بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

حسگر فیبر نوری به منظور اندازه‌گیری امواج صوتی

وحورا تحسینی، رحمان نوروزی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

چکیده -در این مقاله حسگر فیبر نوری بر پایه‌ی تداخل‌سنج ماخ-زندر به‌منظور تشخیص و اندازه‌گیری موج صوتی گزارش شده است. این حسگر توانایی دریافت موج فراصوت با فرکانس‌های ۱۰ کیلوهرتز تا ۸۰ کیلوهرتز را در هوا و بسامدهای بالاتر تا حدود ۳۱۰ کیلوهرتز را داخل مخزن آب داراست. پیش‌بینی می‌شود این حسگر قابلیت دریافت امواج فراصوت حاصل از تخلیه‌ی جزئی را داخل مایعات نیمه عایق مانند روغن خراب ترانسفورماتور نیز داشته باشد.

کلید واژه- تخلیه‌ی جزئی، حسگر فیبر نوری، موج فراصوت، ترانسفورماتور.

Optical fiber sensor for detecting acoustic waves

Vahoora Tahsini, Rahman Nouroozi

Department Physics, Institute for advanced studies in basic sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Abstract- In this paper, a Mach-Zehnder based fiber optical sensor enabling to detect the acoustic waves is reported. Reported sensor is capable to sense ultrasonic waves from 10 to 80 kHz in an ambient condition and high frequencies up to 310 kHz in a water tank. It is anticipated the sensor have the ability for detecting ultrasonic wave caused by partial discharge in semi-insulating liquids like impaired transformer oil.

Keywords: partial discharge, optical fiber sensor, ultrasonic wave, transformer.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

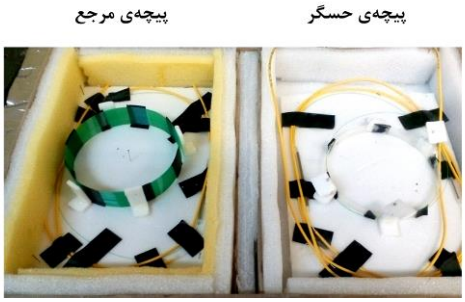
۱- مقدمه

ترانسفوماتور ابزار مفیدی در شبکه‌های انتقال انرژی الکتریکی است. با توجه به کاربرد گسترده‌ی این وسیله در صنعت برق و هزینه‌ی بالای ساخت و تعمیر آن، حفظ و نگهداری از ترانسفورماتورها از اهمیت بسزایی برخوردار است. از روغن به‌عنوان خنک کننده در ترانسفورماتور استفاده می‌شود. روغن ترانسفوماتور باید دارای ویژگی‌هایی نظیر گران‌روی پایین، نقطه‌ی ریزش پایین، توانایی بالا در انتقال حرارت، نقطه‌ی اشتعال بالا و عایق بودن باشد. بالا بودن میزان عایقی از مهم‌ترین ویژگی‌های روغن ترانسفورماتور محسوب می‌شود. هرگونه عوامل خارجی مانند تنش‌های الکتریکی، رطوبت و غیره می‌تواند موجب کاهش میزان عایق بودن روغن شود. کاهش میزان عایقی روغن، منجر به تخلیه‌ی جزئی که یک جریان لحظه‌ای است می‌شود. لذا یکی از راه‌های تشخیص خرابی روغن ترانسفورماتور، اندازه‌گیری تخلیه‌ی جزئی داخل آن است [۱]. به‌واسطه‌ی ایجاد هر تخلیه‌ی جزئی، طیف گسترده‌ای از امواج الکترومغناطیسی و صوتی تولید می‌شود. همچنین تخلیه‌ی جزئی منجر به تولید گازهای شیمیایی در اثر اندرکنش (اکسایش) با محیط اطراف خود می‌گردد. روش‌های مختلفی برای تشخیص تخلیه‌ی جزئی در روغن وجود دارد که به‌عنوان نمونه می‌توان به آنالیز گازهای شیمیایی حل شده در روغن، استفاده از حسگرهای صوتی و حسگرهای فرکانس فرا بلند (UHF) اشاره نمود. یکی از مناسب‌ترین روش‌های تشخیص تخلیه‌ی جزئی، استفاده از حسگر فیبر نوری است. با توجه به ویژگی‌های حسگر فیبر نوری مانند حساسیت بالا، ارزان بودن، عدم ایجاد تداخل الکترومغناطیسی در آن، توانایی کار در محیط‌های خشن و عایق بودن، این نوع حسگر در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. در این مقاله گزارش ساخت حسگر فیبر نوری بر مبنای تداخل‌سنج ماخ زندر به‌منظور اندازه‌گیری فشار صوتی ناشی از تخلیه‌ی جزئی بیان شده است. نتایج آزمایشگاهی مؤید توانایی حسگر ساخته شده به‌منظور اندازه‌گیری بسامد امواج صوتی پیوسته و همچنین تشخیص تخلیه‌ی جزئی در فضای آزاد و نیز داخل مخزن آب می‌باشد.

این مقاله شامل سه بخش است. در بخش (۲)، مبانی نظری حسگر فیبرنوری تداخل‌سنج ماخ-زندر بیان شده است. بخش (۳)، توضیحات مربوط به چیدمان آزمایشگاهی و نتایج حاصل از آزمایشات تجربی را دربر می‌گیرد. در نهایت در بخش (۴) نتیجه‌گیری صورت گرفته است.

۲- مبانی نظری

حسگر فیبر نوری مبتنی بر تداخل‌سنج ماخ-زندر، شامل دو پیچه‌ی فیبرنوری تک مد و دو جفت‌کننده‌ی نوری می‌باشد. این حسگر یک حسگر ذاتی است، بدین معنی که اختلال‌های محیطی به‌طور مستقیم بر خود فیبر اثر می‌گذارد. شکل ۱ تصویری شماتیک از پیچه‌ی حسگر ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل۱: تصویری شماتیک از پیچه های حسگر فیبر نوری ساخته شده

انتقال موج صوتی در یک محیط مادی از طریق انتقال فشار ناشی از صوت بصورت طولی صورت می‌گیرد. فشار موج صوتی باعث ایجاد تنش در فیبر نوری می‌شود. تنش ناشی از صوت، فاز مد نوری انتشاری در فیبر را تغییر می‌دهد. با تعیین تغییرات فاز مد انتشاری می‌توان بسامد و شدت موج صوتی را اندازه‌گیری نمود. با توجه به‌اینکه آشکارسازها توانایی تعیین فاز نور فرودی را ندارند، تعیین تغییرات فاز مد انتشاری از فیبر با استفاده از روش تداخل‌سنجی امکان‌پذیر است. فاز اولیه‌ی مد انتشاری از فیبر بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = \beta L = \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda} \qquad (۱)$$

که در آن β ثابت انتشار مد نوری و n_{eff} و λ به ترتیب ضریب شکست مؤثر و طول موج مد نوری انتشاری در فیبری به طول L هستند. تغییر فاز ناشی از فشار صوتی به دو صورت کرنش محوری و کرنش اپتیکی است که در حالت کلی می‌تواند بصورت زیر خلاصه گردد:

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

$$\Delta\phi_{tot} = \Delta\phi_{ax} + \Delta\phi_{op}$$
$$= -\frac{\beta L}{E}(1-2\nu)\Delta P + \frac{\beta L n^2}{2E}(1-2\nu)(p_{11}+2p_{12})\Delta P$$
$$= \frac{\beta L}{2E}(1-2\nu)[n^2(p_{11}+2p_{12})-2]\Delta P \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲) E مدول یانگ، ν ثابت پواسون و p_{11} و p_{12} ضرایب تانسور کرنش اپتیکی و Δp فشار صوتی واردشده بر فیبر هستند. با توجه به رابطه‌ی بالا می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فاز نور عبوری از فیبر به ضریب پواسون و مدول یانگ فیبر و میزان فشارصوتی وارد شده بر فیبر وابسته است[۳و۴]. بنابراین رابطه‌ی (۲) را می‌توان به شکل ساده‌تر بیان نمود:

$$S_{norm} = \frac{\Delta\varphi_{tot}}{\varphi\Delta P} = \frac{(1-2\nu)}{E}[\frac{n^2}{2}(p_{11}+p_{12})-1] \quad (۳)$$

عبارت سمت راست رابطه (۳) مقدار ثابتی است و وابسته به نوع فیبر می‌باشد. عبارت S_{norm} میزان حساسیت نرمالیزه شده‌ی فیبرنوری نسبت به موج صوتی است. این مقدار برای فیبر سیلیکا $۴/۹\times۱۰^{-۱۲}$ بر پاسکال است[۶]. تغییر فاز ناشی از اعمال فشار صوتی بر فیبر نوری را می‌توان با استفاده از تداخل‌سنج تمام فیبری ماخ-زندر اندازه‌گیری نمود. رابطه‌ی زیر شدت خروجی از یک تداخل سنج ماخ-زندر را وقتی که دو بازوی آن اختلاف فاز $\Delta\phi_{tot}$ نسبت به هم دارند نشان می‌دهد.

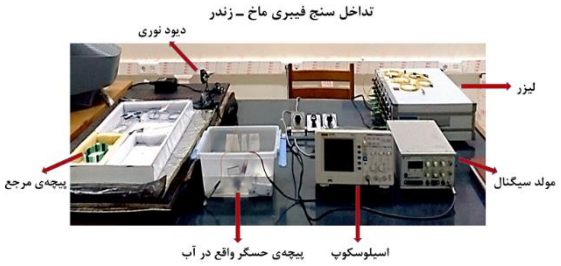
$$I = \frac{I_0}{2}(1+\cos\Delta\varphi_{tot}) \quad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)، I_0 و I به‌ترتیب شدت اولیه و شدت نور پس از ایجاد تداخل است. درنتیجه با به‌دست آوردن میزان اختلاف فاز وارد شده بر فیبر از طریق تداخل‌سنجی رابطه‌ی زیر به‌دست آورد [۴]. ترکیب روابط (۲) و (۳) رابطه‌ی (۵) را نتیجه می‌دهد. همانگونه که از این رابطه مشخص است با افزایش طول فیبر میزان اختلاف فاز ایجاد شده‌ی ناشی از موج صوتی بیشتر خواهد بود.

$$\Delta\varphi_{tot} = S_{norm}\frac{2\pi n_{eff}L}{\lambda}\Delta p \quad (۵)$$

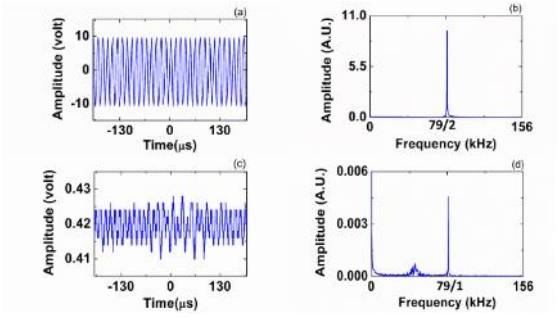
۳- چیدمان آزمایش و نتایج

شکل ۲ شمایی از چیدمان مورد استفاده برای اندازه‌گیری تخلیه‌ی جزئی با استفاده از حسگر فیبر نوری را نشان می‌دهد. نور لیزر با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر پس از تقسیم شدن به دو مقدار برابر، به دو پیچه‌ی فیبر نوری در دو بازوی تداخل‌سنج ماخ-زندر می‌رسد. یکی از پیچه‌ها فیبری روکش‌دار است که فشار ناشی از موج صوتی بر آن اثری ندارد. در بازوی دیگر تداخل‌سنج، پیچه‌ای از یک فیبر بدون روکش به‌منظور حسگر فیبری استفاده شده است. نورهای انتشاری از این دو پیچه توسط جفت‌کننده‌ی فیبری با هم ترکیب می‌شوند. در نهایت شدت خروجی از فیبر توسط یک دیود نوری آشکار و با استفاده از یک اسیلوسکوپ ۱۰۰ مگاهرتزی ثبت می‌شود. اطلاعات ثبت شده به‌منظور آنالیز به رایانه منتقل می‌شود.



شکل ۲: شمایی از چیدمان حسگر فیبر نوری ماخ زندر با قرارگیری پیچه‌ی حسگر داخل مخزن آب

عملکرد حسگر فیبری با استفاده از یک مولد سیگنال و یک ارتعاشگر پیزو مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونه‌ای از نتایج ثبت شده توسط حسگر فیبر نوری برای بسامدهای گوناگون در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد سیگنال پاسخ حسگر و فرکانس مربوط به آن مطابق با سیگنال و فرکانس اعمالی توسط پیزو می‌باشد. این نتایج مؤید عملکرد صحیح حسگر است.



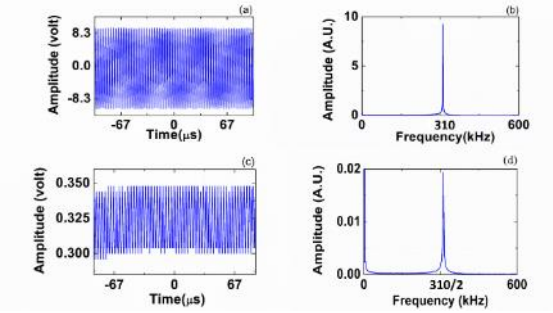
شکل۳: سیگنال تولیدی مولد سیگنال (a) و تبدیل فوریه‌ی آن (b) با بسامد ۷۹/۲ کیلوهرتز و سیگنال پاسخ حسگر (c) و تبدیل فوریه‌ی آن (d) با بسامد ۷۹/۱ کیلوهرتز

به‌منظور بررسی عملکرد حسگر در روغن یک ترانسفورماتور،

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

پیچه‌ی حسگر فیبر نوری داخل مخزن آب قرار داده و آزمایش قبلی تکرار شد. وجود آب در چیدمان جدید علاوه براینکه به شرایط واقعی ترانسفورماتور نزدیک‌تر است، امکان اندازه‌گیری بسامدهای بالاتری نسبت به چیدمان هوا را نیز فراهم می‌سازد. شکل ۴ نمونه‌ای از این نتایج را نشان می‌دهد.



شکل۴: سیگنال تولیدی مولد سیگنال (a) و تبدیل فوریه‌ی آن (b) با بسامد ۳۱۰ کیلوهرتز و سیگنال پاسخ حسگر (c) و تبدیل فوریه‌ی آن (d) با بسامد ۳۱۰/۲ کیلوهرتز.

همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، حسگر فیبرنوری، امواج صوتی حاصل از مولد سیگنال را با بسامد اعمال شده از طریق مولد سیگنال با دقت نسبتا خوبی دریافت کرده است. با استفاده از روابط (۴) میزان تغییر فاز ایجاد شده در مد عبوری از حسگر تعیین می‌شود و با استفاده از رابطه‌ی (۵) می‌توان محاسبه کرد که فشار صوتی دریافتی توسط این حسگر، حدود ۴ پاسکال است.

امواج صوتی دارای محدوده‌ی بسامد از صفر تا $۱۰^{۱۰}$ هرتز هستند. در حال حاضر از حسگرهای صوتی پیزوالکتریک برای تشخیص امواج صوتی استفاده می‌شود. این حسگرها توانایی دریافت امواج صوتی با بسامد ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز را دارند. نتایج بدست آمده در این پروژه نشان می‌دهد حسگر ساخته شده، قابلیت شناسایی و دریافت امواج صوتی تولید شده در محیط‌هایی مثل هوا و آب را همانند برخی حسگرهای صوتی پیزوالکتریک داشته و همچنین برتری این حسگر، قرارگیری آن داخل محیط‌های خشن است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اصول نظری حاکم بر عملکرد حسگر فیبر نوری بر پایه‌ی تداخل‌سنج ماخ-زندر و چیدمان آزمایشگاهی آن به منظور اندازه‌گیری امواج صوتی گزارش شده است. نتایج حاصل از آزمایشات تجربی نشان می‌دهد حسگر ساخته شده قابلیت شناسایی امواج صوتی با محدوده‌ی بسامد ۱۰ کیلوهرتز تا حدود ۸۰ کیلوهرتز را در فضای آزاد و بسامدهای بالاتر امواج فراصوت در حدود ۳۱۰ کیلوهرتز را در مخزن آب داراست. همچنین پیش‌بینی می‌شود این حسگر قادر به دریافت امواج حاصل از تخلیه‌ی جزئی تا بسامد ۶۰۰ کیلوهرتز نیز باشد.

مراجع

[1] Von Meier, Alexandra. *Electric power systems: a conceptual introduction.* John Wiley & Sons, 2006.

[2] MacAlpine, Mark, Zhiqiang, Zhao, and Demokan, M Süleyman. *Development of a fibre-optic sensor for partial discharges in oil-filled power transformers*. Electric Power Systems Research, 63(1):27–36, 2002.

[3] Yaacob, MM, Alsaedi, Malik Abdulrazzaq, Rashed, JR, Dakhil, AM, and Atyah, SF. *Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors. Photonic Sensors*, 4(4):325–337, 2014.

[4] Posada-Roman, Julio, Garcia-Souto, Jose A, and Rubio-Serrano, Jesus. *Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems*. Sensors, 12(4):4793–4802, 2012

[5] Wild, Graham and Hinckley, *Steven. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art*. IEEE Sensors Journal, 8(7):1184–1193, 2008.

[6] Lamela-Rivera, H, Macia-Sanahuja, C, and Garcia-Souto, JA. *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, 5(1):66, 2002.

[7] Zhiqiang, Zhao, MacAlpine, Mark, et al. *The directionality of an optical fiber high-frequency acoustic sensor for partial discharge detection and location.* Journal of lightwave technology, 18(6):795, 2000.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]