



ارزیابی مقاومت در برابر اتصال کوتاه و توسعه اتوترانسفورماتور با ظرفیت بالا

پارسا ثروتی^۱، شهاب الدین نیکوخصال^۳، احمد مرادی^۲

^۱- دانشکده مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران servatiparsa7@gmail.com

^۲- دانشکده مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران pes.nikookhesal@gmail.com

^۳- دانشکده مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران st_ahmad_moradi@azad.ac.ir

چکیده

وقوع اتصال کوتاه ناگهانی در یک ترانسفورماتور بزرگ با ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت منجر به خرابی می‌شود، که می‌تواند تأثیر زیادی بر پایداری و ایمنی شبکه برق داشته باشد. این مقاله اصول محاسبه و روش ارزیابی توانایی مقاومت ترانسفورماتور را در برابر اتصال کوتاه بررسی می‌کند. همچنین ساختار طراحی یک اتوترانسفورماتور ۴۰۰ مگاوات/۵۰۰ کیلوولت و توانایی آن برای تحمل اتصال کوتاه تحت شرایط ولتاژ بالا-ولتاژ متوسط (HV-MV) و ولتاژ متوسط-ولتاژ پایین (MV-LV) ارائه می‌شود. ویژگی‌های اتصال کوتاه بر اساس مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی ۱۱۰ کیلوولت و ۲۲۰ کیلوولت تحلیل می‌شوند و یک استراتژی کنترل برای بزرگ‌ترین اتوترانسفورماتور با ظرفیت ۴۰۰ مگاوات/۵۰۰ کیلوولت ارائه می‌شود. سپس تطبیق با نتایج یک آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی در یک مرکز آزمایش با جریان بالا انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که اتوترانسفورماتور با ظرفیت بزرگ با موفقیت، آزمون ضربه جریان بالا تحت شرایط اتصال کوتاه HV-MV و MV-LV را پشت سر گذاشته و این به عنوان یک دستاورد جهانی تاریخی تلقی می‌شود. تمام شاخص‌ها مثبت هستند و اعتبار بررسی قدرت و روش ارزیابی اتصال کوتاه را تایید می‌کنند. این نیز توانایی بالا اتوترانسفورماتور ۵۰۰ کیلوولت را برای مقاومت در برابر اتصال کوتاه نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اتوترانسفورماتورها، نیروهای الکترومغناطیسی، ارزیابی ترانسفورماتورهای قدرت، جریان‌های اتصال کوتاه

1. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت، تجهیزات بسیار مهمی در سیستم‌های برق هستند. آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور یک آزمایش خاص است و هزینه آزمایش بسیار زیاد است. بیشتر ترانسفورماتورها بدون انجام آزمایش اتصال کوتاه به بهره‌برداری گذاشته می‌شوند که باعث بروز مشکلات پنهان در پایداری شبکه برق می‌شود. در مقایسه با ترانسفورماتورهای 110 کیلوولت و 220 کیلوولت، وقوع اتصال کوتاه در ترانسفورماتور 500 کیلوولت بیشتر ممکن است منجر به خرابی سیم پیچ شود و تأثیر بیشتری بر اقتصاد اجتماعی داشته باشد.

در اتصال کوتاه، نیروهای شعاعی و محوری بر سیم‌پیچ‌ها وارد می‌شود. بخش‌هایی از سیم‌پیچ تحت تأثیر نیروی مستقیم شعاعی به سمت داخل و بین نوارهای شعاعی خم می‌شوند، و بخش‌های دیگر تحت تأثیر نیروی محوری بین فاصله‌گذارهای عایق کج و خمیده می‌شوند، که تعمیر آن در محل بسیار دشوار است و تأثیر زیادی بر مجموع آنها خواهد داشت. بنابراین باید اطمینان حاصل شود که سیم‌پیچ در برابر اتصال کوتاه، قدرت و استحکام کافی را دارد.

در سال‌های اخیر، مقالات تحقیقاتی زیادی در مورد محاسبه و تحلیل نیروی الکترومغناطیسی اتصال کوتاه سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور وجود دارد. یک مدل اتصال مدار میدانی با ترانسفورماتور 220 کیلوولت ایجاد شده و نیروی الکترومغناطیسی اتصال کوتاه مورد مطالعه قرار گرفته است. Fonseca W. S. یک مدل تک‌فازی پیشنهاد داده و نیروهای الکترومغناطیسی را بر اساس ترانسفورماتور MVA 50 تحلیل کرده است. Jin M. یک مدل ساختاری مغناطیسی متصل قوی پیشنهاد داده است. Ashfaq A. مقدار بار نظری را تحلیل کرده و آن را با اندازه‌گیری‌های واقعی روی یک نمونه اولیه ترانسفورماتور MVA 20 مقایسه کرده است. Miyazaki S. نقص‌های مکانیکی را بررسی کرد و آزمایش اتصال کوتاه را روی هشت ترانسفورماتور انجام داد. Wu Y. فشار سیم‌پیچ‌های HV و LV در یک ترانسفورماتور 2 کیلوولت آمپر را با استفاده از روش المان محدود 2 بعدی مورد تحقیق قرار داد. Zhang C. نیروی الکترومغناطیسی و تغییر شکل را تحت جریان ورودی تحریک، تجزیه و تحلیل کرد. با این حال، تحقیقات فوق بر تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی ویژگی‌های الکترومغناطیسی سیم‌پیچ‌ها متمرکز است و تعداد کمی مقاله تحقیقاتی در مورد تأیید آزمایش اتصال کوتاه با ظرفیت بزرگ 500 کیلوولت نمونه واقعی وجود دارد.

علاوه بر این، مزایای جذاب ترانسفورماتورهای فوق که شامل رسانای دمای بالا (HTS) نسبت به مدل‌های معمولی است، شرکت‌های تولیدی، موسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌های سراسر جهان را به انجام تحقیق و توسعه در این زمینه ترغیب کرده است. Ahmadpour A. یک ترانسفورماتور توزیع HTS با ظرفیت 630 کیلوولت آمپر را تحت شرایط مختلف با استفاده از روش المان محدود (FEM) مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل کرد. Moradnouri A. نیروی اتصال کوتاه، به ویژه نیروی اتصال کوتاه محوری، را با بهینه‌سازی طراحی ترانسفورماتور HTS و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ناشی مغناطیسی کاهش داد.

برای اطمینان از توانایی مقاومت در برابر اتصال کوتاه، بسیاری از تولیدکنندگان، آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی ترانسفورماتورهای ۱۱۰ کیلوولت یا ۲۲۰ کیلوولت را انجام داده‌اند و تعداد کمی از تولیدکنندگان نمونه اولیه اتصال کوتاه ترانسفورماتورهای ۵۰۰ کیلوولت با ظرفیت ۲۵۰ مگاوات آمپر یا ۳۳۴ مگاوات آمپر را توسعه داده‌اند. آزمایشات اتصال کوتاه با ترانسفورماتور ۵۰۰ کیلوولت تحت شرایط اتصال کوتاه HV-MV و HV-LV انجام می‌شود، اما شرایط شدیدتر اتصال کوتاه MV-LV نادیده گرفته می‌شود. ترانسفورماتور ۴۰۰ مگاوات آمپر / ۵۰۰ کیلوولت بزرگترین ترانسفورماتور تک‌فاز با ظرفیت بالا برای آزمایشات ناگهانی اتصال کوتاه در سطح ۵۰۰ کیلوولت در جهان است و آزمایش شرایط اتصال کوتاه MV-LV هنوز اجرا نشده است، بنابراین نیاز به ارزیابی و توسعه نمونه اولیه از یک اتوترانسفورماتور آزمایش اتصال کوتاه با ظرفیت ۴۰۰ مگاوات آمپر وجود دارد.

این مقاله روش بررسی اتصال کوتاه را تحلیل، نیروی الکترومغناطیسی را محاسبه و توانایی مقاومت در برابر اتصال کوتاه اتوترانسفورماتور تک‌فاز ۴۰۰ مگاوات آمپر / ۵۰۰ کیلوولت را تحت شرایط HV-MV و HV-LV ارزیابی می‌کند. همچنین با مقایسه نمونه‌های اتصال کوتاه ترانسفورماتور معمولی ۱۱۰ کیلوولت و ۲۲۰ کیلوولت، ویژگی‌های اتصال کوتاه یک اتوترانسفورماتور با ظرفیت بزرگ ۵۰۰ کیلوولت را

تجزیه و تحلیل می‌کند و استراتژی کنترل را از جنبه‌های شعاعی و محوری ارائه می‌دهد. در نهایت، این مقاله جزئیات آزمایش تأثیر اتصال کوتاه و نتایج آزمایش نمونه اولیه را تحت شرایط HV-MV و MV-LV تشریح می‌کند. آزمایش اتصال کوتاه، دقت بررسی قدرت و اثربخشی روش ارزیابی اتصال کوتاه را تأیید می‌کند.

2. اصل محاسبه اتصال کوتاه ترانسفورماتور و روش ارزیابی

ارزیابی یک ترانسفورماتور تحت اتصال کوتاه عمدتاً شامل سه بخش است: محاسبه جریان اتصال کوتاه، نشتی مغناطیسی و محاسبات الکترومغناطیسی سیم‌پیچی، و بررسی استحکام در برابر اتصال کوتاه.

2_1 اصل محاسبه جریان اتصال کوتاه

2_1_1 محاسبه جریان اتصال کوتاه پایدار

بر اساس استاندارد IEC 60076-5، فرمول محاسبه برای جریان اتصال کوتاه سه‌فاز سیم‌پیچی به شرح زیر است:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \quad (1)$$

که در آن U ولتاژ نامی سیستم، Z_t مقاومت جریان متناوب ترانسفورماتور، و Z_s مقاومت جریان متناوب سیستم است. پس از تبدیل، فرمول محاسبه جریان اتصال کوتاه استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_d = I_N \times \frac{100}{U_k + \frac{s}{S_i} \times 100} \quad (2)$$

I_N جریان اسمی سیم‌پیچ است، $(U_k\%)$ مقاومت جریان متناوب ترانسفورماتور است، $(S_i\%)$ ظرفیت اسمی سه‌فاز است، (MVA) ؛ و S_s ظرفیت اتصال کوتاه سیستم (MVA) است.

2_1_2 محاسبه جریان اتصال کوتاه ناپایدار

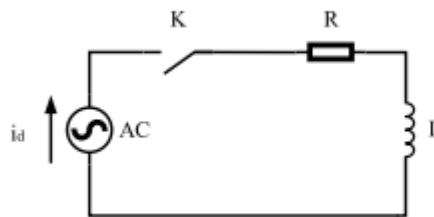
مدار محاسبه جریان در صورت بروز اتصال کوتاه ناگهانی می‌تواند معادل یک مدار RL باشد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. فرمول محاسبه جریان اتصال کوتاه در حالت گذرا به شرح زیر است:

$$i_d = \frac{U_m}{Z} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{U_m}{Z} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3)$$

زمانی که مقدار لحظه‌ای ولتاژ منبع تغذیه تنها از صفر عبور می‌کند، جریان اتصال کوتاه بیشترین است. K_{ch} به عنوان ضریب تأثیر جریان تعریف شده است. زمانی که ظرفیت ترانسفورماتور برابر یا بیشتر از 100 MVA باشد، K_{ch} برابر با 1.9 است، در غیر این صورت، K_{ch} برابر با 1.8 است.

2_2 اصول محاسبه نیروی الکترومغناطیسی سیم‌پیچی

اگر اتصال کوتاه رخ دهد، سیم‌پیچی ترانسفورماتور نیروی الکترومغناطیسی عظیمی تولید خواهد کرد و فرمول محاسبه نیروی الکترومغناطیسی به صورت زیر است:



شکل 1) اتصال کوتاه معادل

$$F(t) = F_{\max} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right] \quad (4)$$

F_{\max} حداکثر میزان نیرو است.

برای ترانسفورماتورهای دو سیم‌پیچه، نیروهای الکترومغناطیسی شعاعی و محوری تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی ناشی محوری و شعاعی به ترتیب تولید می‌شوند، همانطور که در معادله (۵) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} F_x = B_y \times J_{\Phi} \\ F_y = B_x \times J_{\Phi} \end{cases} \quad (5)$$

F_x نیروی الکترومغناطیسی شعاعی است، B_y چگالی ناشی محوری است، J_{Φ} چگالی جریان است، F_y نیروی الکترومغناطیسی محوری است، و B_x چگالی ناشی شعاعی است.

ناشی شار مغناطیسی شعاعی B_x نیروی محوری F_{ey} را تولید می‌کند و ناشی شار مغناطیسی محوری B_y نیروی شعاعی F_{ox} را تولید می‌کند، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است. نیروی محوری در انتهاها به سمت وسط سیم‌پیچی ترانسفورماتور هدایت می‌شود زیرا اجزاء ناشی شار مغناطیسی شعاعی سیم‌پیچ‌های بالا و پایین در جهات مخالف هستند.

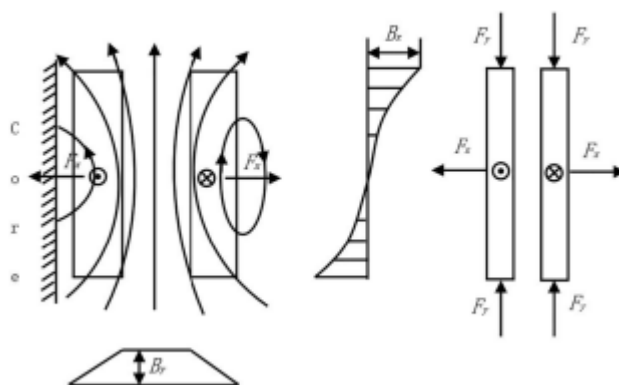
بر اساس اصول محاسبه نیروی الکترومغناطیسی، فرمول چگالی متوسط ناشی شار مغناطیسی محوری و نیروی الکترومغناطیسی شعاعی بدین صورت است:

$$B_{pj} = 0.4\pi \frac{I_{d\max} \cdot W\rho}{2H_k} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$F_x = B_{pj} \times I_{d\max} \times l_{pj} \quad (7)$$

B_{pj} چگالی متوسط ناشی شار مغناطیسی محوری است، $I_{d\max}$ حداکثر جریان اتصال کوتاه است، W تعداد دورهای سیم‌پیچی است، ρ ضریب راکول است، H_k ارتفاع سیم‌پیچی است، و l_{pj} میانگین محیط هر حلقه رسانا است.

نیروی محوری عمدتاً توسط دورهای آمپری نامتعادل و جزء شعاعی ناشی شار مغناطیسی ایجاد می‌شود. فرمول محاسبه چگالی ناشی شار مغناطیسی شعاعی و نیروی الکترومغناطیسی محوری در طول اتصال کوتاه به شرح زیر است :



شکل 2) نشت و نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ

$$B_y = 0.4\pi \frac{I_{d\max} \cdot W\rho_s \alpha_m}{\lambda} \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$F_y = B_y \times I_{d\max} \quad (9)$$

ρ_s ضریب راکول ناشی شار مغناطیسی شعاعی است، a_m حداکثر دورهای آمپری نامتعادل است، و α_m عرض ناشی شار مغناطیسی شعاعی است.

2_3 بررسی استحکام سیم‌پیچ در برابر اتصال کوتاه

آسیب به سیم‌پیچ ترانسفورماتور در اثر خطای اتصال کوتاه اغلب به دلیل ناپایداری شعاعی، ناپایداری محوری، و آسیب عایق سیم‌پیچی است. بنابراین، پایداری شعاعی، پایداری محوری سیم‌پیچ و استحکام مکانیکی مواد عایق، شاخص‌های کلیدی برای بررسی هستند.

2_3_1 بررسی پایداری شعاعی

برای سیم‌پیچ داخلی ترانسفورماتور با نیرو محرکه، بررسی پایداری شعاعی می‌تواند با استفاده از مدل قوس دایره‌ای با مرز پایداری تحت بار شعاعی یکنواخت بین دو نیرو محوری تحلیل شود. فرمول محاسبه بار بحرانی به شرح زیر است:

$$q_{cr} = \frac{E(\sigma)I}{R^3} \left[\left(\frac{\pi}{\alpha} \right)^2 - 1 \right] \quad (10)$$

$E(\sigma)$ مدول کشسانی مماسی است، I لحظه اینرسی است، R شعاع قوس است، و α زاویه بین دو نیرو محوری است.

بر اساس اصول مکانیک، معادله (10) به کشش بحرانی رسانای سیم‌پیچ تبدیل می‌شود.

$$\sigma_{cr} = \frac{E(\sigma)}{3} \left(\frac{b}{D_{Pj}} \right)^2 \left[\left(\frac{\pi}{\alpha} \right)^2 - 1 \right] = \frac{E(\sigma)}{\lambda^2} (m^2 - 1) \quad (11)$$

D_{Pj} میانگین قطر سیم‌پیچ است، b ضخامت رسانا است، $\lambda = \sqrt{3}D_{Pj}/b$ انعطاف‌پذیری است، $m = \pi/\alpha$ مقدار ناپایداری موج است.

در نهایت، بار فشرده متوسط محیطی رسانا تحت شرایط اتصال کوتاه باید کمتر از بار بحرانی آن باشد.

$$\sigma_t \leq \sigma_{cr} \quad (12)$$

2_3_2 بررسی پایداری محوری

بر اساس IEC 60076-5:2006، برای سیم‌پیچ‌های سری، مارپیچ و لایه‌ای با هادی‌های ترانسپوزیشن متصل به رزین (CTCs)، از آنجا که هادی‌ها به ویژه در برابر خم شدن مقاوم هستند، لازم نیست نیروی بحرانی آنها بررسی شود. برای سیم‌پیچ‌های سری، مارپیچ و لایه‌ای با هادی‌های معمولی یا هادی‌های ترانسپوزیشن غیرمتصل، نیروی بحرانی مربوط به خم شدن F_{tilt}^* باید طبق فرمول زیر محاسبه شود.

$$F_{tilt}^* = \left[K_1 \cdot E_0 \cdot \frac{n \cdot beq \cdot h^2}{Dmw} + K_2 \cdot \frac{n \cdot X \cdot beq^3 \cdot \pi \cdot Dmw \cdot \gamma}{h} \right] \times K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

E_0 مدول کشش مس است، n تعداد هادی‌ها در عرض شعاعی سیم‌پیچ است، beq عرض شعاعی هادی است، Dmw میانگین قطر سیم‌پیچ است، X ضریب پوشش فاصله‌گذار سیم‌پیچ‌های سری و پیچشی است، h ارتفاع هادی است، γ ثابت شکل هادی است، K_1

ضریب پیچش است، K_2 ضریب بستر است، K_3 ضریبی است که درجه سخت کاری مس را در نظر می گیرد، و K_4 ضریب نوسان دینامیکی است.

در نهایت، نیروی محوری سیم پیچ باید کمتر از نیروی بحرانی F_{tilt}^* باشد.

3_3 بررسی استحکام فاصله گذار

بر اساس IEC 60076-5:2006، بار فشاری مواد عایق بندی دور سیم پیچ و فاصله گذار شعاعی باید شرایط زیر را برآورده سازد:

$$\sigma_{sp} \leq 80 \text{ MPa} \quad (14)$$

3. محاسبه و ارزیابی قدرت اتصال کوتاه اتوترانسفورماتور 500 کیلو ولت

3_1 پارامترهای اساسی

ترانسفورماتور 500MVA/ kV 400 مورد مطالعه در این مقاله، یک اتوترانسفورماتور تک فاز با سه ستون و سه سیم پیچی، غوطه ور در روغن است. پارامترهای اساسی در جدول 1 و جدول 2 نشان داده شده اند.

3_2 ساختار پایه

اتوترانسفورماتور دارای ساختار هسته ای سه ستونی تک فاز است. سیم پیچی HV از ساختار سری با مقاومت داخلی، سیم پیچی

MV از ساختار سری معمولی، سیم پیچی های LV و تنظیمی، از ساختار مارپیچی، و سیم پیچی تحریک از ساختار سری درهم تنیده استفاده می کنند.

بدنه داخلی از ورقه نازک با فاصله روغنی کم و حلقه ای شکل گرفته استفاده می کند، و سیم اتصال HV از خروجی مستقیم بهره می برد، و ساختار داخلی در شکل 3 نشان داده شده است. مخزن دارای ساختار ستونی است، و کل ساختار بیرونی در شکل 4 نشان داده شده است.

3_3 محاسبه جریان اتصال کوتاه

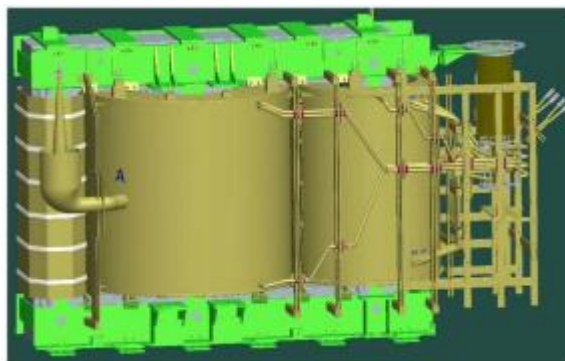
ساختار ستون کناری اتوترانسفورماتور اتخاذ شده و مدار اتصال سیم در شکل 5 نشان داده شده است. ظرفیت اتصال کوتاه سیستم HV برابر با 60000 MVA و ظرفیت اتصال کوتاه سیستم MV برابر با 18000 MVA است. بر اساس شرایط اتصال کوتاه سه فاز و با در نظر گرفتن موقعیت های مختلف اتصال وسط سیم پیچی، جریان هر سیم پیچی تحت شرایط اتصال کوتاه HV-MV و MV-LV با استفاده از فرمول (2) محاسبه می شود. نتایج محاسبه جریان در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول 1 پارامتر اصلی ترانسفورماتور

اسم پروژه	پارامتر
مدل	ODFS-400000/500
ولتاژ اسمی	$515/\sqrt{3}/(230/\sqrt{3} \pm 2 \times 2.5\%)/36 \text{ kV}$
ظرفیت اسمی	400/400/120 MVA
جریان اسمی	1345/3012/333 A
گروه اتصال	YNyn0d1
سطح عایق	SI1175LI1550AC680-LI325AC140/ LI950AC395-LI325AC140/LI200AC85
مقاومت جریان متناوب	HV-MV:20%; HV-LV:60%; MV-LV:38%
آرایش سیم پیچ	LV-MV-HV

جدول 2 پارامتر ساده سیم پیچ

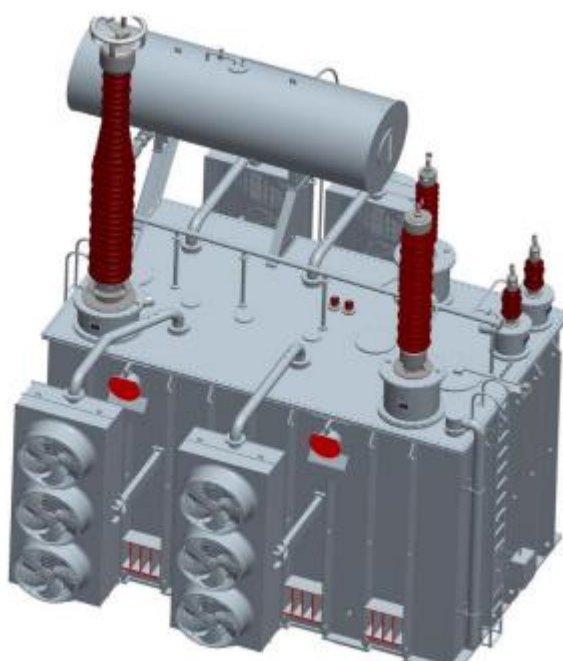
نام سیم پیچ	LV	MV	HV
نوع سیم پیچ	مارپیچ	پیوسته	پیوسته
نوع هادی	CTCs	CTCs	CTCs
قدرت بازدهی	220 MPa	200 MPa	200 MPa
تعداد دورها	83	306	365
تعداد سیم پیچها	169	124	124
تعداد نوارها	44	44	44



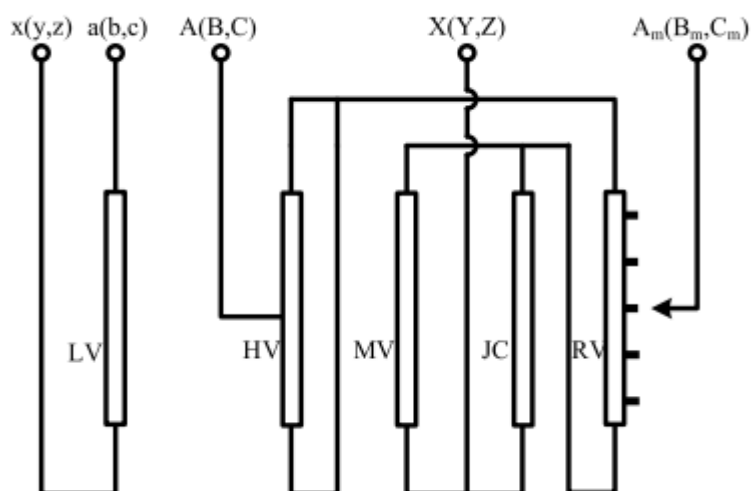
شکل 3) ساختار داخلی ترانسفورماتور

3_4 محاسبه نیروی الکترومغناطیسی با اتصال کوتاه HV-MV

محاسبه نشتی شار مغناطیسی سیم‌پیچ‌ها کار مهمی در محاسبه نیروی اتصال کوتاه است. مدل محاسبه اتصال کوتاه سیم‌پیچ ترانسفورماتور، از مدل‌سازی سیم‌پیچ به سیم‌پیچ استفاده می‌کند که می‌تواند به طور دقیق نشتی شار مغناطیسی و توزیع نیروی الکترودینامیکی هر سیم‌پیچ را محاسبه کند. محاسبه سیم‌پیچ ترانسفورماتور در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 4) ساختار خارجی ترانسفورماتور



شکل 5) مدار اتصال سیم

جدول 3 نتایج محاسبه جریان اتصال کوتاه

LV	MV	HV	محل خطا	اتصال	شرایط اتصال کوتاه
0	7.776	6.199	MV	Max	HV-MV
0	7.885	6.286	MV	Rat	
0	7.812	6.228	MV	Min	
24.546	7.001	0	LV	Max	MV-LV
24.876	7.095	0	LV	Rat	
25.044	7.143	0	LV	Min	

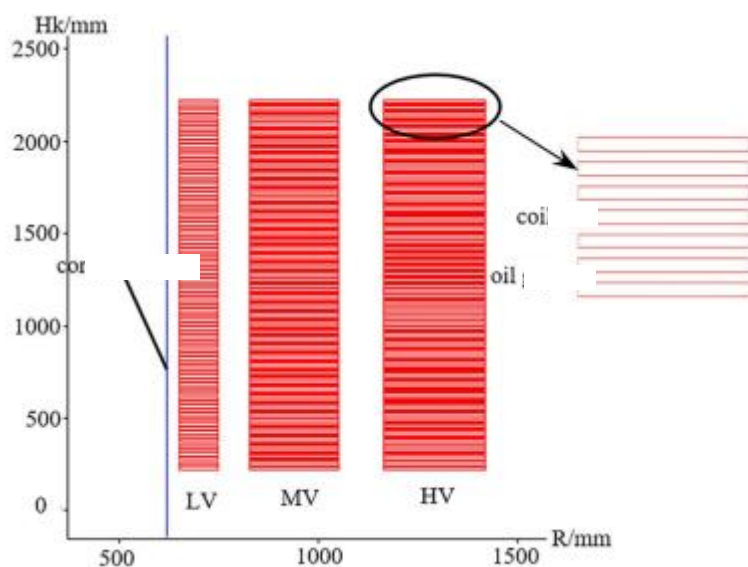
روش المان محدود دو بعدی (D FEM-2) دقت کافی در محاسبه برای میدان‌های الکترومغناطیسی محوری در ترانسفورماتور را دارد. شرط استاندارد از معادله ماکسول نشأت می‌گیرد و معادله حاکم، معادله برداری پواسون است، که به صورت زیر نشان داده شده است:

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (15)$$

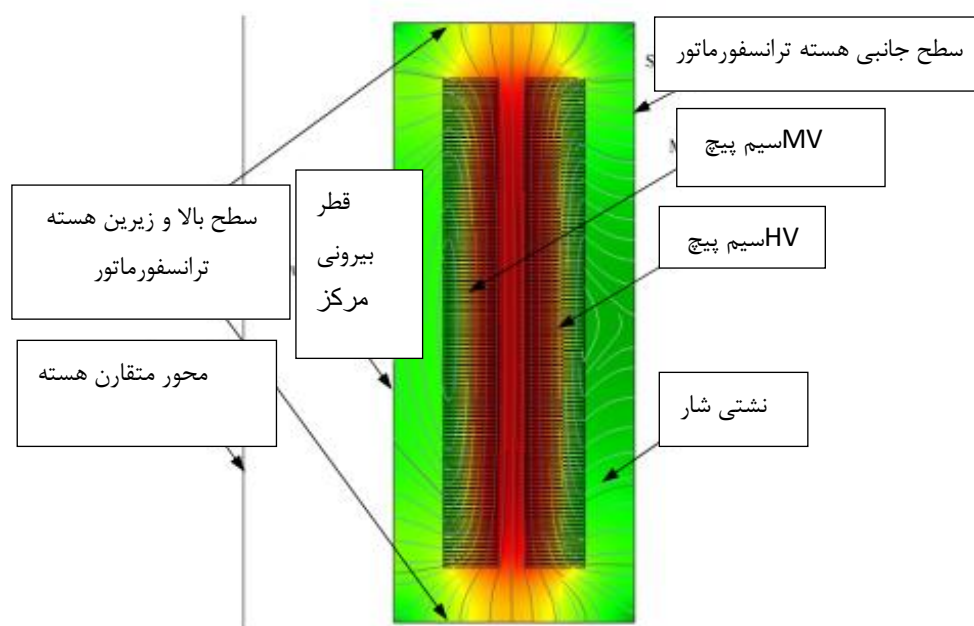
A پتانسیل برداری مغناطیسی، μ نفوذپذیری مغناطیسی، و J چگالی جریان هادی‌ها است.

مدل FEM دو بعدی برای مطالعه توزیع نشتی شار مغناطیسی سیم پیچ‌ها، بر اساس مشخصات ذکر شده در جدول ۲ و جدول ۳، همانطور که شکل ۷ نشان می‌دهد، ساخته شد.

از طریق FEM دو بعدی، میانگین نشتی شار مغناطیسی سیم پیچ به طور دقیق محاسبه شده و سپس نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ بر اساس نشتی شار مغناطیسی و پارامترهای ساختاری محاسبه می‌شود تا توزیع نشتی شار مغناطیسی و نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ به دست آید.



شکل (6) مدل محاسبه سیم پیچ

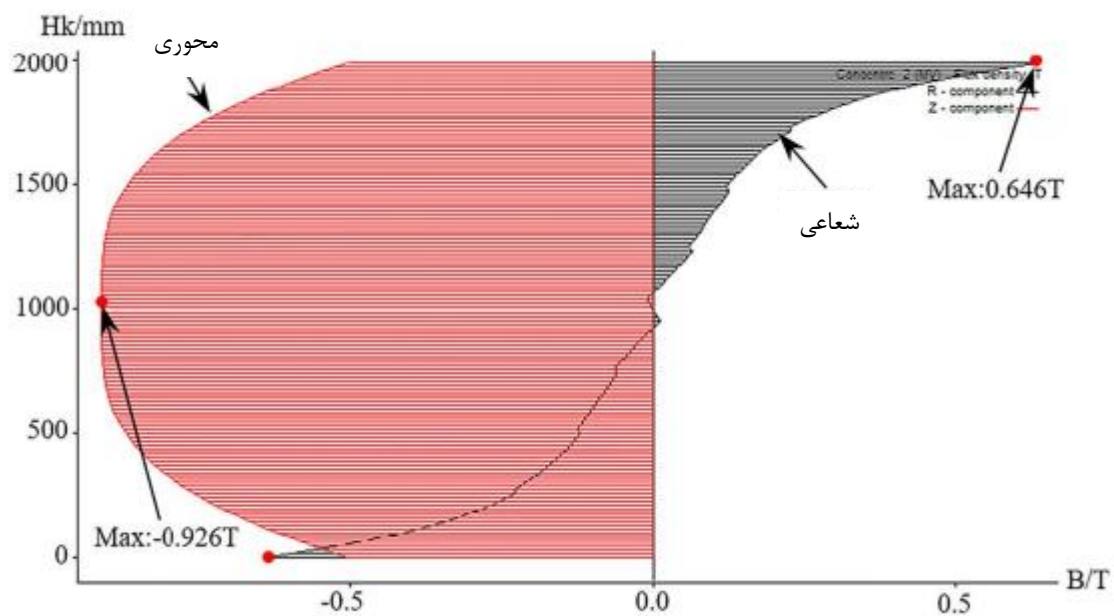


شکل 7) توزیع نشتی شار مغناطیسی با ولتاژ بالا و ولتاژ متوسط

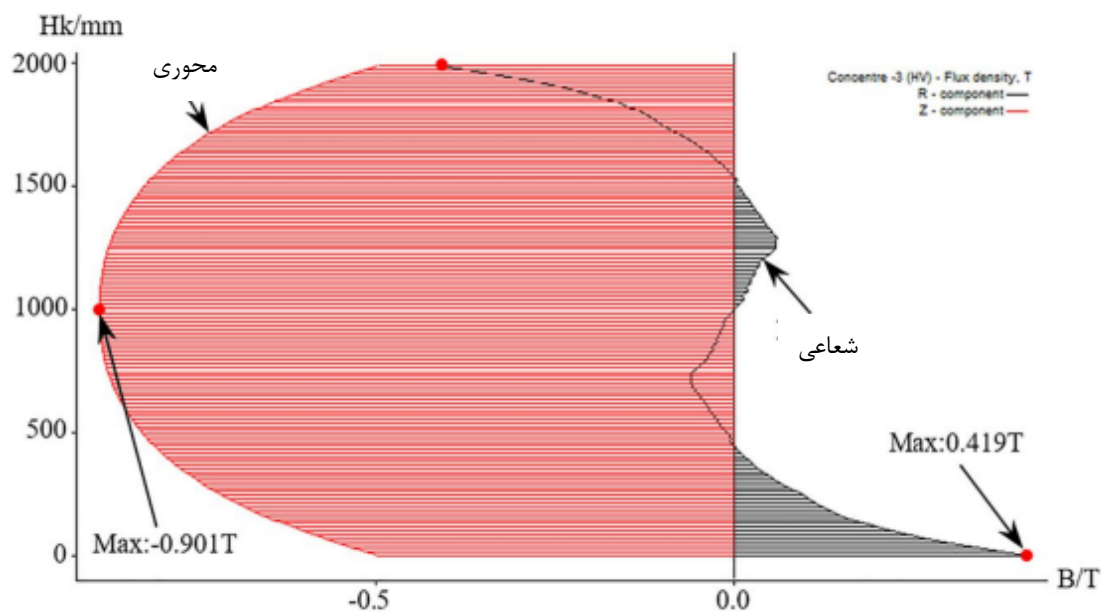
برای شرایط اتصال کوتاه HV-MV، با گرفتن نمونه برداری ارزیابی شده به عنوان مثال، نتایج محاسبه نشتی شار مغناطیسی و نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ های HV و MV در شکل های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده اند.

شکل های ۸ و ۹ نشان می دهند که تحت شرایط اتصال کوتاه HV-MV، نشتی شار مغناطیسی شعاعی سیم پیچ های HV و MV دارای تقارن آشکاری در جهت ارتفاع محوری است، و نشتی شار مغناطیسی شعاعی در انتهای بالا و پایین سیم پیچ ها زیاد است، در حالی که حداکثر مقدار نشتی شار مغناطیسی محوری در وسط سیم پیچ قرار دارد. شکل ۸ نشان می دهد که حداکثر نشتی شار مغناطیسی محوری سیم پیچ MV منفی ۰٫۹۲۶ تسلا است، که در سیم پیچ های ۶۱، ۶۲، و ۶۳ رخ می دهد؛ حداکثر نشتی شار مغناطیسی شعاعی ۰٫۶۴۶ تسلا است، که در انتها بالا و پایین سیم پیچ قرار دارد. شکل ۹ نشان می دهد که حداکثر نشتی شار مغناطیسی محوری سیم پیچ HV منفی ۰٫۹۰۱ تسلا است، که در سیم پیچ های ۶۲ و ۶۳ رخ می دهد، و حداکثر نشتی شار مغناطیسی شعاعی ۰٫۴۱۹ تسلا است، که نیز در انتها بالا و پایین سیم پیچ قرار دارد.

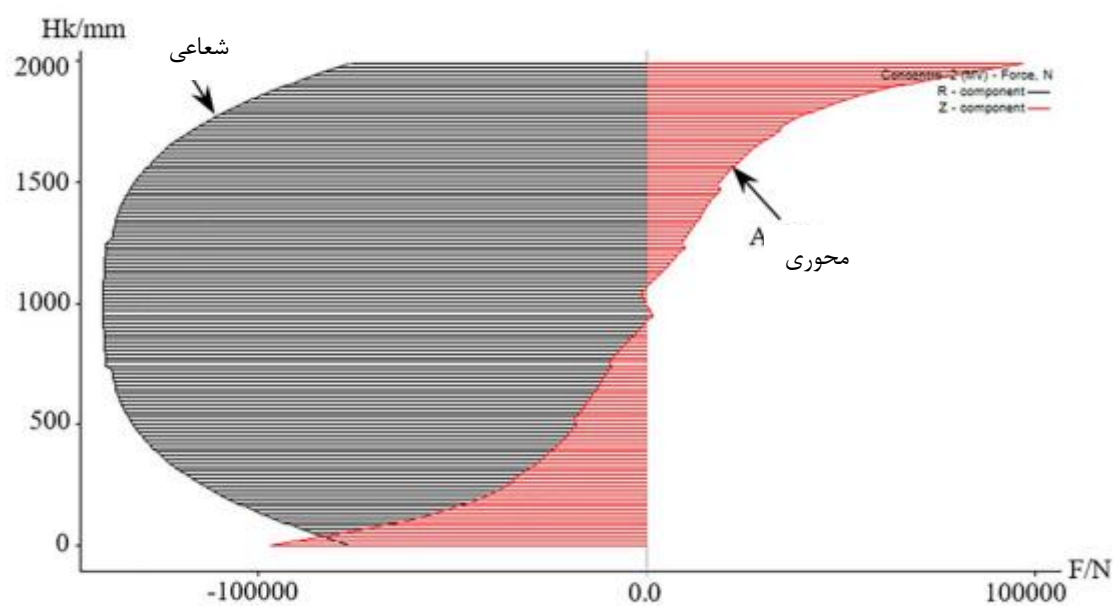
شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان می دهند که تحت شرایط اتصال کوتاه HV-MV، ویژگی های نیروی الکترومغناطیسی محوری سیم پیچ های HV و MV مشابه با نشتی شار مغناطیسی شعاعی آنها است، با تقارن آشکار در جهت ارتفاع محوری، و نیروی محوری سیم پیچ های انتهای بالا و پایین بیشترین مقدار است؛ نیروی الکترومغناطیسی شعاعی نیز تقارن آشکاری در جهت ارتفاع محوری نشان می دهد، و حداکثر نیروی شعاعی در وسط سیم پیچ قرار دارد.



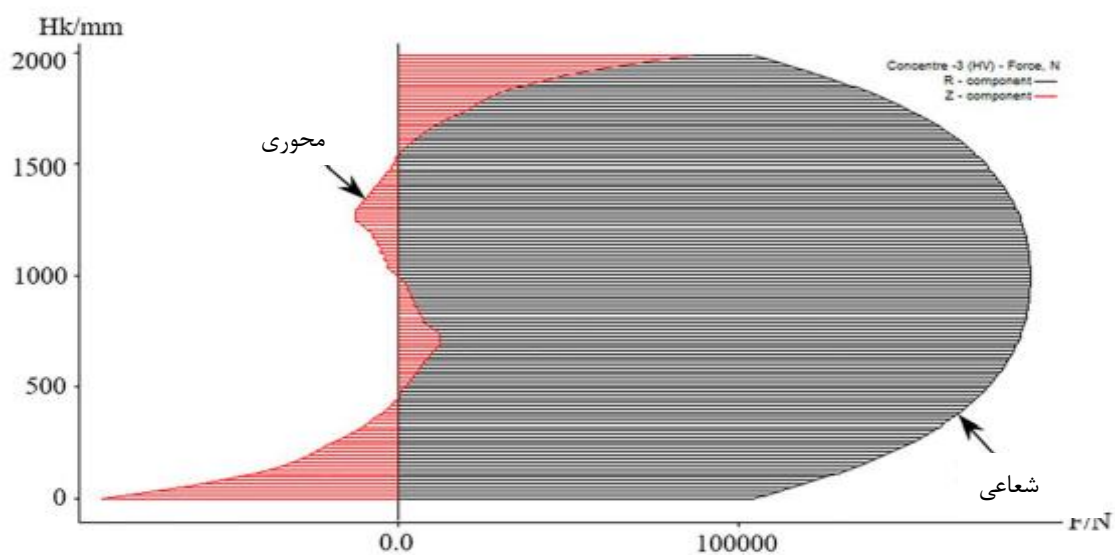
شکل 8) نشتی شار مغناطیسی سیم پیچ MV



شکل 9) نشتی شار مغناطیسی سیم پیچ HV



شکل 10) نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ MV

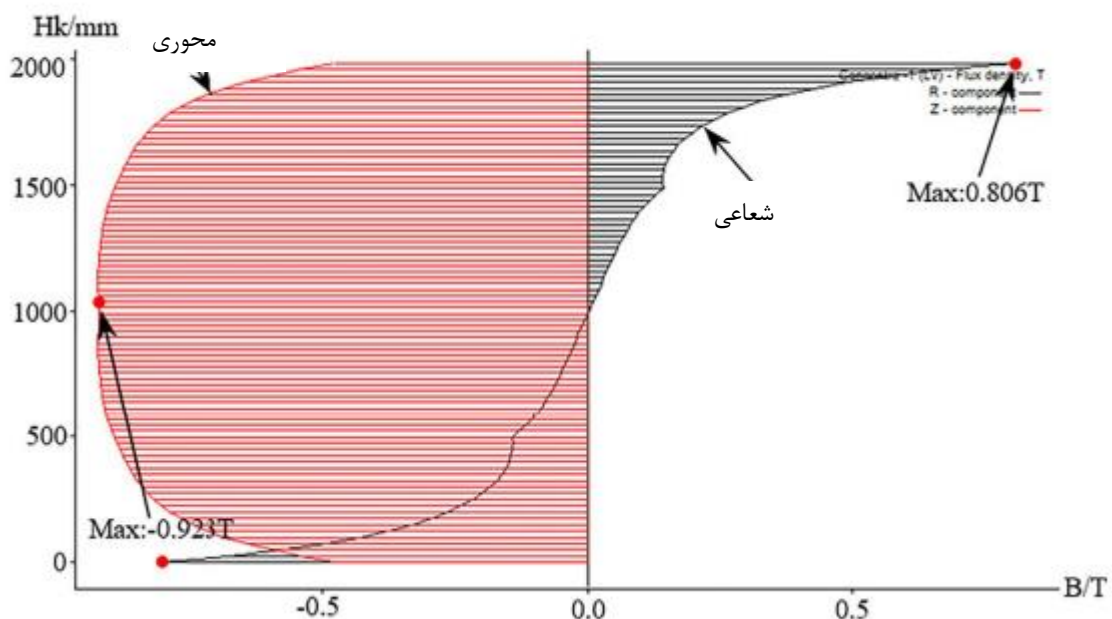


شکل 11) نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ HV

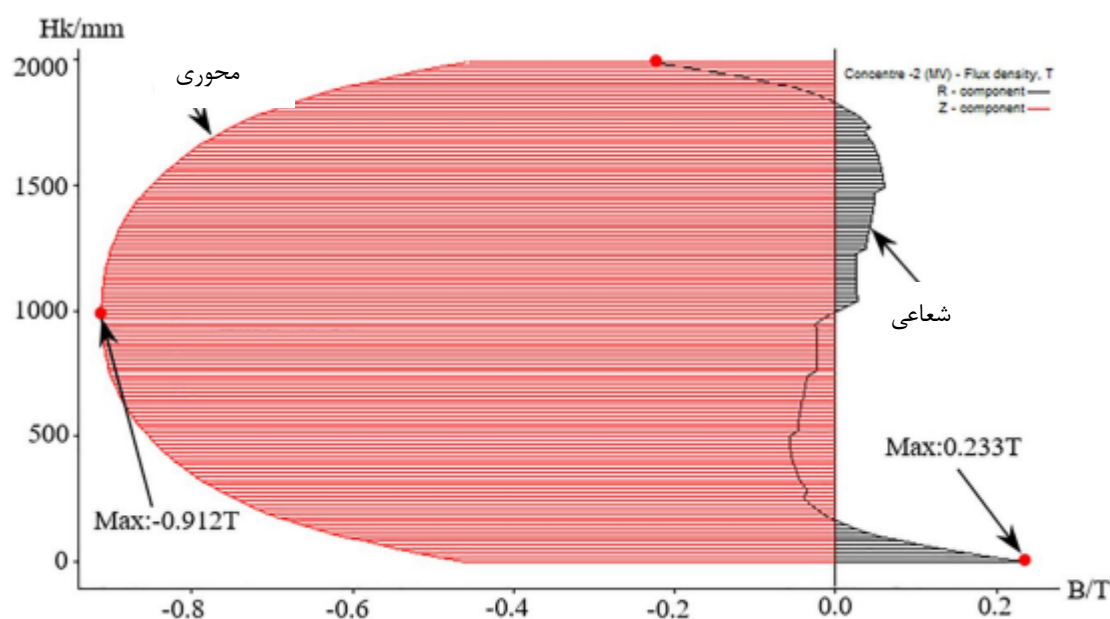
3_5 محاسبه نیروی الکترومغناطیسی با اتصال کوتاه MV-LV

با اینکه مقاومت جریان اتصال کوتاه $MV-LV$ ۹۰٪ بیشتر از $HV-MV$ است، ظرفیت ارزیابی شده $HV-MV$ ۲۳۳٪ بیشتر از $MV-LV$ است، چگالی سیم‌پیچی تحت شرایط اتصال کوتاه $MV-LV$ از شرایط اتصال کوتاه $HV-MV$ بیشتر خواهد بود، و شرایط اتصال کوتاه $MV-LV$ نیازمندی‌های بالاتری برای تحمل اتصال کوتاه دارد. برای شرایط اتصال کوتاه $MV-LV$ ، با گرفتن نمونه‌برداری ارزیابی شده به عنوان مثال، نتایج محاسبه نشتی شار مغناطیسی و نیروی الکترومغناطیسی سیم‌پیچ‌های MV و LV در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نشان داده شده‌اند.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند که تحت شرایط اتصال کوتاه $MV-LV$ ، نشتی شار مغناطیسی شعاعی سیم‌پیچ‌های MV و LV دارای تقارن آشکاری در جهت ارتفاع محوری است، و نشتی شار مغناطیسی شعاعی در انتهای بالا و پایین سیم‌پیچ‌ها زیاد است، در حالی که حداکثر مقدار نشتی شار مغناطیسی محوری در وسط سیم‌پیچ قرار دارد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که حداکثر نشتی شار مغناطیسی محوری سیم‌پیچ LV منفی ۰٫۹۲۳ تسلا است، که بین سیم‌پیچ‌های ۳۴ تا ۵۰ رخ می‌دهد؛ حداکثر نشتی شار مغناطیسی شعاعی ۰٫۸۰۶ تسلا است، که در انتهای بالا و پایین سیم‌پیچ قرار دارد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که حداکثر نشتی شار مغناطیسی محوری سیم‌پیچ MV منفی ۰٫۹۱۲ تسلا است، که بین سیم‌پیچ‌های ۶۱ تا ۶۴ رخ می‌دهد، و حداکثر نشتی شار مغناطیسی شعاعی ۰٫۲۳۳ تسلا است، که نیز در انتهای بالا و پایین سیم‌پیچ قرار دارد.

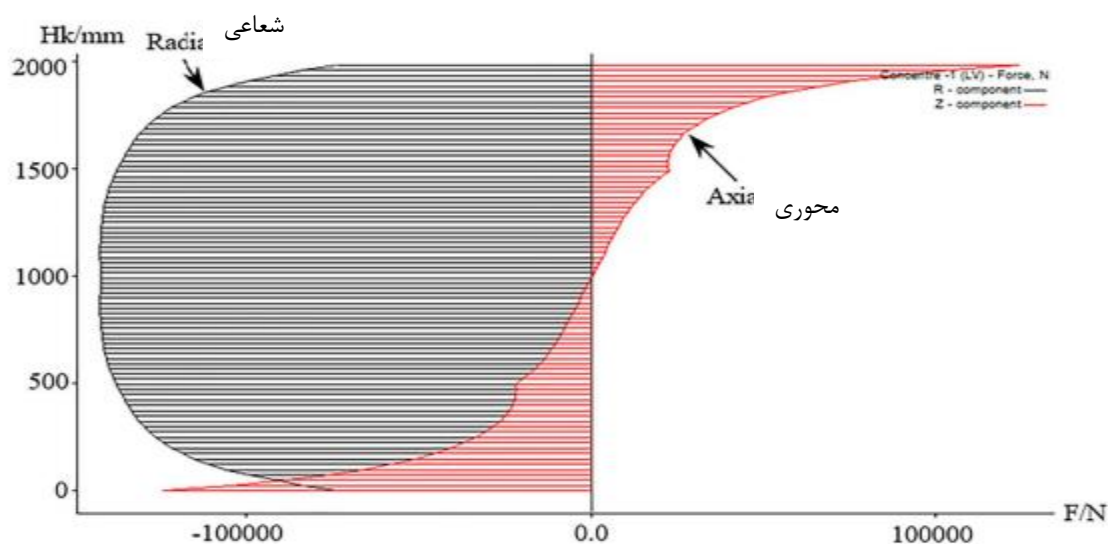


شکل ۱۲) نشتی شار مغناطیسی سیم پیچ LV

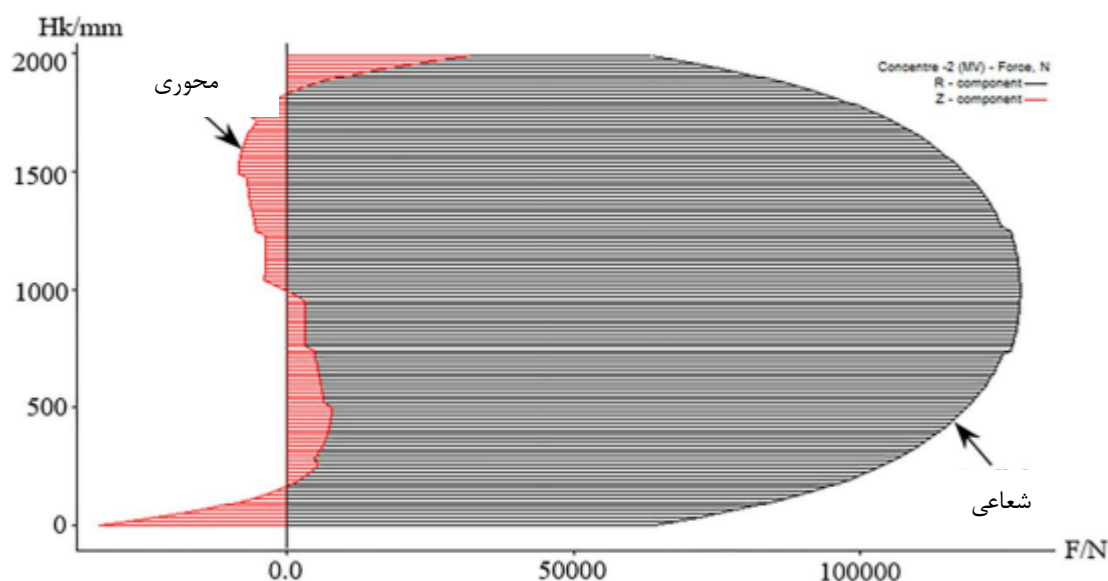


شکل 13) نشتی شار مغناطیسی سیم پیچ MV

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند که تحت شرایط اتصال کوتاه MV-LV، ویژگی‌های نیروی الکترومغناطیسی محوری سیم‌پیچ‌های MV و LV مشابه با نشتی شار مغناطیسی شعاعی آن‌ها است، با تقارن آشکار در جهت ارتفاع محوری، و نیروی محوری سیم‌پیچ‌های انتهایی بالا و پایین بیشترین مقدار است؛ نیروی الکترومغناطیسی شعاعی نیز تقارن آشکاری در جهت ارتفاع محوری نشان می‌دهد، و حداکثر نیروی شعاعی در وسط سیم‌پیچ قرار دارد.



شکل 14) نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ



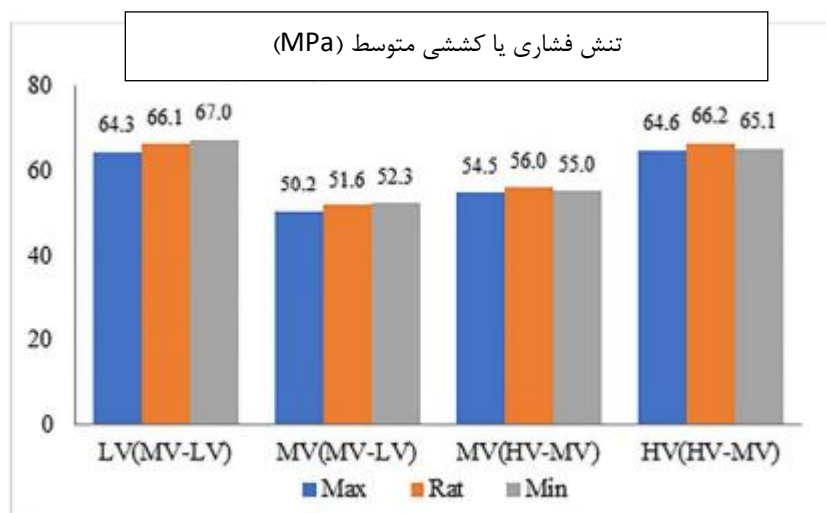
شکل 15) نیروی الکترومغناطیسی سیم پیچ MV

6_3 ارزیابی توانایی اتصال کوتاه اتوترانسفورماتور 500 کیلو ولت

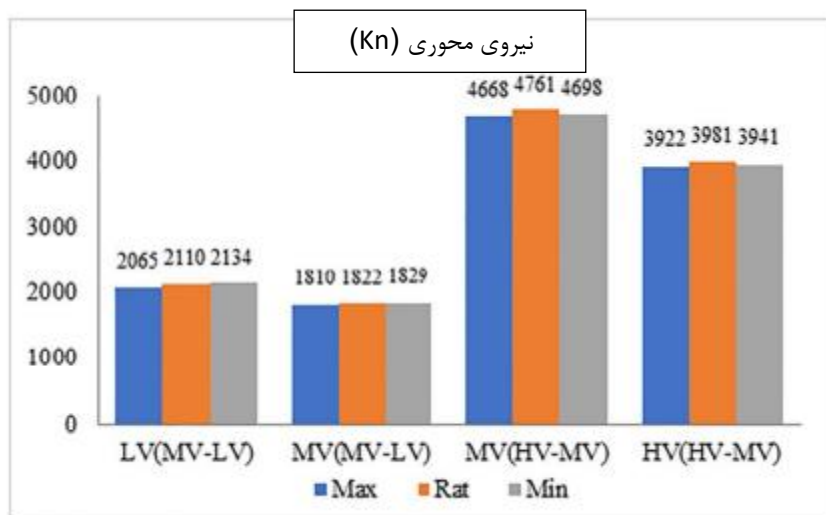
برای اتصال کوتاه‌های HV-MV و MV-LV، با در نظر گرفتن حالت‌های اتصال حداکثر، ارزیابی شده و حداقل، تنش متوسط محیطی (برای ارزیابی ثابت شعاعی)، نیروی محوری (برای ارزیابی ثابت محوری)، و تنش فشاری جداکننده (برای ارزیابی استحکام مواد عایق) عمدتاً تجزیه و تحلیل می‌شوند تا توانایی اتوترانسفورماتور 500 کیلو ولت برای تحمل اتصال کوتاه ارزیابی شود. نتایج محاسبه تحت اتصال‌های مختلف در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نشان داده شده‌اند.

شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نشان می‌دهند که انحراف تنش متوسط محیطی، نیروی محوری، و تنش فشاری هر سیم‌پیچ تحت اتصال‌های مختلف کم است و بیشتر آن‌ها در حدود ۵٪ هستند. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که کشش متوسط محیطی سیم‌پیچ LV بیشترین مقدار است، که کنترل کلیدی ثابت شعاعی است؛ شکل ۱۷ نشان می‌دهد که نیروی محوری سیم‌پیچ MV بزرگترین است و ثابت محوری این سیم‌پیچ باید عمدتاً کنترل شود؛ شکل ۱۸ نشان می‌دهد که تنش فشاری جداکننده در سیم‌پیچ MV بزرگترین است، که نیاز به توجه ویژه دارد.

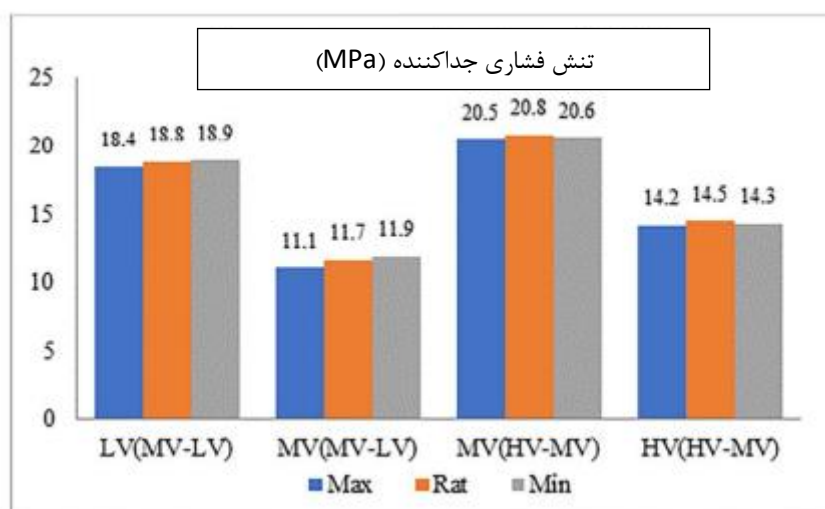
با توجه به شرایط اتصال کوتاه HV-MV و MV-LV، نتایج محاسبه حداکثر مقادیر تحت اتصال‌های مختلف برای بررسی تحت نظارت قرار می‌گیرند. از آنجا که تنش بحرانی شعاعی محاسبه شده برای رسانای CTCs بیشتر از مقدار استحکام بازدهی است، استحکام بازدهی و استاندارد IEC به عنوان مقدار مجاز نهایی انتخاب می‌شوند و لزومی به بررسی نیروی بحرانی محوری نیست. خلاصه نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است، که نشان می‌دهد مقادیر محاسبه شده برای اتوترانسفورماتور کمتر از مقادیر مجاز است و توانایی تحمل اتصال کوتاه خوب است، که پایه‌ای برای آزمایش‌های اتصال کوتاه فراهم می‌کند.



شکل ۱۶) نتایج محاسبه تنش فشاری یا کششی متوسط



شکل ۱۷) نتایج محاسبه نیروی محوری



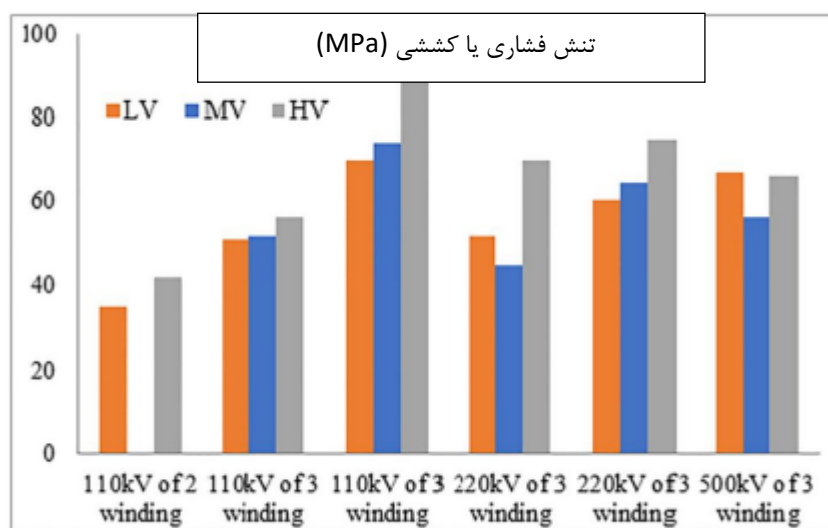
شکل 18) نتایج محاسبه تنش فشاری جداکننده

4. ویژگی‌های اتصال کوتاه و استراتژی کنترل اتوترانسفورماتور 500 کیلوولت

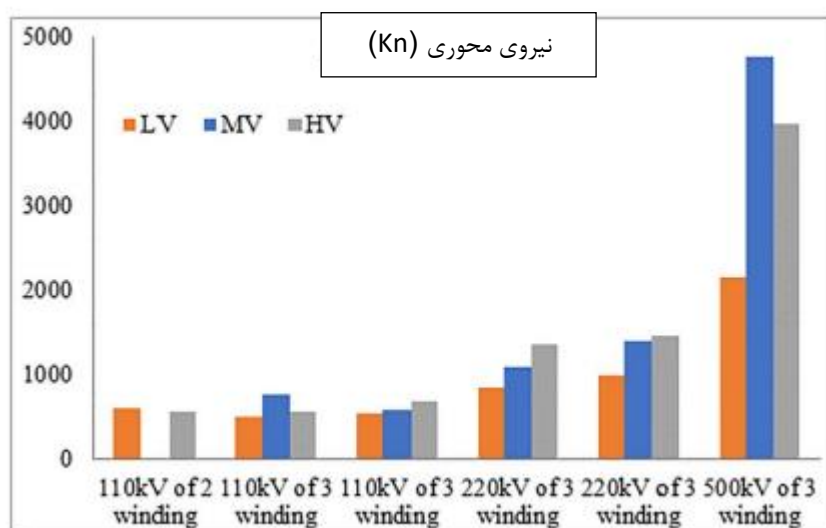
4_1 ویژگی‌های اتصال کوتاه اتوترانسفورماتور 500 کیلوولت

ویژگی‌های اتصال کوتاه اتوترانسفورماتورهای 500 کیلوولت با ترانسفورماتورهای معمولی 110 کیلوولت و 220 کیلوولت به دلیل تفاوت‌های سطح ولتاژ، ظرفیت‌ها و ساختارها، بسیار متفاوت است. نتایج مقایسه تنش متوسط محیطی، نیروی محوری و تنش فشاری جداکننده ترانسفورماتورهای معمولی 110 کیلوولت و 220 کیلوولت و نمونه‌های اتصال کوتاه 500 کیلوولت در شکل‌های 19 تا 21 نشان داده شده‌اند.

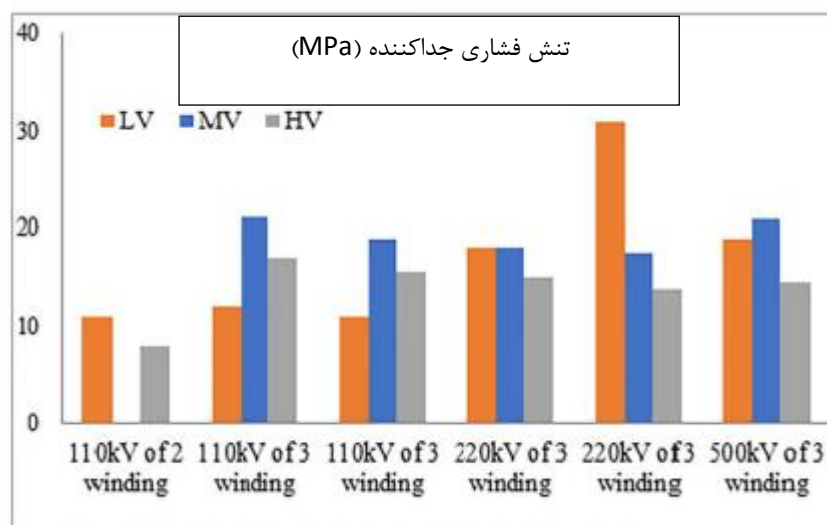
شکل ۱۹ نشان می‌دهد که تنش میانگین محیطی سیم‌پیچ‌های LV، MV، و HV اتوترانسفورماتور ۵۰۰ کیلوولت به طور قابل توجهی نسبت به ترانسفورماتورهای ۱۱۰ کیلوولت و ۲۲۰ کیلوولت افزایش نیافته است، اما نیروی کلی شعاعی سیم‌پیچ‌ها به دلیل افزایش ظرفیت و اندازه ساختاری، به طور قابل توجهی افزایش یافته و کنترل شعاعی یک مشکل عمده است. شکل ۲۰ نشان می‌دهد که نیروی محوری هر سیم‌پیچ با افزایش سطح ولتاژ و ظرفیت، به صورت نمایی افزایش می‌یابد و کنترل محوری بزرگترین مقدار است. شکل ۲۱ نشان می‌دهد که تنش فشاری جداکننده معادل هم است.



شکل 19) نتایج مقایسه‌ای تنش میانگین محیطی



شکل 20) نتایج مقایسه‌ای نیروی محوری



شکل 21) نتایج مقایسه‌ای تنش فشاری جداکننده

4_2 استراتژی کنترل اتصال کوتاه

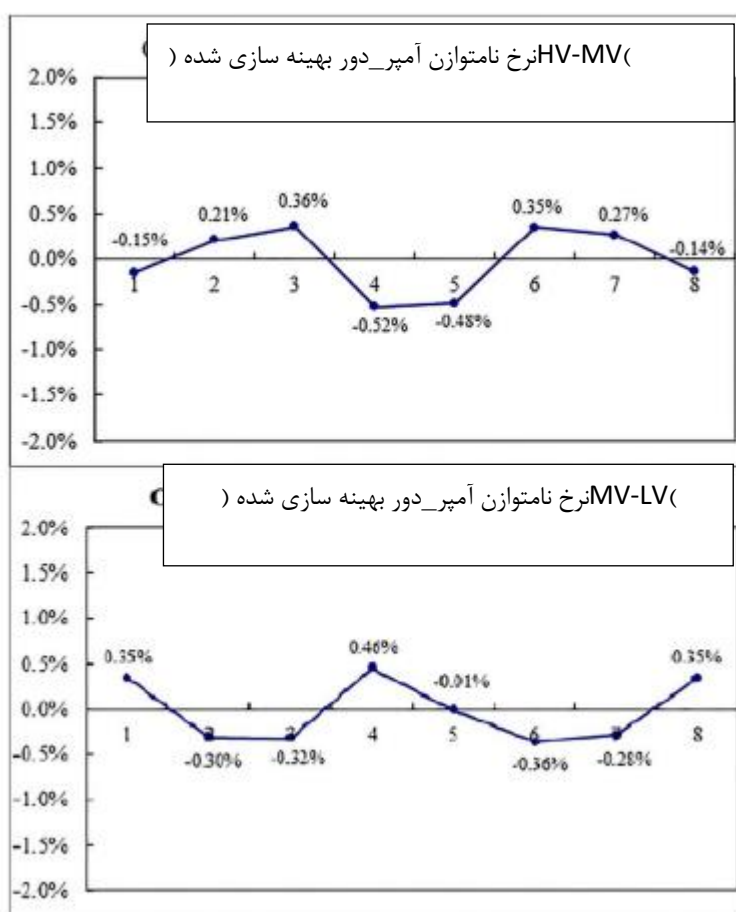
در مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی ۱۱۰ کیلوولت و ۲۲۰ کیلوولت، نیروی شعاعی و محوری اتوترانسفورماتور ۵۰۰ کیلوولت به طور چشمگیری بهبود یافته است، به ویژه نیروی محوری سیم‌پیچ که ۲ تا ۳ برابر افزایش یافته اما مشکلات زیادی را برای طراحی و ساخت به وجود آورده است. این مقاله کنترل را از جنبه‌های شعاعی و محوری تقویت می‌کند تا توانایی اتصال کوتاه ترانسفورماتور را بهبود بخشد.

4_2_1 استراتژی کنترل شعاعی

1. استفاده از هادی‌های ترانسپوزیشن متصل به رزین و افزایش استحکام بازده از ۱۶۰ به ۲۰۰ مگاپاسکال. استحکام بازده و استحکام متصل به رزین قبل از تولید آزمایش می‌شوند.
2. برای تضمین نیروی شعاعی، از میله‌های گرد کوچک بین مراحل مختلف هسته استفاده می‌شود.
3. نیروی شعاعی با استفاده از دو نوار داخلی و خارجی سیم‌پیچ LV و سیم‌پیچ MV داخلی تقویت می‌شود.
4. کانال روغن محوری سیم‌پیچ LV را لغو کنید و کانال روغن محوری MV را کاهش دهید، و تعداد سیم‌پیچ‌های HV از ۳ به ۱ کاهش می‌یابد.
5. استفاده از ساختار استوانه ورقه‌ای سخت برای تقویت نقش اسکلت سیم‌پیچ.
6. ابعاد شعاعی، ارتفاع محوری و فاصله مونتاژ سیم‌پیچ را به شدت کنترل کنید و اطمینان حاصل کنید که ارتفاع مرکزی هر سیم‌پیچ یکسان است.

LVسیم پیچ		MVسیم پیچ		HVسیم پیچ		نوع
act.	all.	act.	act.	all.	act.	
/	/	180	56.0	180	66.2	تنش کششی حلقه متوسط (مگاپاسکال)
132	67.0	120	52.3	/	/	تنش فشاری حلقه متوسط (مگاپاسکال)
/	2134	/	4761	/	3981	حداکثر نیروی محوری (کیلونیوتن)
80	18.9	80	20.8	80	14.5	قدرت فشاری جداکننده

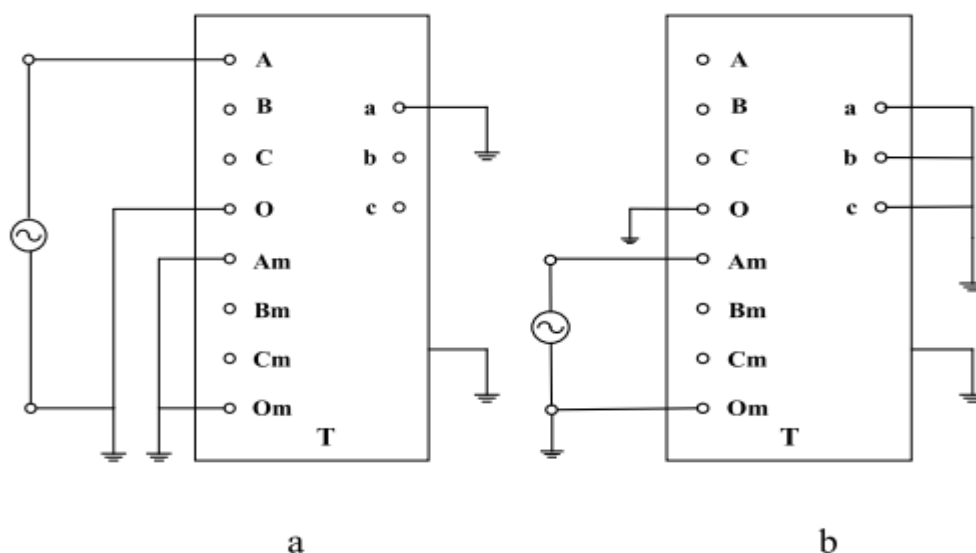
جدول 4) بررسی نتایج توانایی اتصال کوتاه ترانسفورماتور



شکل 22) نرخ نامتوازن آمپر_دور بهینه سازی شده

4_2_2 استراتژی کنترل محوری:

۱. تمام سیم‌پیچ‌ها از طراحی دور برابر استفاده می‌کنند و سیم‌پیچ HV از ساختار متقارن بالا و پایین بهره می‌برد، که تعداد گروه‌های نشتی مغناطیسی متناوب را افزایش می‌دهد، نرخ نامتوازن آمپر-دور را کاهش می‌دهد و نیروی محوری را کم می‌کند. بهینه‌سازی نرخ نامتوازن آمپر-دور در شکل ۲۲ نشان داده شده است.
۲. عرض جداکننده‌های LV و MV را ۱۰ میلی‌متر افزایش دهید تا استحکام مواد عایق را بهبود بخشید.
۳. از تخته فشاری یکپارچه استفاده کنید و فشار پیش‌تندگی محوری سیم‌پیچ را انتخاب کنید.
۴. سیم‌پیچ LV دارای ساختار مارپیچی است و در فاصله ۵۰۰ میلی‌متری از خروجی به صورت چند لایه محکم بسته شده است تا از حرکت و آسیب دیدگی سیم پیچ جلوگیری کند.
۵. حلقه‌های انتهایی بدنه سیم‌پیچ به صورت یکپارچه می‌خکوب می‌شوند.
۶. از جداکننده و تخته فشاری با چگالی بالا برای بهبود استحکام سیم‌پیچ‌ها استفاده می‌شود.
۷. تحمل ارتفاع سیم‌پیچ خشک به شدت کنترل می‌شود تا سیم‌پیچ‌ها به طور یکنواخت فشرده شوند.
۸. دستگاه هیدرولیک به طور یکنواخت روی بدنه قرار می‌گیرد و مجموعه سیم‌پیچ سه بار فشرده می‌شود.



شکل 23) نمودار آزمایش سیم کشی

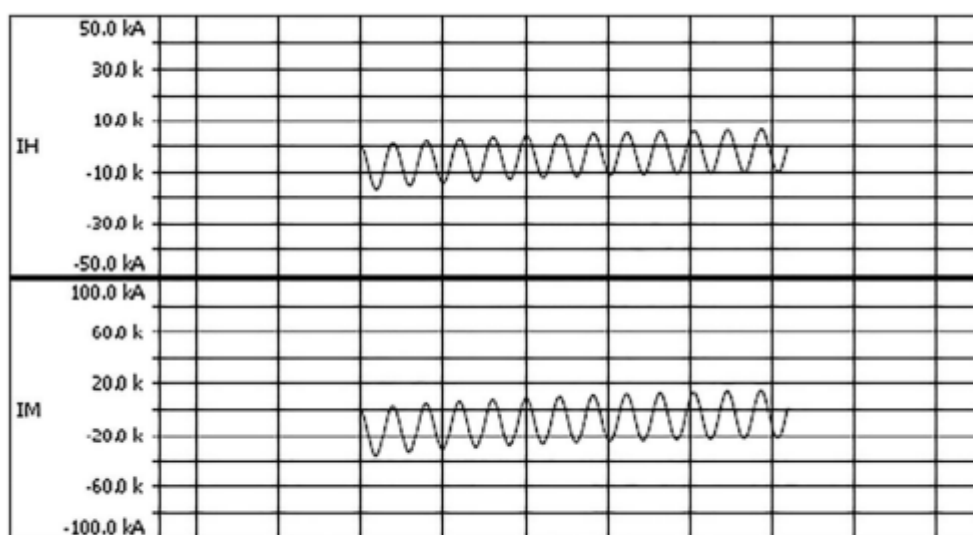
(a) اتصال کوتاه (HV-MV)

(b) اتصال کوتاه (MV-LV)

5. آزمایش اتصال کوتاه

1_5 آزمایش اتصال کوتاه (HV-MV)

در طول آزمایش اتصال کوتاه HV-MV، پایانه HV یک منبع تغذیه تک فاز را اعمال می کند و در همان زمان، پایانه MV کوتاه می شود، پایانه LV مدار باز است، پایانه پوسته محافظت می شود و هسته و گیره ها که به زمین متصل بودند سه بار آزمایش شده اند. نمودار سیم کشی آزمایش در شکل 23 نشان داده شده است. ولتاژ و جریان موج آزمایشی طبیعی هستند، همانطور که در شکل 24 نشان داده شده است. عکس محل آزمایش اتصال کوتاه در شکل 25 آمده است. نتایج آزمایش اتصال کوتاه HV-MV در جدول 5 نشان داده شده است. جدول 5 نشان می دهد که جریان اتصال کوتاه طبیعی است، و اتصال کوتاه برای 260 میلی ثانیه طول کشیده است که شرایط آزمایش را برآورده می کند. در سه آزمایش، بیشترین انحراف راکتانس (مقاومت القایی) تنها 0.04 اهم است، کمتر از 0.1٪، و نتیجه آزمایش بسیار خوب است.



شکل 24) جریان اتصال کوتاه موجی شکل



شکل 25) تصویر آزمایش اتصال کوتاه

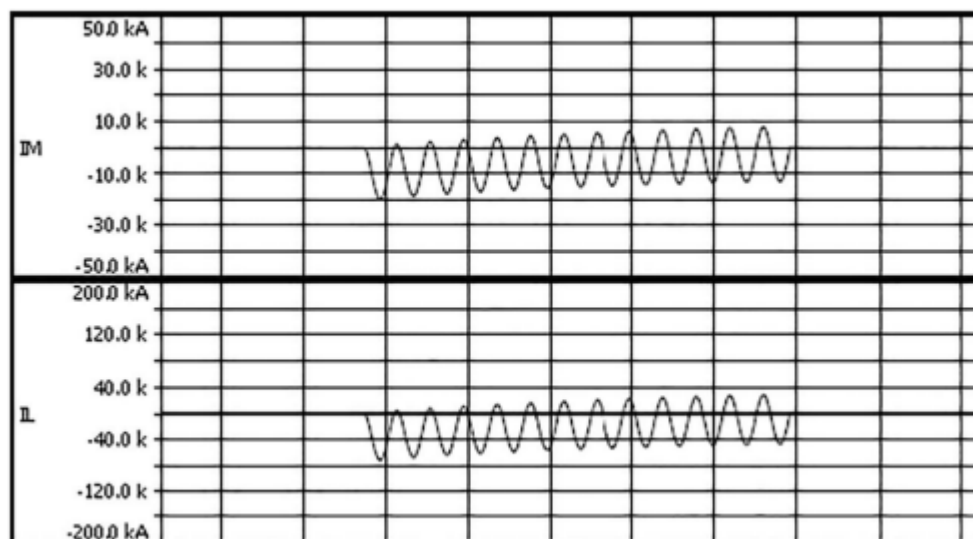
جدول 5 نتیجه آزمایش اتصال کوتاه HV-MV

مقاومت القایی (Ω)			اوج جریان (Ka)			
انحراف مقاومت القایی	بعد از تست	قبل از تست	زمان (میلی ثانیه)	MV	HV	اتصال
0.02%	43.44	43.43	260	36.40	17.43	Max
0.02%	43.05	43.04	260	37.10	16.67	Rat
-0.09%	43.46	43.50	260	39.17	16.88	Min

2_5 آزمایش اتصال کوتاه MV-LV

ظرفیت LV تنها 30٪ از ظرفیت HV و MV است، و آزمایش اتصال کوتاه MV-LV، ترانسفورماتور MVA400 اولین آزمایش اتصال کوتاه در جهان است. در طول آزمایش اتصال کوتاه MV-LV، پایانه MV یک منبع تغذیه تک فاز را اعمال می کند و در همان زمان، پایانه LV اتصال کوتاه، پایانه HV مدار باز، پایانه پوسته محافظت می شود و هسته و گیره ها که به زمین متصل بودند سه بار آزمایش شده اند. نمودار سیم کشی آزمایش در شکل b23 نشان داده شده است. ولتاژ و جریان موج آزمایشی طبیعی هستند، همانطور که در شکل 26 نشان داده شده است. نتایج آزمایش اتصال کوتاه MV-LV در جدول 6 نشان داده شده است. جدول 6 نشان می دهد که جریان کوتاه مدار طبیعی است، اتصال کوتاه برای 258 میلی ثانیه طول کشیده است که شرایط آزمایش را برآورده می کند. در سه آزمایش، بیشترین انحراف راکتانس 0.06 اهم است، که نیازهای

استاندارد را برآورده می‌کند و آزمایش معتبر است. پس از آزمایش اتصال کوتاه، یک آزمایش مجدد و بازرسی دقیق انجام شد و تمام شاخص‌ها عالی بودند. در نهایت، تأیید شده است که نمونه اولیه آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی را پشت سر گذاشته است.



شکل 26) جریان اتصال کوتاه موجی شکل

مقاومت القایی (Ω)		اوج جریان (Ka)				
انحراف مقاومت القایی	بعد از تست	قبل از تست	زمان (میلی ثانیه)	LV	MV	اتصال
0.33%	18.36	18.30	258	69.83	18.38	Max
0.37%	16.42	16.36	258	71.26	19.66	Rat
0.34%	14.76	14.71	258	68.84	19.86	Min

MV-LV جدول 6) نتایج اتصال کوتاه

6. نتیجه گیری

بر اساس تحلیل ویژگی‌های اتصال کوتاه، استراتژی کنترل اتصال کوتاه پیشنهاد شده است، و بزرگترین نمونه اولیه اتصال کوتاه با ظرفیت $MVA \text{ } 400/500 \text{ kV}$ اتوترانسفورمر توسعه یافته است. در نهایت، آزمایش ناگهانی اتصال کوتاه تحت شرایط HV-MV و MV-LV برای اولین بار در جهان با موفقیت پشت سر گذاشته شده است، که دقت بررسی قدرت اتصال کوتاه و اثربخشی روش ارزیابی اتصال کوتاه را تأیید می‌کند.

1. در مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی 110 کیلوولت و 220 کیلوولت، نیروی کلی شعاعی و محوری اتوترانسفورمر تک‌فاز 500 کیلوولت به طور قابل توجهی افزایش یافته است، به ویژه از آنجا که افزایش نیروی محوری به 2 تا 3 برابر رسیده است.
2. این مقاله پیشنهاد می‌کند که استحکام مواد را بهبود بخشد، پشتیبانی شعاعی را تقویت کند، طراحی بهینه‌سازی دور آمپر را اجرا کند، و ساختار را بهبود بخشد، که به طور مؤثر توانایی اتصال کوتاه شعاعی و محوری سیم‌پیچی را بهبود می‌بخشد.
3. شاخص‌های خوب آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور با بزرگترین ظرفیت 500 کیلوولت، قدرت کوتاه کردن اتصال کوتاه قوی را تأیید می‌کند و همچنین ارزش مرجع عالی برای توسعه ترانسفورماتورهای اتصال کوتاه با ظرفیت بزرگ را فراهم می‌آورد.

مراجع

1. Zhang, H., et al.: Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short-circuit fault by FEM. IEEE Trans. Appl. Supercond. 24(3), 1–4 (2014). <https://doi.org/10.1109/tasc.2013.2285335>
2. Mortazi, Mohammad and Moradi, Ahmad and Khosravi, Mohsen (2021) : Simultaneous optimization of transformer tap changer and network capacitors to improve the distribution system's static security considering distributed generation sources. Published in: International Journal of Engineering Science and Computing , Vol. 11, No. 07 (30 July 2021): pp. 28527-28536.
3. Bakshi, A.: An investigation of winding curvature effect on the mechanical strength of transformer windings. IEEE Trans. Power Deliv. 30(4), 1821–1826 (2015). <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2015.2410775>
4. Bakshi, A., Kulkarni, S.V.: Analysis of buckling strength of inner windings in transformers under radial short-circuit forces. IEEE Trans. Power Deliv. 29(4), 241–245 (2014). <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2272102>
5. Bakshi, A., Kulkarni, S.V.: Coupled electromagnetic-structural analysis of the spiraling phenomenon in a helical winding of a power transformer. IEEE Trans. Power Deliv. 29(1), 235–240 (2014). <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2276047>
6. Geißler, D., Leibfried, T.: Short-circuit strength of power transformer windings-verification of tests by a finite element analysis-based model. IEEE Trans. Power Deliv. 32(4), 1705–1712 (2017). <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2016.2572399>
7. Patel, M.R.: Instability of the continuously transposed cable under short-circuit forces in transformers. IEEE Trans. Power Deliv. 17(1), 149–154 (2002). <https://doi.org/10.1109/61.974202>
8. Bakshi, A., Kulkarni, S.V.: Eigenvalue analysis for investigation of tilting of transformer winding conductors under axial short-circuit forces. IEEE Trans. Power Deliv. 26(4), 2505–2512 (2011). <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2011.2159032>
9. Wang, S., et al.: Calculation and analysis of mechanical characteristics of transformer windings under short-circuit condition. IEEE Trans. Magn. 55(7), 1–4 (2019). <https://doi.org/10.1109/tmag.2019.2898183>
10. Wang, H., et al.: Research on radial stability of autotransformer inner winding under the short-circuit condition. In: 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp. 312–315 (2017)
11. Fonseca, W.S., et al.: Analysis of structural behavior of transformers winding under inrush current conditions. IEEE Trans. Ind. Appl. 54(3), 2285–2294 (2018). <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2808273>
12. Jin, M., et al.: Coupled magnetic-structural modeling of power transformer for axial vibration analysis under short-circuit condition. IEEE Trans. Magn. 58(7), 1–9 (2022). <https://doi.org/10.1109/tmag.2022.3175245>

13. Ashfaq, A., et al.: Short circuit stress analysis using FEM in power transformer on H-V winding displaced vertically & horizontally. *Alex. Eng. J.* 57(1), 147–157 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.10.006>
14. Miyazaki, S., Mizutani, Y., Ichikawa, M.: Mechanical faults in oil- immersed power transformers with disc-type windings due to external short circuit. *IEEJ Trans.* 16(4), 545–550 (2021). <https://doi.org/10.1002/tee.23328>
15. Wu, Y., et al.: Electromagnetic force of power transformer with different short circuit current based on FEM. In: *International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics (CSIA)*, pp. 788–797 (2019)
16. Zhang, C., et al.: Comprehensive analysis of winding electromagnetic force and deformation during no-load closing and short-circuiting of power transformers. *IEEE Access* 9(9), 73335–73345 (2021). <https://doi.org/10.1109/access.2021.3068054>
17. Ahmadpour, A., Dejamkhooy, A.: Modeling and analysis of HTS distribution transformers under various conditions using FEM. *J. Supercond. Nov. Magnetism.* 35(7), 1847–1856 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06210-y>
18. Moradnouri, A., et al.: HTS transformers leakage flux and short circuit force mitigation through optimal design of auxiliary windings. *Cryogenics* 110, 103148 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103148>
19. Moradnouri, A., et al.: Optimal design of flux diverter using genetic algorithm for axial short circuit force reduction in HTS transformers. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 30(1), 1–8 (2020). <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2923550>
20. Moradnouri, A., et al.: HTS transformer windings design using distributive ratios for minimization of short circuit forces. *J. Supercond. Nov. Magnetism* 32(2), 151–158 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4925-z>
21. Moradnouri, A., et al.: Multi-segment winding application for axial short circuit force reduction under tap changer operation in HTS transformers. *J. Supercond. Nov. Magnetism* 32(10), 3171–3182 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10948-019-5109-1>
22. IEC 60076-5: Ability to Withstand Short Circuit, 3rd ed (2006)
23. Zhang, B., et al.: Buckling strength analysis of transformer windings based on electromagnetic thermal structural coupling method. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 29(2), 1–4 (2019). <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2893996>
24. Wang, S., et al.: Research on radial stability and its influence factors of transformer windings under short circuit fault. In: *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pp. 1–5 (2018)
25. Li, Y., et al.: Analysis of winding stability of short-circuit test model for extra-high voltage power transformer. In: *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1–4 (2011)
26. Cigre Working Group 12.19: The Short-Circuit Performance of Power Transformers. CIGRE (2002)
27. Lazarev, V.I.: Electromagnetic stability of transformer windings under short-circuit, Ukrainian research, design, and technological transformer institute. OSC VIT (2002)

Evaluation of ability to withstand short circuit and development of large capacity autotransformer

Parsa Servati¹, Shahab aldin Nikookhesal², Ahmad Moradi³

Instructor of Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, servatiparsa7@gmail.com

Instructor of Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, pes.nikookhesal@gmail.com

Instructor of Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, st_ahmad_moradi@azad.ac.ir

Abstract— In the event of a sudden short circuit damaging a large 500 kV transformer, it can greatly impact the safe operation of the power grid. The article discusses the calculation principle and evaluation method of the transformer's short circuit withstand ability. It also presents the design structure of a 400 MVA/500 kV short circuit autotransformer and assesses its ability to withstand short circuits under high voltage e- medium voltage (HV-MV) and medium voltage - low voltage (MV-LV) scenarios. The short-circuit characteristics are analyzed by comparing with typical 110 kV and 220 kV transformers, and a control strategy is proposed for the largest capacity short circuit prototype with a 400 MVA/500 kV autotransformer. Subsequently, a sudden short circuit test is conducted at a large current test center. The outcomes demonstrate that the large capacity autotransformer successfully passed the big current impulse under HV-MV and MV-LV short circuit conditions, marking a world-first achievement. All indicators are positive, confirming the validity of the strength check and the short circuit evaluation method. This also establishes the strong ability of the 500 kV autotransformer to withstand short circuits.

Keywords: autotransformers, electromagnetic forces, performance evaluation, power transformers, short-circuit currents