فصل چهاردهم

بوبین (سلف)

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ بوبین را تعریف کند و انواع آن را نام ببرد.

۲ــ میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب را شرح دهد.

۳ــ خودالقا را تعریف کند.

۴ــ مقدار و جهت نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا را توضیح دهد.

۵ــ قانون لنز را تعریف کند.

۶ــ ضریب خودالقا و عوامل مؤثّر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

۷ــ رابطه‌ی اندوکتانس و نیروی ضد محرّکه را توضیح دهد و نیروی ضد محرکه را محاسبه کند.

۸ــ واحد خودالقا را تعریف کند.

۹ــ بوبین ایده‌ال و واقعی را شرح دهد.

۱۰ــ مقاومت خودالقا و عوامل مؤثّر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

۱۱ــ ثابت زمانی را تعریف و محاسبه کند.

۱۲ــ منحنی‌های ولتاژ داده شده، جریان و نیروی ضد محرکه را تجزیه و تحلیل کند.

۱۳ــ تأثیر هسته‌ی مغناطیسی را در اندوکتانس بیان کند.

۱۴ــ اتّصال سری و موازی بوبین‌ها را توضیح دهد و مقادیر معادل را محاسبه کند.

۱۵ــ القای متقابل و ضریب کوپلاژ را توضیح دهد.

۱۶ــ انرژی ذخیره شده در سلف و عوامل مؤثّر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

۱ــ۱۴ــ تعریف بوبین

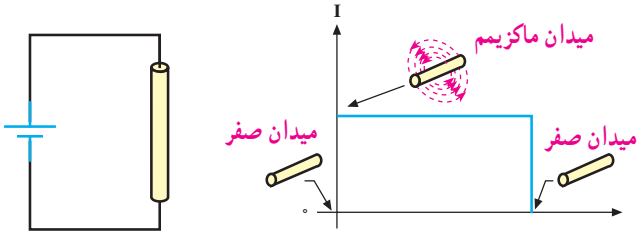
اگر مقداری سیم به دور محور یا هسته‌ای پیچانده شود، بوبین یا سیم‌پیچ به وجود می‌آید. از هسته علاوه بر اثرات القایی ــ به جای تکیه‌گاه ــ جهت پیچاندن و نگهداری سیم استفاده می‌شود. در شکل ۱ــ۱۴ تعدادی بوبین با هسته‌ی هوایی و فلزّی را مشاهده می‌کنید.

بوبین‌هایی را که هسته‌ی فلزّی 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.

شکل ۱ــ۱۴ــ انواع بوبین‌ها با هسته‌های مختلف

۲ــ۱۴ــ میدان مغناطیسی حاصل از یک جریان مستقیم و متناوب

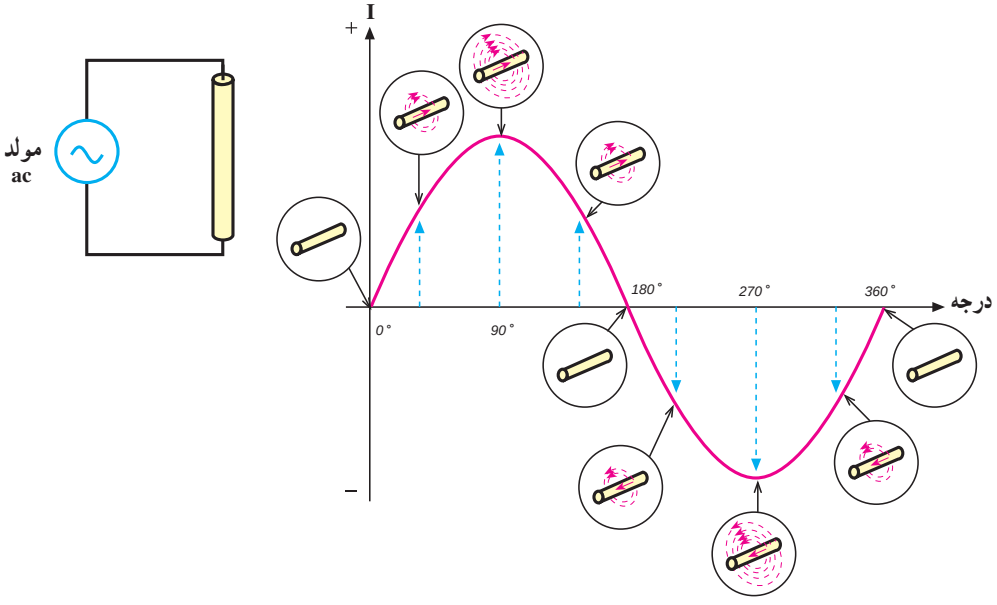
اگر دوسر یک هادی را مطابق شکل ۲ــ۱۴ به جریان مستقیم وصل کنیم، شدّت جریان به طور ناگهانی از صفر به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و میدان مغناطیسی در اطراف هادی نیز به ناگاه از صفر به مقدار ماکزیمم خود افزایش می‌یابد. تا موقعی که جریان در هادی جاری است، میدان در ماکزیمم مقدار خود باقی می‌ماند. چنان‌چه مدار باز شود جریان، صفر شده و میدان نیز به صفر کاهش می‌یابد.



شکل ۲ــ۱۴ــ میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله‌ی جریان مستقیم

اگر دو سر یک هادی را مطابق شکل ۳ــ۱۴ به یک جریان متناوب وصل کنیم، مقدار جریان و در نتیجه، شدّت 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.



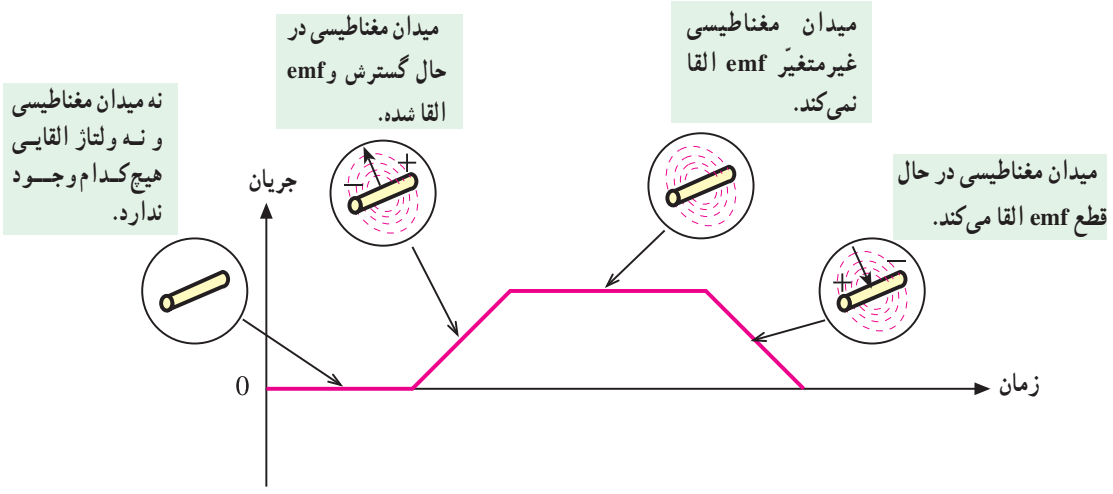
شکل ۳ــ۱۴ــ میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب

۳ــ۱۴ــ خودالقایی[۱]

با طی نیم پریود 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 به‌تدریج 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 محرّکه‌ی الکتریکی (emf)[۲] در هادی تولید می‌گردد.

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 خاصیّت 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 ۴ــ۱۴ القای نیروی محرکه را در زمان تغییر جریان نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ۱۴ــ نمایش تولید emf

۴ــ۱۴ــ مقدار نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا

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

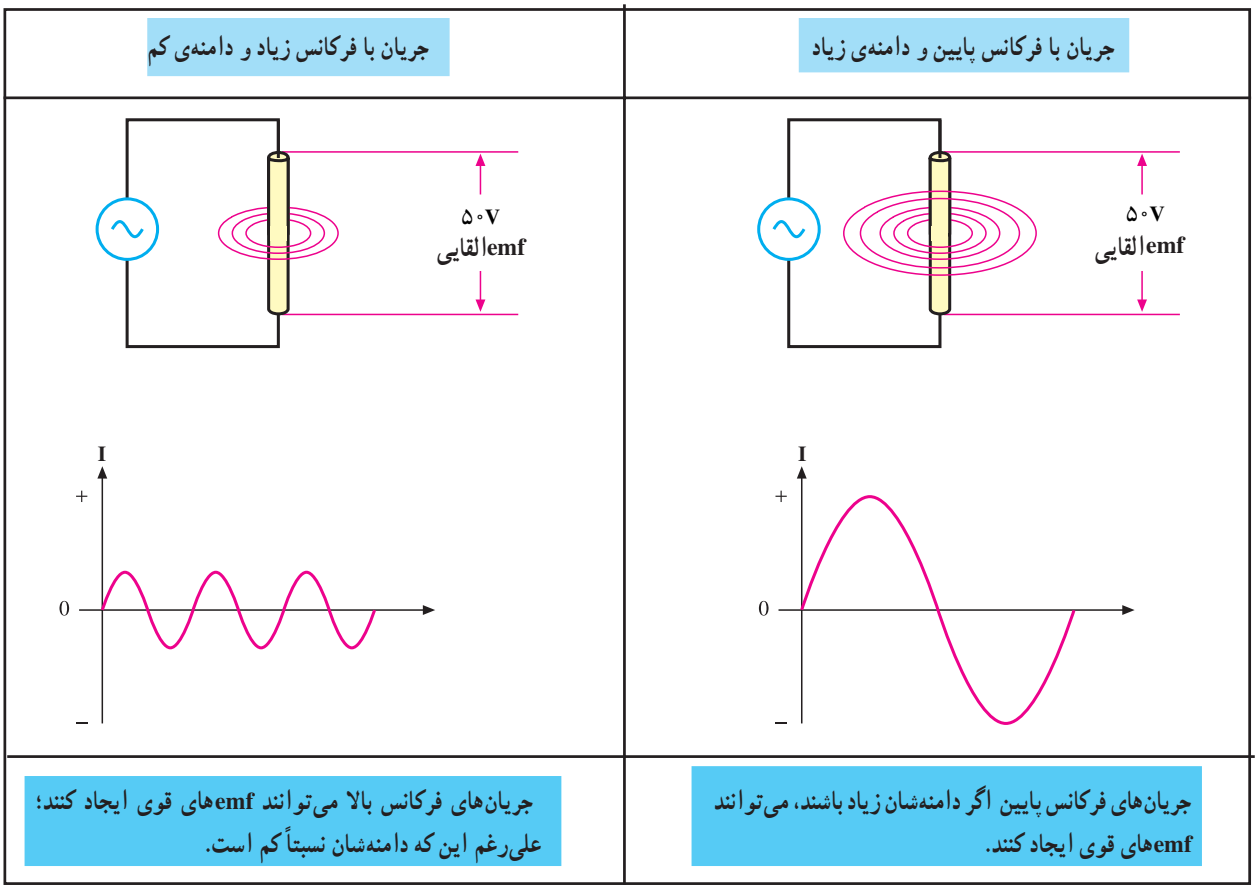
مقدار emf در این رابطه، $\Delta\varphi$ تغییرات شار مغناطیسی $= \frac{\Delta\varphi}{\Delta T}$

و ΔT تغییرات زمان را نشان می‌دهد. شدت میدان مغناطیسی به سرعت تغییرات جریان یا تغییرات فرکانس بستگی دارد ؛ بنابراین مقدار نیروی محرّکه‌ی 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 معیّن می‌کند ؛ یعنی، هر چه شدّت 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 ۵ــ۱۴ عوامل ذکر شده را به خوبی نشان می‌دهد.

۱ــ self-induction

۲ــ Electro motive force یا نیروی الکتروموتوری



شکل ۵ــ۱۴ــ تأثیر دامنه و فرکانس جریان بر مقدار emf القایی

۵ــ۱۴ــ جهت نیروی محرکه‌ی خودالقا

شاید تصوّر شود که پلاریته یا جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه باید در جهت جریانِ به وجود آورنده‌ی آن باشد. این تصوّر درست نیست. می‌دانیم که افزایش جریان هادی از صفر تا مقدار ماکزیمم، سبب افزایش میدان مغناطیسی و نیروی محرّکه‌ی القایی می‌شود. اگر نیروی محرکه‌ی القا شده در همان جهت جریان باشد، شدّت 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 امّا می‌دانیم که چنین اتّفاقی نمی‌افتد؛ یعنی جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه طوری است که اثر آن مخالف با تغییر جهت جریانِ به وجود آورنده‌ی آن است.

۶ــ۱۴ــ قانون لنز

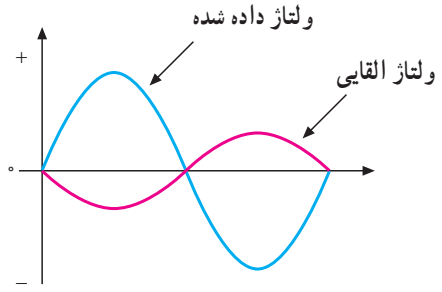
در سال ۱۸۳۴ یک فیزیک‌دان آلمانی به نام **لنز**[۱] قانونی را به جهانیان ارائه داد که بیانگر جهت نیروی محرکه‌ی القایی در یک هادی بود و ما اکنون آن را به نام **قانون لنز** می‌شناسیم.

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

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

افزایش جریان مخالفت می‌کند. شکل ۶ــ۱۴ رابطه‌ی بین ولتاژ یا نیروی محرکه‌ی القا شده را با ولتاژی که باعث ایجاد جریان می‌شود (ولتاژ داده شده)، با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نشان می‌دهد.

با زیاد یا کم شدن ولتاژ داده شده در یک جهت، نیروی محرکه‌ی القا شده در جهت مخالف آن زیاد یا کم می‌شود. از آن‌جا که عمل نیروی محرکه‌ی القایی مخالف با ولتاژ داده شده است، آن را نیروی ضد محرکه‌ی القایی می‌نامند و با Cemf نمایش می‌دهند. مقدار آن را از رابطه‌ی $Cemf = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ [1] محاسبه می‌کنند.



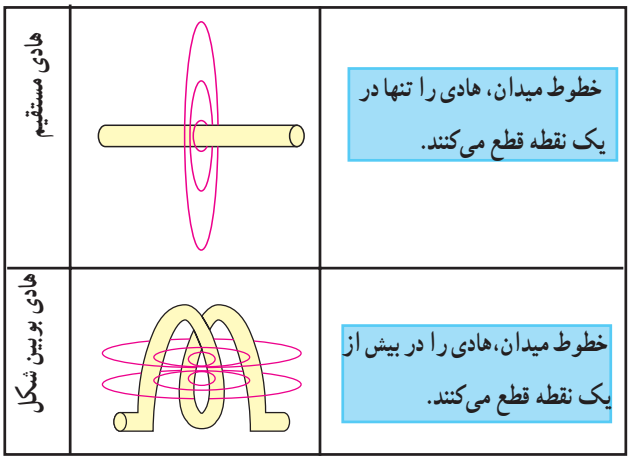
شکل ۶ــ۱۴ــ نیروی محرکه‌ی القایی همیشه با ولتاژ داده شده مخالفت می‌کند.

۷ــ۱۴ــ 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 می‌گذارد، شکل فیزیکی هادی است که مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

تاکنون از هادی‌های مستقیم برای مطالعه‌ی میدان مغناطیسی و نیروی ضدّ محرکه‌ی القایی ایجاد شده کمک می‌گرفتیم. اکنون اگر یک هادی به صورت بوبین (سیم‌پیچ) باشد اولاً، به دلیل این که طول آن بیش‌تر است، نیروی ضدّ محرّکه‌ی بیش‌تری القا می‌شود. ثانیاً چون هر خط میدان، در بیش از یک نقطه از هادی نیروی ضدّ محرّکه‌ی القایی ایجاد می‌کند، نیروی ضدّ محرّکه‌ی حلقه‌ها به هم کمک کرده نیروی ضدّ محرّکه‌ی قوی‌تری تشکیل می‌شود. هر چه تعداد حلقه‌های یک سیم‌پیچ بیش‌تر باشد، نیروی ضدّ محرّکه‌ی تشکیل شده قوی‌تر خواهد بود. به طوری که می‌توان نوشت: $Cemf = -N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ که در این رابطه، N تعداد دور سیم‌پیچ است.

شکل ۷ــ۱۴ تأثیر شکل فیزیکی هادی بر خودالقای ایجاد شده را نشان می‌دهد.



اگر هادی بوبین شکل باشد، نیروی ضد محرکه‌ی بیش‌تری بر اثر خودالقا ایجاد می‌گردد.

شکل ۷ــ۱۴ــ نیروی ضد محرکه در یک هادی صاف و یک سیم‌پیچ

۸ــ۱۴ــ اندوکتانس یا ضریب خودالقا

هرگاه تعداد خطوط قوای قطع شده توسط یک هادی در واحد زمان را در ضریبی که توسط شکل هادی تعیین می‌شود ضرب کنیم، مقدار نیروی ضدّ محرّکه‌ی ایجاد شده در آن به دست می‌آید؛ یعنی:

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

ضریب مورد بحث ــ یعنی L ــ را که مقدار آن به شکل هادی بستگی دارد، ضریب خودالقا یا اندوکتانس آن هادی می‌گویند. قبلاً گفتیم که نیروی ضدّ محرکه‌ی القا شده در یک سیم‌پیچ، بسیار قوی‌تر از نیروی محرکه‌ی القا شده در یک هادی است؛ زیرا اندوکتانس یک هادی مستقیم بسیار کوچک و اندوکتانس یک سیم‌پیچ ــ بسته به تعداد حلقه‌های آن ــ نسبتاً بزرگ می‌باشد.

۱ــ Counter electro motive force

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

واحد اندوکتانس هانری[1] 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 ضدّ 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.

$$U_{Cemf} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}^{2}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که نیروی ضدّ محرّکه‌ی ایجاد شده، با ولتاژ داده شده در فاز مخالف است.

مثال ۱: در یک بوبین اگر شدّت جریان در یک ثانیه از ۵۰۰ میلی‌آمپر به ۱۰۰ میلی‌آمپر برسد و نیروی ضدّ محرکه‌ای مساوی یک ولت در آن تولید کند، مقدار ضریب خودالقا (اندوکتانس) بوبین را به دست آورید.

راه حل:

$$U_{Cemf} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t} = -L\frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1}$$

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

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

۹ــ۱۴ــ عوامل مؤثر در ضریب خودالقا (اندوکتانس)

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

الف ــ جنس هسته

ب ــ عوامل فیزیکی

الف ــ جنس هسته: همان‌طور که می‌دانیم، اصولاً سلف از یک سیم‌پیچ 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 سیم‌پیچ را به‌راحتی از خود عبور می‌دهند ؛ یعنی قابلیت نفوذپذیری (ضریب‌نفوذ) آن‌ها زیاد است. این مواد را معمولاً مواد **فرومغناطیسی** می‌نامند.

ضریب‌نفوذ هسته را با حرف μ (مو) مشخص می‌کنند. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تعیین کننده‌ی ضعف میدان مغناطیسی در هسته است. ضریب نفوذ مواد (μ) نسبت به ضریب نفوذ هوا (μ_0) سنجیده و به‌صورت $\mu = \mu_r . \mu_0$ بیان می‌شود.

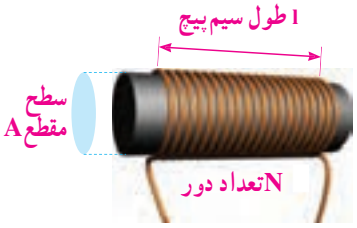
در این رابطه $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\left[\frac{H}{m}\right]$ و μ_r برای مواد فرومغناطیسی بزرگ‌تر از ۱۰۰ و برای مواد غیرمغناطیسی حدود یک است.

ب ــ عوامل فیزیکی: پارامترهای زیر ــ همان‌گونه که در شکل ۸ــ۱۴ نشان داده شده است ــ بر اندوکتانس سلف مؤثّرند.

۱ــ تعداد دور سیم‌پیچ

۲ــ طول سیم‌پیچ

۳ــ سطح مقطع هسته



شکل ۸ــ۱۴ــ پارامترهای مهم در یک سلف

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

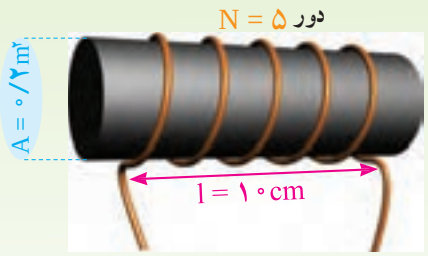
۲ــ Δi و Δt که دلتا آی و دلتا تی تلفظ می‌شود، همان تغییرات شدّت جریان و تغییرات زمان است.

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

$$L = \frac{\mu . A . N^2}{l}$$ [1]

L اندوکتانس بر حسب هانری، μ ضریب نفوذ هسته برحسب هانری بر متر، A سطح مقطع هسته برحسب مترمربع و l طول سیم‌پیچی برحسب متر است.

مثال ۲: با توجه به شکل ۹ــ۱۴ مقدار اندوکتانس بوبین چه قدر است؟



شکل ۹ــ۱۴

راه حل:

$$L = \frac{\mu . A . N^2}{l} = \frac{۴\pi \times ۱۰^{-۷} \times ۰/۲ \times ۵^2}{۱۰ \times ۱۰^{-۲}} = ۶۲/۸\mu H$$

۱۰ــ۱۴ــ ثابت زمانی

در یک مدار مقاومتیِ جریان مستقیم، شدّت جریان به طور لحظه‌ای تغییر می‌کند ؛ یعنی، با بستن کلید، جریان به‌طور ناگهانی از صفر به ماکزیمم و با قطع کلید، دفعتاً از ماکزیمم به صفر می‌رسد. در صورتی که اگر بوبینی به مدار اضافه شود، جریان دیگر نمی‌تواند به این صورت تغییر کند ؛ بنابراین، با بستن کلید، جریان سعی دارد به طور آنی افزایش یابد امّا نیروی ضدّمحرکه‌ی ایجاد شده با افزایش آنی جریان مخالفت می‌کند. در نتیجه، مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان به مقدار ماکزیمم خود برسد. با قطع کلید نیز جریان به‌طور آنی به صفر نمی‌رسد ؛ زیرا نیروی ضدّ 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 مدّت زمان رسیدن به این جریان، به وجود می‌آید که به وسیله‌ی کمیّتی به نام ثابت زمانی بیان می‌شود و آن را با حرف τ (تاو) نمایش می‌دهند. برحسب تعریف، ثابت زمانی به مدت زمانی گفته می‌شود که جریان در یک سلف به ۶۳/۲ درصد مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار ثابت زمانی در یک مدار سلفی به مقدار مقاومت (R) واندوکتانسِ (L) بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

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

همان‌گونه 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) برحسب هانری و مقاومت (R) برحسب اهم باشد، ثابت زمانی (τ) برحسب ثانیه به دست خواهد آمد.

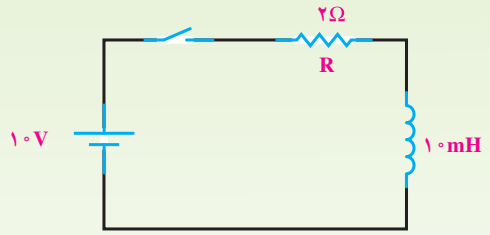
معمولاً ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد تا جریان در یک سلف به مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار درصد افزایش یا کاهش شدّت جریان را در ثابت‌های زمانی مختلف با توجه به منحنی‌های شکل ۱۱ــ۱۴ تحت عناوین صعود و نزول جریان بررسی می‌کنیم.

در ثابت زمانی اوّل جریانی به اندازه‌ی ۶۳/۲ درصد کل جریان نهایی از سیم‌پیچ می‌گذرد. در ثابت زمانی دوم، جریان به ۸۶/۴ درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم نیز به همین منوال. به‌طوری که در ثابت زمانی پنجم تقریباً به مقدار حداکثر خود می‌رسد. منحنی ۱۱ــ۱۴ ــ الف روند افزایش جریان‌و مقادیر هر ثابت زمانی را نشان می‌دهد.

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

با قطع جریان در مدار ــ همان گونه که در منحنی شکل ۱۱ــ۱۴ ــ ب مشهود است ــ در ثابت زمانی اوّل جریان به اندازه‌ی ۶۳/۲ درصد از مقدار ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند و به ۳۶/۸ درصد می‌رسد. در ثابت زمانی دوم به ۱۳/۶ درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم کاهش جریان به همین منوال ادامه پیدا می‌کند و در ثابت زمانی پنجم تقریباً به صفر می‌رسد.

مثال ۳: در مدار شکل ۱۰ــ۱۴ پس از بستن کلید، مدت زمانی را که شدّت جریان به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، حساب کنید.



شکل ۱۰ــ۱۴

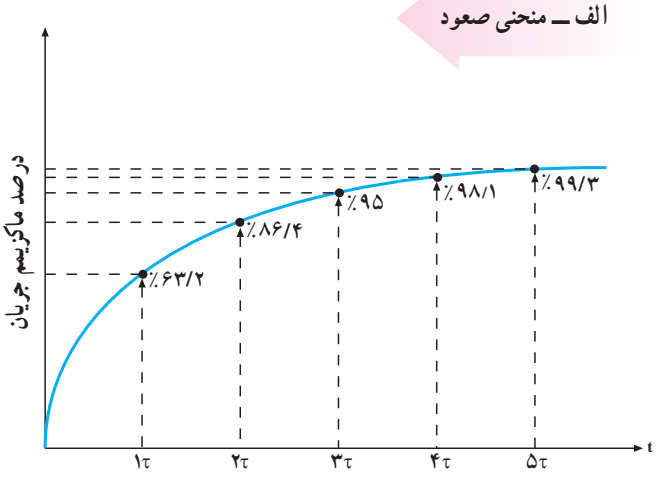
حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{۱۰\times۱۰^{-۳}(H)}{۲(\Omega)} = ۵(ms)$$

$$۵\tau = ۵\times۵ms = ۲۵(ms)$$

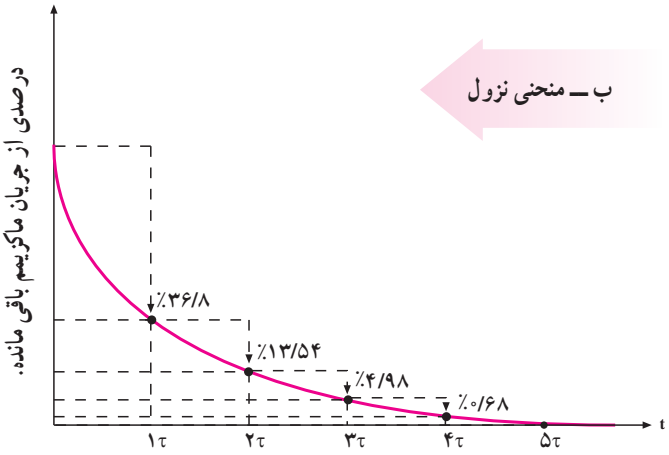
در طول ۵ ثابت زمانی، جریان به ۹۹٪ مقدار ماکزیمم می‌رسد. این مقدار عملاً همان ۱۰۰٪ است.

الف ــ منحنی صعود



در ۵ ثابت زمانی، جریان به کم‌تر از ۱٪ مقدار ماکزیمم سقوط می‌کند. که عملاً همان صفر است.

ب ــ منحنی نزول



شکل ۱۱ــ۱۴ــ منحنی صعود و نزول شدت جریان در مدار سلفی

مثال ۴: در مثال ۳ اگر بوبینی با اندوکتانس ۲۰mH به جای بوبین ۱۰mH قرار گیرد، ثابت زمانی چگونه تغییر می‌کند؟

راه حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{۲۰\times۱۰^{-۳}}{۲} = ۱۰(ms)$$

با توجه به رابطه‌ی فوق و مقدار به دست آمده، ثابت زمانی دوبرابر می‌شود.

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 اوّل

$$I_۱ = ۱۰\times\frac{۶۳/۲}{۱۰۰} = ۶/۳۲(A)$$

باقیمانده‌ی جریان $۱۰-۶/۳۲ = ۳/۶۸(A)$

افزایش جریان در ثابت زمانی دوم

$$۳/۶۸\times\frac{۶۳/۲}{۱۰۰} = ۲/۳۲(A)$$

مقدار جریان در پایان ثابت زمانی دوم

$$I_۲ = ۶/۳۲+۲/۳۲ = ۸/۶۴(A)$$

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

۱۱ــ۱۴ــ بوبین در جریان متناوب

برخلاف مدارهای DC که در آن‌ها جریان فقط هنگام باز وبسته شدن مدار تغییر می‌کند، در مدارهای AC جریان پی‌درپی تغییر می‌کند. لذا اندوکتانس اثری دائمی بر کار مدار می‌گذارد ؛ یعنی، از لحظه‌ی بسته شدن مدار تا لحظه‌ی قطع مدار اندوکتانس بر عملکرد مدار تأثیر دارد.

بوبین‌ها معمولاً ایده‌آل نیستند. لذا هر بوبین در مدار AC علاوه بر خاصیّت القایی از خاصیّت اهمی نیز برخوردار است. به علاوه، منبع و سیم‌های رابط نیز مقداری مقاومت دارند. حال اگر این مقاومت‌ها به قدری کوچک باشند که اثرشان بر مدار در مقابل اثر اندوکتانس ناچیز باشد، می‌توان فقط اثر سلفی را در مدار در نظر گرفت و از اثر اهمی آن صرف‌نظر کرد.

۱۲ــ۱۴ــ مقاومت القایی

می‌دانیم که مقاومت اهمی در مقابل جریان DC و AC به‌ازای ولتاژ ثابتی عکس‌العمل مشابهی دارد امّا اگر مداری تنها شامل اندوکتانس باشد، مقدار جریان به نیروی ضدّ محرکه‌ی ایجاد شده بستگی دارد که با عبور جریان مخالفت می‌کند امّا چون نیروی ضدّ محرکه (Cemf) برحسب ولت بیان می‌شود، نمی‌توان آن را به جای اهم قرار داد و جریان را به دست آورد. لذا تأثیر نیروی ضدّ محرکه بر مدار را می‌توان بر حسب اهم به دست آورد. این اثر را **مقاومت القایی** می‌گویند و با X_L نمایش می‌دهند.

مقدار نیروی ضدّ محرکه‌ی ایجاد شده در مدار، توسط مقدار L و فرکانس جریان عبوری از مدار، تعیین می‌شود ؛ بنابراین، مقاومت القایی نیز باید وابسته به همین عوامل باشد. یعنی :

$$X_L = ۲\pi f L$$

در رابطه‌ی فوق، X_L مقاومت القایی بر حسب اهم، ۲π عدد ثابت و برابر ۶/۲۸ و f فرکانس جریان برحسب هرتز و L اندوکتانس است که برحسب هانری در فرمول قرار می‌گیرد. با توجه به رابطه‌ی یاد شده هر چه فرکانس یا اندوکتانس بیش‌تر باشد، مقاومت القایی بیش‌تر و هر چه فرکانس کم‌تر باشد، مقدار مقاومت القایی کم‌تر خواهد بود.

از طرفی، $۲\pi f$ همان سرعت زاویه‌ای(ω) است که سرعت تغییرات جریان را نمایش می‌دهد و برحسب رادیان بر ثانیه بیان می‌شود. هرقدر جریان با سرعت بیش‌تری تغییر کند، افت ولتاژ القایی در دو سر سلف نیز زیادتر خواهد شد. بنابراین، با توجّه به قانون اهم می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت.

$$X_L = ۲\pi f L = \frac{U_L}{I_L}$$

۱۳ــ۱۴ــ اتّصال بوبین‌ها

برای دست‌یابی به اندوکتانس مناسب، اغلب مجبوریم بوبین‌ها را به طور سری یا موازی ببندیم. در چنین مواردی، بدون درنظر گرفتن اثر میدان‌ها بر یک دیگر، اندوکتانسِ کل عیناً شبیه مقاومت معادل در مدارهای سری و موازی به دست می‌آید.

الف ــ اتّصال سری بوبین‌ها: با اتّصال پی‌درپی (متوالی) بوبین‌ها، اندوکتانس کل برابر مجموع تک‌تک اندوکتانس‌های موجود در مدار است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$L_t = L_۱ + L_۲ + \quad + L_n$$

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

$$L_t = nL$$

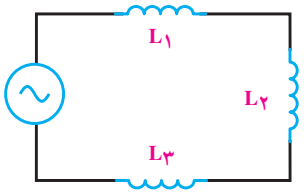
ب ــ اتّصال موازی بوبین‌ها: در اتّصال موازی بوبین‌ها اندوکتانس کل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{۱}{L_t} = \frac{۱}{L_۱} + \frac{۱}{L_۲} + \quad + \frac{۱}{L_n}$$

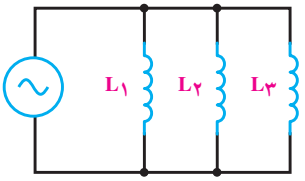
در صورت مساوی بودن بوبین‌ها اندوکتانس کل برای n بوبین، برابر است با

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

شکل‌های ۱۲ــ۱۴ و ۱۳ــ۱۴ اتّصال سری و موازی را برای سه بوبین که با فاصله‌ی زیاد از یک دیگر قرار دارند (بدون داشتن ارتباط مغناطیسی)، نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ــ۱۴ ــ اتصال سری بوبین‌ها



شکل ۱۳ــ۱۴ ــ 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.

مدار سری $\boxed{X_{L_t} = X_{L_۱} + X_{L_۲} + \quad + X_{L_n}}$

مدار موازی $\boxed{\frac{۱}{X_{L_t}} = \frac{۱}{X_{L_۱}} + \frac{۱}{X_{L_۲}} + \quad + \frac{۱}{X_{L_n}}}$

تذکر: در هر یک از اتصالات سری یا موازی بوبین‌ها مقاومت القایی کل را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد.

$$\boxed{X_{L_t} = ۲\pi f L_t = W.L_t}$$

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:

۱ــ اتّصال سری

$$L_t = L_۱ + L_۲ + L_۳$$

$$L_t = ۱۵ + ۶ + ۱۰ = ۳۱(mH)$$

۲ــ اتّصال موازی

$$\frac{۱}{L_t} = \frac{۱}{L_۱} + \frac{۱}{L_۲} + \frac{۱}{L_۳} = \frac{۱}{۱۵} + \frac{۱}{۶} + \frac{۱}{۱۰}$$

$$\frac{۱}{L_t} = \frac{۲+۵+۳}{۳۰} = \frac{۱۰}{۳۰}(mH)$$

$$L_t = \frac{۳۰}{۱۰} = ۳(mH)$$

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

۱ــ حالت سری

$$L_t = ۳۱(mH)$$

$$XL_t = ۲\pi f L_t = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۱۰۰۰ \times ۳۱ \times ۱۰^{-۳}(\Omega)$$

$$XL_t = ۱۹۴/۶۸\Omega$$

۲ــ حالت موازی

$$L_t = ۳mH$$

$$XL_t = ۲\pi f L_t = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۱۰۰۰ \times ۳ \times ۱۰^{-۳}\Omega$$

$$XL_t = ۱۸/۸۴\Omega$$

۱۴ــ۱۴ــ القای متقابل

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

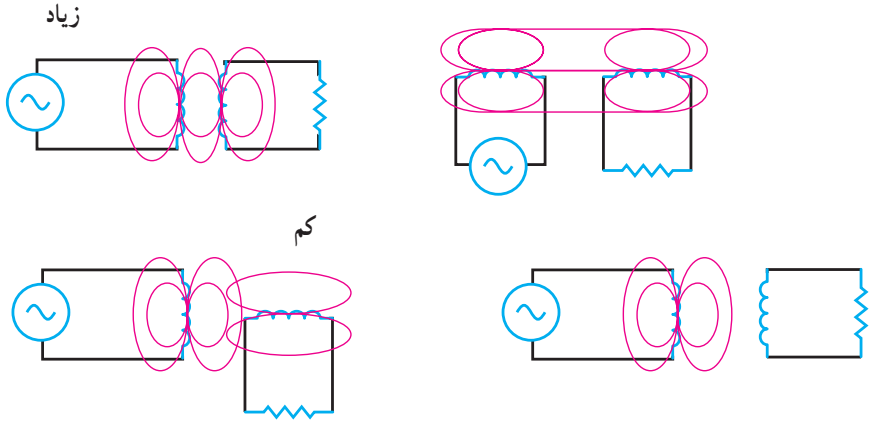
این ارتباط، متقابل است.

مقدار ولتاژ القایی ناشی از القای متقابلِ دو بوبین، به وضع قرار گرفتن آن‌ها نسبت به یک‌دیگر و تعداد خطوط قوایی که ارتباط بین دو بوبین را برقرار می‌کنند، بستگی دارد. درجه‌ی ارتباط خطوط قوا، توسط ضریبی به نام **ضریب تزویج** بیان می‌شود. وقتی همه‌ی 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 کم‌تر از یک خواهد بود. در صورتی که بین دو بوبین هیچ‌گونه القای متقابلی وجود نداشته باشد، ضریب تزویج برابر صفر خواهد بود.

هرگاه ضریب تزویج ــ که آن را با حرف k نمایش می‌دهند ــ برابر یک باشد، تزویج را کامل یا سفت گویند. چنان‌چه ضریب تزویج (k) کم‌تر از یک باشد، تزویج را ناقص یا سست می‌گویند.

تزویج حداکثر (واحد) زمانی اتفاق می‌افتد که خطوط قوای یک بوبین، تمام حلقه‌های بوبین دیگر را قطع کند.

شکل ۱۴ــ۱۴ درجه‌ی تزویج را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ــ۱۴ــ نمایش درجه‌ی تزویج بین بوبین‌ها

برای نشان دادن میزان القای متقابل بین دو بوبین از ضریبی استفاده می‌شود، که آن‌را ضریب القای متقابل می‌نامند و با حرف M نمایش می‌دهند. ضریب القای متقابل به اندوکتانس دو سیم‌پیچ و ضریب تزویج بین آن‌ها وابسته است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

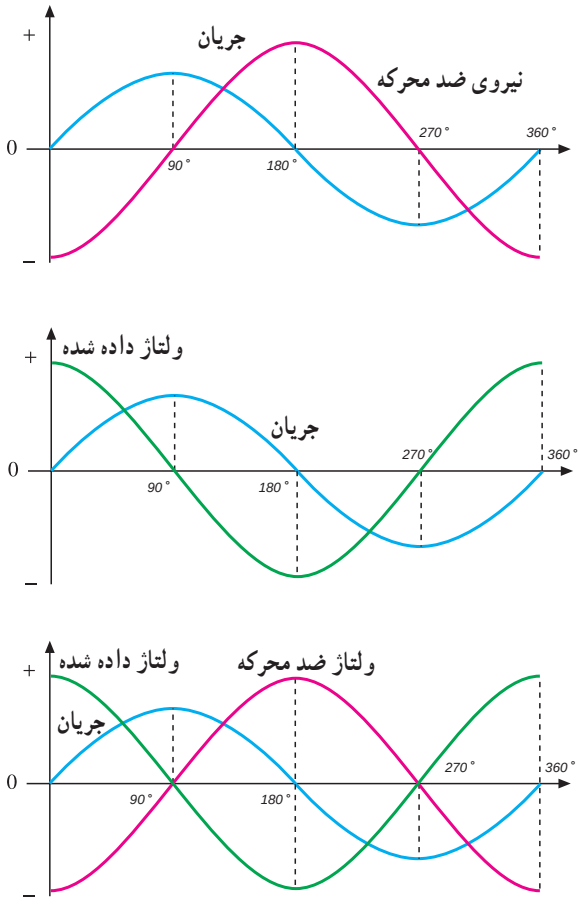
$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

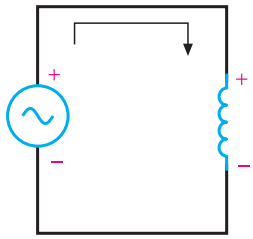
در این رابطه M ضریب القای متقابل بر حسب هانری L_1 و L_2 اندوکتانس بوبین‌ها برحسب هانری و k ضریب تزویج است که بدون واحد می‌باشد.

۱۵ــ۱۴ــ 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 می‌باشد. امّا اگر مداری شامل اندوکتانس باشد، نیروی ضدّ محرکه و تأخیر ایجاد شده توسط اندوکتانس در جریان، بین ولتاژ داده شده و جریان عبوری از آن، اختلاف فاز ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، جهت نیروی ضدّمحرکه چنان است که همیشه با تغییرات جریان مخالفت می‌کند. به علاوه، می‌دانیم که ولتاژ داده شده با ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ همفاز نیستند و کاملاً در جهت مخالف یک دیگرند. منحنی‌های شکل ۱۵ــ۱۴ ارتباط بین منحنی‌های جریان، ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه را به خوبی نشان می‌دهد. زمانی که دامنه‌ی جریان ماکزیمم است، به دلیل اینکه تغییرات آن صفر است، دامنه‌ی نیروی ضدّ محرکه صفر است. زمانی که جریان از صفر می‌گذرد، تغییرات آن بیش‌ترین مقدار را دارا است. پس نیروی ضدّ محرکه بسته به جهت تغییرات جریان، ماکزیمم یا مینیمم می‌باشد. به تعبیر دیگر در ۹۰ و ۲۷۰ درجه، جریان تغییرات ناچیزی دارد و ولتاژ داده شده صفر است. لذا نیروی ضد محرکه‌ای ایجاد نمی‌شود. در صفر، ۱۸۰ و ۳۶۰ درجه تغییراتِ جریان، زیاد و ولتاژ داده

شده ماکزیمم است. لذا حداکثر نیروی ضدّ محرکه در خلاف جهت ولتاژ داده شده تولید می‌شود.





شکل ۱۵ــ۱۴ــ نمایش منحنی‌های جریان ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه

۱۶ــ۱۴ــ انرژی ذخیره شده در سلف

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

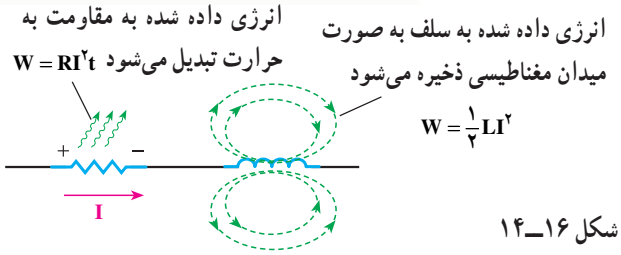
$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

در رابطه‌ی فوق I برحسب آمپر، L برحسب هانری و انرژی ذخیره شده، (W) برحسب وات ثانیه یا ژول است.

مثال ۸ : از یک سیم‌پیچ با ضریب خودالقایی ۳ هانری، جریان مستقیمی برابر با ۶۰ آمپر می‌گذرد. هنگام قطع این سیم‌پیچ چه قدر انرژی آزاد می‌شود؟

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

$$W = \frac{1}{2} \times 3 \times (60)^2 = \frac{3 \times 3600}{2} = 5400\,j = 5/4\,kj$$



شکل ۱۶ــ۱۴

پرسش

۱ــ خودالقایی و ضریب خودالقایی را تعریف کنید.
۲ــ تغییرات جریان چه اثراتی بر سیم‌پیچ می‌گذارد؟
۳ــ قانون لنز چیست؟
۴ــ اثرات جریان DC و AC را بر سیم‌پیچ با یک دیگر مقایسه کنید.
۵ــ فرق بین emf و Cemf چیست؟
۶ــ عوامل مؤثّر بر مقدار ضریب القا و خودالقا کدام‌اند؟
۷ــ القای متقابل یعنی چه؟
۸ــ اثرات جریان DC در القای متقابل چیست؟
۹ــ اثرات هسته را در سیم‌پیچ‌ها توضیح دهید.
۱۰ــ انرژی ذخیره شده در سلف یعنی چه؟
۱۱ــ اثر مقاومت القایی را در جریان متناوب توضیح دهید.
۱۲ــ دلیل سری یا موازی بستن سیم‌پیچ‌ها را بیان کنید.
۱۳ــ رابطه‌ی فازی بین ولتاژ و جریان یک بوبین چیست؟ چرا؟

تمرین

۱ــ سیم‌پیچی به طول ۵۰ سانتی‌متر و سطح مقطع ۰/۰۲ متر مربع با هسته‌ی هوا دارای ۱۰۰۰ دور است ؛ اولاً ضریب خودالقایی آن تقریباً چند میلی هانری است؟ ثانیاً اگر بخواهیم ضریب خود القا دو برابر شود، تعداد دور سیم‌پیچ باید چند دور شود؟
(جواب : ۵۰mH و دور ۱۴۱۰)

۲ــ دو بوبین با ضریب خودالقای ۱۰۰ میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی به هم وصل می‌کنیم. ضریب خودالقایی کل در هر دو حالت چه قدر می‌شود؟
(جواب : ۲۰۰ و ۵۰ میلی هانری)

۳ــ ضریب خود القایی سیم‌پیچی ۲۰mH و جریان عبوری از آن ۱۰ آمپر است. چه مقدار انرژی در سیم‌پیچ ذخیره می‌شود؟
(جواب : ژول ۱ =W)

۴ــ چهار بوبین با ضریب‌های خودالقای ۵۰، ۲۵، ۱۰۰ و ۲۵ میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی ببندید. ضریب خودالقای کل را در هر حالت به دست آورید.

(جواب : ۲۰۰ و ۹ میلی هانری)

۵ــ از یک بوبین با ضریب خودالقایی ۱۰mH جریان متناوبی با فرکانس ۵۰ هرتز عبور می‌کند. مقاومت القایی بوبین چند اهم است؟ اگر فرکانس به یک کیلو هرتز تغییر یابد، مقاومت القایی بوبین چند اهم می‌شود؟

(جواب : ۳/۱۴ و ۶۲/۸)

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

(جواب : ۹- و ۹۰۰۰-)

۷ــ یک بوبین با ضریب خودالقایی ۲ هانری و مقاومت اهمی ۰/۵ اهمی در دست است. اگر این بوبین را به ولتاژ ۱/۵ 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)