

## بوبین (سلف)

### هدف‌های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود:
- ۱- بوبین را تعریف کند و انواع آن را نام ببرد.
  - ۲- میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب را شرح دهد.
  - ۳- خودالقا را تعریف کند.
  - ۴- مقدار و جهت نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا را توضیح دهد.
  - ۵- قانون لنز را تعریف کند.
  - ۶- ضریب خودالقا و عوامل مؤثر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.
  - ۷- رابطه‌ی اندوکتانس و نیروی ضد محرکه را توضیح دهد و نیروی ضد محرکه را محاسبه کند.
  - ۸- واحد خودالقا را تعریف کند.
  - ۹- بوبین ایده‌ال و واقعی را شرح دهد.
  - ۱۰- مقاومت خودالقا و عوامل مؤثر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.
  - ۱۱- ثابت زمانی را تعریف و محاسبه کند.
  - ۱۲- منحنی‌های ولتاژ داده شده، جریان و نیروی ضد محرکه را تجزیه و تحلیل کند.
  - ۱۳- تأثیر هسته‌ی مغناطیسی را در اندوکتانس بیان کند.
  - ۱۴- اتصال سری و موازی بوبین‌ها را توضیح دهد و مقادیر معادل را محاسبه کند.
  - ۱۵- القای متقابل و ضریب کوپلاژ را توضیح دهد.
  - ۱۶- انرژی ذخیره شده در سلف و عوامل مؤثر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

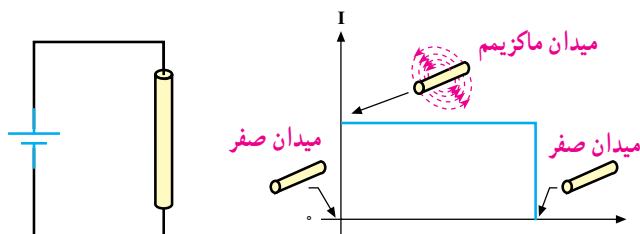
### ۱۴-۱- تعریف بوبین

بوبین‌هایی را که هسته‌ی فلزی دارند و اغلب دارای تعداد

دور استاندارد هستند، در اصطلاح چوک (choke) می‌گویند. چوک‌ها معمولاً حفاظ خارجی دارند؛ مانند: چوک مهتابی، چوک بلندگو و ... از چوک مهتابی در مصارف برقی و از چوک بلندگو در مصارف الکترونیکی استفاده می‌شود.

اگر مقداری سیم به دور محور یا هسته‌ای پیچانده شود، بوبین یا سیم‌پیچ به وجود می‌آید. از هسته علاوه بر اثرات القایی - به جای تکیه‌گاه - جهت پیچاندن و نگهداری سیم استفاده می‌شود. در شکل ۱-۱۴ تعدادی بوبین با هسته‌ی هوایی و فلزی را مشاهده می‌کنید.

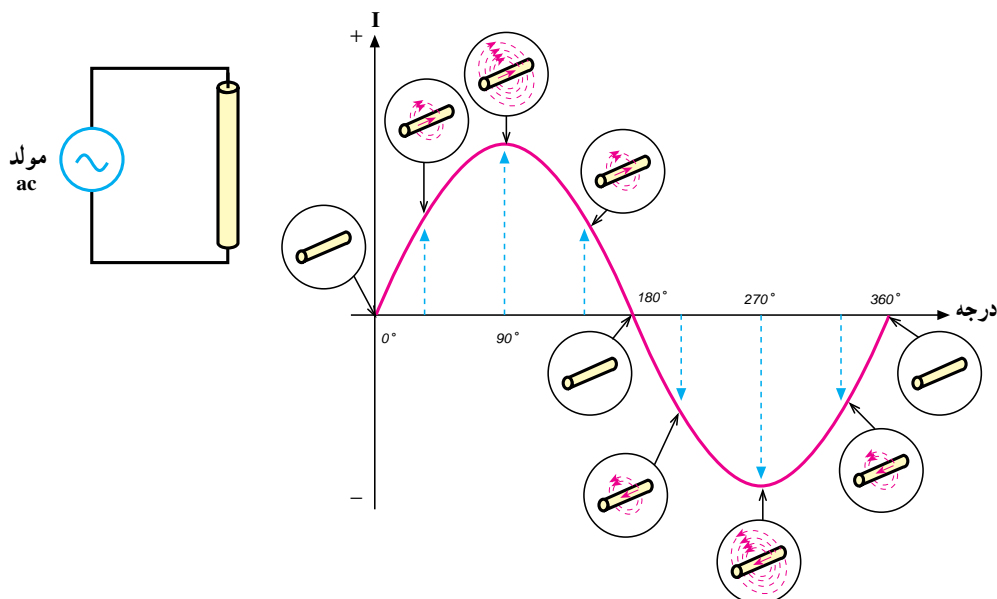
ماکزیم مقدار خود می‌رسد و میدان مغناطیسی در اطراف هادی نیز به ناگاه از صفر به مقدار ماکزیم خود افزایش می‌یابد. تا موقعی که جریان در هادی جاری است، میدان در ماکزیم مقدار خود باقی می‌ماند. چنانچه مدار باز شود جریان، صفر شده و میدان نیز به صفر کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴-۲- میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله‌ی جریان مستقیم

اگر دو سر یک هادی را مطابق شکل ۱۴-۳ به یک جریان متناوب وصل کنیم، مقدار جریان و در نتیجه، شدت میدان مغناطیسی در اطراف هادی پیوسته تغییر می‌کنند. با اضافه شدن تدریجی جریان، میدان حاصل نیز قوی‌تر می‌شود و برعکس، با کم شدن جریان میدان نیز کم‌تر خواهد شد.

از آنجا که جریان متناوب در هر نیم سیکل تغییر جهت می‌دهد، جهت میدان نیز معکوس می‌شود؛ بنابراین، جهت میدان مغناطیسی در هر لحظه به وسیله‌ی جهت جریان مشخص می‌شود.



شکل ۱۴-۳- میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب



شکل ۱۴-۱- انواع بوبین‌ها با هسته‌های مختلف

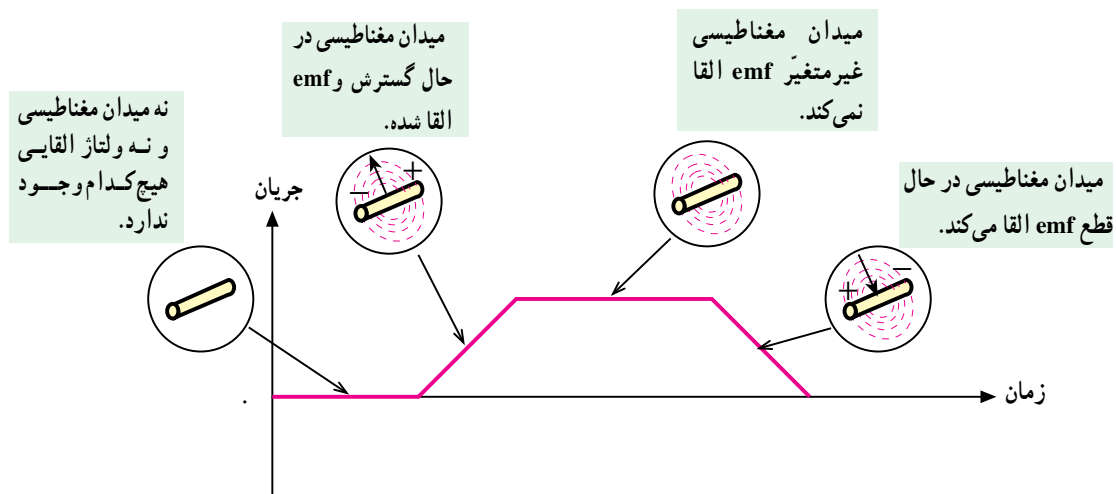
## ۱۴-۲- میدان مغناطیسی حاصل از یک جریان مستقیم و متناوب

اگر دوسر یک هادی را مطابق شکل ۱۴-۲ به جریان مستقیم وصل کنیم، شدت جریان به طور ناگهانی از صفر به

### ۱۴-۳- خودالقایی<sup>۱</sup>

با کم شدن میدان و قطع خطوط قوا به وسیله‌ی هادی، باز هم یک نیروی محرکه‌ی الکتریکی در هادی القا می‌شود. بنابراین، افزایش یا کاهش جریان در هادی سبب گسترش یا فروکش کردن میدان مغناطیسی در اطراف آن می‌شود و نیروی محرکه‌ای متناسب با تغییرات میدان در هادی القا می‌گردد. این خاصیت را **خودالقایی** می‌گویند. توجه داشته باشید که اگر جریان عبوری از هادی ثابت باشد، میدان مغناطیسی ایجاد شده نیز ثابت خواهد بود و لذا نیروی محرکه‌ای در هادی القا نمی‌شود. شکل ۴-۱۴ القای نیروی محرکه را در زمان تغییر جریان نشان می‌دهد.

با طی نیم پرپود از جریان متناوب عبوری از یک هادی، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و سپس به تدریج از بین می‌رود. در نیم سیکل بعدی نیز میدان در جهت مخالف ایجاد می‌شود و به تدریج از بین می‌رود. زمانی که میدان مغناطیسی در حال ایجاد شدن است، خطوط قوای مغناطیسی از مرکز هادی به طرف خارج گسترش می‌یابند. میدان در حال گسترش به وسیله‌ی هادی قطع می‌شود و یک نیروی محرکه‌ی الکتریکی (emf)<sup>۲</sup> در هادی تولید می‌گردد.



شکل ۴-۱۴- نمایش تولید emf

مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده؛ با فرکانس جریان متناسب است. با افزایش فرکانس، نیروی محرکه‌ی القا شده افزایش و با کاهش فرکانس نیروی محرکه القا شده، کاهش می‌یابد. مقدار جریان نیز از عوامل دیگری است که مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده را معین می‌کند؛ یعنی، هر چه شدت جریان عبوری از هادی بیش‌تر باشد، میدان ایجاد شده قوی‌تر و هرچه جریان کم‌تر باشد، میدان ایجاد شده ضعیف‌تر می‌شود. پس به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده (خودالقا) به دامنه و فرکانس جریان عبوری از هادی بستگی دارد. شکل ۴-۱۵ عوامل ذکر شده را به خوبی نشان می‌دهد.

### ۱۴-۴- مقدار نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا

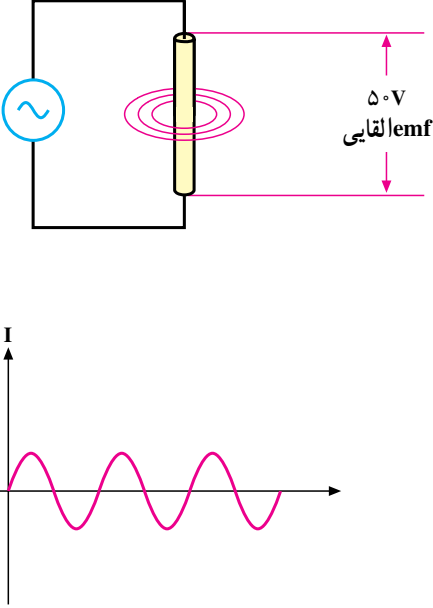
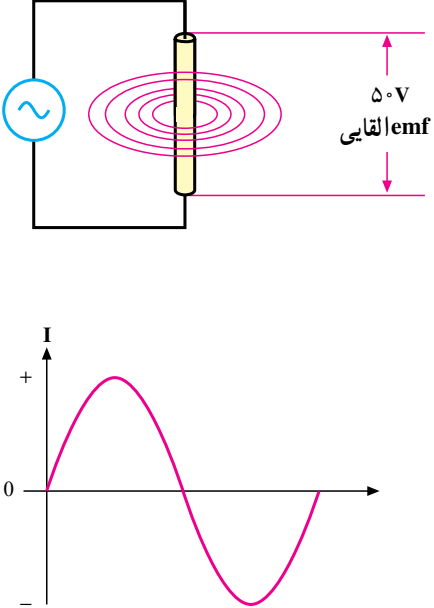
نیروی محرکه‌ی الکتریکی القا شده در یک هادی به وسیله‌ی تغییر در شدت جریان عبوری از آن، همانند هر نیروی محرکه‌ای دارای مقدار و جهت است. از جمله عواملی که مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده را معین می‌کند، میزان تغییرات شدت میدان مغناطیسی است. به طوری که می‌توان نوشت:

$$\frac{d}{dt} \text{ مقدار emf در این رابطه، تغییرات شار مغناطیسی} = T$$

و T تغییرات زمان را نشان می‌دهد. شدت میدان مغناطیسی به سرعت تغییرات جریان یا تغییرات فرکانس بستگی دارد؛ بنابراین

۱- self-induction

۲- Electro motive force یا نیروی الکتروموتوری

جریان با فرکانس زیاد و دامنه‌ی کم	جریان با فرکانس پایین و دامنه‌ی زیاد
 <p>The diagram shows a coil connected to an AC source. The induced EMF is labeled as 50V. Below it, a graph plots current (I) against time, showing a high-frequency sine wave with a small amplitude.</p>	 <p>The diagram shows a coil connected to an AC source. The induced EMF is labeled as 50V. Below it, a graph plots current (I) against time, showing a low-frequency sine wave with a large amplitude.</p>
<p>جریان‌های فرکانس بالا می‌توانند emf‌های قوی ایجاد کنند؛ علی‌رغم این که دامنه‌شان نسبتاً کم است.</p>	<p>جریان‌های فرکانس پایین اگر دامنه‌شان زیاد باشند، می‌توانند emf‌های قوی ایجاد کنند.</p>

شکل ۱۴-۵- تأثیر دامنه و فرکانس جریان بر مقدار emf القایی

تغییر جهت جریان به وجود آورنده‌ی آن است.

### ۱۴-۶- قانون لنز

در سال ۱۸۳۴ یک فیزیک‌دان آلمانی به نام **لنز** قانونی را به جهانیان ارائه داد که بیانگر جهت نیروی محرکه‌ی القایی در یک هادی بود و ما اکنون آن را به نام **قانون لنز** می‌شناسیم. بر اساس قانون لنز، هر تغییر در جریان عبوری از یک هادی باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی خودالقایی می‌شود که اثر آن با جهت تغییرات جریان مخالفت می‌کند؛ به عبارت دیگر، هنگامی که جریان کاهش می‌یابد، نیروی محرکه‌ی القایی در جهتی است که با کاهش جریان مخالفت می‌کند و هنگامی که جریان افزایش می‌یابد، باز جهت نیروی محرکه‌ی خودالقایی طوری است که با

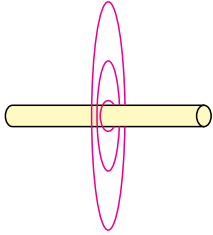
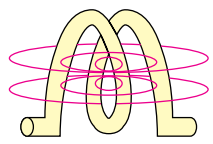
### ۱۴-۵- جهت نیروی محرکه‌ی خودالقایی

شاید تصور شود که پلاریته یا جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه باید در جهت جریان به وجود آورنده‌ی آن باشد. این تصور درست نیست. می‌دانیم که افزایش جریان هادی از صفر تا مقدار ماکزیمم، سبب افزایش میدان مغناطیسی و نیروی محرکه‌ی القایی می‌شود. اگر نیروی محرکه‌ی القا شده در همان جهت جریان باشد، شدت جریان را افزایش می‌دهد. افزایش جریان، نیروی محرکه‌ی بیش‌تری را سبب می‌شود و افزایش نیروی محرکه نیز به نوبه‌ی خود افزایش جریان را به دنبال دارد. این دوره‌ی تناوب تکرار می‌شود تا جایی که عنصری را در مدار می‌سوزاند اما می‌دانیم که چنین اتفاقی نمی‌افتد؛ یعنی جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه طوری است که اثر آن مخالف با

۱- نام این فیزیک‌دان آلمانی Heinrich F.E. Lenz است.

بیش تر باشد، نیروی ضد محرکه‌ی تشکیل شده قوی تر خواهد بود. به طوری که می توان نوشت:  $\text{Cemf} = -N \frac{d\phi}{dt}$  که در این رابطه،  $N$  تعداد دور سیم پیچ است.

شکل ۷-۱۴ تأثیر شکل فیزیکی هادی بر خودالقای ایجاد شده را نشان می دهد.

هادی مستقیم		خطوط میدان، هادی را تنها در یک نقطه قطع می کنند.
هادی بوبین شکل		خطوط میدان، هادی را در بیش از یک نقطه قطع می کنند.

اگر هادی بوبین شکل باشد، نیروی ضد محرکه‌ی بیش تری بر اثر خودالقای ایجاد می گردد.

شکل ۷-۱۴- نیروی ضد محرکه در یک هادی صاف و یک سیم پیچ

## ۸-۱۴- اندوکتانس یا ضریب خودالقای

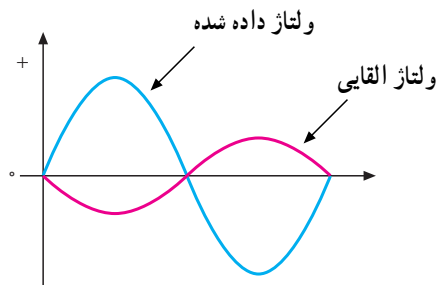
هرگاه تعداد خطوط قوای قطع شده توسط یک هادی در واحد زمان را در ضریبی که توسط شکل هادی تعیین می شود ضرب کنیم، مقدار نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده در آن به دست می آید؛ یعنی:

$$U_{\text{Cemf}} = L \cdot \frac{\text{تغییرات جریان}}{\text{تغییرات زمان}}$$

ضریب مورد بحث -  $L$  را که مقدار آن به شکل هادی بستگی دارد، ضریب خودالقای یا اندوکتانس آن هادی می گویند. قبلاً گفتیم که نیروی ضد محرکه‌ی القا شده در یک سیم پیچ، بسیار قوی تر از نیروی محرکه‌ی القا شده در یک هادی است؛ زیرا اندوکتانس یک هادی مستقیم بسیار کوچک و اندوکتانس یک سیم پیچ - بسته به تعداد حلقه‌های آن - نسبتاً بزرگ می باشد.

افزایش جریان مخالفت می کند. شکل ۶-۱۴ رابطه‌ی بین ولتاژ یا نیروی محرکه‌ی القا شده را با ولتاژی که باعث ایجاد جریان می شود (ولتاژ داده شده)، با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه نشان می دهد.

با زیاد یا کم شدن ولتاژ داده شده در یک جهت، نیروی محرکه‌ی القا شده در جهت مخالف آن زیاد یا کم می شود. از آن جا که عمل نیروی محرکه‌ی القایی مخالف با ولتاژ داده شده است، آن را نیروی ضد محرکه‌ی القایی می نامند و با  $\text{Cemf}$  نمایش می دهند. مقدار آن را از رابطه‌ی  $\text{Cemf} = -\frac{d\phi}{dt}$  محاسبه می کنند.



شکل ۶-۱۴- نیروی محرکه‌ی القایی همیشه با ولتاژ داده شده مخالفت می کند.

## ۷-۱۴- تأثیر شکل هادی بر خودالقایی

پیش از این دو عامل دامنه و فرکانس جریان را که بر خودالقایی مؤثرند، بررسی کردیم. عامل سومی که بر خودالقایی تأثیر می گذارد، شکل فیزیکی هادی است که مورد مطالعه قرار می گیرد.

تاکنون از هادی‌های مستقیم برای مطالعه‌ی میدان مغناطیسی و نیروی ضد محرکه‌ی القایی ایجاد شده کمک می گرفتیم. اکنون اگر یک هادی به صورت بوبین (سیم پیچ) باشد اولاً، به دلیل این که طول آن بیش تر است، نیروی ضد محرکه‌ی بیش تری القا می شود. ثانیاً چون هر خط میدان، در بیش از یک نقطه از هادی نیروی ضد محرکه‌ی القایی ایجاد می کند، نیروی ضد محرکه‌ی حلقه‌ها به هم کمک کرده نیروی ضد محرکه‌ی قوی تری تشکیل می شود. هر چه تعداد حلقه‌های یک سیم پیچ

## ۹-۱۴ عوامل مؤثر در ضریب خودالقا (اندوکتانس)

عوامل مؤثر در ضریب خودالقا یا اندوکتانس یک سلف را به دو دسته تقسیم می‌کنیم:

الف - جنس هسته

ب - عوامل فیزیکی

الف - جنس هسته: همان‌طور که می‌دانیم، اصولاً سلف

از یک سیم پیچ درست شده است و ماده‌ای که سیم به دور آن پیچیده می‌شود، هسته نام دارد. این هسته‌ها ممکن است از مواد مغناطیسی یا غیرمغناطیسی باشند. هسته‌های با مواد مغناطیسی، خطوط قوای مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم پیچ را به راحتی از خود عبور می‌دهند؛ یعنی قابلیت نفوذپذیری (ضریب نفوذ) آن‌ها زیاد است. این مواد را معمولاً مواد **فرومغناطیسی** می‌نامند.

ضریب نفوذ هسته را با حرف  $\mu$  (مو) مشخص می‌کنند.

ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تعیین کننده‌ی ضعف میدان مغناطیسی در هسته است. ضریب نفوذ مواد  $(\mu_r)$  نسبت به ضریب نفوذ هوا  $(\mu_0)$  سنجیده و به صورت  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  بیان می‌شود.

در این رابطه  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$  برای مواد

فرومغناطیسی بزرگ‌تر از  $10^6$  و برای مواد غیرمغناطیسی حدود یک است.

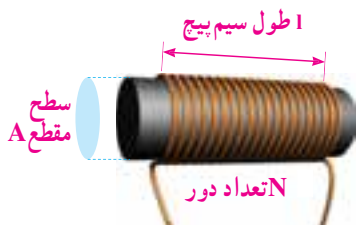
ب - عوامل فیزیکی: پارامترهای زیر - همان‌گونه که

در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است - بر اندوکتانس سلف مؤثرند.

۱- تعداد دور سیم پیچ

۲- طول سیم پیچ

۳- سطح مقطع هسته



شکل ۸-۱۴ پارامترهای مهم در یک سلف

اندوکتانس در حقیقت یکی از خصوصیت‌های فیزیکی یک هادی یا سیم پیچ است اما اغلب آن را بر اساس تأثیری که بر عبور جریان دارد، تعریف می‌کنند. بنابراین، اندوکتانس عبارت است از خاصیت هر هادی در مقابل هر تغییر در شدت جریان عبوری از آن. لذا بدیهی است که اندوکتانس در جریان مستقیم اثری ندارد و تنها اثرش - که مخالف با تغییر شدت جریان است - هنگامی ظاهر می‌شود که شدت جریان متغیر باشد. اندوکتانس در واقع معیاری است برای سنجش این که به ازای هر تغییری در شدت جریان چه مقدار نیروی ضد محرکه تولید می‌شود. پس به طور کلی، اندوکتانس هر سیم پیچ نشان می‌دهد که به ازای یک آمپر در ثانیه تغییر در جریان، چند ولت نیروی محرکه در آن القا می‌گردد.

واحد اندوکتانس هانری<sup>۱</sup> است که از نام دانشمند کاشف آن گرفته شده است. هانری مقدار اندوکتانس یک هادی است، اگر تغییر جریان یک آمپر در ثانیه در آن نیروی ضد محرکه‌ی یک ولت ایجاد کند. چون هانری واحد نسبتاً بزرگی است، غالباً اندوکتانس را برحسب واحدهای کوچک‌تری چون میلی هانری ( $10^{-3} H$ ) و میکروهانری ( $10^{-6} H$ ) به کار می‌برند. از آنجا که مقدار نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده در هادی جزئی از تعریف هانری است، مقدار نیروی محرکه را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد.

$$U_{Cemf} = -L \frac{di}{dt}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد

شده، با ولتاژ داده شده در فاز مخالف است.

مثال ۱: در یک بوبین اگر شدت جریان در یک ثانیه از  $500$  میلی آمپر به  $100$  میلی آمپر برسد و نیروی ضد محرکه‌ای مساوی یک ولت در آن تولید کند، مقدار ضریب خودالقا (اندوکتانس) بوبین را به دست آورید.

راه حل:

$$U_{Cemf} = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1}$$

$$1V = -L \frac{(0/1 - 0/5)A}{1sec}$$

$$L = \frac{1}{0/4} = 2/5H$$

۱- ژوزف هانری نام فیزیک‌دان آمریکایی است که همراه با مایکل فاراده خاصیت القایی را کشف کرده است.

۲-  $i$  و  $t$  که دلالتی تلفظ می‌شود، همان تغییرات شدت جریان و تغییرات زمان است.

اندوکتانس با توجه به عوامل مؤثر در آن به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$L = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l}$$

$L$  اندوکتانس بر حسب هانری،  $\mu$  ضریب نفوذ هسته بر حسب هانری بر متر،  $A$  سطح مقطع هسته بر حسب مترمربع و  $l$  طول سیم پیچی بر حسب متر است.

خود برسد. با قطع کلید نیز جریان به طور آنی به صفر نمی‌رسد؛ زیرا نیروی ضد محرکه‌ی تولید شده، با این تغییر سریع مخالفت می‌کند. لذا جریان به تدریج به صفر می‌رسد.

طی این تغییرات، رابطه‌ای مابین جریان به دست آمده و مدت زمان رسیدن به این جریان، به وجود می‌آید که به وسیله‌ی کمیّتی به نام ثابت زمانی بیان می‌شود و آن را با حرف  $\tau$  (تاو) نمایش می‌دهند. بر حسب تعریف، ثابت زمانی به مدت زمانی گفته می‌شود که جریان در یک سلف به  $63/2\%$  درصد مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار ثابت زمانی در یک مدار سلفی به مقدار مقاومت ( $R$ ) و اندوکتانس ( $L$ ) بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

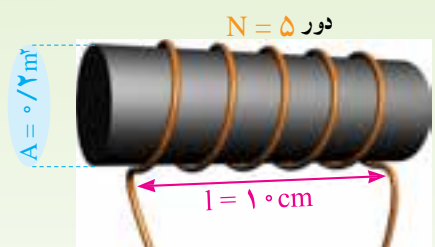
$$\tau = \frac{L}{R}$$

همان گونه که از رابطه‌ی گفته شده برمی‌آید، ثابت زمانی با اندوکتانس نسبت مستقیم و با مقاومت، نسبت عکس دارد؛ بنابراین، هرچه اندوکتانس بزرگ‌تر یا مقاومت کوچک‌تر باشد، ثابت زمانی طولانی‌تر خواهد شد و برعکس. اگر اندوکتانس ( $L$ ) بر حسب هانری و مقاومت ( $R$ ) بر حسب اهم باشد، ثابت زمانی ( $\tau$ ) بر حسب ثانیه به دست خواهد آمد.

معمولاً  $5\tau$  ثابت زمانی طول می‌کشد تا جریان در یک سلف به مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار درصد افزایش یا کاهش شدت جریان را در ثابت‌های زمانی مختلف با توجه به منحنی‌های شکل ۱۱-۱۴ تحت عناوین صعود و نزول جریان بررسی می‌کنیم.

در ثابت زمانی اول جریانی به اندازه‌ی  $63/2\%$  درصد کل جریان نهایی از سیم پیچ می‌گذرد. در ثابت زمانی دوم، جریان به  $86/4\%$  درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم نیز به همین منوال. به طوری که در ثابت زمانی پنجم تقریباً به مقدار حداکثر خود می‌رسد. منحنی ۱۱-۱۴ الف روند افزایش جریان و مقادیر هر ثابت زمانی را نشان می‌دهد.

مثال ۲: با توجه به شکل ۹-۱۴ مقدار اندوکتانس بویین چه قدر است؟



شکل ۹-۱۴

راه حل:

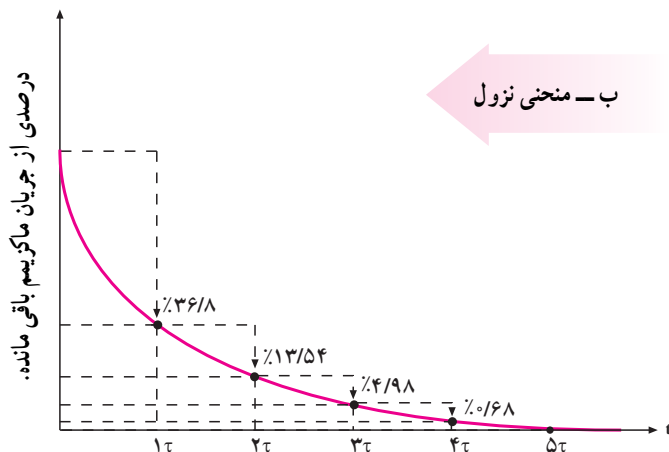
$$L = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l} = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 0.7 \cdot 5^2}{10 \cdot 10^{-2}} = 62/8 \text{ H}$$

### ۱۰-۱۴- ثابت زمانی

در یک مدار مقاومتی جریان مستقیم، شدت جریان به طور لحظه‌ای تغییر می‌کند؛ یعنی، با بستن کلید، جریان به طور ناگهانی از صفر به ماکزیمم و با قطع کلید، دفعتهاً از ماکزیمم به صفر می‌رسد. در صورتی که اگر بویینی به مدار اضافه شود، جریان دیگر نمی‌تواند به این صورت تغییر کند؛ بنابراین، با بستن کلید، جریان سعی دارد به طور آنی افزایش یابد اما نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده با افزایش آنی جریان مخالفت می‌کند. در نتیجه، مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان به مقدار ماکزیمم

۱- این فرمول در حالتی صادق است که  $l$  از قطر مقطع هسته بسیار بزرگ‌تر باشد.

در ۵ ثابت زمانی، جریان به کم تر از ۱٪ مقدار ماکزیمم سقوط می کند. که عملاً همان صفر است.



ب - منحنی نزول

شکل ۱۱-۱۴ - منحنی صعود و نزول شدت جریان در مدار سلفی

مثال ۴: در مثال ۳ اگر بویینی با اندوکتانس ۲۰ mH به جای بویین ۱۰ mH قرار گیرد، ثابت زمانی چگونه تغییر می کند؟  
راه حل:

$$\dots \frac{L}{R} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 10 \text{ (ms)}$$

با توجه به رابطه ی فوق و مقدار به دست آمده، ثابت زمانی دوبرابر می شود.

مثال ۵: حداکثر جریان در یک مدار RL، ۱۰ آمپر است. مقدار جریان صعودی در پایان ثابت زمانی دوم چه قدر است؟

مقدار جریان در پایان ثابت زمانی اول

$$I_1 \cdot 10 \cdot \frac{63/2}{100} \cdot 6/32 \text{ (A)}$$

باقیمانده ی جریان ۳/۶۸ (A)

افزایش جریان در ثابت زمانی دوم

$$3/68 \cdot \frac{63/2}{100} \cdot 2/32 \text{ (A)}$$

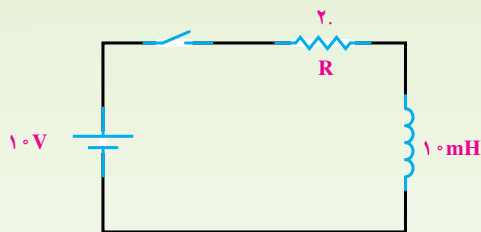
مقدار جریان در پایان ثابت زمانی دوم

$$I_2 \cdot 6/32 + 2/32 \cdot 8/64 \text{ (A)}$$

تمرین: مقدار جریان را در پایان ثابت زمانی سوم و چهارم به دست آورید.

با قطع جریان در مدار - همان گونه که در منحنی شکل ۱۱-۱۴ - ب مشهود است - در ثابت زمانی اول جریان به اندازه ی ۶۳/۲ درصد از مقدار ماکزیمم کاهش پیدا می کند و به ۳۶/۸ درصد می رسد. در ثابت زمانی دوم به ۱۳/۶ درصد می رسد. در ثابت های زمانی سوم، چهارم و پنجم کاهش جریان به همین منوال ادامه پیدا می کند و در ثابت زمانی پنجم تقریباً به صفر می رسد.

مثال ۳: در مدار شکل ۱۰-۱۴ پس از بستن کلید، مدت زمانی را که شدت جریان به مقدار ماکزیمم خود می رسد، حساب کنید.



شکل ۱۰-۱۴

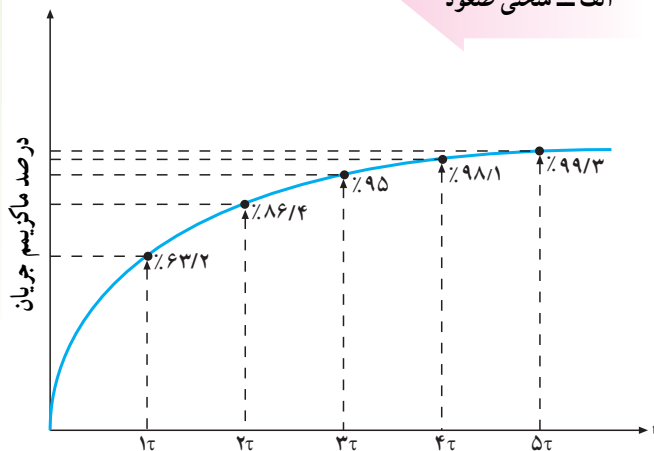
حل:

$$\dots \frac{L}{R} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ (H)}}{2 \text{ (.)}} \cdot 5 \text{ (ms)}$$

$$5 \cdot 5 \cdot 5 \text{ ms} \cdot 25 \text{ (ms)}$$

در طول ۵ ثابت زمانی، جریان به ۹۹٪ مقدار ماکزیمم می رسد. این مقدار عملاً همان ۱۰۰٪ است.

الف - منحنی صعود





## ۱۱-۱۴- بوبین در جریان متناوب

باشد، مقاومت القایی بیش تر و هر چه فرکانس کم تر باشد، مقدار مقاومت القایی کم تر خواهد بود.

از طرفی،  $f$ ، همان سرعت زاویه ای ( $\omega$ ) است که سرعت تغییرات جریان را نمایش می دهد و برحسب رادیان بر ثانیه بیان می شود. هر قدر جریان با سرعت بیش تری تغییر کند، افت ولتاژ القایی در دو سر سلف نیز زیادتر خواهد شد. بنابراین، با توجه به قانون اهم می توان رابطه ی زیر را نوشت.

$$X_L = \omega \cdot fL = \frac{U_L}{I_L}$$

## ۱۳-۱۴- اتصال بوبین ها

برای دست یابی به اندوکتانس مناسب، اغلب مجبوریم بوبین ها را به طور سری یا موازی ببندیم. در چنین مواردی، بدون در نظر گرفتن اثر میدان ها بر یک دیگر، اندوکتانس کل عیناً شبیه مقاومت معادل در مدارهای سری و موازی به دست می آید.

**الف - اتصال سری بوبین ها:** با اتصال بی دربی (متوالی) بوبین ها، اندوکتانس کل برابر مجموع تک تک اندوکتانس های موجود در مدار است که از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$L_t = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

در صورت مساوی بودن اندوکتانس ها، اندوکتانس کل برای  $n$  بوبین برابر است با

$$L_t = nL$$

**ب - اتصال موازی بوبین ها:** در اتصال موازی بوبین ها اندوکتانس کل از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

در صورت مساوی بودن بوبین ها اندوکتانس کل برای  $n$  بوبین، برابر است با

$$L_t = \frac{L}{n}$$

برخلاف مدارهای DC که در آن ها جریان فقط هنگام باز و بسته شدن مدار تغییر می کند، در مدارهای AC جریان بی دربی تغییر می کند. لذا اندوکتانس اثری دائمی بر کار مدار می گذارد؛ یعنی، از لحظه ی بسته شدن مدار تا لحظه ی قطع مدار اندوکتانس بر عملکرد مدار تأثیر دارد.

بوبین ها معمولاً ایده آل نیستند. لذا هر بوبین در مدار AC علاوه بر خاصیت القایی از خاصیت اهمی نیز برخوردار است. به علاوه، منبع و سیم های رابط نیز مقداری مقاومت دارند. حال اگر این مقاومت ها به قدری کوچک باشند که اثرشان بر مدار در مقابل اثر اندوکتانس ناچیز باشد، می توان فقط اثر سلفی را در مدار در نظر گرفت و از اثر اهمی آن صرف نظر کرد.

## ۱۲-۱۴- مقاومت القایی

می دانیم که مقاومت اهمی در مقابل جریان DC و AC به ازای ولتاژ ثابتی عکس العمل مشابهی دارد اما اگر مداری تنها شامل اندوکتانس باشد، مقدار جریان به نیروی ضد محرکه ی ایجاد شده بستگی دارد که با عبور جریان مخالفت می کند اما چون نیروی ضد محرکه ( $Cemf$ ) برحسب ولت بیان می شود، نمی توان آن را به جای اهم قرار داد و جریان را به دست آورد. لذا تأثیر نیروی ضد محرکه بر مدار را می توان بر حسب اهم به دست آورد. این اثر را **مقاومت القایی** می گویند و با  $X_L$  نمایش می دهند.

مقدار نیروی ضد محرکه ی ایجاد شده در مدار، توسط مقدار  $L$  و فرکانس جریان عبوری از مدار، تعیین می شود؛ بنابراین، مقاومت القایی نیز باید وابسته به همین عوامل باشد. یعنی:

$$X_L = \omega \cdot fL$$

در رابطه ی فوق،  $X_L$  مقاومت القایی بر حسب اهم،  $\omega$ ، عدد ثابت و برابر  $\frac{2\pi}{60}$  و  $f$  فرکانس جریان برحسب هرتز و  $L$  اندوکتانس است که برحسب هانری در فرمول قرار می گیرد. با توجه به رابطه ی یاد شده هر چه فرکانس یا اندوکتانس بیش تر

$$L_t = 15 + 6 + 10 = 31(\text{mH})$$

۲- اتصال موازی

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} = \frac{1}{15} + \frac{1}{6} + \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{L_t} = \frac{2+5+3}{30} = \frac{10}{30}(\text{mH})$$

$$L_t = \frac{30}{10} = 3(\text{mH})$$

مثال ۷: در مثال ۶، اگر فرکانس مدار ۱۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شود، مقاومت القایی معادل را در هر حالت به دست آورید.

۱- حالت سری

$$L_t = 31(\text{mH})$$

$$XL_t = 2 \cdot fL_t = 2 \cdot 3/14 \cdot 1000 \cdot 31 \cdot 10^{-3} ( )$$

$$XL_t = 194/68$$

۲- حالت موازی

$$L_t = 3\text{mH}$$

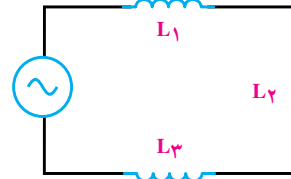
$$XL_t = 2 \cdot fL_t = 2 \cdot 3/14 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$XL_t = 18/84$$

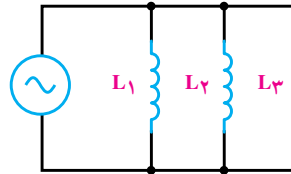
## ۱۴-۱۴- القای متقابل

هرگاه دو سیم پیچ طوری در نزدیکی یک دیگر قرار گیرند که خطوط قوای تولید شده توسط یکی حلقه‌های سیم پیچ دیگری را قطع کند، در سیم پیچ دوم ولتاژی القا می‌شود. ولتاژ القا شده در سیم پیچ دوم - در صورت بسته بودن مدارش با مصرف کننده - به نوبه‌ی خود جریانی را تولید می‌کند که با تولید خطوط قوای جدید، حلقه‌های سیم پیچی اول را قطع می‌کند و در سیم پیچ اول ولتاژی القا می‌شود. به این عمل **القای متقابل** گفته می‌شود؛ یعنی، دو سیم پیچ متقابلاً بر یک دیگر اثر می‌گذارند. با توجه به این که هیچ‌گونه ارتباط الکتریکی بین دو سیم پیچ وجود ندارد ولی حلقه‌های آن‌ها توسط میدان مغناطیسی با هم در ارتباط‌اند،

شکل‌های ۱۲-۱۴ و ۱۳-۱۴ اتصال سری و موازی را برای سه بوبین که با فاصله‌ی زیاد از یک دیگر قرار دارند (بدون داشتن ارتباط مغناطیسی)، نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۱۴- اتصال سری بوبین‌ها



شکل ۱۳-۱۴- اتصال موازی بوبین‌ها

هم‌چنین، برای محاسبه‌ی مقاومت القایی معادل در مدارهای سری و موازی نیز می‌توان مشابه محاسبه‌ی اندوکتانس معادل بوبین‌ها عمل کرد. روابط محاسبه‌ی مقاومت القایی معادل در مدار سری و موازی به صورت زیر است.

$$\text{مدار سری} \quad X_{L_t} = X_{L_1} + X_{L_2} + \dots + X_{L_n}$$

$$\text{مدار موازی} \quad \frac{1}{X_{L_t}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \dots + \frac{1}{X_{L_n}}$$

تذکره: در هر یک از اتصالات سری یا موازی بوبین‌ها مقاومت القایی کل را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$X_{L_t} = 2 \cdot fL_t = W \cdot L_t$$

مثال ۶: سه بوبین با اندوکتانس‌های ۱۵ و ۶ و ۱۰ میلی‌هانری یک بار به صورت سری و یک بار به صورت موازی بسته شده‌اند. اندوکتانس کل را در هر حالت به دست آورید.

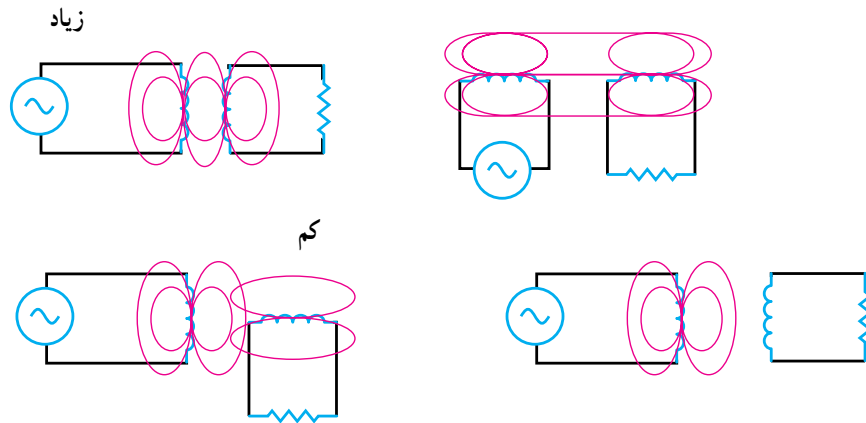
راه حل:

۱- اتصال سری

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3$$

این ارتباط، متقابل است.

از یک خواهد بود. در صورتی که بین دو بوبین هیچ گونه القای متقابلی وجود نداشته باشد، ضریب تزویج برابر صفر خواهد بود. هرگاه ضریب تزویج  $k$  را با حرف  $k$  نمایش می دهند - برابر یک باشد، تزویج را کامل یا سفت گویند. چنانچه ضریب تزویج  $(k)$  کم تر از یک باشد، تزویج را ناقص یا سست می گویند. تزویج حداکثر (واحد) زمانی اتفاق می افتد که خطوط قوای یک بوبین، تمام حلقه های بوبین دیگر را قطع کند. شکل ۱۴-۱۴ درجه های تزویج را در حالت های مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۴-۱۴ - نمایش درجه های تزویج بین بوبین ها

اندوکتانس باشد، نیروی ضد محرکه و تأخیر ایجاد شده توسط اندوکتانس در جریان، بین ولتاژ داده شده و جریان عبوری از آن، اختلاف فاز ایجاد می کند. به عبارت دیگر، جهت نیروی ضد محرکه چنان است که همیشه با تغییرات جریان مخالفت می کند. به علاوه، می دانیم که ولتاژ داده شده با ولتاژ القا شده در سیم پیچ همفاز نیستند و کاملاً در جهت مخالف یک دیگرند. منحنی های شکل ۱۴-۱۵ ارتباط بین منحنی های جریان، ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه را به خوبی نشان می دهد. زمانی که دامنه ی جریان ماکزیمم است، به دلیل اینکه تغییرات آن صفر است، دامنه ی نیروی ضد محرکه صفر است. زمانی که جریان از صفر می گذرد، تغییرات آن بیش ترین مقدار را دارا است. پس نیروی ضد محرکه بسته به جهت تغییرات جریان، ماکزیمم یا مینیمم می باشد. به تعبیر دیگر در  $90^\circ$  و  $270^\circ$  درجه، جریان تغییرات ناچیزی دارد و ولتاژ داده شده صفر است. لذا نیروی ضد محرکه ای ایجاد نمی شود. در صفر،  $180^\circ$  و  $360^\circ$  درجه تغییرات جریان، زیاد و ولتاژ داده

مقدار ولتاژ القایی ناشی از القای متقابل دو بوبین، به وضع قرار گرفتن آن ها نسبت به یک دیگر و تعداد خطوط قوای که ارتباط بین دو بوبین را برقرار می کنند، بستگی دارد. درجه ی ارتباط خطوط قوا، توسط ضریبی به نام **ضریب تزویج** بیان می شود. وقتی همه ی خطوط قوای یک بوبین توسط بوبین دیگر قطع شود، ضریب تزویج برابر یک و هرگاه قسمتی از خطوط قوای تولید شده توسط بوبین دیگر قطع شود، ضریب تزویج کم تر

برای نشان دادن میزان القای متقابل بین دو بوبین از ضریبی استفاده می شود، که آن را ضریب القای متقابل می نامند و با حرف  $M$  نمایش می دهند. ضریب القای متقابل به اندوکتانس دو سیم پیچ و ضریب تزویج بین آن ها وابسته است و از رابطه ی زیر محاسبه می شود.

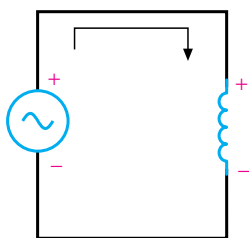
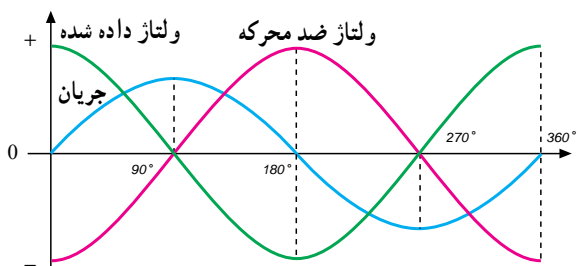
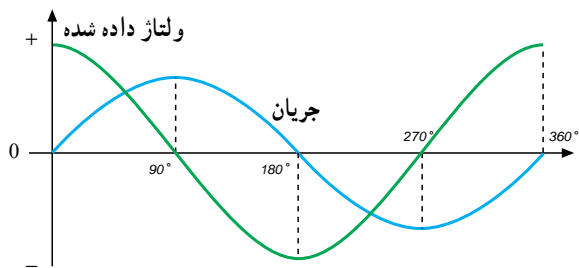
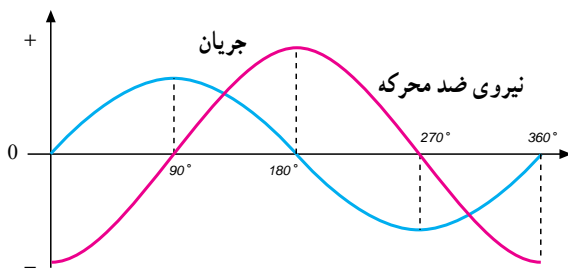
$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

در این رابطه  $M$  ضریب القای متقابل بر حسب هانری  $L_1$  و  $L_2$  اندوکتانس بوبین ها بر حسب هانری و  $k$  ضریب تزویج است که بدون واحد می باشد.

## ۱۴-۱۵ - منحنی جریان و ولتاژ بوبین در جریان متناوب

در یک مدار با مقاومت اهمی اختلاف فاز بین ولتاژ دو سر مقاومت با جریان عبوری از آن برابر صفر است؛ یعنی، جریان با ولتاژ دو سر یک مقاومت هم فاز می باشد. اما اگر مداری شامل

شده ماکزیمم است. لذا حداکثر نیروی ضد محرکه در خلاف جهت ولتاژ داده شده تولید می شود.



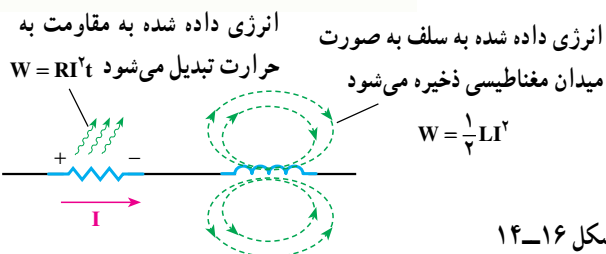
شکل ۱۵-۱۴- نمایش منحنی های جریان و ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه

انرژی ذخیره شده، (W) برحسب وات ثانیه یا ژول است.

مثال ۸: از یک سیم پیچ با ضریب خودالقایی ۳ هانری، جریان مستقیمی برابر با ۶۰ آمپر می گذرد. هنگام قطع این سیم پیچ چه قدر انرژی آزاد می شود؟

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot (60)^2 = \frac{3 \cdot 3600}{2} = 5400 \text{ J} = 5.4 \text{ kJ}$$



### ۱۶-۱۴- انرژی ذخیره شده در سلف

میدان مغناطیسی وابسته به جریان در یک سیم پیچ دارای انرژی الکتریکی است که از طریق منبع ولتاژی که جریان را تولید می کند، تأمین می شود. این انرژی در میدان مغناطیسی ذخیره می شود و به اندوکتانس (L) و مجذور جریان بستگی دارد؛ یعنی:

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

در رابطه ی فوق I برحسب آمپر، L برحسب هانری و

شکل ۱۶-۱۴



- ۱- خودالقایی و ضریب خودالقایی را تعریف کنید.
- ۲- تغییرات جریان چه اثراتی بر سیم پیچ می گذارد؟
- ۳- قانون لنز چیست؟
- ۴- اثرات جریان DC و AC را بر سیم پیچ با یک دیگر مقایسه کنید.
- ۵- فرق بین  $emf$  و  $Cemf$  چیست؟
- ۶- عوامل مؤثر بر مقدار ضریب القا و خودالقا کدامند؟
- ۷- القای متقابل یعنی چه؟
- ۸- اثرات جریان DC در القای متقابل چیست؟
- ۹- اثرات هسته را در سیم پیچ ها توضیح دهید.
- ۱۰- انرژی ذخیره شده در سلف یعنی چه؟
- ۱۱- اثر مقاومت القایی را در جریان متناوب توضیح دهید.
- ۱۲- دلیل سری یا موازی بستن سیم پیچ ها را بیان کنید.
- ۱۳- رابطه ی فازی بین ولتاژ و جریان یک بوبین چیست؟ چرا؟

- ۱- سیم پیچی به طول  $50$  سانتی متر و سطح مقطع  $2\%$  متر مربع با هسته ی هوا دارای  $1000$  دور است؛ اولاً ضریب خودالقایی آن تقریباً چند میلی هانری است؟ ثانیاً اگر بخواهیم ضریب خود القا دو برابر شود، تعداد دور سیم پیچ باید چند دور شود؟  
(جواب:  $50\text{ mH}$  و دور  $1410$ )
- ۲- دو بوبین با ضریب خودالقایی  $100$  میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی به هم وصل می کنیم. ضریب خودالقایی کل در هر دو حالت چه قدر می شود؟  
(جواب:  $200$  و  $50$  میلی هانری)
- ۳- ضریب خود القایی سیم پیچی  $2\text{ mH}$  و جریان عبوری از آن  $10$  آمپر است. چه مقدار انرژی در سیم پیچ ذخیره می شود؟  
(جواب: ژول  $1 = W$ )
- ۴- چهار بوبین با ضریب های خودالقایی  $50, 25, 100, 25$  میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی ببندید. ضریب خودالقایی کل را در هر حالت به دست آورید.

(جواب : ۲۰۰ و ۹ میلی هانری)

۵- از یک بوبین با ضریب خودالقایی  $10\text{mH}$  جریان متناوبی با فرکانس  $50^\circ$  هرتز عبور می‌کند. مقاومت القایی بوبین چند اهم است؟ اگر فرکانس به یک کیلو هرتز تغییر یابد، مقاومت القایی بوبین چند اهم می‌شود؟

(جواب :  $3/14$  و  $62/8$ )

۶- در یک بوبین با ضریب خودالقایی ۳ میلی‌هانری، جریان در مدت دو ثانیه از یک آمپر به ۷ آمپر افزایش می‌یابد و ولتاژ خودالقایی در بوبین چند میلی ولت است؟ اگر ضریب خودالقایی ۳ هانری باشد، ولتاژ القایی چند میلی‌ولت می‌شود؟

(جواب : ۹- و ۹۰۰۰-)

۷- یک بوبین با ضریب خودالقایی ۲ هانری و مقاومت اهمی  $5^\circ$  اهمی در دست است. اگر این بوبین را به ولتاژ  $1/5$  ولت مستقیم وصل کنیم، ماکزیمم جریان مدار چند آمپر می‌شود؟ چه مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان ماکزیمم شود؟

(جواب : ۳ آمپر و ۲۰ ثانیه)