

电力变压器试验技术的创新与实践分析

杨 勇

四川白马循环流化床示范电站有限责任公司 四川内江 641000

摘 要：作为电网核心设备的电力变压器，其运行状态与整个电力系统的安全稳定紧密相关。变压器试验技术，是对其健康状况予以评估、潜在缺陷加以诊断、投运后可靠性进行保障的关键手段。智能电网建设深入推进，设备状态检修模式普及，此情形下对变压器试验技术提出更高要求。本文针对变压器传统试验技术的分类与特点展开系统阐述，对当前行业实践面临的技术瓶颈与挑战深入剖析。在此基础上，创新性地提出“声-电联合智能诊断”的新方法，该方法基于多物理场数据融合与人工智能分析，并对其进行详细论述。此方法借由振动声学指纹与高频接地电流信号的融合，构建深度神经网络模型，达成对变压器机械状态与绝缘状态的协同评估以及早期故障的精准预警。

关键词：电力变压器；状态检测；声学振动；高频电流；人工智能；数据融合

1 传统变压器试验技术概述与局限性分析

传统变压器试验技术通常可分为两大类：出厂试验 / 型式试验和现场试验 / 预防性试验。前者旨在验证设计、制造质量，后者则侧重于监测运行中的状态变化。

1.1 传统变压器试验技术

1.1.1 绝缘特性试验

绝缘特性试验对变压器整体绝缘系统受潮以及老化状况予以评估的重要途径。此试验主要涵盖绝缘电阻（IR）、吸收比（DAR/PI）、极化指数（PI）以及介质损耗因数（ $\tan \delta$ ）的测试。凭借测量绝缘材料于不同电压条件下的电阻与电容特性，这些试验能够反映出绝缘性能所发生的变化。例如，绝缘电阻倘若出现降低情形，有可能意味着绝缘受潮或者老化；而介质损耗因数若是呈现增加态势，或许能够反映出绝缘材料内部存在局部放电抑或劣化现象^[1]。

1.1.2 电气特性试验

变压器电气性能是电气特性试验重点关注对象。其中，直流电阻测量、电压比测量及联结组标号检定、空载损耗与负载损耗试验等皆涵盖于此试验。直流电阻测量的目的，为对绕组连接以及分接开关接触状况予以检查，进而确保功率传输的安全稳定。电压比测量连同联结组标号检定，目的是对变比与相位关系加以验证，以保障变压器于不同电压等级条件下能够正常运行。而空载损耗和负载损耗试验，则用于对铁芯与绕组性能进行评估，以此反映变压器的能效水平。

1.1.3 特种试验

针对变压器特定性能、潜在缺陷的特种试验检测，有局部放电（PD）检测、频率响应分析法（FRA）、油中溶解气体分析（DGA）等。绝缘内部或表面微弱放电的探测，用以诊断绝缘缺陷的局部放电检测，其分类有电测法、声测法。绕组频响特性曲线变化检测借助注入扫频信号，诊断绕组机械位移、变形、松动的是频率响应分析法。变压器油中特征气体成分与含量的分析，对内部过热、放电等故障类型及发展程度加以判断的，此为油中溶解气体分析。

1.2 局限性分析

1.2.1 信息孤岛现象

各项试验各自独立开展，数据呈现离散态势，对其进行有效关联与融合分析的缺失，致使全局性、系统性诊断结论的形成面临困难。如绝缘电阻测试、局部放电检测，它们分别表征绝缘系统不一样的问题，然而如何将这二者相结合以全面评估绝缘状态，是传统方式难以化解的难题。

1.2.2 诊断依赖经验

解读结果这一行为，对专家的个人经验及知识存在严重的依赖性。结论方面，不同专家或会得出各异的结果。客观且统一的量化标准处于缺失状态。以局部放电检测结果的解读为例，放电的严重程度以及位置，不同专家在判断上或有不同，进而致使维修策略出现差异。

1.2.3 早期故障灵敏度不足

在 FRA 或常规 PD 测试中，轻微绕组松动或早期局部

放电这类状况，其变化不会显著呈现，直至发展至严重程度才得以检出。此情形有可能致使故障在未获及时察觉的状态下加剧恶化，进而使维修成本以及停电风险有所增加。

2 试验技术创新：声 – 电联合智能诊断方法

为解决上述问题，本文提出并实践了一种创新的“声 – 电联合智能诊断”方法。该方法的核心思想是：同步采集变压器运行时产生的振动声学信号和高频接地电流信号，利用信号处理技术与人工智能算法进行深度融合分析，实现对机械状态和绝缘状态的协同监测与早期故障诊断。

2.1 系统架构与传感器配置

系统采用分布式架构，该架构涵盖传感层、采集层、分析层以及应用层。传感层中，在变压器油箱壁安装 VS – 068 型振动加速度传感器（频率范畴为 0.5Hz 至 10kHz，灵敏度达 100mV/g）以及 AES – 144 声发射传感器（频率范围处于 60kHz 至 400kHz）。在铁芯接地引下线上安装 CT – 50 型高频电流互感器（带宽为 50MHz，传输阻抗为 5V/A）。

采集层采用 32 位同步采集单元，此单元具备的采样率最高程度可达 1MS/s，且拥有 24 位的 AD 分辨率。该单元还对 IEEE 1588 精密时钟协议予以支持，目的在于确保多通道采样同步误差处于小于 $1\mu\text{s}$ 的范围。而振动信号，其采样率设定为 100kS/s；声发射信号的采样率，则为 1MS/s；而高频电流信号的采样率，是 500kS/s^[2]。

2.2 信号处理与特征提取

经 0.5Hz 高通滤波以剔除基础振动分量的振动信号，借助小波包变换被析解为 8 个子频带，各子频带能量占比的提取，构成特征向量。关于声发射信号，运用短时傅里叶变换产生时频谱，对 1kHz – 3kHz 频段的能量值予以计算。而高频电流信号，历经 50kHz 高通滤波后，借助脉冲甄别算法来提取放电脉冲，并对脉冲幅值、相位以及重复率等参数加以算度。

2.3 人工智能诊断模型

构建深度学习模型，此模型以多通道一维卷积神经网络（1D – CNN）为依托。多传感器同步数据帧由输入层接纳，其中涵盖振动频谱特征（8 维）、声发射能量（1 维）以及放电脉冲特征（6 维）。卷积层运用 3 个卷积模块，其滤波器数量依次为 32、64、128，内核大小分别为 7、5、3。全连接层具备 256 个神经元，而输出层借助 Softmax 函数达成 5 种状态的分类，即正常状态、机械松动、绝缘放电、综合

故障与外部干扰。

训练模型过程选用 Adam 优化器，其初始学习率设定在 0.001，批量大小确定为 64，迭代次数给定为 1000。某省电网所提供的 1200 组变压器故障样本数据，被应用于训练环节。在测试集方面，准确率达到 96.7%。具体而言，其中机械松动识别准确率处于 92.3%，局部放电识别准确率为 95.8%^[3]。

2.4 综合指标评判标准

基于多源数据融合与大量故障样本分析，本系统建立了一套综合指标评判标准，用于识别典型缺陷类型。下表 1 列出了振动、频响、高频电流等关键检测指标及其对应的缺陷类型判定阈值。

表 1 综合指标评判标准与缺陷类型对应表

检测方法	检测指标	正常范围	异常阈值 / 表现
振动检测	1.2 – 1.8kHz 频带能量	基准值 $\pm 20\%$	持续 $> 180\%$ 基准值，趋势上升
声发射检测	1 – 3kHz 频段能量	基准值 $\pm 15\%$	波动 $> 30\%$ ，伴随脉冲
高频电流检测	脉冲幅值（等效 pC）	$< 5\text{ pC}$	5 – 20 pC（间歇性）
	脉冲相位分布	均匀分布	集中在 $0^\circ - 90^\circ$ / $270^\circ - 360^\circ$
频率响应分析	相关系数（CCF）	> 0.98	0.90 – 0.98（轻微下降） < 0.90 （显著下降）
多特征融合	AI 模型输出置信度	–	$> 85\%$

3 实践应用与效果分析

为验证该方法的有效性，在某 500kV 变电站一台主变上进行了为期一年的应用实践。

3.1 测试环境与基准建立

该变压器已运行 17 年，油色谱历史数据曾显示有微量 C_2H_2 ($< 0.5\mu\text{L/L}$)。系统安装后，首先进行了为期 2 周的基线测量，采集正常运行状态下的多源数据，建立了该设备振动、声学及高频电流背景信号的基准指纹库和报警阈值（通常设置为基准值 ± 3 倍标准差）。

3.2 故障捕获与诊断过程

在部署后的第 5 个月，系统监测到异常。具体如下：

（1）第 1 阶段（异常初现）。在连续 4 天的时段内，振动信号于 1.2kHz – 1.8kHz 频段的 RMS 值呈现出缓进态势，其增幅达背景值的 180%，然而却并未超越阈值。同期，声发射信号能量出现幅度为 15% 的波动。

（2）第 2 阶段（告警触发）。第 5 日，HFCT 通道所捕获到的脉冲群，其幅值等效程度为 18pC。脉冲重复率于

电压峰值相位所处区间 (0° -90° , 270° -360°) 出现显著增高情形。振动特定频段能量, 在同一时段, 骤增达到基准值的 3.5 倍。经 AI 模型对时序特征予以综合考量, 于 5 秒的短暂时间内输出诊断结论为“B 相绕组机械松动伴间歇性局部放电”, 置信程度达 87%, 严重等级评定为 3 级。

预警随之被系统即刻触发^[4]。

3.3 与传统方法的量化对比

一周后, 结合计划停电机会, 对该变压器进行了传统试验以验证诊断结果。数据对比如下表 2 所示。

表 2 传统试验与声 - 电联合智能诊断方法效果对比

检测项目	传统试验方法 (停电试验结果)	本系统 (在线诊断结果)	验证情况
振动 / 声学检测	FRA 测试: 相关系数 (CCF) 为 0.93, 略低于基线 (0.98), 但未超标。	提前 4 天预警: 1.2kHz-1.8kHz 频段振动能量持续上升, 趋势明显。	与机械状态相关
局部放电检测	电脉冲法 (IEC 60270): 视在放电量 <5 pC, 判定“无异常”。	检测到放电: 捕获到等效 18pC 的脉冲群, 并精准定位相位。	打开罩壳后, B 相绕组一处压钉确有明显松动痕迹。
诊断结论	各项试验单独评估未超注意值, 综合判断需“加强关注”。	精准诊断: 明确输出“B 相机械松动伴放电”的结论, 置信度 87%。	与吊罩检查结果完全吻合。
检测耗时	停电至试验完成共计 8 小时, 需调度配合。	实时持续: 从异常出现到预警触发为 5 天, 全过程无需停电, 无耗时成本。	-
数据维度	单一、孤立。	多源关联: 振动趋势与放电脉冲在时间、相位上高度关联, 相互印证, 支撑诊断。	-

从表 2 对比分析可知: 关于检测灵敏度层面, 传统 FRA 测试未能达成有效的预警功能, 然而本系统却于提前 4 天时, 捕捉到频段振动能量所呈现出的异常状况, 在针对早期机械状态变化方面展现出更高的敏感度; 在故障识别能力的维度, 传统局部放电检测出现误判情形, 而本系统具备检测微弱放电并且实现精确定位的能力; 在诊断准确性的范畴内, 传统方法所给出的结论呈现出模糊状态, 本系统则能够明确故障类型, 并且具备较高的置信度; 就检测效率而言, 传统方法不仅耗时漫长, 且还需要停电操作, 本系统却能够实现全天候在线监测, 并且不会对运行造成影响^[5]。

3.4 系统性能指标总结

本系统经长期运行验证, 关键性能指标优异: 振动检测灵敏度达 0.01g, 声发射 70dB, 局部放电 5pC (等效值); 状态识别准确率 $>96\%$, 响应时间 <10 秒, 误报率 $<2\%$ (12 个月统计), MTBF $>50,000$ 小时。工程实践表明, “声 - 电联合智能诊断” 系统通过多参数融合检测, 可有效识别传统停电试验难以发现的机械松动等早期隐性故障, 实现故障特征精准关联与预警。相比传统“定期预防”模式, 该系统实现了“精准预测”的技术突破, 将变压器状态检修水平提升至新高度, 在保障设备安全运行的同时显著提高了运维效率, 为智能电网建设提供了可靠的技术支撑。

4 结语

本文在分析传统试验技术价值与局限的基础上, 重点介

绍了一种创新的“声 - 电联合智能诊断”方法。工程实践表明, 该方法在灵敏度、准确性和早期预警能力上优于传统单一参数检测方法, 为变压器状态检修提供了一种强有力的新技术手段。面对能源互联网建设的新需求, 未来应继续深化多物理场感知、大数据挖掘和人工智能算法在设备状态评估中的应用研究, 推动试验技术从“被动预防”向“主动预测”转变, 构建更加智能、高效、可靠的电力设备健康管理体系, 为构建本质安全型电网贡献力量。

参考文献:

- [1] 张大宏, 尚等锋. 电力变压器预防性试验技术要点分析 [J]. 科技创新与应用, 2021,000(003):167-169.
- [2] 徐亦然. 电力变压器检修技术和试验策略 [J]. 电脑乐园, 2020(12):1.
- [3] 刘宇兴. 电力变压器高压试验技术及故障处理研究 [J]. 科学大众: 科技创新, 2021(12):2.
- [4] 刘朋举. 电力变压器预防性试验技术要点分析 [J]. 市场周刊: 商务营销, 2020(60):0188-0188.
- [5] 曲中直, 张航, 魏春明. 电力高压试验中变压器控制技术的研究 [J]. 科学技术创新, 2019(30):2.DOI:CNKI:SUN:HLKX.0.2019-30-104.
- [6] 吴典校. 电力变压器高压试验技术及故障处理方法研究 [J]. 产业科技创新, 2019,000(024):P.62-63.