

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.051

计及动态疲劳损伤特征的变压器非接触式激光测振技术

陆旭锋, 沙杰, 董海庆

(国网上海市电力公司嘉定供电公司, 上海 201899)

摘要:为了准确测量变压器的振动情况,提出一种计及动态疲劳损伤特征的变压器非接触式激光测振技术。根据变压器的硅钢板和线圈在磁场中的受力情况,得到变压器振动信号的产生机理,通过分析铁芯和线圈的振动传递途径,分析变压器振动传递途径。利用矩阵描述变压器的频率响应函数,通过计算频率响应函数的虚部差值,得到变压器的运行状态,结合衰减系数,提取出变压器的动态疲劳损伤特征。通过设计变压器非接触式激光测振仪,实现变压器的非接触式激光测振。实验结果表明:本技术能够根据变压器的疲劳损伤特征,测量出振动信号,并将测振精度提高到90%以上。

关键词:疲劳损伤;特征提取;非接触式;变压器;激光测振;信号传递

中图分类号:TN249 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)02-0262-04

Non-contact Laser Vibration Measurement Technology of Transformer Considering Dynamic Fatigue Damage Characteristics

LU Xufeng, SHA Jie, DONG Haiqing

(Jiading Power Supply Company of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 201899, China)

Abstract: In order to accurately measure the vibration of transformers, a non-contact laser vibration measurement technology for transformers considering dynamic fatigue damage characteristics is proposed. Based on the force acting on the silicon steel plate and coil of the transformer in the magnetic field, the generation mechanism of the transformer vibration signal is obtained. By analyzing the vibration transmission pathways of the iron core and coil, the vibration transmission pathways of the transformer are studied. A matrix is applied to describe the frequency response function of a transformer, the operating state of the transformer is obtained by calculating the imaginary part difference of the frequency response function. Combined with the attenuation coefficient, the dynamic fatigue damage characteristics of the transformer are extracted. A non-contact laser vibration meter for transformers is designed to achieve the non-contact laser vibration measurement of transformers. The experimental results show that the proposed technology can measure vibration signals based on the fatigue damage characteristics of transformers, and raise the vibration measurement accuracy up to over 90%.

Keywords: fatigue damage; feature extraction; non-contact; transformer; laser vibration measurement; signal transmission

0 引言

变压器在运行中会受到振动的影响,长期的振动作用会导致变压器疲劳损伤,进而影响其正常运行和寿命。因此,测量变压器的振动可以帮助及时发现疲劳损伤的迹象,进行预防和维护。变压器测振要选择合适的测量位置和设备^[1],进行准确的参数设置、正确的时间安排,对测得的振动数据进行有效地分析和比较,并根据结果进行必要的异常判断和处理,以确保变压器的正常运行和可靠性^[2]。在变压器的振动监测和故障诊断领域,传统的接触式激光测振技术存在一些局限性,如测量精度、速度不足等问题^[3]。因此,已有相关的学者进行了研究。姚远等^[4]提出了一种基

于物联网的无接触联机绝缘测试系统,利用静电感应原理,在变压器保护装置周围测量空间磁场;通过低功耗、远程的无线通信 LoRa 模块将数据传输到网关节点,并传递给微处理器模块;通过计算机或移动终端实时展示可视化数据。但该方法无法全面评估变压器的振动情况,导致测量精度较差。潘超等^[5]建立一套完整的三相非均衡应力传递模型,分析了绕组不均衡应力和振动特征;基于电磁场理论和模态分析,提出了一种新型的电力系统模型,可以准确描述电力系统中的三相不均衡情况,并预测绕组的应力和振动特征。但该方法无法应用于高温和高速旋转环境下的设备,影响测量精度。

基于以上研究背景,本文针对变压器的动态

第一作者简介:陆旭锋(1977—),男,上海人,高级工程师,本科,研究方向为电力系统自动化、变电站运行维护等, xianwei72445@163.com。

疲劳损伤特征,提出一种非接触式激光测振技术,为变压器的设计提供一种有效的测试技术。

1 变压器非接触式激光测振技术设计

1.1 变压器振动信号的产生机理和特征分析

变压器通常安装在支撑并固定变压器的基础上。其基础的不稳定、强度的不足等问题都可能引起变压器的振动,进而导致疲劳损伤。

根据变压器振动信号产生的机理,发现铁芯和线圈的振动会导致变压器产生振动^[6]。图1给出了变压器振动信号的具体传递途径。

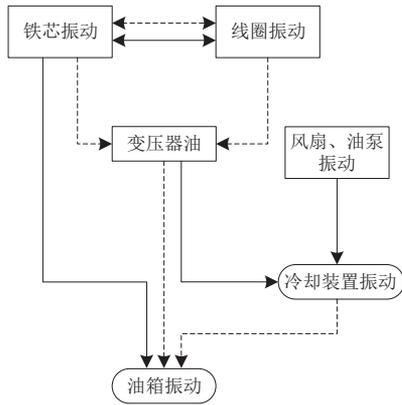


图1 变压器振动传递途径

通过铁芯垫脚的固态传递和绝缘油的液态传递两种方式,将铁芯的振动传递到油罐壁上^[7],而线圈的振动只能从绝缘油中传到油罐壁上,而像风扇、油泵等制冷装置的振动是通过固态传递的方式传到变压器的油罐内。

为了分析变压器振动信号的产生机理并了解其特征,计算铁芯中硅钢板所受的磁致伸缩力和线圈在磁场中的电磁力。

1) 由硅钢板所受的磁致伸缩所产生的振动为

$$s = -\frac{2L_{\text{Si}}E_{\text{Si}}U_{\text{A}}^2}{(N_{\text{c}}S_{\text{Fe}}B_{\text{Fe}})^2}\cos 2f \quad (1)$$

式中: L_{Si} 表示硅钢板的长度; E_{Si} 表示硅钢板的磁感应强度; B_{Fe} 表示线圈的磁感应强度; U_{A} 表示电压幅值; f 表示电源的运行频率; N_{c} 表示线圈的匝数; S_{Fe} 表示线圈的横截面积。完成硅钢板所受的磁致伸缩力的计算,可以了解由于磁场变化而引起的变压器振动,评估硅钢板的应力及其对变压器的疲劳损伤情况。

2) 变压器的线圈在磁场中受到电磁力的影响之后,会发生一定松动和变形^[8],当线圈在磁场中处于 ϕ 位置时,所受的电磁力为

$$F_{\text{q}} = B_{\text{q}}\phi I \quad (2)$$

式中: I 表示流过变压器的负载电流; B_{q} 表示变压器对磁场的感应强度。完成线圈所受电磁力的计算,可以了解线圈在磁场中的运动和振动情况,预测线圈的位移和变形情况。

通过计算变压器振动产生的力和位移,可以提取变压器的动态疲劳损伤特征。

1.2 提取变压器的动态疲劳损伤特征

根据计算得到的 s 和 F_{q} ,评估振动的频率,进一步理解振动对变压器系统的影响,提取出变压器的动态疲劳损伤特征。当变压器在振动过程中出现疲劳损伤时,局部刚度会发生一些变化,从而影响变压器内部各个构件的动态响应。

为了提取到变压器的动态疲劳损伤特征,先对变压器的动态疲劳损伤进行定位^[9]。变压器在运行过程中,将其看作是一个自由度为 χ 的系统,通过构建 $i \times j$ 阶矩阵,描述系统运行的频率响应函数,表示为

$$G(\omega_f) = \begin{bmatrix} g_{11}(\omega_f) & g_{12}(\omega_f) & \cdots & g_{1j}(\omega_f) \\ g_{21}(\omega_f) & g_{22}(\omega_f) & \cdots & g_{2j}(\omega_f) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{i1}(\omega_f) & g_{i2}(\omega_f) & \cdots & g_{ij}(\omega_f) \end{bmatrix} \quad (3)$$

在式(3)的矩阵中,元素 $g_{ij}(\omega_f)$ 表示变压器在 j 点进行激励时,在 i 点得到的频率响应函数,可以通过下式计算,即

$$g_{ij}(\omega_f) = \sum_{k=1}^n \frac{a_{ik}a_{jk}(F_{\text{q}} + s)}{(\omega_k^2 - \omega_f^2) + 2\varepsilon_k\omega_k\omega_f} \quad (4)$$

式中: a_{ik} 和 a_{jk} 分别表示 k 阶矩阵的第 i, j 个元素的动态响应; ω_k 表示变压器的固有频率, ω_f 表示变压器的振动频率; ε_k 表示阻尼比。

当变压器在运行过程中出现疲劳损伤之后,可以根据疲劳损伤产生的过程中,从频率响应函数的虚部差值^[10]得到变压器的运行状态,其中虚部差值的计算公式为

$$\Delta_{\text{imag}} \approx \frac{\varepsilon_k g_{ij}(\omega_f)}{2f_p^2} \left[\frac{1}{f_p} - \frac{1 - \Delta\mu_p}{f_p \left(1 + \frac{\Delta\mu_p^2}{f_p^2} \right)} \right] \quad (5)$$

式中: f_p 表示频率响应函数在 p 阶模态下的频率; $\Delta\mu_p$ 表示 p 阶模态下的频率与固有频率之间的差值。

对于频率响应函数而言,当其虚部差值 Δ_{imag} 发生变化时,即可实现变压器动态疲劳损伤的定位。疲劳损伤位置确定之后,即可提取其特征。

通过测量激光在变压器中传输的速度差值,就可以提取到变压器的动态疲劳损伤特征。当激光信号到达变压器的疲劳损伤处时,就会发生衰减^[11],激光信号的衰减系数为

$$\xi = 10 \times \lg \frac{W_0}{W} + \Delta_{\text{imag}} \quad (6)$$

式中: W_0 表示变压器表面对激光的反射波波幅; W 表示激光穿出变压器表面的反射波波幅; ξ 表示衰减系数。变压器的疲劳损伤越严重,激光衰减系数 ξ 的值就越大^[12]。根据衰减系数 ξ 的大小,就可以判断出变压器的疲劳损伤程度。

对变压器的疲劳损伤基波和谐波信号进行变换处理,变换后的信号峰值体现出变压器疲劳损伤的全部特征,通过变压器疲劳损伤信号的二次变换,即可提取变压器疲劳损伤的局部特征,则能更准确地评估变压器的运行状态。

变压器产生的疲劳损伤对激光信号造成非线性效应的时限很短,通过上述步骤,获取变压器的动态疲劳损伤特征,从而准确地评估变压器的运行状态。

1.3 变压器非接触式激光测振仪的工作原理及实现

考虑到变压器动态疲劳损伤特征 ξ 是由振动引起的,因此根据 ξ 设计一种非接触式激光测振仪,利用光纤干涉原理监测变压器的振动情况,为变压器非接触式激光测振的实现提供设备支持。非接触式激光测振仪实质上是一种光纤调制传感器,主要利用光纤干涉原理实现测振功能^[13],其模型如图 2 所示。

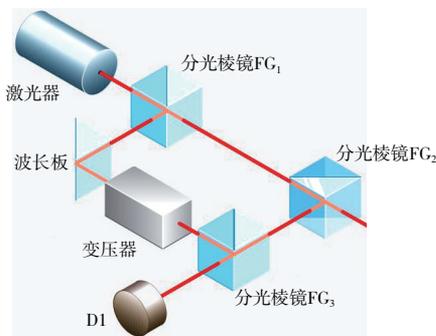


图 2 非接触式激光测振仪模型

根据图 2 可知,利用激光器发出一个 $0.5894 \mu\text{m}$ 的偏振光,通过分光棱镜 FG_1 将其分为传感光和参考光。传感光经过偏振分光棱镜 FG_2 和 $1/4$ 波长板之后,传递到变压器,经过变压器表面的反射,再回到分光棱镜 FG_2 传递给分光棱镜 FG_3 。分光棱镜 FG_3 中的光与分光棱镜 FG_2 发射的参考光

存在相互干扰的关系,所形成的干扰信号通过光检测器 $D1$ ^[14],经过电路的处理,就可以得出变压器的振动情况。

为了方便变压器振动信号的检测,假设变压器的振动速度为 V ,引入外差干涉技术,在非接触式激光测振仪中添加一个频率为 f_g 声光调制器^[15],此时原输出信号的频率为

$$f = f_s + f_g = f_s + \frac{2V}{\xi} \quad (7)$$

式中 f_s 表示多普勒频率。根据式(7)就可以检测出变压器的振动幅度和位移。

综上所述,根据非接触式激光测振模型的工作原理,就可实现变压器的非接触式激光测振。

2 实验分析

2.1 实验步骤

为了测试非接触式激光测振仪在变压器中的性能,使用 Polytec PDV-100 非接触式激光测振仪进行变压器振动信号的测量,通过激光束照射到变压器的振动目标上,并通过测量激光反射回来的信号得到振动信息。采用 Keysight DSOX2004A 示波器测量变压器振动信号的波形、幅值、频率等参数。通过 DAQmx 编写采集任务代码,实现数据采集功能。使用 LabVIEW 中的信号滤波器、傅里叶变换、相位计算等对采集到的光波数据进行去除噪声、滤波、归一化和相位校准等处理,并通过信号处理、频谱分析工具进行提取光波数据中的关键特征和分析。利用 LabVIEW 的图表、绘图工具,将处理后的数据进行可视化展示。如表 1 和图 3 所示。

当变压器的振动信号处于全波谐振时,输入电压与端点的振动速度之间会存在一定位相差,其变化情况如图 3 所示。

从表 1 和图 3 的结果可以看出,无论是半波谐振还是全波谐振,随着输入电压的增大,输入电压与端点振动速度之间的位相差逐渐减小。对于 $3/2$ 波长的谐振而言,输出速度波形的位相差始终比输入电压小。当负载处于开路状态时,位相差接近于 π ,当负载处于短路时,位相差近似等于 0。在表 1 的实验数据中,当负载处于短路状态下,位相差并没有接近 0 的原因是变压器的输出端仍然存在倍压整流电路,负载并没有完全处于短路状态。

根据图 3 的振动速度波形可知,当输入的电

压比较大时,变压器振动过程中的速度波形会出现失真的情况,说明输入电压增大之后,变压器的振动逐渐趋于饱和。

表 1 变压器振动测量结果

频率/ kHz	输入 电压/V	输出 电压/V	速度/ (mm/s)	位移/ μm	位相差/ ($\mu\text{s}/(^{\circ})$)
	3.3/9.8	109	880	3.48	4.60/68
36.45 (半波 谐振)	7.2/18.9	149	1 120	4.56	3.80/55
	10.2/29.7	173	1 330	5.47	3.30/43
	13.5/38.7	184	1 435	5.76	2.50/36
109.35 (3/2 波长 谐振)	4.1/10.9	81	718	0.89	0.24/12
	7.6/22.1	113	614	0.76	-0.83/-36
	11.3/31.6	136	597	0.74	-0.76/-35
72.9 (全波 谐振)	13.6/38.3	138	692	0.87	-1.30/-56
	2.4/7.5	120	695	1.36	2.90/84
	4.9/12.8	210	1 015	2.03	2.20/56
72.9	8.4/23.8	274	1 055	2.14	0.38/12
	12.6/35.7	304	983	1.96	0.14/4.2
	15.9/44.3	324	823	1.68	0.07/1.8
72.9	7.5/21.2	开路	388	0.76	6.40/183
	6.1/16.8	短路	1 089	2.24	1.20/32

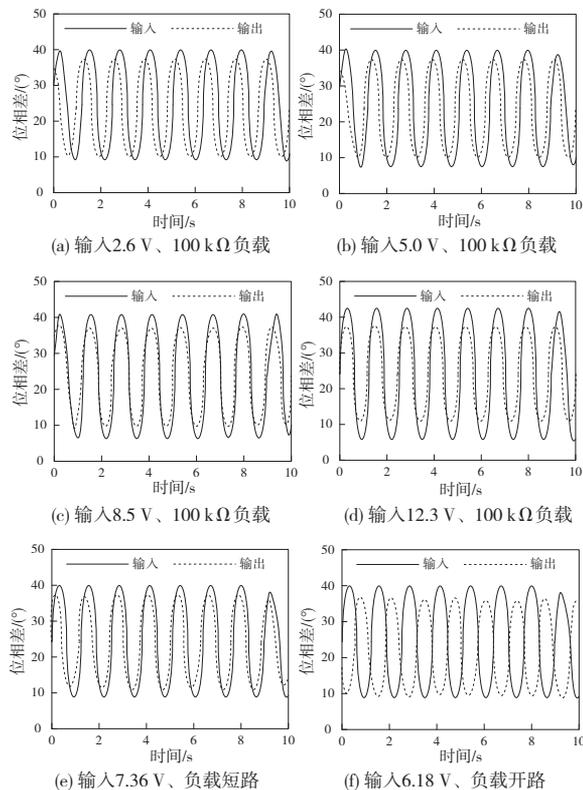


图 3 输入电压与端点振动速度之间的位相差变化情况

2.2 对比分析

为了验证本文技术在变压器非接触式激光测振中的性能,引入基于物联网技术的测振技术和基于电磁-机械耦合原理的测振技术作对比,在不同的振幅下,测试了变压器非接触式激光测振精度,结果如图 4 所示。

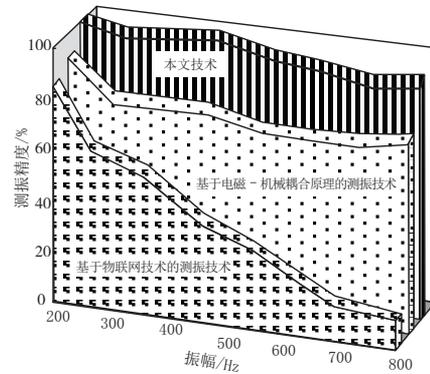


图 4 变压器非接触式激光测振精度

图 4 的结果显示,采用基于物联网技术的测振技术时,随着振幅的增大,变压器非接触式激光测振精度迅速下降,当振幅为 800 Hz 时,测振精度降到 20% 以下。采用基于电磁-机械耦合原理的测振技术时,测振精度受到振幅的变化影响比较小,可以将测振精度提高到 60% 以上。而采用本文技术时,变压器测振精度是最高的,随着振幅的增大,测振精度始终高于 90%,说明本文技术可以提高变压器非接触式激光测振性能。

3 结语

本文提出一种计及动态疲劳损伤特征的变压器非接触式激光测振技术。经过实验测试发现,该技术能够测量变压器的振动情况并提高测振性能。本文研究虽然取得一定成果,但是还存在很多不足,在今后的研究中,希望对线圈和铁芯振动与变压器故障之间的关系进行研究,完善变压器振动与故障的关系,保证变压器的稳定工作。

参考文献:

- [1] 张仕民,丰遥. 基于振动信号的变压器铁心与绕组故障区分方法[J]. 电测与仪表,2021,58(6):161-166.
- [2] 何兆磊,余恒洁,林聪,等. 基于多源参数融合的配变台区状态估计[J]. 机械制造与自动化,2023,52(1):209-214.
- [3] 钟思翀,祝丽花,王前超,等. 电力变压器振动噪声分析及其有源降噪[J]. 电工技术学报,2022,37(增刊1):11-21.

(下转第 307 页)

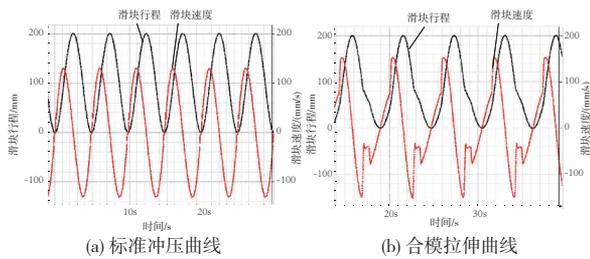


图 7 标准冲压曲线和合模拉伸曲线运行数据采集

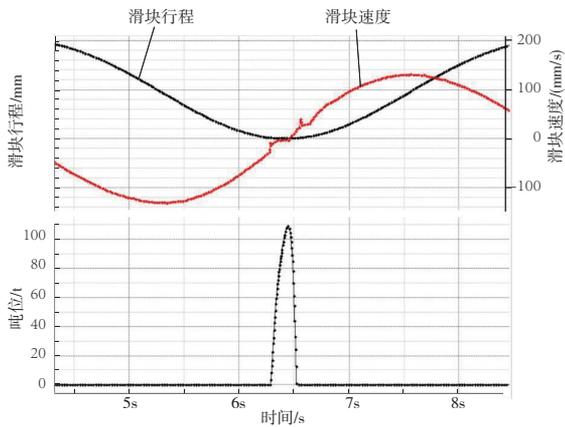


图 8 标准冲压曲线运行数据采集

从图 7 中可以看出,用户可以根据工艺要求设定自定义的冲压曲线,不仅响应速度快,而且曲线处理平滑,完全可以满足工艺要求。从图 8 中可以看出,在冲压刚开始时(吨位刚开始增加时),

速度存在瞬时抖动,但很快趋于平滑,满足运行工艺要求。

5 结语

本文所描述的基于 Codesys 与 MCGS 的曲柄连杆压机控制系统应用广泛,面向大多数曲柄连杆型压机。经调试,本系统满足控制要求,实现曲柄连杆型压机正常运行,并能完成各种工艺曲线。使曲柄连杆型压机具备高响应、高精度、高可靠性等特点,弥补了机身本体方面的不足。通过本系统的优化,将曲柄连杆型压机与伺服驱动系统有机地结合在一起。

参考文献:

[1] 豆征,李勇,陈永刚. 自动机曲柄连杆机构柔性冲击研究[J]. 机械强度,2023,45(1):176-182.
 [2] 邱浩东,张训国,范元勋. 基于反馈线性化滑模控制的电液位置同步伺服系统研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(6):185-189.
 [3] 冯雪峰. 伺服压力机数控系统的设计与实现[D]. 南京:东南大学,2019.
 [4] 宋清玉. 大型机械伺服压力机的关键技术及其应用研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.
 [5] 彭发忠,王传英,柴恒辉,等. 基于分层结构的伺服压力机滑块轻量化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(12):1016-1022.

收稿日期:2023-08-02

(上接第 265 页)

[4] 姚远,梁科,张幸,等. 基于物联网技术的变压器套管非接触式检测方法[J]. 电工技术,2022(21):185-186,241.
 [5] 潘超,陈祥,蔡国伟,等. 基于电磁-机械耦合原理的变压器三相不平衡运行绕组振动模-态特征[J]. 中国电机工程学报,2020,40(14):4695-4707,4747.
 [6] 余长厅,黎大健,陈梁远,等. 基于形态分量分析的变压器有载分接开关振动信号分离[J]. 变压器,2021,58(12):30-34.
 [7] 杨玥坪,树婷,吴玖汕,等. 变压器绕组局部放电量测量误差计算及其修正方法研究[J]. 西安交通大学学报,2022,56(10):122-129.
 [8] 张杰,程林,谭丹,等. 变压器有载分接开关的振动信号特征识别和状态评估技术研究[J]. 电测与仪表,2021,58(4):52-59.
 [9] 尚海昆,许俊彦,李宇才,等. CEEMDAN 在变压器振动信号提取中的应用[J]. 控制理论与应用,2022,39(3):459-468.
 [10] 丁彬,吕亮,刘强,等. 基于振动频响法的变压器绕组

松动故障检测方法研究[J]. 高压电器,2022,58(9):203-209.
 [11] 李慧奇,李金博,杨光. 间谐波激励下变压器励磁-振动特性的实验研究与计算分析[J]. 高电压技术,2022,48(5):1781-1790.
 [12] 潘志城,邓军,彭翔,等. 计及谐波影响的在运换流变压器振动信号特性分析[J]. 变压器,2021,58(9):63-67,47.
 [13] 崔佳嘉,马宏忠,李楠,等. 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):48-55.
 [14] 李慧奇,闫长祺,杨光,等. 间谐波下变压器铁心振动噪声特性的实验研究[J]. 太原理工大学学报,2020,51(6):874-880.
 [15] 韩学,宋文乐,毛学魁,等. 基于磁致伸缩效应的三相五柱变压器振动特性仿真与实验研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(1):48-55.

收稿日期:2023-07-19