



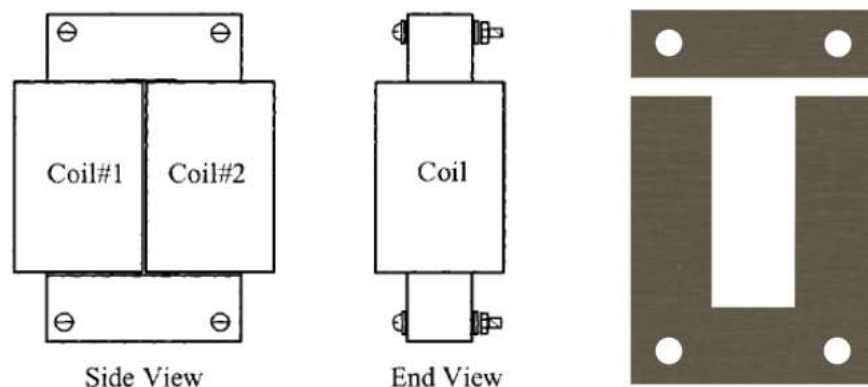
## بخش اول

هدف از این قسمت شبیه سازی مدار مغناطیسی یک ترانسفورماتور و یافتن مدار معادل آن است. شبیه سازی مدار مغناطیسی در نرم افزار MATLAB و بخش SIMULINK آن انجام می شود.

قصد داریم یک ترانسفورماتور تک فاز  $230\text{ V}/40\text{ V}$  طراحی کنیم. فراموش نکنید که زمانی که از یک ولتاژ در مهندسی قدرت صحبت می شود منظور مقدار موثر ولتاژ است. ترانسفورماتور طراحی شده را قرار است از برق شهر تغذیه کرده و در سمت دیگر یک مجموعه ای که با ولتاژ ac با مقدار موثر  $40\text{ V}$  کار می کند را راه اندازی کنیم.

### انتخاب شکل هسته:

برای ساخت این ترانسفورماتور به سراغ هسته های UI رفته ایم. نمونه این هسته و فرم نهایی ترانسفورماتوری که قرار است ساخته شود در شکل ۱ نمایش داده شده است.



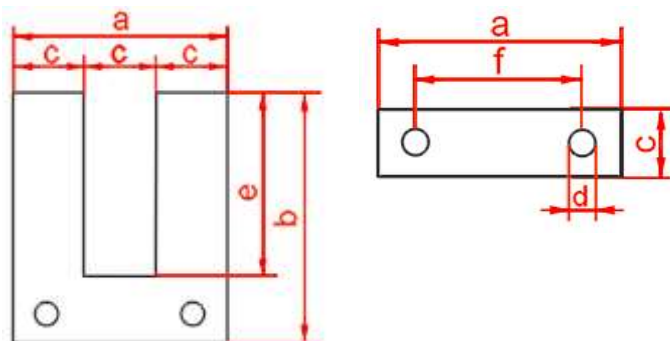
شکل ۱: تصویر هسته UI و شکل نهایی ترانسفورماتور مدنظر.

همان طور که دیده می شود سیم پیچ اولیه بر روی یک ساق و سیم پیچ ثانویه بر روی ساق دیگر بسته خواهد شد. هسته های UI اندازه های متفاوت دارند. شکل ۲، اندازه های مختلف هسته های UI و ابعاد آن را به mm نشان می دهد. برای کاربرد ما هسته UI 180 مناسب به نظر می رسد. از روی این ابعاد می توانید  $L_m$  یا طول متوسط مدار مغناطیسی را تعیین کنید.



به نام خدا

پروژه ماشین های الکتریکی ۱



UI	a	b	c	d	e	f
150 UI	150	200	50	12	150	100
180 UI	180	240	60	12	180	120
210 UI	210	280	70	15	210	140
240 UI	240	320	80	15	240	160

شکل ۲: ابعاد مختلف هسته UI. ابعاد به mm است.

### منحنی BH هسته

نوع هسته انتخابی از جنس Electrical-Steel-NGO-35PN250 است که مشخصه BH آن به صورت شکل ۳ است. از آنجا که در طول پروژه احتیاج به استفاده از مشخصه این هسته داریم، تلاش کردیم تا به کمک مجموعه Curve fitting از نرم افزار MATLAB یک تابع ریاضی به مجموعه نشان داده شده برازش کنیم. ما برای برازش تابع نمایی را انتخاب کرده ایم. تصاویر ابزار curve fitting و منحنی برازش شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، توابع ریاضی که می توانیم از آنها استفاده کنیم به صورت زیر است:

$$B = 1.578 \times \exp(9.69e - 6 \times H) - 1.578 \times \exp(-0.00859 \times H)$$

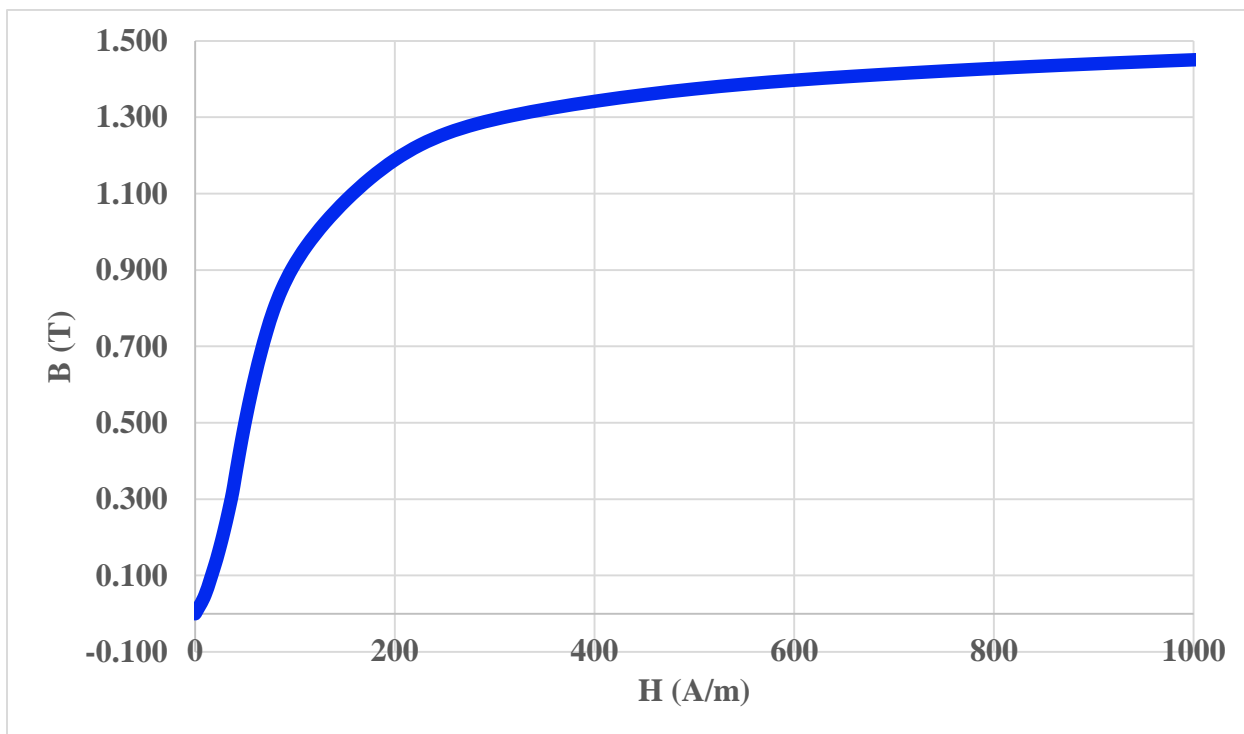
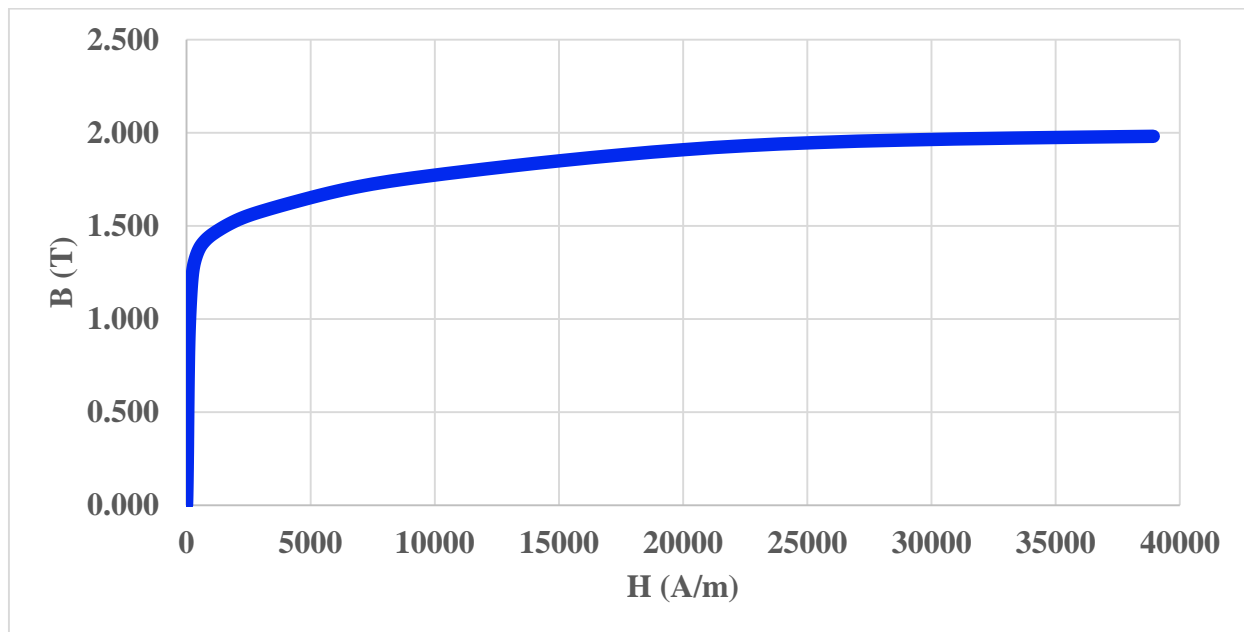
$$H = 0.1431 \times \exp(6.253 \times B) - 0.1431$$

دقت کنید که توابع به نحوی تغییر داده شده اند که منحنی BH از مبدا عبور کند.



به نام خدا

پروژه ماشین های الکتریکی ۱

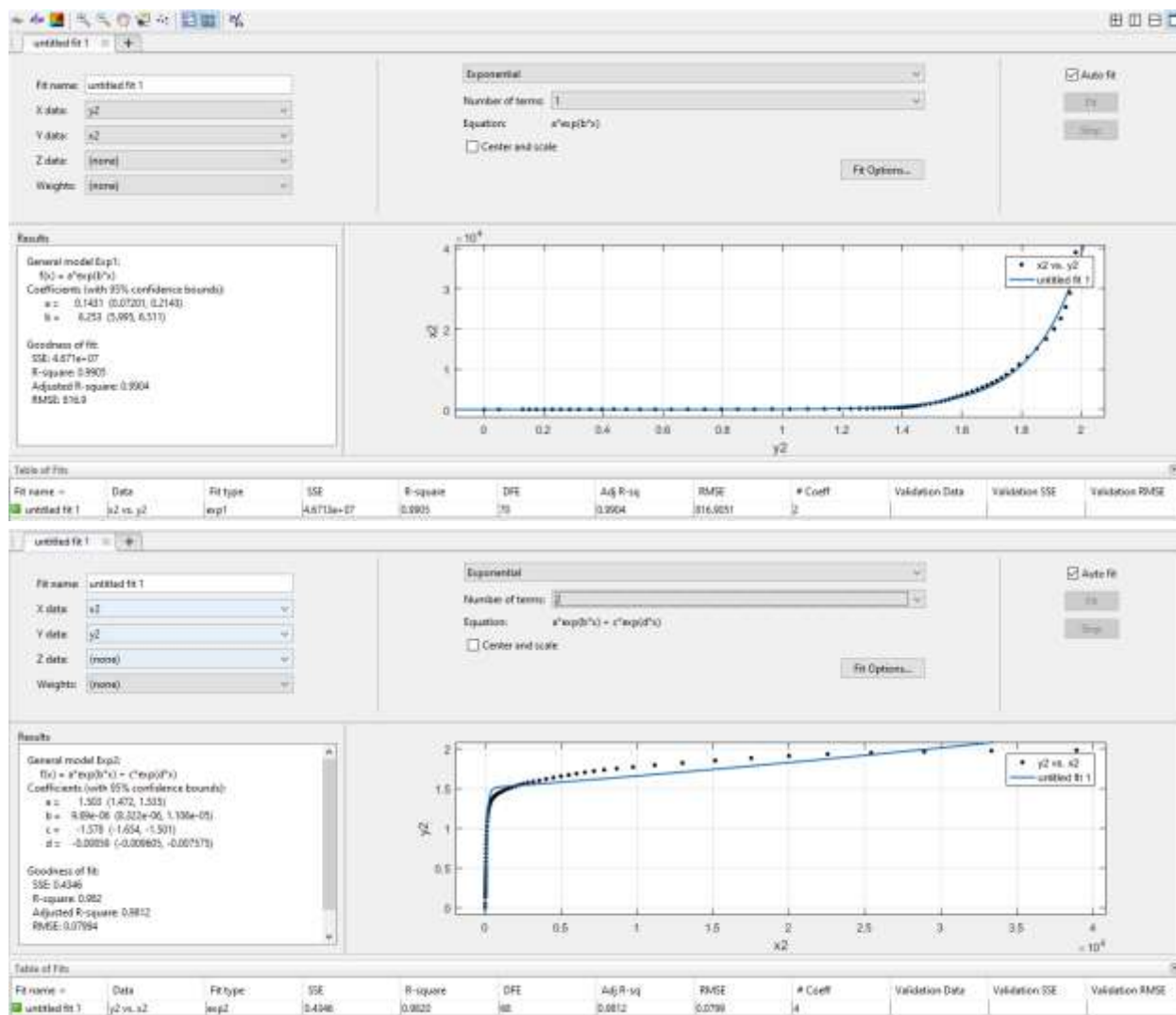


شکل ۳: منحنی BH هسته از جنس Electrical-Steel-NGO-35PN250



به نام خدا

پروژه ماشین های الکتریکی ۱



شکل ۴: برازش تابع نمایی به منحنی BH هسته.

تعیین تعداد دور سیم پیچ و سطح مقطع هسته

گام اول تعیین مشخصات سیم پیچ اولیه و ثانویه است. از آن جا که تغذیه به صورت ac است می توانیم از رابطه زیر استفاده کنیم:



به نام خدا

پروژه ماشین های الکتریکی ۱



$$\varphi = \frac{1}{N} \int v(t) dt = \frac{1}{N} \int V_{\max} \cos(\omega t) dt = \frac{V_{\max}}{N\omega} \sin \omega t$$

بنابراین می توان برای حداکثر شار رابطه زیر را نوشت:

$$\varphi_{\max} = \frac{V_{\max}}{N\omega} \Rightarrow V_{\max} = N\omega\varphi_{\max}$$

رابطه فوق را می توان بر حسب ولتاژ موثر و چگالی شار به شکل زیر نوشت:

$$V_{\max} = \sqrt{2}V_{rms} = N \times 2\pi f \times B_{\max} A$$

$$V_{rms} = 4.44 N f A B_{\max}$$

آخرین رابطه را می توان برای تعیین مشخصات استفاده کرد. در ساختاری که مد نظر ماست در سمت اولیه برای مثال، مقدار ولتاژ موثر مشخص و برابر 230 V، فرکانس برابر 50 Hz است. همچنین با توجه به منحنی BH هسته انتخاب چگالی شار برابر 0.9 T در نقطه زانو مناسب به نظر می رسد. بنابراین آنچه که باقی می ماند حاصل ضرب A یعنی سطح مقطع هسته در N یعنی تعداد دور سیم پیچ است. با انتخاب N به نحو دلخواه میزان سطح مقطع مورد نیاز از هسته مشخص خواهد شد. برای یک ترانسفورماتور به شکل بالا انتخاب تعداد دور بین 115 دور تا 460 دور به یک طراحی معقول منجر می شود.

(۱) به صورت دلخواه N را انتخاب کرده و سطح مقطع لازم را مشخص و در گزارش قید کنید. همچنین بر اساس مشخصات هسته 180UI طول متوسط هسته را گزارش کنید.

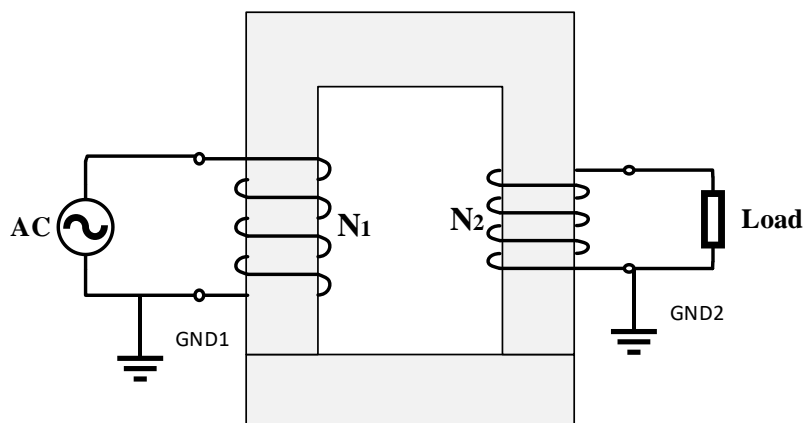
### ایجاد مدل ترانسفورماتور

در نسخه جدید سیمولینک، فضای Magnetics ذیل کتابخانه Foundation Library → Simscape ایجاد شده است که دارای المان های مختلف برای جابه جایی بین فضای مغناطیسی و الکتریکی است. مداری که بایستی ایجاد شود به شکل زیر است:



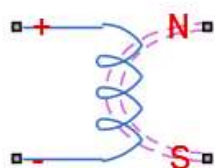
به نام خدا

پروژه ماشین های الکتریکی ۱



شکل ۵: مدار ترانسفورماتور مورد شبیه سازی.

برای اجزای الکتریکی از مجموعه Electrical ذیل Foundation Library → Simscape استفاده کنید. برای مدل سازی سیم پیچ مدل سازی هسته بایستی در فضای مغناطیسی از یک رلوکتانس متغیر استفاده کرد. برای مدل سازی سیم پیچ می توان از Electromagnetic Converter (EC) با شمای زیر استفاده کرد:



Electromagnetic  
Converter2

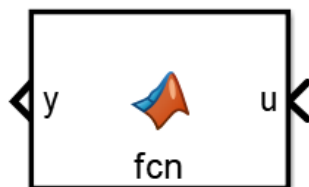
شکل ۶: شمای Electromagnetic Converter

EC در حقیقت مدل یک سیم پیچ است که از یک سمت به فضای الکتریکی و از سمت دیگر با تولید mmf به فضای مغناطیسی متصل می شود. در سمت مغناطیسی برای مدل سازی هسته بایستی یک رلوکتانس با مشخصه BH ای که پیش تر برازش کردیم ایجاد کنید.



راهنمایی: همان طور که مقاومت الکتریکی را می توان با یک منبع ولتاژ وابسته به جریان خودش مدل کرد، یک رلوکتانس را می توان با منبع mmf وابسته به شار خودش مدل کرد. در سیمولینک منبع mmf وابسته به شار و همچنین سنسور شار موجود است. رابطه بین شار و mmf تولید شده می تواند به هر شکلی باشد از جمله می تواند رابطه BH برازش شده را داشته باشد. برای ارتباط بین ورودی و خروجی با هر رابطه دلخواه می توانید از MATLAB Function در محیط سیمولینک با شمای زیر استفاده کنید.

### MATLAB Function1



پس از مدل سازی رلوکتانس غیرخطی، می توان یک EC دیگر در سمت دیگر رلوکتانس اضافه کرد تا سیم پیچ دوم ترانسفورماتور را مدل کند. در آماده سازی مدل به نکات زیر توجه داشته باشید:

- هر دو سمت الکتریکی بایستی دارای زمین باشند وگرنه مدل اجرا نمی شود.
- در سمت مغناطیسی، به یک Magnetic reference که معدل زمین الکتریکی است احتیاج دارید.
- منبع mmf دارای سر مثبت و منفی است. در صورتی که سر مثبت و منفی را اشتباه متصل کنید، یک رلوکتانس منفی مدل می شود و مدل ناپایدار خواهد شد.
- فاز منبع ولتاژ اولیه را بر روی 90 درجه تنظیم کنید در غیر این صورت پدیده ای به نام جریان هجومی مدل می شود که مدنظر ما نیست.
- برای مدل سازی حالت مدار باز می توانید مقاومت Load را بزرگ در نظر بگیرید.
- فضاهای الکتریکی و مغناطیسی جزء فضاهای فیزیکی محسوب می شوند و در نتیجه سیگنال آن ها را نمی توان مستقیم به اسکوپ داده و یا یک تابع بر روی آن ها پیاده سازی کرد. برای تبدیل سیگنال فیزیکی به سیگنال معمولی سیمولینک بایستی از Simulink-PS converter با شمای زیر استفاده کنید.



به نام خدا

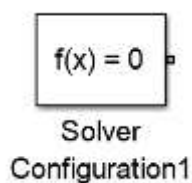
پروژه ماشین های الکتریکی ۱



- همچنین با استفاده از PS-Simulink Converter با شمای زیر می توان یک سیگنال عادی سیمولینک را به یک سیگنال فیزیکی تبدیل کرد:



- برای حل مدار حداقل به یک Solver Configuration با شمای زیر احتیاج دارید که به یک نقطه از مدل مثلاً به مدار الکتریکی متصل شده باشد.



- با توجه به اینکه مدار در فرکانس 50 Hz کار می کند، در صورتی که زمان اجرا را طولانی قرار دهید و گام های حل را بزرگ در نظر بگیرید، مدل به درستی کار نمی کند. شبیه سازی پنج سیکل یعنی حدود 0.1 s به نتایج مناسبی منجر خواهد شد.

اکنون مدل ترانسفورماتور آماده است و می توان تحلیل های متفاوتی بر روی آن انجام داد.





## مطالعات و مطالبات

۲) در حالتی که ترانسفورماتور بدون بار است ( $R_{Load} > 10000 \Omega$ ) شکل موج شار هسته و همچنین جریان بی‌باری ترانسفورماتور را گزارش کنید. آیا شکل موج جریان و شار سینوسی است؟ اگر هریک از شکل موج‌ها غیرسینوسی است علت آن را توضیح دهید.

۳) در حالت فوق، مقدار موثر ولتاژ ورودی و خروجی را گزارش کنید. آیا نسبت تبدیل رعایت شده است؟  
۴) در حالت فوق، مقدار پیک چگالی شار در هسته را مشخص کنید. آیا با مقدار طراحی یعنی  $0.9 \text{ T}$  هم‌خوانی دارد یا خیر. در غیر این صورت علت آن را توضیح دهید.

۵) اکنون برای کامل‌تر شدن مدل، مقاومت‌های سیم‌پیچ اولیه و ثانویه را در مدار الکتریکی اضافه کنید. مقاومت اولیه را در حدود چند اهم و مقاومت ثانویه را در حد چند صد میلی‌اهم در نظر بگیرید. مجدداً قسمت ۲ را پیاده‌سازی کنید. آیا شکل موج شار سینوسی است؟ چرا؟

۶) اکنون مقدار مقاومت بار را بر روی  $10 \Omega$  تنظیم کنید. شکل موج جریان خروجی و ورودی و همچنین شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی را گزارش کنید. مقدار موثر ولتاژ ورودی و خروجی را نیز مشخص کنید. آیا شکل موج جریان‌ها سینوسی است؟ چرا؟ آیا نسبت تبدیل رعایت شده است؟ چرا؟

۷) برای در نظر گرفتن نشتی شار هر سیم‌پیچ یک رلوکتانس خطی که نماینده عبور شار در هوا است را با هر سیم‌پیچ موازی کنید (یک رلوکتانس نشتی موازی سیم‌پیچ اولیه و یک رلوکتانس نشتی موازی سیم‌پیچ ثانویه). برای این رلوکتانس هوایی، طول  $0.1 \text{ m}$  و سطح مقطع  $0.0625 \text{ m}^2$  معقول به نظر می‌رسد. بار را بر روی مقدار  $10 \Omega$  تنظیم کنید. آیا مقدار موثر ولتاژ ثانویه تغییر می‌کند؟ چرا؟ در همین حالت آیا مقدار پیک شار در هسته عوض شده است؟ علت آن را قید کنید.

۸) اکنون می‌خواهیم برای ترانسفورماتور شبیه‌سازی شده یک مدل الکتریکی استخراج کنیم. مدل ارجاع‌شده به سمت اولیه را به شکل زیر انتخاب می‌کنیم. با انجام آزمون‌های مدارباز و اتصال کوتاه بر روی مدلی که ایجاد کرده‌اید، هر یک از چهار عنصر زیر را تعیین کرده و گزارش کنید. در صوتی که در حالت مدارباز جریان تحریک غیرسینوسی است، هارمونیک اول آن را برای محاسبه مدل در نظر بگیرید. با توجه به مدل محاسبه شده، آیا سلف مغناطیسی ترانسفورماتور با  $N^2/R$  که  $R$  رلوکتانس غیرخطی مدل شده در نقطه

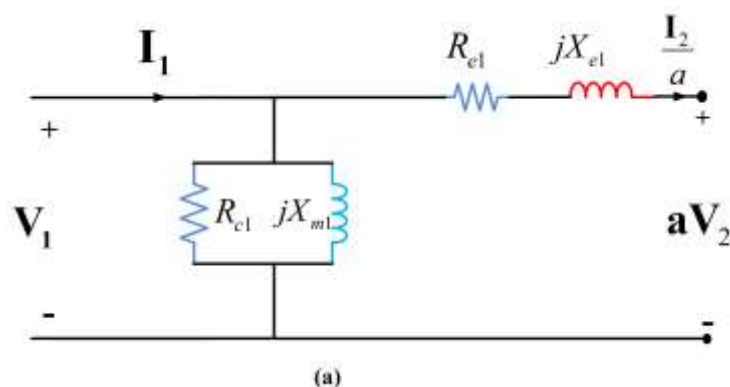


به نام خدا

پروژه ماشین های الکتریکی ۱



کار است تطابق دارد؟ چرا؟ آیا مجموع سلف نشتی با جمع  $N^2/R_L$  که در آن  $R_L$  رلوکتانس نشتی اضافه شده به صورت موازی با سیم پیچ است تطابق دارد؟ چرا؟



شکل ۷: مدار معادل ترانسفورماتور ارجاع شده به سمت اولیه.

#### تذکرات:

- لازم است فقط فایل PDF گزارش در سایت درس آپلود نمایید.
- پروژه تحویل حضوری دارد که لازم است دانشجویان در زمانی که بعدا مشخص خواهد شد به صورت حضوری به سوالات مرتبط با پروژه پاسخ دهند (که لزوما مشابه سوالات پروژه نیست و لازم است هر فرد پروژه را با دقت انجام دهد تا بتواند پاسخ گوی سوالات باشد).
- افرادی که تا زمان مشخص شده فایل های خود را آپلود نکنند نمی توانند در تحویل حضوری شرکت نمایند.
- افرادی که فایل های خود را آپلود کرده ولی در تحویل حضوری شرکت نکنند نمره ای دریافت نمی کنند.

موفق باشید