مدلسازی عددی و تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور اُوال و مقایسه آن با ترانسفورماتور سیلندری با استفاده از روش اجزای المان محدود

کریم عباس زاده[1] **فاطمه صفار**

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
Abbaszadeh@Kntu.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی-دانشگاه آزاد اسلامی تهران جنوب- تهران – ایران
fadak_943@yahoo.com

چکیده: ترانسفورماتور توزیع با سیم پیچی بیضی‌گون در ردیف توان‌های کم، به عنوان ترانسفورماتور بهینه مطرح می‌گردد. زیرا مقدار آهن و مس مصرفی آن کاهش می‌یابد که این امر منجر به کم شدن تلفات این نوع ترانسفورماتور نسبت به ترانسفورماتور سیلندری می‌گردد. اما با توجه به تغییر شکل مقطع این ترانسفورماتور از دایره به بیضی باید نیروهای الکترومغناطیسی آن تحلیل گردد. در مقالات روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور سیلندری استفاده شده است. اما در خصوص ترانسفورماتور بیضی‌گون تاکنون تحلیلی بر روی نیروهای الکترومغناطیسی آن انجام نشده است. بدین جهت در این مقاله به مطالعه‌ی نیروهای این ترانسفورماتور پرداخته شده و با مقدار نیروهای ترانسفورماتور سیلندری مقایسه گردیده است. این نیروها در دو حالت کارنرمال و اتصال کوتاه سه فاز متقارن با استفاده از روش اجزای المان محدود در محیط سه بعدی و توسط نرم افزارMaxwell V.13 تحلیل شده‌اند. در این روش، بردار پتانسیل مغناطیسی، چگالی شار و نیروهای الکترومغناطیسی محاسبه می‌گردند.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور اُوال، ترانسفورماتور سیلندری، ترانسفورماتور بهینه، نیروهای الکترومغناطیسی، روش اجزای المان محدود.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۴
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۲۳
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر کریم عباس زاده
نشانی نویسنده مسئول : دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]
2016Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring& Summer 2016

۱- مقدمه

ترانسفورماتور از مهم‌ترین اجزای شبکه‌های توزیع می‌باشد. در صورت جایگزینی ترانسفورماتور کارکرده با ترانسفورماتور جدید و بهینه، درصد بالایی از تلفات شبکه‌های توزیع کاسته خواهد شد و سالانه صرفه جویی زیادی در صنعت برق صورت خواهد گرفت. بهینه‌سازی ترانسفورماتور می‌تواند به وسیله‌ی کاهش در وزن، تلفات بی‌باری و تلفات بارداری صورت گیرد؛ که این امر با تغییر در ابعاد هسته و سیم پیچها و یا تغییر در نوع سیم و ورق هسته-ی ترانسفورماتور حاصل می‌گردد. در همین راستا، در ترانسفورماتوری با نام تجاری اُوال بوسیله‌ی تغییر در مقطع هسته و سیم پیچها، از دایره به بیضی، بهینه‌سازی صورت گرفته است (شکل ۱). با این تغییر در ساختار، استفاده‌ی بهینه‌تری از فضای موجود شده و امکان تولید ترانسفورماتورهای معمولی با کاهش ارتفاع چمشگیری نسبت به ترانسفورماتوری با مقطع دایره (سیلندری) فراهم شده است. این کاهش در ارتفاع با توجه به نوع طراحی، می‌تواند باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در وزن مس و آهن و یا کاهش تلفات (بی باری و بارداری) گردد. به-عنوان مثال اوزان کاهش یافته دریک ترانسفورماتور ۲۰۰kVA بیضی‌گون[1] نسبت به ترانسفورماتوری با مقطع دایره (سیلندری) بصورت جدول (۱) می‌باشد، که این مقادیر کاهش وزن برای ترانسفورماتور توزیع در این ردیف توان، قابل توجه است.



(الف) (ب)

شکل (۱) مقطع ترانسفورماتور(الف) سیلندری ،(ب) اُوال

اما در تکنولوژی طراحی و تولید این ترانسفورماتور به علت شکل مقطع آن باید ملاحظاتی صورت گیرد. از جمله پارامترهای دستخوش تغییر در طراحی ترانسفورماتور بیضی‌گون، نیروهای الکترومغناطیسی آن است؛ زیرا محاسبه‌ی نیروهای آن با استفاده از روابط ترانسفورماتور سیلندری امکان پذیر نبوده و دارای مقادیری متفاوت است.

جدول (۱): اوزان کاهش یافته در ترانسفورماتور بیضی‌گون۲۰۰ kVA

وزن مس کاهش یافته	۳۰kg
وزن ورق هسته کاهش یافته	۱۰kg
وزن روغن کاهش یافته	۴۰kg
کل وزن کاهش یافته ترانسفورماتور	۸۰kg

ترانسفورماتور فوق در اکثر شرکت‌های بزرگ ترانسفورماتور-سازی همانند ABB و شرکت‌های کره‌ای بصورت انبوه در حال تولید است. در ایران نیز حدوداً ۱۰۰ نمونه به صورت آزمایشی تولید شده است. اما تکنولوژی ساخت این ترانسفورماتور به صورت کامل در دسترس نمی‌باشد. بویژه در زمینه‌ی محاسبه‌ی نیروهای الکترومغناطیسی و محاسبات حرارتی؛ علاوه بر اینکه مقاله‌ای نیز در مجامع بین المللی در این زمینه ارائه نگردیده و همچنان موضوع مورد بحث بصورت تکنولوژی در بین سازنده-های آن باقی مانده است. لذا در این مقاله سعی شده است تا در راستای تولید این تکنولوژی گام برداشته تا شاید نتایج بدست آمده از آن و مقالات دیگر، بتواند در جهت ساخت ترانسفورماتور بیضی‌گون در صنعت ایران مثمر ثمر واقع شود.

نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور از اثر متقابل چگالی جریان و چگالی شار نشتی بوجود می‌آیند. در حالت کار عادی، ترانسفورماتور قادر به تحمل این نیروهاست. اما طراحی باید به گونه‌ای صورت گیرد که ترانسفورماتور در برابر جریان اتصال کوتاه، از استقامت مکانیکی خوبی برخوردار باشد و سیم پیچ‌های آن دچار تغییر شکل نگردند [۲-۱]، به منظور محاسبه‌ی نیروها، باید نحوه‌ی توزیع چگالی شار نشتی بدست آید که بر همین اساس روش‌های متفاوتی وجود دارد. محاسبه‌ی چگالی شار نشتی در حالت گذرای اتصال کوتاه با استفاده از روش‌های قدیمی سخت است. اما با استفاده از روش اجزای المان محدود و با یک مدل کامل و شرایط مرزی مربوطه می‌توان به حل آن پرداخت، البته این روش، روش گرانی برای ارزیابی مسئله است [۳]، از روش‌های دیگر محاسبه‌ی شار نشتی، استفاده از مدل رلوکتانسی ترانسفورماتور در حوزه‌ی زمان است. این روش بر اساس ترسیم مدار معادل مغناطیسی ترانسفورماتور است، که همسان مدار الکتریکی است [۴]. روش دیگر برای تحلیل نیروها استفاده از محاسبات عددی است. این روش بر مبنای جریان اتصال کوتاه گذرا است. مقدار چگالی شار، چگالی جریان و نیروها به صورت مختلط بیان می‌گردند و نیروهای اتصال کوتاه به صورت مجموع سه مولفه‌ی DC، فرکانس اصلی و فرکانس دوبل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

خواهند بود [۵]، در روشی به نام تئوری تصویر یک قسمت از هسته در نظر گرفته می‌شود و جواب بدست آمده به بقیه نقاط تعمیم داده خواهد شد. در این روش با استفاده از خاصیت مجاورت یک جسم جریان‌دار در برابر یک هسته‌ی آهنی، میدان مغناطیسی سیم پیچ‌ها محاسبه گردیده و با توجه به چگالی جریان، نیروهای الکترومغناطیسی بدست می‌آیند [۷-۶].

دو روش دیگر که بر مبنای معادلات ماکسول به حل نیروهای الکترومغناطیسی می‌پردازند به روش رابینز و روش ریشه‌ها معروف هستند. در روش رابینز معادلات ماکسول در محیط استوانه‌ای حل خواهند شد و نیروهای اتصال کوتاه بر اساس چگالی شار بدست آمده توسط این روش محاسبه می‌گردند اما نیروهای الکترومغناطیسی در روش ریشه‌ها با استفاده از حل معادلات پواسن بردار پتانسیل مغناطیسی در محیط کارتزین بدست می‌آیند [۹-۸]. در روش انرژی، مقدار انرژی یا کوانرژی سیستم با استفاده از چگالی شار و بردار پتانسیل مغناطیسی محاسبه می‌شود. در این روش مشتق تابع انرژی، نیروی الکترومغناطیسی سیستم است [۱۰] و هنگامی که در ترانسفورماتور تپ چنجر و یا جابه‌جایی محوری در سیم پیچ‌ها وجود داشته باشد، می‌توان از روش آمپر دور باقیمانده استفاده کرد [۱۱].

در این مقاله، به منظور محاسبه‌ی نیروهای ترانسفورماتور بیضی‌گون ۲۰۰kVA از روش اجزای المان محدود استفاده شده است و برای دست یافتن به میزان تفاوت نیروهای این ترانسفورماتور بهینه با ترانسفورماتورهای سیلندری، مقایسه‌ای بین نتایج حاصله از این دو ترانسفورماتور با قدرت مشابه ۲۰۰kVA انجام شده است. این مقایسه هم در خصوص نیروهای شعاعی و هم نیروی محوری صورت گرفته است. قابل ذکر است که هر دو ترانسفورماتور در محیط سه بعدی و با شرایط یکسانی مدل شده‌اند تا مقایسه‌ی صحیح‌تری بین نتایج آنها صورت گیرد. از نتایج بدست آمده توسط این نیروها، می‌توان نوع مهارهای محوری و افقی لازم را تعیین کرد. بنحوی که در هنگام اتصال کوتاه کمترین آسیب به ترانسفورماتور وارد شود. در ادامه‌ی مقاله برای سهولت امر از نام تجاری ترانسفورماتور بیضی‌گون یعنی اُوال استفاده شده است.

۲- تحلیل نیروها

در ابتدا نیروهای الکترومغناطیسی در حالت کار نرمال و اتصال کوتاه سه فاز متقارن توسط روش اجزای المان محدود محاسبه شده و سپس بیشترین نیروهای بدست آمده در ترانسفورماتور اُوال و سیلندری مقایسه گردیده‌اند.

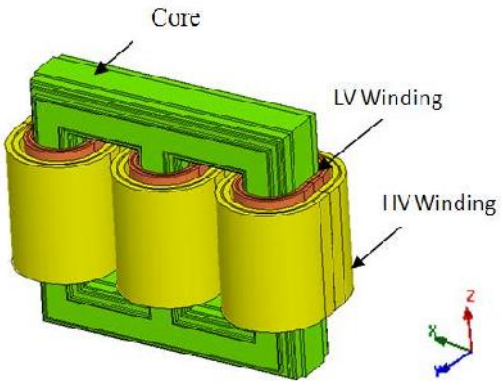
۲-۱- مدلسازی

- مشخصات ترانسفورماتور اُوال و سیلندری ۲۰۰ kVA سه فاز با هسته‌ی ستونی مطابق جدول (۲) می باشد.

جدول (۲) مشخصات ترانسفورماتور اُوال و سیلندری

توان ترانسفورماتور(سیلندری، اُوال)	۲۰۰KVA
فرکانس	۵۰Hz
ولتاژ فشار قوی	۲۰ kV
ولتاژ فشار ضعیف	۰/۴ kV
جریان فشار قوی	۵/۷۷ A
جریان فشار ضعیف	۲۸۹ A
گروه برداری	Yzn5

- مدلسازی در محیط سه بعدی مطابق شکل۲ انجام شده است. به دلیل شکل مقطع ترانسفورماتور اُوال که به حالت بیضی نزدیک است، نمی توان از مدل دو بعدی استفاده نمود زیرا در بعد سوم تغییرات وجود دارد و یک عمق ثابت و یکسان نمی‌توان برای ترانسفورماتور اُوال در حالت دو بعدی در نظر گرفت. همچنین نتایج حاصله در محیط سه بعدی دقیق تر از دو بعدی است [۱۳-۱۲].

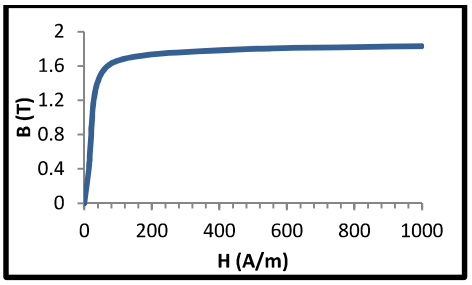


شکل (۲): مدل سه فاز ترانسفورماتور اُوال

- این مدلسازی در محیط مغناطیس ساکن (Magnetostatic) صورت پذیرفته است. قابل ذکر است که در چند نقطه‌ی کار $t = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$ نیروهای الکترومغناطیسی تحلیل شده‌اند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring& Summer

- مشخصه‌ی مغناطیسی هسته ترانسفورماتور مطابق شکل ۳ به صورت غیر خطی در نظر گرفته شده است [۱۴،۱۵].



شکل (۳): منحنی مشخصه‌ی مغناطیسی ترانسفورماتور

- نیروهای الکترومغناطیسی در نرم افزار Maxwell توسط قانون لورنتز محاسبه شده‌اند، که در ادامه روابط آن بیان می گردد [۱۶].

$$F = \int J \times B dv \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱) مقدار چگالی شار از بردار واسطه‌ای به نام بردار پتانسیل مغناطیسی (A) محاسبه می‌گردد [۱۷].

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \qquad (۲)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \qquad (۳)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \qquad (۴)$$

با استفاده از رابطه ی (۲) و(۳) و(۴) داریم :

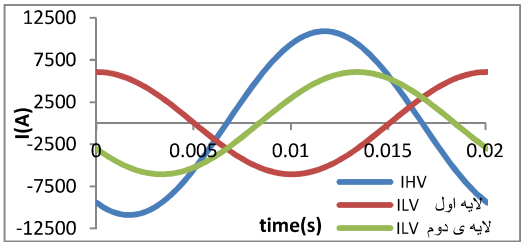
$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} = \vec{J} \qquad (۵)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\nabla \times \vec{A}\right) = J \qquad (۶)$$

$$J_Z(x,y) = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\nabla \times A(x,y)\right)\right) \qquad (۷)$$

در روابط بالا، F بیانگر نیروی الکترومغناطیسی، B چگالی شار، A بردار پتانسیل مغناطیسی، H شدت میدان مغناطیسی، J چگال جریان و μ_r, μ_0 به ترتیب ضریب پرمابیلیته‌ی هوا و ورق هسته می باشند. به علت غیر خطی بودن منحنی B-H برای حل این معادلات و بدست آوردن بردار پتانسیل مغناطیسی A از روش نیوتن رافسون استفاده می‌شود [۱۸].

- توزیع چگالی جریان در هادیها بصورت یکنواخت فرض شده است. با توجه به وجود اتصال زیگزاگ در سمت فشارضعیف دو ترانسفورماتور، جریان در دو لایه‌ی این سیم پیچها دارای اختلاف فاز بوده و در یک زمان به پیک نمی‌رسند. منحنی جریان‌های سیم پیچ فشار قوی و ضعیف مطابق شکل ۴ می باشد.

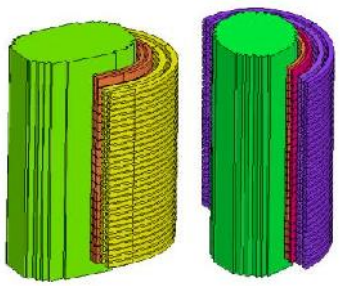


شکل (۴): منحنی جریان سیم پیچ های ترانسفورماتورأوال و سیلندری در شرایط عملکرد نرمال

- در این مدلسازی برای بدست آوردن توزیع نیروها در راستای محوری و شعاعی همانند شکل۵، سیم‌پیچ‌های فشارضعیف (LV) و فشارقوی(HV) به قسمت‌های مختلفی تقسیم شده‌اند، تعداد این تقسیمات در جدول (۳) ارائه شده است.
- به دلیل بالا بودن حجم محاسبات و به علت تقارن در ترانسفورماتور محاسبات برای $\frac{1}{4}$ یک ساق انجام شده است (شکل ۶).

جدول(۳) تعداد تقسیمات سیم پیچ های ترانسفورماتور أوال و سیلندری در راستای محوری و شعاعی

		راستای محوری	راستای شعاعی
ترانسفورماتور أوال	فشار ضعیف	۲۱	۴
	فشار قوی	۳۰	
ترانسفورماتور سیلندری	فشار ضعیف	۲۵	
	فشار قوی	۳۰	

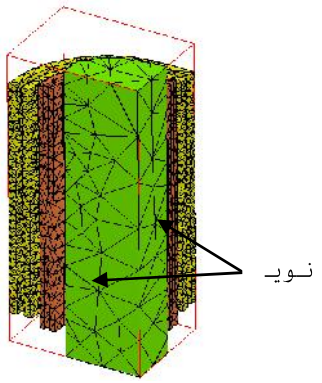


(ب) (الف)

شکل (۵) مدل یک ساق ترانسفورماتور (الف) سیلندری (ب) أوال

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]

۸- پس از انجام مدلسازی در مرحله‌ی حل معادلات ماکسول توسط نرم افزار ابتدا باید شرایط مرزی مسئله مشخص گردد [۱۹]. این شرایط مرزی مطابق شکل۶ در دوسطح برش زده شده نویمن و در بقیه‌ی سطوح دیریکله در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در ترانسفورماتور اُوال و سیلندری مشابه یکدیگر لحاظ شده‌اند.



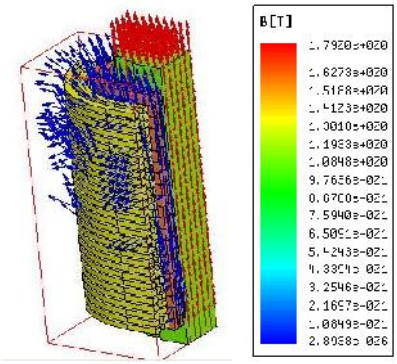
شکل (۶): شرایط مرزی مدل ترانسفورماتور اُوال

۹- تعداد مش‌های زده شده توسط نرم افزار مطابق با جدول (۴) می باشد.

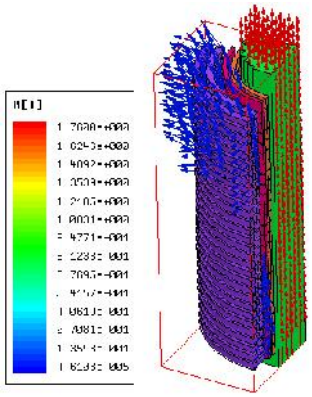
جدول (۴) تعداد مش های زده شده در مدل ترانسفورماتور اُوال و سیلندری

	ترانسفورماتور اُوال	ترانسفورماتورسیلندری
تعداد کل مش‌های زده شده	۵۷۴۴۱	۶۳۹۶۰

۱۰- بعد از انجام عملیات مش‌زنی به حل معادلات ماکسول پرداخته می‌شود. که در نتیجه‌ی آن بردارهای چگالی شار در شرایط کار نرمال، به فرم شکل (۷) در ترانسفورماتور اُوال و شکل (۸) در ترانسفورماتور سیلندری بدست می‌آیند.



شکل (۷) : بردارهای چگالی شار مغناطیسی ترانسفورماتور اُوال



شکل (۸): بردارهای چگالی شار مغناطیسی ترانسفورماتور سیلندری

۲-۲- محاسبات نیروی الکترومغناطیسی در شرایط کار نرمال

نیروهای بدست آمده توسط روابط به دو قسمت نیروی شعاعی و محوری تقسیم می‌شوند، که علت آن تقسیم چگالی شار نشتی به دو مولفه‌ی شعاعی و محوری است. جریانهای عبوری از سیم-پیچی که تحت تاثیر مؤلفه‌ی شار پراکندگی محوری قرار می-گیرند، نیروهای شعاعی تولید می‌نمایند. طبیعت نیروهای شعاعی طوری است که سعی دارند سیم پیچی خارجی را ترکانده (از هم پاشیده) و سیم پیچی داخلی را به هسته بفشارند. نیروی شعاعی در ترانسفورماتور اُوال به دلیل شکل مقطع آن، در دو راستای x,y بیان می‌گردد. رابطه‌ی نیروی شعاعی با ابعاد ترانسفورماتور به صورت رابطه‌ی (۸) است [۲۰].

$$F_{radial} = \frac{1}{2}\mu(NI)^2 \times (\frac{L_{mt}}{H_w}) \qquad (۸)$$

L_{mt} = قطر میانگین هسته

H_w = ارتفاع سیم پیچ

جریانهای سیم پیچی که با مؤلفه‌ی شعاعی شار پراکندگی تأثیر متقابل پیدا می‌کنند، نیروهای محوری فشاری تولید می-کنند که تمایل دارند سیم پیچ‌ها را در وسط بهم فشار دهند [۲۱].

$$F_{axial} = \frac{1}{2}\mu(NI)^2 \times (\frac{L_{mt}}{2(a+b_1+b_2)}) \qquad (۹)$$

a : کانال بین سیم پیچ فشار ضعیف و فشار قوی

b_1 : پهنای سیم پیچ فشار ضعیف

b_2 : پهنای سیم پیچ فشار قوی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring& Summer

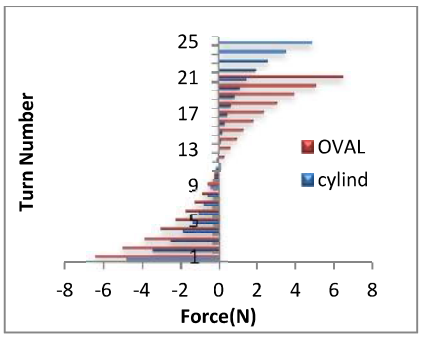
با استفاده از روابط (۸) و (۹)، در روش اجزای المان محدود پس از به دست آوردن چگالی شار مغناطیسی و چگالی جریان اعمال شده، به محاسبه‌ی نیروهای الکترومغناطیسی پرداخته می‌شود، به عنوان مثال در جدول (۵) نیروهای محاسبه شده در شرایط کار نرمال بیان گردیده است.

جدول (۵): نیروی الکترومغناطیسی محوری سیم پیچی فشار ضعیف ترانسفورماتور اُوال و سیلندری نسبت به تغییرات زمان در شرایط کار نرمال

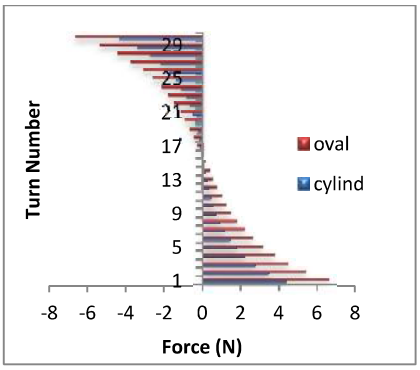
نیروی محوری (N) محاسبه شده با نرم افزار Maxwell		t=0	$t=\frac{\pi}{4}$	$t=\frac{\pi}{2}$	$t=\frac{3\pi}{4}$	$t=\frac{5\pi}{4}$
سیم پیچی فشار ضعیف اُوال	دور اول	-۴/۹۷	-۶/۴	-۲/۰۶	-۰/۶	-۶/۴
	دور آخر	۴/۹۷	۶/۴۱	۲/۰۶	۰/۶	۶/۴
سیم پیچی فشار ضعیف سیلندری	دور اول	-۳/۷۱	-۴/۷۸	-۱/۵۳	-۰/۴۶	-۴/۸
	دور آخر	۳/۷۱	۴/۷۸	۱/۵۳	۰/۴۶	۴/۸

۳-۲- مقایسه نیروی الکترومغناطیسی در شرایط کار نرمال در ترانسفورماتور اُوال و سیلندری

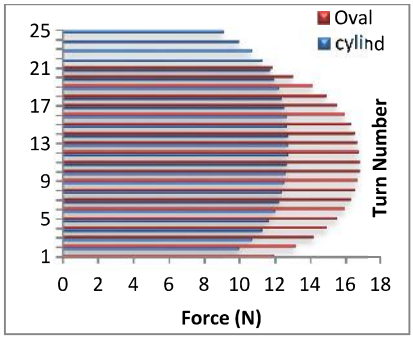
با توجه به تحلیل‌های انجام شده در محیط Magnetostatic در ۵ زمان $t = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$، نیروهای الکترومغناطیسی در $t = \frac{\pi}{4}$ تقریباً دارای بیشترین مقدار هستند، به همین دلیل نتایج نیروها در دو ترانس فوق در این نقطه‌ی کار مقایسه شده‌اند. شکل ۹ توزیع نیروهای الکترومغناطیسی در شرایط عملکرد نرمال این دو ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.



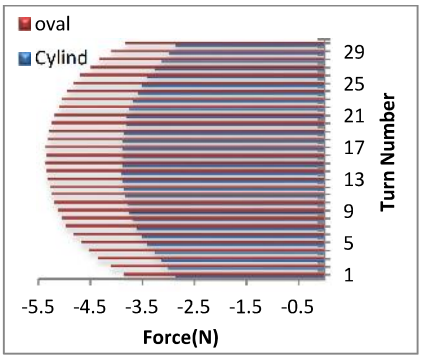
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۹: توزیع نیروی الکترومغناطیسی در شرایط عملکرد نرمال ترانسفورماتور اُوال و سیلندری، (الف) نیروی محوری LV ،(ب) نیروی محوری HV ، (ج) نیروی شعاعی LV ، (د) نیروی شعاعی HV

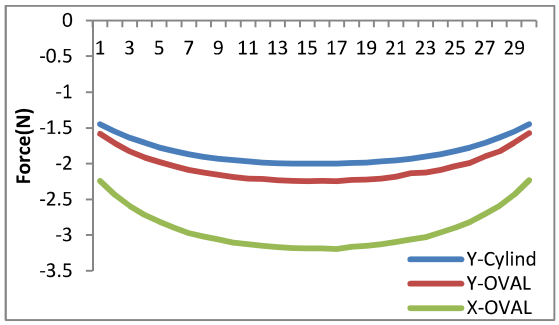
با توجه به قسمت ج و د شکل ۹، بیشترین مقدار نیروی شعاعی در سیم‌پیچ فشارضعیف اُوال برابرN ۱۶/۷۸ و در سیلندری N ۱۲/۶۴ است و مقدار بیشینه‌ی این نیرو در سیم پیچ فشارقوی اُوال برابر N ۵/۳۵- و در سیلندری N ۳/۸۸- است. در یک مقایسه‌ی کلی، این نتیجه حاصل می‌شود که در سیم‌پیچ اُوال، نیروی شعاعی ۱.۳ برابر بیشتر از سیم پیچ سیلندری است. از علل این امر می‌توان به افزایش قطر میانگین سیم پیچها، کاهش ارتفاع بوبین و تغییر مقطع ترانسفورماتور اُوال در دو راستای x,y اشاره کرد. تفاوت در شکل مقطع سیم پیچ اُوال، باعث تغییر در توزیع چگالی شار محوری می‌گردد، بنحویکه مقدار چگالی شارمحوری در راستای y، به دلیل افزایش

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

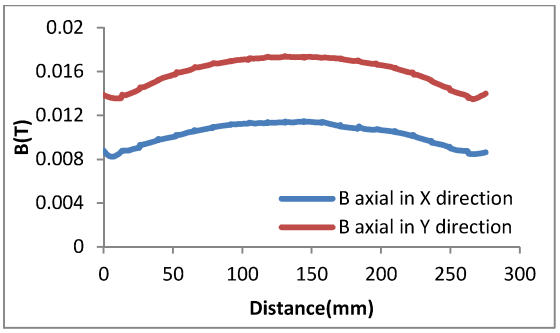
قطر میانگین، بیشتر از مؤلفه‌ی محوری چگالی شار در راستای x خواهد بود.

در شکل ۱۰ چگالی شار محوری در دو راستای x,y سیم‌پیچ فشارضعیف ترانسفورماتور اُوال رسم شده است. در این شکل بیشتر بودن مقدار چگالی شار محوری در راستای y کاملاً مشخص است. افزایش مقدار این مؤلفه، موجب افزایش نیروی شعاعی در جهت محور x خواهد شد و به عبارت دیگر نیروی شعاعی در ترانسفورماتور اُوال تمایل دارد که سیم پیچ فشار قوی را در راستای x به دایره نزدیک کرده و سیم پیچ فشار ضعیف را در این راستا جمع کند. این موضوع در هنگام بروز اتصال کوتاه می‌تواند باعث تغیر شکل در سیم پیچهای اُوال گردد. اما در ترانسفورماتور سیلندری، به دلیل مقطع یکنواخت آن، نیروی شعاعی از توزیع یکنواختی در دو راستای x,y برخوردار است و لذا احتمال تغییر شکل سیم پیچها در این ترانسفوماتور کمتر است.

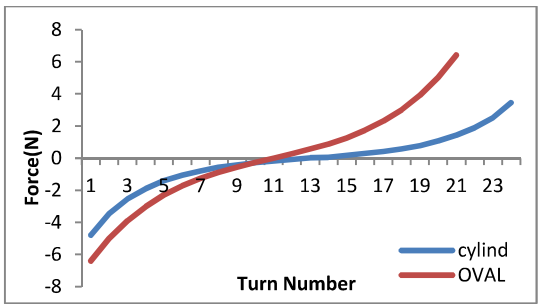
شکل ۱۱، نشان دهنده‌ی نیروی شعاعی ترانسفورماتور اُوال و سیلندری در دو راستای بیان شده است. مقدار نیروی شعاعی در راستای محور y اُوال و سیلندری شبیه به یکدیگر هستند، زیرا مقطع اُوال در این راستا به دایره شبیه است؛ اما به دلیل تغییر شکل مقطع اُوال در راستای x ، نیروی شعاعی بیشتری ظاهر می‌گردد. به عنوان مثال مقدار این نیرو در ترانسفورماتور اُوال در راستای x، برابر N ۳/۱۹- ، و در راستای y N ۲/۲۴- است. اما در ترانسفورماتور سیلندری مقدار نیروی شعاعی در راستای x,y یکسان بوده و برابر N۲- است.



شکل (۱۰): مولفه‌ی x,y نیروی شعاعی سیم پیچ HV در حالت عملکرد نرمال ترانسفورماتورهای اُوال و سیلندری

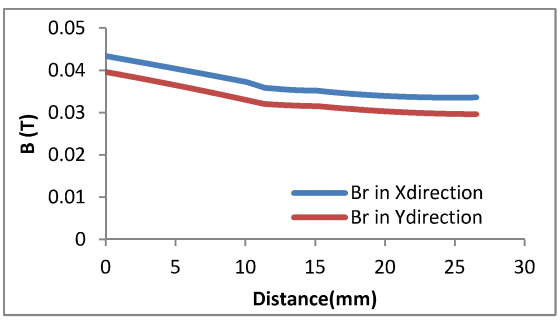


شکل (۱۱): مولفه‌ی چگالی شار محوری در راستای x,y در سیم پیچ LV ترانسفورماتور اُوال



شکل (۱۲): نیروی محوری سیم پیچ LV در حالت عملکرد نرمال ترانسفورماتورهای اُوال و سیلندری

با توجه به مقایسه‌ی صورت گرفته در خصوص نیروی محوری ترانسفورماتور اُوال و سیلندری در شکل ۱۲،۹ و مقادیر جدول(۴)، این نتیجه حاصل می‌شود که مقدار نیروی محوری سیم پیچهای اُوال اعم از فشار قوی و فشار ضعیف، بیشتر از سیم‌پیچ سیلندری است. علت این امر تفاوت در ساختار سیم پیچ‌های دو ترانسفورماتور است؛ که منجر به تغییر در مقدار و نحوه‌ی توزیع چگالی شار عرضی می‌گردد. کاهش ارتفاع تقریباً ۲۰٪ و افزایش قطر میانگین سیم پیچهای اُوال باعث افزایش مقدار چگالی شار عرضی شده است. همچنین یکسان نبودن توزیع چگالی شار عرضی در دو راستای x,y سیم پیچ اُوال به دلیل شکل مقطع آن، نیروی محوری برآیند را افزایش داده است (شکل ۱۳).



شکل (۱۳): مولفه‌ی چگالی شار عرضی در راستای x,y در سیم پیچ HV ترانسفورماتور اُوال

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring& Summer

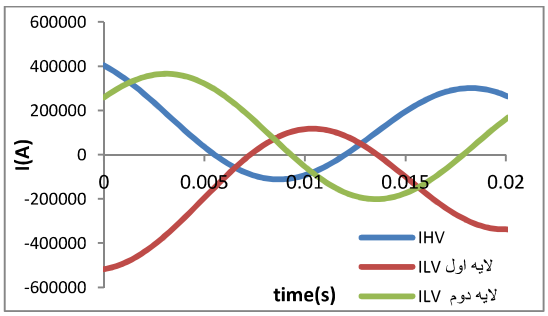
۴-۲- محاسبه‌ی نیروی الکترومغناطیسی در شرایط اتصال کوتاه در ترانسفورماتور اُوال وسیلندری

به دلیل اختلاف فاز بین جریان دو لایه سیم پیچ فشار ضعیف، نمی‌توان تنها از رابطه‌ی (۱۰) برای محاسبه‌ی نیروهای اتصال کوتاه استفاده نمود. بلکه باید اختلاف فاز را هم، در فرمول جریان اتصال کوتاه لحاظ کرد. این جریان اتصال کوتاه در نظر گرفته شده در رابطه‌ی (۱۱) دارای مؤلفه‌ی نمایی و فرکانس ۵۰Hz است. نیروی بدست آمده از این فرمول‌ها دارای سه مولفه‌ی dc و فرکانس ۵۰ و فرکانس ۱۰۰ HZ می‌باشد [۲۲].

$$I_{\max} = \frac{I_{normal} \times k\sqrt{2}}{\sqrt{U_x^2 + U_r^2}} \qquad (۱۰)$$

$$I_{sc} = I_{\max}(\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \times \sin(\alpha - \varphi)) \qquad (۱۱)$$

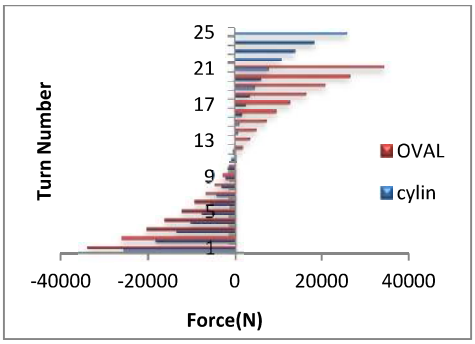
در روابط بالا $K\sqrt{2}$، ضریب پیک اتصال‌کوتاه است؛ U_x و U_r به ترتیب افت ولتاژ راکتانسی و افت ولتاژ اهمی ترانسفورماتور هستند. همچنین مقدار α زاویه‌ی ولتاژ در هنگام اتصال کوتاه می‌باشد. با توجه به فرمول (۱۱) بیشترین مقدار جریان اتصال کوتاه در $\alpha = \frac{\pi}{2}$ رخ خواهد داد [۲۳]. τ ثابت زمانی ترانسفورماتور و φ اختلاف فاز است (شکل ۱۴).



شکل (۱۴): منحنی جریان سیم پیچ های ترانسفورماتورأوال و سیلندری در شرایط اتصال کوتاه

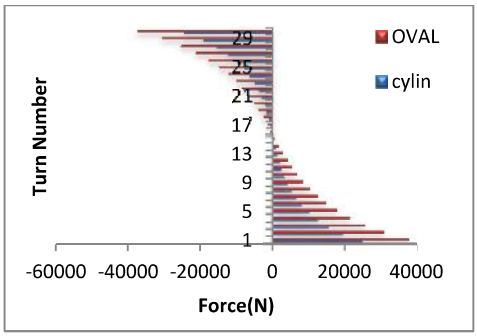
۵-۲- مقایسه‌ی نیروی الکترومغناطیسی در شرایط اتصال کوتاه در ترانسفورماتور اُوال و سیلندری

همانگونه که انتظار می‌رفت مقدار نیروهای اتصال‌کوتاه شعاعی و محوری ترانسفورماتور اُوال همانند نیروهای الکترومغناطیسی در حالت کار نرمال بیشتر از ترانسفورماتور سیلندری است. مقایسه‌ی بین نیروهای شعاعی و محوری ترانسفورماتور اُوال و سیلندری در شکل ۱۵ و در جداول (۶) و (۷) صورت گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده در حالت اتصال کوتاه، نیروی محوری سیم پیچ‌های فشارضعیف و فشارقوی ترانسفورماتور اُوال بیشتر از ترانسفورماتور سیلندری است. منحنی توزیع نیروی محوری سیم پیچ فشار ضعیف در شکل ۱۶ رسم شده است که در آن بیشترین نیروی محوری برابر ۳۳۸۹۰ N است، اما در سیم‌پیچ سیلندری ۲۵۵۷۰ N می‌باشد. علت این تفاوت در قسمت ۳-۲ بیان گردید. همچنین با استفاده از نرم افزار Force Calculation Program ng41r50.Ver 1.04[۲]، نیروهای ترانسفورماتور سیلندری محاسبه شده‌اند، این نرم افزار بر اساس تئوری تصویر به محاسبه‌ی نیروهای ترانسفورماتور می‌پردازد. بیشترین مقدار نیروی محوری سیم پیچ فشار ضعیف با استفاده از این نرم افزار ۲۳۲۰۰ N بدست آمده است، که این مقدار حدوداً ۹٪ با نتایج حاصل از نرم افزار اجزای المان محدود متفاوت است. علت این اختلاف، تفاوت در دو روش اجزای المان محدود و تئوری تصویر است. بر طبق مقالات مختلف در روش تئوری تصویر، نیروهای محوری کمتر از حد واقعی محاسبه می‌گردند، در نتیجه در روش اجزای المان محدود جواب‌های بدست آمده به واقیعت نزدیک‌تر هستند. نیروی شعاعی در ترانسفورماتور اُوال در حالت اتصال کوتاه رفتاری مشابه با حالت نرمال داشته با این تفاوت که جریان اتصال کوتاه در سیکل‌های اول به علت وجود مؤلفه‌ی نمایی دارای تغییرات سینوسی نمی‌باشد و پس از طی چند سیکل به حالت تناوبی برخواهد گشت. مقداری نیروی شعاعی سیم پیچ اُوال در راستای y مشابه با سیم‌پیچ سیلندری است؛ اما در راستای x، مقدار آن تقریباً ۱.۶ برابر مولفه‌های y است مطابق (شکل ۱۷).

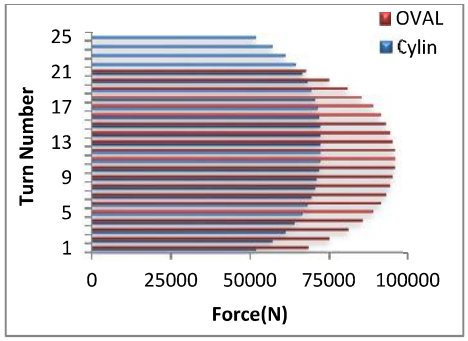


(الف)

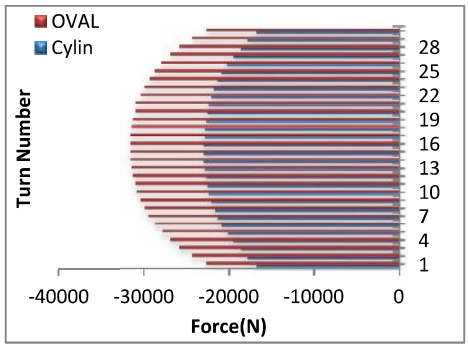
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]



(ب)

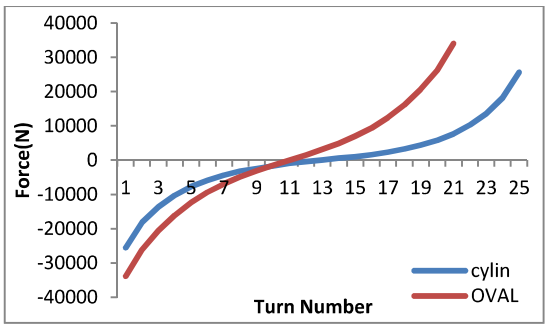


(ج)

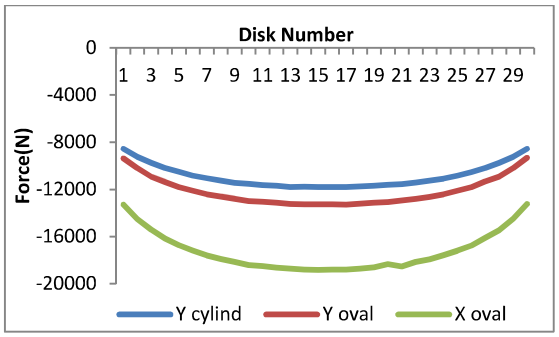


(د)

شکل (۱۵): توزیع نیروی الکترومغناطیسی در شرایط اتصال کوتاه ترانسفورماتور اُوال و سیلندری ، (الف) نیروی محوری LV ، (ب) نیروی محوری HV ، (ج) نیروی شعاعی LV ، (د) نیروی شعاعی HV



شکل (۱۶) نیروی محوری سیم پیچ HV در حالت اتصال کوتاه ترانسفورماتورهای اُوال و سیلندری



شکل (۱۷) مؤلفه ی x,y نیروی شعاعی سیم پیچ HV در حالت اتصال کوتاه ترانسفورماتورهای اُوال و سیلندری

جدول (۶) تغییرات نیروی اتصال کوتاه محوری سیم پیچی فشار ضعیف ترانسفورماتور اُوال و سیلندری نسبت به تغییرات زمان

		نیروی محوری (نیوتن) محاسبه شده توسط نرم افزارMaxwell	t=0	$t=\frac{\pi}{4}$	$t=\frac{\pi}{2}$	$t=\frac{3\pi}{4}$	$t=\frac{5\pi}{4}$
سیم پیچی فشار ضعیف اُوال	دور اول	-۳۳۸۰۰	-۲۸۵۰۰	-۱۰۴۰۰	-۱۵۰	-۲۴۰۰
	دور آخر	۳۴۰۰۰	۲۸۶۰۰	۱۰۵۰۰	۱۴۰	۲۴۰۰
سیم پیچی فشار ضعیف سیلندری	دور اول	-۲۵۵۰۰	-۲۲۰۰۰	-۸۴۰۰	-۲۳۰	-۲۰۰۰
	دور آخر	۲۵۶۰۰	۲۲۱۰۰	۸۴۰۰	۲۳۰	۲۰۱۰

جدول (۷) تغییرات نیروی اتصال کوتاه شعاعی سیم پیچی فشار ضعیف ترانسفورماتور اُوال و سیلندری نسبت به تغییرات زمان

	نیروی شعاعی(نیوتن) محاسبه شده توسط نرم افزار Maxwell	t=0	$t=\frac{\pi}{4}$	$t=\frac{\pi}{2}$	$t=\frac{3\pi}{4}$	$t=\frac{5\pi}{4}$
سیم پیچی فشار ضعیف اُوال	مؤلفه X	۸۰۶۷۰	۵۶۹۰۰	۱۴۲۱۰	۱۶۷۰	۲۶۰۰
	مؤلفه Y	۵۱۱۲۰	۳۶۳۳۰	۹۰۹۰	۱۱۱۰	۱۶۶۰
	نیروی کل	۹۵۵۰۰	۶۷۵۰۰	۱۶۸۶۰	۲۰۰۰	۳۰۸۰
سیم پیچی فشار ضعیف سیلندری	مؤلفه X	۵۰۸۴۰	۳۷۰۰۰	۹۹۳۰	۸۹۰	۱۹۲۰
	مؤلفه Y	۵۰۸۴۰	۳۷۰۰۰	۹۹۳۰	۸۹۰	۱۹۲۰
	نیروی کل	۷۱۹۳۰	۵۲۳۲۰	۱۴۰۴۰	۱۲۵۰	۲۷۱۰

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring& Summer

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، در راستای تولید تکنولوژی ترانسفورماتور اُوال در ایران، به موضوع بررسی نیروهای الکترومغناطیسی این ترانسفورماتور پرداخته شد. علت انتخاب این موضوع نبود اطلاعات کافی در زمینه‌ی محاسبه و تحلیل نیروهای این ترانسفورماتور است. به منظور بررسی نوع رفتار نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور اُوال در حالت کار عادی و اتصال کوتاه از روش اجزای المان محدود در محیط سه بعدی بهره گرفته شد. نتایج بدست آمده بیانگر بیشتر بودن نیروهای محوری و شعاعی ترانسفورماتور اُوال نسبت به ترانسفورماتور سیلندری است، همچنین توزیع نیروهای شعاعی ترانسفورماتور اُوال در مقطع آن بر خلاف ترانسفورماتور سیلندری یکنواخت نمی‌باشد. افزایش مقدار نیروهای ترانسفورماتور مورد بحث در مقایسه با ترانسفورماتورهای سیلندری باید در هنگام طراحی مد نظر قرار گرفته شود؛ زیرا در صورت نادیده گرفتن این موضوع، احتمال دفرمه شدن سیم پیچهای ترانسفورماتور اُوال بیشتر است.

مراجع

[1] Hyun. M,Sung Chin Hahn, "Experimental Verification and Finit Element Analysis of Short Circuit Electromagnetic Force for Dry –Type Transformer" ,IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL.48,NO 2,FEBRUARY 2012

[2] Jawad Faze, Bashir Mahdi Ebrahimi , "Three and Two-Dimensional Finit Element Computatio of Inrush Current and Short-circuit Electromagnetic Forces on Windings of a Three Phase Core-Type Power Transformer" ,IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL.44,NO 5,MAY 2008.

[3] Jiao Liyang, Bai Baodong , "The Calculation of Amper Force on Electric Power Transformer under the Short Circuit Situation" ,International Conference on Electrical Machines and Systems, 4423 - 4426 , 2008.

[4] Abbaszadeh.k ,Jamali.S, "Calculation of Circuit Reactance and Electromagnetic Force in Three Phase transformer by Finit Element Method" ,Proceedings of theEighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 1725 - 1730 Vol. 3, 2005.

[5] Yun-Qiu Tang, Jing-Qiu Qiao, "Numerical Calculation Of Short Circuit Electromagnetic Forces On The Transformer Winding" ,IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 26, NO. 2, MARCH 1990.

[6] Antonios G. Kladas, Michael P , " Leakage Flux And Force Calculation On Power Transformer Windings Unde Short-Circuit: 2D And 3D Models Based On The Theory Of Images And The Finite Element Method Compared To Measurements" , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. VOL. 30, NO. 5. SEPTEMBER 1994.

[۷] دکتر صفایی، ا ، ۱۳۸۴،" **مبانی الکترومغناطیس**" ، شیخ بهایی، چاپ هفتم،

[8] Final Report Prepared By Working Group Of Study Committee No. 12 (Transformers) ,"Calculation Of Short Circuit Forces In Transformers",1979,Electra.

[۹] یداله کردلو ، سید هادی حسینی ، " **محاسبه نیروهای اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای قدرت توسط روش رابین: اعتبار سنجی محاسبات یک ترانسفورماتور نمونه توسط FEM** " بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق، ۲۰۰۹ .

[10] Hidajet Salkiü, Vlado Madžareviü , "Numerical Calculation of Magnetic Dissipation and Coil in Power Transformer" ,18th International Conference on Electricity Distribution , Turin, 6-9 June 2005.

[11] WATERS. M , "The Measurement And Calculation Of Axial Electromagnetic Forces In Concentric Transformer Windings" , Electrical Engineers, Journal of the Institution , 63 - 64 ,1954.

[12] Hongkui Li, Gang Cheng , "Analysis of Three-Phase Power Transformer Short Circuit Magnetic Field and Forces" ,International Conference on Electrical and Control Engineering 2010

[13] J. Y. Lee, H .M. Ahn ," Finit Element Analysis of Short Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer " International Conference on Electrical Machines and Systems, 49-61,2009.

[14] KarenL. Butler, HangWang, "Modeling Transformers With Internal Incipient Faults ", IEEE Transactions On Power Delivery,Vol.17,No.2,April2002.

[15] A.R. Zare, " Ferroresonance Modeling in Transformers Based on a Novel Hysteretic Core Model" , Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineering (IAEEE), Vol. 4, No.2, Fall and Winter 2007.

[16] Ansoft Maxwell Software V.13,Documentation,2010

[17] Feyzi M, Sabahi M, "Finite Element Analyses of Short Circuit Forces in Power Transformers with

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]

Asymmetric Condition ", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 576-581,2008.

[18] A . C. de Azevedo,A C.Delaiba , "Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: a time domain approach" ,International Conference on power systems Transients (IPST'07) in Lyon,France on June 4-7 ,2007.

[۱۹] نیکولابیانچی، ۱۳۸۷ ،" **تحلیل ماشین های الکتریکی به روش اجزای المان محدود**"، ترجمه دکتر کریم عباس زاده، مهندس علیرضا قربانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول.

[20] A. C. de Azevedo,Rezende, Ivan , "Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused By External Faults Using FEM" ,Transmission & Distribution Conference and Exposition,1-6, Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES .

[۲۱] آ-ک-ساوانی، " **طراحی جامع ماشین های الکتریکی**" ، ترجمه دکتر لسانی، دانش و فن، ۱۳۶۱.

[۲۲] دکتر علی مطلبی، " **ترانسفورماتور یک فازه و سه فازه**" ، جلد دوم،چاپ پنجم، نشر افروز، ۱۳۸۵.

[23] G. Bertagnolli ," Short Circuit Duty of Power **Transformer", Second Revisd Edition, ABB, 1996.**

زیرنویس‌ها

[۱] OVAL

[۲] این نرم افزار ، نوشته شده توسط شرکت زیمنس می باشد و از نرم افزار-های صنعتی و درون شرکتی است. همچنین با استفاده از این نرم افزار نیروهای ترانسفورماتور قدرت نیز محاسبه می‌گردد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring& Summer

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.11.5]