

کاربرد حسگر فیبر نوری در تشخیص تخلیه جزئی

محسن قراط^۱، مهدی غفاری^۲، اعظم لایقی^۳، گئورگ قره پتیان^۲ و حمید لطیفی^۲
شرکت مدیریت شبکه برق ایران^۱ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر^۲ - دانشگاه شهید بهشتی^۳***

یکی از مواردی که ترانسفورماتور را دچار خطر می‌کند تخلیه جزئی است. عوارض ناشی از تخلیه جزئی عبارتند از: تشعشعات نورانی، امواج صوتی، فرایند شیمیایی، افزایش ناگهانی $tg\delta$ و پالس‌های الکتریکی. با بررسی و اندازه‌گیری هر یک از عوارض مذکور می‌توان به شدت و میزان تخلیه جزئی پی برد.

به دلیل مزیت‌های ذاتی که در حسگرهای فیبر نوری برای شناسایی عوامل مختلفی از جمله: پارامترهای فیزیکی و شیمیایی، اندازه کوچک، قابلیت انتقال نور، حساسیت بالا، پاسخ فرکانسی وسیع و مصونیت از نویز EMI وجود دارد استفاده از این حسگرها به مراتب بهتر است.

با توجه به افزایش کارایی این حسگرها در پایش ترانسفورماتور انواع مختلف آن ارایه شده است. کارایی آن سبب شده است که در ایران نیز جهت کاربردی سازی این روش اقدام شود. ساختارهای مختلف این حسگرها در شناسایی و مکان‌یابی تخلیه جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. حسگرهای فابری پرو به دلیل ساختار، قرارگیری در داخل ترانسفورماتور آسانتر بوده و به دلیل ابعاد کوچکتر آنها نسبت به حسگرهای دیگر نسبت به پارامترهایی غیر از آکوستیک حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهند. همچنین با جایگذاری این نوع حسگرها در نقاط مختلف ترانسفورماتور امکان مکان‌یابی تخلیه جزئی دقیق تر می‌باشد. این دقت بر اساس قرارگیری حسگر در داخل ترانسفورماتور، عدم نویزپذیری نسبت به نویزهای موجود در ترانسفورماتور، افزایش تعداد حسگر و کاهش وابستگی محاسبات مکان‌یابی ناشی از انعکاس امواج آکوستیک می‌باشد.

در این مقاله پس از مقدمه خصوصیات روش صوتی نشان داده شده است. در بخش ۳ به روابط فشار بر روی فیبر نوری اشاره شده و در بخش‌های بعد به انواع ساختار حسگر فیبر نوری و تقویت سیگنال‌های مرتبط با آن پرداخته شده است. در انتها نیز شبیه سازی‌های مربوط به ساختار فابری

چکیده — در حال حاضر سیستم‌های پایش مختلف در ترانسفورماتورهای قدرت وجود دارند. امروزه حسگرهایی با استفاده از پیزوالکتریک جهت شناسایی و مکان‌یابی تخلیه جزئی کاربردی شده است. در این مقاله به انواع مختلف حسگر فیبر نوری در دریافت سیگنال‌های صوتی تخلیه جزئی پرداخته شده است. حسگرهای ماخ زندر، فابری پرو و ساگاناک ساختارهایی هستند که تحقیقات زیادی در این زمینه در مورد آنها انجام می‌شود. با توجه به ضعیف بودن سیگنال‌های صوتی معمولاً نیاز به تقویت دارند. تقویت سیگنال در سه مرحله صوتی، نوری و الکتریکی قابل پیاده سازی است. حسگر فابری پرو به جهت ساخت و جایگذاری مناسب تر آن در ترانسفورماتور نسبت به حسگرهای دیگر فیبر نوری، جهت شبیه سازی و بررسی انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی حسگر فیبر نوری - تقویت کننده - صوت

۱. مقدمه

از کار افتادن ترانسفورماتورها، شبکه‌های برق را با ریسک بزرگی مواجه می‌کند. علاوه بر این در سال‌های اخیر با مطرح شدن مفاهیم جدیدی نظیر شبکه‌های هوشمند و تجدید ساختار یافته، تداوم انتقال انرژی، اهمیت دوچندان یافته است.

نظارت بر عملکرد قسمت‌های مختلف تجهیزات و شرایط لحظه‌ای اجزا مختلف به منظور تشخیص به موقع عوامل موثر در ایجاد خطا و در نتیجه جلوگیری از به وجود آمدن عیب را پایش می‌گویند. در حال حاضر سیستم‌های پایش مختلف در ترانسفورماتورهای قدرت وجود دارند. [۱]

مدوله می شود که می توان آن را در چهار دسته طبقه بندی کرد: پلارسنجی، تداخل سنجی، شدت سنجی، ماهیت سنجی [۴].

از بین روش های فوق، از تکنیک تداخل سنجی در آشکارسازی تخلیه-های جزئی توسط حسگرهای فیبر نوری استفاده می گردد. در این روش، اشعه نوری منتشر شده از طریق فیبر بواسطه اغتشاش و آشفستگی ناشی از امواج فشاری فراصوتی تولید شده توسط تخلیه-جزئی، مدوله فاز انجام می-شود. ضریب مدولاسیون به پارامترهای مختلفی نظیر ضریب شکست فیبر، تطبیق امپدانس صوتی ماده در تماس با فیبر و تغییر در طول فیبر بستگی دارد [۵]. شاخص انکسار می تواند پارامتر حساس در فیبر نوری باشد. به تغییر شاخص انکسار به دلیل فشار اعمالی آن فشار نوری گفته می شود. تغییر در فاکتور $\frac{1}{n^2}$ در اثر فشار اعمالی برابر است با [۶]:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{\sigma} p_{ij} S_j \quad (1)$$

P_{ij} کشش فشار نوری می باشد. اگر فیبر از یک جنس هموزن باشد کشش فشار نوری برابر است با:

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

بردار فشار S_j ، برای فشار طولی ε برابر است با:

$$S_j = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ -v\varepsilon \\ -v\varepsilon \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

تنش در دو محور عرضی وارد می شود (قطر فیبر)، که به موجب تنش طولی با نسبت پواسون v است. با حل (۱)، (۲) و (۳) خواهیم داشت:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{2,3} = \varepsilon(1-v)p_{12} - v\varepsilon p_{11} \quad (4)$$

تغییر در $\frac{1}{n^2}$ سبب تغییر در شاخص انکسار Δn می شود [۷]:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{2,3} = -2 \frac{\Delta n}{n^3} \quad (5)$$

تغییر در شاخص انکسار به دلیل فشار طولی برابر است با:

۲. روش صوتی

این روش بر مبنای دریافت و ثبت سیگنال های صوتی ناشی از تخلیه-جزئی و آنالیز آن استوار می باشد و علاوه بر آشکارسازی، قابلیت مکان یابی تخلیه-جزئی را نیز دارا می باشد. روش صوتی علاوه بر سرعت بالا دارای دقت قابل قبول و هزینه پایینی نیز است. از محدودیت های این روش می توان به ضعیف بودن سیگنال های صوتی تولیدی توسط تخلیه-جزئی و ماهیت پیچیده صوت و انتشار آن اشاره کرد. علاوه بر این در محیط ترانسفورماتور نویزهای صوتی داخلی و خارجی نظیر نویز ناشی از هسته ترانسفورماتور و یا نویز ناشی از برخورد شن یا قطره های باران به بدنه تانک ترانسفورماتور وجود دارند. این روش بصورت برخط و با ماهیت غیر مخرب و غیر هجومی نیز قابل اجرا است [۲].

سیستم های آشکارساز صوتی را در حالت کلی می توان به دو دسته سیستم های آشکارساز خارجی و داخلی طبقه بندی کرد. در سیستم های آشکارساز صوتی خارجی، از حسگرهای صوتی نصب شده بر روی بدنه تانک ترانسفورماتور استفاده می شود حسگرهای صوتی پیزوالکتریک (PZT) از این نوع می باشند. اما این روش دارای محدودیت هایی می باشد که از آن جمله می توان به ماهیت پیچیده انتشار امواج صوتی برخوردی به دیواره داخلی محفظه ترانسفورماتور و تضعیف و میرایی امواج صوتی اشاره کرد. این محدودیت ها در کنار مزایا و برتری های این روش، زمینه را برای استفاده از سیستم های آشکارسازی داخلی مهیا کرد که سبب تولید و ساخت حسگرهای صوتی فیبرنوری با قابلیت استقرار در درون ترانسفورماتور گردید [۳].

۳. سیستم های حسگری صوتی فیبر نوری

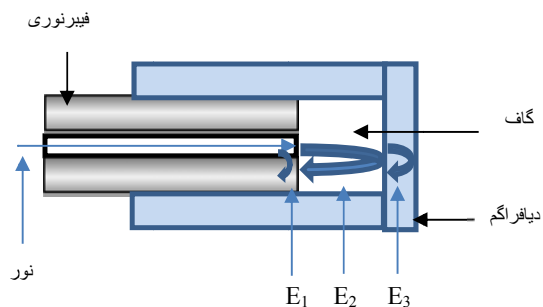
اساس عملکرد حسگرهای فیبر نوری مدولاسیون نور می باشد. بر هم کنش امواج صوتی در فرکانس های صوتی و فراصوتی با فیبر نوری باعث اعمال فشار به فیبر نوری می گردد. در محدوده فرکانسی فراصوتی، فشار صوتی روی فیبر در امتداد فیبر یکنواخت و دارای تقارن محوری است. حساسیت فشار فیبرها تحت تاثیر ضرائب الاستیک و الاستو اپتیک فیبر شیشه ای و ضرائب الاستیک روکش فیبر است. نور به روش های مختلفی در فیبر

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_{2,3} \quad (6)$$

$$= -\frac{1}{2} n^3 [\varepsilon(1-v)p_{12} - v\varepsilon p_{11}]$$

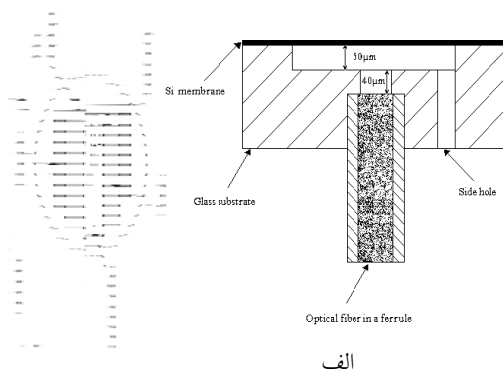
۳.۱. حسگر فابری پرو

در حسگر تداخل سنجی فابری پرو سه بازتاب وجود دارد که در شکل ۱ با نام‌های E1 ناشی از انتهای فیبر، E2 سطح داخلی دیافراگم و E3 سطح خارجی دیافراگم نشان داده شده است. بر اثر فشار بر دیافراگم جابجایی در آن رخ می‌دهد و سبب ایجاد تداخل می‌شود [۸-۱۱].

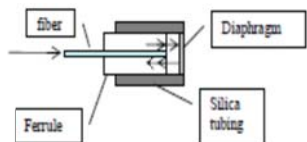


شکل ۱: شماتیک ساختار حسگر فابری-پرو دیافراگمی

دیافراگم دارای ضخامتی به میزان d و شعاع r است. گاف که به معنای جداکننده دو محیط است در اینجا به فضای پشت دیافراگم گفته می‌شود که از هوا پر شده است که طول آن برابر L است. در این ساختار صفحه دیافراگمی با اعمال فشار ناشی از تخلیه جزئی امکان جابجایی در حسگر را ایجاد می‌نماید که این امر موجب تغییر در طول گاف فابری پرو فیبرنوری می‌شود.



ب



در این شرایط فاز تداخل می‌کند. در یک فیبر نوری با طول L ، نور که از آن عبور می‌کند برابر است با $[V]$:

$$\Phi = \beta L \quad (7)$$

در این رابطه β ثابت انتشار بوده و برابر است با:

$$\beta = n_{eff} k_0 \quad (8)$$

n_{eff} متوسط شاخص انکسار هسته فیبر و لایه روکش بوده و k_0 نیز برابر $\frac{2\pi}{\lambda}$ است. برای استفاده از فیبر به عنوان حسگر به عنوان مثال فشار، برای تغییر در تداخل باید تغییر در فاز ایجاد شود. با استفاده از (۷) تغییر در فاز $\Delta\Phi$ به موجب تغییر در طول ΔL و یا تغییر در ثابت انتشار $\Delta\beta$ رخ می‌دهد. بنابراین:

$$\Delta\Phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta \quad (9)$$

تغییر در طول بواسطه فشار برابر است با:

$$\Delta L = \varepsilon L \quad (10)$$

تغییر در ثابت انتشار بوسیله تغییر در شاخص انکسار و یا تغییر در قطر فیبر ایجاد می‌شود:

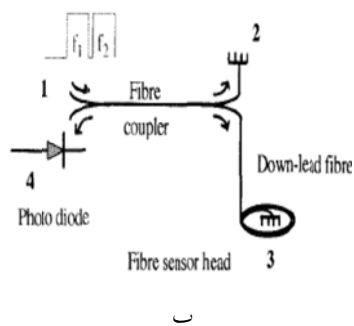
$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial\beta}{\partial D} \Delta D \quad (11)$$

تغییر در شاخص انکسار به دلیل فشار طولی در (۶) نشان داده شده است. با مشتق گیری از β نسبت به n در رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial\beta}{\partial n} = k_0 = \frac{\beta}{n} \quad (12)$$

مشتق گیری نسبت به قطر به دلیل تغییرات بسیار اندک مخصوصاً در فیبر تک حالت 1550nm در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین رابطه کلی (۱۳) تغییرات در فاز را نشان می‌دهد.

$$\Delta\Phi = \varepsilon L\beta - \frac{\varepsilon L}{2} n^3 [(1-v)p_{12} - v\varepsilon p_{11}] \quad (13)$$



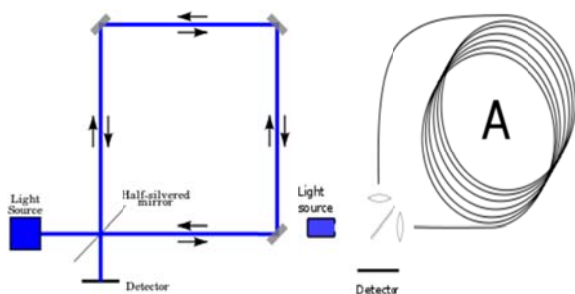
ب

شکل ۳: شماتیک حسگرهای مختلف ماخ زندر

در روش ماخ زندر به دلیل طول زیاد فیبر که نقش حسگر را دارد حساسیت نسبت پارامترهای مختلف زیاد می باشد. حساسیت زیاد این حسگر در دریافت سیگنال تخلیه جزئی گرچه مناسب است ولی پارامترهایی مانند دما، نور، نویز صوتی بر عملکرد این حسگر تاثیر منفی زیادی دارد. با ایجاد سیم پیچ های متفاوت به عنوان حسگر دامنه دید سیگنال زیاد شده است.

۳,۳. تداخل سنج ساگناک

تداخل سنج ساگناک از چهار بازو تشکیل شده است که به آن تداخل سنج حلقه نیز می گویند. نکته مهم دستگاه این است که باریکها دو مسیر مشابه ولی در راستاهای مخالف را اختیار می کنند و هر دو پیش از آنکه برای تشکیل تداخل باهم متحد شوند، حلقه های بسته ای را تشکیل می دهند. یک جابجایی جزئی در سمت گیری یکی از آینه ها باعث ایجاد اختلاف در طول مسیر شده و در نتیجه پارامتر مورد سنجش ارزیابی خواهد شد [۲۰].



شکل ۴: شماتیک تداخل سنج ساگناک.

از مزایای این تداخل سنج، سادگی، سهولت در ساخت و مقاوم نسبت به تغییرات محیطی از جمله دما و نویز پذیری کم می باشد. همچنین پاسخ فرکانسی وسیع این ساختار از مزایای این روش می باشد.

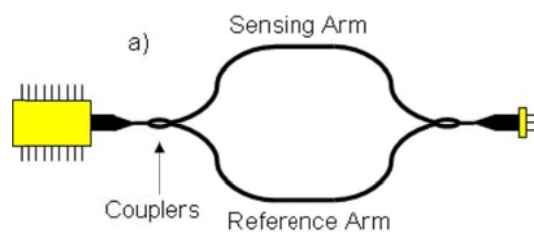
ج

شکل ۲: شماتیک حسگرهای مختلف فابری پرو

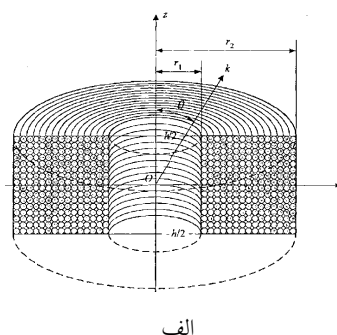
در مقالات برای دریافت سیگنال تخلیه جزئی انواع مختلف این نوع حسگر استفاده شده است. تغییر ساختار دیافراگم مانند ایجاد یک حفره در انتهای دیافراگم و یا تغییر زاویه دیافراگم پاسخ را خطی کرده است. تغییر جنس دیافراگم و لایه نشانی بر روی دیافراگم از مواردی است که در بهبود عملکرد این حسگر از آن استفاده می شود.

۳,۲. حسگر ماخ زندر

تداخل سنج ماخ-زندر نوعی تداخل سنج است که برای تعیین نسبت اختلاف فاز بین دو باریکه هم راستا که از یک منبع نوری هم دوس هستند بکار می رود. این تداخل سنج بویژه برای اندازه گیری اختلاف فاز اندکی که بین دو باریکه نور بوسیله یک نمونه یا تغییر در طول یا پیمایش یکی از آن ها بوجود آمده است بکار می رود [۱۲-۱۶].



شکل ۲: شماتیک ساختار ماخ زندر



الف

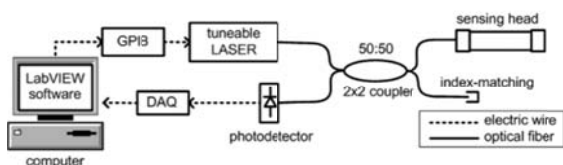
$$\omega_{m,n}^2 = \frac{E}{\rho(1-v^2)R^2} \left(\frac{(1-v^2)\lambda^4 + a^2(\lambda^2 + n^2)^4}{n^2 + (\lambda^2 + n^2)^2} \right) \quad (14)$$

R: شعاع مندرل، E: مدول یانگ، t: ضخامت، ρ: چگالی

ν: ضریب پواسون، L: طول مندرل، $\lambda = \frac{m\pi R}{L}$ و $a^2 = \frac{t^2}{12R^2}$ می باشد.

فرکانس تولید شده ناشی از تخلیه الکتریکی، بین ۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز می باشد. لذا با طراحی مندرل می توان فرکانس رزونانس آن را در محدوده فرکانسی تولیدی ناشی از تخلیه الکتریکی، طراحی نمود.

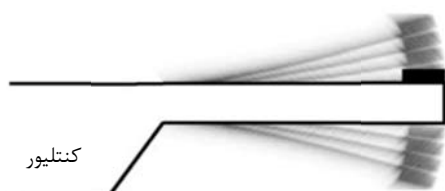
زمانیکه که حسگر به مندرل متصل می شود و یک موج آکوستیک به مندرل برخورد می کند، در صورتی که فرکانس ناشی از موج آکوستیک در محدوده فرکانس رزونانس مندرل باشد، مندرل باعث تقویت موج آکوستیک می شود که در نهایت به حسگر انتقال پیدا می کند.



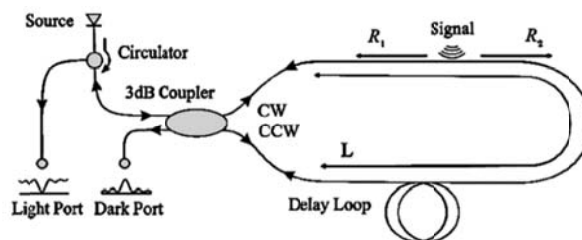
شکل ۷: استفاده از مندرل به عنوان تقویت کننده

۴,۲. کنتلیور

به یک جسم صلب گفته میشود که با توجه به ابعاد، شکل و جنس آن نسبت به ارتعاشات بتواند حساسیت نشان دهد. کنتلیورها اشکال مختلفی دارند که میتوانند مستطیل، مربع، مثلث، و یا هر شکل دیگری داشته و وابسته به شکل و جنس آن، هرکدام دارای یک فرکانس رزونانس مختلف هستند. برای ساخت کنتلیور، یک سمت آن را ثابت می کنند و سمت دیگر آن هنگام اعمال یک نیروی خارجی می تواند بسته به مقدار فرکانس رزونانس کنتلیور به ارتعاش درآید [۲۳-۲۴].



زمانیکه موج آکوستیک که می تواند ناشی از تخلیه الکتریکی باشد، به یک سمت از تداخل سنج برخورد می کند، منجر به اختلاف راه نوری در دو مسیر ساعتگرد و پادساعتگرد، شده و در نهایت باعث تداخل می شود.



شکل ۵: چیدمان تداخل سنج ساگناک برای فیبر نوری ناشی از موج آکوستیک.

۴. تقویت کننده

برای تقویت سیگنال های دریافتی معمولاً از انواع تقویت کننده های مکانیکی، الکتریکی و نوری (Erbium Doped Fiber Amplifier) استفاده می شود. نحوه عملکرد تقویت کننده های مکانیکی از جمله مندرل و کنتلیور بدین گونه است که موج آکوستیکی دریافتی توسط مندرل و یا کنتلیور تقویت شده و به حسگر انتقال می یابد. در تقویت کننده های نوری، توان سیگنال ارسالی از لیزر تقویت شده و به حسگر منتقل می شود. در تقویت کننده های الکتریکی، سیگنال نوری خروجی از حسگر توسط فوتودتکتور به سیگنال الکتریکی تبدیل، و سپس تقویت می شود.

۴,۱. مندرل

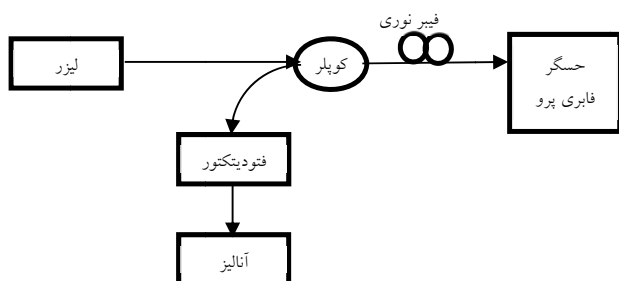
مندرل به لوله ای گفته می شود که با توجه به خصوصیات فیزیکی جنس آن مانند مدول یانگ و ضریب پواسون و چگالی و همچنین ابعاد آن موجب تقویت سیگنال دریافتی می شود [۲۱-۲۲].



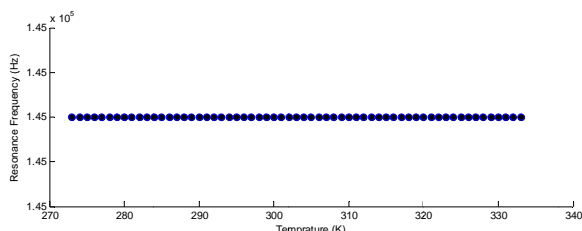
شکل ۶: نمای مندرل

فرکانس رزونانس مندرل از (۱۴) بدست می آید:

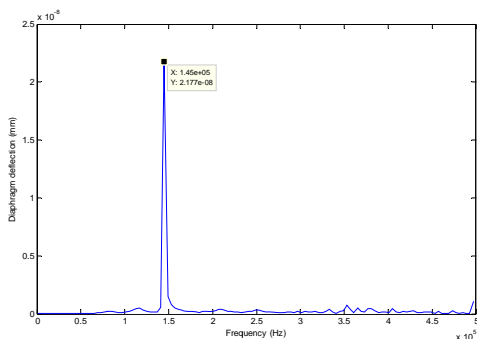
دیگر از این نظر ارجح می‌سازد. شبیه سازی انجام شده در این زمینه در شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۱) ارایه شده است.



شکل ۱۰: شماتیک ساختار فابری پرو



شکل ۱۲: میزان تغییرات فرکانس تشدید نسبت به تغییرات دما



شکل ۱۲: فرکانس تشدید دیافراگم در روغن

همانطور که ملاحظه می‌شود فرکانس رزونانس حسگر برابر ۱۴۵ کیلوهرتز است و همچنین این فرکانس با تغییرات دما تغییر نمی‌کند. تغییرات بارگذاری سبب تغییرات دمای روغن می‌شود. از اینرو تغییرات دما نباید بر روی عملکرد حسگر تاثیر بگذارد. زیرا در این صورت با تغییرات دما ممکن است شناسایی تخلیه جزئی با مشکل مواجه شود.

پس از شناسایی تخلیه جزئی، مکان‌یابی آن اهمیت می‌یابد. از آنجا که قرارگیری این حسگرها داخل ترانسفورماتور حفظ عایقی را از بین نمی‌برد و همچنین نسبت به نویز الکترومغناطیس ایمن می‌باشد، می‌تواند به تعداد، در نقاط مختلف داخل ترانسفورماتور قرار گیرد. این امر سبب می-

شکل ۸: نحوه به ارتعاش درآمدن کنتلیور.

مهمترین شاخصه برای کنتلیور، شکل هندسی و ثابت فنر آن می‌باشد. ثابت فنر زمانیکه طول بزرگتر از ضخامت باشد از (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$K = \frac{Et^3\omega}{4l^3} \quad (15)$$

که در آن E: مدول یانگ، t: ضخامت، l: طول، W: عرض کنتلیور است. با در نظر گرفتن یک کنتلیور مستطیلی از جنسی با چگالی ρ فرکانس رزونانس از (۱۶) بدست می‌آید.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi l^2} t \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \quad (16)$$

فرکانس رزونانس کنتلیور بستگی به جنس (مدول یانگ، چگالی) و ابعاد آن دارد. حسگر مورد نظر را به کنتلیور متصل می‌کنند و زمانیکه تخلیه جزئی اتفاق می‌افتد، اگر فرکانس تولید شده نزدیک به فرکانس رزونانس کنتلیور باشد، موج آکوستیکی به کنتلیور وارد شده و باعث تقویت موج آکوستیکی شده و سیگنال تقویت شده به حسگر منتقل می‌شود.

۴.۳. تقویت کننده نوری EDFA

یک لیزر با طول موج 1470nm و با قدرت معین بیشتر از حد آستانه به فیبر وارد می‌شود و بسته به طول موج آن، الکترون‌ها را به یکی از لایه های انرژی بالاتر می‌برد و با ورود سیگنال اصلی، الکترونها تحریک شده به سطح انرژی قبلی خود بازمی‌گردند و انرژی آزاد شده باعث تقویت سیگنال اصلی می‌شود.

۴.۴. تقویت کننده الکتریکی

سیگنال الکتریکی خروجی از فتودیتکتور معمولا بسیار کوچک بوده و نیاز به تقویت کننده الکتریکی دارد. از اینرو با استفاده از یک تقویت کننده که معمولا بصورت OPAMP پیاده سازی می‌شود استفاده می‌شود.

۵. کارهای پیشرو

در زمینه توسعه و استفاده از حسگر فیبر نوری برای تشخیص و مکان-یابی تخلیه جزئی، ساختار حسگر فابری پرو از جنس سیلیکا انتخاب شده است [۲۵-۲۶]. با توجه به جنس آن، حساسیت نسبت به سیگنال صوتی مناسب بوده و فرکانس رزونانس آن در محدوده فرکانس رزونانس تخلیه جزئی می‌باشد. وابستگی این جنس نسبت به دما پایین بوده و آنرا به مواد

[11] Sanderson E. U. Lima, Orlando Frazão, Rubem G. Farias, Francisco M. Araújo, Luis A. Ferreira, José L. Santos, and Vladimiro Miranda, "Mandrel-Based Fiber-Optic Sensors for Acoustic Detection of Partial Discharges—a Proof of Concept", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, OCTOBER 2010

[12] A.Zargari, T. R. Blackburn, "Application of Optical Fibre Sensor for Partial Discharge Detection in High-voltage power equipment", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996

[13] A.Zargari, T. R. Blackburn, "Detection of Partial Discharge signals in Unknown Noisy Environment", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996

[14] ACOUSTIC DETECTION OF PARTIAL DISCHARGES USING NON-INTRUSIVE OPTICAL FIBRE SENSORS

[15] J.Deng, H.Xiao, W.Huo, M.Luo, R.May, A.Wang, Y.Liu, "Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers", Optics & Laser Technology 33 (2001)

[16] Z.Zhiqiang, M.MacAlpine, M. Süleyman Demokan "The Directionality of an Optical Fiber High-Frequency Acoustic Sensor for Partial Discharge Detection and Location", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 18, NO. 6, JUNE 2000

[17] M.MacAlpine, Z.Zhiqiang, M. S. Demokan "Development of a fibre-optic sensor for partial discharges in oil-filled power transformers", Electric Power Systems Research 63 (2002)

[18] H Lamela-Rivera, C Maci'a-Sanahuja and J.A. Garc'ia-Souto, "Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers", JOURNAL OF OPTICS A: PURE AND APPLIED OPTICS, Pure Appl. Opt. 5 (2003) 66–72

[19] Alison K. Lazarevich, "Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor", May 12, 2003, Blacksburg, Virginia, U.S.A.

[20] M. S. Hapeez, A. F. Abidin, H. Hashim, M. K. Hamzah, N. R. Hamzah, "Analysis and Classification of Different Types of Partial Discharges by Harmonic Orders", ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA, VOL. 19, NO. 9, 2013

[21] S.E. U. LIMA, R.G. FARIAS, F.M. ARAÚJO, L.A. FERREIRA, J.L. SANTOS, V.MIRANDA, O.FRAZÃO, "Fiber Laser Sensor Based on a Phase-Shifted Chirped Grating for Acoustic Sensing of Partial Discharges", Photonic Sensors (2013) Vol. 3, No. 1: 44–51

[22] I.Búa-Núñez, E. Posada-Román, J.Rubio-Serrano, J. Garcia-Souto, "Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors", IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 63, NO. 5, MAY 2014

[23] L Wang, N Fang, C Wu, H Qin, and Z Huang, "A Fiber Optic PD Sensor Using a Balanced Sagnac Interferometer and an EDFA-Based DOP Tunable Fiber Ring Laser," Sensors 14 (5), 8398-8422 (2014)

شود که از محاسبات پیچیده بازتاب امواج آکوستیک کاسته شده و همچنین با دقت بسیار مطلوبی مکان تخلیه جزئی را نشان دهد.

۶. جمع بندی

در این مقاله به کارهای گذشته که در زمینه دریافت سیگنال آکوستیک تخلیه جزئی انجام شده، پرداخته شده است. فیبر نوری به عنوان حسگر با توجه به نویزپذیری پایین آن در محیطی مانند ترانسفورماتور با نویز الکترومغناطیس و همچنین قیمت نسبتاً ارزان آن، کاربرد وسیعی دارد. با طراحی مناسب حسگرهای فابری پرو در محدوده فرکانس رزونانس تخلیه جزئی، شناسایی دقیق این پدیده میسر خواهد شد. علاوه بر شناسایی تخلیه جزئی، مکان یابی آن با استفاده از حسگرهای فیبر نوری، به علت امکان قرارگیری آنها در داخل ترانسفورماتور با حفظ خاصیت عایقی دقیق تر می - شود. موارد فوق سبب تحقیقات گسترده در زمینه این حسگرها شده است.

منابع

- [1] حسین محسنی، « مبانی مهندسی فشار قوی الکتریکی »، انتشارات دانشگاه تهران
- [2] "Partial discharge – Part XIV: Acoustic partial discharge detection – Practical application," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 8, no. 1, pp. 34–43, Jan./Feb. 1992.
- [3] "Partial discharge – Part XIII: Acoustic partial discharge detection – Fundamental considerations," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 8, no. 1, pp. 25–31, Jan./Feb. 1992.
- [4] D. Park, H.Cho, S.Wook Cha, G.Kil, " Positioning of Partial Discharge Origin by Acoustic Signal Detection in Insulation Oil", Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 2, No. 1, pp. 28–32, 2012
- [5] G.Wild, S.Hinckley, " Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art", IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 8, NO. 7, JULY 2008
- [6] C. D. Butter and G. B. Hocker, "Fiber optic strain gauge," Appl. Opt., vol. 17, no. 18, pp. 2867–2869, 1978
- [7] E. Hecht, Optics. Reading, MA: Addison-Wesley, 2002.
- [8] Lijun Song, " Detection and Position Location of Partial Discharges in Transformers Using Fiber Optic Sensors", December 3, 2004, Blacksburg, Virginia, U.S.A
- [9] X.Wang, B.Li, Z.Xiao, S.Hwui Lee, H.Roman, O.L.Russo, K.K.Chin, K.R.Farmer, "An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection", JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING, J. Micromech. Microeng. 15 (2005) 521–527
- [10] Xiaodong Wang, Baoqing Li, Harry T. Roman, Onofrio L. Russo, Ken Chin, and Kenneth R. Farmer, "Acousto-optical PD Detection for Transformers", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 3, JULY 2006

عنوان مقاله

سومین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۵ - تهران، ایران

[24] George Y. Chen,* Gilberto Brambilla, and Trevor P. Newson, " Compact acoustic sensor based on air-backed Mandrel coiled with optical microfiber" OPTICS LETTERS, Vol. 37, No. 22, November 15, 2012

[۲۵] محسن قراط، اعظم لایقی، مهدی غفاری اصل، مریم اخوان حجازی، گئورک قره پتیان، حمید لطیفی، " طراحی حسگر فیبر نوری جهت تشخیص تخلیه جزئی"،

بیست و چهارمین کنفرانس مهندسی برق ۲۰۱۶ ایران- شیراز

[۲۶] محسن قراط، اعظم لایقی، مهدی غفاری اصل، مریم اخوان حجازی، گئورک

قره پتیان، حمید لطیفی، "نویززدایی از سیگنال صوتی تخلیه جزئی بوسیله تبدیل

موجک مختلط دو درختی" ششمین کنفرانس نیروگاه‌های حرارتی ۱۳۹۴ ایران-تهران