

电力设备多源信息融合的健康状态监测技术研究

吴文影 檀英辉 陈国东 张晓义 张哲

国网冀北电力有限公司超高压分公司 北京 102401

【摘要】：数字化时代到来后，电力设备监测、检测工作朝着自动化、智能化、智慧化方向发展，但在实际落实过程中也存在一些细节上的问题需要得到进一步优化。基于此，本文以某变电站构建的多源信息融合的健康状态监测技术入手，结合实际故障案例分析这一监测体系在其中的具体应用，进而明确该技术的实际落实细节，打造出高效率、高质量的电力设备智能监测系统，实现电力供应的稳定性。

【关键词】：电力设备；多源信息；健康状态；监测技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.017

引言

面对日益提高的电力供应需求，确保电力设备健康稳定运行是当前变电站运行的主要任务，尤其是在“双碳”目标提出后，现有的智能监测技术在单一功能上的局限性逐渐凸显出来。为实现全方位、多维度的电力设备监测，还需在现有的电力设备监测技术基础上，进一步落实数字化改革，打造出多源信息融合的健康状态监测技术，以此综合判断电力设备的综合运行状态，为变电站推进科学管理提供数据支撑，达到保障电网安全稳定运行的目标。

1 电力设备健康状态监测案例概况

1.1 案例概述

以某 500kV 变电站为例，该变电站作为地区电网的关键节点，拥有 4 座变压器及附属设备，是确保区域供电稳定性和可

靠性的重要基础设施。为提升变电站的运行安全性与效率，站内构建了电力设备多源信息融合的健康状态监测模块。该变电站内的主变压器为油浸式电力变压器，额定电压为 500kV，额定容量为 334MVA，自投入运行以来，已稳定工作超过 10 年，其间经历多次定期维护和检修，包括绕组绝缘测试、油质分析和冷却系统检查等。历史运行数据表明，该变压器在大多数情况下能够保持稳定的运行状态，但偶尔会出现因负荷波动导致的温度上升和振动加剧现象。

为提升对该变压器的运行状态监测能力，变电站内安装了机器人测温、高清摄像头、油色谱监测等设备，从而获取多源信息，实现对状态的综合性监测，多角度判断设备情况。通过补充监测模块，集成电流传感器、温度传感器、振动传感器和噪声监测设备等多种传感器，能够实时监测变压器的运行状态，并通过数据融合技术提高监测精度和可靠性。

表 1 变压器日常运行数据

时间节点	负载电流 (A)	绕组温度 (°C)	油温 (°C)	振动幅度 (mm)	噪声水平 (dB)	氢气含量 (ppm)	乙炔含量 (ppm)
0515 08:00	0	65	55	0.2	70	5	0
0515 08:10	310	66	56	0.22	71	5	0
0515 08:20	320	67	57	0.24	72	6	0
0515 08:30	315	68	58	0.23	71	6	0
0515 08:40	330	69	59	0.25	73	7	0
0515 08:50	340	70	60	0.27	74	7	0
0515 09:00	335	71	61	0.26	73	8	0
跳闸前瞬间	420 (过载)	85 (异常)	75 (异常)	0.5 (异常)	420 (过载)	50 (异常)	20 (异常)

从上表内容来看，变压器在故障发生前，负载电流逐渐上升，同时绕组温度和油温也随之升高，伴随着振动幅度和噪声水平的增加。

在日常运行时间段（08:00 至 09:00），变压器的各项参数均保持在正常范围内。负载电流在 300A 至 340A 之间波动，

绕组温度稳定在 65°C 至 71°C 之间，油温也在 55°C 至 61°C 的正常范围内。振动幅度和噪声水平均较低，分别保持在 0.2mm 至 0.27mm 和 70dB 至 74dB 之间。同时，油色谱分析数据显示氢气含量和乙炔含量均处于正常水平，分别为 5ppm 至 8ppm 和 0ppm。

然而，在跳闸前瞬间（10:45），变压器的运行状态发生了显著变化。负载电流急剧上升至 420A，远超正常运行范围，导致绕组温度和油温也迅速升高至 85℃ 和 75℃ 的异常水平。振动幅度和噪声水平也显著增加，分别达到 0.5mm 和 85dB，表明变压器此时已处于异常或故障状态。更重要的是，油色谱分析数据显示氢气含量和乙炔含量均出现异常增加，分别达到 50ppm 和 20ppm，变压器内部存在过热或放电故障的明确征兆。监控系统立即发出告警，提示变压器可能存在严重故障。经现场检查发现，变压器内部绕组因长期过载运行导致绝缘层老化，最终引发匝间短路，产生大量热量和振动，导致变压器跳闸。

1.2 监测系统

从上述变电站故障情况来看，变电站内构建的多源信息融合的健康状态监测技术在电力设备故障预警和诊断中发挥着不可替代的作用。但变电站在基于多源信息构建健康状态评估模型的过程中，还需对不同传感器以及数据源信息进行综合处理，以此提高信息的完整性、精确度和可靠性。在上述变电站中借助贝叶斯网络进行多元信息融合，具体公式如（1）所示。

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

$P(A|B)$ 是在事件 B 发生的条件下事件 A 发生的概率， $P(B|A)$ 是在事件 A 发生的条件下事件 B 发生的概率， $P(A)$ 和 $P(B)$ 分别是事件 A 和 B 发生的先验概率。在完成多源信息融合的基础上，该变电站借助大数据智能分析模型，对多维度信息进行综合分析评估，以此判断变电站的健康状态。但需要注意的是，在判断不同变电站设备健康状态评估中，还需进一步构建出相应的健康状态评估模型。在上述案例中，贝叶斯网络被用于融合来自电流传感器、温度传感器、振动传感器、噪声监测设备和油色谱分析仪的多种信息。计算各事件之间的条件概率，如 $P(\text{绕组温度过高} | \text{负载电流过大})$ 和 $P(\text{油中氢气含量增加} | \text{绕组过热})$ ，贝叶斯网络能够更准确地评估变压器的健康状态。如，当负载电流过大时，贝叶斯网络可以计算出绕组温度过高的概率，并结合油中气体含量的变化，进一步判断变压器是否存在内部故障。

健康评估模型借助主成分分析法来评估设备系统的健康状况，具体公式如（2）所示。

$$X = U \cdot \Lambda \cdot V^T \quad (2)$$

其中，X 是原始数据矩阵，U 是左奇异向量矩阵， Λ 是对角矩阵，包含奇异值， V^T 是右奇异向量矩阵的转置。变电站基于这一模型，根据不同设备的原始多维数据，将其映射到一维向量上，从而表征设备系统的健康状况。在上述案例中变电站利用主成分分析法对变压器的多维数据进行降维处理，将原

始数据矩阵 X（包含负载电流、绕组温度、油温、振动幅度、噪声水平以及油中气体含量等）映射到一维向量上。计算得到的奇异值，可评估变压器健康状态的稳定性，奇异值越大，表明变压器的健康状态越不稳定。在此案例中，跳闸前瞬间的奇异值显著增加，达到 100，表明变压器的健康状态发生了显著变化，与实际情况相符。

2 电力设备多源信息融合的健康状态监测系统构建

2.1 系统总体架构与设计思路

电力设备多源信息融合的健康状态监测系统旨在通过集成多种监测技术，实现对电力设备运行状态的全面、实时、准确监测。系统总体架构分为三层：感知层、传输层和应用层。在实际设计中，变电站非常注重模块化、可扩展性和易用性。

2.2 关键传感器与数据采集技术

以上述变电站故障案例为例，在这一故障处理中，油色谱监测技术在监控油温上效果突出，通过分析变压器油中的气体成分及其含量变化，来诊断变压器内部的潜在故障。变压器油在正常运行过程中，由于油与绝缘材料的分解，会产生少量的气体，如氢气（H₂）、甲烷（CH₄）、乙炔（C₂H₂）等。当变压器内部出现局部过热、电弧放电或火花放电等故障时，这些气体的产生量会显著增加，且气体成分也会发生变化。从上述变电站的故障案例中可以看出，通过油色谱监测与红外热成像检测的结合使用，在故障发生前一周，油色谱监测数据显示油中氢气含量从正常的 0.5% 突然上升至 1.2%，且持续上升。这一异常变化已经预示着变压器内部存在潜在的过热或放电故障。在故障发生后，油色谱分析显示油中乙炔含量异常高，达到 0.05%，变压器内部可能存在放电故障，不仅如此，红外成像检测显示变压器某区域的表面温度异常升高，达到 85℃，这些数据也成功让工作人员预案变压器内部存在的局部放电和过热故障。进一步结合振动信号、铁芯接地电流等监测数据，系统对变压器的健康状况进行全面评估，并给出详细的维修建议。这些措施有效避免变压器故障的进一步发展，保障变电站的安全稳定运行。

2.3 数据传输与处理单元

采集模块通过高速 ADC（模数转换器）将传感器输出的模拟信号转换为数字信号，并进行初步滤波和校准。预处理包括数据去噪、异常值检测、数据压缩等，以确保数据的准确性和传输效率。采用工业以太网或无线通信技术（如 LoRa、NB-IoT 等）将预处理后的数据传输至数据中心。远程监控平台通过 Web 界面实时数据查看、历史数据查询、故障预警等功能。

3 多源信息融合算法与健康状态评估

电力设备多源信息融合的健康状态监测系统通过集成多种监测技术和算法，实现对电力设备运行状态的全面、实时、

准确监测和评估。该系统不仅提高电力设备的可靠性和安全性，还为变电站设备的维修决策提供科学依据，降低维修成本和停电风险。

3.1 多源信息融合算法设计

对于每种监测指标，根据其历史数据和统计特性，生成相应的概率分布函数。这些函数描述指标值在不同健康状态下的概率分布，采用贝叶斯网络、高斯混合模型等方法来构建和更新概率分布函数。由于不同传感器和数据源可能存在测量误差和噪声，导致评估结果产生冲突。采用 D-S 证据理论、模糊逻辑等方法来融合多源信息，弱化冲突，提高评估精度。通过引入权重因子来反映不同数据源的可信度，进一步提升评估结果的准确性^[1]。

3.2 健康状态评估模型

将来自不同传感器的数据（如电压、电流、温度、振动、

局放信号等）进行融合，形成综合评估指标。根据综合评估指标和预设的阈值或判断规则，对电力设备的健康状态进行分级评估（如正常、轻微故障、严重故障等）。以变压器为例，结合局放信号、振动信号、铁芯接地电流等多源信息，构建变压器健康状态评估模型。通过实时监测和分析这些数据，模型能够准确判断变压器的绝缘状况、机械稳定性和潜在故障点^[2]。实例分析表明，该模型能够提前数周甚至数月发现变压器的潜在故障，为维修决策提供有力支持。

4 总结

综上所述，电力设备监测工作日益优化，但还需进一步丰富电力系统的能源感知性，以此保证变电站人员可以更加准确地把握电力设备情况。多源信息融合的健康状态监测技术可从多角度判断电力设备情况，在实现实时监控的基础上，让变电站做出预判，实现快速决策和设备检修管理，及时调整电力设备的运行模态，真正实现高效运维和低碳运行。

参考文献:

- [1] 张小丽.基于多源信息融合的配电网继电保护灵敏度校验系统[J].微型电脑应用,2024,40(10):80-83+100.
- [2] 刘雪莹,江相伟,吴一庆,等.电力设备多源信息融合的健康状态监测技术分析与研究[J].仪表技术,2024,(01):57-60.