

一种用于变压器内部噪声测量的光纤水听器

高 侃¹ 吴晔炎¹ 张桂林¹ 楼 锦¹ 杨 辉¹ 莫 娟² 马裕超²

¹中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 200437

²中国电力科学研究院, 北京 100192

摘要 基于 Michelson 干涉光路的光纤水听器内部存在法拉第旋镜, 其传感信号受到强电磁场的干扰。改进的传感光路结构将法拉第旋镜与光纤水听器分离, 使得传感信号不受强电磁场的干扰。制作了新型光纤水听器, 并将其安装于大型变压器内部。利用制作的光纤水听器成功测量了不同负载电流情况下变压器内部的噪声。

关键词 传感器; 光纤水听器; 干涉光路; 变压器; 内部噪声测量

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1210003

An Optical Fiber Hydrophone Used to Detect Noise in Transformer

Gao Kan¹ Wu Bingyan¹ Zhang Guilin¹ Lou Jin¹ Yang Hui¹ Mo Juan² Ma Yuchao²

¹No. 23 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200437, China

²China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract Because of the existence of the Faraday rotator mirror, the sensing signal in the optical fiber hydrophone based on Michelson interferometric optical path is disturbed by the strong electromagnetic field. The improved sensing optical path structure separates the Faraday rotator mirror from the optical fiber hydrophone, and the sensing signal can be resistant to the strong electromagnetic field. A new type of optical fiber hydrophone is made. The optical fiber hydrophone which is installed in a large transformer can detect noise inside the transformer under different load currents successfully.

Key words sensors; optical fiber hydrophone; interferometric optical path; transformer; inside noise detection

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 060.2420; 060.5060

1 引 言

近年来,随着我国电网的容量和电压等级不断提高,对电网的安全运行提出了越来越高的要求。变压器(尤其是高压变压器)运行状态的在线监测得到了电力系统用户的高度重视。振动噪声分析法是变压器在线监测的重要手段之一^[1-2],该方法利用安装于变压器内部不同位置处的振动和声压传感器获取设备运行时的振动和噪声信息,并通过数据的分析处理得到变压器的运行状态,从而对存在的故障隐患进行早期预警。变压器内部的复杂环境(如高电压、强电磁、高温等)限制了传统电学式传感器在变压器内部的使用。因此,声传感器通常只能布设于变压器周围,振动传感器只能安装于变压器油箱外壁^[3-4]。利用箱体振动数学模型推算变压器内部的振动噪声信息,大幅降低了在线监测的准确性。

光纤水听器是一种建立在光纤、光电子技术基础上的声压传感器,它利用弹性体将声压转换为光纤中光相位信号的变化,并通过高灵敏度的光学相干检测方法还原微弱的声压信号。光纤水听器具有灵敏度高、动态范围大、可靠性高、可构成大规模阵列等优点^[5-7],广泛应用于海洋监测领域。与此同时,由于光纤水听器具有无电源、重量轻、耐腐蚀、耐高低温等特点,适用于变压器内部,因此光纤水听器技术也为变压器内部噪声监测提供了一种有效的技术途径。

本文针对变压器内部噪声监测的要求,对传统干涉型光纤水听器的光路进行了改进,设计了一种不受强电磁场干扰的光纤水听器,并通过实验验证了其实用性。

收稿日期: 2016-07-29; **收到修改稿日期:** 2016-09-23

作者简介: 高 侃(1975—),男,博士,高级工程师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: gaokan@stl.com.cn

2 强电磁场环境下传统光路存在的问题

Michelson 光纤水听器的典型光路如图 1 所示^[8-10]。传感光路中包含 Michelson 光纤干涉仪。干涉仪信号臂上的光纤盘绕在声敏感的弹性体上,构成声敏感线圈。当线圈在声压作用下发生形变时,干涉仪信号臂和参考臂之间的光程差随之发生变化,通过后端的相位解调算法即可从干涉信号中还原声信号。为了解决干涉信号的偏振衰落问题,通常在信号臂和参考臂的端部安装法拉第旋镜(FRM)。在法拉第旋镜内部安装永久磁铁和旋光片,依靠磁光效应在光路中实现偏振补偿。构成干涉仪的所有器件被整体封装在一起,形成光纤水听器。

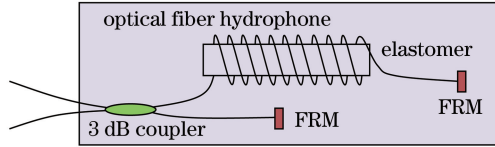


图 1 传统干涉型光纤水听器光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of classical interferometric optical fiber hydrophone

为了验证传感信号是否受强电磁场干扰,将 Michelson 光纤水听器放置于充满变压器油的实验池中,对实验池中的一根铜导线通以 750 A 的大电流以形成强电磁场环境。干涉仪的不平衡度为 63.8 m,声压灵敏度为 $-140 \text{ dB}\cdot\text{rad}/\mu\text{Pa}$,频率响应范围为 $10\sim 1000 \text{ Hz}$,信号解调采用基于 3×3 耦合器的相位解调法。实验结果表明,强电磁场环境下光纤水听器的输出信号受到严重的干扰(图 2),噪声幅度约为 1 rad,主要频率成分为 100 Hz 及其倍频。为了排除该信号为实验池中的声压或振动信号的可能性,实验中在光纤水听器周围遮挡一层金属网以屏蔽电磁场,实验结果如图 3 所示。光纤水听器输出信号频谱中的 100 Hz 倍频信号消失,噪声幅度仅为 0.2 rad,与未通电流前的情况基本相同(噪声来源为实验场地周围的环境噪声)。上述实验现象表明,Michelson 光纤水听器传感信号受到强电磁场的干扰。

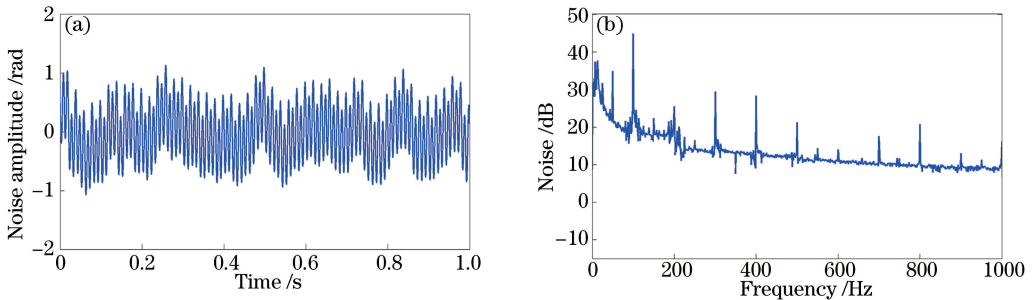


图 2 未加金属屏蔽网情况下光纤水听器的输出信号。(a)时域信号;(b)频域信号

Fig. 2 Output signals of optical fiber hydrophone without metal shielding mesh. (a) Time-domain signal; (b) frequency-domain signal

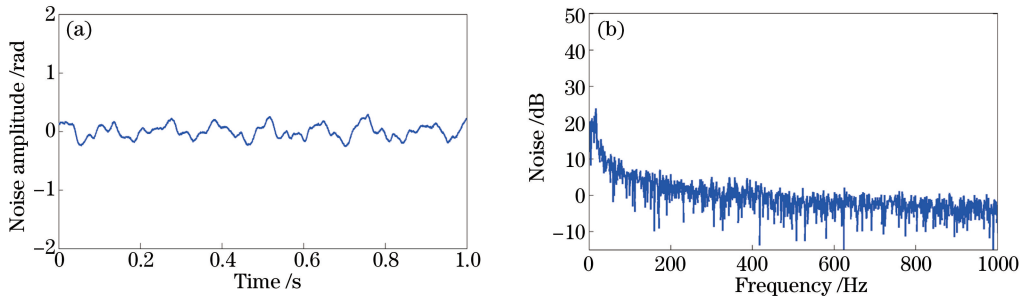


图 3 加金属屏蔽网后光纤水听器的输出信号。(a)时域信号;(b)频域信号

Fig. 3 Output signals of optical fiber hydrophone with metal shielding mesh. (a) Time-domain signal; (b) frequency-domain signal

光纤水听器内部的光纤本身并不受强电磁场的干扰,法拉第旋镜通过内部旋光片的磁光效应在光路中实现偏振补偿。在外界交变强电磁场的作用下,旋光片中光的偏振旋转角度随之发生周期性变化。

对于带有法拉第旋镜的 Michelson 干涉仪而言,将各个环节对应的琼斯矩阵相乘,得到干涉光强 I 的表达式为^[10]

$$I = 0.5 + 0.5 \sqrt{c^2 + d^2} \cos(\beta + \Delta\Phi), \quad (1)$$

式中 Δ 为交变电磁场引起的法拉第旋镜偏振旋转角度的变化值, $\Delta = A \cos(2\pi ft)$, 其中 A 为幅度常数, f 为交流电的频率 ($f = 50 \text{ Hz}$), t 为时间; $\Delta\Phi$ 为探测声信号引起的光相位变化; $c = \sin^2(2\Delta) \cos \delta_s + \cos^2(2\Delta)$, $d = -\sin^2(2\Delta) \sin \delta_s$, 其中 δ_s 为干涉仪信号臂光纤引起的快慢轴相位差; $\beta = \arctan(c/d)$ 。由于光纤较短,干涉仪参考臂引起的快慢轴相位差近似为零。

由(1)式可知,法拉第旋镜偏振旋转角度在交变电磁场作用下产生的变化值 Δ 不仅引起干涉信号幅度项周期性变化,同时在相位项上叠加了一个频率为 $2f$ ($2f = 100 \text{ Hz}$) 的周期信号 β , 即图 2 中观测到的干扰信号。

变压器内部不允许额外安装金属屏蔽网,也不允许光纤水听器内部存在金属结构。为了消除电磁场干扰,同时考虑到法拉第旋镜内部的永久磁铁可能造成变压器内局部磁场异常,设计了法拉第旋镜与光纤水听器分离的新结构,并将其安装在变压器外部。

3 新型光路设计

将法拉第旋镜从光纤水听器内部移出的最直接方法为将图 1 中两个法拉第旋镜通过光纤连接至变压器外部。由于变压器内部安装点与油箱外壳上光纤贯通器的距离较远(几米至十几米),两个法拉第旋镜与耦合器之间的两根余长光纤(指干涉仪中未缠绕在弹性体上的光纤)对振动信号敏感且振动状态相异,余长光纤的振动在该光路中引入较大的干扰信号,因此无法精确检测变压器内部噪声。将含有两根余长光纤的 10 m 光缆盘成直径约为 100 mm 的光缆圈,并将其固定在振动台上振动,噪声测试结果如图 4 所示。振动频率为 1000 Hz, 振动加速度为 $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 。从测试结果可以看出,频率为 1000 Hz 处的噪声水平为 19.59 dB。

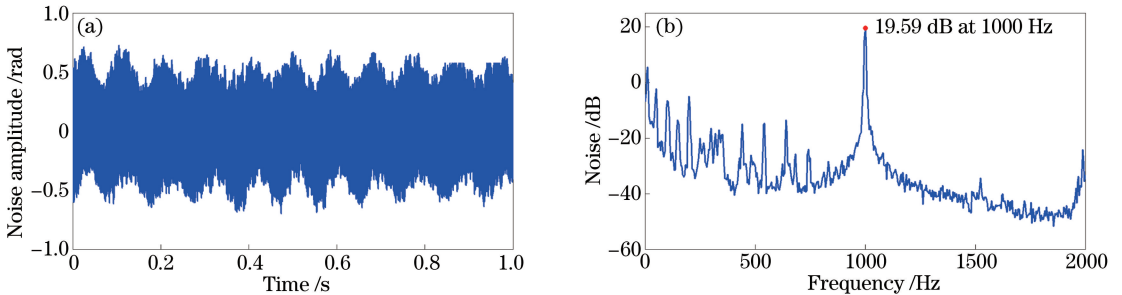


图 4 两根余长光纤振动情况下的传统干涉光路光纤水听器的输出信号。(a) 时域信号; (b) 频域信号

Fig. 4 Output signals of optical fiber hydrophone with classical interference optical path when two extended fibers are vibrating. (a) Time-domain signal; (b) frequency-domain signal

针对上述问题,提出了一种改进的干涉光路,如图 5 所示。该光路类似 Mach-Zehnder 干涉光路,设计思路为使光纤干涉仪的信号臂和参考臂共用同一段余长光纤和同一个法拉第旋镜。该法拉第旋镜和光纤水听器是分离的,可通过余长光纤直接连接至变压器外部。虽然这段余长光纤同样对振动信号敏感,但由于干涉仪的信号光脉冲和参考光脉冲经过同一段余长光纤,两个脉冲的时延为 312 ns(对应于 63.8 m 的干涉仪不平衡度),远小于 1000 Hz 测量信号所对应的周期(1 ms),因此可以显著降低干扰信号的幅度。将含有一

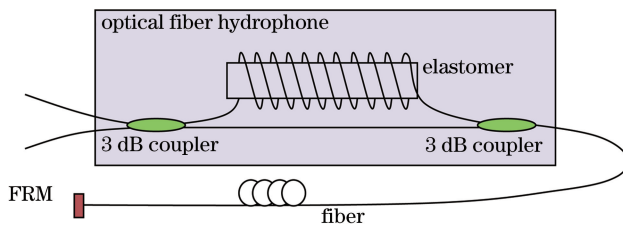


图 5 改进的光纤水听器光路示意图

Fig. 5 Diagram of optical path of improved optical fiber hydrophone

根共用余长光纤的 10 m 光缆盘成直径约为 100 mm 的光缆圈,平置固定在振动台上振动(此处的振动条件与图 3 相同),噪声测试结果如图 6 所示。从测试结果可以看出,在 1000 Hz 处的噪声水平为 -29.65 dB,比图 3 的测试结果降低了 49.24 dB。

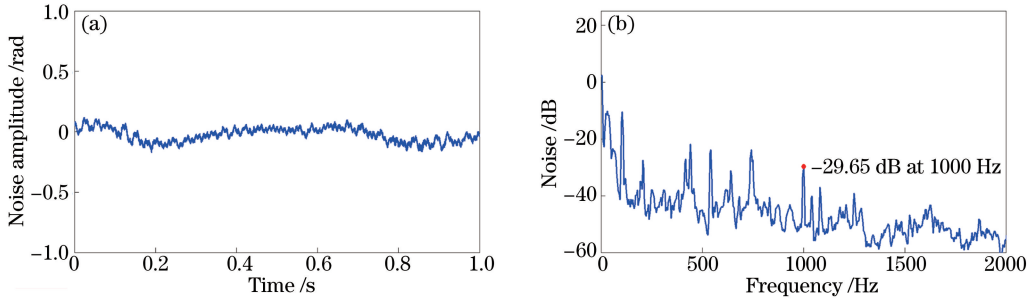


图 6 新型光纤水听器的输出信号。(a)时域信号;(b)频域信号

Fig. 6 Output signals of new optical fiber hydrophone. (a) Time-domain signal; (b) frequency-domain signal

4 实 验

依据改进的光路设计,制作了相应的光纤水听器。考虑到在变压器内部使用的安全性,光纤水听器内部均采用耐高温的非金属结构件。外部使用聚氨酯材料进行整体灌封,以保证其油密性。光纤水听器制作完成后,将该光纤水听器放入第 2 节中描述的实验环境中,测试输出信号是否受强电磁场的干扰。测试结果与图 3 类似,输出信号未受到强电磁场的干扰。对光纤水听器进行了局部放电测试,进一步确保其在变压器内部使用的安全性。



图 7 新型光路的光纤水听器

Fig. 7 Optical fiber hydrophone based on new optical path

将光纤水听器安装于 550 kV 大型变压器内部,进行真实工作环境下的噪声测试。整个实验过程中,光纤水听器性能稳定且信号输出正常,当变压器的工作电流分别为 0 及额定电流的 20%、40%、60%、80%、100%时,测得内部噪声谱。图 8、9 分别为变压器的工作电流为额定电流的 40%、100%时,光纤水听器测得的噪声信号。从图中可以看出,变压器内部的噪声信号以 100 Hz 的倍频信号为主。当变压器的工作电流为

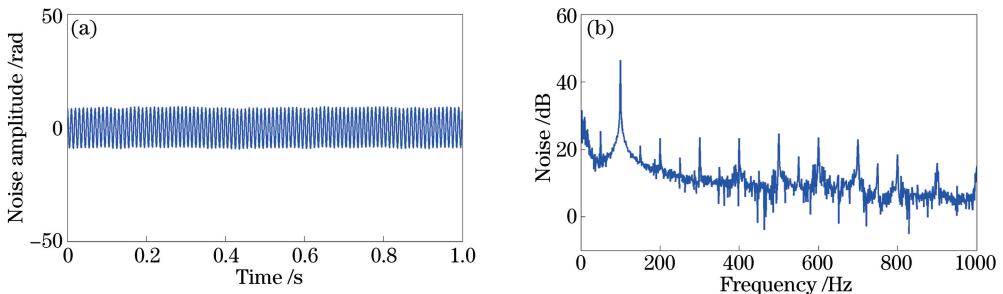


图 8 变压器的工作电流为额定电流的 40%时测得的变压器内部噪声。(a)时域信号;(b)频域信号

Fig. 8 Noise detected in transformer when working current is 40% of rated current. (a) Time-domain signal; (b) frequency-domain signal

额定电流的 40% 时, 噪声信号幅度约为 9 rad; 当变压器的工作电流为额定电流的 100% 时, 噪声信号幅度约为 45 rad, 噪声水平明显增大。

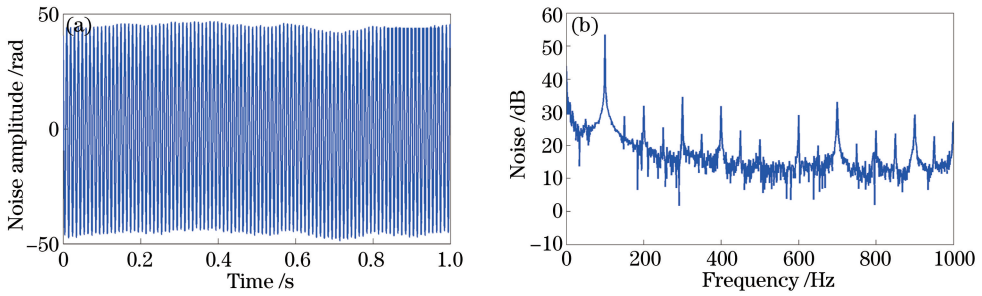


图 9 变压器的工作电流为额定电流的 100% 时测得的变压器内部噪声。(a) 时域信号; (b) 频域信号

Fig. 9 Noise detected in transformer when working current is 100% of rated current. (a) Time-domain signal; (b) frequency-domain signal

5 结 论

针对基于传统 Michelson 干涉光路结构的光纤水听器在变压器内部噪声测量中存在强电磁场干扰的问题, 提出了一种将法拉第旋镜与光纤水听器分离并可安装在变压器外部的新型干涉光路结构, 使得传感信号不受强电磁场的干扰。利用该方法制作了新型的光纤水听器, 并将其安装于大型变压器内部, 成功测量了不同负载电流情况下变压器内部的噪声谱。该技术和光纤振动传感技术的结合可为变压器内部的振动噪声监测提供有效手段。

参 考 文 献

- 1 Foster S L, Reiplinger E. Characteristics and control of transformer sound[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(3): 1072-1077.
- 2 Bartoletti C, Desiderio M, Carlo D D, *et al.* Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 221-229.
- 3 朱光伟, 张彼德. 电力变压器振动监测研究现状与发展方向[J]. 变压器, 2009, 46(2): 23-24.
- 4 Li Ying, Huang Ying, Zou Yuxing, *et al.* Test and research of load noise in large transformer[J]. Transformer, 2015, 52(8): 53-58.
李 英, 黄 莹, 邹宇星, 等. 大容量变压器负载噪声的试验研究[J]. 变压器, 2015, 52(8): 53-58.
- 5 Bucaro J A, Dardy H D, Carome E. Fiber-optic hydrophone[C]. SPIE, 1990, 1169: 266-269.
- 6 Davis A R, Kirkendall C K, Dandridge A, *et al.* 64 channel all optical deployable acoustic array[C]. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1997: OFA6.
- 7 Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K, *et al.* Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 19-30.
- 8 Liu Ying, Li Yushen, Xu Dawei, *et al.* Research and realization of interferometric Michelson fiber optic hydrophone[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(11): 30-32.
刘 鹰, 李玉深, 徐大伟, 等. 迈克尔逊干涉型光纤水听器研究与实现[J]. 传感器技术, 2005, 24(11): 30-32.
- 9 Li Zhineng, Shen Liang, Ye Xianfeng. Study of polarization-insensitive fiber optic Michelson interferometric sensors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(1): 44-46.
李志能, 沈 梁, 叶险峰. 偏振无关的 Michelson 光纤传感器的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(1): 44-46.
- 10 Wang Jianfei, Wang Xiao, Luo Hong, *et al.* Influence of rotation angle and working wavelengths of Faraday rotation mirror on single-mode fiber optics Michelson interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1042-1046.
王建飞, 王 潇, 罗 洪, 等. 法拉第旋光镜旋转角和工作波长对单模光纤迈克尔孙干涉仪性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1042-1046.