

به نام خداوند بخشنده مهربان

# هندبوک سرویس و عیب یابی ترانسفورماتور

**ABB**

مترجمین:  
آرش آقائی فر  
علیرضا ترابی

ویراستار فنی:  
کمال بشکار

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

پیشگفتار مترجمین

مقدمه

### فصل اول: ملاحظات طراحی

۱	۱.۱. ساختمان
۲	۲.۱. ملاحظات مکانیکی
۲	۳.۱. ملاحظات حرارتی
۳	۴.۱. ملاحظات عایقی
۴	۵.۱. انواع ترانسفورماتور از لحاظ ساختمان
۴	۱. ۵.۱. ترانسفورماتورهای زرهی
۱۰	۲. ۵.۱. ترانسفورماتورهای هسته‌ای
۱۵	۶.۱. پوشینگ
۱۶	۱. ۶.۱. طراحی و ساخت سیستم خازنی در پوشینگ‌های خازنی
۱۹	۲. ۶.۱. تپ پوشینگ
۲۲	۳. ۶.۱. اتصالات
۲۲	۴. ۶.۱. روغن نمای پوشینگ
۲۳	۵. ۶.۱. رنگ
۲۳	۷.۱. تپ چنجر تحت بار
۲۳	۱. ۷.۱. معرفی
۲۴	۲. ۷.۱. تپ چنجرهای مورد استفاده در آمریکای شمالی
۳۱	۳. ۷.۱. تپ چنجرهای مورد استفاده در اروپا

- ۳۶ ۸.۱. بارداری الکترواستاتیک گردشی
- ۳۸ ۸.۱. تمایل به بارداری الکترواستاتیک در روغن (ECT)
- ۴۰ ۸.۱.۲. راهکارهای کاهش اثر بارداری الکترواستاتیک گردشی

### فصل دوم: رویکرد عملی در ارزیابی ریسک وقوع خطا

- ۴۵ ۱.۲. پیشینه
- ۴۶ ۲.۲. فرایند مدیریت عمر
- ۴۶ ۱.۲.۲. ارزیابی ریسک
- ۴۸ ۲.۲.۲. تشریح فرایند ارزیابی
- ۵۰ ۳.۲.۲. فرایند ارزیابی
- ۵۱ ۴.۲.۲. احتمال وقوع خطا: نرخ خطای هر ترانسفورماتور
- ۵۲ ۳.۲.۲. ارزیابی ریسک وقوع خطا در ترانسفورماتور
- ۵۲ ۱.۳.۲. عوامل مکانیکی
- ۵۲ ۲.۳.۲. عوامل حرارتی
- ۵۲ ۳.۳.۲. عوامل الکتریکی: ریسک خطای عایقی
- ۵۳ ۴.۳.۲. عوامل مرتبط با خطای تجهیزات جانبی
- ۵۳ ۵.۳.۲. ریسک کلی وقوع خطا
- ۵۴ ۴.۲. کاهش ریسک
- ۵۵ ۵.۲. خلاصه

### فصل سوم: عیب‌یابی ترانسفورماتور و تجهیزات جانبی

- ۵۷ ۱.۳. معرفی
- ۵۸ ۲.۳. روش‌های عیب‌یابی ترانسفورماتور
- ۵۸ ۱.۲.۳. عوامل تنش‌زا در ترانسفورماتورهای قدرت
- ۵۹ ۲.۲.۳. عوامل تخریب عایق و مکانیزم شکست
- ۶۰ ۳.۲.۳. روش‌های عیب‌یابی
- ۶۱ ۳.۳. روش‌های عیب‌یابی بوشینگ
- ۶۱ ۱.۳.۳. تنش‌های وارده بر بوشینگ
- ۶۱ ۲.۳.۳. عوامل تخریب عایق و مکانیزم‌های خرابی
- ۶۲ ۳.۳.۳. روش‌های عیب‌یابی
- ۶۳ ۴.۳. روش‌های عیب‌یابی برقگیر
- ۶۳ ۱.۴.۳. تنش‌های وارده بر برقگیر
- ۶۳ ۲.۴.۳. عوامل تخریب و مکانیزم‌های خرابی
- ۶۴ ۳.۴.۳. روش‌های عیب‌یابی

## فصل چهارم: آزمون‌های روغن

- ۶۷ ۱. عوامل موثر بر سلامت و عمر ترانسفورماتور
- ۶۸ ۲. روش‌های ارزیابی کیفیت روغن
- ۶۸ ۱. ۲. ۴. استقامت عایقی (ولتاژ شکست)
- ۶۹ ۲. ۲. ۴. کشش بین سطحی
- ۷۰ ۳. ۲. ۴. مقدار اسیدیته
- ۷۰ ۴. ۲. ۴. تانژانت دلتا
- ۷۱ ۵. ۲. ۴. اندازه‌گیری مواد بازدارنده‌ی اکسیداسیون (آنتی‌اکسیدان)
- ۷۱ ۶. ۲. ۴. آنالیز فوران
- ۷۱ ۷. ۲. ۴. مقدار PCB
- ۷۱ ۸. ۲. ۴. گوگرد خورنده
- ۷۲ ۳. ۴. رطوبت در سیستم عایقی ترانسفورماتور
- ۷۲ ۱. ۳. ۴. روغن ترانسفورماتور
- ۷۳ ۲. ۳. ۴. رطوبت نسبی
- ۷۳ ۳. ۳. ۴. کاغذ (سلولز)
- ۷۴ ۴. ۳. ۴. منابع تولید آب در ترانسفورماتور
- ۷۵ ۵. ۳. ۴. موازنه‌ی رطوبت بین روغن و کاغذ
- ۷۷ ۶. ۳. ۴. عدم دقت تخمین رطوبت کاغذ با استفاده از روش منحنی‌های تعادلی
- ۷۸ ۴. ۴. تحلیل نتایج کنترل کیفی روغن
- ۸۲ ۵. ۴. رطوبت و تشکیل حباب در ترانسفورماتور
- ۸۵ ۶. ۴. آنالیز گازهای محلول در روغن (DGA) یا گاز کروماتوگرافی
- ۸۵ ۱. ۶. ۴. معرفی
- ۸۷ ۲. ۶. ۴. فرایند عیب‌یابی با کمک آنالیز گازهای محلول در روغن
- ۸۷ ۳. ۶. ۴. نمونه‌برداری
- ۸۸ ۴. ۶. ۴. جداسازی گاز از روغن
- ۸۹ ۵. ۶. ۴. اندازه‌گیری مقدار گازها
- ۸۹ ۶. ۶. ۴. تحلیل نتایج
- ۸۹ ۷. ۶. ۴. هوا
- ۸۹ ۸. ۶. ۴. طیف گازها: انواع خطای قابل شناسایی با گاز کروماتوگرافی
- ۹۱ ۹. ۶. ۴. عوامل تأثیرگذار بر تشکیل گاز در ترانسفورماتور
- ۹۶ ۱۰. ۶. ۴. روش‌های تحلیل گازهای محلول در روغن
- ۱۰۹ ۷. ۴. آنالیز ذرات معلق در روغن ترانسفورماتور
- ۱۱۰ ۱. ۷. ۴. نمونه‌برداری از روغن برای انجام آزمون اندازه‌گیری ذرات معلق

- ۱۱۰ ۴.۷.۲. شمارش ذرات
- ۱۱۱ ۴.۷.۳. ذرات فلزی
- ۱۱۳ ۴.۷.۴. نمونه‌هایی از عیب‌یابی ترانسفورماتور با کمک آنالیز اندازه‌گیری ذرات
- ۱۱۴ ۴.۷.۵. تأثیر ذرات بر استقامت عایقی روغن

### فصل پنجم: آزمون‌های الکتریکی و ترموگرافی

- ۱۲۱ ۵.۱. اندازه‌گیری مقاومت سیم‌پیچ
- ۱۲۲ ۵.۱.۱. روش‌های اندازه‌گیری مقاومت سیم‌پیچ
- ۱۲۳ ۵.۲. تست نسبت تبدیل ترانسفورماتور
- ۱۲۵ ۵.۳. مقاومت عایقی
- ۱۲۵ ۵.۱.۳. اندازه‌گیری
- ۱۲۶ ۵.۲.۳. تحلیل نتایج
- ۱۲۷ ۵.۳.۳. شاخص پلاریزاسیون
- ۱۲۸ ۵.۴. تانژانت دلتا
- ۱۲۹ ۵.۱.۴. ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه
- ۱۳۳ ۵.۲.۴. ترانسفورماتور سه‌سیم‌پیچه
- ۱۳۳ ۵.۳.۴. مقادیر معمول تانژانت دلتای عایق
- ۱۳۴ ۵.۴.۴. راهنمای عمومی برای ارزیابی مقادیر تانژانت دلتا
- ۱۳۵ ۵.۴.۵. تست Tip-up
- ۱۳۵ ۵.۵. اندازه‌گیری مقاومت عایقی هسته
- ۱۳۵ ۵.۱.۵. اندازه‌گیری و تشخیص زمین شدن هسته از بیش از یک نقطه
- ۱۳۷ ۵.۶. تست جریان تحریک
- ۱۳۸ ۵.۱.۶. آماده‌سازی مدارهای اندازه‌گیری
- ۱۴۰ ۵.۲.۶. تحلیل نتایج تست جریان تحریک
- ۱۴۱ ۵.۷. آنالیز ترموگرافی ترانسفورماتور و تجهیزات جانبی
- ۱۴۱ ۵.۱.۷. فرایند ترموگرافی
- ۱۴۲ ۵.۲.۷. معیارهای ارزیابی تست
- ۱۴۲ ۵.۳.۷. نمونه‌های عملی از عیب‌یابی به روش ترموگرافی

### فصل ششم: آزمون‌های ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی پیشرفته

- ۱۴۷ ۶.۱. ارزیابی وضعیت مکانیکی ترانسفورماتور: آنالیز پاسخ فرکانسی (FRA)
- ۱۴۷ ۶.۱.۱. معرفی
- ۱۴۸ ۶.۱.۲. چه زمانی باید تست FRA انجام شود؟
- ۱۴۸ ۶.۱.۳. روش انجام تست

۱۴۹	۴.۱.۶. مدارات اندازه‌گیری
۱۵۰	۵.۱.۶. تجهیزات تست
۱۵۱	۶.۱.۶. فرایند انجام تست
۱۵۷	۷.۱.۶. گزارش‌دهی آزمون FRA
۱۵۸	۸.۱.۶. تحلیل اولیه و کنترل کیفیت نتایج در سایت
۱۶۴	۹.۱.۶. نمونه‌هایی از عیب‌یابی به روش FRA
۱۶۸	۲.۶. ارزیابی وضعیت حرارتی ترانسفورماتور: درجه‌ی پلیمریزاسیون (DP)
۱۶۸	۱.۲.۶. معرفی
۱۷۲	۲.۲.۶. تجزیه و تحلیل ترکیبات فوران
۱۷۵	۳.۶. پاسخ فرکانسی عایق (DFR)
۱۷۵	۱.۳.۶. معرفی
۱۷۶	۲.۳.۶. پاسخ فرکانسی عایق و مدل X-Y
۱۷۹	۳.۳.۶. دلایل افزایش تانژانت دلتا در عایق ترانسفورماتور
۱۸۱	۴.۳.۶. مشخصه‌ی پاسخ فرکانسی عایق (DFRS)
۱۸۸	۵.۳.۶. خلاصه
۱۸۸	۴.۶. ارزیابی وضعیت الکتریکی ترانسفورماتور: اندازه‌گیری تخلیه جزئی (PD)
۱۸۸	۱.۴.۶. معرفی
۱۸۹	۲.۴.۶. اندازه‌گیری تخلیه جزئی به روش الکتریکی
۱۹۳	۳.۴.۶. فرایند شناسایی منابع تخلیه جزئی
۱۹۸	۴.۴.۶. اندازه‌گیری تخلیه جزئی به روش صوتی

### فصل هفتم: ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی بوشینگ و تپ‌چنجر

۲۰۵	۱.۷. ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی بوشینگ
۲۰۵	۱.۱.۷. روش‌های ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی مشترک بین استانداردهای ANSI و IEC
۲۱۰	۲.۱.۷. ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی بوشینگ بر مبنای ANSI/IEEE
۲۲۴	۳.۱.۷. ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی بوشینگ بر مبنای IEC
۲۲۸	۲.۷. ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی تپ‌چنجر تحت بار
۲۲۸	۱.۲.۷. تعداد عملکرد
۲۲۸	۲.۲.۷. مقاومت اتصالات الکتریکی
۲۲۸	۳.۲.۷. درجه حرارت
۲۲۸	۴.۲.۷. جریان موتور درایو
۲۲۸	۵.۲.۷. سیگنال‌های صوتی
۲۲۹	۶.۲.۷. زمان عملکرد رله
۲۲۹	۷.۲.۷. رطوبت

### فصل هشتم: آنالیز خطا

- ۲۳۷ ۱. معرفی
- ۲۳۹ ۲. تعاریف مربوط به خطا
- ۲۳۹ ۳. طبقه بندی انواع خطا
- ۲۴۰ ۴. اطلاعات عمومی در خصوص عیوب و خطاها
- ۲۴۱ ۵. تحلیل خطای سیستماتیک
- ۲۴۲ ۱.۵. گردآوری اطلاعات از تجهیز
- ۲۴۳ ۲.۵. اطلاعات مورد نیاز در زمان وقوع خطا
- ۲۴۶ ۳.۵. تصمیم‌گیری در خصوص ادامه‌ی بهره‌برداری یا بررسی بیشتر
- ۲۴۷ ۴.۵. ارزیابی میزان آسیب
- ۲۴۸ ۵.۵. ارزیابی آسیب‌های بیرونی ترانسفورماتور در سایت
- ۲۴۹ ۶.۵. آزمون‌های عیب‌یابی و تحلیل نتایج
- ۲۵۰ ۱.۶. آزمون‌های روتین قابل انجام در سایت
- ۲۵۲ ۲.۶. آزمون‌های عیب‌یابی ویژه
- ۲۵۶ ۳.۶. بازرسی هسته و سیم‌پیچ ترانسفورماتور در سایت
- ۲۵۸ ۴.۶. دمونتاژ ترانسفورماتور معیوب
- ۲۶۰ ۵.۶. الگوهای معمول خطای سیم‌پیچی
- ۲۶۲ ۶.۶. بازرسی هسته و مخزن
- ۲۶۳ ۷. ارزیابی نهایی خطا
- ۲۶۳ ۸. نمونه‌های عملی آنالیز خطا
- ۲۶۳ ۱.۸. نمونه‌ی اول: ارزیابی وضعیت ترانسفورماتور با خطای تخلیه‌جزئی
- ۲۷۲ ۲.۸. نمونه‌ی دوم: تحلیل خطای ناشی از وقوع اضافه ولتاژ
- ۲۷۵ ۳.۸. نمونه‌ی سوم: تحلیل خطای ناشی از تخلیه‌ی الکتریکی داخلی

### فصل نهم: پایش وضعیت آنالاین

- ۲۸۳ ۱. معرفی
- ۲۸۳ ۲. ترانسفورماتورهای قدرت (هسته و مخزن)
- ۲۸۴ ۳. تپ‌چنجر تحت‌بار
- ۲۸۵ ۴. بوشینگ و ترانسفورماتور جریان
- ۲۸۶ ۵. نمونه‌هایی از سیستم‌های پایش وضعیت آنالاین

### فصل دهم: سرویس‌ونگهداری پیشگیرانه

۲۹۱	۱.۱۰.۱. فرایندهای پیری
۲۹۱	۱.۱۰.۱.۱. معرفی
۲۹۲	۱.۱۰.۲. تخریب عایق کاغذی
۲۹۵	۱.۱۰.۳. روش‌های خشک‌سازی در سایت
۲۹۷	۱.۱۰.۴. تصفیه‌ی شیمیایی
۲۹۹	۲.۱۰. سرویس‌ونگهداری پایه
۲۹۹	۲.۱۰.۱. برنامه‌ی پیشنهادی برای سرویس‌ونگهداری
۳۰۲	۲.۱۰.۲. سرویس‌ونگهداری اجزاء و متعلقات ترانسفورماتور
۳۰۵	۲.۱۰.۳. بررسی خطای محتمل در ترانسفورماتور
۳۰۸	۲.۱۰.۴. بازرسی داخلی
۳۱۱	۲.۱۰.۵. سرویس‌ونگهداری از پوشینگ
۳۱۳	۲.۱۰.۶. سرویس‌ونگهداری از تپ‌چنجر تحت‌بار
۳۱۴	۲.۱۰.۷. عیوب محتمل و روش‌های رفع عیب انواع مختلف تپ‌چنجر تحت‌بار

#### فصل یازدهم: تعمیر، بهینه‌سازی و نوسازی

۳۲۳	۱.۱۱. معرفی
۳۲۴	۲.۱۱. مرحله‌ی آماده‌سازی
۳۲۵	۳.۱۱. خارج کردن اکتیوپارت از مخزن و دمونتاز
۳۲۵	۴.۱۱. تعمیر ترانسفورماتور
۳۲۶	۵.۱۱. مونتاژ و وارد کردن اکتیوپارت به داخل مخزن
۳۲۷	۶.۱۱. خشک‌سازی
۳۲۸	۷.۱۱. مونتاژ نهایی
۳۲۹	۹.۱۱. کنترل کیفیت تعمیر
۳۲۹	۱۰.۱۱. امکانات لازم برای تعمیر در سایت

#### فصل دوازدهم: ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی

۳۳۵	۱.۱۲. جنبه‌های زیست محیطی
۳۳۵	۱.۱۲.۱. آلودگی روغن به PCB
۳۳۷	۱.۱۲.۲. سازگاری در برابر امواج الکترومغناطیسی (EMC)
۳۳۸	۱.۱۲.۳. نویز قابل شنیدن
۳۴۲	۱.۱۲.۴. انتشار روغن عایقی
۳۴۳	۲.۱۲. ملاحظات اقتصادی مرتبط با مدیریت دارایی ترانسفورماتور
۳۴۳	۲.۱۲.۱. آمار خرابی ترانسفورماتورهای قدرت
۳۴۹	۲.۱۲.۲. اقتصاد مدیریت ترانسفورماتور برای ناوگان ترانسفورماتوری



# پیشگفتار مترجمین

کتاب حاضر ترجمه‌ی فارسی آخرین ویرایش هندبوک سرویس و عیب‌یابی ترانسفورماتور است که توسط شرکت ABB و با مشارکت بیش از ۶۰ نویسنده‌ی متخصص در مسائل مختلف ترانسفورماتور از ۱۴ کشور دنیا تدوین شده است. آنچه این کتاب را از استانداردها و کتاب‌های مشابه متمایز می‌سازد، تجربه‌ی توأمان شرکت ABB، هم در زمینه‌ی طراحی و تولید ترانسفورماتور و هم در زمینه‌ی تست، سرویس و تعمیر این تجهیز است که به هندبوک جنبه‌ی کاربردی و عملی بیشتری داده است. این‌را می‌توان از نمونه‌های عملی ارائه شده در کتاب نیز دریافت.

کتاب حاضر در دوازده فصل تدوین شده است: فصل اول مروری کلی است بر اجزاء، قطعات، ساختمان و انواع ترانسفورماتور و همچنین قطعاتی مانند بوشینگ و تپ‌چنجر، که آشنایی با مکانیزم عملکرد و اجزای داخلی آن‌ها به‌منظور سرویس و عیب‌یابی ترانسفورماتور اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این در انتهای این فصل، بارداری الکترواستاتیک گردشی ترانسفورماتور معرفی و نقش آن در وقوع خطا بر روی این تجهیز بیان شده است. در فصل دوم روشی برای ارزیابی ریسک وقوع خطا در ترانسفورماتور ارائه و راهکارهایی برای کاهش این ریسک معرفی شده است.

در فصل سوم به کلیات عیب‌یابی ترانسفورماتور و تجهیزات جانبی آن به‌ویژه بوشینگ و برقیگیر پرداخته شده است. تمرکز فصل چهارم بر روی آزمون‌های روغن و ذرات معلق، همچنین نقش این رطوبت در سیستم عایقی، آنالیز گازهای محلول در روغن و ذرات معلق، همچنین نقش این آزمون‌ها در شناسایی خطاهای محتمل در ترانسفورماتور به تفصیل بیان شده است. در فصل پنجم، آزمون‌های الکتریکی روتین ترانسفورماتور شامل مقاومت اهمی سیم‌پیچ، نسبت تبدیل، مقاومت عایقی سیم‌پیچ و هسته، تانژانت دلتا، tip-up و جریان تحریک (بی‌باری) معرفی و نحوه‌ی آماده‌کردن و بستن مدارات تست و تفسیر نتایج به تفصیل بیان شده است. در انتهای فصل نیز آزمون ترموگرافی و اهمیت آن در تحلیل عیوب محتمل ترانسفورماتور با ذکر نمونه‌های عملی بیان گردیده است. فصل ششم با موضوع آزمون‌های عیب‌یابی پیشرفته، یکی از مفصل‌ترین فصل‌های کتاب است که به معرفی تست‌های FRA، درجه‌ی پلیمریزاسیون عایق، DFR (FDS)

و اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی می‌پردازد. در این فصل نیز مانند فصل پنجم، مدارات تست تشریح شده و نحوه‌ی تحلیل نتایج ذکر شده‌است. در فصل هفتم، ارزیابی وضعیت و عیب‌یابی بوشینگ و تپ‌چنجر ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفته‌است، که هر دو سهم عمده‌ای در حوادث ترانسفورماتور دارند. علاوه بر این در این فصل یک نمونه‌ی عملی در خصوص آنالیز خطا و عیب‌یابی بوشینگ تایپ U معرفی شده‌است. با توجه به افزایش حوادث مرتبط با بوشینگ در ایران، این نمونه ارائه شده می‌تواند الگویی برای آنالیز خطا و عیب‌یابی بوشینگ‌های معمول در کشور ما باشد. در فصل هشتم، آنالیز خطای ترانسفورماتور معرفی می‌گردد. تمرکز این فصل بر اقدامات لازم بر روی ترانسفورماتوری است که یا به‌دلیل عملکرد تجهیزات حفاظتی از مدار خارج شده، یا دچار حادثه شده‌است. در انتهای فصل نیز سه نمونه‌ی عملی از آنالیز خطای ترانسفورماتورهای حادثه‌دیده ذکر شده‌است که می‌تواند برای بهره‌برداران و علاقه‌مندان به صنعت ترانسفورماتور آموزنده باشد. پایش وضعیت آنالیز، موضوع فصل نهم این کتاب است، که در آن برخی از سیستم‌های مونیتورینگ آنالیز که بعضاً در کشور ما نیز استفاده شده معرفی گردیده‌است. در فصل دهم، ابتدا فرایندهای پیری عایق و روش‌های خشک‌سازی ترانسفورماتور در سایت معرفی و سپس سرویس‌های دوره‌ای ترانسفورماتور و تجهیزات جانبی به‌ویژه تایپ‌های مختلف تپ‌چنجر تشریح شده‌است. همچنین عیوب محتمل ترانسفورماتور و روش‌های رفع عیب نیز در جدولی به صورت خلاصه بیان گردیده‌است. الزامات تعمیر ترانسفورماتور در سایت یا کارگاه تعمیرات، موضوع فصل یازدهم کتاب است. در آخرین فصل نیز برخی ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی مربوط به سرویس و بهره‌برداری از ترانسفورماتور شرح داده شده‌است.

با توجه به این که مخاطبین اصلی این کتاب، بهره‌برداران ترانسفورماتورهای توزیع و قدرت و مشاورین و پیمانکاران سرویس، نگهداری، تست و تعمیرات این تجهیزات هستند، در ترجمه‌ی فارسی کتاب تلاش شده به‌جای معادل‌سازی فارسی، از واژه‌های معمول در دستورالعمل‌ها و متون فنی و عملیاتی و اصطلاحات رایج بین مهندسان در صنعت برق و ترانسفورماتور استفاده شود؛ تا خواننده‌ی متخصص، برای درک معنی واژه دچار مشکل نشود. در این ترجمه تلاش بسیاری شده تا متن، دقیق و روان باشد و وفاداری به متن اصلی نیز حفظ شود. هر جا به توضیح بیشتری توسط مترجمین نیاز بوده در انتهای فصل با علامت (م) مشخص شده‌است. همچنین تعدادی از تصاویر کتاب در فصل‌های ۵، ۶، ۸ و ۱۲ به‌صورت رنگی و با کیفیت بالا در وبسایت: [www.Atecco.ir](http://www.Atecco.ir) بارگذاری شده‌اند. این تصاویر را در انتهای فصول ذکر شده مشخص کرده‌ایم. پیشنهاد می‌گردد پس از مطالعه‌ی این کتاب، «هندبوک ترانسفورماتور ABB» را نیز که در سال گذشته ترجمه و منتشر شده است مطالعه فرمایید. از کلیه‌ی خوانندگان محترم تقاضا داریم انتقادهای، پیشنهادها و همچنین ایرادهای مشاهده شده در متن را به‌منظور اصلاح در ویرایش‌های آتی به پست الکترونیک: [info@atecco.ir](mailto:info@atecco.ir) ارسال نمایند.

آرش آقائی‌فر

علیرضا ترابی

زمستان ۱۴۰۱

# مقدمه

هدف از تدوین و نگارش هندبوک سرویس ترانسفورماتور، ارائه‌ی دستورالعملی کلی و جامع و در عین حال ساده برای پایش وضعیت و افزایش طول عمر این تجهیزات است. این کتاب توسط متخصصین شرکت ABB و با توجه به تجربه و دانشی که طی سالیان متمادی در زمینه‌ی تولید و خدمات ترانسفورماتور اندوخته‌اند، به رشته تحریر درآمده است. مهندسین و کارشناسان این شرکت نه تنها با آخرین تحولات و فناوری‌های موجود در زمینه‌ی سرویس و تست ترانسفورماتور آشنایی کامل دارند، بلکه در بسیاری از موارد، خود مبدع برخی از این نوآوری‌ها بوده‌اند. اطلاعات مکتوب ولی پراکنده‌ی زیادی در خصوص تست، سرویس و بهره‌برداری از ترانسفورماتور در دنیا وجود دارد؛ اما آنچه با نگارش این هندبوک تلاش کردیم به انجام برسانیم، گردآوری مفیدترین و کاربردی‌ترین این اطلاعات در قالب یک کتاب جامع بود. هدف نهایی آن است که این هندبوک، انتخاب اول بهره‌برداران و شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی خدمات تست و تعمیر باشد و به‌عنوان مرجعی معتبر، برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص ترانسفورماتور استفاده شود. همچنین از این کتاب می‌توان برای آموزش دانشجویان نیز استفاده کرد. آنچه در نگارش این هندبوک به دنبال آن بودیم، تنها ارائه‌ی مطالب تئوریک در خصوص سرویس ترانسفورماتور نبوده است. ما تلاش کرده‌ایم خوانندگان را با نحوه‌ی انجام عملیات سرویس و تست ترانسفورماتور به‌صورت عملی و نحوه‌ی تفسیر داده‌های گردآوری‌شده از انجام تست‌ها آشنا کنیم. شرکت ABB سه کتاب دیگر در خصوص ترانسفورماتور منتشر کرده است که به مسائل مربوط به این تجهیز پر اهمیت، بیشتر از کتاب حاضر، نگاهی تئوریک دارند:

۱) هندبوک ترانسفورماتور

۲) اتصال کوتاه در ترانسفورماتور

۳) آزمون‌های کارخانه‌ای ترانسفورماتورهای قدرت و راکتورهای سنت

ما اطمینان داریم مطالب مندرج در این کتاب، مرجع کامل و جامعی برای پاسخ به پرسش‌های خوانندگان، در خصوص بهره‌برداری از ترانسفورماتور خواهد بود. نکته‌ی آخر این که گرچه مطالب این هندبوک برای کلیه‌ی ترانسفورماتورهایی که براساس استانداردهای IEC و IEEE تولیدشده‌اند قابل اعمال است؛ در یک ترانسفورماتور مورد بهره‌برداری، دستورالعمل‌های سازنده‌ی همان ترانسفورماتور، بر این مطالب اولویت دارند.

# فصل اول

## ملاحظات طراحی

### ۱.۱. ساختمان

ترانسفورماتورهای قدرت در دونوع ساخته می‌شوند: هسته‌ای<sup>۱</sup> و زرهی<sup>۲</sup>. تفاوت‌های فیزیکی بین این دو، به آرایش مدار مغناطیسی و موقعیت، هم‌ترازی و نوع سیم‌پیچی‌های مورد استفاده مرتبط است. به‌طور کلی در طراحی نوع زرهی، مدار مغناطیسی بخش‌های عمده‌ی سیم‌پیچی‌ها را مانند زره در بر می‌گیرد. هسته‌ی ترانسفورماتورهای زرهی سه‌فاز، چهار یا هفت ساق دارد که این ساق‌ها معمولاً به‌صورت افقی قرار می‌گیرند. در طراحی‌های اخیر از ترانسفورماتورهای زرهی با هفت ساق به دلایلی چون وزن کمتر، تولید آسان‌تر و تلفات هسته‌ی پایین‌تر، بیشتر استفاده شده است. سیم‌پیچی‌های مورد استفاده در این نوع ترانسفورماتورها از نوع درهم<sup>۳</sup> است. یعنی سیم‌پیچی‌های فشارقوی و فشارضعیف به بخش‌هایی که در راستای محوری (افقی) در مجاورت یکدیگر هستند تقسیم شده است. هر بخش نیز متشکل از بوبین‌های پنکیکی<sup>۴</sup> مستطیل شکل است. در ترانسفورماتورهای هسته‌ای، مدار مغناطیسی شامل هسته‌ای است که از داخل سیم‌پیچی‌ها عبور می‌کند. ترانسفورماتورهای هسته‌ای سه‌فاز معمولاً سه ساق به‌صورت عمودی دارند. دو یوغ بالا و پایین که به‌صورت افقی قرار می‌گیرند برای شار اصلی مسیر برگشتی ایجاد می‌کنند. در صورتی که برای ارتفاع حمل ترانسفورماتور محدودیت وجود داشته باشد می‌توان از هسته‌هایی با پنج ساق استفاده کرد. این آرایش با فراهم کردن مسیری برای بازگشت شار موجب کاهش ارتفاع یوغ خواهد شد. همچنین در صورتی که لازم باشد امپدانس توالی صفر با امپدانس توالی مثبت برابر باشد باید از هسته با پنج ساق استفاده کرد. در ترانسفورماتورهای هسته‌ای تک‌فاز از هسته‌های با دو، سه یا چهار ساق استفاده می‌شود. معمولاً در آرایش نوع هسته‌ای از بوبین‌های مدور (لایه‌ای، هلیکال، دیسکی) که با یکدیگر و با ساق هسته هم‌مرکز هستند استفاده می‌شود. مزیت ترانسفورماتورهای قدرت زرهی یا هسته‌ای نسبت به یکدیگر تابعی از الزامات طراحی مانند توان نامی، کلاس ولتاژی، الزامات امپدانس و تلفات است.

### ۲.۱. ملاحظات مکانیکی

طراحی مکانیکی ترانسفورماتور شامل تحلیل و تعیین نیروهای مورد انتظار، آنالیز تنش‌های ساختاری سیستم عایقی و اجزاء نگهدارنده و انتخاب مناسب مواد است. ترانسفورماتور باید توانایی تحمل تنش‌های مکانیکی مرتبط با حوادث سیستم مانند اتصال کوتاه را داشته باشد. تنش‌های مکانیکی که در حین عملکرد عادی ترانسفورماتور به وجود می‌آیند کم است اما تنش‌های ناشی از اتصال کوتاه در شبکه ممکن است بسیار زیاد باشد. همچنین مقدار این تنش‌ها با بیشتر شدن توان و پیچیدگی ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. اغلب تنش‌های مکانیکی، بر روی سیستم عایقی، که متشکل از مواد سلولزی است وارد می‌شود. این مواد در مقابل خمش آسیب‌پذیر هستند. از این رو لازم است در ترانسفورماتور تحت پرس باشند. طراحی سیم‌پیچی باید به گونه‌ای باشد که مجموع نیروهای وارده بر آن به حداقل ممکن برسد.

### ۳.۱. ملاحظات حرارتی

حرارت یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر عمر ترانسفورماتور است. عمر عایق با افزایش دمای آن کاهش می‌یابد. ترانسفورماتور باید به گونه‌ای طراحی شود که در صورت بهره‌برداری در شرایط دمایی گارانتی شده و حتی افزایش از آن به میزان ذکر شده در استاندارد، عمر تجهیز کاهش نیابد. نقش روغن عایقی ترانسفورماتور خارج کردن حرارت از سیم‌پیچی‌ها و هسته‌ی مغناطیسی است. روغن برای ایفای وظیفه‌ی خنک‌کنندگی باید از داخل سیم‌پیچ و سیستم خنک‌کننده‌ی خارجی (مثل رادیاتور) عبور کند. گردش روغن به صورت ترموسیفون (طبیعی) زمانی اتفاق می‌افتد که وزن ستون روغن در سیستم خنک‌کننده بیشتر از وزن ستون روغن در هسته و بوبین باشد. همچنین مرکز خنک‌کنندگی باید بالاتر از مرکز تولید حرارت باشد. این فاصله تأثیری مستقیم بر اختلاف دمای بین روغن بالا و پایین دارد. هرچه فاصله‌ی بین مرکز سیستم خنک‌کنندگی و مرکز تولید حرارت بیشتر باشد، گردش روغن بیشتر بوده و اختلاف دمای بین روغن بالا و پایین کمتر است. استانداردها این آرایش خنک‌کنندگی را ONAN (گردش طبیعی روغن و هوا) نام‌گذاری کرده‌اند. این نوع خنک‌کنندگی را در گذشته OA می‌نامیدند.

با افزودن سیستم‌های خنک‌کنندگی اضافی مانند فن می‌توان ظرفیت نامی ترانسفورماتور را افزایش داد. فن‌ها گردش هوا روی سیستم خنک‌کنندگی خارجی را سرعت بخشیده بدون آنکه گردش روغن داخل ترانسفورماتور را تحت تاثیر قرار دهند. فن‌ها را می‌توان در یک یا دو مرحله وارد مدار کرد. اگر توان نامی ترانسفورماتور در شرایط ONAN را ۱۰۰ درصد فرض کنیم، با افزودن یک گروه فن می‌توان به ظرفیت ۱۳۳ درصد و با افزودن گروه دوم فن‌ها (که از لحاظ تعداد برابر با تعداد فن‌های گروه اول است)، می‌توان به ظرفیت ۱۶۷ درصد رسید. روشن شدن فن‌ها معمولاً توسط ترمومتر سیم‌پیچی صورت می‌گیرد. مطابق استاندارد، سیستم خنک‌کنندگی با فن همراه با گردش طبیعی روغن که در صنعت معمول است، مطابق استانداردها بدین گونه نام‌گذاری می‌شوند:

• خنک‌کنندگی ONAN/ONAF (گردش طبیعی روغن و هوا / گردش طبیعی روغن و گردش

اجباری هوا، ۱۰۰ درصد / ۱۳۳ درصد) نام‌گذاری قدیم به‌صورت OA/FA بوده است.

- خنک‌کنندگی ONAN/ONAF/ONAF (گردش طبیعی روغن و هوا / گردش طبیعی روغن و گردش اجباری هوا، ۱۰۰ درصد / ۱۳۳ درصد / ۱۶۷ درصد) نام‌گذاری قدیم به‌صورت OA/FA/FA بوده است.

در توان‌های بالاتر به‌منظور برآورده کردن الزامات مرتبط با جهش‌های حرارتی ممکن است نیاز به گردش اجباری روغن از طریق پمپ باشد. معمولاً با افزودن پمپ، اختلاف دمایی روغن بالا و پایین کمتر از ده درجه می‌شود. در سیستم خنک‌کننده با گردش اجباری روغن، معمولاً روغن به سمت سیم‌پیچ هدایت می‌شود که به آن گردش هدایت‌شده‌ی روغن می‌گویند. سیستم خنک‌کنندگی فن و پمپ مطابق استانداردها بدین شیوه نام‌گذاری می‌شوند:

- خنک‌کنندگی ONAN/ODAF (گردش طبیعی روغن و هوا / گردش هدایت‌شده‌ی روغن و گردش اجباری هوا، ۱۰۰ درصد / ۱۳۳ درصد) نام‌گذاری قدیم به‌صورت OA/FOA بوده است.
- خنک‌کنندگی ONAN/ODAF/ODAF (گردش طبیعی روغن و هوا / گردش هدایت‌شده‌ی روغن و گردش اجباری هوا، ۱۰۰ درصد / ۱۳۳ درصد / ۱۶۷ درصد) نام‌گذاری قدیم به‌صورت OA/FOA/FOA بوده است.

در بعضی موارد روش‌های خنک‌کنندگی با فن و پمپ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان نمونه استفاده از فن‌ها در مرحله‌ی اول و استفاده از پمپ‌ها در مرحله‌ی دوم خنک‌کنندگی. همچنین می‌توان ترانسفورماتور را تنها با یک ظرفیت نامی به‌گونه‌ای طراحی کرد که شامل پمپ‌های گردش روغن و مبدل حرارتی روغن/هوا یا آب باشد.

#### ۴.۱. ملاحظات عایقی

سیستم عایقی ترانسفورماتور باید به‌گونه‌ای طراحی شود که هم ولتاژهای اعمال شده در شرایط بهره‌برداری و هم اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، سوئیچینگ و اتصال کوتاه در سیستم را تحمل کند. به‌علاوه لازم است ترانسفورماتور به‌گونه‌ای تولید شود که ولتاژ کار کلیه‌ی اجزاء آن پایین‌تر از ولتاژ شروع کرونا باشند. ترانسفورماتور در ولتاژها و اضافه‌ولتاژهای با فرکانس پایین یک اندوکتانس ساده در نظر گرفته می‌شود. هرچند در ولتاژهای ضربه، ترکیبی پیچیده‌ای از سلف و خازن است. زمانی که اضافه ولتاژ وارد سیم‌پیچی ترانسفورماتور می‌شود، در ابتدا این ظرفیت خازنی سیم‌پیچ‌ها نسبت به هم و نسبت به زمین است که نحوه‌ی توزیع ولتاژ را تعیین می‌کند. توزیع ولتاژ نهایی با توجه به اندوکتانس سیم‌پیچی صورت می‌گیرد. در بسیاری از ترانسفورماتورها توزیع اولیه‌ی ولتاژ ضربه، ایده‌آل نیست؛ که نتیجه‌ی آن افزایش تنش در انتهای سیم‌پیچی خواهد بود. راهکارهای مختلفی برای غلبه بر این تنش‌های اضافی وجود دارد. روش معمول در سطوح ولتاژی پایین‌تر، طراحی سیستم عایقی با توجه به تنش‌های اضافه است. اما در سطوح ولتاژی بالاتر از آرایش‌های مختلف سیم‌پیچی، درهم کردن سیم و شیلدهای الکترواستاتیک برای کاهش تنش‌های ولتاژی به‌وجودآمده استفاده می‌شود.