



دانشگاه زنجان

پایان نامه کارشناسی

دانشکده مهندسی برق

گرایش قدرت

موضوع پایان نامه

مدلسازی سه بعدی ترانسفورماتور سه فاز و تحلیل مغناطیسی آن

با استفاده از روش المان محدود (FEM)

نام دانشجو

حسین داودی زنجانی

(۹۱۴۴۲۱۳۱)

استاد راهنما

مهندس علی نصیری

آذر ماه ۱۳۹۵

چکیده

در این مقاله سعی شده است با مدل سازی ۳ بعدی یک ترانسفورماتور توزیع ۳ فاز و با استفاده از روش المان محدود^۱ که به اختصار « FEM » نامیده می شود به تحلیل مغناطیسی قسمت های مختلف آن پرداخته و با استخراج پارامتر های مورد نیاز از جمله چگالی شار مغناطیسی^۲ و انرژی ذخیره شده^۳ در اجزای ترانسفورماتور و با استفاده از قوانین مغناطیسی حاکم بر ترانسفورماتور ها به پارامتر های دیگری که در طراحی انواع ترانسفورماتور ها مورد استفاده قرار می گیرد ، دست یابیم. در این مقاله از دو نرم افزار تحلیلی « Ansys Maxwell » که مبتنی بر روش FEM بوده و همچنین نرم افزار « Matlab » استفاده شده است. پس از مدل سازی و طراحی مدل فیزیکی ترانسفورماتور براساس برگه مشخصات ترانسفورماتور موجود در شرکت ایران ترانسفو ، در نرم افزار Ansys Maxwell و انجام تنظیمات پارامتر های مورد نیاز ، مقادیر انرژی ذخیره شده را برای قسمت های مختلف استخراج کرده و در نرم افزار متلب براساس فرمول های حاکم ، امیدانسی درصد ترانسفورماتور را محاسبه خواهیم کرد.

کلمات کلیدی :

امیدانسی درصد

1. Finite Element Method
2. Magnetic Flux Density
3. Stored Energy

فهرست مطالب

چکیده	الف
مقدمه	۱
فصل اول	
مقدمه	۲
مدار سمبولیک ترانسفورماتور	۳
ترانسفورماتور ایده آل	۴
بازتاب امپدانس اولیه و ثانویه	۵
ترانسفورماتور واقعی	۶
مدار معادل ترانسفورماتور واقعی	۷
مقادیر اسمی ترانسفورماتور	۹
ترانسفورماتور سه فاز	۹
روش های اتصال سیم پیچ های ترانسفورماتور سه فاز	۱۰
فصل دوم	
انواع ترانسفورماتور از نظر تغییرات ولتاژ	۱۴
انواع ترانسفورماتور از نظر نوع جریان	۱۴
انواع ترانسفورماتور تجارتي	۱۴
انواع ترانسفورماتور از نظر ساختمان هسته	۱۵
انواع ترانسفورماتور از نظر نحوه خنک کاری	۱۶
انواع ترانسفورماتور از لحاظ ساختاری	۱۶

فصل سوم

توان ظاهری	۲۰
روش های خنک کاری	۲۰
نسبت تبدیل و درصد پله های تنظیم ولتاژ	۲۱
نوع اتصالات و گروه های برداری	۲۱
امیدانس اتصال کوتاه	۲۲
انواع کلید تنظیم ولتاژ	۲۲
شرایط محیطی محل نصب	۲۲
سطوح عایق بندی و انواع تست ها	۲۳
اضافه تحریک	۲۴
تلفات بی باری	۲۴
تلفات بار	۲۴
جریان بی باری	۲۴
نویز صدای ترانسفورماتور	۲۴

فصل چهارم

هسته ترانسفورماتور	۲۵
بویین های فشار قوی و فشار ضعیف	۲۷
کلید تپ چنجر	۲۸
بوشینگ (مقره عبوری)	۲۸
منبع انبساط روغن	۲۹
مخزن ترانسفورماتور	۲۹
اجزای حفاظتی ترانسفورماتور	۲۹

فصل پنجم

۳۰	مقدمه
۳۱	روش های بدست آوردن امپدانس درصد
۳۱	روش شار پیوندی
۳۵	روش انرژی ذخیره شده در ترانسفورماتور
۳۵	روش کلاسیک
۳۷	روش محاسبات عددی
۳۷	روش توان موهومی
۳۸	روش المان محدود

فصل ششم

۴۷	مقدمه
۴۷	معرفی نرم افزار ANSYS MAXWELL
۴۸	مشخصات کلی ترانسفورماتور
۴۹	نحوه ایجاد پروژه، طراحی و تحلیل ۳ بعدی ترانسفورماتور
۴۹	ایجاد پروژه جدید
۴۹	انتخاب نوع آنالیز
۵۰	انتخاب طول واحد در پروژه
۵۱	طراحی هسته ترانسفورماتور
۵۵	طراحی بوبین های فشار قوی و فشار ضعیف
۵۶	مراحل مدل سازی بوبین ها
۶۲	تعیین جنس قطعات مختلف ترانسفورماتور
۶۴	تعیین منبع تحریک
۷۲	نمودار مش بندی طرح
۷۴	نمودار گرافیکی چگالی شار ماکزیمم
۷۴	نمودارهای گرافیکی چگالی جریان برداری در بوبین ها
۷۶	نمودارهای گرافیکی انرژی ذخیره شده در ترانسفورماتور
۸۲	مراحل محاسبه امپدانس اتصال کوتاه
۸۷	نتیجه گیری
۸۸	فهرست منابع

مقدمه

یکی از کاربردی ترین دستگاههای مرسوم در سیستم های برق رسانی و مدارهای الکتریکی «ترانسفورماتورها» می باشند. ترانسفورماتور عبارت است از وسیله ای که از طریق یک میدان مغناطیسی متغیر واسط انرژی الکتریکی را از یک سطح ولتاژ به سطحی دیگر از ولتاژ تبدیل می کند. لذا ترانسفورماتور ها برای انتقال انرژی الکتریکی از یک مدار AC به انرژی الکتریکی در مدار AC دیگر بدون تغییر فرکانس مدار بکار می روند. این امر در خصوص انتقال انرژی الکتریکی اهمیت زیادی دارد. زیرا در خطوط انتقال برای کاهش تلفات اهمی جریان کتریسیته را با ولتاژهای زیاد ولی جریانهایی کم انتقال داده و سپس در محل مصرف مجدداً به حد دلخواه کاهش می دهند. با توجه به اینکه شدت جریان در مدار با توان دو^۲، تلفات اهمی را تحت تاثیر قرار می دهد علاوه بر این بدلیل تنوع در مصرف کننده ها از نقطه نظر قدرت مصرفی و ولتاژ مورد نیاز، اکثر مصرف کننده ها به منظور تطبیق ولتاژ ورودی به ولتاژ مورد نیاز مجهز به ترانسفورماتور می باشند. امروزه به دلیل تنوع مصرف کننده ها انواع مختلفی از نظر مقدار ولتاژ خروجی، و قدرت انتقال وجود دارد.

اهمیت ترانسفورماتور ها را از ۲ نظر می توان بیان نمود:

- **از لحاظ فنی:** ترانسفورماتور تجهیزاتی است بدون جایگزین و در هر شبکه برقی باید استفاده شود. بنابراین داشتن دانش فنی طراحی و ساخت ترانسفورماتور برای هر کشوری به عنوان یک سرمایه ملی تلقی خواهد شد.

- **از لحاظ اقتصادی:** ترانسفورماتور دستگاهی بسیار گران قیمت است و پروسه طراحی و ساخت آن زمان بر می باشد. در نتیجه خودکفایی در زمینه ساخت ترانسفورماتور باعث عدم وابستگی به کشور های خارجی و خارج نشدن سرمایه ملی از کشور خواهد شد. همچنین داشتن دانش طراحی و ساخت ترانسفورماتور باعث ایجاد اشتغال، درآمد زایی و صادرات خواهد شد. با توجه به نیاز شدید به ترانسفورماتور ها در همه زمینه ها، طراحی اصولی و علمی آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو استخراج کلیه پارامترهای دخیل در مشخصات ترانسفورماتور ها از جمله قدرت ترانسفورماتور، جریان نامی، ولتاژ اولیه و ثانویه، نیروهای اتصال کوتاه، تلفات و غیره در طراحی ترانسفورماتور ها نقش بسزایی دارند. در این مقاله به یکی از این پارامتر ها به نام «امپدانس اتصال کوتاه» (UK%) پرداخته شده است که در اندازه ابعاد فیزیکی ترانسفورماتور به ویژه سیم پیچ ها نقش بسزایی دارد.

1. Transformers

2. $P = RI^2$

فصل اول

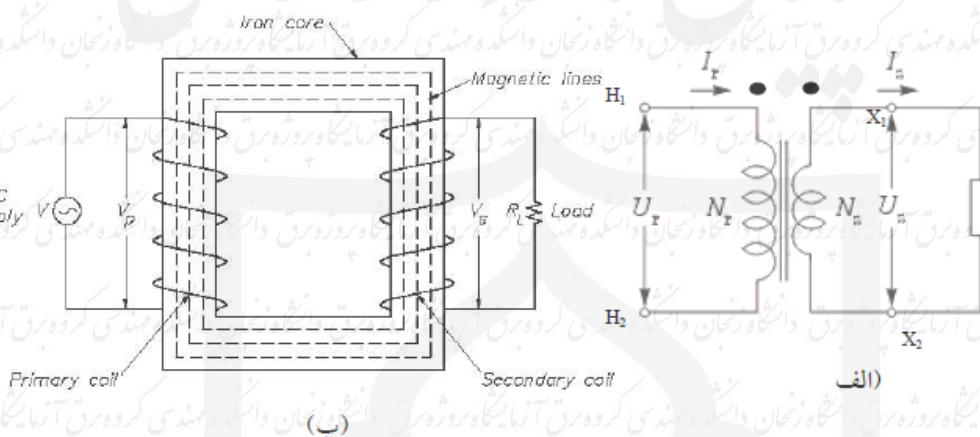
ترانسفورماتورها و اصول کار کرد آنها

ترانسفورماتور اساساً متشکل از دو یا چند سیم پیچ است که به دور یک هسته فرومغناطیس مشترک با مقاومت مغناطیسی بسیار کم پیچیده شده اند . تنها اتصال این سیم پیچها میدان مغناطیسی است که در داخل هسته وجود دارد . یکی از سیم پیچها به منبع ولتاژ متناوب (شبکه) وصل می گردد تا شاری متناوب در هسته ایجاد نماید. دامنه این شار (Φ_m) به ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ و تعداد دور سیم پیچ بستگی دارد . سیم پیچی که به شبکه وصل می گردد بنام « سیم پیچ اولیه ¹ » یا « ورودی » و سیم پیچی که به بار (مصرف کننده) وصل می شود بنام « سیم پیچ ثانویه ² » یا « خروجی » نامیده می شود. ممکن است ترانسفورماتور دارای سیم پیچ دیگری نیز باشد که در آن صورت به آن « سیم پیچ ثالثیه ³ » گفته می شود. از سیم پیچ های اضافی جهت حصول سطوح مختلف ولتاژ در خروجی استفاده می شود. با اعمال ولتاژ به سیم پیچ اولیه و عبور جریان از آن شار متغیر مغناطیسی متناسب در هسته جاری شده و بوسیله مدار مغناطیسی (هسته ترانسفورماتور که از یکدیگر عایق شده اند) مدار بسته شده و در نتیجه ، بیشتر شار مغناطیسی مدار ثانویه را قطع می کند. در نتیجه این کار نیروی محرکه الکتریکی تولید می شود. (طبق قانون فاراده $e = M \frac{di}{dt}$) دامنه این ولتاژ القایی به مقدار ولتاژ اولیه ترانسفورماتور و همچنین تعداد دور سیم پیچ ثانویه بستگی دارد. با اتصال طرف ثانویه ترانسفورماتور به بار جریان ثانویه نیز در ترانسفورماتور برقرار می گردد. بدین ترتیب ولتاژ مورد نظر در سمت بار ایجاد می شود. در واقع می توان گفت انرژی الکتریکی سیم پیچ اولیه (بوسیله واسط مغناطیسی) به انرژی الکتریکی در مدار ثانویه تبدیل شده است.

1. Primary Winding
2. Secondary Winding
3. Tertiary Winding

۱-۱) مدار سمبولیک ترانسفورماتورها

شکل ۱-۱ نحوه نمایش سمبولیک ترانسفورماتور را در مدار نشان می دهد. در این مدار دو نقطه توپیر نشان دهنده پلاریته سیم پیچهای اولیه و ثانویه می باشد. در لحظه ای که ترمینال نقطه دار در سیم پیچ اولیه نسبت به ترمینال بدون نقطه در همین سیم پیچ مثبت باشد، ترمینال نقطه دار در سیم پیچ ثانویه نیز نسبت ترمینال بدون نقطه مثبت خواهد بود. ترمینال هایی که با حرف H نشان داده می شوند مربوط به طرف فشار قوی (ولتاژ بالا) و ترمینال هایی که با حرف X نشان داده می شوند مربوط به طرف فشار ضعیف می باشد.



شکل ۱-۱ - مدار مغناطیسی (الف) و مدار سمبولیک یک ترانسفورماتور (ب)

۱-۲) ترانسفورماتور ایده آل

ترانسفورماتور ایده آل عبارت است از دستگاهی که متشکل از دو سیم پیچ اولیه و ثانویه همراه با هسته می باشد که می توان فرض کرد هیچ گونه تلفاتی در آن بوجود نمی آید. امروزه ترانسفورماتورهای واقعی بسیار نزدیک به این فرض هستند به گونه ای که بعضی از آنها دارای راندمانی تا ۹۹٪ هم هستند. بنابراین فرض ایده آل بودن در مورد اکثر ترانسفورماتورهای امروزی فرض قابل قبولی خواهد بود. یک ترانسفورماتور ایده آل خواهد بود اگر فرض شود که:

- تمامی شار محدود به هسته است و از درون دو سیم پیچ اولیه و ثانویه به طور کامل عبور می کند.
- مقاومت الکتریکی دو سیم پیچ قابل اغماض است
- اتلاف انرژی در هسته ناچیز است
- تراوندگی مغناطیسی آن چنان زیاد است که تنها نیروی محرکه مغناطیسی کمی نیاز است تا شار مورد نظر تولید شود.

در یک چنین ترانسفورماتوری با عبور جریان متناوب از سیم پیچ اولیه نیروی محرکه مغناطیسی (MMF) باعث بوجود آمدن شار متناوبی در هسته می گردد که حداکثر مقدار آن Φ_m می باشد. شار متناوب با عبور از هسته به صورت شار متقابل عمل نموده و در سیم پیچ ثانویه ولتاژ القاء خواهد نمود. ولتاژ القاء شده برابر قانون فاراده متناسب است با شدت تغییرات شار نسبت به زمان:

$$e(t) = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1) \quad (\text{علامت منفی به دلیل مخالفت ولتاژ القایی با شار می باشد})$$

$$\phi(t) = \phi_m \sin(\omega t) \quad \omega = 2\pi f \quad (1.2)$$

$$e(t) = -N_1 \phi_m \omega \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

در لحظه $t = 0$ مقدار شار برابر صفر و مقدار ولتاژ حداکثر خواهد بود لذا:

$$\phi = 0 \Rightarrow e_{max} = N_1 \phi_m 2\pi f \quad (1.4)$$

$$e_{max} = \sqrt{2} E_1 \quad (1.5)$$

$$E_1 = \frac{\phi_m N_1 2\pi f}{\sqrt{2}} \quad (1.6)$$

$$E_1 = 4.44 \phi_m N_1 f \quad (1.7)$$

در رابطه اخیر E_1 عبارت است از ولتاژ اعمال شده در سیم پیچ اولیه با تعداد دور N_1 که سبب ایجاد شار Φ_m در هسته می گردد. در این رابطه فرض شده است که هیچگونه شار نشتی در هسته وجود نداشته باشد.

یکی دیگر از معادلات اساسی حاکم بر ترانسفورماتور ها رابطه زیر می باشد که به نسبت دور در ترانسفورماتور شناخته می شود:

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.8)$$

1. Magneto Motive Force

چنانچه ترانسفورماتور ایده ال فرض گردد و از تلفات اکتیو و راکتیو در هسته صرف نظر شود و لحظه ای را در نظر بگیریم که طرف ثانویه به باری متصل گردد جریان در ثانویه برقرار خواهد شد که نیروی محرکه مغناطیسی $N_2 I_2$ را در طرف ثانویه ایجاد خواهد کرد. این نیروی محرکه مغناطیسی بایستی با جریانی که در اولیه برقرار می گردد ($N_1 I_1$) خنثی گردد:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad 1.9$$

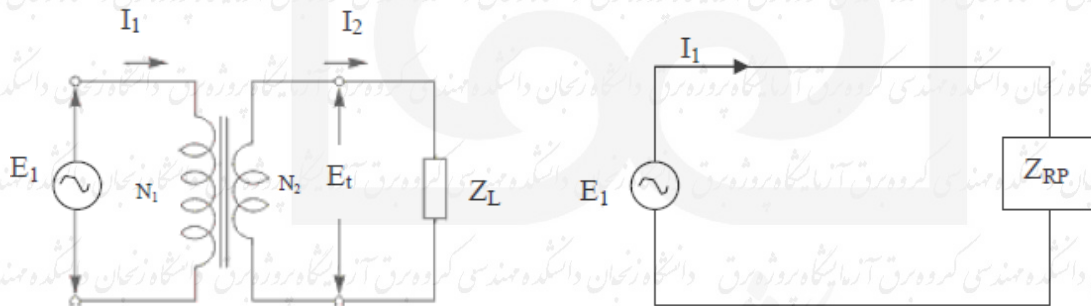
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad 1.10$$

و لذا رابطه 1.8 را به صورت زیر می توان تکمیل کرد:

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad 1.11$$

۳-۱) بازتاب امپدانس در اولیه و ثانویه

در بررسی ترانسفورماتور ها مدار اولیه و ثانویه به صورت الکتریکی به هم متصل نیستند ولی چون از همدیگر متاثر هستند بایستی به گونه ای این تاثیر متقابل را پیدا کرده و مقادیر و کمیت ها را از یک طرف به طرف دیگر منتقل نمود تا قادر باشیم مقادیر جریانش و ولتاژها را در هر دو طرف در یک ترانسفورماتور تحت بار محاسبه نماییم.



شکل ۲-۱ - مدار مغناطیسی ترانسفورماتور (الف)، مدار الکتریکی ترانس بازتاب شده به طرف اولیه

با توجه به شکل ۲ - ۱ (الف) قانون اهم برای طرف ثانویه عبارتست از :

$$V_2 = Z_L I_2 \quad 1.12$$

$$\xrightarrow{\text{رابطه (1-11)}} V_1 = V_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad 1.13$$

$$\xrightarrow{(1-12) \cdot (1-13)} V_1 = (Z_L I_2) \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad 1.14$$

$$a = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_2 = a I_1 \quad 1.15$$

$$V_1 = Z_L (a I_1) a \Rightarrow V_1 = (a^2 Z_L) I_1 \quad 1.16$$

$$Z_{RP} = a^2 Z_L \quad 1.17$$

رابطه 1.17 عبارت است از بازتاب امپدانس طرف ثانویه در طرف اولیه و به همان ترتیب می توان بازتاب امپدانس اولیه در ثانویه را نیز به صورت زیر بدست آورد:

$$Z_{RS} = \frac{Z_1}{a^2} \quad 1.18$$

۴-۱) ترانسفورماتور واقعی

اگر چه در ترانسفورماتور های خوب طراحی شده می توان به نتایجی نزدیک به ترانسفورماتور ایده

آل دست یافت ولی چون در ترانسفورماتور ایده آل ۴ فرض اساسی وجود داشت که در ترانسفورماتور های

واقعی ممکن است وجود نداشته باشد. لذا در ترانسفورماتور معمولی برخی آثار جنبی پدیدار می شود که

متفاوت از ترانسفورماتور ایده آل خواهد بود. در ترانسفورماتور های واقعی به دلیل مقاومت اهمی سیم پیچ

های اولیه و ثانویه مقداری تلفات به صورت حرارتی خواهیم داشت. علاوه بر این مقداری تلفات انرژی در

اثر جریانهای گردابی^۱ در هسته و افت مغناطیسی نیز وجود دارد. و نهایتاً اینکه در هسته مقداری شار

نشستی^۲ در طرف اولیه و ثانویه وجود دارد که مثل راکتانس^۳ در مدار عمل می کنند و باعث ایجاد مقاومت

ظاهری بیشتر در مدار می گردند. این موارد باعث می گردد که رفتار ترانسفورماتور واقعی متفاوت از رفتار

ترانسفورماتور ایده ال باشد.

1. Eddy Current
2. Leakage Flux
3. Reactance

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

۳-۶) نتیجه گیری

همانطور که مشاهده می شود ، مقدار بدست آمده امپدانس درصد ترانسفورماتور با مشخصات ابتدای فصل برابر « 5.884941 % » است. طبق اطلاعات موجود در دیتاشیت شرکت ایران ترانسفو، براساس نتایج آزمایشات و اطلاعات تجربی مقدار امپدانس اتصال کوتاه حدود « 6 % » است. همانگونه که در فصول قبل نیز اشاره شد ، تلورانس مقدار امپدانس درصد برابر « $10 \pm \%$ » می باشد در نتیجه مقدار بدست آمده از روش های تئوری نیز قابل قبول است . با این وجود ، می توان به دلایل زیر به عنوان عوامل ایجاد این اختلاف اندک اشاره نمود :

❖ در آزمایشات « اتصال کوتاه ترانسفورماتور » مقدار دقیق مقاومت اهمی ناشی نیز محاسبه می شود.

$$\% UK = \sqrt{UK_X^2 + UK_R^2} \quad 6.14$$

اما در فصل قبل در محاسبات امپدانس درصد از آن چشم پوشی کرده و فرض زیر را در نظر گرفتیم :

$$\% UK \cong UK_X \quad 6.15$$

❖ به مرور زمان و انباشت تجربه در تولیدات شرکت ، به صورت تجربی روابط و ضرایبی در این پارامتر دخالت داده شده اند که می تواند دلیل این اختلاف کم باشد.

فهرست منابع

1. S.V.Kulkarni , S.A.Khparde , *Transformer Engineering*, Marcel Dekker INC , 2004

2. Hayt , W.H. *Engineering electromagnetics*, McGraw-Hill Book Company,Singapore, 1989, pp. 298–301.

3. Turowski, J. , Turowski, M. , and Kopec , M. Method of three-dimensional network solution of leakage field of three-phase transformers , *IEEE*

۴. جرجانی خسرو ، محاسبات عملی ترانسفورماتور ، دانشگاه علم و صنعت ایران ، ۱۳۶۹

5. Eng. Nasiri Ali , *Transformer Design Principles Course* , Jan. 2016 , Zanjn University