ترانسفورماتورهای توزیع با تلفات کاهش یافته AB’

بهروز احمدزاده، گئورگ ب. قره‌پتیان، سعید احمدزاده

ترانسفورماتور توزیع زنگان، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده — در این مقاله با توجه به استانداردهای بین‌المللی و نیز دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های ترانسفورماتورهای روغنی توزیع 20 کیلوولت که برای کلیه شرکت‌های توزیع نیروی برق کشور لازم‌الاجراست، جهت مقایسه سه نمونه ترانسفورماتور 100 kVA با سطوح تلفات مختلف بررسی‌هایی انجام گرفته است. نمونه اول دارای مشخصات ترانسفورماتور طرح قدیمی (نرمال) شرکت ایران‌ترانسفو است که به وفور در شبکه‌های سراسر کشور موجود می‌باشد. نمونه دوم نیز توسط همین سازنده ولی با معیارهای تلفات AB’ طراحی و ساخته شده و در مورد نمونه سوم که توسط یک سازنده خارجی و با هسته آمورف تولید شده، معرفی مختصری از ساختمان اکتیوپارت (مجموعه هسته و سیم‌پیچ‌ها) انجام شده است. در نهایت با توجه به وزن مواد مصرفی اصلی شامل مس، هسته و روغن و قیمت روز آن‌ها، شاخصی از قیمت خرید ترانسفورماتورهای نمونه محاسبه شده و سپس با در نظر گرفتن قیمت تلفات بی‌باری و بارداری، معیاری از هزینه کل این سه نمونه تعیین شده که با مقایسه این ارقام ترانسفورماتور نمونه دوم نسبت به دو نمونه دیگر اقتصادی‌تر برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی — ترانسفورماتور توزیع – کاهش تلفات – AB’

1. مقدمه

بحث پیرامون کاهش تلفات ترانسفورماتورها در شبکه‌های توزیع سال‌هاست که جزو مباحث مطرح شده در شرکت‌های توزیع نیروی برق و کارخانجات سازنده و کنفرانس‌های علمی می‌باشد[1]. طرح این موضوع در سایر کشورها منجر به تدوین استانداردهایی مانند DIN 42500 [2] در کشور آلمان و یا HD 428.1 S1 [3] در اتحادیه اروپا گردیده و در همین رابطه دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های ترانسفورماتورهای روغنی توزیع 20 کیلوولت [4] نیز که ویرایش اول آن در سال 1390 توسط معاونت هماهنگی توزیع شرکت توانیر تدوین شده، به کلیه شرکت‌های توزیع نیروی برق کشور ابلاغ گردیده است. بر اساس سند فوق یکی از مشخصات اجباری ترانسفورماتورها، شاخص حداکثر سطح تلفات مجاز آن بوده که مقدار آن AB’ تعیین شده است. این بدین مفهوم است که برای هر ترانسفورماتور با توان مشخص، حداکثر مقدار تلفات بار (P_K) از گروه A و حداکثر مقدار تلفات بی‌باری (P_0) از گروه B’ (قید شده در جدول شماره 9 دستورالعمل فوق‌الذکر) تعیین می‌گردد.

در این مقاله نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی یک دستگاه ترانسفورماتور 100 KVA در سه طرح متفاوت ارائه شده است. لازم به ذکر است که تفاوت عمدهٔ بین این سه طرح از لحاظ مشخصات ترانسفورماتور مربوط به میزان تلفات بی‌باری و بارداری و از لحاظ مواد مصرفی در ترانسفورماتور مربوط به نوع ورق هسته می‌باشد.

2. مشخصات فنی ترانسفورماتورهای نمونه

اهم مشخصات ترانسفورماتورهای مورد بررسی در این مقاله عبارت است از:

توان نامی	100 kVA
ولتاژ نامی	20 / 0.4 KV
فرکانس نامی	50 Hz
امپدانس اتصال کوتاه	4 %
گروه برداری	Yzn 5
خنک‌کنندگی	ONAN
جهش حرارتی روغن / سیم‌پیچ	60 / 65 K
دمای مبنا (برای تست اتصال کوتاه)	75 °C
جنس هادی سیم‌پیچ‌ها	مسی

اما مهمترین تفاوت بین مشخصات فنی نمونه‌های انتخابی مربوط به مقادیر گارانتی شده تلفات ترانسفورماتورها می‌باشد.

ترانسفورماتور نمونه اول بر اساس طرح قدیمی (نرمال) ایران‌ترانسفو ساخته شده که پیرو ابلاغ دستورالعمل توانیر، تولید آن در این شرکت متوقف و با ترانسفورماتور نمونه دوم (AB') جایگزین شده است. تغییرات طراحی در این ترانسفورماتور نسبت به طرح قدیمی شامل تغییر جنس ورق هسته، کاهش چگالی شار ورق هسته و کاهش چگالی جریان سیم‌پیچ‌ها بوده که در نتیجه افزایش اندکی در ابعاد و اوزان ترانسفورماتور ایجاد گردید. از سوی دیگر، نمونه‌ای از ترانسفورماتورهای دارای هستهٔ آمورف[1] جهت آشنایی با تکنولوژی مواد و تولید آن از تولیدکننده خارجی تهیه شده که ضمن انجام مهندسی معکوس و پیاده‌سازی نقشه‌ها، خلاصه‌ای از اطلاعات کلی آن در مقایسه با دو نمونه قبلی در جدول (1) آورده شده است.

3. مقایسه اکتیوپارت‌های با هسته آمورف و هسته ورق سیلیکونی

استفاده از هسته آمورف در ترانسفورماتورهای توزیع، هم از لحاظ تامین مواد و هم از لحاظ امکانات تولید و تعمیرات با محدودیت‌هایی مواجه می‌باشد. لذا مطالب زیر صرفاً جهت آشنایی و مقایسه با اکتیوپارت متداول (تولید شده با هسته ورق سیلیکونی **CRGO**[2]) آورده شده‌اند. ورق آمورف به دلیل ضخامت بسیار کم (حدود $0.03\ ^{mm}$) امکان برش و چینش نداشته و تولیدکنندگان عموماً آن را به صورت کویل‌های برش خورده با مقطع مستطیلی و با پهنای مشخص و با ابعاد داده شده توسط طراح ترانسفورماتور تولید نموده و جهت مونتاژ اکتیوپارت به کارخانجات سازنده ترانسفورماتور ارسال می‌نمایند. در ترانسفورماتور نمونه که تصویر اکتیوپارت آن در شکل (1) نشان داده شده، هسته از نوع پنج ستونه متشکل از دو کویل بزرگ و دو کویل کوچک می‌باشد که پارامترهای ابعادی آن بر اساس شکل (2) در جدول (2) معرفی شده‌اند.

لازم به ذکر اینکه اختلاف پهنای نوار آمورف با پهنای هسته (D) برابر 4^{mm} بوده که ناشی از پوشش اپوکسی رزین در دو طرف (جهت استحکام کویل هسته) بوده و همچنین شعاع خمش (R) داخل پنجره هسته 6 ± 1.5^{mm} می‌باشد. از دیگر نکات قابل توجه این نوع هسته، پایین بودن چگالی شار نامی آن‌هاست که عموماً در محدوده 1.4 – 1.2 تسلا بوده و این موضوع منجر به افزایش وزن قابل توجه نسبت به هسته ساخته شده با ورق سیلیکونی می‌گردد. هرچند به دلیل پایین بودن تلفات ویژه بسیار پایین نسبت به ورق سیلیکونی که در منحنی شکل (3) نشان داده شده، در مجموع تلفات بی‌باری ترانسفورماتور کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد [5].

تفاوت قابل تامل دیگر در اکتیوپارت فوق نسبت به نمونه‌های اول و دوم، استفاده از سیم‌پیچ‌های با مقطع مستطیلی است. هرچند این امر باعث کاهش در ابعاد نهایی اکتیوپارت این ترانسفورماتور شده، لیکن در اکتیوپارت ترانسفورماتورهای با هسته سیلیکونی به دلیل امکان چیدن ورق‌های با عرض‌های متفاوت و ساخت هسته‌ای با مقطع دایره‌ای، از سیم‌پیچ‌های استوانه‌ای شکل استفاده می‌شود که قابلیت تحمل نیروهای اتصال کوتاه در آن‌ها بسیار بیشتر از ترانسفورماتورهای با هسته آمورف است،

[1] Amorphous Transformer

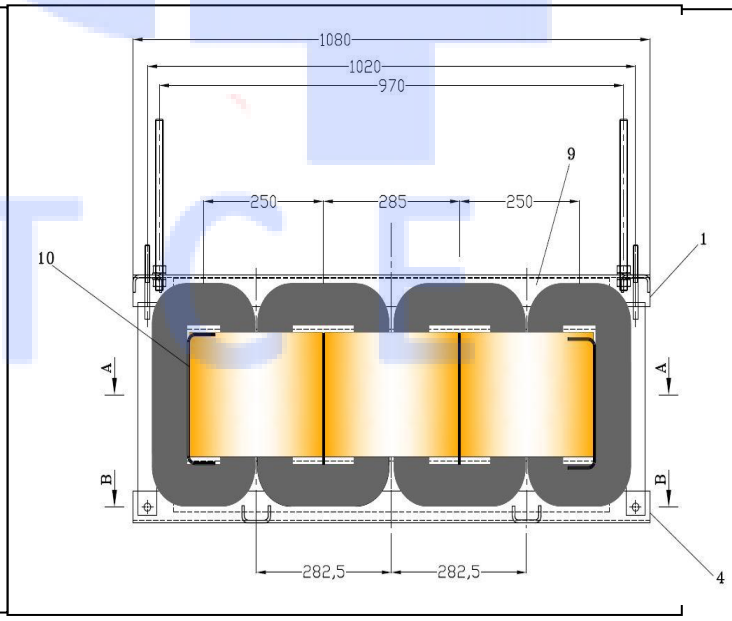
[2] Cold Rolled Grain Oriented

ضمن اینکه در صورت نیاز به تعمیرات و تعویض سیم‌پیچ‌ها، اجرای سیم-پیچی استوانه‌ای نسبت به سیم‌پیچی مقطع مستطیلی ساده‌تر و یکنواخت‌تر بوده و نیز امکان دمونتاژ اکتیوپارت و تعویض سیم‌پیچ ساده‌تر است.

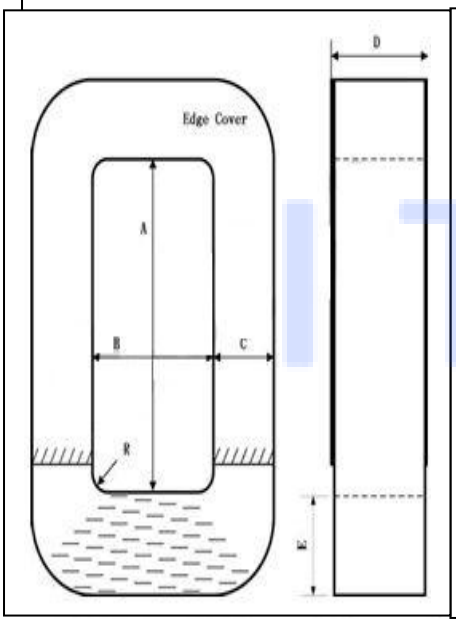
یادآوری این نکته نیز مفید است که در ویرایش اول دستورالعمل تعیین الزامات فنی ترانسفورماتورهای توزیع، این مشخصه (دایره‌ای و یا مستطیلی بودن مقطع سیم‌پیچ‌ها) جزو مشخصات مندرج در جدول (3) (مشخصات اجباری) و یا جدول (4) (مشخصات فنی پیشنهادی و امتیازدهی) آورده نشده که پیشنهاد می‌شود در ویرایش بعدی اصلاح گردد.

جدول 1: مقایسه مشخصات ترانسفورماتورهای نمونه

ترانسفورماتور / مشخصات فنی	نمونه اول (نرمال)	نمونه دوم ('AB)	نمونه سوم (آمورف)
تلفات P_o (W)	۳۴۰	۲۶۰	۸۰
تلفات P_K (W)	۲۱۵۰	۱۷۵۰	۱۷۵۰
طول کلی (mm)	۹۹۶	۱۰۱۲	۱۳۷۰
عرض کلی (mm)	۶۹۰	۶۹۰	۸۰۰
ارتفاع کلی (mm)	۱۴۰۰	۱۴۴۰	۱۱۸۰
وزن کلی (kg)	۵۹۰	۶۳۷	۹۸۰
حجم روغن (Lit)	۱۸۳	۲۰۳	۲۷۰
وزن روغن (kg)	۱۶۲	۱۸۰	۲۴۰
وزن مس (kg)	۷۸	۱۱۰	۴۰۰
وزن هسته (kg)	۱۷۱	۱۸۶	۴۴۰
نوع ورق هسته	M۵	HiB	۲۶۰۵ SA ۱



شکل 1: اکتیوپارت ترانسفورماتور با هسته آمورف



شکل 2: پارامترهای ابعادی کویل‌های هسته

جدول 2: ابعاد کویل‌های هسته آمورف

ابعاد / هسته آمورف	E	D	C	B	A
کویل هسته	Joint Built	پهنای هسته	Core Build	عرض پنجره	ارتفاع پنجره

4. مقایسه اقتصادی نمونه‌ها

ارزیابی هزینه‌ای ترانسفورماتورها بر اساس مجموع هزینه خرید به اضافه هزینه بهره‌برداری انجام می‌شود. با توجه به اینکه تامین‌کنندگان سه نمونه مورد بررسی در این مقاله شامل سازندگان داخلی و خارجی می‌شود، لذا جهت سهولت و امکان ارزیابی، هزینه خرید فقط شامل هزینه مواد مصرفی اصلی ترانسفورماتور (مس، هسته و روغن) فرض شده و همینطور هزینه بهره‌برداری فقط شامل هزینه تلفات بی‌باری و بارداری در نظر گرفته شده است و از لحاظ کردن هزینه‌هایی چون مواد عایق، آهن‌آلات، تجهیزات، دستمزد، سود، حمل و نقل، نصب، تعمیرات و غیره صرف نظر شده است.

4.1. محاسبه هزینه تلفات

برای محاسبهٔ هزینه تلفات بی‌باری و بارداری هم از روابط (1) و (2) استفاده شده است:

$$CPO = C1 + C2 * 8760 \qquad (1)$$

$$CPK = C1 + C2 * \sum_{i=1}^{m} (T_i * K_i^{\,2}) \qquad (2)$$

که در آن:

CPO: هزینه تلفات بی‌باری در سال به $[\$/kW/year]$

CPK: هزینه تلفات بارداری در سال به $[\$/kW/year]$

C1: هزینه دیماند به $[\$/kW/year]$

C2: هزینه انرژی مصرفی به [$/kWh]

لازم به ذکر است که در روابط فوق جهت سهولت فرض شده ترانسفورماتور در تمام طول سال برق‌دار بوده و بارگیری از آن به صورت پله‌ای با ضریب بار K_i، در مدت T_i انجام شده و m تعداد پله‌های بارگیری در طول سال می‌باشد.

همچنین با معلوم بودن نرخ سود **P** برحسب درصد در سال و دوره استهلاک **n** سال برای عمر ترانسفورماتور، می‌توان طبق روابط (3) و (4) ارزش حال (هنگام خرید) را برای هزینه تلفات برحسب (**$/kW**) محاسبه کرد:

$$BPO = CPO * {}^{100}/_{R} \qquad (3)$$

$$BPK = CPK * {}^{100}/_{R} \qquad (4)$$

که در آن:

$$R = P * \left(1 + {}^{P}/_{100}\right)^{{}^{n}/_{[(1+{}^{P}/_{100})^{n}-1]}} \qquad [\%/year]$$

به دلیل پیچیدگی دستیابی به داده‌های مورد نیاز در روابط فوق، مقادیر نهایی زیر را (استخراج شده از اسناد یکی از مناقصه‌های انجام شده) در نظر می‌گیریم :

BPO = 3000 $/kW

BPK = 1000 $/kW

4.2. هزینه کل نمونه‌ها

بر اساس مطالب فوق، ارزش حال هزینه کل هریک از ترانسفورماتورهای مذکور طبق رابطه (5) به دست می‌آید:

TOC = A + BPO * PO + BPK * PK [$] [5]

که در آن **A** قیمت خرید (هزینه مواد مصرفی اصلی شامل مس، هسته و روغن) می‌باشد. در این تحقیق هزینهٔ مواد مذکور طبق جدول (3) در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از داده‌های جداول (1) و (3) و نیز ارزش حال هزینه واحد تلفات (BPO و BPK) می‌توان هزینه کل را برای هر نمونه ترانسفورماتور محاسبه نمود.

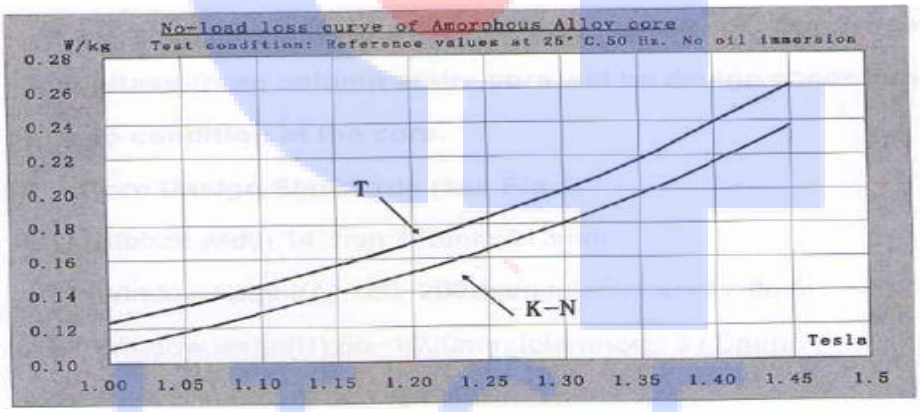
جدول 3: قیمت مواد مصرفی اصلی ترانسفورماتور

مواد مصرفی	مس	هسته			روغن
		ورق سیلیکونی M۵	ورق سیلیکونی HiB	آمورف	
قیمت $/kg	۷	۲.۴	۲.۷	۵	۱.۴

جدول 4: اجزای هزینه ترانسفورماتورهای نمونه

ترانسفورماتور / اجزا هزینه ($)	نمونه اول (نرمال)	نمونه دوم (AB')	نمونه سوم (آمورف)
قیمت مواد اصلی (A)	۱۱۸۳	۱۵۲۴	۵۳۳۶
تلفات بی باری Bpo ⋄ Po	۱۰۲۰	۷۸۰	۲۴۰
تلفات بارداری BPk ⋄ Pk	۲۱۵۰	۱۷۵۰	۱۷۵۰
جمع TOC	۴۳۵۳	۴۰۵۴	۷۳۲۶

شکل 3: منحنی تلفات بی‌باری هسته آمورف



5. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که از نتایج فوق برمی‌آید، از بین سه نمونه انتخابی در این مقاله، نمونه دوم (AB') اقتصادی‌ترین طرح می‌باشد، ضمن اینکه ترانسفورماتور نمونه سوم که دارای هسته آمورف است، نیازمند خرید خارجی می‌باشد. در ادامه این تحقیق می‌توان برای ترکیب‌های دیگر جدول تلفات (جدول (9) دستورالعمل توانیر) مانند AC' و یا CC' ، طراحی ترانسفورماتور را انجام و اوزان مواد مصرفی اصلی آن را استخراج و مقایسه اقتصادی کامل‌تری انجام داد.

مراجع

[۱] انتخاب حدود بهینه تلفات ترانسفورماتورهای توزیع در کشور با در نظر گرفتن مسایل فنی و اقتصادی، بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق- تهران (PSC ۲۰)، ۱۳۸۴.

[2] DIN 42500(1984), Drehstrom, Verteilungstransformatoren der Öffentlichen Energieversorgung 50 Hz, 50 bis 2500 kVA, $U_m \leq 24$ kV.

[3] CENELEC HD 428.1 (1992), Oil immersed Transformers, Standardization of LL and NLL.

[۴] دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های ترانسفورماتورهای روغنی توزیع ۲۰ کیلوولت، توانیر، معاونت هماهنگی توزیع، ۱۳۹۰.

[5] Beijing ZJLG amorphous technology Co., LTD, AT & M Material Core Catalogue.