

آنالیز اقتصادی افزایش تلفات و کاهش عمر  
ترانسفورماتور تحت بار هارمونیکی و فیلتر گذاری  
به منظور کاهش هارمونیک جریان

۱. محمد حسین جاویدی دشت بیاض<sup>۱،۲</sup>  
h-javid@ferdowsi.um.ac.ir

۱. مهرداد حجت<sup>۱،۲</sup>  
me.hojjat@stu-mail.um.ac.ir

حدیث پور اصغر خمامی<sup>۱</sup>  
delaram.poorasghar@gmail.com

۱. دانشگاه فردوسی مشهد، ایران - دانشکده مهندسی برق
۲. آزمایشگاه تخصصی سیستم و تجدید ساختار

واژه‌های کلیدی: تلفات ترانسفورماتور، هارمونیک،  
کاهش عمر، فیلتر غیرفعال، آنالیز هزینه فایده

#### چکیده

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات اصلی و مهم شبکه توزیع هستند که برای استفاده تحت شرایط ولتاژ و جریان سینوسی، فرکانس نامی و بارخطی طراحی شده‌اند. در سال‌های اخیر افزایش استفاده از بارهای غیرخطی، منجر به بالا رفتن سطح هارمونیک‌های جریان و ولتاژ و کاهش کیفیت توان شده است. افزایش بار هارمونیکی در ترانسفورماتور منجر به تلفات حرارتی بیشتر و بالا رفتن دمای روغن، سیم پیچ‌ها و دمای نقطه داغ ترانسفورماتور می‌شود. افزایش درجه حرارت اضافی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش عمر مفید ترانسفورماتور داشته باشد. در این مقاله، هدف اصلی مقایسه اقتصادی میان خسارت مالی ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور و هزینه ساخت فیلتر برای کاهش سطح هارمونیک‌های جریان است. به این منظور ابتدا میزان کاهش عمر مفید سه ترانسفورماتور توزیع اساس روابط اقتصادی بیان شده، به دست آمده است. در نهایت، فیلتر غیرفعال LC به منظور کاهش هارمونیک‌های جریان طراحی و هزینه ساخت و نصب آن محاسبه شده است. نتایج مقایسه این هزینه با خسارت مالی تخمین زده شده، نشان می‌دهد که فیلتر گذاری از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود.



## آنالیز اقتصادی افزایش تلفات و کاهش عمر ترانسفورماتور تحت بار هارمونیکی و فیلترگذاری به منظور کاهش هارمونیک جریان

۲۰۱ محمدحسین جاویدی دشت بیاض

h-javidi@ferdowsi.um.ac.ir me.hojjat@stu-mail.um.ac.ir delaram.poorasghar@gmail.com

۲۰۱ مهرداد حجت

حدیث پوراصغرخمامی<sup>۱</sup>

۱. دانشگاه فردوسی مشهد، ایران - دانشکده مهندسی برق

۲. آزمایشگاه تخصصی سیستم و تجدید ساختار

واژه‌های کلیدی: تلفات ترانسفورماتور، هارمونیک، کاهش عمر، فیلتر غیرفعال، آنالیز هزینه فایده

سازی‌ها با استفاده از اطلاعات هارمونیکی سه ترانسفورماتور توزیع نمونه انجام می‌شود. نتایج شبیه سازی بر روی این ترانسفورماتورها نشان می‌دهد، با افزایش تلفات هارمونیکی و دما، عمر مفید ترانسفورماتور کاهش یافته است. خسارت مالی ناشی از آن در مقایسه با هزینه نصب فیلتر بیشتر بوده و در نتیجه فیلترگذاری از لحاظ اقتصادی می‌تواند مقرنون به صرفه باشد.

### ۱- مقدمه

ترانسفورماتورها معمولاً برای استفاده تحت شرایط ولتاژ و جریان سینوسی، فرکانس نامی و بار خطی طراحی می‌شوند. این روزها استفاده از بار غیرخطی منجر به افزایش تلفات و کاهش عمر مفید ترانسفورماتور شده است. واضح است در صورتیکه ترانسفورماتور به اندازه عمر استاندارد خود مورد استفاده قرار نگیرد، متحمل خسارت مالی خواهیم شد [۱]. در سال ۱۹۸۰، مشکل افزایش دما و حرارت ترانسفورماتورها تحت جریان غیرسینوسی در کمیته

**چکیده**  
 ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات اصلی و مهم شبکه توزیع هستند که برای استفاده تحت شرایط ولتاژ و جریان سینوسی، فرکانس نامی و بار خطی طراحی شده‌اند. در سال های اخیر افزایش استفاده از بارهای غیرخطی، منجر به بالا رفتن سطح هارمونیک‌های جریان و ولتاژ و کاهش کیفیت توان شده است. عامل بسیاری از خرابی‌ها در ترانسفورماتور، افزایش تلفات ناشی از وجود مولفه‌های هارمونیکی به خصوص هارمونیک‌های جریان است. افزایش تلفات هارمونیکی منجر به افزایش دمای روغن، سیم پیچ‌ها و مخصوصاً دمای نقطه داغ آن می‌شود که این موضوع به خرابی، پیری زودرس عایق و کاهش عمر مفید ترانسفورماتور می‌انجامد. در این مقاله ابتدا کاهش عمر مفید ترانسفورماتور تحت شرایط بار هارمونیکی و خسارت مالی ناشی از آن بررسی شده است. سپس، با طراحی فیلتر غیرفعال به منظور کاهش هارمونیک‌های جریان و برآورد هزینه ساخت آن، مقرنون به صرفه بودن نصب فیلتر بررسی گردیده است. شبیه

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

افزایش تلفات مسی در سیم پیچ ها و بدنه آن را درپی دارد [۱]. به طورکلی، تلفات هارمونیکی ناشی از افزایش حرارت تولیدی در سیم پیچ ها، هسته و جریان های گردابی، همگی تابعی از مجدور جریان مؤثر هستند. این افزایش درجه حرارت اضافی می تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش عمر مفید عایق ترانسفورماتور داشته باشد. بیشترین عامل محدودکننده در بارگذاری ترانسفورماتور، افزایش دمای نقطه داغ است [۳]. افزایش تلفات جریان گردابی به دلیل وجود بار هارمونیکی، می تواند منجر به افزایش غیرطبیعی دما و تلفات بیش از اندازه و مضاعف سیم پیچ ها شود. به همین دلیل هارمونیک جریان از اهمیت بیشتری برخوردار است [۹]. پیش از این مطالعات بسیاری در زمینه تأثیر هارمونیک ها بر کاهش عمر مفید ترانسفورماتور صورت گرفته است [۹-۱۲]. با این وجود، هیچ کدام از آن ها خسارت مالی ناشی از این کاهش عمر را درنظر نگرفته است. در حالی که در این مقاله، نه تنها این خسارت مالی برآورد شده بلکه هزینه ناشی از ساخت و نصب فیلتر غیرفعال مناسب به منظور کاهش سطح هارمونیک ها نیز محاسبه شده است.

در این مقاله، هدف اصلی مقایسه اقتصادی میان خسارت مالی ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور و هزینه ساخت فیلتر برای کاهش سطح هارمونیک های جریان است. به این منظور ابتدا میزان کاهش عمر مفید سه ترانسفورماتور توزیع  $100 \text{ KVA}$ ،  $200 \text{ KVA}$  و  $315 \text{ KVA}$  محاسبه شده، سپس خسارت مالی ناشی از این کاهش عمر بر اساس روابط اقتصادی بیان شده، به دست آمده است. در نهایت، فیلتر غیرفعال LC به منظور کاهش هارمونیک های جریان طراحی و هزینه ساخت و نصب آن محاسبه شده است. نتایج مقایسه این هزینه با خسارت مالی تخمین زده شده نشان می دهد که فیلترگذاری از نظر اقتصادی مغرون به صرفه خواهد بود.

### ۳- تلفات ترانسفورماتورها

تلفات ترانسفورماتور به طور کلی به دو دسته تلفات بسیاری و تلفات بارداری تقسیم می شود:

ترانسفورماتور IEEE مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این جلسه پیشنهاد تهیه یک راهنمای استاندارد به منظور تخمین ظرفیت بارگذاری ترانسفورماتورهای تحت جریان هارمونیکی مطرح شد. سپس استاندارد IEEE C 57.110 با نام «روند توصیه شده به منظور تعیین ظرفیت ترانسفورماتور تحت جریان غیرسینوسی» به چاپ رسید. این روند میزان نیاز به کاهش جریان نامی در صورت وجود هارمونیک را تعیین می کند. کاهش در توان ظاهری ترانسفورماتور که Derating نامیده می شود، در بسیاری از مقالات بیان شده است [۳،۲].

هارمونیک در یک شبکه قدرت AC، به عنوان یک مؤلفه سینوسی از یک شکل موج متناوب که فرکانس آن مضرب صحیحی از فرکانس نامی و اصلی شبکه است، تعریف می شود. منابع عدمه هارمونیک؛ تجهیزات شبکه قدرت، بارهای صنعتی و بارهای خانگی می باشد. منابع هارمونیک شناخته شده توسط ۵۱۹:۱۹۹۲ IEEE شامل مبدل های قدرت، یکسو کنده ها، کوره های قوس الکتریکی، جبران کننده های توان راکتیو، اینورترهای تولید پراکنده، کترول فاز الکترونیکی، UPS ها، درایوهای PWM، سیکلوکانورترها و درایوهای کنترل سرعت است [۴،۶].

سه روش مورد استفاده برای تخمین محتویات بار هارمونیکی عبارتند از؛ ضریب Crest، ضریب هارمونیک (Drصد کل اعوجاج هارمونیکی - THD%) و ضریب K. دو مورد اول معمول ترین و پرکاربردترین روش ها برای تخمین بار هارمونیکی است، اگرچه فرکانس هارمونیک ها درنظر گرفته نمی شود و ضریب K نیز پیچیده ترین روش می باشد [۷].

افزایش اعوجاج هارمونیکی در ترانسفورماتور منجر به تلفات حرارتی بیشتر، کاهش عمر عایق و بالا رفتن دما می شود. استرس حرارتی عایقبندی، کاهش ضریب قدرت و ظرفیت، بارگذاری کمتر، خطای در سیستم های حفاظتی و رله ها و عدم عملکرد مناسب شبکه از دیگر عوایق آن می باشد [۸]. هارمونیک ولتاژ منجر به افزایش تلفات در هسته مغناطیسی ترانسفورماتور می شود، در حالی که هارمونیک جریان

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

کردن از هارمونیک های ولتاژ و محاسبه تلفات بی باری ترانسفورماتور بر اساس مؤلفه اصلی ولتاژ، تنها منجر به ایجاد یک خطای کوچک و قابل اغماض خواهد شد [۴، ۵].

### ۲-۳- تأثیر هارمونیک های جریان

در اکثر شبکه های برق، هارمونیک های جریان از اهمیت خاصی برخوردارند. این هارمونیک های جریان موجب ایجاد تلفات اضافی در سیم پیچ ها و سایر قسمت های ترانسفورماتور می شود. تلفات اهمی ترانسفورماتور تحت شرایط جریان هارمونیکی با در نظر گرفتن اثر پوسیت مقاومت، از رابطه (۶) به دست می آید [۱۳]:

$$P_{DC} = 3 \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h,rms}^2 R_{dc} \quad (6)$$

$$P_{DC} = 3 \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h,rms}^2 R_1 (C_0 + C_1 h^b + C_2 h^2)$$

در رابطه فوق، جریان مؤثر هارمونیک مرتبه  $h$ ،  $R_1$  مقاومت DC در فرکانس اصلی،  $C_0$ ،  $C_1$  و  $C_2$  و ضرایب اثر پوسیت می باشند. ( $C_0 + C_1 + C_2 = 1$ )

جدول ۱ - مقادیر ضرایب اثر پوسیت در ترانسفورماتورهای توزیع [۱۲]

| ضرایب اثر پوسیت | $C_0$        | $C_1$          | $C_2$          | $b$       |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|-----------|
| مقدار           | .۸۵ -<br>۰/۹ | .۰۰۵ -<br>۰/۰۸ | .۰۰۵ -<br>۰/۰۸ | .۰۹ - ۱/۴ |

تلفات جریان گردابی در سیم پیچ ها که توسط فلوئی الکترومغناطیسی تولید شده، متناسب با مجنور جریان مؤثر و فرکانس (مرتبه هارمونیک) تغییر می کند. بنابراین تحت شرایط بار هارمونیکی باید تلفات جریان گردابی  $P_{EC}$  و سایر تلفات سرگردان  $P_{OSL}$  در ضرایب تلفات هارمونیک  $F_{HL}$  و  $F_{HL-STR}$  ضرب شوند.

### ۱-۲-۳- ضرایب تلفات هارمونیکی

$F_{HL}$  و  $F_{HL-STR}$  شاخص های کلیدی برای نمایش تأثیر هارمونیک جریان بر تلفات جریان گردابی در سیم پیچ ها و

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (1)$$

به طوریکه  $P_T$  کل تلفات ترانسفورماتور،  $P_{NL}$  تلفات بی باری و  $P_{LL}$  تلفات بارداری است. تلفات بی باری مربوط به هسته آهنی ترانسفورماتور بوده و ناشی از پدیده هیسترزیس و جریان های گردابی می باشد. تلفات بارداری به صورت ذیل تعریف می شود:

$$P_{LL} = I^2 R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2)$$

به طوریکه  $I^2 R$  تلفات اهمی ترانسفورماتور ناشی از جریان بار و مقاومت DC سیم پیچ ها،  $P_{EC}$  تلفات جریان گردابی و  $P_{OSL}$  سایر تلفات سرگردان در بدنه، تانک، کلمپ ها و ساختمان ترانسفورماتور به جز سیم پیچ ها است.

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

کل تلفات سرگردان  $P_{TSL}$ ، با کم کردن تلفات اهمی از تلفات بارداری ترانسفورماتور که در هنگام آزمایش امپدانس اندازه گیری می شود، به دست می آید [۱۱]. لازم به ذکر است تاکنون هیچ روش آزمایشگاهی که بتوان تلفات جریان گردابی سیم پیچ ها و سایر تلفات سرگردان را از یکدیگر تفکیک نمود، ارائه نشده است [۴].

مطابق استاندارد IEEE برای ترانسفورماتورهای روغنی، تلفات جریان گردابی ۳۳٪ کل تلفات سرگردان درنظر گرفته می شود [۹]. کل تلفات سرگردان نیز بین ۲۰٪ - ۳۰٪ تلفات بارداری ترانسفورماتور می باشد [۱۳].

$$P_{EC} = 0.33 P_{TSL} \quad (4)$$

$$P_{OSL} = P_{TSL} - P_{EC} \quad (5)$$

### ۳- تأثیر هارمونیک های ولتاژ

براساس قانون فارادی، ولتاژ ترمینال سطح شار ترانسفورماتور را تعیین می کند. اندازه شار با هارمونیک ولتاژ به طور مستقیم و با مرتبه هارمونیک به طور معکوس متناسب است. بعلاوه، در اکثر شبکه های برق اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کمتر از ۵٪ بوده و اندازه هارمونیک های ولتاژ نیز در مقایسه با مؤلفه اصلی بسیار کوچک است. بنابراین صرف نظر

## بیست و ششمین گنفرانس بین‌المللی برق

ترین عامل تعیین کننده در میزان کاهش عمر مفید ترانسفورماتور، دمای نقطه داغ آن است که از رابطه (۱۲) و براساس دمای روغن، سیم پیچ‌ها و محیط محاسبه می‌شود. سپس ضریب پیری  $F_{AA}$  و عمر واقعی ترانسفورماتور تحت شرایط جریان هارمونیکی به دست می‌آید [۳،۹].

$$\theta_{TO} = \theta_{TO\text{-rated}} \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL\text{-rated}} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad (10)$$

$$\theta_g = \theta_{g\text{-rated}} \left( \frac{P_{LL}}{P_{LL\text{-rated}}} \right)^{0.8} \quad (11)$$

دمای نقطه داغ برابر است با:

$$\theta_H = \theta_A + \theta_{TO} + \theta_g \quad (12)$$

به طوریکه  $\theta_{TO}$  افزایش دمای روغن،  $\theta_g$  افزایش دمای نقطه داغ هادی سیم پیچ‌ها،  $\theta_A$  درجه حرارت محیط و  $\theta_H$  دمای نقطه داغ ترانسفورماتور است.

$$FAA = \exp \left( \frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right) \quad (13)$$

$$\text{Life (pu)} = 9.8 \times 10^{-18} e^{\left( \frac{15000}{\theta_H + 273} \right)} \quad (14)$$

$$(15)$$

$$\text{Real Life} = \text{Life(pu)} \times \text{Normal Insulation Life (year)}$$

$$(16)$$

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

### ۵- آنالیز اقتصادی

در این بخش بر اساس نتایج به دست آمده از روابط (۱۶)- (۱۴)، خسارت مالی ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور محاسبه می‌شود. به این منظور ترانسفورماتوری با عمر طبیعی  $L$  سال، قیمت خرید  $C$  تومان و نرخ بهره  $k$ -تورم در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که کاهش عمر مفید ترانسفورماتور  $\Delta L$  سال باشد، در سال  $\Delta L$  -  $L$  میزان ضرر مالی برابر خواهد بود با [۱۴]:

$$C = \Delta C_1 + \Delta C_2 \quad (17)$$

سایر تلفات سرگردان ترانسفورماتور است. این ضرایب را می‌توان بر اساس جریان اصلی یا جریان مؤثر نرماییزه کرد، که روابط آن به صورت ذیل خواهد بود:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=h_1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=h_1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (V)$$

$$F_{HL\text{-STR}} = \frac{\sum_{h=h_1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=h_1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (V)$$

در صورت وجود هارمونیک، تلفات جریان گردابی با ضریب  $F_{HL\text{-STR}}$  و سایر تلفات سرگردان با ضریب افزایش می‌یابد. مطابق نتایج بدست آمده از آزمایشات و پژوهش‌های مختلف، در نظر گرفتن ضرایب تلفات هارمونیکی به صورت آنچه در روابط (۷) و (۸) آمده، تنها برای ترانسفورماتورهایی صحیح است که ابعاد رشته هادی‌های آنها کمتر از ۳ میلی متر باشد. به علت پدیده اثر پوستی در رشته‌های هادی با ابعاد بیش از ۳ میلی متر، شار الکترومغناطیسی نمی‌تواند در فرکانس‌های بالا بطور کامل در رشته‌هادی سیم پیچی نفوذ کند. لذا برای رشته‌هایی با ابعاد بیش از ۳ میلی متر، درنظر گرفتن ضرایب به صورت فوق، منجر به جواب‌هایی با صحت کمتر خواهد شد [۴].

به این ترتیب تلفات بارداری ترانسفورماتور تحت شرایط جریان غیرسینوسی به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{LL} = P_{DC} + F_{HL} P_{EC} + F_{HL\text{-STR}} P_{OSL} \quad (9)$$

### ۴- عمر مفید ترانسفورماتور تحت بار هارمونیکی

طول عمر ترانسفورماتور به عمر عایق آن بستگی دارد و عمر عایقندی آن به اثرات و عوامل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی وابسته است. البته تأثیرات حرارتی از اهمیت بیشتری برخوردارند، به طوریکه حدود ۵۰٪ کاهش عمر مفید ترانسفورماتور به دلیل تنش‌های حرارتی ناشی از وجود جریان بار غیرخطی 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 مهم

## بیست و ششمین گنفرانس بین‌المللی برق

فرکانسی که در آن امپدانس خازن فیلتر برابر امپدانس سلف آن باشد را فرکانس تنظیم می‌نامند. کیفیت فیلتر غیرفعال پارامتری است که تیزی مشخصه فیلتر را تعیین می‌کند. فیلترهایی که دارای کیفیت بالا باشند مانند فیلترهای تک تنظیمه، فقط برای حذف یک هارمونیک خاص طراحی می‌شوند. ضریب عدم تنظیم، مقدار انحراف فرکانس تشديد فیلتر غیرفعال از فرکانس تنظیم نامی آن را نشان می‌دهد، در صنعت، ضریب عدم تنظیم را به نام De Tuned می‌شناسند و آن را به شکل در صدی بیان می‌کنند [۱۵].

$$P\% = \left( \frac{X_L}{X_C} \right) \times 100 \quad (21)$$

$$h = \frac{1}{\sqrt{P}} \quad (22)$$

مهم ترین پارامتر در طراحی فیلتر غیرفعال تک تنظیمه که اندازه خازن و سلف بر اساس آن تعیین می‌شود، ضریب قدرت شبکه است. در حقیقت هدف اصلی ابتدا اصلاح ضریب قدرت Power Factor می‌باشد که بر این اساس مقدار توان راکتیو مورد نیاز که باید در فرکانس اصلی ۵۰ هرتز به شبکه تزریق شود، محاسبه می‌گردد و به این ترتیب اندازه امپدانس خازن به دست می‌آید. در ادامه با توجه به رابطه بین شده می‌توان اندازه سلف را نیز محاسبه کرد.

$$Q_C = P [ \operatorname{tg} (\operatorname{Cos}^{-1} \operatorname{PF}^{\text{new}}) - \operatorname{tg} (\operatorname{Cos}^{-1} \operatorname{PF}^{\text{old}}) ] \quad (23)$$

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (24)$$

$$X_L = X_C \times P\% \quad (25)$$

بنابراین حذف هارمونیک، هدف دوم در فیلترگذاری است. هر فیلتر تک تنظیمه که برای حذف یک هارمونیک به خصوص طراحی شده، قادر است تا ۶۰٪ دامنه آن هارمونیک را کاهش دهد. از جمله مواردی که در این تحقیق لحاظ نشده، هارمونیک هایی است که از سمت اوپلیه (شبکه ۲۰KV) وارد ترانسفورماتور شده‌اند. در اینجا با این فرض که تمام هارمونیک‌ها از سمت ثانویه (صرف کننده) به

$\Delta C_1$  خسارت ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور خریداری شده به قیمت C توانان است. ترانسفورماتور خریداری شده باید L سال کارکرد مفید داشته باشد ولی تحت شرایط بار هارمونیکی،  $\Delta L$  سال از عمر مفید آن کاسته شده که این به روشنی نشان دهنده خسارت مالی  $\Delta C_1$  خواهد بود.

$$\Delta C_1 = \left( \frac{\Delta L}{L} \right) C \quad (18)$$

$\Delta C_2$  ضرر ناشی از خریداری زودتر از موعد ترانسفورماتور جدید است. در حقیقت ترانسفورماتور جدید  $\Delta L$  باید در سال  $L$  خریداری شود ولی در شرایط کنونی که سال زودتر جایگزینی صورت گرفته به این معناست که سرمایه  $\Delta L$  سال زودتر درگیر خرید ترانسفورماتور جدید شده است. بنابراین با در نظر گرفتن نرخ بهره - تورم k می‌توان محاسبه کرد که  $\Delta L$  سال زودتر درگیر کردن سرمایه، به اندازه  $\Delta C_2$  ضرر و زیان مالی درپی خواهد داشت.

$$\Delta C_2 = C (1+K)^L - C (1+K)^{L-\Delta L} \quad (19)$$

ارزش فعلی این خسارت مالی در کل به صورت زیر محاسبه می‌شود :

$$\Delta C = \Delta C_1 / (1+K)^{L-\Delta L} + \Delta C_2 / (1+K)^L \quad (20)$$

می‌توان در صد میزان خسارت را نیز از رابطه  $\frac{\Delta C}{C}$  بدست آورد [۱۴].

## ۶- فیلتر غیرفعال LC

حال بر اساس خسارت مالی محاسبه شده در بخش قبل و هزینه فیلترگذاری، می‌خواهیم مقررین به صرفه بودن نصب فیلتر را بررسی کنیم. به این منظور از فیلتر غیرفعال LC تک تنظیمه استفاده شده است.

فیلتر تک تنظیمه Harmonic Trap شامل یک سلف و یک خازن سری می‌باشد که با ترانسفورماتور به صورت موازی قرار می‌گیرد. این فیلتر از نوع فیلترهای غیرفعال بوده و از جمله پارامترهای آن می‌توان فرکانس تنظیم فیلتر را نام برد.

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

### ۷- تعیین و مقایسه هزینه کاهش عمر ترانسفورماتور با فیلترگذاری

در این بخش سه ترانسفورماتور  $V_{KVA} = 100$  و  $KV = 20$  سه فاز روغنی با ظرفیت های  $315$  و  $400$  (اداره امور برق)،  $200$  (بار خانگی گلشن) و  $50$  (مرکز تجاری زمرد) که مربوط به شبکه توزیع شهر مشهد می باشند، درنظر گرفته شده و اطلاعات هارمونیکی آن ها اندازه گیری شده است. به این ترتیب با استفاده از این اطلاعات و روابط بیان شده، افزایش تلفات، دما و عمر واقعی ترانسفورماتور تحت جریان هارمونیکی توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی و محاسبه شده است.

### ۷-۱- محاسبه تلفات و عمر واقعی ترانسفورماتور پست اداره امور برق

جدول شماره (۲) مشخصات ترانسفورماتور پست اداره برق ۵ را که تحت شرایط  $THD_i = 20\%$  است، نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصات ترانسفورماتور پست اداره برق ۵

|                            |       |       |
|----------------------------|-------|-------|
| توان نامی ترانسفورماتور    | ۱۰۰   | KVA   |
| ولتاژ اولیه                | ۲۰    | KV    |
| ولتاژ ثانویه               | ۴۰۰   | Volt  |
| فرکانس نامی                | ۵۰    | Hz    |
| جریان نامی اولیه           | ۲/۸۹  | Amp   |
| جریان نامی ثانویه          | ۱۴۴/۳ | Amp   |
| مقاومت DC                  | ۰/۰۴  | pu    |
| تلفات بی باری نامی         | ۰/۳۴  | Kw    |
| تلفات بارداری نامی         | ۲/۱۵  | Kw    |
| تلفات جریان گردابی نامی    | ۰/۲۲  | Kw    |
| سایر تلفات سرگردان نامی    | ۰/۴۳  | Kw    |
| متوسط دمای محیط            | ۳۲    | °C    |
| متوسط افزایش دمای روغن     | ۷۰    | °C    |
| متوسط افزایش دمای نقطه داغ | ۱۱۲   | °C    |
| طول عمر طبیعی عایق         | ۳۰    | years |

ترانسفورماتور وارد شده، فیلتر گذاری تنها در سمت ثانویه صورت گرفته است. علاوه بر مطالب فوق، محاسبه ولتاژ خازن (جهت جلوگیری از اضافه ولتاژ در اثر سری شدن بال) و محاسبه اضافه بار فیلتر نیز ضروری است.

$$V_C = \frac{V}{1-P} \quad (26)$$

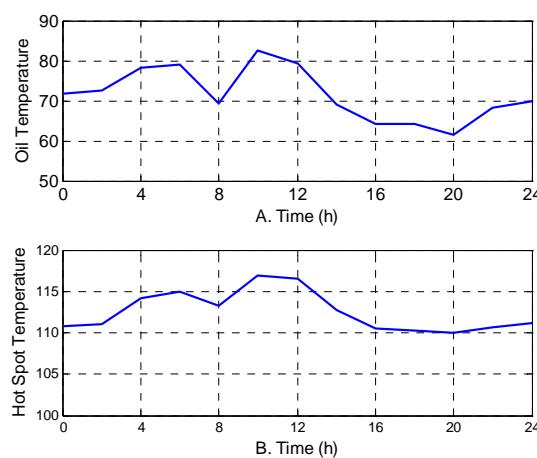
$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} V} \quad (27)$$

به منظور در نظر گرفتن اضافه بار در فیلترها، همواره مقدار ضریب عدم تنظیم  $P$  کمی بیشتر در نظر گرفته می شود، در مورد هارمونیک سوم  $P = 12\%$ .  $P = 12\%$  انتخاب می شود. اگر دقیقاً مقدار  $P = 11\%$  را لحاظ کنیم، فیلتر با جذب تمام مقادیر هارمونیک سوم دچار اضافه بار و خرابی یا حتی انفجار خواهد شد. اگر مقدار  $P$  را روی  $144$  هرتز عمل خواهد کرد، معناست که فیلتر روی فرکانس  $144$  هرتز عمل خواهد کرد، که این می تواند حاشیه اطمینان قابل قبولی باشد. نکته قابل توجه این است که همواره  $P$  باید مقداری بیشتر در نظر گرفته شود، به این ترتیب علاوه بر این که فیلتر بر هارمونیک ۳ پوشش کامل دارد، می تواند مقادیری از هارمونیک ۲ را نیز جذب کند. در حالی که اگر  $P$  کمتر لحاظ شود، فیلتر تنها مقداری از هارمونیک ۳ را می بیند و بیشتر بر هارمونیک ۴ پوشش خواهد داشت. در مورد هارمونیک های مرتبه ۵ و ۷ نیز مقدار  $P$  به ترتیب برابر  $5\%$  و  $2/5\%$  در نظر گرفته می شود [۱۵].

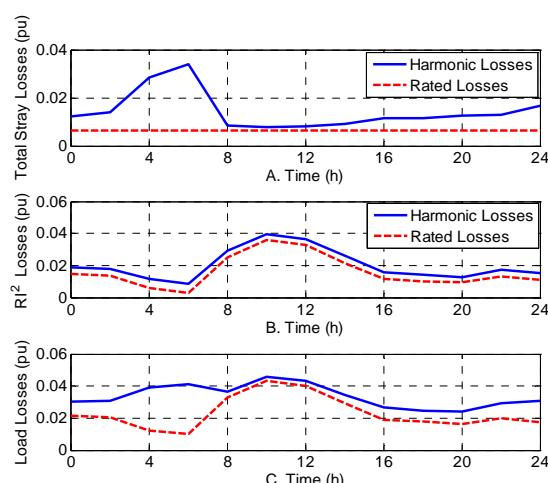
در این مقاله فیلتری به منظور حذف هارمونیک های جریان مرتبه ۳، ۵ و ۷ طراحی شده و هزینه ساخت و نصب آن محاسبه شده است. از سایر هارمونیک ها به دلیل اینکه دامنه آن ها در مقایسه با دامنه مؤلفه اصلی جریان بسیار کوچک است، صرف نظر شده و فرض بر این است که با نصب فیلتر، هارمونیک جریان در محدوده استاندارد قرار خواهد گرفت. سپس این هزینه با خسارت مالی ناشی از وجود هارمونیک که منجر به کاهش عمر مفید ترانسفورماتور گردیده، مقایسه شده است.

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

منحنی در شکل های (۲)، (۳) و (۴) رسم شده است. شکل (۲) منحنی های مربوط به تغیرات دمای روغن و دمای نقطه داغ ترانسفورماتور را در مدت ۲۴ ساعت نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش جریان هارمونیکی، دما نیز به شدت افزایش یافته و در ساعات پیک مصرف، به اوج خود رسیده است که اثرات آن بر کاهش عمر مفید ترانسفورماتور در شکل (۴) به وضوح مشاهده می شود.



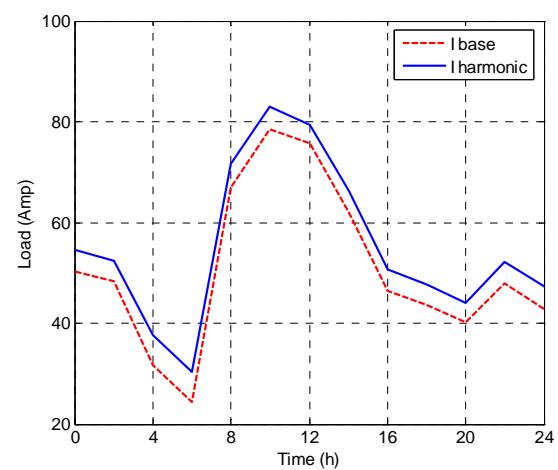
شکل ۲ - A. افزایش دمای روغن B. افزایش دمای نقطه داغ



شکل ۳ - A. کل تلفات سرگردان B. تلفات اهمی سیم پیچ ها  
C. تلفات بارداری ترانسفورماتور

در شکل (۳) منحنی ها در هر دو حالت، تحت شرایط بار هارمونیکی و عدم وجود جریان هارمونیکی، رسم شده اند. به این ترتیب به راحتی می توان میزان افزایش تلفات سرگردان، تلفات اهمی و کل تلفات بارداری ترانسفورماتور را در

شکل (۱) منحنی بار روزانه پست را در دو حالت وجود هارمونیک جریان و مؤلفه جریان اصلی، نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پیک بار پست اداره برق ۵ که بار اداری است، در طول روز و عمدتاً بازه ۸ صبح تا ساعت ۱۶ بعدازظهر رخ داده و در سایر ساعات با توجه به تعطیلی اداره، جریان بار مصرفی به صورت قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. این منحنی چگونگی تغیرات و افزایش جریان هارمونیکی را در مدت ۲۴ ساعت به روشنی نشان می دهد.



شکل ۱ - منحنی بار روزانه پست اداره امور برق ۵

بر اساس روابط بیان شده و با توجه به مقادیر هارمونیک های جریان از مرتبه ۲ تا ۱۵؛ تغیرات دمای روغن و دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، تلفات اهمی سیم پیچ ها با درنظر گرفتن اثر پوستی مقاومت، ضرایب  $F_{HL-STR}$  و  $F_{HL}$  در بازه زمانی ۲۴ ساعت محاسبه شده و ضرایب در مقدار تلفات جریان گردابی نامی و سایر تلفات سرگردان نامی ترانسفورماتور ضرب شده است.

$$P_{TSL-rated} = 30\% P_{LL} = 0.3 \times 2150 = 645 \text{ W}$$

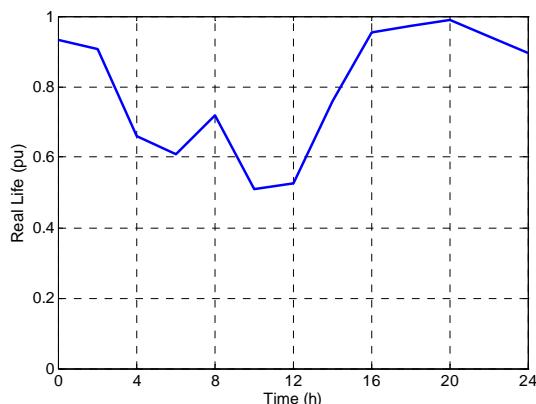
$$P_{EC-rated} = 0.33 \times 645 = 220 \text{ W}$$

$$P_{OSL-rated} = 0.67 \times 645 = 430 \text{ W}$$

در تمام محاسبات، هارمونیک های جریان، دمای روغن و دمای محیط به صورت متغیر در طول ۲۴ ساعت لحاظ شده است. در نهایت مجموع تلفات بارداری و عمر واقعی ترانسفورماتور بر حسب پریونیت محاسبه و نتایج به صورت

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

ترانسفورماتور نسبت به تلفات نامی به شدت افزایش یافته که این امر منجر به کاهش عمر مفید ترانسفورماتور شده است. شکل (۴) تغییرات عمر واقعی ترانسفورماتور را تحت شرایط بار هارمونیکی در بازه زمانی ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان با میانگین گیری در این مدت، عمر واقعی ترانسفورماتور را  $0.8/8$  پریونیت که برابر با ۲۴ سال است، به دست آورد. به این ترتیب اثرات مخرب وجود بار هارمونیکی بر افزایش تلفات، دما و کاهش ۶ سال از عمر مفید این ترانسفورماتور به روشنی مشاهده می‌شود.



شکل (۴)- عمر مفید ترانسفورماتور

### ۲-۷- محاسبه خسارت مالی ناشی از کاهش عمر ترانسفورماتور

حال با استفاده از روابط بیان شده در بخش آنالیز اقتصادی و با توجه به میزان کاهش عمر مفید ترانسفورماتور به  $0.8/8$  پریونیت، می‌توان خسارت مالی ناشی از آن را محاسبه نمود. نرخ بهره و تورم بر اساس میانگین گیری از مقادیر اعلام شده توسط بانک مرکزی در طی سال‌های اخیر به دست آمده است.

جدول ۴- اطلاعات لازم برای محاسبه خسارت مالی

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| قیمت ترانسفورماتور (C)                | ۳۵۰۰۰۰۰ ریال |
| کاهش عمر ترانسفورماتور ( $\Delta L$ ) | ۶ سال        |
| (نرخ بهره (%))                        | ۲۰ %         |
| (نرخ تورم (%))                        | ۱۲ %         |

صورت وجود جریان غیرسینوسی مشاهده کرد.

با توجه به اینکه ضرایب  $F_{HL}$  و  $F_{HL-STR}$  بر اساس نسبت دامنه هارمونیک‌های جریان به دامنه جریان اصلی محاسبه می‌شود، در ساعتی که بار مصرفی کاهش یافته و دامنه جریان اصلی کوچک است، اندازه ضرایب بزرگ شده و درنتیجه حاصلضرب آن‌ها در تلفات نامی نیز منجر به افزایش قابل توجهی در تلفات سرگردان ترانسفورماتور شده است. بعلاوه، در ساعت‌هایی که جریان مصرفی افزایش یافته، بارگذاری ترانسفورماتور بیشتر شده و افزایش تلفات اهمی را در پسی دارد.

جدول ۳- مقادیر ضرایب  $F_{HL}$ ،  $F_{HL-STR}$ ، تلفات بارداری ترانسفورماتور تحت جریان سینوسی و غیرسینوسی در مدت زمان ۲۴ ساعت

| زمان (ساعت) | $F_{HL}$ | $F_{HL-STR}$ | تلفات جریان سینوسی (pu) | تلفات جریان غیرسینوسی (pu) |
|-------------|----------|--------------|-------------------------|----------------------------|
| ۰۰:۰۰       | ۳/۳۵۳۶   | ۱/۱۶۳۶       | ۰/۰۲۱۳                  | ۰/۰۲۹۸                     |
| ۰۰:۰۲       | ۴/۰۲۷۱   | ۱/۱۸۷۶       | ۰/۰۲۰۳                  | ۰/۰۳۰۴                     |
| ۰۰:۰۴       | ۹/۸۸۱۷   | ۱/۵۶۳۵       | ۰/۰۱۲۴                  | ۰/۰۳۸۹                     |
| ۰۰:۰۶       | ۱۲/۱۳۱۴  | ۱/۶۸۶۵       | ۰/۰۱                    | ۰/۰۴۰۸                     |
| ۰۰:۰۸       | ۱/۶۴۱۳   | ۱/۰۵۳۱       | ۰/۰۳۲۹                  | ۰/۰۳۶                      |
| ۰۰:۱۰       | ۱/۳۹۲۶   | ۱/۰۳۱۹       | ۰/۰۴۳۴                  | ۰/۰۴۵۶                     |
| ۰۰:۱۲       | ۱/۴۵۲۳   | ۱/۰۳۹۸       | ۰/۰۴۰۱                  | ۰/۰۴۲۷                     |
| ۰۰:۱۴       | ۲/۰۲۹۵   | ۱/۰۹۳۷       | ۰/۰۲۹۱                  | ۰/۰۳۳۹                     |
| ۰۰:۱۶       | ۲/۹۴۹۹   | ۱/۱۵۵۸       | ۰/۰۱۸۹                  | ۰/۰۲۶۱                     |
| ۰۰:۱۸       | ۳/۰۱۷۹   | ۱/۱۳۲۴       | ۰/۰۱۷۶                  | ۰/۰۲۴۳                     |
| ۰۰:۲۰       | ۳/۵۰۰۶   | ۱/۱۴۵۶       | ۰/۰۱۶۲                  | ۰/۰۲۳۹                     |
| ۰۰:۲۲       | ۳/۵۳۶    | ۱/۱۶۹۱       | ۰/۰۱۹۸                  | ۰/۰۲۸۷                     |
| ۰۰:۲۴       | ۵/۱۵۴۷   | ۱/۲۵۹۴       | ۰/۰۱۷۴                  | ۰/۰۳۰۵                     |

جدول (۳) مقادیر ضرایب  $F_{HL}$ ،  $F_{HL-STR}$ ، کل تلفات بارداری ترانسفورماتور تحت جریان سینوسی و غیرسینوسی را در مدت زمان ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضرایب، تلفات هارمونیکی

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

حالت با در نظر گرفتن  $\Delta C_2$  و بدون آن انجام شده تا تفاوت بزرگ این دو مقدار به روشنی مشاهده شود.

### ۳-۷- محاسبه فیلتر غیرفعال LC

در این بخش به منظور حذف و یا کاهش سطح هارمونیک های جریان مرتبه ۳ و ۵ و ۷ از فیلتر LC تک تنظیمه استفاده شده است. با توجه به روابط بیان شده در بخش فیلتر، اندازه خازن و سلف به این ترتیب محاسبه می شود:

$$PF^{\text{old}} = ۰/۸ \rightarrow PF^{\text{new}} = ۰/۹۶$$

با استفاده از این رابطه می توان اندازه توان راکتیو مورد نیاز به منظور اصلاح ضریب قدرت را محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} Q_C &= 80 [\operatorname{tg}(\operatorname{Cos}^{-1} 0.96) - \operatorname{tg}(\operatorname{Cos}^{-1} 0.8)] = 35^{\text{KVAR}} \\ X_C &= \frac{400^2}{35000} = 4.57 \Omega \\ I_C &= \frac{35000}{\sqrt{3} 400} = 50 \text{ A} \rightarrow I_C = I_L = 50 \times 1.1 = 55 \text{ A} \\ V_C &= \frac{400}{1-0.12} = 455 \text{ V} \end{aligned}$$

با درنظر گرفتن اضافه بار، جریانی که لازم است سلف و خازن تحمل کند،  $1/1$  برابر جریان نامی خازن فرض می شود. به دلیل قرار گرفتن سلف و خازن در کنار هم امکان بروز تشدید وجود دارد ولی در اینجا به علت بزرگ بودن اندازه مقاومت در شبکه توزیع و خاصیت میراکنندگی آن و همچین کوچک بودن اندازه هارمونیک های جریان، از اثر تشدید صرف نظر شده است.

هارمونیک ۳ :

$$X_{L3} = 4.57 \times 0.12 = 0.55 \rightarrow L_3 = \frac{0.55}{100\pi} = 1.75 \text{ mH}$$

هارمونیک ۵ :

$$X_{L5} = 4.57 \times 0.05 = 0.23 \rightarrow L_5 = \frac{0.55}{100\pi} = 0.73 \text{ mH}$$

هارمونیک ۷ :

$$X_{L7} = 4.57 \times 0.025 = 0.114 \rightarrow L_7 = \frac{0.55}{100\pi} = 0.36 \text{ mH}$$

با توجه به مقادیر محاسبه شده برای سلف و خازن و قیمت آن ها، هزینه لازم برای ساخت و نصب فیلتر، ۹۰۰۰۰۰ ریال می باشد. خسارت مالی ناشی از کاهش عمر

بر اساس رابطه زیر می توان نرخ بهره - تورم k را محاسبه نمود.

$$k = \left( \frac{1+i}{1+f} \right) - 1 = \left( \frac{1.2}{1.12} \right) - 1 = 0.07 \rightarrow k = 7\%$$

$$\text{ریال } \Delta C_1 = \left( \frac{6}{30} \right) \times 35000000 = 7000000$$

$$\text{ریال } \Delta C_1 / (1+K)^{L-\Delta L} = \frac{7000000}{1.07^{24}} = 1380000$$

خسارت مالی ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور فعلی و ارزش آن پس از گذشت ۲۴ سال با توجه به نرخ بهره - تورم

$$\Delta C_1 / C \times 100 = \frac{1380000}{35000000} \times 100 = 3.95 \%$$

بدون در نظر گرفتن  $\Delta C_2$  خسارت مالی تنها ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور فعلی خواهد بود.

$$\Delta C_2 = 35000000 \times [1.07^{30} - 1.07^{24}]$$

$$\text{ریال } = 88900000$$

$$\text{ریال } \Delta C_2 / (1+K)^L = \frac{88900000}{1.07^{30}} = 11680000$$

بخشی از سرمایه که ۶ سال زودتر در گیر خرید ترانسفورماتور جدید شده و ارزش مالی آن پس از گذشت ۳۰ سال بر اساس نرخ بهره - تورم

$$\text{ریال } \Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2 = 13000000$$

$$\Delta C / C \times 100 = 38 \%$$

همانطور که مشاهده می شود، بخش بزرگی از خسارت مالی  $\Delta C$  مربوط به مقدار  $\Delta C_2$  است.  $(\Delta C_1 \gg \Delta C_2)$  در حقیقت اگر تنها ضرر و زیان ناشی از کاهش عمر مفید ترانسفورماتور فعلی در نظر گرفته شود و به این نکته که با جایگزینی و خریداری زودتر از موعد ترانسفورماتور جدید، مقدار زیادی از سرمایه به مدت ۶ سال زودتر در گیر شده، توجه نشود، میزان خسارت بسیار کمتر به نظر خواهد آمد. در حالی که اگر سود سرمایه در این مدت محاسبه گردد، مشاهده می کنیم که عملاً میزان خسارت بسیار بیشتر از مقدار  $\Delta C_1$  (۱۳۸۰۰۰ ریال) خواهد بود، که در علم اقتصاد به آن «هزینه فرصلت» گفته می شود. در این مقاله، محاسبات در هر دو

## بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

بارگذاری ترانسفورماتور و جریان مصرفی در ساعت مختلف شبانه روز، میزان افزایش تلفات اهمی و سرگردان می تواند متغیر باشد. در ساعتی که جریان مصرفی بیشتر است، تلفات اهمی بیشتر شده و بالعکس، در ساعتی که جریان مصرفی کمتر است، تأثیر تلفات سرگردان بیشتر خواهد بود. همچنین از نتایج به دست آمده مشاهده می شود، ترانسفورماتوری که عمر طبیعی آن ۳۰ سال بوده، تحت شرایط بار هارمونیکی به ۲۴ سال کاهش یافته است. خسارت مالی ناشی از آن برابر ۱۳۰۰۰۰۰ ریال محاسبه شده و با هزینه فیلترگذاری به منظور حذف هارمونیک های جریان که برابر ۹۰۰۰۰۰ ریال می باشد، مقایسه شد. فیلتر نه تنها تا حد زیادی منجر به کاهش تلفات هارمونیکی می شود، بلکه دارای فواید ناشی از نصب خازن و اصلاح ضریب قدرت نیز می باشد. نکته قابل توجه این است که علاوه بر THD باید عوامل دیگری نظری طرفیت و قیمت ترانسفورماتور را نیز لحاظ کرد. این مقایسه نشان می دهد، در مورد پست های اداره برق ۵، زمرد و گلشن، فیلترگذاری از نظر اقتصادی مفروض به صرفه خواهد بود.

مفید ترانسفورماتور به دلیل وجود بار هارمونیکی، ۱۳۰۰۰۰۰ ریال محاسبه شده بود. می توان به روشنی مشاهده کرد که فیلتر گذاری به منظور حذف هارمونیک های جریان از نظر اقتصادی مفروض به صرفه خواهد بود. علاوه براین، فیلتر اثرات مشتبی در افزایش میزان ضریب توان نیز دارد. حال کلیه محاسبات انجام شده در بخش (۷) را برای دو ترانسفورماتور توزیع دیگر، تکرار کرده و نتایج در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵)- نتایج شبیه سازی پست زمرد و پست گلشن

| نام ترانسفورماتور   | پست زمرد    | پست گلشن    |
|---------------------|-------------|-------------|
| ظرفیت               | ۳۱۵ KVA     | ۲۰۰ KVA     |
| THD <sub>i</sub>    | ۱۶ %        | ۱۰ %        |
| کاهش عمر $\Delta L$ | ۵/۵ سال     | ۴ سال       |
| قیمت ترانسفورماتور  | ۶۵۰۰۰۰ ریال | ۵۳۰۰۰۰ ریال |
| خسارت مالی          | ۲۲۵۰۰۰ ریال | ۱۳۸۰۰۰ ریال |
| هزینه فیلتر         | ۹۵۰۰۰ ریال  | ۱۱۰۰۰۰ ریال |

## ۱۱- مراجع

- [۱] Damnjanovic, G. Feruson, "The Measurement and Evaluation of Distribution Transformer Losses under Non-Linear Loading, "IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, pp.1416-1419.
- [۲] IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-sinusoidal Load Currents, IEEE Std.C.57.110, 1998
- [۳] Mohammad Yazdani Asrami, Mohammad Mirzaie, Amir Abbas Shayegani Akmal, "Investigation on Impact of Current Harmonic Contents on the Distribution Transformer Losses and Remaining Life " IEEE International Conference on Power and Energy, 2010.
- [۴] محمد بیزدانی اسرمی، محمد میرزایی، سید اصغر غلامیان، " تعیین تلفات و تخمین عمر ترانسفورماتورها تحت بار هارمونیکی به دو روش تحلیلی و شبیه سازی اجزاء محدود " بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق ایران، ۱۳۸۸

همانطور که مشاهده می شود در مورد پست زمرد و گلشن نیز اگرچه THD کاهش یافته است ولی به دلیل افزایش ظرفیت ترانسفورماتور و بالا رفتن قیمت آن، باز هم فیلترگذاری از لحاظ اقتصادی مفروض به صرفه خواهد بود. بنابراین THD به تنهایی نمی تواند مبنای درستی برای مقایسه و تصمیم گیری باشد و باید عوامل دیگری نظیر ظرفیت و قیمت ترانسفورماتور را نیز در نظر گرفت.

## ۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر بارهای غیرخطی و هارمونیک های جریان بر تلفات، دما و عمر مفید ترانسفورماتور بررسی و شبیه سازی شده است. نمودارهایی در هر دو حالت جریان سینوسی و بار هارمونیکی رسم و میزان افزایش تلفات اهمی، تلفات سرگردان و دمای ترانسفورماتور در مدت زمان ۲۴ ساعت محاسبه شد. نتایج نشان می دهد بر اساس میزان

## بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

فیلترهای غیرفعال بر هارمونیک ها در شبکه برق منطقه ای غرب "بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق ایران، ۱۳۸۹.

[۵] استاندارد صنعت برق ایران-مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق)، سازمان مدیریت تولید و انتقال نیروی برق ایران (توانیز)، ۱۳۸۱

[۶] Linden W. Pierce, " Transformer design and application considerations for non sinusoidal load currents" *IEEE Trans.Industry*.

[۷] Massey, G.W, "Estimation Methods For Power System Harmonic Effects On Power Distribution Transformers," *IEEE Transactions on Industry Applications*. March-April.Kansas City, MO: IEEE, 485–489, 1994.

[۸] Salih, M., Hadi, M. and Yildirmaz, G, "The Effect Of Harmonic Components Upon Transformer Active Losses In Case Of (Non) Sinusoidal Sources And (Non) Linear Loads," Turkey: *IEEE*, 741- 745, 2000.

[۹] D.M. Said, K.M. Nor, M.S. Majid, "Analysis of Distribution Transformer Losses and Life Expectancy using Measured Harmonic Data ", *IEEE*, 2010.

[۱۰] Anthio Carlos Delaiba, Jose Carlos de Oliveira, Anderson L. A. VilaGa, Jose Roberto Cardoso, " THE EFFECT OF HARMONICS ON POWER TRANSFORMERS LOSS OF LIFE ",*IEEE*, 1996.

[۱۱] A.Elmoudi, M.Lehtonen, Hasse Nordman, " Effect of Harmonics on Transformers Loss of life ", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006.

[۱۲] M.H.Amrrollahi,S.Hassani, "Determination losses and estimate life of distribution transformers with three computational, measurement and simulation methods, despite harmonic loads" *IEEE*.

[۱۳] Li Pei, Li Guodong, Xu Yonghai, Yao Shujun, "Methods Comparation and Simulation of Transformer Harmonic Losses ", *IEEE*, 2010.

[۱۴] Jose Policarpo, G.de Abreu, Alexander Eigeles Emanuel, " Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and Its Estimated Cost ", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 2002.

[۱۵] محمدرضا فروردین، "اصلاح ضربی قدرت با خازن در شبکه توزیع هارمونیکی" پایان نامه دوره کارشناسی برق، دانشکده و آموزشکده فنی مشهد، زمستان ۸۹.

[۱۶] محمد حسین نصری، سعید نجفی، رضا پورآقاپا، "بررسی تأثیر خازن های تصویح ضربی توان و