

تخمین طول عمر ترانسفورماتورهای توزیع در حضور بارهای هارمونیک: مطالعه موردی ترانسفورماتورهای توزیع شهرستان ایلام

رحمت اعظمی، امین مرادخانی، محمدحسن پرهیزگاری و داریوش باقری

ترانسفورماتورهایی که هزینه اولیه و بهره‌برداری و تلفات کمتری داشته باشند از لحاظ اقتصادی بسیار حایز اهمیت است.

هارمونیک‌ها که در آغاز سده ۱۸ میلادی به وسیله فوریه شناسایی گردیدند، مضارب صحیحی از فرکانس پایه که برای برخی از کشورها ۵۰ و برای برخی ۶۰ هرتز می‌باشد، هستند و عمدتاً به خاطر بارهایی با مشخصات غیر خطی اتفاق می‌افتند که موجب وارد شدن اغتشاش به جریان و ولتاژ سیستم می‌گردد [۲].

هنگامی که استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت در اواخر دهه ۱۹۷۰ رایج شد، توجه بسیاری از مهندسين شرکت‌های برق به توانایی پذیرش اعوجاج هارمونیک توسط سیستم‌های قدرت جلب گردید. پیش‌بینی‌های مایوس‌کننده‌ای از سرنوشت سیستم‌های قدرت در صورت استفاده از این تجهیزات توسط مهندسين برق انجام گرفت. در حالی که بعضی از این نگرانی‌ها احتمالاً بیش از حد قلمداد گردیدند، ولی بررسی مفهوم کیفیت برق مدیون پیگیری این افراد در مورد این مسئله می‌باشد. بروز هارمونیک‌ها در سیستم‌های برق اولین پیامد عناصر غیر خطی در شبکه است. به خاطر گسترش فزاینده استفاده از عناصر غیر خطی در سیستم‌های قدرت مانند راه‌اندازها، مبدل‌های الکترونیک قدرت و درایورهای تنظیم سرعت، مقدار هارمونیک شکل موج جریان و ولتاژ به طور چشم‌گیری افزایش یافته است. با روشن شدن اهمیت موضوع، شرکت‌های برق باید تمهیداتی را برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی تجهیزات اعم از خانگی مانند کنتورها و صنعتی مانند ترانسفورماتورهای توزیع ببیند [۳].

ترانسفورماتورهای توزیع نیز همانند سایر تجهیزات موجود در سیستم‌های قدرت برای کار در فرکانس ۵۰ هرتز طراحی و ساخته شده‌اند. با اعمال بارهای خطی و متعادل فاقد هارمونیک و البته در حد بار نامی، می‌توان عملکرد مناسب ترانسفورماتورهای توزیع را انتظار داشت. در این شرایط همچنین می‌توان طول عمری تقریباً برابر با ۳۰ سال را برای ترانسفورماتورهای توزیع در نظر گرفت. ولی به طور قطع می‌توان گفت که هیچ کدام از ترانسفورماتورهای توزیع بارهایی با شرایط متعادل و فاقد هارمونیک را تجربه نمی‌کنند. به عبارت دیگر همان طور که قبلاً نیز بیان شد، بارهای موجود در شبکه توزیع به سمت غیر خطی شدن پیش می‌روند. به گونه‌ای که طبق پیش‌بینی‌های انجام‌شده در چند سال آینده کلیه بارهای قرارگرفته بر روی ترانسفورماتورهای توزیع از نوع غیر خطی خواهند بود لذا نمی‌توان انتظار عملکردی را که ترانس برای آن طراحی شده است داشته باشیم [۴].

معمولاً در سیستم، مجموع اغتشاشات هارمونیک ولتاژ از ۵٪ کمتر و اندازه مؤلفه‌های هارمونیک آن در مقایسه با مؤلفه اصلی خیلی ناچیز می‌باشد و به ندرت از ۲ الی ۳٪ تجاوز می‌کند. بنابراین تأثیر هارمونیک ولتاژ بر تلفات بی‌باری و بارداری ناچیز است و از آن صرف نظر می‌شود [۵]. همچنین تأثیر هارمونیک جریان بر تلفات بی‌باری نیز به علت وابستگی آن به ولتاژ و مستقل بودن این تلفات از جریان، زیاد قابل توجه

چکیده: ترانسفورماتورهای یکی از اجزای اصلی سیستم‌های توزیع می‌باشند که خرابی آنها خسارت‌های جبران‌ناپذیری را برای سیستم‌های قدرت و شرکت‌های توزیع در بر خواهد داشت. علت اکثر این خرابی‌ها افزایش تلفات ترانسفورماتورها در اثر افزایش هارمونیک‌ها به خصوص هارمونیک‌های جریان می‌باشد. این تلفات باعث افزایش دمای نقاط مختلف ترانسفورماتور گردیده و موجب کاهش عمر ترانسفورماتورهای توزیع و در نتیجه آسیب‌دیدن شبکه‌های توزیع می‌گردد. به همین منظور در این مقاله ضمن ارائه روابط حاکم بر تلفات ترانسفورماتورهای توزیع در حضور بارهای هارمونیک و با توجه به داده‌های موجود برای سه ترانسفورماتور توزیع نمونه شهرستان ایلام، ارزیابی فنی و عملی حضور بارهای هارمونیک انجام و تأثیر آنها بر روی تلفات ترانسفورماتورهای تحت بررسی ارائه گردیده است. بررسی‌های انجام‌شده در حضور این بارهای هارمونیک، کاهش طول عمر مفید برخی ترانسفورماتورها را از ۳۰ به ۱۷ سال نشان می‌دهد.

کلیدواژه: ترانسفورماتورهای توزیع، هارمونیک‌های جریان، تلفات بارداری، نقطه داغ، طول عمر.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای یکی از اساسی‌ترین اجزای انتقال انرژی الکتریکی می‌باشند. می‌توان گفت تمامی انرژی تولیدی در نیروگاه‌ها با عبور از ۵ تا ۶ ترانسفورماتور در سطوح ولتاژ مختلف به مصرف‌کننده نهایی می‌رسد. ترانسفورماتورهای توزیع به عنوان بخشی از سیستم توزیع توان الکتریکی برای تحویل توان الکتریکی استفاده می‌گردند. انرژی الکتریکی تولیدشده توسط نیروگاه‌ها از طریق سیستم‌های انتقال و توزیع به مصرف‌کننده تحویل داده می‌شود. با استناد به مطالعات انجام‌شده در زمینه تلفات سیستم‌های قدرت، تنها ۹۳٪ از توان تولیدی توسط نیروگاه‌ها از طریق سیستم‌های توزیع به مصرف‌کننده منتقل می‌شود [۱]. ۷٪ این توان تولیدی در سیستم‌های قدرت شامل انتقال و توزیع تلف خواهد شد که از این تلفات ۴۰٪ آن در سیستم‌های توزیع و ۶۰٪ باقیمانده در سیستم‌های انتقال تلف می‌گردد. از این میزان تلفات صورت‌گرفته در سیستم‌های توزیع، ۶۰٪ آن مربوط به ترانسفورماتورهای توزیع و مابقی آن مربوط به سایر بخش‌های سیستم توزیع است و از این رو استفاده از

این مقاله در تاریخ ۲۱ مهر ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۳۰ تیر ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

رحمت اعظمی (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، (email: r.aazami@ilam.ac.ir).

امین مرادخانی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، (email: a.moradkhani@ilam.ac.ir).

محمدحسن پرهیزگاری، شرکت توزیع نیروی برق استان ایلام، ایلام، ایران، (email: mohamad_5773@yahoo.com).

داریوش باقری، امور انتقال استان ایلام، شرکت برق منطقه‌ای غرب، کرمانشاه، ایران، (email: d.bagheri@gmail.com).

روی ترانسفورماتورهای توزیع بیان گردیده است. مرجع [۱] با توجه به این می‌باشد، نه تنها به این دلیل که این تلفات متناسب با مجذور جریان بار هستند بلکه چون جریان‌های هارمونیک زیادی در شبکه‌های توزیع وجود دارند. اگر مقدار مؤثر جریان به سبب مؤلفه‌های هارمونیک زیاد شود تلفات اهمی نیز به سبب متناسب بودن با مجذور جریان زیاد می‌شوند. علاوه بر این تحت بارهای هارمونیک تلفات سرگردان نیز افزایش می‌یابند چرا که آنها نیز به مقدار جریان بار بستگی دارند که این خود باعث کاهش بازده ترانسفورماتورهای توزیع و در نتیجه شبکه توزیع می‌گردد. ازدیاد بیش از حد این هارمونیک‌ها موجب پیری زودرس برای ترانسفورماتور نیز می‌گردد. به طور کلی از جمله اثراتی که وجود بارهای غیر خطی مصرف‌کنندگان و در نتیجه محتوای هارمونیک ولتاژ و جریان آنها بر روی ترانسفورماتورهای توزیع دارد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۶]:

- افزایش دمای سیم‌پیچ‌ها، عایق و روغن ترانسفورماتور و امکان رسیدن به سطوح غیر قابل قبول و غیر قابل تحمل.
- افزایش چگالی شار ناشی و در نتیجه افزایش جریان‌های گردابی در بخش‌های مرتبط با این شار و در نتیجه افزایش بیشتر دما و تلفات.
- افزایش بیش از حد مجاز رطوبت و گازهای موجود در عایق و روغن ترانسفورماتور به دلیل افزایش دما.
- افزایش تنش‌های اعمالی روی بوشینگ‌ها، تپ چنجرها، اتصالات انتهایی کابل‌ها و ... و امکان تجاوز از حدود طراحی شده برای عملکرد عادی ترانسفورماتور.

از طرفی سایر مراجع مانند [۷] بحث کیفیت توان و استفاده از ادوات FACTS برای استفاده در سیستم‌های توزیع را به منظور کاهش محتوای هارمونیک ولتاژ و جریان سیستم‌های قدرت مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مراجع ضمن معرفی ادواتی مانند SVC و همچنین STATCOM، با تزریق توان راکتیو مورد نیاز بارها، سعی بر جبران عدم تقارن و غیر خطی نمودن بارها و در نتیجه بهبود شرایط هارمونیک شده است. با این وجود در این مراجع بحثی در مورد ارزیابی اقتصادی این روش‌ها نشده است. سایر مراجع نیز ضمن معرفی انواع تلفات در ترانسفورماتورها، تأثیر بارهای غیر خطی بر روی این تلفات را بررسی نموده و به معرفی راهکارهای مختلف جهت بهبود وضعیت فیزیکی هسته ترانسفورماتور برای کاهش تلفات بسنده نموده‌اند. هرچند این روش‌ها به دلیل مشکلات طراحی چندان به پیاده‌سازی عملی نزدیک نیستند.

۲- تلفات ترانسفورماتورها

سازندگان ترانسفورماتور معمولاً می‌کوشند ترانسفورماتورها را به گونه‌ای طراحی کنند که حداقل تلفات آنها در ولتاژ نامی، فرکانس نامی و جریان سینوسی رخ دهد. اما با افزایش تعداد بارهای غیر خطی در سال‌های اخیر، جریان بار دیگر سینوسی نیست. تلفات ترانسفورماتور به دو دسته اصلی تلفات بی‌بار و بار تقسیم می‌شود [۴] و [۶]

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (۱)$$

که P_{NL} تلفات بی‌بار، P_{LL} تلفات بار و P_T تلفات کل است. تلفات بی‌باری یا تلفات هسته ناشی از تغییر زمانی شار الکترومغناطیسی عبوری از هسته می‌باشد به گونه‌ای که فرکانس این تغییرات میزان این تلفات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجا که ترانسفورماتورهای توزیع همیشه در حال کارند، با در نظر گرفتن تعداد این نوع از ترانسفورماتورها در شبکه، میزان تلفات بی‌باری بالا اما ثابت است. این نوع از تلفات ناشی از پدیده هیستریزس و جریان‌های گردابی در هسته و متناسب با فرکانس و حداکثر چگالی شار هسته و جدای از جریان‌های بار است [۴]. آزمایش‌های فراوان نشان داده‌اند که افزایش دمای هسته، پارامتری محدودکننده در تعیین جریان مجاز ترانسفورماتورها در جریان‌های غیر سینوسی نیست. به علاوه با در نظر گرفتن این که مقدار مؤلفه هارمونیک ولتاژ کمتر از ۵٪ است، خطای نادیده گرفتن مؤلفه هارمونیک ولتاژ قابل چشم‌پوشی است. از این رو استانداردهای IEEE C57.110 افزایش تلفات هسته ناشی از بارهای غیر خطی را مورد توجه قرار نداده و این تلفات را در جریان‌های غیر سینوسی ثابت فرض نموده‌اند.

تلفات بارداری شامل تلفات جریان مستقیم (بدون تأثیر فرکانس در محاسبه مقاومت) یا اهمی، تلفات گردابی در سیم‌پیچ‌ها و تلفات پراکنده دیگر است و می‌توان آن را از آزمایش اتصال کوتاه به دست آورد [۵]

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (۲)$$

با توجه به آنچه گفته شد، میزان توان تلف شده در ترانسفورماتورهای توزیع نقش زیادی در کل تلفات سیستم قدرت دارد. لذا بررسی هر چه بیشتر نحوه عملکرد این ترانسفورماتورها، شناسایی عوامل اصلی این تلفات و پیشگیری وقوع این تلفات می‌تواند نقش بسزایی در افزایش بازده هم در ترانسفورماتورهای توزیع و هم در کل سیستم‌های قدرت داشته باشد.

از طرفی بر اساس استانداردهای موجود برای عملکرد مناسب ترانسفورماتورهای به کار رفته در شبکه قدرت، جریان‌های جاری شده در شبکه نباید ضریب هارمونیک بیشتر از ۵٪ را داشته باشند. اگرچه در عمل بارهای غیر خطی مصرف‌کنندگان بدون توجه به محتوای هارمونیک جریان این بارها و همچنین اثر این جریان‌ها بر روی تجهیزات، به شبکه قدرت متصل می‌گردند. همچنین با توجه به آنچه در مورد اثرات محتوای هارمونیک ولتاژ و جریان ناشی از غیر خطی بودن بارها بر روی عملکرد ترانسفورماتورهای توزیع بیان شد، می‌توان فهمید که وجود بارهای غیر خطی تلفات سیستم را افزایش و در نتیجه بازده سیستم و همچنین طول عمر ترانسفورماتورها را کاهش می‌دهد. لذا با بررسی اقتصادی اثرات محتوای هارمونیک ناشی از بارهای غیر خطی بر روی ترانسفورماتورهای توزیع و تلفات ناشی از آن بر روی کل سیستم و مقایسه اقتصادی با روش‌های پیشنهاد شده جهت کاهش این تلفات مانند روش جایگزینی ترانسفورماتورهای فرسوده و حساس به بارهای غیر خطی با ترانسفورماتورهای جدید غیر حساس به بارهای غیر خطی [۱] و همچنین استفاده از ادوات FACTS جهت بهبود کیفیت توان [۷] تا [۱۱] می‌توان گامی مفید جهت افزایش بازده و کاهش هزینه که دغدغه اصلی شرکت‌های برق می‌باشد برداشت.

تا به امروز مطالعات زیادی در زمینه اثر هارمونیک‌های ناشی از بارهای غیر خطی بر روی ترانسفورماتورهای توزیع انجام شده است. در [۴] به طور کلی به بررسی ماهیت هارمونیک‌های موجود در سیستم قدرت پرداخته شده است. در [۱] تا [۶] اثرات این هارمونیک‌ها به طور ویژه بر

$$R_{AC}^{hf} = 0.0129 \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^{0.8} \quad (9)$$

در فرکانس‌های بین ۴۲۰-۱۲۰۰ هرتز نیز این مقاومت توسط (۱۰) محاسبه خواهد شد

$$R_{AC}^{hf} = 0.33358 \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^{-1.87} \quad (10)$$

در نتیجه، این تلفات متناسب با مجذور جریان بار و فرکانس با توان ۰٫۸ است

$$P_{OSL} \propto I^2 \propto f^{0.8} \quad (11)$$

معادله زیر را نیز می‌توان برای محاسبه تلفات پراکنده دیگر به کار برد

$$P_{OSL} = P_{TSL} - P_{EC} \quad (12)$$

۳- ارزیابی اثر هارمونیک‌ها بر تلفات و تخمین طول عمر ترانسفورماتور

ولتاژ هارمونیک نقش مهمی در عملکرد ترانسفورماتور بازی می‌کند و می‌توان آن را با توصیف مقاومت هسته بررسی کرد. فرکانس‌های بزرگ موجود در ولتاژ ترمینال موجب کوچک‌تر شدن مقاومت هسته می‌شود. بنابراین جریان بیشتری از طریق مقاومت هسته جاری شده که منجر به تلفات بیشتر خواهد شد به طوری که اگر سیستم خنک‌کننده در ترانس وجود نداشته باشد، دمای هسته افزایش می‌یابد. بر اساس قانون فاراده، ولتاژ ترمینال مقدار شار ترانسفورماتور را تعیین می‌کند

$$v(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (13)$$

تبدیل این معادله به حوزه فرکانس، رابطه بین هارمونیک‌های ولتاژ و مؤلفه‌های شار را نشان می‌دهد

$$V_h = Nj(h\omega) \cdot \phi_h \quad (14)$$

این رابطه نشان می‌دهد که اندازه شار با هارمونیک ولتاژ نسبت مستقیم و با مرتبه هارمونیک نسبت معکوس دارد. اما معمولاً در شبکه اغتشاشات هارمونیک ولتاژ زیر ۵٪ و اندازه مؤلفه‌های هارمونیک در مقایسه با مؤلفه اصلی خیلی ناچیز است و به ندرت از ۲٪ تا ۳٪ تجاوز می‌کند که اندازه‌گیری‌های [۳] این امر را تأیید می‌نماید. با این حال اگر محتوای هارمونیک ولتاژ قابل چشم‌پوشی نباشد، تلفات در ولتاژهای هارمونیک را می‌توان بر اساس استاندارد ANSI-C.۲۷-۱۹۲۰ و با استفاده از (۱۵) محاسبه نمود

$$P = P_M [P_h + P_{ec} \left(\frac{V_{hrms}}{V_{rms}}\right)^2] \quad (15)$$

که در آن V_{rms} و V_{hrms} مقادیر مؤثر ولتاژهای هارمونیک و سینوسی، P_M و P تلفات بی‌باری در ولتاژهای هارمونیک و سینوسی و P_h و P_{ec} تلفات جریان گردابی و هیستریزس هستند [۴].

اگر مقدار مؤثر جریان بار در اثر مؤلفه‌های هارمونیک افزایش یابد آن گاه این تلفات به اندازه مجذور مؤثر جریان بار افزایش خواهد یافت [۴]. تلفات اهمی سیم‌پیچ‌ها در شرایط هارمونیک توسط (۱۶) نشان داده می‌شود

$$P_{dc} = R_{dc} \times I^2 = R_{dc} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h,max}^2 \quad (16)$$

که P_{DC} تلفات ناشی از مقاومت سیم‌پیچ‌ها، P_{EC} تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها و P_{OSL} تلفات پراکنده دیگر در اجزای ساختاری ترانسفورماتور نظیر مخزن و بست‌ها می‌باشد. مجموع P_{OSL} و P_{EC} تلفات پراکنده کل نامیده می‌شود. مطابق (۳) می‌توان مقدار آن را از روی تفاضل تلفات بار و تلفات اهمی محاسبه نمود

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{OSL} = P_{LL} - P_{DC} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که هنوز روند عملی یا تجربی برای جداکردن تلفات گردابی سیم‌پیچ‌ها و تلفات پراکنده دیگر وجود ندارد. تلفات اهمی را نیز می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت جریان مستقیم سیم‌پیچ و جریان بار با استفاده از (۴) محاسبه کرد

$$P_{DC} = R_{dc} \times I^2 = R_{dc} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h,max}^2 \quad (4)$$

تلفات جریان گردابی در سیم‌پیچ‌ها ناشی از شار الکترومغناطیسی متغیر با زمان است که سیم‌پیچ‌ها را قطع می‌کند. به طور کلی جریان گردابی تحت تأثیر دو مؤلفه به نام اثر پوستی و اثر مجاورت قرار می‌گیرد. در ترانسفورماتورها، سیم‌پیچ‌های داخلی مجاور هسته نسبت به سیم‌پیچ‌های خارجی تلفات جریان گردابی بیشتری دارند. دلیل آن شار الکترومغناطیسی شدید نزدیک هسته است که این سیم‌پیچ‌ها را می‌پوشاند. همچنین بیشترین مقدار تلفات در آخرین لایه سیم‌ها در سیم‌پیچ است که ناشی از چگالی زیاد شار در این ناحیه می‌باشد [۲]

$$P_{EC} = \frac{\pi \tau^2 \mu^2}{3\rho} f^2 \times H^2 \propto f^2 \times I^2 \quad (5)$$

که در آن τ پهنای سیم عمود بر خط میدان، μ نفوذپذیری مغناطیسی، ρ مقاومت ویژه هادی، f فرکانس و H میدان مغناطیسی متناسب با جریان می‌باشد. با توجه به ثابت بودن مقادیر τ ، μ و ρ و متناسب بودن میدان مغناطیسی با جریان الکتریکی داریم

$$P_{EC} \propto f^2 \times I^2 \quad (6)$$

معادله زیر را می‌توان برای محاسبه تلفات جریان گردابی نیز به کار برد

$$P_{EC} = P_{LL-R} - [R_{1-1-R} I_{1-R}^2 + R_{1-2-R} I_{2-R}^2] \quad (7)$$

مطابق استانداردهای IEEE C57.110، میزان تلفات جریان گردابی نامی سیم‌پیچ‌ها حدود ۳۳٪ از کل تلفات پراکنده دیگر می‌باشد

$$P_{EC-R} = 0.33 P_{TSL} \quad (8)$$

هر هادی فلزی که با شار الکترومغناطیسی پیوند برقرار نماید ولتاژی در آن القا می‌شود و جریان گردابی را به وجود می‌آورد. این جریان گردابی تلفاتی را ایجاد نموده و موجب افزایش دما می‌گردد. تلفات گردابی به غیر از تلفات در سیم‌پیچ‌ها را تلفات پراکنده دیگر گویند. تلفات پراکنده دیگر (P_{OSL}) در هسته و در دیگر بخش‌های فلزی ترانسفورماتور با مجذور جریان بار متناسب است اما مانند تلفات جریان گردابی با مجذور فرکانس متناسب نمی‌باشد. البته این تلفات تابع بسیاری از فاکتورها شامل حجم فیزیکی هسته و سیم‌پیچ، کلاس ولتاژ ترانسفورماتور، موارد مورد استفاده در ساخت تانک و ... می‌باشد. آزمایشات زیادی به منظور تعیین میزان تغییرات تلفات پراکنده دیگر با فرکانس انجام شده است. با در نظر گرفتن نتایج ارائه‌شده در [۵]، مقاومت تلفات پراکنده دیگر در فرکانس‌های کم (۳۶۰-۰) هرتز به صورت (۹) بیان می‌شود

علاوه بر مقدار تلفات، بیشینه جریان مجاز برای تعیین ظرفیت ترانسفورماتور الزامی است. بیشینه جریان مجاز برای ترانسفورماتورها از (۲۳) محاسبه می‌شود

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + [F_{HL} \times P_{ec-R}(pu)] + [F_{HL-STR} P_{OSL-R}]}} \quad (24)$$

که در آن داریم

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\max} I_h(pu)} \quad (25)$$

از (۲۴) می‌توان جریان مجاز و کاهش ظرفیت ترانسفورماتور را تحت بارهای هارمونیک محاسبه کرد.

طول عمر ترانسفورماتور به عمر عایق آن بستگی دارد و عمر عایق‌بندی آن به اثرات و عوامل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی وابسته است. البته تأثیرات حرارتی از اهمیت بیشتری برخوردارند به طوری که حدود ۵۰٪ کاهش عمر مفید ترانسفورماتور به دلیل تنش‌های حرارتی ناشی از وجود جریان بار غیر خطی است. تلفات بیشتر منجر به تولید حرارت بیشتر در ترانسفورماتور و افزایش دمای آن خواهد شد که این امر، کاهش عمر عایق را به دنبال خواهد داشت. بنابراین مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده در میزان کاهش عمر مفید ترانسفورماتور دمای نقطه داغ آن است که بر اساس دمای روغن، دمای سیم‌پیچ‌ها و محیط از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]

$$\theta_H = \theta_A + \theta_{TO} + \theta_g \quad (26)$$

که در آن θ_{TO} افزایش دمای روغن، θ_g افزایش دمای نقطه داغ هادی سیم‌پیچ‌ها، θ_A دمای هوا و θ_H دمای نقطه داغ ترانسفورماتور می‌باشد. مقادیر θ_{TO} و θ_g در محیط هارمونیک به صورت زیر به دست می‌آیند

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-rated} \times \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-rated} + P_{NL}} \right)^{\gamma_A} \quad (27)$$

$$\theta_g = \theta_{g-rated} \times \left(\frac{P_{LL}}{P_{LL-rated}} \right)^{\gamma_A} \quad (28)$$

که در آن $\theta_{TO-rated}$ و $\theta_{g-rated}$ مقادیر دمای روغن و دمای نقطه داغ سیم‌پیچ‌ها در شرایط نامی (بدون هارمونیک) می‌باشند که در جداول مربوط به مشخصات ترانسفورماتورها آمده‌اند. همچنین در این روابط P_{LL} تلفات بارداری در محیط هارمونیک، $P_{LL-rated}$ و P_{NL} تلفات بارداری نامی و تلفات بی‌باری نامی (بدون هارمونیک) می‌باشند. با به دست آمدن دمای نقطه داغ ترانسفورماتور بر حسب دامنه جریان بار و محتوای هارمونیک آن می‌توان ضریب پیری ترانسفورماتور را که نشان‌دهنده میزان کاهش عمر ترانسفورماتور است با استفاده از (۲۹) به دست آورد

$$FAA = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}\right) \quad (29)$$

برای میزان عمر ترانسفورماتور تحت شرایط هارمونیک نیز داریم

$$Life(pu) = 9.8 \times 10^{-18} \times e^{\frac{15000}{\theta_H + 273}} \quad (30)$$

طول عمر واقعی ترانسفورماتور نیز از ضرب مقدار طول عمر بر حسب پیری در طول عمر نامی عایقی ترانسفورماتور به دست می‌آید یعنی

$$Real\ Life = Life(pu) \times Nominal\ Insulation\ Life(year) \quad (31)$$

تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها متناسب با مجذور جریان و مجذور فرکانس هارمونیک در شرایط هارمونیک است. توسط (۱۷) این تلفات محاسبه می‌شود [۵] و [۶]

$$P_{EC} = P_{EC-R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^{\gamma} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^{\gamma} \quad (17)$$

که در آن P_{EC-R} تلفات جریان گردابی نامی سیم‌پیچ‌ها، I_h جریان مربوط به هارمونیک h ام، I_R جریان بار نامی و h مرتبه هارمونیک است. همچنین ضریب تلفات هارمونیک برای اتلاف جریان گردابی سیم‌پیچ را می‌توان مطابق [۵] و [۸] و به صورت (۱۸) تعریف نمود

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=\max} h^{\gamma} I_h^{\gamma}}{\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^{\gamma}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=\max} h^{\gamma} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^{\gamma}}{\sum_{h=1}^{h=\max} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^{\gamma}} \quad (18)$$

فرض می‌شود که تلفات پراکنده دیگر با مجذور مقدار مؤثر جریان و فرکانس هارمونیک با توان ۰٫۸ تغییر می‌کند، در این صورت

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^{\gamma_A} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^{\gamma} \quad (19)$$

ضریب تلفات هارمونیک برای تلفات پراکنده دیگر، مشابه جریان‌های گردابی سیم‌پیچ‌ها [۶] بیان می‌شود

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=\max} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^{\gamma} h^{\gamma_A}}{\sum_{h=1}^{h=\max} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^{\gamma}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=\max} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^{\gamma} h^{\gamma_A}}{\sum_{h=1}^{h=\max} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^{\gamma}} \quad (20)$$

بنابراین در جریان‌های غیر سینوسی صرفاً باید تلفات پراکنده دیگر نامی را در ضریب تلفات هارمونیک (F_{HL-STR}) ضرب نمود.

حال که تأثیر هارمونیک بر تک‌تک تلفات بارداری بررسی شد می‌توان رابطه کلی برای محاسبه تلفات زمانی که ترانسفورماتور بار هارمونیک را تغذیه می‌کند ارائه کرد. تلفات بارداری در حالت بار خطی و در شرایط نامی برابر است با

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (21)$$

که P_{LL-R} تلفات بار نامی ترانسفورماتور، P_{EC-R} تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها تحت شرایط نامی، P_{OSL-R} تلفات پراکنده دیگر در شرایط نامی و عدد ۱ نیز تلفات اهمی می‌باشند. مقدار پایه برای پیریونیت نمودن رابطه بالا تلفات اهمی یا تلفات DC می‌باشد. اگر بار هارمونیک باشد آن گاه

$$P_{LL}(pu) = \left[\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^{\gamma}(pu) \times 1 \right] + \left[\left(\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^{\gamma}(pu) \times h^{\gamma} \right) \times P_{ec-R}(pu) \right] + \left(\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^{\gamma}(pu) \times h^{\gamma_A} \right) \times P_{OSL-R}(pu) \quad (22)$$

$$P_{LL}(pu) = I^{\gamma}(pu) \times \left[1 + F_{HL} \times P_{ec-R}(pu) + F_{HL-STR} P_{OSL-R}(pu) \right] \quad (23)$$

جدول ۲: محتوای هارمونیک بارهای متصل به ترانسفورماتورهای تحت بررسی.

مرتبه هارمونیک	درصد هارمونیک		
	ترانس ۱۰۰	ترانس ۲۰۰	ترانس ۴۰۰
۲	۰.۶	۰.۶	۰.۷
۳	۱.۳	۱.۳	۱.۲
۴	۰.۶	۰.۶	۰.۵
۵	۲.۵	۲.۵	۲.۲
۶	۰.۳	۰.۳	۰.۳
۷	۶.۲	۶.۲	۶.۶
۸	۰.۵	۰.۵	۰.۵
۹	۰.۷	۰.۷	۰.۶
۱۰	۰.۴	۰.۴	۰.۴
۱۱	۳.۵	۳.۵	۳.۶
۱۲	۰.۹	۰.۹	۰.۹
۱۳	۲.۶	۲.۶	۲.۶
۱۴	۰.۹	۰.۹	۰.۹
۱۵	۰.۸	۰.۸	۰.۸
۱۶	۰.۸	۰.۸	۰.۷
۱۷	۱.۴	۱.۴	۱.۵
۱۸	۰.۵	۰.۵	۰.۵
۱۹	۱.۲	۱.۲	۱.۱
۲۰	۰.۴	۰.۴	۰.۴
۲۱	۰.۶	۰.۶	۰.۴
۲۲	۰.۳	۰.۳	۰.۳
۲۳	۰.۹	۰.۹	۱

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتورهای تحت بررسی.

ظرفیت نامی (کیلوولت آمپر)	۲۰۰	۴۰۰	۱۰۰
ولتاژ اولیه (کیلوولت)	۲۰	۲۰	۲۰
ولتاژ ثانویه	۰.۴	۰.۴	۰.۴
جریان نامی اولیه (آمپر)	۱۱,۵۵	۱۰,۵	۲,۸۹
جریان نامی ثانویه (آمپر)	۵۷۷	۲۶۶,۷	۱۴۴,۳
مقاومت DC اولیه (اهم)	۵,۴۱	۱۴,۷۵	۸۰
مقاومت DC ثانویه (اهم)	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۶۲	۰,۰۳۲
تلفات بی‌باری نامی (وات)	۸۵۰	۵۰۰	۳۴۰
تلفات بارداری نامی (وات)	۶۴۵۰	۳۰۰۰	۲۱۵۰

جدول ۳: درصد افزایش تلفات ترانسفورماتورهای تحت بررسی در محیط هارمونیک.

تلفات نامی (وات)	تلفات هارمونیک	درصد افزایش
ترانسفورماتور ۴۰۰	۷۳۰۰	۱۰,۸۶۲
ترانسفورماتور ۲۰۰	۱۰,۵۰۰	۱۴,۵۶۱
ترانسفورماتور ۱۰۰	۲۴۹۰	۲,۵۳۸

بنابراین مقدار عمر کاشته شده از عمر ترانسفورماتور برابر است با

$$Loss\ of\ Life\ (\Delta L) = \text{Nominal Insulation Life} - \text{Real Life}(\text{year}) \quad (32)$$

که در آن طول عمر عایقی ترانسفورماتورها برابر با ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. با توجه به این که در روابط فوق دمای نقطه داغ و در نتیجه ضریب پیری ترانسفورماتور به میزان بارگذاری آن بستگی دارد، لذا به ازای جریان‌های بار مختلف ضریب پیری متفاوت است.

۴- نتایج عددی تأثیر هارمونیک‌های جریان بر روی ترانسفورماتورهای شبکه توزیع برق ایلام

در این بخش ضمن استفاده از روابط ارائه شده در بخش‌های قبل، برای چند ترانسفورماتور توزیع استفاده شده در شبکه توزیع ایلام، میزان تلفات ناشی از هارمونیک‌ها، محاسبه و ارائه می‌گردد. برای محاسبه تلفات، سه ترانسفورماتور توزیع با مشخصات مختلف که مشخصات مربوط به آنها در جدول ۱ آمده است مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در جدول ۲ نیز محیط هارمونیک که هر کدام از این ترانسفورماتورها در آن قرار دارند، یعنی نسبت مرتبه‌ای هارمونیک مختلف به هارمونیک اصلی آمده است.

حال با استفاده از روابط به دست آمده در بخش قبل به محاسبه تلفات بی‌باری و تلفات بارداری شامل تلفات جریان‌های گردابی، تلفات پراکنده دیگر و تلفات DC در حضور بارهای هارمونیک پرداخته می‌شود. با توجه به روابط، برای رسیدن به میزان انواع تلفات بایستی ابتدا ضرایب تلفات هارمونیک یعنی F_{HL} و F_{HL-STR} را محاسبه نمود. جدول ۳ به به دست آمدن این مقادیر برای ترانس‌های تحت بررسی با مرتبه‌های هارمونیک مختلف کمک می‌کند.

با استفاده از نتایج جداول مقادیر ضریب تلفات هارمونیک برای تلفات گردابی و تلفات پراکنده دیگر به دست خواهد آمد. برای ترانس ۴۰۰ کیلوولت آمپری با بار هارمونیک داده شده این ضرایب برابرند با

$$F_{HL} = \frac{32675/92}{10693/82} = 3/03 \quad (33)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{12672/21}{10693/82} = 1/17$$

برای ترانس ۲۰۰ کیلوولت آمپری

$$F_{HL} = \frac{29575}{10565/57} = 2/8 \quad (34)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{12211/7}{10565/57} = 1/16$$

جداول ۶ تا ۸ نتایج به دست آمده برای هر کدام از تلفات ترانس‌های توزیع مورد بررسی را به همراه ضرایب هارمونیک محاسبه شده آنها نشان می‌دهد. همان طور که نتایج محاسبات نشان می‌دهد در حضور بارهای هارمونیک تلفات ترانسفورماتور، افزایش و در نتیجه بازده آنها کاهش می‌یابد. جدول ۹ درصد افزایش این تلفات را برای سه ترانسفورماتور تحت بررسی نشان می‌دهد. این افزایش تلفات علاوه بر کاهش بازده سیستم، باعث اثرات فنی دیگر مانند محدود کردن ظرفیت قابل استفاده ترانسفورماتور و همچنین افزایش حرارت سیستم یعنی افزایش نقطه داغ و در نتیجه کاهش طول عمر ترانسفورماتور می‌گردد.

در صورت وجود بارهای هارمونیک در سیستم و در نتیجه عبور جریان‌های هارمونیک از ترانسفورماتورهای توزیع، حداکثر جریان مجاز مقداری کمتر از جریان نامی خواهد بود. با استفاده از این رابطه و مقادیر به دست آمده برای تلفات پراکنده دیگر و تلفات جریان گردابی، مقدار جریان مجاز برای هر ترانسفورماتور به صورت زیر به دست می‌آید

$$I_{max}(p.u.) = \sqrt{\frac{\frac{1325}{5284}}{1 + 3/06 \times \frac{1325}{5284} + 1/17 \times \frac{2691}{5284}}} = 0/86 p.u \quad (35)$$

جدول ۴: درصد ظرفیت کاهش یافته.

درصد ظرفیت کاهش یافته	ظرفیت در حضور بار هارمونیکی	ظرفیت نامی	حداکثر جریان مجاز (پریونیت)	ترانسفورماتور
۱۴	۳۴۴	۴۰۰	۰٫۸۶	۴۰۰ ترانسفورماتور
۱۷	۱۶۶	۲۰۰	۰٫۸۳	۲۰۰ ترانسفورماتور
۰٫۵	۹۹٫۵	۱۰۰	۰٫۹۹۵	۱۰۰ ترانسفورماتور

جدول ۵: محاسبه فاکتورهای هارمونیک برای ترانسفورماتور ۴۰۰ کیلوولت آمپر.

مرتبه هارمونیک	$\frac{I_h}{I_1}$	$(\frac{I_h}{I_1})^2$	h^2	$h^2 (\frac{I_h}{I_1})^2$	h^{-2}	$h^{-2} (\frac{I_h}{I_1})^2$
۱	۱۰۰	۱۰۰۰۰	۱	۱۰۰۰۰	۱	۱۰۰۰۰
۲	۰٫۶	۰٫۳۶	۴	۱٫۴۴	۰٫۲۵	۰٫۰۹
۳	۰٫۳	۰٫۰۹	۹	۰٫۸۱	۰٫۱۱	۰٫۰۱
۴	۰٫۲	۰٫۰۴	۱۶	۰٫۶۴	۰٫۰۶	۰٫۰۰۲۴
۵	۰٫۱۵	۰٫۰۲۲۵	۲۵	۰٫۵۶۲۵	۰٫۰۴	۰٫۰۰۹
۶	۰٫۱۶۷	۰٫۰۲۸	۳۶	۱٫۰۳۲	۰٫۰۳۷	۰٫۰۱۰۶
۷	۰٫۱۴۳	۰٫۰۲۰۴	۴۹	۱٫۰۰۱۶۳	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۶۸
۸	۰٫۱۲۵	۰٫۰۱۵۶	۶۴	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۰۳۹	۰٫۰۰۶۱
۹	۰٫۱۱۱	۰٫۰۱۲۳	۸۱	۰٫۹۸۰۱	۰٫۰۴۱	۰٫۰۰۵۱
۱۰	۰٫۱	۰٫۰۱	۱۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۱	۰٫۰۹۱	۰٫۰۰۸۳	۱۲۱	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۲	۰٫۰۸۳	۰٫۰۰۶۹	۱۴۴	۰٫۹۷۳۸	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۳	۰٫۰۷۷	۰٫۰۰۵۹	۱۶۹	۰٫۹۴۰۱	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۴	۰٫۰۷۱	۰٫۰۰۵۰	۱۹۶	۰٫۹۰۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۵	۰٫۰۶۶	۰٫۰۰۴۴	۲۲۵	۰٫۸۶۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۶	۰٫۰۶۲	۰٫۰۰۳۹	۲۵۶	۰٫۸۲۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۷	۰٫۰۵۹	۰٫۰۰۳۵	۲۸۹	۰٫۷۸۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۸	۰٫۰۵۶	۰٫۰۰۳۱	۳۲۴	۰٫۷۴۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۱۹	۰٫۰۵۳	۰٫۰۰۲۸	۳۶۱	۰٫۷۰۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۲۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۰۲۵	۴۰۰	۰٫۶۶۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۲۱	۰٫۰۴۷	۰٫۰۰۲۲	۴۴۱	۰٫۶۲۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۲۲	۰٫۰۴۴	۰٫۰۰۲۰	۴۸۴	۰٫۵۸۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
۲۳	۰٫۰۴۱	۰٫۰۰۱۷	۵۲۹	۰٫۵۴۰۰	۰٫۰۴۰	۰٫۰۰۴۰
مجموع	-	-	-	۱۰۶۹۳٫۸۲	-	۱۲۶۷۲٫۲۱

$$I_{max}(p.u.) = \sqrt{\frac{\frac{2150}{1500}}{1 + 1,08 \times \frac{220}{1500} + 1,01 \times \frac{430}{1500}}} = 0,995 p.u \quad (39)$$

$$S_{new} = I_{max}(p.u.) \times S_{base} = 0,995 \times 100000 = 99,5 kVA \quad (40)$$

همان طور که مشاهده می‌شود در محیط هارمونیک بخشی از ظرفیت نامی ترانسفورماتورها به خاطر وجود تلفات مازاد اشغال می‌شود. از میان سه ترانسفورماتور مورد بررسی، به خاطر بیشتر بودن درصد افزایش تلفات در ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپری، ظرفیت بیشتری از آن اشغال شده که این موضوع به خوبی در جدول ۱۰ مقایسه گردیده است.

در این بخش با توجه به روابط فوق و به ازای جریان مختلف، عمر واقعی ترانسفورماتور استخراج می‌شود. در کلیه بررسی‌ها مراتب هارمونیک بارها، همان مقادیر آمده در جدول مخصوص (جداول ۵ تا ۱۴) به هر ترانسفورماتور است.

برای جریان‌های بارگذاری و ترانسفورماتورهای تحت بررسی با مراتب هارمونیک هر کدام، می‌توان طول عمر مفید آنها را محاسبه نمود. جداول

چون در رابطه مورد استفاده مقادیر تلفات بر حسب تلفات اهمی پریونیت شده‌اند پس در رابطه بالا و روابط جریان ماکسیمم سایر ترانسفورماتورها باید مقادیر توان نامی بارداری، جریان گردابی و پراکنده دیگر را بر تلفات اهمی آن ترانس تقسیم نمود. حال با استفاده از این حداکثر جریان مجاز، ظرفیت واقعی ترانسفورماتور ۶۳۰ کیلوولت آمپری برابر است با

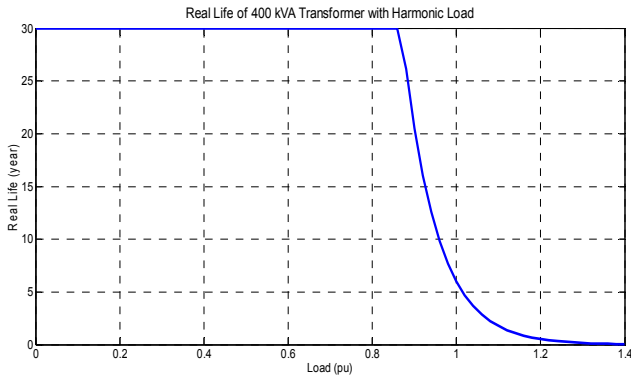
$$S_{new} = I_{max}(p.u.) \times S_{base} = 0,86 \times 400000 = 344 \quad (36)$$

برای ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپری داریم

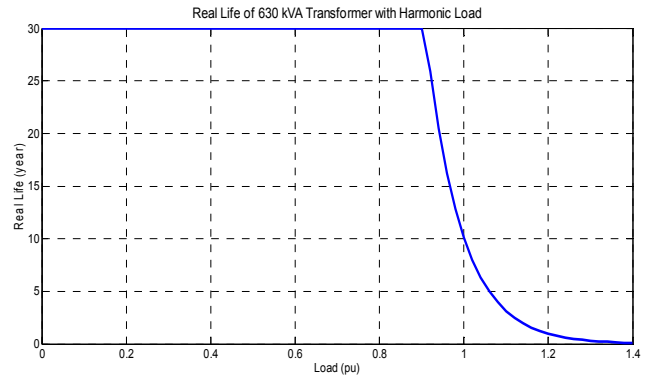
$$I_{max}(p.u.) = \sqrt{\frac{\frac{6450}{2181}}{1 + 2,8 \times \frac{1409}{2181} + 1,16 \times \frac{2860}{2181}}} = 0,83 p.u \quad (37)$$

$$S_{new} = I_{max}(p.u.) \times S_{base} = 0,83 \times 200000 = 166 kVA \quad (38)$$

برای ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت آمپری نیز داریم



شکل ۲: نمودار طول عمر مفید ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپر بر حسب جریان بار در محیط هارمونیک.



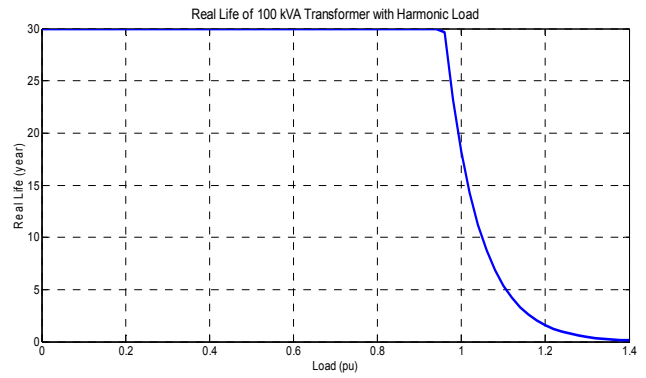
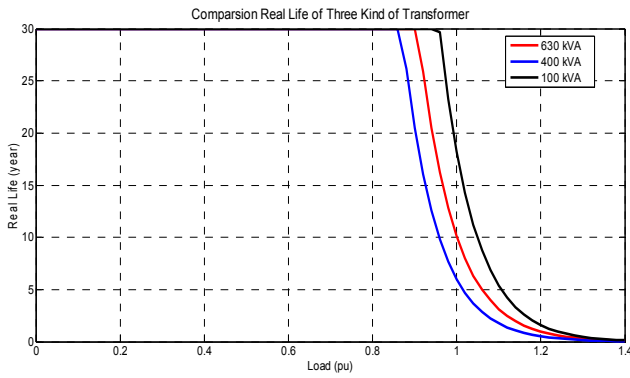
شکل ۱: نمودار طول عمر مفید ترانسفورماتور ۴۰۰ کیلوولت آمپر بر حسب جریان بار در محیط هارمونیک.

جدول ۶: محاسبه ضرایب هارمونیک برای ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپری.

رتبه هارمونیک	$\frac{I_h}{I_1}$	$(\frac{I_h}{I_1})^2$	h^2	$h^2 (\frac{I_h}{I_1})^2$	$h^{1.8}$	$h^{1.8} (\frac{I_h}{I_1})^2$
۱	۱.۰۰	۱.۰۰۰۰	۱	۱.۰۰۰۰	۱	۱.۰۰۰۰
۲	۰.۰۷	۰.۰۴۹	۴	۰.۱۹۶	۱.۷۴	۰.۸۵
۳	۰.۱۲	۰.۰۱۴۴	۹	۰.۱۲۹۶	۲.۴۱	۰.۶۲
۴	۰.۰۵	۰.۰۰۲۵	۱۶	۰.۰۴۰۰	۳.۰۳	۰.۷۶
۵	۰.۲۲	۰.۰۴۸۴	۲۵	۱.۲۱۰۰	۳.۶۲	۱.۷۶۹۹۵
۶	۰.۰۳	۰.۰۰۰۹	۳۶	۰.۰۳۲۴	۴.۱۹	۰.۳۸
۷	۰.۰۶۶	۰.۰۰۴۳۵۶	۴۹	۰.۲۱۳۴۴۴	۴.۷۴	۲.۰۶۶۲
۸	۰.۰۵	۰.۰۰۲۵	۶۴	۰.۱۶۰۰	۵.۲۷	۱.۳۲
۹	۰.۰۶	۰.۰۰۳۶	۸۱	۰.۲۹۱۶	۵.۷۹	۲.۰۹
۱۰	۰.۰۴	۰.۰۰۱۶	۱۰۰	۰.۱۶۰۰	۶.۳۱	۱.۰۱
۱۱	۰.۰۳۶	۰.۰۰۱۲۹۶	۱۲۱	۰.۱۵۶۸۱۶	۶.۸۱	۸.۸۲۵
۱۲	۰.۰۹	۰.۰۰۸۱	۱۴۴	۰.۱۱۶۶۴	۷.۳۰	۵.۹۱
۱۳	۰.۰۲۶	۰.۰۰۰۶۷۶	۱۶۹	۰.۱۱۴۲۴۴	۷.۷۸	۵.۲۶۱
۱۴	۰.۰۹	۰.۰۰۸۱	۱۹۶	۰.۱۵۸۱۷۶	۸.۲۶	۶.۶۹
۱۵	۰.۰۸	۰.۰۰۶۴	۲۲۵	۰.۱۴۴	۸.۷۳	۵.۵۹
۱۶	۰.۰۷	۰.۰۰۴۹	۲۵۶	۰.۱۲۵۴۴	۹.۱۹	۴.۵۰
۱۷	۰.۰۵	۰.۰۰۲۵	۲۸۹	۰.۰۷۲۵	۹.۶۵	۲.۱۷۰
۱۸	۰.۰۵	۰.۰۰۲۵	۳۲۴	۰.۰۸۱	۱۰.۰۱	۲.۵۲
۱۹	۰.۱۱	۰.۰۱۲۱	۳۶۱	۰.۰۴۳۶۸۱	۱۰.۵۴	۱۲.۷۶
۲۰	۰.۰۴	۰.۰۰۱۶	۴۰۰	۰.۰۶۴	۱۰.۹۹	۱.۷۶
۲۱	۰.۰۴	۰.۰۰۱۶	۴۴۱	۰.۰۷۵۶	۱۱.۴۲	۱.۸۳
۲۲	۰.۰۳	۰.۰۰۰۹	۴۸۴	۰.۰۴۳۵۶	۱۱.۸۶	۱.۰۷
۲۳	۱	۱	۵۲۹	۵۲۹	۱۲.۲۶	۱۲.۲۹
مجموع	-	-	-	۱۰۵۶۵.۵۷	-	۱۲۲۱۱.۰۷

۵ تا ۱۴ نتایج به دست آمده از این بخش را برای سه ترانسفورماتور نشان می‌دهد. از طرفی همان طور که در شکل‌های ۱ تا ۴ مشاهده می‌شود با افزایش جریان بار در حضور بارهای هارمونیک، عمر مفید ترانسفورماتور نیز کاهش می‌یابد. از میان ترانسفورماتورها نیز ترانس ۲۰۰ کیلوولت آمپری شرایط بدتری را تجربه می‌کند و این در حالی است که ترانس ۱۰۰ کیلوولت آمپری حتی به ازای جریان بار ۰.۹۲ پریونیتی نیز طول عمر نامی خود یعنی ۳۰ سال را خواهد داشت. برای درک بهتر موضوع در ادامه طول عمر مفید ترانسفورماتورهای تحت بررسی بر حسب جریان بار در شکل‌های ۱ تا ۴ رسم شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود از میان

ترانسفورماتورها به ازای یک جریان خاص، ابتدا ترانسفورماتور ۲۰۰، سپس ترانسفورماتور ۴۰۰ و در انتها ترانسفورماتور ۱۰۰ عمر مفید خود را از دست می‌دهند. برای بررسی بهتر عمر مفید ترانسفورماتورها بایستی اثر تغییرات دمای محیط را نیز در نظر گرفت. به عبارت دیگر در تمامی محاسبات انجام شده در بخش محاسبه عمر مفید ترانسفورماتورها، دمای محیط ثابت در نظر گرفته شد. این در حالی است که با متغیر بودن دمای هوا، دمای محیط را دیگر نمی‌توان ثابت در نظر گرفت. به همین منظور در ادامه طول عمر مفید ترانسفورماتور فوق را در حالتی که دما متغیر است بر حسب میزان بار به دست آمده است و در شکل‌های ۵ تا ۷ نمایش داده شده است. همان



شکل ۴: مقایسه طول عمر مفید سه ترانسفورماتور تحت بررسی در محیط هارمونیک.

شکل ۳: نمودار طول عمر مفید ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت آمپر بر حسب جریان بار در محیط هارمونیک.

جدول ۷: محاسبه ضرایب هارمونیک برای ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت آمپری.

$h^{1.8} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$h^{1.8}$	$h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	h^2	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\frac{I_h}{I_1}$	مرتبه هارمونیک
۱۰۰۰۰	۱	۱۰۰۰۰	۱	۱۰۰۰۰	۱۰۰	۱
۳۶,۸۴	۱,۷۴	۸۴,۶۴	۴	۲,۱۱۶	۴,۶	۲
۵,۴۲	۲,۴۱	۲۰,۲۵	۹	۲,۲۵	۱,۵	۳
۹,۸۲	۳,۰۳	۵۱,۸۴	۱۶	۳,۲۴	۱,۸	۴
۴,۳۸	۳,۶۲	۳۰,۲۵	۲۵	۱,۲۱	۱,۱	۵
۴,۱۹	۴,۱۹	۳۶	۳۶	۱	۱	۶
۳,۸۴	۴,۷۴	۳۶,۶۹	۴۹	۰,۸۱	۰,۹	۷
۳,۳۸	۵,۲۷	۴۰,۹۶	۶۴	۰,۶۴	۰,۸	۸
۳,۲۶	۵,۷۹	۴۵,۵۶	۸۱	۰,۵۶	۰,۷۵	۹
۳,۰۹	۶,۳۱	۴۹	۱۰۰	۰,۴۹	۰,۷	۱۰
۲,۸۸	۶,۸۱	۵۱,۱۲	۱۲۱	۰,۴۲	۰,۶۵	۱۱
۲,۶۳	۷,۳۰	۵۱,۸۴	۱۴۴	۰,۳۶	۰,۶	۱۲
۲,۲۵	۷,۷۸	۵۱,۱۲	۱۶۹	۰,۳۰	۰,۵۵	۱۳
۲,۰۶	۸,۲۶	۴۹	۱۹۶	۰,۲۵	۰,۵۰	۱۴
۱,۷۷	۸,۷۳	۴۵,۵۶	۲۲۵	۰,۲	۰,۴۵	۱۵
۱,۶۷	۹,۱۹	۴۰,۹۶	۲۵۶	۰,۱۶	۰,۴۰	۱۶
۱,۱۸	۹,۶۵	۳۵,۴	۲۸۹	۰,۱۲	۰,۳۵	۱۷
۰,۹۱	۱۰,۱	۲۹,۱۶	۳۲۴	۰,۰۹	۰,۳۰	۱۸
۰,۶۶	۱۰,۵۴	۲۲,۵۶	۳۶۱	۰,۰۶	۰,۲۵	۱۹
۰,۴۴	۱۰,۹۹	۱۶	۴۰۰	۰,۰۴	۰,۲۰	۲۰
۰,۲۶	۱۱,۴۲	۹,۹۲	۴۴۱	۰,۰۲	۰,۱۵	۲۱
۰,۱۲	۱۱,۸۶	۴,۸۴	۴۸۴	۰,۰۱	۰,۱۰	۲۲
۰,۰۳	۱۲,۲۶	۱,۳۲	۵۲۹	۰,۰۰۲۵	۰,۰۵	۲۳
۱۰۰۹۰,۹۹	-	۱۰۸۰۷,۰۱	-	۱۰۰۳۳,۴۱	-	مجموع

جدول ۸: نتایج محاسبه تلفات برای ترانسفورماتور ۴۰۰ کیلوولت آمپری در حضور بارهای هارمونیک.

تلفات نامی	جریان هارمونیک مؤثر	تلفات تحت جریان مؤثر هارمونیک	فاکتور هارمونیک	تلفات هارمونیک	نوع تلفات
۸۵۰	-	۸۵۰	-	۸۵۰	P_{NL}
۶۴۵۰	۱,۰۶	۶۸۳۷	-	۱۰۰۱۲	P_{LL}
۲۱۸۱	۱,۰۶	۲۳۱۲	-	۲۳۱۲	P_{dc}
۴۲۶۹	۱,۰۶	۴۵۶۸	-	۷۷۰۰	P_{TSL}
۱۴۰۹	۱,۰۶	۱۴۹۴	۲,۸	۴۱۸۳	P_{EC}
۲۸۶۰	۱,۰۶	۳۰۳۲	۱,۱۶	۳۵۱۷	P_{OSL}
۷۳۰۰	-	۷۶۸۷	-	۱۰۸۶۲	P_T

جدول ۹: نتایج محاسبه تلفات برای ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپری در حضور بارهای هارمونیک.

نوع تلفات	تلفات نامی	جریان هارمونیک مؤثر	تلفات تحت جریان مؤثر هارمونیک	فاکتور هارمونیک	تلفات هارمونیک
P_{NL}	۱۲۰۰	-	۱۲۰۰	-	۱۲۰۰
P_{LL}	۹۳۰۰	۱,۰۷	۹۹۵۱	-	۱۳۳۶۱
P_{dc}	۵۲۸۴	۱,۰۷	۵۶۵۳,۸۸	-	۵۶۵۳,۸۸
P_{TSL}	۴۰۱۶	۱,۰۷	۴۲۷۹,۱۲	-	۷۷۰۷
P_{EC}	۱۳۲۵	۱,۰۷	۱۴۱۷,۷۵	۳,۰۶	۴۳۳۸
P_{OSL}	۲۶۹۱	۱,۰۷	۲۸۷۹,۳۷	۱,۱۷	۳۳۶۹
P_T	۱۰۵۰۰	-	۱۱۱۵۱	-	۱۴۵۶۱

جدول ۱۰: نتایج محاسبه تلفات برای ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت آمپری در حضور بارهای هارمونیک.

نوع تلفات	تلفات نامی (وات)	جریان هارمونیک مؤثر	تلفات تحت جریان مؤثر هارمونیک (وات)	فاکتور هارمونیک	تلفات هارمونیک (وات)
P_{NL}	۳۴۰	-	۳۴۰	-	۳۴۰
P_{LL}	۲۱۵۰	۱,۰۰۹	۲۱۷۰	-	۲۱۹۸
P_{dc}	۱۵۰۵	۱,۰۰۹	۱۵۱۹	-	۱۵۱۹
P_{TSL}	۶۴۵	۱,۰۰۹	۶۵۱	-	۶۷۹
P_{EC}	۲۲۰	۱,۰۰۹	۲۲۲	۱,۰۸	۲۴۰
P_{OSL}	۴۳۰	۱,۰۰۹	۴۳۴	۱,۰۱	۴۳۹
P_T	۲۴۹۰	-	۲۵۱۰	-	۲۵۳۸

جدول ۱۱: درصد افزایش تلفات ترانسفورماتورهای تحت بررسی در محیط هارمونیک.

تلفات نامی (وات)	تلفات هارمونیک (وات)	درصد افزایش تلفات
۷۳۰۰	۱۰۸۶۲	۴۸,۸
۱۰۵۰۰	۱۴۵۶۱	۳۸,۶۷
۲۴۹۰	۲۵۳۸	۱,۹

جدول ۱۲: محاسبه عمر مفید ترانسفورماتورها در حضور بارهای هارمونیک به ازای جریان بار ۰,۶۵ پرینیت.

$I = 0,65 pu$										
Life	F_{AA}	θ_H	θ_A	θ_g	θ_{g-rat}	θ_{TO}	θ_{TO-rat}	P_{LL}	P_{LL-rat}	
۳۰	۰,۰۸۸	۸۷,۶۸	۴۰	۳,۱۸	۵	۴۴,۵	۶۰	۱	۱,۷۶	۴۰۰
۳۰	۰,۰۸	۸۶,۷۵	۴۰	۳,۴	۵	۴۳,۱۷	۶۰	۱,۸۳	۲,۹۶	۲۰۰
۳۰	۰,۰۳۲	۷۹	۳۲	۶,۱	۱۲	۴۰,۷۱	۷۰	۰,۶۱۳	۱,۴۳	۱۰۰

جدول ۱۳: محاسبه عمر مفید ترانسفورماتورها در حضور بارهای هارمونیک به ازای جریان بار ۰,۶۵ پرینیت.

$I = 0,80 pu$										
Life	F_{AA}	θ_H	θ_A	θ_g	θ_{g-rat}	θ_{TO}	θ_{TO-rat}	P_{LL}	P_{LL-rat}	
۳۰	۰,۲۸	۹۸	۴۰	۴,۴۲	۵	۵۳,۹	۶۰	۱,۵۱	۱,۷۶	۴۰۰
۳۰	۰,۲	۹۵	۴۰	۴,۸	۵	۵۰,۴۱	۶۰	۲,۷۸	۲,۹۶	۲۰۰
۳۰	۰,۱۶	۹۳,۱	۳۲	۸,۵۱	۱۲	۵۲,۵۵	۷۰	۰,۹۳	۱,۴۳	۱۰۰

جدول ۱۴: محاسبه عمر مفید ترانسفورماتورها در حضور بارهای هارمونیک به ازای جریان بار ۰,۶۵ پرینیت.

$I = 0,92 pu$										
Life	F_{AA}	θ_H	θ_A	θ_g	θ_{g-rat}	θ_{TO}	θ_{TO-rat}	P_{LL}	P_{LL-rat}	
۲۷	۱,۱۱	۱۱۱	۴۰	۵,۴	۵	۶۵,۷	۶۰	۲	۱,۷۶	۴۰۰
۱۷	۱,۸۳	۱۱۶	۴۰	۵,۹۴	۵	۷۰	۶۰	۳,۶۷	۲,۹۶	۲۰۰
۳۰	۰,۶۴	۱۰۵,۷	۳۲	۱۰,۶	۱۲	۶۳,۱۲	۷۰	۱,۲۳	۱,۴۳	۱۰۰

ترانسفورماتور است افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با تغییر دما حد بارگذاری ترانسفورماتور یعنی حداکثر جریان بار که می‌تواند در محیط هارمونیک از ترانسفورماتور عبور کند بیشتر می‌شود.

طور که مشاهده می‌شود دمای محیط تأثیر بسیار مهمی بر روی طول عمر ترانسفورماتورهای توزیع دارد به گونه‌ای که با کاهش دما، دمای نقطه داغ کاهش یافته و در نتیجه طول عمر عایقی که همان طول عمر

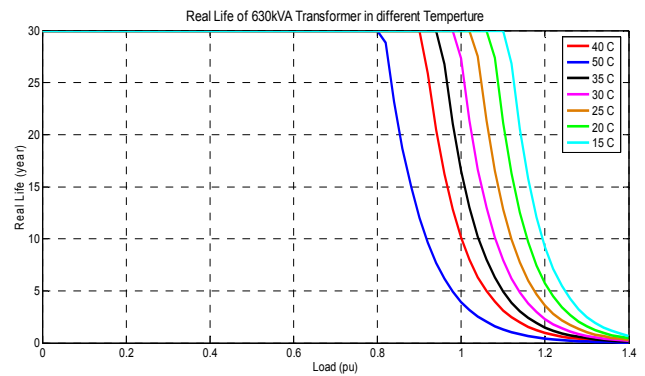
- [2] M. I. Samesima, J. Wilson Resende, and S. C. N. Araujo, "Analysis of transformer loss of life driving nonlinear industrial loads by the finite elements approach," in *Proc. of the 1995 IEEE Industry Applications Conf. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95*, pp. 2175-2179, Orlando, FL, USA, 8-12 Oct. 1995.
- [3] L. Pierrat, R. J. Resende, and J. Santana, "Power transformers life expectancy under distorting power electronic loads," in *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 578-583, Warsaw, Poland, 17-17 Jun. 1996.
- [4] L. W. Pierce, "Transformer design and application consideration for non-sinusoidal load currents," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 32, no. 3, pp. 633-645, May/June. 1996.
- [5] M. Radmehr, S. Farhangi, and A. Nasiri, "Effect of power quality distortion on electrical drives and transformer life in paper industries: simulation and real time measurements," in *Proc. of the Pulp and Paper Industry Technical Conf.*, 9 pp., Appleton, WI, USA, 18-23 Jun. 2006.
- [6] M. S. Hwang, W. M. Grady, and H. W. Sanders, Jr., "Distribution transformer winding losses due to nonsinusoidal currents," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 2, no. 1, pp. 46-46, Jan. 1987.
- [7] S. B. Sadati, A. Tahani, B. Darvishi, M. Dargahi, and H. Yousefi, "Comparison of distribution transformer losses and capacity under linear and harmonic loads," in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Power and Energy, PECon'08*, pp. 1265-1269, Johor Baharu, Malaysia, 1-3 Dec. 2008.
- [8] D. Gokhan Ece and H. Akcay, "An analysis of transformer excitation current under nonsinusoidal supply voltage," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 5, pp. 1085-1089, Oct. 2002.
- [9] S. Biricik and O. C. Ozerdem, "Experimental study and comparative analysis of transformer harmonic behaviour under linear and nonlinear load conditions," in *Proc. 10th Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering, EEEIC'11*, 4 pp., Rome, Italy, 8-11 May 2011.
- [10] V. Pahwa and K. S. Sandhu, "Modelling and simulation of single phase transformer including the main flux saturation effect," in *Proc. XXXII National Systems Conf., NSC'08*, paper no. 118, Roorkee, India, 17-19 Dec. 2008.
- [11] S. R. Mohanty, *Modelling and Analysis of Transformer under Non-Sinusoidal Current Excitation*, Bachelor of Technology Thesis, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, May 2012.
- [12] S. Deokar and L. Waghmare, "Impact of power system harmonics on insulation failure of distribution transformer and its remedial measures," in *Proc. 3rd Int. Conf. on Electronics Computer Technology*, pp. 136-140, Kanyakumari, India, 4-10 Apr. 2011.

رحمت اعظمی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۲ از دانشگاه شهید چمران اهواز، تهران و تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه ایلام می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل بهره‌برداری، برنامه‌ریزی و کنترل سیستم‌های قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر و اقتصاد سیستم‌های قدرت می‌باشد.

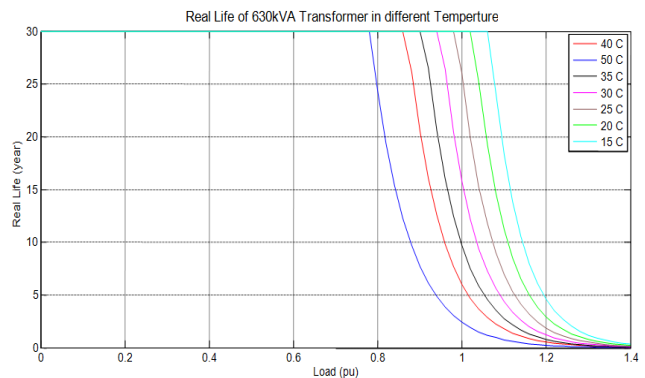
امین مرادخانی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و تربیت مدرس به پایان رسانده است. وی هم‌اکنون استادیار مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه ایلام می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان مطالعات شبکه‌های توزیع و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

محمدحسن پرهیزگاری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۴ از دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور و دانشگاه آزاد اسلامی به پایان رسانده است. وی از سال ۱۳۸۹ تاکنون در شرکت توزیع نیروی برق استان ایلام مشغول به فعالیت می‌باشد.

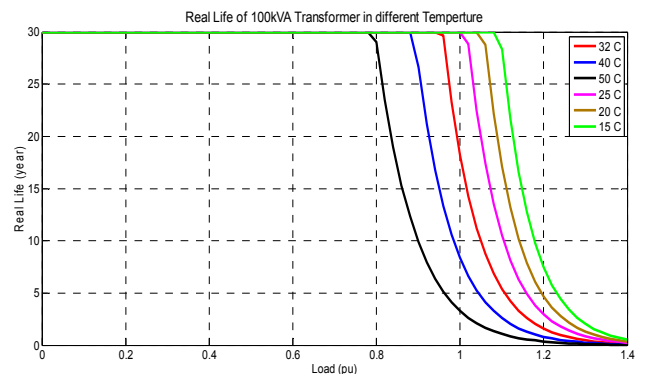
داریوش باقری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۹۴ از دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور و دانشگاه آزاد اسلامی به پایان رسانده است. وی از سال ۱۳۷۸ در شرکت برق منطقه‌ای غرب و از سال ۱۳۹۵ به عنوان مدیر امور انتقال برق استان ایلام مشغول به فعالیت می‌باشد.



شکل ۵: عمر مفید ترانسفورماتور ۴۰۰ کیلوولت آمپر در دماهای مختلف.



شکل ۶: عمر مفید ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپر در دماهای مختلف.



شکل ۷: عمر مفید ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت آمپر در دماهای مختلف.

۵- نتیجه گیری

همان طور که نتایج ارائه شده در بخش‌های قبل نشان می‌دهد وجود بارهای هارمونیک متصل به ترانسفورماتورهای توزیع تحت بررسی، باعث افزایش تلفات آنها تا ۵۰٪ می‌گردد. این افزایش تلفات برای ترانسفورماتور دوم که محتوای هارمونیک بار متصل به آن بیشتر است بالاتر می‌باشد. علاوه بر افزایش تلفات، وجود بارهای هارمونیک باعث افزایش نقطه داغ ترانسفورماتورها و در نتیجه کاهش طول عمر آنها نیز می‌گردد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حضور بارهای هارمونیک، ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت آمپری نسبت به دو ترانسفورماتور دیگر کاهش ظرفیت بیشتر، دمای نقطه داغ بیشتر و نتیجتاً طول عمر کمتری را تجربه می‌کند.

مراجع

- [1] D. Yildirim and E. F. Fuchs, "Measured transformer derating & comparison with harmonic loss factor (FHL) approach," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 186-191, Jan. 2000.