بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

پردیس دانشگاهی

شماره پایان‌نامه : ۹۳۵۵۵۳۹۱۰۱

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش قدرت

عنوان :

بررسی و تشخیص خطاهای سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت به صورت برخط

استاد راهنما:

دکتر مرتضی رزاز

استاد مشاور:

دکتر محمود جورابیان

نگارنده :

میثم ربیعی

بهمن‌ماه ۱۳۹۳

باسمه‌تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

نتیجه ارزشیابی پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد

پردیس دانشگاهی

پایان‌نامه آقای **میثم ربیعی** دانشجوی رشته **مهندسی برق** گرایش **قدرت**

دانشکده **مهندسی** به شماره دانشجویی **۹۱۵۵۵۳۹۱۱۴**

با عنوان :

بررسی و تشخیص خطاهای سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت به صورت برخط

جهت اخذ مدرک : **کارشناسی ارشد** در تاریخ : **۹۳/۱۱/۱۷** توسط هیئت‌داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با **درجه عالی** تصویب گردید.

		رتبه علمی	امضاء
۱.	اعضای هیئت‌داوران :		
	استاد راهنما: دکتر مرتضی رزاز	.....	.....
	استاد مشاور :	.....	.....
	استاد داور :.....	.....	.....
	استاد داور :.....	.....	.....
	نماینده تحصیلات تکمیلی :.....	.....	.....
۲.	**مدیر گروه** :	.....	.....
۳.	**معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده** :	.....	.....
۴.	**مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه** :	.....	.....

تشکر

شکر و سپاس خداوند منان را که طی مدت تحصیل، استقامت و صبر را به من ارزانی داشت و ناملایمات را رفع نمود.

بی‌شک، پیشرفت در این دوره را مرهون نظارت مستمر جناب آقای **دکتر مرتضی رزاز**، استاد راهنمای ارجمندم می‌دانم. کمک‌های شایان ایشان در دوره تحصیل شایسته تقدیر است.

از جناب آقای **دکتر محمود جورابیان**، استاد مشاور گرامی که با راهنمایی‌های خود مرا یاری نمودند کمال تشکر و سپاسگزاری را می‌نمایم.

ضمناً مراتب سپاس خود را از اعضای فرهیخته هیئت ناظران و داوران در قبول زحمت مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاعیه، ابراز داشته و بهروزی آن‌ها را آرزومندم.

فهرست مطالب

فرم ارزشیابی ..... پ
تشکر ..... ت
فهرست مطالب ..... ث
فهرست شکل‌ها ..... خ
فهرست جدول‌ها ..... ر
چکیده پایان‌نامه به زبان فارسی ..... ز

فصل اول

مقدمه و طرح مسئله ۱

۱-۱ موضوع پژوهش و ضرورت آن ۱
۱-۲ خطا در ترانسفورماتور ۲
۱-۳ عوامل چالش‌برانگیز برای ترانسفورماتور ۳
۱-۳-۱ فشارهای مکانیکی و شوک‌های مخرب ۴
۱-۳-۲ فشارهای لرزشی و ارتعاشی ۵
۱-۳-۳ کهنگی و پیر شدن ترانسفورماتور ۸
۱-۳-۴ نیروهای اتصال کوتاه ۹
۱-۴ بیان مسئله ۹
۱-۵ روش پیشنهادی برای حل مسئله ۱۰
۱-۶ اهداف و ساختار پایان‌نامه ۱۱

فصل دوم

مرور پژوهش‌های پیشین ۱۲

۲-۱ مقدمه ۱۲
۲-۲ تست ضربه ولتاژ پایین ۱۳

۲-۳ تست تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA) ۱۴
۲-۴ تشخیص از طریق ارتعاشات تانک ترانسفورماتور ۱۵
۲-۵ روش مخابراتی ۱۶
۲-۶ روش ثابت تغییر جریان ۱۷
۲-۷ راکتانس اتصال کوتاه و راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ ۱۷
۲-۸ روش امواج مافوق صوت ۲۰
۲-۹ روش تابع انتقال برخط ۲۰

فصل سوم

تشخیص خطای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت به روش برخط از طریق تشکیل مکان هندسی ولتاژ – جریان ۲۴

۳-۱ مقدمه ۲۴
۳-۲ مدیریت عمر ترانسفورماتور ۲۵
۳-۳ ساختار سیم پیچ‌ها ۲۷
۳-۴ نیروهای الکترومغناطیسی ۲۹
۳-۴-۱ نیروهای شعاعی ۳۰
۳-۴-۱-۱ محاسبه نیروی شعاعی ۳۱
۳-۴-۲ نیروهای محوری ۳۳
۳-۴-۲-۱ محاسبه نیروی محوری ۳۴
۳-۵ نتایج وارد شدن نیروهای الکترومغناطیسی- اثر نیروی شعاعی ۳۶
۳-۵-۱ خطای غُرشدگی ۳۶
۳-۵-۲ خطای کشش دایره‌ای ۳۹
۳-۶ نتایج وارد شدن نیروهای الکترومغناطیسی- اثر نیروی محوری ۴۰
۳-۶-۱ واژگونی هادی ۴۰
۳-۶-۲ خمش محوری هادی ۴۱
۳-۶-۳ آسیب دیدن بست ها و نگه‌دارنده‌های سیم‌پیچ ۴۱
۳-۷ نتیجه ترکیبی وارد شدن نیروهای شعاعی و محوری ۴۲
۳-۷-۱ مارپیچ شدگی ۴۲

۳-۷-۲ درهم فرورفتگی ۴۳
۳-۸ تشکیل مکان هندسی ولتاژ – جریان ۴۴
۳-۹ مدل‌سازی ترانسفورماتور ۴۷
۳-۹-۱ اندوکتانس خودی و متقابل ۵۱
۳-۹-۱-۱ اندوکتانس خودی ۵۲
۳-۹-۱-۲ اندوکتانس متقابل ۵۴
۳-۹-۲ خازن سری ۵۵
۳-۹-۳ خازن موازی ۵۷
۳-۹-۳-۱ خازن بین سیم‌پیچ با سیم‌پیچ ۵۷
۳-۹-۳-۲ خازن بین فازها ۵۸
۳-۹-۳-۳ خازن بین سیم پیچ و تانک ۵۸
۳-۱۰ رابطه خطای سیم‌پیچ با پارامترهای مدار معادل ۵۹
۳-۱۱ تشخیص خطای سیم‌پیچ از طریق مکان هندسی ولتاژ – جریان..... ۶۰

فصل چهارم

شبیه‌سازی و تحلیل خطای مکانیکی سیم‌پیچ با استفاده از مکان هندسی ولتاژ – جریان..... ۶۲

۴-۱ مقدمه ۶۲
۴-۲ شبیه‌سازی ۶۳
۴-۲-۱ بررسی تأثیر تغییر بارگذاری ترانسفورماتور..... ۶۴
۴-۳ آنالیز و تحلیل خطا..... ۶۸
۴-۳-۱ خطای اتصال کوتاه دورها..... ۶۸
۴-۳-۲ خطای جابجایی محوری..... ۷۰
۴-۳-۳ خطای غُرشدگی..... ۷۳
۴-۳-۴ خطای نشتی..... ۷۵
۴-۴ تحلیل نتایج..... ۷۶
۴-۴-۱ تمایزهای بصری..... ۷۶
۴-۴-۲ تمایز با استفاده از ویژگی‌های بیضی ۷۷

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۸۹

۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۸۹

۵-۲ پیشنهادهای ادامه کار..... ۹۰

مقاله ارائه شده مستخرج از پایان‌نامه ۹۰

فهرست منابع ۹۱

چکیده پایان‌نامه به زبان انگلیسی ۹۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: نواحی زلزله‌خیز با شدت‌های مختلف جهت نصب ترانسفورماتور..... ۶
شکل ۲-۱: مدار تست ضربه ولتاژ پایین (LVI) ۱۴
شکل ۲-۲: مدل‌سازی ترانسفورماتور به‌عنوان یک شبکه‌ی دوسویه ۱۸
شکل ۲-۳: برش جانبی یک بوشینگ خازنی ۲۱
شکل ۲-۴: موازی کردن یک امپدانس با تپ بوشینگ ۲۲
شکل ۲-۵: مدار اندازه‌گیری برخط تابع تبدیل برای حالت‌های ستاره ۲۳
شکل ۲-۶: مدار اندازه‌گیری برخط تابع تبدیل برای حالت مثلث ۲۳
شکل ۳-۱: سیم‌پیچی نوع هسته‌ای ترانسفورماتور..... ۲۷
شکل ۳-۲: سیم‌پیچی نوع زرهی ترانسفورماتور..... ۲۸
شکل ۳-۳: ایجاد نیروی شعاعی در هادی حامل جریان و قرارگرفتن در میدان محوری..... ۳۰
شکل ۳-۴: وارد شدن نیرو به سیم‌پیچ درجهت شعاعی..... ۳۱
شکل ۳-۵: برش جانبی از سیم پیچ بیرونی و درونی ونمایش وارد شدن نیرو..... ۳۲
شکل ۳-۶: وارد شدن نیرو به سیم‌پیچ در جهت محوری..... ۳۴
شکل ۳-۷: پارامترهای اندازه گیری نیروی وارد به سیم‌پیچ در جهت محوری..... ۳۵
شکل ۳-۸: وارد شدن نیروی شعاعی و ایجاد غرشدگی آزاد و اجباری..... ۳۶
شکل ۳-۹: مدلسازی غرشدگی اجباری با ابعاد شعاعی به میلی‌متر..... ۳۷
شکل ۳-۱۰: مدلسازی غرشدگی آزاد با ابعاد شعاعی به میلی‌متر..... ۳۸
شکل ۳-۱۱: غرشدگی آزاد سیم‌پیچ دیسکی ترانسفورماتور در اثر نیروی شعاعی..... ۳۹
شکل ۳-۱۲: وارد شدن نیروی محوری به سیم‌پیچ‌های داخلی و خارجی..... ۴۰
شکل ۳-۱۳: واژگونی هادی در اثر نیروهای محوری..... ۴۱
شکل ۳-۱۴: خم‌شدگی هادی‌ها در اثر وارد شدن نیروی محوری..... ۴۱
شکل ۳-۱۵: شکستن بست های نگه‌دارنده در اثر نیروهای محوری..... ۴۲
شکل ۳-۱۶: حالت مارپیچ شدگی در اثر ترکیبی از نیروهای محوری و شعاعی..... ۴۳

شکل ۳-۱۷: حالت درهم فرورفتگی در اثر ترکیبی از نیروهای محوری و شعاعی..... ۴۳
شکل ۳-۱۸: مدار معادل تک فاز ترانسفورماتور..... ۴۴
شکل ۳-۱۹: روند تشکیل مکان هندسی بیضی..... ۴۶
شکل ۳-۲۰: مدار معادل توزیع‌شده ترانسفورماتور..... ۵۰
شکل ۳-۲۱: میدان مغناطیسی یک دیسک از سیم پیچ دیسکی ترانسفورماتور ۵۱
شکل ۳-۲۲: میدان مغناطیسی مربوط به اندوکتانس متقابل ۵۲
شکل ۳-۲۳: مسیر بسته برای اندازه‌گیری انتگرال مربوط به اندوکتانس خودی ۵۳
شکل ۳-۲۴: ارتباط کوپلینگ بین دو رشته دایره‌ای مربوط به اندوکتانس متقابل ۵۴
شکل ۳-۲۵: برش جانبی از نحوه سیم بندی مربوط به محاسبه خازن سیم پیچ ۵۵
شکل ۳-۲۶: نمایش خازن موجود میان سیم پیچ..... ۵۶
شکل ۳-۲۷: ابعاد یک دیسک از سیم پیچ مربوط به محاسبه خازن..... ۵۷
شکل ۳-۲۸: ابعاد میان سیم پیچ ها با یکدیگر و تانک ۵۸
شکل ۴-۱: مدار شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار MATLAB..... ۶۵
شکل ۴-۲: دیاگرام مکان هندسی مرجع یا اثرانگشت سیم‌پیچ ترانسفورماتور..... ۶۶
شکل ۴-۳: تأثیر افزایش بار(به میزان ۵۰ و ۱۰۰ درصد) روی دیاگرام مرجع..... ۶۷
شکل ۴-۴: تأثیر پس فاز، پیش فاز و واحد بودن بارگذاری در ترانسفورماتور..... ۶۷
شکل ۴-۵: دقت روش ارائه‌شده در تشخیص خطای اتصال کوتاه دورها..... ۶۹
شکل ۴-۶: دقت روش ارائه‌شده در تشخیص خطای اتصال کوتاه دورها از نمای نزدیک..... ۶۹
شکل ۴-۷: تأثیر خطای اتصال کوتاه دورها روی مکان هندسی مرجع..... ۷۰
شکل ۴-۸: تأثیر خطای جابجایی محوری روی مکان هندسی مرجع به میزان ۱و۲ درصد..... ۷۲
شکل ۴-۹: نمای نزدیک خطای جابجایی محوری روی مکان هندسی مرجع به میزان ۱و۲ درصد..... ۷۲
شکل ۴-۱۰: تأثیر خطای جابجایی محوری روی مکان هندسی مرجع..... ۷۳
شکل ۴-۱۱: تأثیر خطای غرشدگی روی مکان هندسی مرجع..... ۷۴
شکل ۴-۱۲: نمای نزدیک تأثیر خطای غرشدگی روی مکان هندسی مرجع..... ۷۵
شکل ۴-۱۳: تأثیر خطای نشتی روی مکان هندسی مرجع..... ۷۶
شکل ۴-۱۴: پارامترهای a، b و θ در مکان هندسی بیضی..... ۷۸

شکل ۴-۱۵: قدرمطلق اختلاف درصد قطر بزرگ بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای اتصال کوتاه دورها و جابجایی محوری ۸۰
شکل ۴-۱۶: قدرمطلق اختلاف درصد قطر کوچک بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای اتصال‌کوتاه دورها و جابجایی محوری ۸۱
شکل ۴-۱۷: قدرمطلق اختلاف درصد قطر بزرگ بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای غرشدگی و نشتی ۸۳
شکل ۴-۱۸: قدرمطلق اختلاف درصد قطر کوچک بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای غرشدگی و نشتی ۸۳
شکل ۴-۱۹: قدرمطلق اختلاف درصد زاویه چرخش بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای اتصال کوتاه دورها و جابجایی محوری ۸۵
شکل ۴-۲۰: قدرمطلق اختلاف درصد زاویه چرخش بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای غرشدگی و نشتی ۸۶
شکل ۴-۲۱: اختلاف درصد گریز از مرکز بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای اتصال کوتاه دورها و خطای جابجایی محوری ۸۸
شکل ۴-۲۲: اختلاف درصد گریز از مرکز بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای غرشدگی و نشتی ۸۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱: درصد توزیع خطاهای ترانسفورماتور..... ۳
جدول ۱-۲: تقسیم‌بندی نواحی زلزله‌خیز..... ۷
جدول ۴-۱: مقادیر پارامترهای مدار معادل..... ۶۵
جدول ۴-۲: تأثیر خطاها روی مساحت و چرخش دیاگرام مکان هندسی..... ۷۷
جدول ۴-۳: قدرمطلق اختلاف درصد قطرهای بزرگ و کوچک بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای اتصال کوتاه دورها و جابجایی محوری ۷۹
جدول ۴-۴: قدرمطلق اختلاف درصد قطرهای بزرگ و کوچک بیضی نسبت به حالت مرجع درخطاهای غُرشدگی و نشتی ۸۲
جدول ۴-۵: قدرمطلق اختلاف‌درصد زاویه‌چرخش بیضی نسبت‌به حالت مرجع در خطاهای مختلف..... ۸۴
جدول ۴-۶: اختلاف درصد گریز از مرکز بیضی نسبت به حالت مرجع در خطاهای مختلف ۸۷

چکیده

نام خانوادگی : ربیعی	نام: میثم	شماره دانشجویی : ۹۱۵۵۵۳۹۱۱۴

عنوان پایان‌نامه : بررسی و تشخیص خطاهای سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت به‌صورت برخط

استاد/ اساتید راهنما: جناب آقای دکتر مرتضی رزاز

استاد/ اساتید مشاور: جناب آقای دکتر محمود جورابیان

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: برق	گرایش: قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه : برق

تاریخ فارغ‌التحصیلی : **تعداد صفحه:**

کلیدواژه‌ها : ترانسفورماتور قدرت، سیم‌پیچ، خطای مکانیکی، دیاگرام مکان هندسی، تشخیص برخط

شناسایی به‌موقع عیوب ترانسفورماتور می‌تواند شبکه و تجهیزات را از خطرهای احتمالی نجات دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بخش عمدهٔ عیوب ترانسفورماتور مربوط به عیوب سیم‌پیچ‌هاست. نیروهای مغناطیسی که یک ترانسفورماتور در طول خطاها، سوئیچینگ های گذرا و دیگر رخ‌دادهای سیستم تجربه می‌کند، باعث وارد شدن نیروهای مکانیکی بر روی سیم‌پیچ‌ها می‌گردد که اگر از حد توان و استقامت ترانسفورماتور تجاوز کند، نتیجه‌اش تغییر شکلِ سیم‌پیچ ترانسفورماتور خواهد بود. تابه‌حال روش‌های مختلفی برای شناسایی انواع عیوب مکانیکی ترانسفورماتور ارائه‌شده که عمدتاً به‌صورت غیر برخط خطا را شناسایی می‌کنند. در این پایان‌نامه روشی ارائه می‌گردد که در حین فعالیت ترانسفورماتور (به‌صورت برخط) شرایط مکانیکی سیم‌پیچ‌ها پایش می‌شود و در صورت رخ دادن خطای مکانیکی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت، خطا قابل‌شناسایی است. روش ارائه‌شده از طریق ولتاژ و جریان ترانسفورماتور به تشکیل مکان هندسی می‌پردازد. مکان هندسی به‌دست‌آمده برای ترانسفورماتور، یک مکان هندسی منحصربه‌فرد است که برای ترانسفورماتور سالم به‌عنوان دیاگرام مرجع در نظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که خطایی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور رخ دهد این دیاگرام نسبت به حالت مرجع تغییر شکل می‌دهد. مقایسه میان مکان هندسیِ ترانسفورماتور سالم (دیاگرام مرجع یا اثرانگشت) با دیاگرام ترانسفورماتور دارای خطای سیم‌پیچ و عدم تطابق میان آن‌ها، نمایانگر خطای مکانیکی در سیم‌پیچ خواهد بود. شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. تحلیل دقیق تصاویر شبیه‌سازی از طریق کد پردازش دیجیتالی تصویر در نرم‌افزار MATLAB انجام شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مکان‌هندسی مرجع در اثر خطاهای مختلفِ سیم‌پیچ به نوع خاصی تغییر می‌کند. تغییرات مکان‌هندسی متناسب و وابسته به نوع خطا وتغییر شکل سیم‌پیچ است، به گونه‌ای که استفاده از روش ارائه شده و تحلیل نتایج آن، در مورد خطاهای اتصال‌کوتاه حلقه‌ها، جابجایی محوری، غرشدگی و نشتی، خطای سیم‌پیچ به همراه نوع آن را مشخص نمود.

فصل اول

مقدمه و طرح مسئله

۱-۱ موضوع پژوهش و ضرورت آن

ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ‌ترین، سنگین‌ترین و اغلب گران‌ترین جزء از تجهیزات سیستم قدرت محسوب می‌شوند. بدیهی است توجه مناسب در راه‌اندازی، عملکرد و نگه‌داری از آن‌ها لازم است. ارزیابی شرایط هر واحد و پایشِ وضعیت[1] ترانسفورماتور در شبکه بسیار مهم است.

با توجه به تحقیقات در یک بررسی بین‌المللی نشان داده شد میزان خطا مربوط به ترانسفورماتور ۲-۱ درصد در سال است[۱]. این عدد بالایی نیست ولی یک‌خطا در یک ترانسفورماتورِ بزرگ معمولاً هزینه‌های زیادی را در بردارد. همچنین افزایش فاصله‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد.

یکی از بخش‌های مهم در ترانسفورماتور که عمدتاً خطا را در طول عمر خود تجربه می‌کند، سیم‌پیچ ترانسفورماتور است[۲]. ازجمله خطاهایی که در سیم‌پیچ رخ می‌دهد خطای مکانیکی[2] است. خطاهای مکانیکیِ سیم‌پیچ باعث تغییر شکل در وضعیت ظاهری آن‌هاست. قابل‌ذکر است به دلیل اینکه ترانسفورماتورهای کهنه استقامت کمتری دارند، با تغییر شکل‌های بیشتری مواجه می‌شوند.

ازآنجایی‌که ترانسفورماتورهای قدرت در حفظ پایداری و ارتقاء قابلیت اطمینان شبکه از اجزاء حساس و مهم در شبکه به شمار می‌آیند، در صورت رخ دادن عیب و یا نقصی در آن‌ها شبکه با

[1] Condition Monitoring
[2] Mechanical Fault

آسیب‌های جدی و گسترده روبه‌رو خواهد شد. هدف این است که خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور موردبررسی قرار گیرند و به روش مناسب شناسایی و تشخیص داده شوند.

یکی از عمده‌ترین مشکلات ترانسفورماتورهای قدرت رخ دادن خطا در سیم‌پیچ‌های آن است. اینکه بتوان این خطاها را شناسایی کرد و تصمیم مناسب جهت رفع عیوب اتخاذ نمود، از سال‌ها پیش جزء دغدغه‌های مهندسین بوده است.

در این پژوهش سعی شده است ضمن بررسی انواع خطاهای مکانیکی سیم‌پیچ، مروری بر روش‌های مختلف در تشخیص خطا صورت پذیرد. ازآنجایی‌که برخی از این روش‌ها فقط در حالتی قابل‌اجرا هستند که ترانسفورماتور باید از شبکه جدا باشد، راهکارهایی پیشنهاد می‌گردند که شناسایی خطا را در حین سرویس‌دهی ترانسفورماتور (برخط[1])، انجام دهند.

ترانسفورماتور یکی از حیاتی‌ترین عضوهای شبکه قدرت محسوب می‌شود. بنابراین نظارت مناسب و پایش دقیق از شرایط سیم‌پیچ‌های آن بسیار ضرورت دارد. نظارت بر قسمت‌های مختلف سیم‌پیچ به‌منظور جلوگیری از به وجود آمدن عیب و یا تشخیص به‌موقع آن است. اگر این مهم به‌صورت بر خط قابل پیاده‌سازی باشد آنگاه گام ارزشمندی در جهت حفاظت از ترانسفورماتور برداشته‌شده است. چراکه پایش برخط باعث افزایش قابلیت اطمینان ترانسفورماتور با حداقل سازی قطعی‌های ناخواسته می‌گردد. علاوه بر این پیش از حاد شدن عیوب سیم‌پیچ می‌توان باتدبیری مناسب به رفع عیوب پرداخت تا از هزینه‌های گزاف و بی‌مورد جهت تعمیرات اساسی جلوگیری کرد.

۱-۲ خطا در ترانسفورماتور

به‌صورت کلی خطاهایی که ترانسفورماتور را تهدید می‌کند می‌توان به شش گروه اصلی تقسیم نمود[۱]:

۱. خطا در سیم‌پیچ‌ها

۲. خطا در تپ چنجر

[1] Online

۳. خطا در بوشینگ

۴. خطا در ترمینال ترانسفورماتور

۵. خطا در هسته

۶. خطاهای جانبی

مطالعات متعددی صورت گرفته‌اند، باهدف اینکه آماری از خطاهای ترانسفورماتور و المان‌هایی که در این خطاها دخیل هستند، به دست آورند. خلاصه‌ای از مطالعات در جدول ۱-۱ آورده شده است. با توجه به جدول ۱-۱ قابل‌مشاهده است که هسته و سیم‌پیچ بیشترین درصد خطا را به خود اختصاص می‌دهند.

جدول ۱-۱ : درصد توزیع خطاهای ترانسفورماتور[۱]و[۳-۵]

خطا در قسمت‌های مختلف	**توزیع خطا به درصد**				
	بررسی گروه CIGRE[۱]	**بررسی گروه CEA[۳]**	**بررسی گروه Clients[۴]**	**بررسی گروه ZTZ[۴]**	**بررسی گروه South Africa[۵]**
بوشینگ	۲۹	۲۹	۳۰	۴۰	۱۴
تپ چنجر	۱۵	۳۹	۲۱	۹	۲۴
سیم‌پیچ	۴۳	۱۶	۳۷	۳۹	۴۴
هسته	۲	۱۰	۷	۷	۱۵
خطاهای جانبی	۱۱	۶	۵	۵	۳

۱-۳ عوامل چالش‌برانگیز برای ترانسفورماتور

از زمانی که ترانسفورماتور طراحی می‌شود و ساختار آن کامل می‌گردد تا زمانی که برای بهره‌برداری در محل نصب می‌گردد، باید کاملاً تحت نظر باشد. چراکه ترانسفورماتور در شرایطی

قرار می‌گیرد که آن را با چالش‌هایی روبه‌رو می‌کند و ممکن است سلامت مکانیکی ترانسفورماتور، سیم‌پیچ‌ها و دیگر متعلقات را به خطر بیندازد.

در دسته‌بندی کلی، عواملی که ترانسفورماتور را با چالش روبه‌رو می‌کند به‌صورت زیر است[۶]:

۱- فشارهای مکانیکی و شوک‌های مخرب در طول حمل‌ونقل و جابجایی ترانسفورماتور.

۲- نیروهای دینامیکیِ لرزشی و ارتعاشی در هنگام سرویس‌دهی.

۳- کهنگی تجهیزات و پیر شدن ترانسفورماتور پس از گذراندن عمرِ طراحی[1].

۴- نیروهای اتصال کوتاه شدید که از مهم‌ترین عوامل ایجاد خطای مکانیکی سیم‌پیچ در ترانسفورماتور است.

۱-۳-۱ فشارهای مکانیکی و شوک‌های مخرب

بعضی از شوک‌هایی که به ترانسفورماتور وارد می‌شود شوک‌های مکانیکی خارجی است. این شوک‌ها ارتباطی با فعالیت الکتریکی ترانسفورماتور ندارد که ازجمله آن‌ها می‌توان شوک‌هایی را نام برد که طی جابجایی، حمل‌ونقل و نصب وارد می‌شوند. نتایج تحلیل‌ها برای اقدامات پیشگیرانه در مواقع طراحی، حمل‌ونقل و نصب مورداستفاده قرار می‌گیرد. فقط یک تجهیز خوب طراحی‌شده می‌تواند انواع این شوک‌ها را تحمل کند.

- **ضربات هنگام جابه‌جایی و نقل‌وانتقال**

ترانسفورماتورها معمولاً از طریق جاده، ریل، دریا و حتی به‌صورت هوایی حمل می‌شوند. بنابراین ترانسفورماتور ممکن است ضرباتی را متحمل شود. این نوع از شوک‌ها استانداردسازی شده‌اند(c.f. standard nf 00-060 June 1991) و تست‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی گشته‌اند از قبیل :

تست پرتاب عمودی، از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر

تست ضربات افقی در یک سطح شیب‌دار، با سرعت ضربه به میزان $1085^{m}/_{s}$

[1] Designed life

- **لرزش‌ها**

لرزش‌های فرکانس پایین مهم‌ترین جابجایی‌ها را ایجاد می‌کند و با توجه به‌شتاب آن‌ها مخرب‌ترین تأثیرات رادارند. با توجه به این لرزش‌ها قسمت‌های مختلف ترانسفورماتور تحت شوک‌های مکانیکی قرار می‌گیرند ازجمله :هسته‌ی مغناطیسی، کلاف سیم‌پیچ‌ها، محفظه حفاظتی و متعلقات گوناگون. این مسئله از طریق تست با استفاده از میز لرزش بررسی می‌شود (طبق استاندارد NFH 00-060 June 1991).

تست ۳۰ دقیقه‌ای با فرکانس ۴- ۳ هرتز و پیک افقی و پیک عمودی.

تست ۳۰ دقیقه‌ای با فرکانس ۵-۴ هرتز و پیک افقی و پیک عمودی.

- **انتقال**

علاوه بر ضربات و لرزش‌ها، ترانسفورماتورها با شوک‌هایی مواجه می‌شوند که به خاطر تعجیل‌هایی است که در هنگام انتقال ایجاد می‌شوند:

– شتاب‌های طولی وقتی‌که وسیله‌ی نقلیه می‌ایستد یا ترمز می‌گیرد(بیشتر از g ۰/۵)

– شتاب‌های عرضی وقتی‌که وسیله‌ی نقلیه تغییر جهت می‌دهد.

برای محدود کردن شوک‌ها هنگام انتقال، ترانسفورماتور باید به‌گونه‌ای قرار گیرد که محور طولی آن موازی با مسیر حرکت باشد. برای جلوگیری از واژگونی باید بسیار محکم با تسمه بندی به کف کامیون سفت شود. برای جلوگیری از جابجایی باید توسط گوه به کف کامیون پیچ شده یا با میخ کوبیده شود.

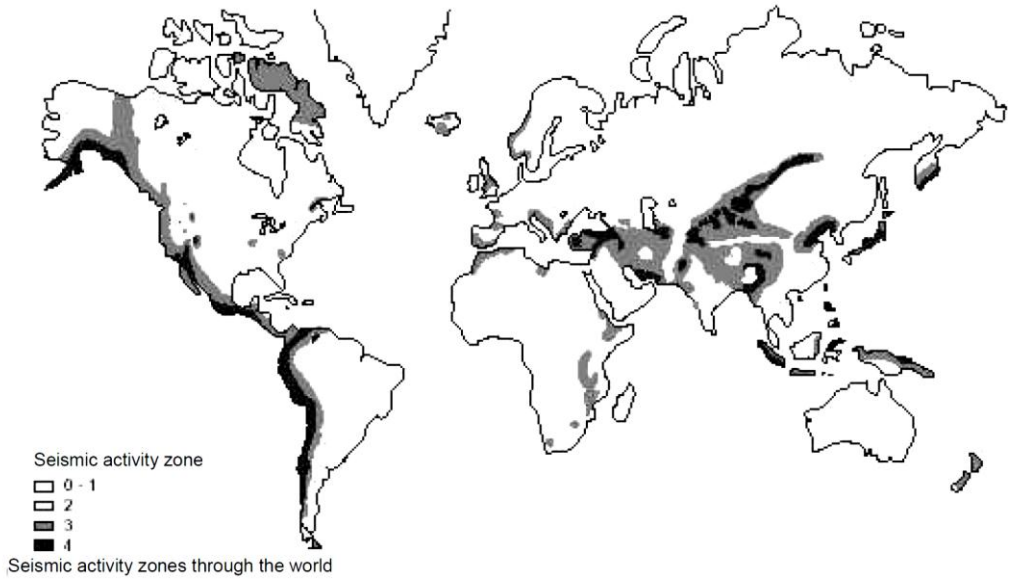
علاوه بر این، برای کاهش ضربان لرزشی که توسط غلتنده ها ایجاد می‌شود، در طراحی ترانسفورماتور ممکن است به گوه‌های تقویت‌شده نیاز باشد. این تقویت مستلزم دو برابر یا حتی سه برابر کردن تعداد گوه‌هاست.

۱-۳-۲ فشارهای لرزشی و ارتعاشی

تجهیزات مهم و ضروری در پست‌ها قرار دارند ازجمله ترانسفورماتورها که در اثر رخ دادن زمین‌لرزه ممکن است به خطر بیافتند. اتفاقاتی مانند LOMO PRIETA در سال ۱۹۸۹ و لرزش

NORTHRIDGE در سال ۱۹۹۴ دوباره آسیب‌پذیر بودن تجهیزات را یادآور کرد. خطراتی که نگه‌دارنده‌های[1] هادی‌ها و مهاربندیِ[2] تجهیزات را به خطر می‌اندازد و به بوشینگ ها و مدار شکن‌ها[3] آسیب می‌زند. همان‌طوری که در اتفاقات LOMO PRIETA و NORTHRIDGE در حدود ۲۸۳ میلیون دلار خسارت وارد کرد.

ترانسفورماتور ممکن است در یک ناحیه‌ی با زمین‌لرزه‌ی فعال نصب شود. شدت لرزه از ۱ تا ۱۲ درجه‌بندی می‌شود. این نواحی زلزله‌خیز با توجه به مشاهدات طی بیش از ۲۰۰ سال تقسیم‌بندی شده‌اند[۱]. شکل ۱-۱ نواحی زلزله‌خیز را نشان می‌دهد. بنابراین ملاحظات لازم برای توانمند ساختن ترانسفورماتور در برابر چنین پدیده‌هایی مهم است. همچنین مهم است که در هنگام پروسه‌ی طراحی بدانیم که ترانسفورماتور کجا نصب خواهد شد. نواحی زلزله‌خیز را به چهار قسمت تقسیم می‌کنیم و توصیه‌ها با توجه به این نواحی صورت می‌پذیرد. جدول ۱-۲ این تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: نواحی زلزله‌خیز با شدت‌های مختلف جهت نصب ترانسفورماتور[۱]

[1] Supporter
[2] Clamping
[3] Circuit breaker

جدول ۱-۲: تقسیم‌بندی نواحی زلزله‌خیز[۱]

شدت زلزله	نواحی زلزله خیز
۱ ۲ ۳ ۴	ناحیه ۰
۵ ۶	ناحیه ۱
۷	ناحیه ۲
۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲	ناحیه ۳ و ۴

ناحیه ۱ و ۲ : عدم دستورالعمل خاص. نصب استاندارد کافی است(اتصال روی غلتک).

ناحیه ۳ : ترانسفورماتور باید از طریق چارچوب خودش به زمین مهار شود. غلطک‌ها توسط یک یا چند ساپورت فلزی با ارتفاع مناسب جایگزین می‌شوند و به زمین مهار شود.

ناحیه ۴ : ترانسفورماتور باید لرزه‌ها را تحمل کند به صورتی که موارد زیر در نظر گرفته شوند:

- دو یا سه برابر کردن تعداد گوه‌های کلاف سیم‌پیچ.
- مهار کردن ترانسفورماتور به زمین از طریق چارچوبش.
- تقویت سازه در قسمت نیمه‌ی بالایی ترانسفورماتور و چارچوبش با استفاده از تجهیزات پیچ شده و سیستم ضد شل شدن.

علاوه بر این باید در نظر داشت که ترانسفورماتور از سازه‌های اطراف (ساختمان‌ها ،تجهیزات جانبی و....) محافظت شوند چون آن‌ها هم لرزش مشابهی را تجربه می‌کنند.