

基于光学电流互感器的核电站辅助变压器 断相监测

张晓伟 钱厚军 王东博 黄贵鑫 沈唯威

(中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要 核电站长期处于备用状态的辅助变压器发生高压侧单相断线后, 高、低压两侧电压依然平衡, 对核电机组的安全运行构成威胁。为及时发现断线异常, 本文根据断相后辅助变压器的其他电气特征, 选择光学电流互感器对高压侧电流进行精确测量, 并针对不同工况制定相应的断相判别逻辑, 确定辅助变压器断相监测方案。通过研究光学电流互感器的设置方法、分辨力与测量范围, 分析其技术特点; 同时, 从硬件、软件、逻辑等方面介绍断相监测系统; 最后, 针对光学电流互感器, 给出定期检查维护策略。

关键词: 光学电流互感器; 分辨力与测量范围; 断相监测方案; 定期检查策略

Open-phase monitoring of nuclear power plant auxiliary transformer based on optical current transformer

ZHANG Xiaowei QIAN Houjun WANG Dongbo HUANG Guixin SHEN Weiwei

(CNNC Nuclear Power Operation Management Co., Ltd, Haiyan, Zhejiang 314300)

Abstract Both sides of the high and low voltages of the auxiliary transformer, which is in the standby state for long time in the nuclear power plant, is still balanced after the single phase open on the high voltage side, posing a threat to the safe operation of nuclear power units. In order to detect the open-phase timely, the optical current transformer is selected to measure the current of the high voltage side accurately according to other electrical characteristics of the auxiliary transformer after phase open, and the corresponding identifying logic is developed according to different working conditions to determine the open-phase monitoring scheme. The setting method, resolution and measuring range of the optical current transformer are studied to understand its technical characteristics. The open-phase monitoring system is introduced from the aspects of hardware, software and logic. At last, maintenance strategy of regular inspection for optical current transformer is given.

Keywords: optical current transformer; resolution and measuring range; open-phase monitoring scheme; regular inspection strategy

0 引言

世界核电运营者协会 (world association of nuclear operators, WANO) 于 2015 年 1 月发布了重要运行事件报告《断相事件对安全的挑战》, 要求所有成员仔细评估该重要运行事件报告 (significant operating event report, SOER), 结合核电站的设计、程序、政策和实践, 来确定如何应用此运行经验进一步提高核电站的安全性。

核电站辅助变压器 (auxiliary transformer, AT) 是为厂用电提供辅助电源的变压器。核电站的运行特点是辅助变压器在绝大多数情况下处于空载备用状态, 且由电力线路单向供电。当失去厂外交流主电源时, 厂用电自动切换至由辅助变压器供电。核电站辅助变压器基本采用 YNy0 带三角形平衡绕组的联结组别, 少量采用 YNd11 的联结组别, 在单向供电线路中间或对侧开关站发生单相断线的情况下, 辅助变压器高、低压侧三相电压完全平衡^[1-4],

由于辅助变压器处于空载状态,断相前与断相后高压侧三相电流均接近零,常规继电保护和监视仪表无法反映辅助变压器已处于断相状态,运行人员无法及时发现此工况,对核电机组的安全运行构成威胁。因此,需要重点关注核电站的辅助变压器。空载辅助变压器高压侧单相断线后相电压变化见表 1。

表 1 空载辅助变压器高压侧单相断线后相电压变化

联结组别	一次电压/p.u.			二次电压/p.u.		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
Y/Δ任何铁心形式	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Y/Y 带三角形平衡绕组	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

1 辅助变压器高压侧单相断线特征与监测方案

本文提到的辅助变压器断相特征指辅助变压器高压侧单相断线的情况。辅助变压器断相后高、低压两侧仍然三相对称,但具有以下变化的电气特征:

1) 高压侧零序阻抗显著增大^[5-6]。

2) 如果断相点在核电站内(以下称近端断相),则断相相电流幅值降为零,健全相电流幅值上升到 $\sqrt{3}$ 倍,同时出现零序电流。

3) 如果断相点在线路中间或对侧开关站(以下称远端断相),由于线路对地电容的存在,则断相相会有电容性电流,且与健全相电流同相位,同时出现零序电流。线路对地电容容抗显著小于辅助变压器励磁电抗。

利用相量法对远端断相进行定性分析。辅助变压器远端断相如图 1 所示,以 YNd11 联结组别的空载变压器为例,假定在线路上或线路对侧开关站发生 A 相断相,需要考虑 A 相对地电容。

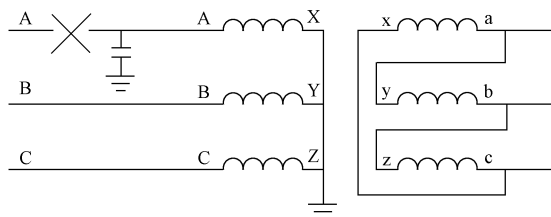


图 1 辅助变压器远端断相

将图 1 转换为图 2,图 2 中点划线框 1 可以看作一台电源性质的 V-V 接线的两相降压变压器,点划线框 2 可以看作一台负载性质的单相升压变压器,则线路 A 相对地电容相当于升压变压器的负载。根据变压器减极性原则,可以画出电流方向如图 2 中箭头所示。理论上,高压侧三相电流幅值相等,

相位相同,均滞后于 A 相电压 90° ,零序电流是相电流的 3 倍。

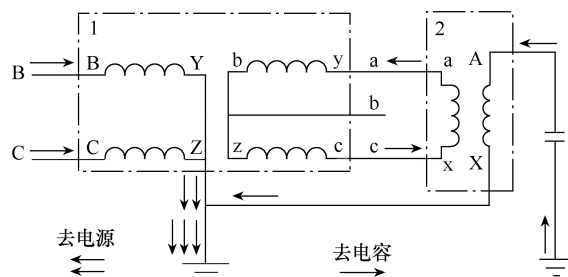


图 2 辅助变压器及其电流

针对上述辅助变压器断相特征,目前有两种监测方案:

1) 根据辅助变压器断相前后零序阻抗的显著变化,采用从辅助变压器高压侧中性点注入非工频电流的方式进行监测。当辅助变压器正常运行时,零序阻抗较小,注入电流大于设定值 1;当辅助变压器断相时,零序阻抗显著增加,注入电流小于设定值 2。或者,根据正常和断相两种情况下注入点的电流、电压变化情况计算零序阻抗,通过零序阻抗的变化可以判别出断相工况^[5-6]。

2) 根据辅助变压器断相前后相电流和零序电流幅值与相位的变化,采用光学电流互感器(optical current transformer, OCT)精确测量电流,可以判别出断相工况^[4,6],并且能够区分哪一相发生断相,以及断相点的远近。

本文重点讨论采用 OCT 的断相监测方案。

2 光学电流互感器原理与技术特点

2.1 OCT 工作原理

OCT 是电子式电流互感器的一大类,其工作原理主要是以法拉第(Faraday)磁光效应原理为基础,实现电流的测量,对被测电流周围的磁场进行线性积分,利用检偏器将偏振角的变化转变为输出光的变化,然后经过一系列信号处理检测出电流的变化^[7-10]。

OCT 组成如图 3 所示,包括光纤环与采集转换单元。OCT 原理框图如图 4 所示。图 4 中,光源发出的光经分光器进入起偏器变为线偏振光,再经相位调制后转换为两束相互正交的线偏光,两束相互正交的线偏光沿传输光纤传输至传感光纤环,经 $\lambda/4$ (λ 为波长)波片后分别转换为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。在一次导体中被测电流产生的磁场作用下,由于法拉第磁光效应,两束圆偏光产生正比

于被测电流的相位差。两束圆偏光经传感光纤环端部的反射镜反射后沿传感光纤返回，返回的两圆偏光经波片后又变成两束相互正交的线偏光，返回的两束线偏光的相位差与被测电流成线性关系。返回的两束线偏光相位差携带被测电流信息，在起偏器处于干涉后，相位差的变化转换为光强的变化，带有被测电流信息的光强信号经分光器输出至光探测器，光探测器将光信号转换为电信号，利用解调电路从中解调出被测一次电流值。

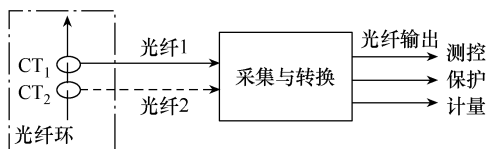


图3 OCT组成

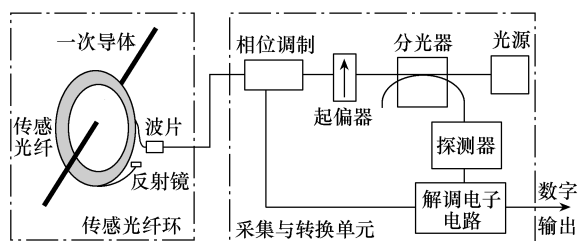


图4 OCT原理框图

2.2 OCT 技术特点与应用

传统电磁式电流互感器选型时需要考虑容量、准确度、电流比等参数，以及开展动、热稳定核算^[11]。传统电磁式电流互感器存在磁饱和、铁磁谐振、只能测量交流电流等缺点^[12]，而OCT没有以上缺点，以其绝缘性能优良、无暂态特性、动态测量范围大、测量精度高、频率响应宽、交直流电流均可测量、易于安装、易于数字设备接口等优点，成为传统电流互感器的替代品。目前，OCT在电力系统尤其是直流输电和换流站中已有广泛应用^[9, 13-15]。

通常，电磁式电流互感器常用电流比、准确度（如5P30）、容量、饱和特性（测量级/保护级）、动热稳定参数等技术参数来描述，但OCT没有容量参数，也没有测量级与保护级的区分，输出量为数字量。

某辅助变压器联结组别为YNd11d11，电压比为220V/6.3kV，额定容量为50MV·A，额定电流为131.2A，空载电流为0.5%（0.656A）。在高压侧三相和中性点处共安装4只OCT，转换单元采用16bit高速模数转换器（analog-to-digital converter, ADC），最大输出数字量 $2^{16}-1=65\,535$ ，OCT总体延迟时间

控制在0.2ms以内。设置A、B、C三相OCT额定电流为200A，测量通道对应输出11 585，保护通道对应输出463。OCT变比与测量范围见表2。

表2 OCT变比与测量范围

应用场合	用于测量		用于保护	
	数值/A	对应输出	数值/A	对应输出
额定电流	200	11 585	200	463
最小分辨电流	0.017	1	0.432	1
瞬时最大值	566	32 767	14 154	32 767
反向瞬时最大值	-566	-32 767	-14 154	-32 767
最大有效值	400	23 170	10 000	23 150

以电流瞬时值单周期正弦波形为例，用于测量的OCT最大线性测量范围如图5所示。当辅助变压器实际一次电流瞬时值超出566A（有效值 $566A/\sqrt{2}=400A$ ）时，测量的瞬时值波形将削顶失真。

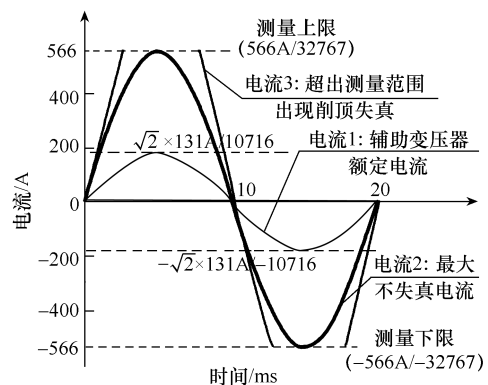


图5 OCT测量范围

同一个光纤环可以设置两组变比，既可用于仪表回路高精度测量，又可用于保护回路高倍数测量。用于保护的OCT，可测量的不失真最大交流电流有效值为 $14\,154A/\sqrt{2}\approx 10kA$ ，是辅助变压器额定电流的约76.2（ $10\,000A/131.2A$ ）倍。用于测量的OCT，其变比可以设为100A/11 585，可测量的最小分辨电流达到8.6mA，最大不失真交流电流有效值为 $566A/2/\sqrt{2}\approx 200A$ ，也能满足测量要求。对于辅助变压器中性线OCT，可以设置额定电流为20A，通道对应输出11 585，则相应的最小分辨电流可达到1.7mA。

OCT用于保护时，通过牺牲分辨力来扩大测量范围；用于测量时，牺牲测量范围来提升分辨力。同时，OCT不存在磁路饱和问题，也没有容量与二次负载阻抗匹配问题。

3 光学电流互感器在断相监测中的应用

目前,某辅助变压器尚未配置 OCT 及断相监测,所配置的电流互感器均为电磁式,主要参数见表 3。该辅助变压器长期空载,空载电流为 0.566A,电流表读数基本为零。辅助变压器断相后,三相电流的变化较小,未超出电磁式电流互感器的测量误差范围。

表 3 某辅助变压器电流互感器主要参数

用途	测量	保护
电流比/(A/A)	200/5	600/5
准确度	0.2	10P/20
容量/(V·A)	15	100

采用小电流比电磁式电流互感器,如 10A/5A 甚至 5A/5A,可以测量辅助变压器空载电流。但是,由于电磁式电流互感器的固有特点,无法设计出既满足高动稳定和热稳定性要求,又具有小电流比的成型产品,生产制造难度大,故现有小电流比电磁式电流互感器无法适应辅助变压器带载及短路故障工况。

根据辅助变压器断相的电气特征,以及 OCT 的技术特点,可以利用 OCT 解决辅助变压器断相监测问题。在辅助变压器高压侧电缆或高压套管适当位置安装光纤环,通过光纤连接采集与转换单元,并最终连接至断相监测装置。辅助变压器断相监测示意图如图 6 所示。图 6 中,除电压互感器及其电缆采用原有设备外,其他设备为新增设备。光纤环支架可以根据现场实际预制成哈夫结构,现场绕制光纤安装光纤环,无需对一次设备进行拆解,新增设备的信号全部采用光纤进行传输。

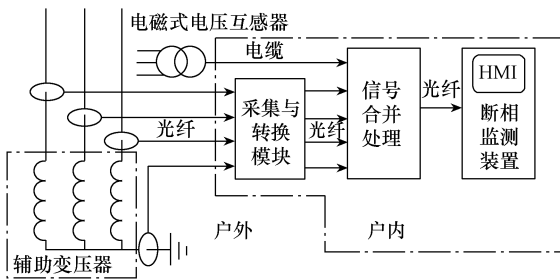


图 6 辅助变压器断相监测示意图

断相监测装置内部硬件框图如图 7 所示。根据前述分析,只要对 OCT 设置合理的变比,就能在人机界面 (human machine interface, HMI) 实时精确显示辅助变压器运行期间 A、B、C 三相电流及中性线不平衡电流,以及电流变化情况。通过电流的变化,

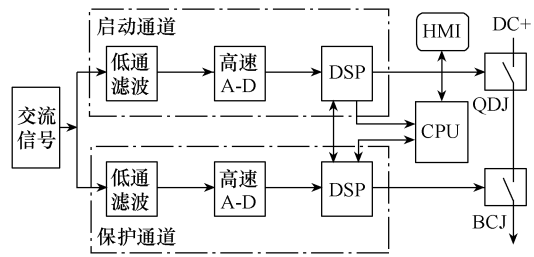


图 7 断相监测装置内部硬件框图

技术人员可以判断系统是否出现异常。

断相监测装置不仅具有测量功能,其内部硬件还具有高速的采集转换能力与强大的逻辑计算能力,能够根据设定逻辑与设定值,判别辅助变压器各种异常运行工况并发出报警,亦可根据设置自动跳闸。

断相监测装置内部启动通道和保护通道并行工作,2 套数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 采用“与门”出口 (串联) 方式。2 套 DSP 具有独立的采样和出口电路,启动 DSP 内设总启动元件,通过启动继电器 (QDJ) 开放出口继电器的正电源;保护 DSP 主要完成保护的逻辑及跳闸出口功能,通过保护出口继电器 (BCJ) 出口。2 个 DSP 之间进行实时数据交互,实现严格的互检和自检,任一 DSP 故障,装置立刻闭锁并报警,杜绝硬件故障引起误动。

辅助变压器断相监测基本逻辑如图 8 所示。远端断相和近端断相均会出现零序电流。近端断相以断相相断流为特征,远端断相以三相电流同相位为特征,同时根据三相电流滞后于某相相电压 90° 来判断该相发生断相。

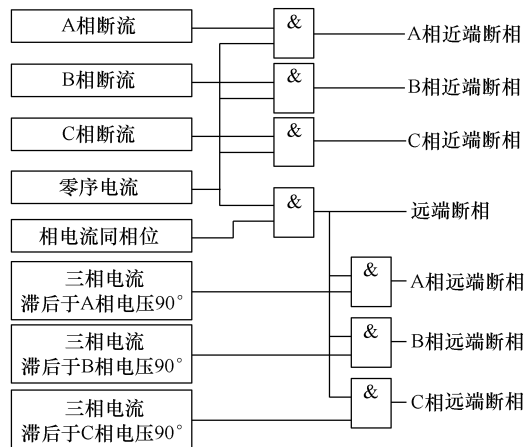


图 8 辅助变压器断相监测基本逻辑

图 8 所示逻辑仅针对 YN_y 联结组别带三角形平衡绕组和 YNd11 联结组别的辅助变压器。断相监测

装置不仅可用于上述特定情况,还可用于判断两相的情况,以及其他联结组别变压器和中性点不接地变压器。同时,断相监测装置需要配置各种闭锁功能,如光纤品质不良、硬件故障等。

4 OCT 的缺点与定期检查策略

目前, OCT 存在以下待改进的方面^[15-19]:

1) 抗噪声性能。OCT 测量小信号区间的信噪比不高,信号越小,误差越大。

2) 抗振性能。持续的振动影响 OCT 内部光路折射的变化,导致输出信号不稳定。

3) OCT 内部结构复杂且精密,工艺要求较高。如果在现场制作安装,OCT 准确度将受到一定影响。

4) OCT 采集与转换部分包括数量庞大的电子器件,电子器件的可靠性会影响 OCT 的长期可靠性。

5) OCT 尚未在电力系统得到大规模应用,尚无平均无故障时间 (mean time between failure, MTBF) 统计数据。

据调查,国内核电站已于 2020 年开始投运基于 OCT 技术的辅助变压器断相监测装置,目前已有 7 套在运,尚无运行异常的经验反馈。前述 220kV/50MV·A 辅助变压器,将于 2025 年 10 月实施改造,增设基于 OCT 的断相监测装置。初步提出针对 OCT 的定期检查维护策略如下:

1) 核电机组并网发电运行期间,每月进行一次巡检,对照装置说明书确认设备工作正常,记录辅助变压器运行参数并确认无误。

2) 当核电机组换料大修时,可在辅助变压器停电期间对 OCT 进行现场校验,按图 9 所示接线开展校验工作,依次给 A 相、B 相、C 相、中性线的光纤环通电流,以标准表为基准,读取断相监测装置显示的电流,采用比对法计算变比误差。

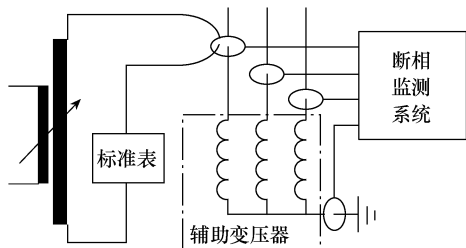


图 9 在辅助变压器现场校验 OCT 接线

5 结论

国内核电机组已逐步增设基于 OCT 技术的辅助变压器断相监测装置,并开展示范运行。本文通

过介绍 OCT 在辅助变压器断相监测方面的应用,以期促进核电技术人员了解、理解其原理与技术特点,掌握检查、校验、维护方法,从而提高核电站设备的运行可靠性。

参考文献

- [1] 罗皓文,严文洁,廖玄,等.一起断线引起主变间隙保护临界动作案例分析[J].电气技术,2019,20(12):108-111.
- [2] 时谊,陈海龙,丘慧龙,等.核电站辅助变压器缺相保护研究[J].电测与仪表,2018,55(11):125-129.
- [3] 钱厚军,黄贵鑫,张晓伟,等.启备变高压侧单相断线分析与模拟实验[J].智能建筑电气技术,2024,18(3):76-79,84.
- [4] 魏巍,彭钰.核电厂辅变空载运行期间辅助电源单相断相故障特征分析及应对措施[J].核科学与工程,2023,43(3):686-694.
- [5] 黄昌军,陈海龙,张轩,等.外加电源注入式核电厂辅助变缺相保护研究[J].中国核电,2022,15(3):347-352.
- [6] 魏巍,陈海龙.核电厂辅助变压器进线回路断相监测方案研究[J].核科学与工程,2023,43(3):601-612.
- [7] 于文斌,张国庆,路忠峰,等.光学电流互感器的抗干扰分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(12):8-12,18.
- [8] 尚秋峰.光学电流互感器实用化方法的研究[D].保定:华北电力大学,2005.
- [9] 李岩松,郭志忠,杨以涵,等.自适应光学电流互感器的基础理论研究[J].中国电机工程学报,2005,25(22):24-29.
- [10] 向勇,李岩松.基于粒子滤波的光学电流互感器信号处理方法研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(18):101-104.
- [11] 张晓伟,钱厚军,张旭,等.励磁变压器 CT 参数核算与选型设计[J].中国核电,2021,14(4):490-492,521.
- [12] 邓成林,蔡新景,付丁丁.电流互感器铁心剩磁影响因素仿真分析[J].电气技术,2021,22(9):22-26.
- [13] 王光,陈俊,王凯,等.基于光学电流互感器的发电厂保护优化研究[J].水电与抽水蓄能,2022,8(1):19-23.
- [14] 赵俊,许立国,罗苏南,等.适于电缆线路故障判别的柔性光学电流互感器[J].电子器件,2015,38(1):32-36.

匝间短路,中间变压器电压比减小,从而引起二次电压降低。为防止类似事件再次发生,提出以下改善措施:

1) 对同厂家、同型号、同批次电容式电压互感器设备进行摸底排查,制定差异化运维策略,重点关注异常设备,对于危急缺陷设备,应立即按流程汇报,申请停运开展停电诊断试验。

2) 在设备运行过程中监测二次电压波形,观察二次电压波形和电压幅值是否正常。

3) 定期对设备进行红外测温,对比三相温差和上下节温差,如超过 1.5K 应缩短测温周期并警惕其温度变化。

4) 例行巡视时,要注意电磁单元绝缘油颜色和油位,有无渗漏油现象,有无放电异响。如果设备运行中二次电压波形和电压幅值异常,或同组三相设备温差超过 3K,应取油进行气相色谱分析,以准确判断设备状态。

5) 对阻尼绕组的设计和选型,应充分考虑设备运行环境中的电能质量影响。

参考文献

- [1] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 温伟杰, 胡铁伟, 陈晓龙, 等. 典型配电故障下直流偏置电压形成及电压互感器熔断分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 226-240.
- [3] 王祺元, 靳巩固, 康婧婧, 等. 高压直流输电工程换

流变进线电压互感器断线故障分析[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 71-75.

- [4] 杨鸣, 史一丰, 司马文霞, 等. 20kV 配电网互感器熔断机制分析及抑制措施[J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7577-7591.
- [5] 陈一惊, 刘坤雄, 冯雅琳, 等. 电容式电压互感器谐波监测技术综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 70-75.
- [6] 韩慕尧, 罗皓文, 刘傲洋, 等. 一起 110kV 电容式电压互感器二次零序电压异常波动故障分析[J]. 电气技术, 2021, 22(12): 53-56.
- [7] 沈泽亮, 汪金刚, 王谦, 等. 一种基于低频窄带扫描的电磁式电压互感器杂散电容测量与精确建模方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2211-2221.
- [8] 魏斌, 蒲军. 顺北油田二区变电站 35kV 电压互感器烧毁故障分析[J]. 电气技术, 2024, 25(2): 74-78.
- [9] 左涛. 一起化工厂 10kV 开关柜过电压保护器热崩溃事故分析[J]. 电气技术, 2024, 25(2): 68-73.
- [10] 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [11] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

收稿日期: 2025-02-18

修回日期: 2025-02-21

作者简介

李冬雪(1993—), 男, 河北保定人, 工程师, 从事电力系统一次设备检修与高压试验方面的工作。

(上接第 79 页)

- [15] 曾林翠, 白世军, 李毅, 等. ZCW9-252 智能隔离断路器中光学电流互感器的应用[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 184-189.
- [16] 耿祥瑞, 刘舒杨, 柴斌, 等. 光纤电流互感器超辐射发光二极管光源衰减故障分析[J]. 电气技术, 2024, 25(12): 21-27.
- [17] 李岩松, 欧阳进, 刘君, 等. 基于 Allan 方差的磁光玻璃型光学电流互感器噪声分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 126-129, 137.

[18] 陈金玲, 李红斌, 刘延冰, 等. 比较式光学电流互感器的分析设计与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 114-118.

[19] 李天麟, 高吉普, 鲁彩江. 光学电流互感器研究与评述[J]. 贵州电力技术, 2015, 18(12): 73-75, 68.

收稿日期: 2025-01-20

修回日期: 2025-02-10

作者简介

张晓伟(1990—), 男, 安徽省阜阳市人, 从事核电厂系统设备维修管理与技术研究工作。