



《输变电设备状态检修试验规程》新版技术解析

石俏 刘有为 方燕虹 王俊波

Interpretation of the New Edition of “Code of Condition-Based Maintenance & Test for Electric Equipment”

SHI Qiao, LIU Youwei, FANG Yanhong, WANG Junbo

引用本文:

石俏, 刘有为, 方燕虹, 等. 《输变电设备状态检修试验规程》新版技术解析 [J]. 现代电力, 2022, 39(5): 623–630. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0174

SHI Qiao, LIU Youwei, FANG Yanhong, et al. Interpretation of the New Edition of “Code of Condition-Based Maintenance & Test for Electric Equipment” [J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(5): 623–630. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0174

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0174>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于风电机组状态信息的海上风电场维护策略

An Offshore Wind Farm Maintenance Strategy Based on Wind Turbine Condition Information

现代电力. 2022, 39(1): 26–35 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0004>

基于随机森林算法的架空输电线路状态评价方法

Condition Evaluation Method of Overhead Transmission Line Based on Random Forest Algorithm

现代电力. 2020, 37(6): 559–565 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.1065>

考虑荷电状态约束的储能参与电网一次调频综合控制策略

An Integrated Control Strategy for Energy Storage Participating in Primary Frequency Regulation Considering State of Charge Constraint

现代电力. 2022, 39(1): 95–103 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0009>

基于预切换状态的电热水器负荷群调控策略

Control Strategy of Water Heater Group Based on Pre-switching State

现代电力. 2019, 36(5): 68–75 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/68>

基于非凸矩阵分解的电网欺骗性数据注入攻击检测方法

Power System False Data Attack Detection Method Based on Nonconvex Matrix Decomposition

现代电力. 2020, 37(3): 263–269 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0447>

基于水波算法因子分析长短时记忆网络的重要输电通道风险评估预测

Risk Assessment and Prediction of Important Transmission Channel Based on Water Wave Optimization-Factor Analysis-Long and Short-Term Memory Network

现代电力. 2022, 39(3): 278–286 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0104>

《输变电设备状态检修试验规程》新版技术解析

石俏¹, 刘有为², 方燕虹³, 王俊波¹

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东省 佛山市 528000; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192; 3. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206)

Interpretation of the New Edition of "Code of Condition-Based Maintenance & Test for Electric Equipment"

SHI Qiao¹, LIU Youwei², FANG Yanhong³, WANG Junbo¹

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd., Foshan 528000, Guangdong Province, China; 2. China Electric Power Research Institute Co.Ltd., Haidian District, Beijing 100192, China; 3. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 为适应电网发展的最新要求, 对《输变电设备状态检修试验规程》进行了修订, 强化了新技术的应用, 重新构建了更加完备的状态分析方法。文中对新引入的智能巡检、带电检测、停电试验及状态分析方法进行了解析, 对各项新技术的原理、适用场景和应用条件进行了详细说明, 包括分析油纸绝缘受潮程度的频域介电谱、评估变压器绕组变形程度的扫频短路阻抗、检测断路器触头烧损情况的动态回路电阻、检测 GIS 及线路金具内部机械性缺陷的现场 X 射线检测等。此外, 还对状态分析方法做了深入解析, 包括单参量分析及多参量综合分析, 阐释了各状态分析方法的理论基础, 详解了关联状态量的概念并给出了应用案例。

关键词: 巡检; 带电检测; 状态检修; 状态分析

Abstract: To meet the latest requirements of power grid development, the "Code of condition-based maintenance & test for electric equipment" published in 2010 has been substantially revised. In this revised edition the application of new technology was strengthened, and a more complete condition analysis method was reconstructed. In this paper, the newly introduced intelligent inspection, live detection, outage tests and condition analysis methods were analyzed, and the principles, applicable scenarios and application conditions of the new technologies were described in detail. Such items as the frequency domain dielectric spectrum for analyzing the degree of moisture of oil paper insulation, the frequency sweep short-circuit impedance for evaluating the degree of transformer winding deformation, the dynamic circuit resistance for detecting contact burning of circuit breaker, on-site X-ray detection for detecting mechanical defects in GIS and line fittings and so on were emphatically introduced. In addition, the condition analysis methods, including analysis based on single parameter and comprehensive

analysis based on multi-parameter, were deeply analyzed, the theoretical basis of each condition analysis method was expounded, and the concept of associated condition indicators was further explained in detail and some application cases were given.

Keywords: inspection; live detection; condition maintenance; condition analysis

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0174

0 引言

输变电设备是组成电网的基本元素, 其可靠性是电网安全稳定运行的重要基础, 应用各种技术手段, 及早发现输变电设备缺陷, 避免运行中发生事故, 是电网企业核心工作之一, 也始终是高等院校、电力科研院所及电网企业不断创新的重点领域。DL/T 393《输变电设备状态检修试验规程》(以下简称规程)^[1]是指导输变电设备缺陷检测与诊断最为基础的行业标准, 集中反映了该领域的研究成果, 在电网企业得到了广泛应用, 构建了较为完备的输变电设备可靠性保障体系, 使我国电网设备事故率一直处于较低水平。但近年来, 随着电网的发展, 2010 版《规程》已不能满足新的需求, 表现在以下几个方面:

1) 随着我国“碳达峰、碳中和”战略目标的提出, 可再生能源加速发展, 电网规模迅速扩大, 输变电设备数量大幅增加, 为了满足社会对高供电可靠性的要求, 电网企业普遍加强了输变电设备的日常巡检, 与此同时, 人员严重不足的

矛盾凸显, 巡检中不断引入新技术, 改变以人工为主的巡检方式。

2) 近年来社会用电量逐年大幅度增长, 安排在运输变电设备定期停电进行试验越来越困难, 停电时间大幅压缩, 而需停电试验的项目却越来越多, 需要更多的停电试验时间去完成, 这种冲突推动了带电检测技术的发展, 即应用新型缺陷感知技术, 在设备正常运行时对其状态进行检测, 部分或完全取代停电试验, 这已成为状态检修的主要发展方向。

3) 现有设备故障诊断技术仍有盲区。虽然整体事故率并不高, 但由于基数很大, 输变电设备事故仍然时有发生, 特别是电压等级高、传输容量大的设备, 事故会对供电安全造成巨大冲击。因此, 研究发展新的诊断技术, 避免诊断盲区, 不断提升早期缺陷的检测和分析能力依然是输变电专业领域需要突破的重点, 也是需要《规程》予以重点规范的内容。

为了应对上述挑战, 更好地满足新时代电网发展的新要求, 从2017年开始“全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员”组织专家对《规程》进行了大幅修订, 引入了若干近年来快速发展且已成熟应用的智能巡检技术、带电检测技术、新兴试验技术及状态分析技术, 《规程》新版已发布, 自2022年3月22日起实施, 本文对引入的新技术进行了解析。

1 智能巡检技术

1.1 机器人巡检技术

机器人代替人工是变电站巡检的发展方向^[2], 经过若干年实践, 机器人巡检技术更加成熟, 可携带可见光、红外及紫外摄录设备按照规划的路径进行巡摄, 然后应用人工智能技术, 从摄录的影像中自主辨识设备异常和缺陷, 自主读取设备模拟表计读数及重要标识, 如变压器油温、GIS气体密度、开关分合位置指示及充油设备油位等^[3], 配合安装在较高位置的固定摄录设备, 达到了代替人工巡检的要求, 而且机器人巡检具有作业周期短、标准化程度高等优点。

1.2 无人机巡检技术

输电线路空间尺度广、对地距离高, 无人机巡检技术具有人工巡检无可比拟的优势。近年来

无人机技术发展迅速^[3], 飞行控制技术、续航时间和搭载负荷能力均有了长足进步, 达到了部分代替有人直升机的基本条件, 机载设备已实现了可见光、红外及紫外的同步摄录, 基本可代替人工开展杆塔、线路和通道的巡检, 实现对杆塔倾斜、变形或缺材, 绝缘子破损或异物缠绕, 输电线路金具滑移、破裂、导线断股、接续金具导电不良、覆冰覆雪超标、舞动以及通道地物等常见缺陷或异常的早发现早干预^[4]。此外, 应用人工智能技术, 从海量飞行记录中快速辨识出输电线路缺陷及异常的工具软件日趋完善, 不仅大幅减轻巡检人员的劳动强度, 而且具有效率高、视角广、可对人员无法或难以抵达的位置进行巡检、可对重点关注部位抵近巡检等显著优势。无人机已经成为输电线路巡检不可或缺的重要手段。

1.3 激光雷达技术

激光雷达是一种集扫描、定位和姿态测定于一体的新型测量装备, 其原理是通过发射与接收激光的时间差, 准确地计算出每一个测点的三维坐标。应用激光雷达可直接对输电线路杆塔偏斜、地基沉降、线路弧垂、交叉跨越距离及通道地物变化等进行厘米级别的精准测量, 特别是机载激光雷达的应用^[5-6], 大幅提升了输电线路巡检的质量和效率, 在变形、位移及绝缘距离等需要精确测量方面具有人工巡视不具备的突出优势, 已在北京、广东等公司得到应用。

1.4 卫星遥感技术

输电线路纵横交错, 覆盖整个国土, 即使应用无人机巡检, 工作量也十分巨大。我国卫星技术近年来发展十分迅速, 在满足国家战略需求的同时, 逐步向商业应用渗透, 现已成为输电线路巡检的重要平台。卫星具有覆盖面广、更新周期短、受环境限制少等优点, 特别适合线路密集、重要电力通道及人员难及区域的巡检。目前, 主要租用遥感、北斗等卫星资源, 获取输电线路的遥感及定位数据, 通过建模, 实现对输电线路杆塔姿态、线路覆冰覆雪、通道区域滑坡、施工作业、洪水及地物变化等进行高效辨识^[7-8], 及时发现隐患, 有效提升输电线路的运维效率和安全水平。

2 带电检测技术

2.1 相对介损及电容量带电检测

电容型设备, 如高压套管、常规电流互感器

等，较常发生事故。在停电试验周期不断延长的背景下，带电开展这类设备的绝缘状态检测十分必要。具体方法是，基于事先安装好的高精度电流传感器，测量同一变电站 2 台电容型设备间的相对介损和电容量，基于同一时刻，2 台设备同时发生故障为极小概率事件的认知，实现对绝缘缺陷设备的早发现早隔离。应用时，先确定被测设备，然后选择同母线或并列母线下同相的电容型设备作为参考设备（必要时亦可选择非同相设备），优先选择同型设备，之后保持不变^[9]。该项技术基本解决了长时间运行中电容型设备绝缘状态缺少监控的问题。

2.2 设备外壳振动带电检测

试验研究表明，变电设备内部存在局部放电、紧固件松动缺陷，或在某些非正常运行工况下，会产生异常振动^[10-11]，这是基于振动信号检测设备缺陷的理论基础。作为强化带电检测的手段之一受到了重视。由于是带电状态下测量，通常仅适用于有金属屏蔽外壳的变电设备，如变压器、GIS、罐式断路器等。不同原因引起的振动，其频率特征有很大差异，应根据诊断需求正确选择传感器的敏感频率。实际应用时，应将传感器刚性固定在待检设备的壳体上（必要时应用耦合剂），并作适当移动，以寻找振动最严重的点位，记录振动信号。如振动具有间歇性，应选择在最严重时段进行。本项技术的关键是从记录的振动信号中提取反映故障特征的信息。如出现故障特征，通常预示存在某种与振动相关的缺陷，如前述局部放电、部件松动等；如被检设备是变压器，还可能是过励磁、直流偏磁等，应结合其他状态量做出综合判断。

2.3 局部放电带电检测

主要用于变压器及 GIS 等大型设备，以诊断内部放电性缺陷。由于局部放电严重危及设备安全，带电检测局部放电一直是研究的重点^[12]，目前已有特高频法^[13-14]、超声波法^[13,15]和高频电流法等多项带电检测技术，通常与油中溶解气体分析（油浸式变压器）、气体分解物检测（气体绝缘设备）联合应用。实践中，可只应用其中一种方法，也可多种方法联合应用。如有 2 种及以上检测方法同时提示有放电性缺陷，即可确定放电性缺陷的存在。

2.4 气体分解物带电检测

气体绝缘设备，如 GIS 及气体绝缘变压器等，一旦内部发生放电性缺陷，放电区域的高温电子会导致绝缘气体的分解，产生新的气体，主要有二氧化硫(SO₂)及硫化氢(H₂S)等，这些气体在设备完好时是没有的或极微量，因此，如果检出这些气体，表示内部有或曾经有过局部放电，在此情况下，相隔 24h 再测 1 次（严重时，宜缩短间隔），如前述分解物还在持续增加，表示局部放电仍在持续中，应尽快安排检修。气体分解物属于局部放电的间接检测，具有不受环境干扰的优点，但可能会滞后一定时间，还可能受到吸附剂的影响^[16]，故此，与上述局部放电带电检测互补，可联合应用。

3 现场试验新技术

3.1 频域介电谱

油纸绝缘在各级变电设备中广泛应用，是最重要的绝缘形式。受潮是油纸绝缘常见的重大缺陷，如不及及时发现和处理，会导致绝缘老化、击穿等严重后果。吸收比、极化指数、介质损耗因数、油中水分、油中溶解 H₂ 含量等都是评估绝缘受潮的传统试验项目。实践证明，这些试验项目依然不够充分，绝缘受潮的诊断技术还在不断深入，频域介电谱是该领域研究的最新成果。所谓频域介电谱是指绝缘介质损耗因数随测试电压频率变化的连续谱线，与常规单一 50 Hz 下介质损耗因数的区别在于，频域介电谱是在较宽频率范围内多个频点下的测量数据集，由 $\tan\delta\sim f$ 谱线而不是一个量值来表征，推荐的测量频率范围为 1 mHz~1 kHz。图 1 给出了油纸绝缘套管在不同含水量下频域介电谱的实测结果^[17]。研究表明，相较于 50 Hz 下的介质损耗因数，频域介电谱可更加有效地反映绝缘的受潮状态，原因在于受潮程度与介质损耗因数、测试电压频率及绝缘介质温度之间存在着极为复杂的关系，单一频率下的测量结果无法解耦这种关系，容易对绝缘真实的受潮状态给出误判。

研究表明，在相近的测试条件下，与介电谱线的原始指纹相比，如果新测量的介电谱线向上、向右偏移，通常预示着绝缘受潮。一些专用仪器在大数据支持下可以定量评估绝缘受潮水平，也

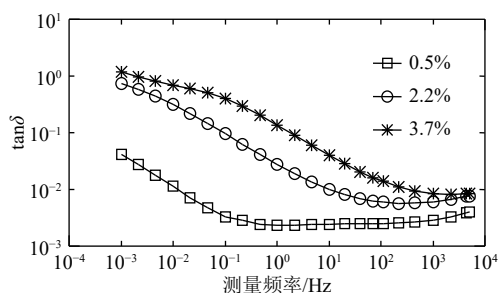


图1 不同含水量下油纸绝缘套管的频域介电谱

Fig. 1 Frequency domain dielectric spectra of oil-paper insulation bushing with different water content

有研究者提出了以最小介质损耗因数定量估算绝缘纸含水量的方法,如图2所示^[17]。总之,频域介电谱可为检修决策提供更全面的依据。实际应用中需注意以下两点:1)温度对频域介电谱有极为明显影响,检测时应准确记录,分析时应予以关注^[17-18];2)相对湿度较大时,绝缘表面泄漏可能成为损耗的一部分,因此,湿度超过75%时,测试前应将表面泄漏电流予以屏蔽。

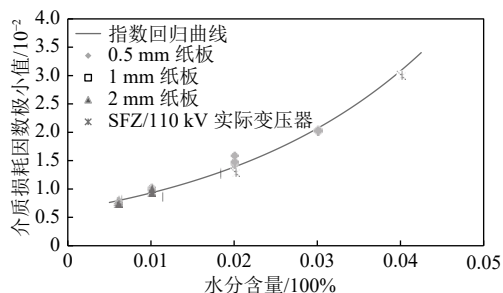


图2 介质损耗因数极小值与绝缘纸含水量的关系

Fig. 2 Relation of the minimum value of dielectric loss factor vs. the moisture content of insulating paper

3.2 扫频短路阻抗

绕组变形是变压器常见缺陷,大约占缺陷总数的20%,绕组一旦出现变形,其抗短路能力会大幅下降,严重危及变压器的安全运行。由于吊罩检查费时费工且部分变形因外层绕组遮挡即使吊罩也不能看到,故此,多年来绕组变形检测技术一直是研究的热点。对于尚未引起局部放电的变形,可用短路阻抗及绕组频率响应等进行检测,两项试验互证,大部分绕组变形都能得到有效诊断。但实践证明,部分绕组变形对短路阻抗及绕组频率响应不敏感,诊断仍然存在盲区。扫频短路阻抗是一种新的绕组变形检测技术,方法是,通过测量较宽频率范围的短路阻抗,然后比较逐

个频点下短路阻抗变化,据此分析绕组是否发生变形。图3为典型测量回路,要求的测量频率范围为10 Hz~1 kHz,同时要求相邻测量频点的频率差不大于10 Hz。之所以频率上限取1 kHz,是因为频率再高,副边是否短路已对测量结果无大的影响,与绕组频率响应曲线基本重合。

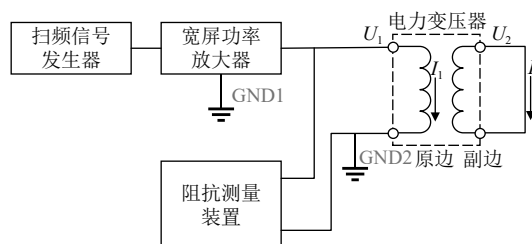


图3 变压器扫频短路阻抗典型测量回路

Fig. 3 Typical measurement circuit of transformer frequency sweep short-circuit impedance

试验研究表明^[18],扫频短路阻抗比常规单一50 Hz下的短路阻抗更具诊断价值。某些绕组变形未明显改变50 Hz下的短路阻抗,但其他频率下的短路阻抗变化却十分明显。图4给出一组真实变压器的测量结果,从图中可以看到,当测量频率小于300 Hz时,变压器ABC三相短路阻抗互差并不大,但当测量频率超过300 Hz,三相短路阻抗的互差开始变大,变压器解体后,发现绕组有明显变形。显然,如果这一案例仅用常规50 Hz下的短路阻抗去判断,会得出没有变形的错误结论。由此表明,在诊断绕组变形方面扫频短路阻抗比传统50 Hz下的短路阻抗更具优势。在实施测量时,要保证输出电压信号的功率,且波形良好,同时注意测量引线、变压器剩磁等因素的影响。

3.3 动态回路电阻

断路器灭弧室检修复杂且耗时,如果打开之

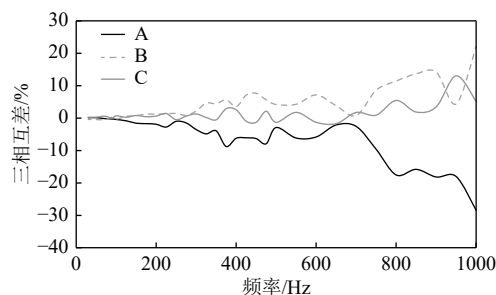


图4 某330kV变压器扫频短路阻抗三相互差

Fig. 4 Differences among three phases of a 330kV transformer sweep frequency short circuit impedance

后，发现并不需要任何检修，检修便是无效甚至负面的。因此，在不打开灭弧室的情况下，准确判断触头烧损情况是断路器状态检修的重要基础。2010 版《规程》给出了主回路电阻结合电寿命损失计算分析触头烧损的方法。这一方法是有效的，但也存在无法反映断路器个体差异的缺点。动态回路电阻是对前述方法的补充。所谓动态回路电阻系指断路器在分、合过程中主回路电阻的变化（也可用电压-时间曲线代替），与一并测量行程特性曲线组成一组测量结果，如图 5 所示，通过与原始曲线比对，观察弧触头单独接触行程的变化，依此评估触头的烧蚀情况，即电寿命损失情况^[19]。由于动态回路电阻属于针对个体的直接测量，而不是理论估算，因此，给出的电寿命损失更加精准。实践中，可以先应用理论估算进行初筛，再通过动态回路电阻进行更精准的分析，以便最终确定是否需要对接灭弧室进行检修。为了准确实施该项目，提出两项具体要求：一是测试电流宜 $> 100 \text{ A}$ ，以提高测量数据的信噪比；二是考虑到分合闸时间仅数十毫秒，为了保证单次操作下可采集的有效测量数据不少于 100 个，推荐采样速率 $\geq 10 \text{ kSa/s}$ ，以保证时间轴分辨率，支持获得更加准确的检测数据，特别是不漏测主触头分离时形成的电压脉冲。同时规定，若因故无法在正常分合闸操作下进行动态回路电阻测试，可通过慢分工装测量不同行程下静态接触电阻来代替。

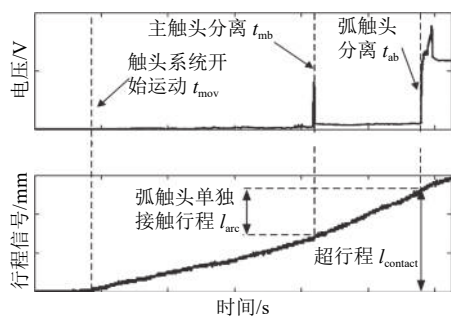


图 5 动态回路电阻及行程特性曲线
Fig. 5 Dynamic loop resistance and travel characteristic curve

3.4 X 射线检测

实践中，有部分机械性缺陷，虽然极易发展为设备故障，但一直没有适宜的检测方法，包括导线接续金具缺陷、GIS 内部机械性缺陷等，具体如接续金具内部导线断裂、压接不到位、滑移

等，GIS 内部隔离开关、接地开关分合不到位等。接续金具压接缺陷可引起异常发热甚至掉线，对于这类缺陷，运行中可以通过红外热像进行检测，停电时可通过测量金具两端电阻进行判断，但不是所有场景都有效。GIS 隔离开关、接地开关分合不到位，会导致严重故障，若属于隔离开关合闸不到位，停电时通过主回路电阻能大致反应，但若接地开关分不到位，目前缺乏有效检测手段，虽然这种情形发生几率很低，但是一旦发生后果非常严重，甚至引起 GIS 绝缘击穿、壳体爆炸，多年来一直困扰着 GIS 运维人员。近年来，工业 X 射线机被引入到变电站现场，成功应用于 GIS 内部机械性缺陷的诊断及输电线路各类接续金具缺陷的检测。图 6 给出了一个接续金具压接不到位的缺陷，图 7 给出了一个 GIS 隔离开关分闸不到位的缺陷，从 X 射线照片上看得非常清晰，这是其他检测项目无法做到的，具有不可替代的重要作用。



图 6 导线压接不到位的 X 射线照片
Fig. 6 X-ray photo of the wire crimp not in place

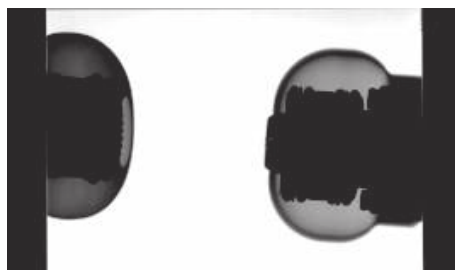


图 7 GIS 隔离开关分闸不到位的 X 射线照片
Fig. 7 X-ray photo of insufficient opening of GIS disconnect

4 状态分析方法及应用

状态分析系指基于巡检、带电检测、在线监测、停电试验以及不良工况、家族缺陷等信息，完成对输变电设备状态评估的技术，包括单一状

态量分析和多状态量综合分析两大类方法。

4.1 单一状态量分析方法

针对单一状态量的分析,有阈值分析法、指纹分析法、互比分析法和同比分析法等,这些方法分别适用不同的场景。

阈值分析法为传统分析方法,其要点是将试验结果与标准给出的阈值,如注意值/警示值,进行比较,以是否超过阈值要求作为评估设备状态是否正常的依据。这里,阈值是通过长期数据积累的经验值,适用于所有同类设备。阈值分析法粗糙,但简单实用。通常要求超过注意值应予以关注,但未必一定有缺陷;但超过警示值则表示设备大概率存在某种缺陷,须查明原因。

指纹分析法为首次明确应用的新方法,其核心是通过与设备自身的原始检测结果比较来评估设备状态,适宜于设备一旦制造完成或安装到位后,状态量将保持稳定不变的情形,如变压器绕组电阻值、套管电容量(安装到位后)等。此时,状态量一旦发生改变,在排除测量原因后,即可确定存在某种缺陷。对于这类状态量,指纹分析法比阈值分析法更加精准,更利于发现早期缺陷。实际应用中,难点是准确把握状态量是否发生了改变,因为在状态量的获取过程中或多或少受到试验检测仪器及环境等因素的影响。为此,推荐应用显著性差异分析法确定状态量的改变与否^[19]。顺便指出,如果状态量为单一数值量,则指纹分析法等同于初值差法。

互比与同比分析法已在实践中应用,其中,互比分析法定义为将设备状态量与处于相近工况的其他同型设备进行比较来评估设备状态的一种方法。实际应用时,不同的场景对应着不同的互比对象,例如,需要规避环境影响时,互比可以选择同一间隔的ABC三相设备;需要消除负载电流的影响时,互比可以选择同相别的同类设备等。该方法在红外热像等检测结果的分析中广泛应用。特别需要说明的是,互比异常未必意味着状态量超过注意值/警示值,否则与阈值分析法就没有了差别。例如,某电网企业接收一批共15支新电流互感器,交接时介质损耗因数试验结果如下:0.19、0.21、0.24、0.26、0.25、0.21、0.20、0.29、0.23、0.31、0.47、0.27、0.21、0.25、0.23,如按阈值分析法全部合格,但投运两周后测量结果为0.47这一支爆炸了,如按互比分析法,

测量结果为0.47的这支与其余14支的测量结果存在显著性差异,互比异常,这一案例证明了互比分析法的价值。

同比分析法定义为将状态量的当前检测值与设备自身同名状态量的历史检测值进行比较来评估设备状态的一种方法。该方法主要通过观察状态量的变化趋势来评估设备状态,即在状态分析中,不仅要静态地检验当前检测值与注意值/警示值之间的差异,而且还要动态地观察历次检测值的变化态势。例如,一台电容型设备相隔两个停电试验周期共3次检测的介质损耗因数分别是0.005、0.005、0.005,另一台同型设备的检测结果分别是0.002、0.003、0.005,虽然最近一次检测结果同为0.005,但一般认为后一台设备的状态要差,发生事故的风险要高,这正是同比分析法的价值所在。与指纹分析法的区别在于,同比分析法适用于允许适度变化的状态量,同时关注状态量变化的幅度和趋势,如前述介质损耗因数等,而指纹分析法强调与原始指纹相比是否发生了有实质意义的改变,适用于一旦制造完成就不应发生变化的参量,如绕组频率响应曲线等。

4.2 多状态量综合分析

相较于单一状态量分析,多状态量综合分析更具复杂性,是开展输变电设备状态评估的瓶颈技术。为了实现多状态量综合分析,引入“关联状态量”这一概念,定义为,与同一种缺陷存在关联关系的两个或两个以上的状态量,也包括存在关联关系的不良工况、家族缺陷。举例来说,一台变压器内部存在放电性缺陷,那么理论上,超声波法、UHF法及油中溶解气体都可以检测到异常,此时,这3个状态量便构成关联状态量。实践中,单一状态量异常,有可能是检测环境干扰,但两个甚至更多关联状态量同时出现异常,则误判的可能性很小,基本可以判定缺陷的存在。这一概念奠定了多状态量综合分析的基础。

基于多状态量关联关系进行综合分析的基本原则为:多个状态量异常时,若彼此间没有关联关系,宜选择反映设备故障风险最高的状态量作为状态评估的核心依据,即聚焦设备状态中的短板;如果至少两个没有关联关系的状态量表达了相近的故障风险,则可应用概率合成法计算出综合的故障风险^[16],不推荐采用扣分的评价方法。如前所述,如有两个及以上关联状态量同时出现

异常,则可以确定相关缺陷的存在,进一步,根据缺陷的性质、状态量的范围(阈值分析法、互比分析法)及变化态势(同比分析法)做出故障风险评级。

另一种情形,发生了重大不良工况,或受家族缺陷警示,设备可能存在某种缺陷,此时,若关联状态量出现异常,同样可以确定前述缺陷已经存在。例如,一台变压器出口(或近区)发生了短路故障,之后不久油中溶解气体分析发现异常,由于出口短路故障可导致绕组变形,而绕组变形可能引起电场畸变及绝缘损伤,进而引发局部放电,局部放电又会引起绝缘油分解产生气体,故此出口短路与油中溶解气体分析异常存在因果关系的关联,等同于两个关联状态量异常,可以判定出现了绕组变形。

对于更为复杂的其他情形,可应用大数据,通过与缺陷案例库比对的方法进行分析。

5 结语

1) 新版规程响应电网最新需求,引入了卫星、无人机和工业机器人组成的巡检作业平台,强化了带电检测技术的应用;通过引入扫频短路阻抗等新试验技术,减少了重大设备缺陷诊断的盲区;构建了单一状态量和多状态量综合分析的设备状态评价新体系,其规范性、可操作性大幅提升。新版规程将有效地服务于我国输变电设备的安全运行。

2) 输变电设备状态分析与诊断技术仍在不断深化研究中。智能巡检海量数据的辨识与处理还需更大的突破,带电检测技术还远不能完全代替停电试验,部分重大设备缺陷的早期预警技术尚不十分成熟,立足于电网安全运行的输变电设备检修决策体系有待深化,这些都是需要进一步研究的领域。

参考文献

- [1] DL/T 393—2010 输变电设备状态检修试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 杨旭东,黄玉柱,李继刚,等.变电站巡检机器人研究现状综述[J]. *山东电力技术*,2015,42(1):30-34.
YANG Xudong, HUANG Yuzhu, LI Jigang, *et al.* Research status review of robots applied in substations for
- equipment inspection[J]. *Shandong Electric Power*, 2015, 42(1): 30-34(in Chinese).
- [3] 蒲天骄,乔骥,韩笑,等.人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J]. *高电压技术*,2020,46(2):369-383.
PU Tianjiao, QIAO Ji, HAN Xiao, *et al.* Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(2): 369-383(in Chinese).
- [4] 陈飞,崔健,王郑.垂起固定翼无人机激光雷达的电力巡检应用[J]. *测绘科学*,2020,45(12):77-80+125.
CHEN Fei, CUI Jian, WANG Zheng. Application of vertical fixed-wing UAV carrying LiDAR system on power line inspection[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(12): 77-80+125(in Chinese).
- [5] 操松元,郭可贵,谭宏武,等.激光雷达在输电线路巡检中的关键技术及应用[J]. *地理空间信息*,2021,19(2):83-86.
CAO Songyuan, GUO Kegui, TAN Hongwu, *et al.* The key technology and application of lidar in the inspection of transmission line[J]. *Geospatial Information*, 2021, 19(2): 83-86(in Chinese).
- [6] 季坤,操松元,严波,等.机载激光扫描技术在输电线路运维中的应用[J]. *电力信息与通信技术*,2018,16(02):57-62.
JI Kun, CAO Songyuan, YAN Bo, *et al.* Application of airborne laser scanning technology in transmission lines maintenance[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2018, 16(02): 57-62(in Chinese).
- [7] 董晓虎,易东.基于北斗卫星差分定位技术的输电线路弧垂监测[J]. *电子设计工程*,2015,23(19):41-42.
DONG Xiaohu, YI Dong. The transmission line sag monitoring by BeiDou satellite differential positioning[J]. *Electronic Design Engineering*, 2015, 23(19): 41-42(in Chinese).
- [8] 武立平,马维青,杨海飞,等.北斗监测数据在输电线路杆塔的位移和形变方面的监测与研究[J]. *计算机测量与控制*,2020,28(3):79-83.
WU Liping, MA Weiqing, YANG Haifei, *et al.* Monitoring and research on displacement and deformation of transmission line towers based on Beidou monitoring data[J]. *Computer Measurement & Control*, 2020, 28(3): 79-83(in Chinese).
- [9] 高树国,是艳杰,岳国良,等.电容型设备介质损耗因数和电容量带电测试技术现场应用导则解读[J]. *智能电网*,2014,2(11):56-60.
GAO Shuguo, SHI Yanjie, YUE Guoliang, *et al.* A reading

- of the site application guide for dielectric loss factor and capacitive value live-testing method of capacitive equipment[J]. *Smart Grid*, 2014, 2(11): 56-60(in Chinese).
- [10] 杨景刚, 刘媛, 宋思齐, 等. GIS设备机械缺陷的振动检测技术研究[J]. *高压电器*, 2018, 54(11): 86-90.
YANG Jinggang, LIU Yuan, SONG Siqi, *et al.* Research on vibration detection technology of GIS mechanical defects[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(11): 86-90(in Chinese).
- [11] 屈斌, 张利, 王永宁, 等. 基于振动信号的GIS机械松动与局部放电诊断方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 98-106.
QU Bin, ZHANG Li, WANG Yongning, *et al.* Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 98-106(in Chinese).
- [12] GB/T 7354—2018. 高电压试验技术局部放电测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [13] 倪鹤立, 姚维强, 傅晨钊, 等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J/OL]. *高压电器*: 1-16[2021-09-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20210420.1419.002.html>.
NI Heli, YAO Weiqiang, FU Chenzhao, *et al.* Review on technical standards for measurement of partial discharge in electrical equipment[J/OL]. *High Voltage Apparatus*: 1-16[2021-09-17].
- [14] 刘嘉林, 董明, 安珊, 等. 基于特高频带电检测技术的GIS局部放电缺陷的识别与诊断[J]. *绝缘材料*, 2015, 48(8): 1-7.
LIU Jialin, DONG Ming, AN Shan, *et al.* Review of partial discharge live detection and location technology for power transformer[J]. *Insulating Materials*, 2015, 48(8): 1-7(in Chinese).
- [15] 吴俊杰, 周舟, 钱晖, 等. SF₆气体分解产物带电检测发现GIS设备缺陷及其分析与处理[J]. *高压电器*, 2019, 55(1): 243-247+252.
WU Junjie, ZHOU Zhou, QIAN Hui, *et al.* Analysis and treatment of GIS defect discovered by live detection of SF₆ decomposition products[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(1): 243-247+252(in Chinese).
- [16] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS设备气体分解物及其影响因素研究[J]. *电网技术*, 2009, 33(5): 58-61.
LIU Youwei, WU Liyuan, GONG Yanpeng. Investigation on SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(5): 58-61(in Chinese).
- [17] 王文焕. 油浸式变压器介质响应特性及绝缘受潮诊断技术研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- [18] 刘有为, 高克利, 许渊, 等. 输变电设备故障诊断技术的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- [19] 刘有为, 王小华, 高文胜, 等. 智能高压设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

收稿日期: 2021-06-28

作者简介:

石俏(1992), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为智能高压设备和不停电作业技术, E-mail: qiaoqiao1916@sina.com;

刘有为(1962), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为高压设备状态检测与诊断、智能高压设备等, E-mail: liuyw926@hotmail.com;

方燕虹(1963), 女, 研究馆员, 主要从事可靠性及科技信息情报研究等工作;

王俊波(1986), 男, 高级工程师, 主要从事高压设备试验和诊断技术等。