آزمایش ۹

ترانسفورماتور

بررسی تجربی ترانسفورماتور و مقایسه با یک ترانسفورماتور ایده‌آل

تئوری آزمایش

توان متوسط در مدار جریان متناوب برابر است با: $P_{av} = \varepsilon_{rms} i_{rms} \cos\varphi$ [۱] که ε_{rms} جذر میانگین مربعی ε و i_{rms} جذر میانگین مربعی جریان مدار است. به ازاء $\cos\varphi = ۱$، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ صفر است و برای بدست آوردن یک توان معین می‌توان ε_{rms} و i_{rms} را به گونه‌ای انتخاب کرد که حاصلضرب آنها مقدار ثابتی باشد. بنابراین به وسیله‌ای نیاز داریم که با توجه به محدودیتهای فنی بتواند اختلاف پتانسیل مدار را کاهش یا افزایش دهد و همزمان حاصلضرب $\varepsilon_{rms} i_{rms}$ را ثابت نگه دارد. ترانسفورماتور جریان متناوب چنین وسیله‌ای است.

در مرکز تولید برق (نیروگاه) و در محل مصرف (منزل یا کارخانه) بنا به دلایل ایمنی بهتر است با ولتاژهای نسبتاً کم کار کنیم از طرف دیگر برای انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاه تا محل مصرف بهتر است که جریان کمترین مقدار ممکن باشد تا تلفات اهمی خطوط انتقال به حداقل برسد. از ترانسفورماتورهای افزاینده برای افزایش ولتاژ مولدهای برق استفاده می‌شود، سپس انرژی را با این ولتاژ انتقال می‌دهند. در انتهای خط از ترانسفورماتورهای کاهنده ولتاژ استفاده کرده و اختلاف پتانسیل را تا حد قابل مصرف کاهش می‌دهند.

قابل تغییر بودن ولتاژ به وسیله ترانسفورماتورها مهم‌ترین علت استفاده از آنها در صنعت است. در صنعت جوشکاری که حرارتی فوق‌العاده مورد نیاز است، باید مقدار جریان زیاد و ولتاژ نسبتاً کم باشد. در این مورد از ترانسفورماتور کاهنده استفاده می‌شود.

ساده‌ترین نوع ترانسفورماتور در شکل ۱ نشان داده شده است این ترانسفورماتور از دو سیم‌پیچ اولیه و ثانویه که بر روی یک هسته با خاصیت *نفوذپذیری مغناطیسی* بالا (مانند آهن) پیچیده شده‌اند، تشکیل شده است. سیم-پیچ اولیه با $N_۱$ دور به منبع تغذیه متناوب با نیروی محرکه الکتریکی ε که از رابطه $\varepsilon = \varepsilon_m \sin\omega t$ بدست می‌آید، وصل شده‌است. سیم‌پیچ ثانویه با $N_۲$ دور، تا زمانی که کلید S باز است در حالت مدار باز است و جریانی از آن عبور نمی‌کند. فرض می‌کنیم مقاومت سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه و همچنین تلفات مغناطیسی در هسته آهنی قابل صرفنظر کردن است و سیم‌پیچ ثانویه در حالت مدار باز است. در این وضعیت سیم‌پیچ اولیه یک

[۱] برای مطالعه بیشتر به کتاب فیزیک هالیدی، فصل جریان‌های متناوب مراجعه شود.

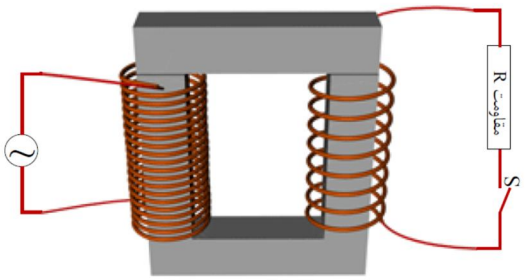
القاگر است و با عبور جریان متناوب از آن، شار مغناطیسی متناوب در هسته آهنی القا می‌شود. فرض کنید تمام این شار مغناطیسی از سیم‌پیچ ثانویه عبور می‌کند، با توجه به قانون القای فاراده نیروی محرکه الکتریکی هر دور، برای هر دور سیم‌پیچ اولیه و ثانویه یکسان است

$$\left(-\frac{d\Phi_B}{dt}\right)_{rms} = \frac{V_1\, rms}{N_1} = \frac{V_2\, rms}{N_2}$$

یا

$$V_2\, rms = V_1\, rms \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \qquad (1)$$

اگر $N_2 > N_1$ باشد، ترانسفورماتور افزاینده و اگر $N_2 < N_1$ باشد ترانسفورماتور کاهنده است.



شکل ۱

وقتی کلید S بسته می‌شود از مدار ثانویه جریان عبور می‌کند. این جریان شار مغناطیسی متناوب خود را در هسته آهنی القا می‌کند و این شار با توجه به قانون فاراده و قانون لنز یک نیروی محرکه الکتریکی مخالف در سیم‌پیچ اولیه ایجاد می‌کند. بنابراین هر دو سیم‌پیچ به صورت القاگر متقابل کاملاً جفت شده عمل می‌کنند. به علت ثابت بودن نیروی محرکه الکتریکی سیم‌پیچ اولیه، جریان در سیم‌پیچ اولیه به صورتی تغییر می‌کند که نیروی محرکه الکتریکی مخالف تولید شده به وسیله سیم‌پیچ ثانویه در آن را، خنثی کند. به ویژه در یک ترانسفورماتور ایده‌آل اختلاف فاز بین جریان و اختلاف پتانسیل به سمت صفر میل کرده و در نتیجه ضریب توان $\cos\varphi$ به سمت یک میل می‌کند. بنابراین برای ترانسفورماتور ایده‌آل

$$V_1\, rms I_1\, rms = V_2\, rms I_2\, rms \qquad (2)$$

یعنی توان داده شده بوسیله مولد به سیم‌پیچ اولیه با توان مصرف شده در بار مقاومتی سیم‌پیچ ثانویه برابر است.

از ترکیب معادله‌های (۱) و (۲) نتیجه می‌شود:

$$\frac{I_1\, rms}{I_2\, rms} = \frac{N_2}{N_1}$$

یعنی نسبت جریان‌ها به نسبت عکس تعداد حلقه‌هاست.

تلفات در ترانسفورماتور

ترانسفورماتورها در عمل دارای تلفات هستند یعنی توان خروجی برابر توان ورودی نیست. بازده ترانسفورماتور(R) را می‌توان به وسیله اندازه‌گیری توان ورودی و خروجی بدست آورد:

$$R = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}}$$

تلفات در یک ترانسفورماتور از دو قسمت تشکیل شده است، ۱) تلفات در هسته آهن ۲) تلفات در سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچ ثانویه (تلفات مس).

۱) تلفات در هسته آهن از سه عامل زیر ناشی می‌شود:

– **تلفات هیسترزیس**[۲]: تلفاتی است که در اثر کاهش و افزایش میدان مغناطیسی در هسته به وجود می‌آید. جریانی که از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور عبور می‌کند متناوب است بنابراین با افزایش جریان، میدان مغناطیسی در یک جهت معین در هسته به وجود می آید و وقتی جریان کاهش می‌یابد میدان مغناطیسی نیز در جهت ذکر شده کاهش می‌یابد. با کاهش جریان بازاء جریان صفر میدان مغناطیسی هسته صفر نمی‌شود. این مقدار باقی مانده را پسماند مغناطیسی می‌نامند. حذف پسماند مغناطیسی همواره با از دست دادن مقداری انرژی همراه است. تلفات حاصل از پسماند مغناطیسی به بسامد جریان بستگی دارد و با افزایش بسامد جریان تلفات هیسترزیس نیز افزایش می‌یابد. با انتخاب جنس هسته ترانسفورماتور از آلیاژ مناسب آهن (آهن وچهار درصد سیلیس) می‌توان تلفات هیسترزیس را کاهش داد.

– **تلفات جریان فوکو**: با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور، شار مغناطیسی در هسته به طور متناوب تغییر می‌کند. طبق قانون لنز، جریانی به نام جریان فوکو در هسته ایجاد می شود که با عامل تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند و باعث کاهش شار مغناطیسی می‌شود، در نتیجه توان خروجی ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. جریان فوکو همچنین باعث گرم شدن هسته می‌شود. اندازه جریان فوکو بستگی به مقاومت الکتریکی هسته دارد، بنابراین برای کاهش تلفات حاصل از جریان فوکو، هسته را از آلیاژ مناسب انتخاب کرده و آن را از ورقه هایی که نسبت به همدیگر عایق هستند می‌سازند. تلفات حاصل از جریان فوکو همچنین به بسامد جریانی که از سیم‌پیچ اولیه عبور می‌کند، بستگی دارد ومتناسب با مجذور بسامد جریان است.

---

[۲] Hysteresis

– **تلفات پراکندگی شار مغناطیسی**: اگر در مسیر شار مغناطیسی یک شکستگی وجود داشته یا سطح مقطع هسته کوچک باشد، مقداری از شار مغناطیسی ازهسته ترانسفورماتور خارج می‌شود، این شار پراکنده شده، از سیم‌پیچ ثانویه نخواهد گذشت و باعث کاهش توان می‌گردد.

۲) تلفات مس: به علت مقاومت اهمی در سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، مقداری از انرژی به صورت حرارت در سیم‌پیچ‌ها تلف می‌شود. با کاهش مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ‌ها تلفات مس را می‌توان کاهش داد.

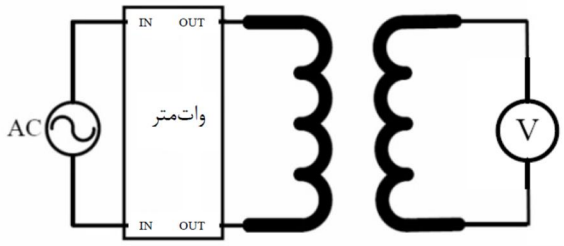
وسایل آزمایش

منبع تغذیه متناوب (AC) ، هسته آهنی U شکل، سیم‌پیچ (دو عدد)، رئوستا، وات‌متر (دو عدد)، ولت‌متر، سیم رابط (۱۰عدد) .

روش آزمایش

اندازه‌گیری جریان، توان و ولتاژ در وضعیتی که درمدار سیم‌پیچ ثانویه مصرف کننده نباشد:

- مدار آزمایش را مطابق شکل ۲ ببندید (**دقت کنید قبل از روشن کردن منبع تغذیه، ولتاژ آن روی صفر باشد تا دستگاه آسیب نبیند و ولتاژ نیز به آرامی افزایش یابد**).
- ولتاژ سیم‌پیچ اولیه را در بازه ۳۰-۱۵ ولت تغییردهید و جریان سیم‌پیچ اولیه، توان ورودی، ولتاژ سیم‌پیچ ثانویه را اندازه‌گیری کرده، در جدول ۱ ثبت کنید.



شکل ۲

- منحنی نمایش تغییرات I_1 و P_1 را بر حسب V_1 رسم کرده و توضیح دهید.

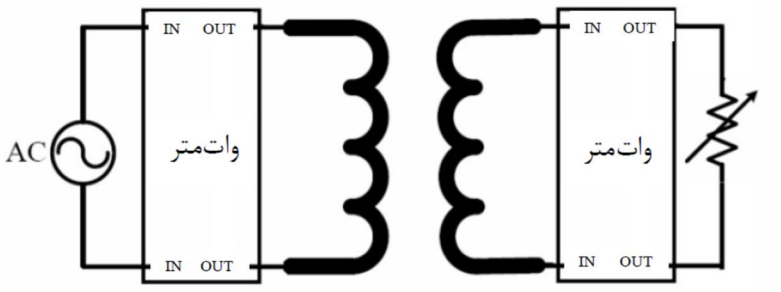
- منحنی نمایش تغییرات $V_۲$ بر حسب $V_۱$ را با روش کمترین مربعات رسم کنید و با محاسبه شیب خط، درستی رابطه $V_۲ = V_۱ \left(\frac{N_۲}{N_۱}\right)$ را بررسی کنید.

جدول ۱

$N_۱ = ۲۵۰$ و $N_۲ = ۵۰۰$				
$V_۱$ (V)	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
$I_۱$ (mA)				
$P_۱$ (W)				
$V_۲$ (V)				

اندازه‌گیری جریان، توان و ولتاژ در وضعیتی که درمدار سیم‌پیچ ثانویه مصرف کننده باشد :

- با قرار دادن رئوستا در مدار سیم‌پیچ ثانویه، مدار آزمایش را مطابق شکل ۳ ببندید.
- با تغییر مقاومت رئوستا جریان سیم‌پیچ ثانویه را در بازه صفر تا یک آمپر تغییر دهید و به ازاء هر جریان P_2، $I_۱$ و P_1 را اندازه‌گیری کرده و در جدول ۲ ثبت کنید.
- منحنی نمایش تغییرات $I_۱$ بر حسب $I_۲$ را با روش کمترین مربعات رسم کنید و با محاسبه شیب خط، درستی رابطه $I_۱ = I_۲ \left(\frac{N_۲}{N_۱}\right)$ را بررسی کنید.
- اختلاف توان‌های اندازه‌گیری شده $P_۱$ و $P_۲$ مربوط به چه نوع تلفاتی در ترانسفورماتور هستند؟ توضیح دهید. (برای یک جریان مشخص)



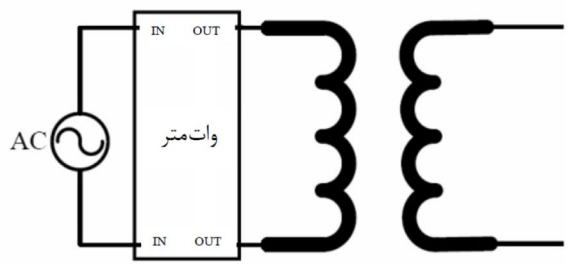
شکل ۳

جدول ۲

$V_۱ = ۳۰$ (V) و $N_۲ = ۲۵۰$ و $N_۱ = ۵۰۰$				
$I_۲$ (mA)	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰
$P_۲$ (W)				
$I_۱$ (mA)				
$P_۱$ (W)				

سیم‌پیچ ثانویه در وضعیت اتصال باز

- مدار آزمایش را مطابق شکل ۴ ببندید (سیم‌پیچ ثانویه در وضعیت مدار باز است).
- جریان سیم‌پیچ اولیه و توان ورودی را اندازه‌گیری کرده، در جدول ۳ ثبت کنید.



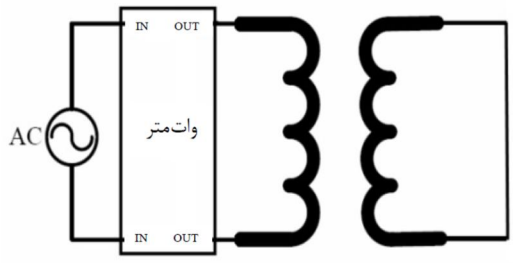
شکل ۴

جدول ۳

$V_۱ = ۳۰$ (V) و $N_۲ = ۲۵۰$ و $N_۱ = ۵۰۰$	
$I_۱ =$ (mA)	$P_۱ =$ (W)

سیم‌پیچ ثانویه در وضعیت اتصال کوتاه

- ولتاژ منبع تغذیه را روی صفر تنظیم کرده و دو انتهای سیم‌پیچ ثانویه را به هم وصل کنید (شکل۵).
- با تغییر ولتاژ منبع تغذیه I_1 را برابر با I_1 آخرین ستون جدول۲ تنظیم کرده و جدول ۴ را کامل کنید.
- آیا مجموع توانهای اندازه گیری شده در حالت اتصال باز و اتصال کوتاه (جدول۳ و جدول ۴)، با اختلاف توان ورودی وخروجی در آخرین ستون جدول ۲، برابر است؟ توضیح دهید.



شکل ۵

جدول ۴

$N_۱ = ۵۰۰$ و $N_۲ = ۲۵۰$		
$I_۱ =$ (mA) معلوم	$V_۱ =$ (V)	$P_۱ =$ (W)