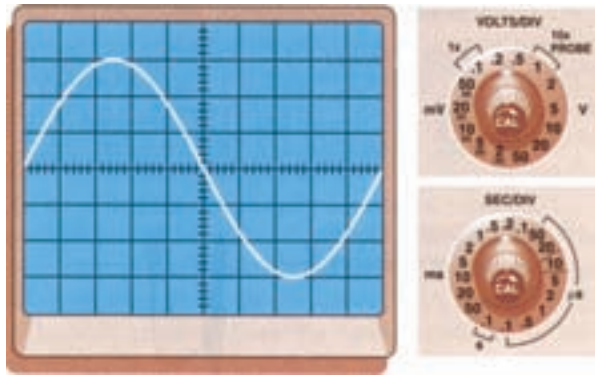
هرگاه دو مقاومت نامساوی به صورت موازی وصل شوند مقاومت معادل و تقسیم جریان در دو مقاومت از روابط مقابل به‌دست می‌آید.



$$\Rightarrow \quad R_t = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$
$$I_1 = I_t \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
$$I_2 = I_t \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

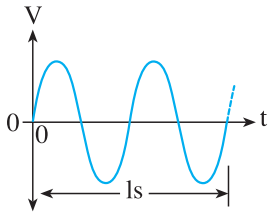
مشخصات جریان متناوب

۱ــ سیکل: شکل موجی که در اثر گردش یک سیم‌پیچ در داخل میدان مغناطیسی به‌وجود می‌آید را یک «سیکل» می‌گویند. هر سیکل از دو نیم سیکل مثبت و منفی تشکیل می‌شود.



تصویر یک سیکل روی صفحه اسیلوسکوپ

۲ــ فرکانس (f): به تعداد سیکل‌ها (نوسانات) در مدت زمان یک ثانیه «فرکانس »می‌گویند. واحد فرکانس $\frac{۱}{(s)}$ یا هرتز (Hz) است. فرکانس برق ایران ۵۰ هرتز است.

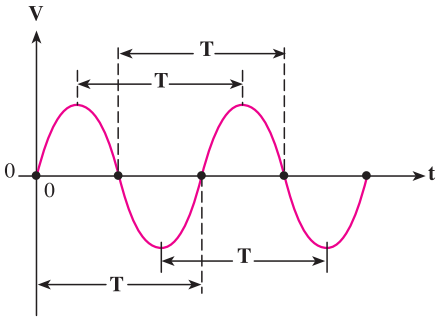


فرکانس ۲ هرتز

۳ــ مدت زمان تناوب (T) : مدت زمانی را که طول می‌کشد تا یک سیکل کامل طی شود «زمان تناوب» یا «پریود» می‌گویند.

واحد زمان تناوب $\left(\frac{۱}{Hz}\right)$ یا ثانیه (s) است.

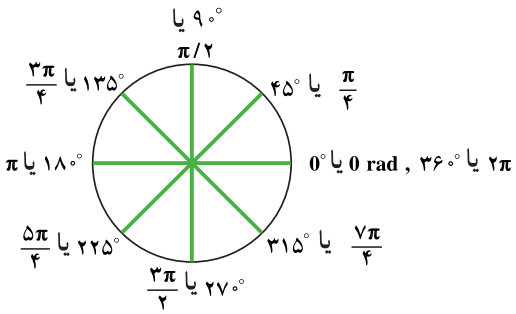
پریود و فرکانس عکس یکدیگرند.

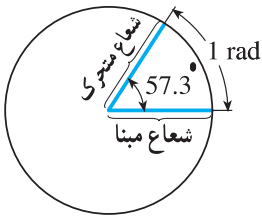


$$T = \frac{۱}{f} \quad \text{یا} \quad f = \frac{۱}{T}$$

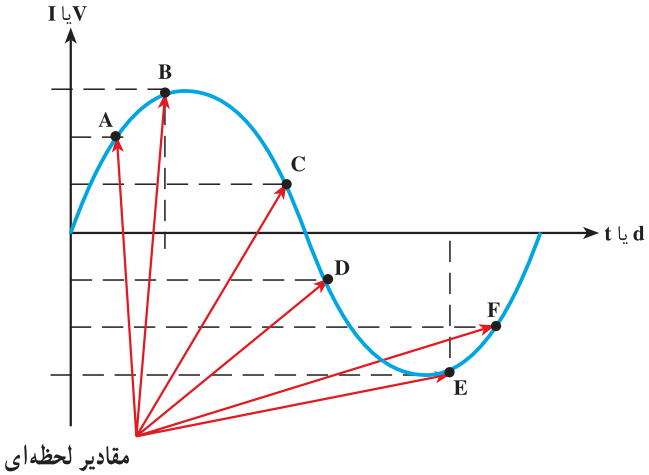
۴ــ سرعت زاویه‌ای (ω امگا[1]): سرعت زاویه‌ای عبارت است از زاویه‌ای که شعاع مربوط به متحرک نسبت به شعاع مبنا در مدت یک ثانیه طی می‌کند. واحد سرعت زاویه‌ای رادیان بر ثانیه است. چون یک دور چرخش داخل دایره برابر 2π رادیان است لذا اگر متحرکی در هر ثانیه f دور بزند خواهیم داشت :

$$\omega = 2\pi f \quad \text{یا} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$



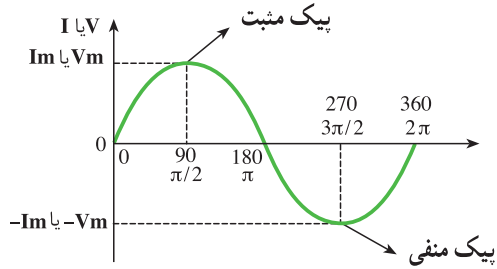


۵ــ دامنه : مقدار موج در هر لحظه از زمان را اصطلاحاً دامنه یا «مقدار لحظه‌ای» می‌گویند. در شکل زیر دامنه لحظه‌ای در نقاط F,E,D,C,B,A نشان داده شده است.



۱ــ ω (امگا) یکی از حروف یونانی است.

۶ــ مقدار پیک یا ماکزیمم (max-peak): حداکثر مقداری که ولتاژ یا جریان سینوسی در هر نیم سیکل دارد را مقدار ماکزیمم می‌گویند. در شکل زیر نقاط پیک مثبت و منفی نشان داده شده است.



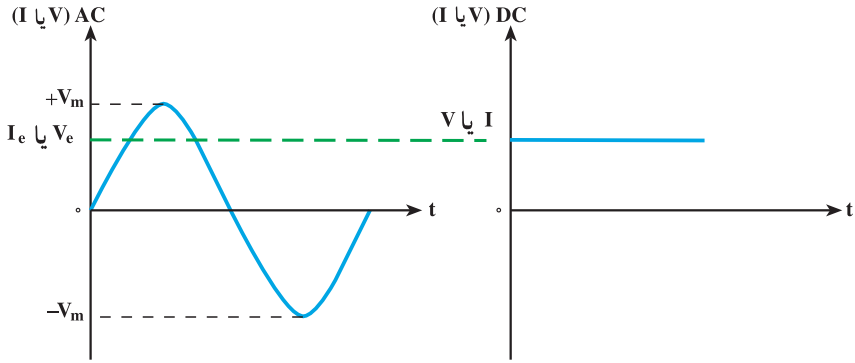
۷ــ مقدار مؤثر[۱]: مقدار مؤثر یک جریان یا ولتاژ AC عبارت است از مقدار جریان یا ولتاژی‌که در یک مداراهمی خالص (مانند اتوی برقی) همان مقدار گرمایی را تولید می‌کند که یک جریان یا ولتاژ DC با همان مقدار دامنه تولید می‌کند.

مقدار مؤثر یک موج سینوسی از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$Ve = \frac{۱}{\sqrt{۲}} \times Vm = ۰/۷۰۷ \times Vm$$

$$Ie = \frac{۱}{\sqrt{۲}} \times Im = ۰/۷۰۷ \times Im$$

به مقدار مؤثر rms[۲] نیز می‌گویند.



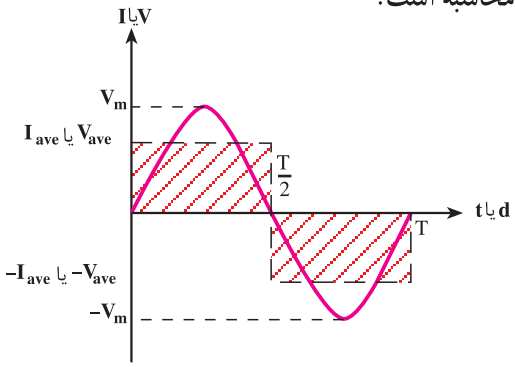
۱ــ Effective Values-(e)

۲ــ Root Mean Square-rms (جذر مربعات مقادیر لحظه‌ای)

۸ــ مقدار متوسط[۱]: به میانگین مقادیر لحظه‌ای موج سینوسی در یک نیم سیکل اصطلاحاً متوسط موج می‌گویند. شکل زیر چون در هر نیم سیکل موج سینوسی از صفر شروع شده به‌مقدار حداکثر (ماکزیمم) می‌رسد و مجدداً به صفر بر می‌گردد لذا مقدار میانگین یک نیم‌سیکل نیز چیزی بین صفر و مقدار ماکزیمم می‌باشد. مقدار متوسط برای نیم سیکل موج سینوسی از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$V_{ave} = \frac{۲}{\pi} \times V_m = ۰/۶۳۷ \times V_m$$

$$I_{ave} = \frac{۲}{\pi} \times I_m = ۰/۶۳۷ \times I_m$$



توجه: مقدار متوسط یک موج متناوب متقارن (موج سینوسی) در یک دوره تناوب برابر صفراست، زیرا :

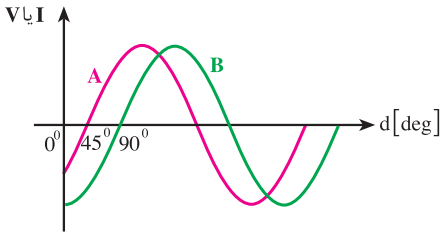
(مقدار متوسط موج) = (نیم سیکل مثبت) + (نیم سیکل منفی)

$$V_{ave_t} = V_{\overset{+}{ave}} + V_{\overset{-}{ave}}$$

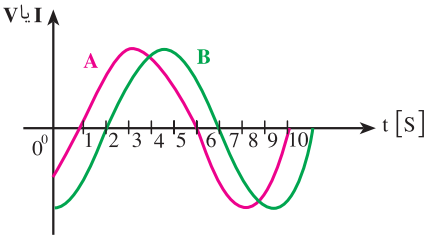
$$V_{ave_t} = (۰/۶۳۷) \times (V_m) + (۰/۶۳۷) \times (-V_m)$$

$$V_{ave_t} = ۰$$

۹ــ فاز[۲]: کلمه یا اصطلاحی است که ارتباط زمانی یا مکانی بین دو یا چند موج هم فرکانس را بیان می‌کند.



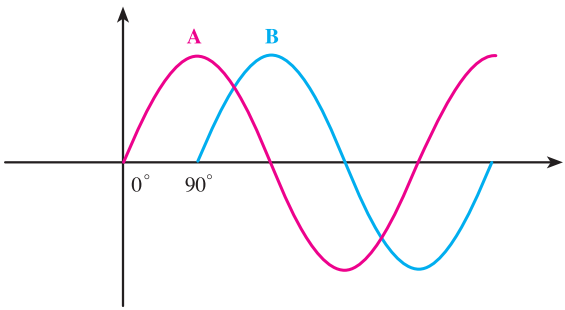
a) موج A با B به اندازه ۴۵ درجه فاصله دارد.



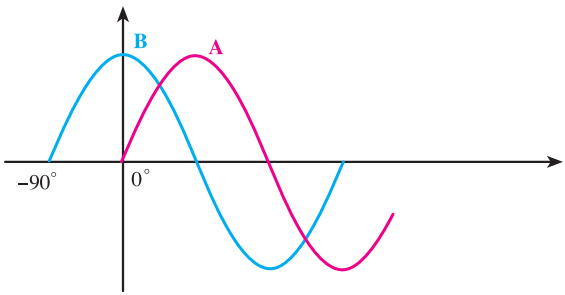
b) موج A با B به اندازه ۱ ثانیه فاصله دارد.

۱ــ Average-(ave) ۲ــ Phase

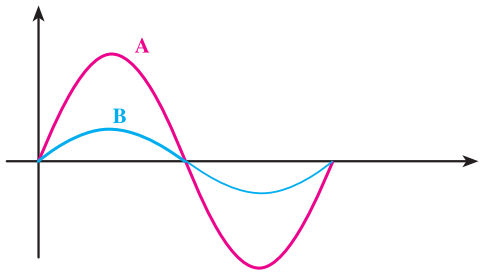
۱۰ــ **اختلاف فاز:** برای تعیین میزان اختلاف فاز بین دو شکل موج هم‌فرکانس ابتدا دو نقطه مشابه (نقطه صفر ــ نقطه ماکزیمم یا نقطه مینیمم) از شکل موج‌ها را بر حسب کمیت محور افقی با یکدیگر مقایسه می‌کنیم وسپس مقدار آن را با ذکر کلمه پسوند «فاز» می‌نویسیم. مثلاً در صورتی که شکل موجی از موج دیگر جلوتر (زودتر) شروع شده باشداصطلاح «پیش فاز»[۱] و در صورتی‌که عقب‌تر (دیرتر) شروع شده باشد کلمه «پس فاز»[۲] و چنانچه دو شکل کاملاً مشابه باشند کلمه «هم‌فاز» را به‌کار می‌بریم (شکل زیر). در برخی موارد میزان اختلاف فاز برحسب درجه یا ضریبی از عدد π نشان داده می‌شود.



الف: شکل موج A نسبت به B به اندازه ۹۰° درجه ($\frac{\pi}{۲}$ رادیان) پیش فاز است. به عبارت دیگر موج B نسبت به A به اندازه ۹۰ درجه پس فاز است.



ب: شکل موج A نسبت به B به اندازه ۹۰° درجه ($\frac{\pi}{۲}$) رادیان پس فاز است. به عبارت دیگر موج B نسبت به A به اندازه ۹۰° درجه پیش فاز است.



ج: شکل موج B و A با هم هم‌فاز هستند.

۱ــ Leads ۲ــ Lags

بررسی مدارهای سلفی (L)

به خاصیت خودالقایی که در اثر عبور جریان در یک سیم‌پیچ پدید می‌آید ضریب خودالقایی یا اندوکتانس (L) می‌گویند. هرگاه یک سلف ایده‌آل (بدون خاصیت اهمی) مطابق شکل مقابل اتصال یابد :

جریان در سلف ۹۰ درجه از ولتاژ عقب‌تر است.

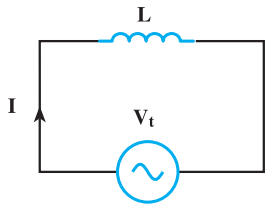
ـ سلف‌ها در جریان متناوب راکتانس القایی نشان می‌دهند که به ضریب خودالقایی (L) و فرکانس جریان (f) بستگی دارد و با X_L نشان می‌دهند.

ـ یک سلف حقیقی در جریان dc مقاومت اهمی و در جریان متناوب علاوه بر مقاومت اهمی مقاومت القایی نیز نشان می‌دهد.

ـ جریان سلف‌های حقیقی در مدارهای dc پس از ۵ ثابت زمانی به حالت پایدار درمی‌آید.

ـ در هر ثابت زمانی سلفی جریان سلف به اندازه ۶۳/۲٪ مقدار ماکزیمم خود افزایش یا کاهش می‌یابد، مدت زمان هر ثابت زمانی سلفی از رابطه $\tau = \frac{L}{R}$ محاسبه می‌شود.

ـ عبور جریان از داخل سلف سبب می‌شود در سلف به اندازه $W_L = \frac{1}{2}LI^2$ ژول انرژی به‌صورت میدان مغناطیسی ذخیره شود.

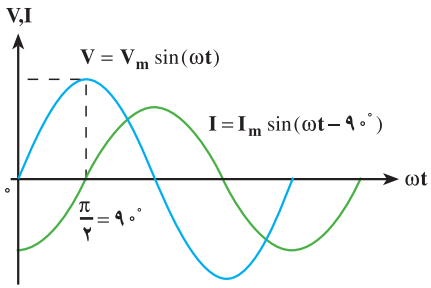


$V_t = V_m \sin(\omega t)$

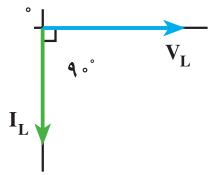
$I_t = V_m \sin(\omega t - 90^\circ)$

$X_L = L\omega = 2\pi fL = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_e}{I_e}$

الف: معادلات ولتاژ و جریان و راکتانس سلفی



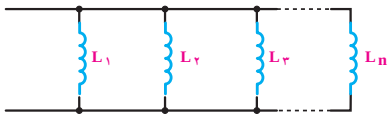
ب: شکل موج‌های ولتاژ و جریان سلف



ج: دیاگرام برداری V و I در یک سلف ایده‌آل

ویژگی‌های مدارهای سلفی

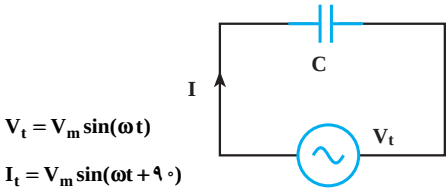
تمامی خصوصیات ولتاژی و جریانی مدارهای سلفی سری و موازی در جریان متناوب مشابه مدارهای سری و موازی مقاومتی است فقط دو عامل ضریب خودالقایی و راکتانس وجود دارند که در محاسبه آن‌ها به نکات زیر باید توجه کرد.

	سری	موازی
		
اندوکتانس معادل L_T	$L_T = L_۱ + L_۲ + L_۳ + \cdots + L_n$	$L_T = \frac{۱}{\frac{۱}{L_۱} + \frac{۱}{L_۲} + \frac{۱}{L_۳} + \cdots + \frac{۱}{L_n}}$
راکتانس معادل X_{L_T}	$X_{L_T} = X_{L_۱} + X_{L_۲} + X_{L_۳} + \cdots + X_{L_n}$ $X_{L_T} = L_T.\omega$	$X_{L_T} = \frac{۱}{\frac{۱}{X_{L_۱}} + \frac{۱}{X_{L_۲}} + \frac{۱}{X_{L_۳}} + \cdots + \frac{۱}{X_{L_n}}}$ $X_{L_T} = L_T.\omega$

بررسی مدارهای خازنی (C)

ـ نسبت بار ذخیره شده به اختلاف ولتاژ دو صفحه خازن را ظرفیت خازن یا کاپاسیتانس (C) گویند.

هر گاه یک خازن ایده‌آل (بدون خاصیت اهمی) مطابق شکل مقابل اتصال یابد :

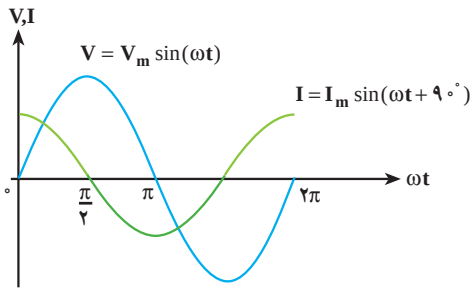


$V_t = V_m \sin(\omega t)$

$I_t = V_m \sin(\omega t + ۹۰)$

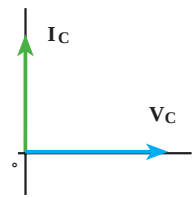
$X_C = \frac{I}{C\omega} = \frac{۱}{۲\pi fC} = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_e}{I_e}$

الف: معادلات ولتاژ و جریان وراکتانس خازنی



ب: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خازن

جریان در خازن ۹۰ درجه از ولتاژ جلوتر است.



ج: دیاگرام برداری V و I در یک خازن ایده‌آل

ـ خازن‌ها در جریان متناوب راکتانس خازنی نشان می‌دهند که به ظرفیت خازن (C) و فرکانس جریان (f) بستگی دارد و با X_C نشان می‌دهند.

ـ یک خازن حقیقی در جریان dc مقاومت اهمی و در جریان متناوب علاوه بر مقاومت اهمی مقاومت خازنی نیز نشان می‌دهد.

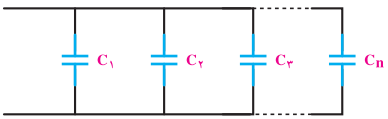
ـ ولتاژ خازن‌های حقیقی در مدارهای dc پس از ۵ ثابت زمانی به حالت پایدار درمی‌آید.

ـ در هر ثابت زمانی خازنی ولتاژ خازن به اندازه ۶۳/۲٪ مقدار ماکزیمم خود افزایش یا کاهش می‌یابد، مدت زمان هر ثابت زمانی خازنی از رابطه $\tau = R.C$ محاسبه می‌شود.

ـ اعمال ولتاژ به یک خازن سبب می‌شود در خازن به اندازه $W_C = \frac{۱}{۲}CV^۲$ ژول انرژی به صورت میدان الکترواستاتیکی ذخیره شود.

ویژگی‌های مدارهای خازنی

تمامی خصوصیات ولتاژی و جریانی مدارهای خازنی سری و موازی در جریان متناوب مشابه مدارهای سری و موازی مقاومتی است. فقط از نظر محاسبه دو عامل ظرفیت خازنی و راکتانس با یکدیگر تفاوت دارند که در محاسبه آن‌ها به نکات زیر باید توجه کرد :

	سری	موازی
		
ظرفیت معادل C_T	$C_T = \frac{۱}{\frac{۱}{C_۱}+\frac{۱}{C_۲}+\frac{۱}{C_۳}+\cdots+\frac{۱}{C_n}}$	$C_T = C_۱ + C_۲ + C_۳ + \cdots + C_n$
راکتانس معادل X_{C_T}	$X_{C_T} = X_{C_۱} + X_{C_۲} + X_{C_۳} + \cdots + X_{C_n}$ $X_{C_T} = \frac{۱}{C_T\omega}$	$X_{C_T} = \frac{۱}{\frac{۱}{X_{C_۱}}+\frac{۱}{X_{C_۲}}+\frac{۱}{X_{C_۳}}+\cdots+\frac{۱}{X_{C_n}}}$ $X_{C_T} = \frac{۱}{C_T\omega}$