

محاسبه‌ی تجهیزات تولید، انتقال، توزیع و بخش 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. بدین منظور، 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 مرتب 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 تألیف کتاب‌های درسی 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 سپاسگزار می‌نمایم.

مؤلفان

هدف کلی درس

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

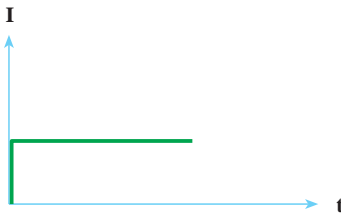
جدول زمانی پیشنهادی برای تدریس کتاب

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 فاز	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 به جهت 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.

یادآوری

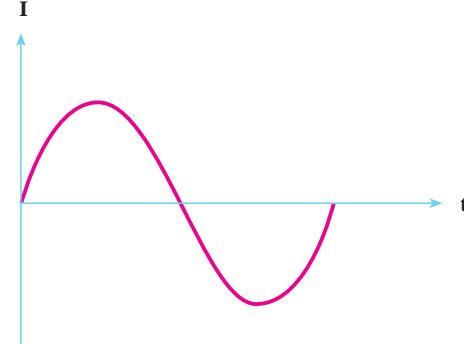
(جریان)



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)



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.

$$I = \frac{q}{t} \quad \begin{matrix} \text{(بار الکتریکی بر حسب کولن - C)} \\ \text{(مدت زمان عبوری بر حسب ثانیه - S)} \end{matrix}$$

(جریان الکتریکی برحسب آمپر - A)

تعریف ولتاژ

مقدار کار انجام شده بر ذره باردار را ولتاژ می‌گویند و از رابطه $V = \frac{W}{q}$ برحسب ولت به دست می‌آید. معمولاً ولتاژ دو سر هر عنصری در مدار از مقایسه اختلاف ولتاژ دو سر آن به دست 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 به دست آورد. مقدار توان الکتریکی مدارها را در شکل کلی از روابط زیر می‌توان حساب کرد.

$$P = (\text{جریان}) \times (\text{ولتاژ}) = VI$$

$$P = (\text{جریان})^2 \times (\text{مقاومت}) = RI^2$$

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

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 - مقاومت اهمی R (رزستانس)

ب - مقاومت سلفی X_L (راکتانس سلفی)

ج - مقاومت خازنی X_C (راکتانس خازنی)

تذکر: مقاومت‌های سلفی (X_L) و خازنی (X_C) فقط در زمان استفاده از سلف و خازن در

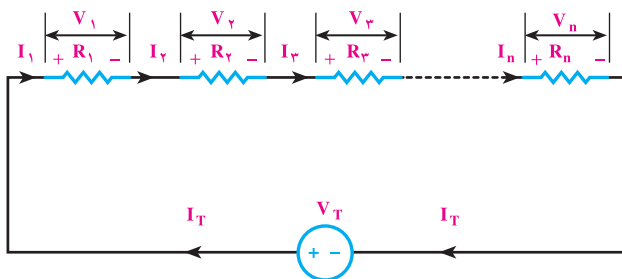
جریان متناوب وجود دارند. بر همین اساس می‌توان راکتانس‌ها، را به صورت زیر تعریف کرد:

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

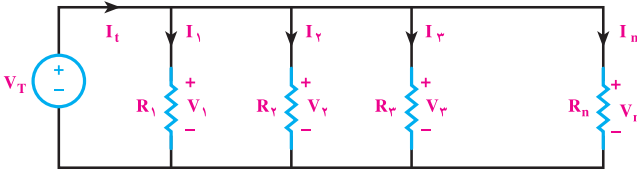
$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = I_n$	جریان عبوری از همه مقاومت‌های سری مساوی است.	جریان
طبق قانون اهم	$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$ در مدارهای سری ولتاژ به نسبت مقدار مقاومت‌ها در دو سر مقاومت‌های مدار تقسیم می‌شود.	ولتاژ
$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$		مقاومت معادل
توان هر یک از مقاومت‌ها	$P_1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

اتصال موازی مقاومت‌ها

هرگاه دو یا چند مقاومت مطابق

شکل روبه‌رو به یکدیگر اتصال داده

شوند اتصال مدار را موازی گویند.

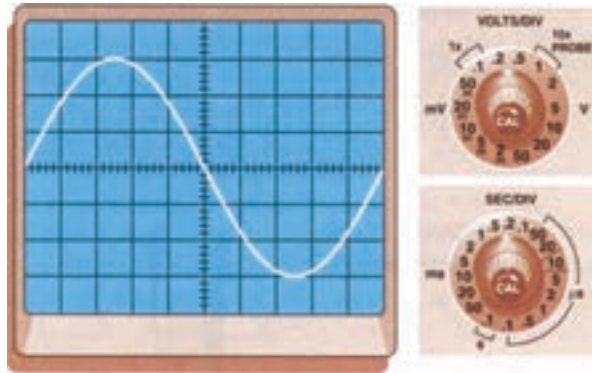


ویژگی‌های مدارهای موازی مقاومتی

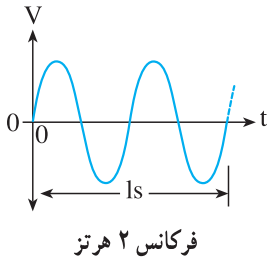
<p>بر اساس قانون اوم</p> $\begin{cases} I_1 = \frac{V_1}{R_1} \\ I_2 = \frac{V_2}{R_2} \\ I_3 = \frac{V_3}{R_3} \\ I_n = \frac{V_n}{R_n} \end{cases}$	<p>در مدارهای موازی جریان به نسبت عکس مقاومت‌ها و متناسب با مقدار مقاومت‌ها در بین آن‌ها تقسیم می‌شود.</p> $I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$	<p>جریان</p>
<p>ولتاژ دو سر هر یک از مقاومت‌ها با هم برابر است.</p> $V_T = V_1 = V_2 = V_3 = V_n$		<p>ولتاژ</p>
$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$		<p>مقاومت معادل</p>
<p>توان هر یک از مقاومت‌ها</p> $\begin{cases} P_1 = V_1 \cdot I_1 = R_1 I_1^2 = \frac{(V_1)^2}{R_1} \\ P_2 = V_2 \cdot I_2 = R_2 I_2^2 = \frac{(V_2)^2}{R_2} \\ P_3 = V_3 \cdot I_3 = R_3 I_3^2 = \frac{(V_3)^2}{R_3} \\ P_n = V_n \cdot I_n = R_n I_n^2 = \frac{(V_n)^2}{R_n} \end{cases}$	<p>$P = \frac{W}{t}$</p> $P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$ $W_T = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n$	<p>توان و انرژی</p>
<p>هرگاه n مقاومت مساوی موازی باشند مقاومت معادل از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.</p>		
<p>(مقدار اهم یک مقاومت) / (تعداد مقاومت‌ها)</p> $R_t = \frac{R}{n}$		
	<p>هرگاه دو مقاومت نامساوی به صورت موازی وصل شوند مقاومت معادل و تقسیم جریان در دو مقاومت از روابط مقابل به‌دست می‌آید.</p> $R_t = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$ $I_1 = I_t \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $I_2 = I_t \frac{R_1}{R_1 + R_2}$	<p>حالت خاص</p>

مشخصات جریان متناوب

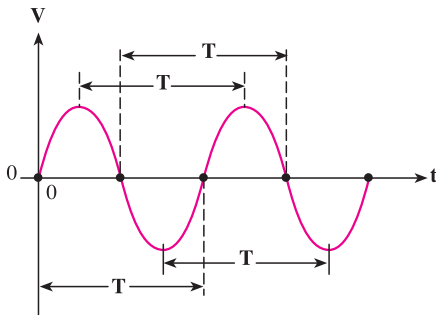
۱- سیکل: شکل موجی که در اثر گردش یک سیم پیچ در داخل میدان مغناطیسی به وجود می‌آید را یک «سیکل» می‌گویند. هر سیکل از دو نیم سیکل مثبت و منفی تشکیل می‌شود.



تصویر یک سیکل روی صفحه اسیلوسکوپ



۲- فرکانس (f): به تعداد سیکل‌ها (نوسانات) در مدت زمان یک ثانیه «فرکانس» می‌گویند. واحد فرکانس $\frac{1}{s}$ یا هرتز (Hz) است. فرکانس برق ایران 50 هرتز است.

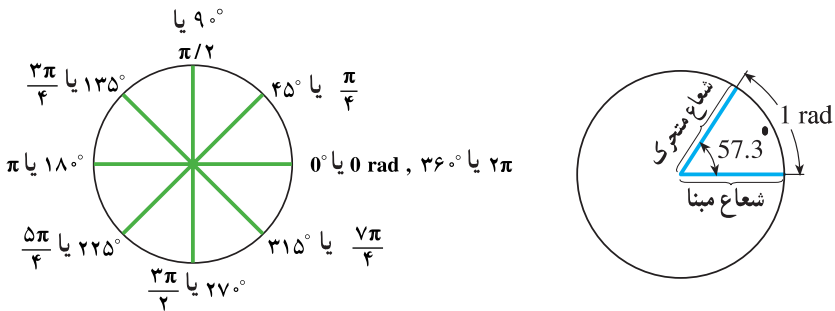


۳- مدت زمان تناوب (T): مدت زمانی را که طول می‌کشد تا یک سیکل کامل طی شود «زمان تناوب» یا «پریود» می‌گویند. واحد زمان تناوب $\left(\frac{1}{\text{Hz}}\right)$ یا ثانیه (s) است. پریود و فرکانس عکس یکدیگرند.

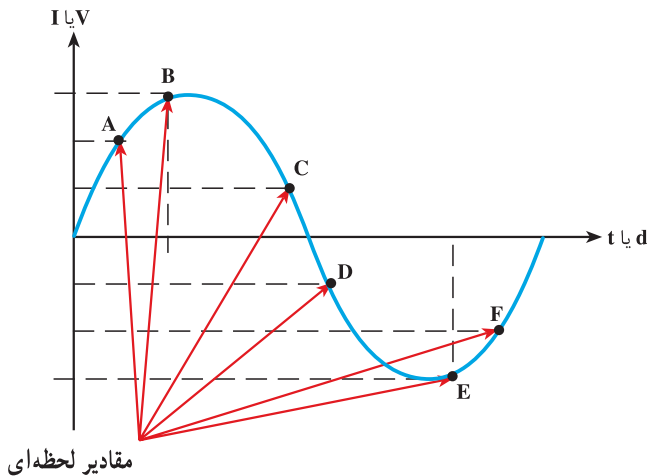
$$T = \frac{1}{f} \quad \text{یا} \quad f = \frac{1}{T}$$

۴- سرعت زاویه‌ای (ω امگا): 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:

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

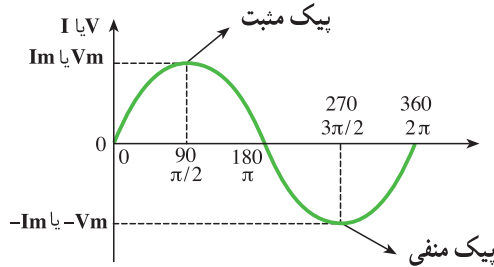


۵- دامنه: مقدار موج در هر لحظه از زمان را اصطلاحاً دامنه یا «مقدار لحظه‌ای» می‌گویند. در شکل زیر دامنه لحظه‌ای در نقاط A, B, C, D, E, F نشان داده شده است.



۱- ω (امگا) یکی از حروف یونانی است.

۶- 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.

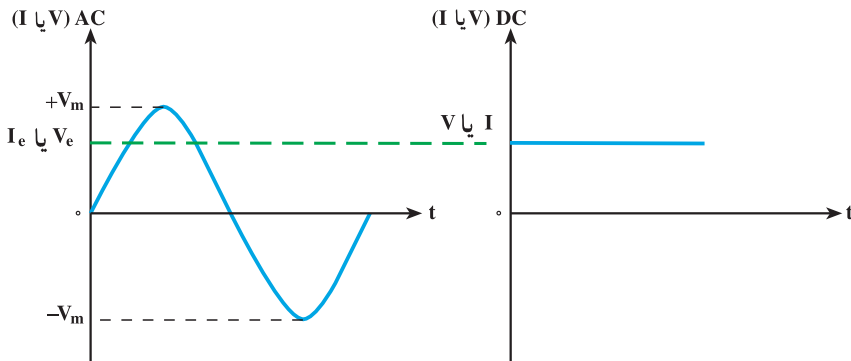


۷- مقدار مؤثر^۱: مقدار مؤثر یک جریان یا ولتاژ AC عبارت است از مقدار جریان یا ولتاژی که در یک مدار اهمی خالص (مانند اتوی برقی) همان مقدار گرمایی را تولید می‌کند که یک جریان یا ولتاژ DC با همان مقدار دامنه تولید می‌کند. مقدار مؤثر یک موج سینوسی از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$V_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_m = 0.707 \times V_m$$

$$I_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_m = 0.707 \times I_m$$

به مقدار مؤثر^۲ rms نیز می‌گویند.



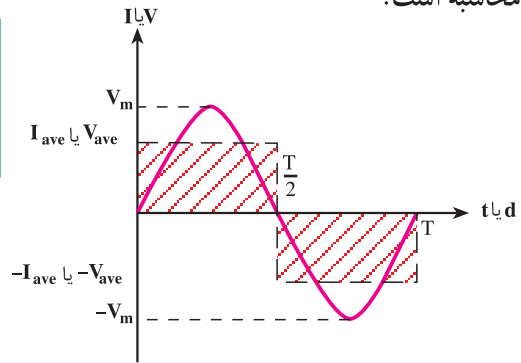
۱- Effective Values-(e)

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

۸- 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 به مقدار 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.

$$V_{ave} = \frac{2}{\pi} \times V_m = 0.637 \times V_m$$

$$I_{ave} = \frac{2}{\pi} \times I_m = 0.637 \times I_m$$



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

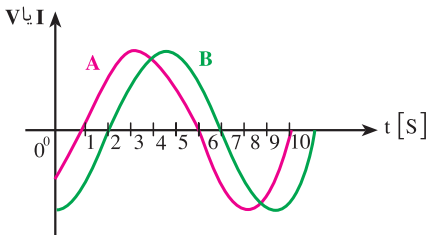
(نیم سیکل منفی) + (نیم سیکل مثبت) = (مقدار متوسط موج)

$$V_{ave_t} = V_{ave^+} + V_{ave^-}$$

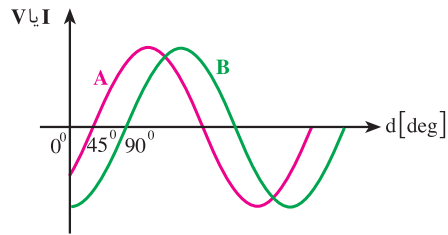
$$V_{ave_t} = (0.637) \times (V_m) + (0.637) \times (-V_m)$$

$$V_{ave_t} = 0$$

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



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

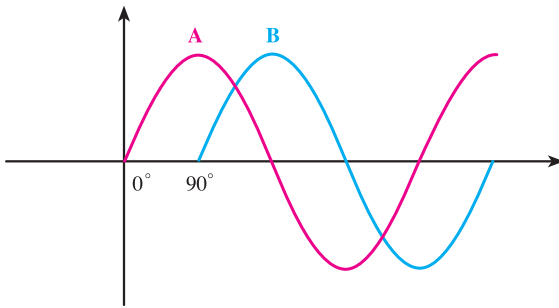


(a) موج A با B به اندازه ۴۵ درجه فاصله دارد.

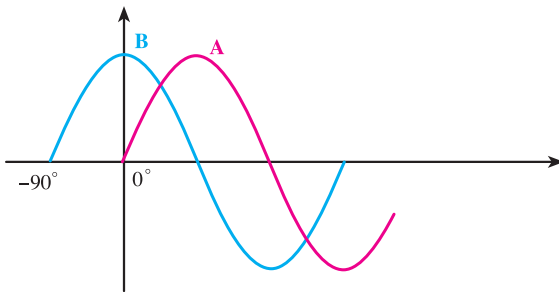
۱- Average-(ave)

۲- Phase

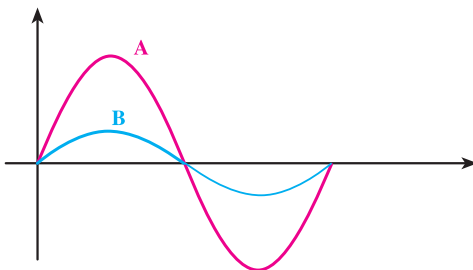
۱- اختلاف فاز: برای تعیین میزان اختلاف فاز بین دو شکل موج هم فرکانس ابتدا دو نقطه مشابه (نقطه صفر - نقطه ماکزیمیم یا نقطه مینیمم) از شکل موج‌ها را بر حسب کمیت محور افقی با یکدیگر مقایسه می‌کنیم و سپس مقدار آن را با ذکر کلمه پسوند «فاز» می‌نویسیم. مثلاً در صورتی که شکل موجی از موج دیگر جلوتر (زودتر) شروع شده باشد اصطلاح «پیش فاز»^۱ و در صورتی که عقب‌تر (دیرتر) شروع شده باشد کلمه «پس فاز»^۲ و چنانچه دو شکل کاملاً مشابه باشند کلمه «هم فاز» را به کار می‌بریم (شکل زیر). در برخی موارد میزان اختلاف فاز بر حسب درجه یا ضربی از عدد π نشان داده می‌شود.



الف: شکل موج A نسبت به B به اندازه 90° درجه ($\frac{\pi}{4}$ رادیان) پیش فاز است. به عبارت دیگر موج B نسبت به A به اندازه 90° درجه پس فاز است.



ب: شکل موج A نسبت به B به اندازه 90° درجه ($\frac{\pi}{4}$ رادیان) پس فاز است. به عبارت دیگر موج B نسبت به A به اندازه 90° درجه پیش فاز است.



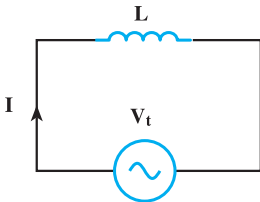
ج: شکل موج B و A با هم هم فاز هستند.

۱- Leads

۲- Lags

بررسی مدارهای سلفی (L)

به خاصیت خودالقایی که در اثر عبور جریان در یک سیم پیچ پدید می آید ضریب خودالقایی یا اندوکتانس (L) می گویند. هرگاه یک سلف ایده آل (بدون خاصیت اهمی) مطابق شکل مقابل اتصال یابد:

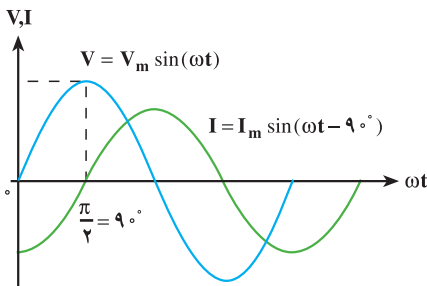


$$V_t = V_m \sin(\omega t)$$

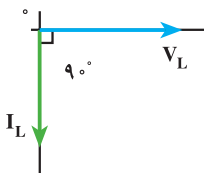
$$I_t = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

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

الف: معادلات ولتاژ و جریان و راکتانس سلفی



ب: شکل موج های ولتاژ و جریان سلف



ج: دیاگرام برداری V و I در یک سلف ایده آل

جریان در سلف ۹۰ درجه از ولتاژ عقب تر است.

– سلف ها در جریان متناوب راکتانس القایی نشان می دهند که به ضریب خودالقایی (L) و فرکانس جریان (f) بستگی دارد و با X_L نشان می دهند.

– یک سلف حقیقی در جریان dc مقاومت اهمی و در جریان متناوب علاوه بر مقاومت اهمی مقاومت القایی نیز نشان می دهد.

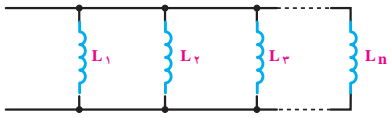

– جریان سلف های حقیقی در مدارهای dc پس از ۵ ثابت زمانی به حالت پایدار در می آید.

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

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

ویژگی‌های مدارهای سلفی

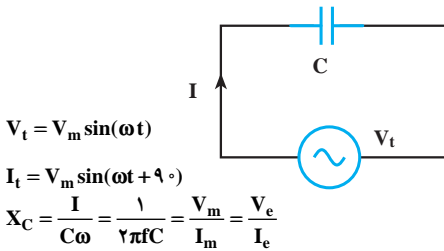
تمامی خصوصیات ولتاژی و جریانی مدارهای سلفی سری و موازی در جریان متناوب مشابه مدارهای سری و موازی مقاومتی است فقط دو عامل ضریب خودالقایی و راکتانس وجود دارند که در محاسبه آنها به نکات زیر باید توجه کرد.

موازی	سری	
		
$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}}$	$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$	اندوکتانس معادل L_T
$X_{L_T} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} + \dots + \frac{1}{X_{L_n}}}$ $X_{L_T} = L_T \cdot \omega$	$X_{L_T} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} + \dots + X_{L_n}$ $X_{L_T} = L_T \cdot \omega$	راکتانس معادل X_{L_T}

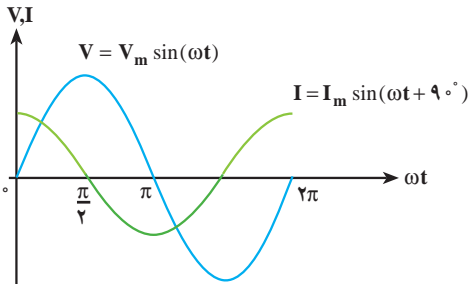
بررسی مدارهای خازنی (C)

– 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:

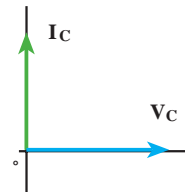


الف: معادلات ولتاژ و جریان و راکتانس خازنی



ب: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خازن

جریان در خازن 90° درجه از ولتاژ جلوتر است.



ج: دیگرام برداری V و I در یک خازن ایده‌آل

– 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.

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

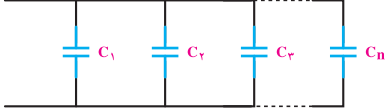
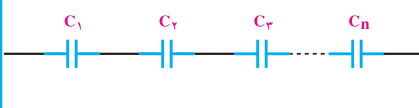
– ولتاژ خازن‌های حقیقی در مدارهای dc پس از ۵ ثابت زمانی به حالت پایدار درمی‌آید.

– 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.

– اعمال ولتاژ به یک خازن سبب می‌شود در خازن به اندازه $W_C = \frac{1}{2}CV^2$ 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:

موازی	سری	
		
$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$	$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}}$	ظرفیت معادل C_T
$X_{C_T} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}} + \dots + \frac{1}{X_{C_n}}}$ $X_{C_T} = \frac{1}{C_T \omega}$	$X_{C_T} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} + \dots + X_{C_n}$ $X_{C_T} = \frac{1}{C_T \omega}$	راکتانس معادل X_{C_T}