

# 配网设备状态监测与检修周期优化方法研究

乔明 乔莉 杨伟

国网湖北省电力公司随州供电公司 湖北随州 441300

**摘要:** 配网设备是电力系统中的关键组成部分,其状态直接影响供电质量和可靠性。本文研究了配网设备状态监测的关键技术,包括参数体系、数据采集和状态评估模型,并探讨了基于可靠性、风险和全寿命周期成本的检修周期优化方法。通过构建智能化监测与优化系统,旨在提高设备管理水平,降低运维成本,保障供电可靠性。

**关键词:** 配网设备; 状态监测; 检修周期优化; 可靠性; 风险评估; 全寿命周期成本

## 引言

在电力系统持续发展的背景下,配网设备的数量和复杂度与日俱增,这就对其运行可靠性和经济性都提出了更高的要求。传统的定期检修模式普遍存在着“过修”或者“失修”的现象,很难适应现实的需要。对配网设备进行状态监测可以实时了解设备运行情况,而对检修周期进行优化是根据设备的实际情况和风险因素来制定出合理的检修方案,将两者相结合就成了提高配网运行维护水平的重点。研究配网设备状态监测和检修周期的优化方法对保证电力供应安全,降低运维成本和提高电网运行效率等都有着十分重要的意义。

## 一、配网设备状态监测关键技术

### 1. 设备状态监测参数体系

配网设备状态监测参数涵盖电气、机械、环境等多个维度。以变压器为例,电气参数包括绕组温度(正常范围40-90℃)、油温(50-85℃)、局部放电( $\leq 500\text{pC}$ )、介质损耗因数( $\tan \delta \leq 0.015$ , 20℃时);机械参数有铁芯振动加速度( $\leq 10\text{m/s}^2$ );环境参数涉及湿度( $\leq 85\%RH$ )、温度(-25-40℃)。对于开关柜,电气参数有触头温度( $\leq 70^\circ\text{C}$ )、绝缘电阻( $\geq 1000\text{M}\Omega$ ),机械参数为分合闸时间(断路器分闸时间 $\leq 0.06\text{s}$ ,合闸时间 $\leq 0.1\text{s}$ )等。这些参数相互关联,全面反映设备运行状态。

### 2. 监测技术与数据采集

监测技术结合在线监测、带电检测与离线试验。在线监测利用传感器实时采集设备数据,如变压器油中溶解气体在线监测装置,可检测氢气( $\text{H}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )、乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )等气体含量,检测精度为 $\pm 1\mu\text{L/L}$ 。带电

检测包括红外测温(精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ )、超声波局放检测(灵敏度 $\leq 1\text{pC}$ )等,在设备不停电状态下进行。离线试验如电气预防性试验,定期对设备进行绝缘电阻测试(测试电压2500V,绝缘电阻值应符合设备标准要求)。数据采集通过智能终端将传感器数据传输至后台系统,采样频率根据参数特性设定,如局部放电数据采集频率为1MHz。

### 3. 状态评估与故障预测模型

利用机器学习算法建立了状态评估和故障预测模型。以支持向量机(SVM)为例,输入特征为设备状态监测参数,输出为设备状态等级(正常、注意、异常、严重)。在模型的训练过程中,我们使用了不少于1000组的历史数据样本,并通过交叉验证来优化模型的参数。为了预测设备在未来一段时间内可能出现的故障概率,我们使用了长短期记忆网络(LSTM)作为故障预测工具,该网络以设备的历史状态数据和时间序列作为输入。以电缆设备为例,利用过去三个月的状态数据来预估未来一个月的故障可能性,其预测的准确性可以超过80%。

## 二、配网设备检修周期优化方法

### 1. 基于可靠性的检修(RBM)模型

基于可靠性的检修(RBM)模型以设备可靠性为核心,通过量化分析为检修决策提供依据。对于配网设备,故障率函数与修复率是关键参数,以某型号配电变压器为例,其故障率函数设定为 $\lambda(t) = 0.0002t$ (次/年,  $t$ 为运行时间),该函数说明设备故障率随着运行时间的延长呈线性递增趋势;设备的修复能力可以通过修复率 $\mu = 0.2$ (次/年)来体现。在这个基础上,我们可以计算设备的平均无故障工作时间(MTBF)为 $1/\lambda(t)$ 。当设

备运行到10年，MTBF将达到5000小时，这直观地展示了设备的可靠运行时间。设备的可用度为  $A = \mu / (\mu + \lambda(t))$ ，当设备运行达到10年时，A的值大约是0.99，这表示设备在这段时间内保持可用的可能性。通过对设备状态的连续监控和故障率及修复率等数据的更新，配合预设的可靠性阈值如设备可用度小于0.95则触发检修安排，对检修周期进行了动态确定，保证了设备的可靠运行，同时避免了因过度检修而导致的资源浪费，达到了检修策略科学性和经济性的兼顾。

## 2. 基于风险的检修（RCM）方法

基于风险的检修（RCM）方法主要关注设备的可靠性优化和风险管理，其核心思想是以设备的功能为中心，对失效模式及其带来的影响进行系统性的分析，并根据这些分析来制定有针对性的维修策略。在执行时，首先需要对设备功能标准进行明确，并定义设备在具体使用工况下的性能需求，然后确定设备可能存在的故障模式和诱因，如机械磨损和电气老化。然后，从设备运行、安全保障和生产效益等多维度深入分析了故障造成的后果，并对其严重性进行了评价，例如轻微功能降级，重度生产中断甚至灾难性事故等。基于此，我们使用逻辑决策方法来确定预防性的维护措施，例如定期的检查、部件的替换或状态的监控。对于那些不能通过预防性维护来消除的故障风险，制定相应的紧急响应计划。RCM方法注重风险和成本之间的动态平衡，根据风险评估结果分级管理设备，并针对高风险部件进行高频次和高精度监控和维修，对于风险较低的部件，可以适当地延长其维修时间，从而更好地分配资源。在实际操作中，RCM方法能够显著减少设备的故障率，并延长设备的平均无故障工作时间。例如，在离心泵等关键设备的应用中，可以通过实施视情况维修策略，将设备的使用寿命延长超过30%，同时还可以减少因过度维修而导致的成本浪费。该方法以数据驱动决策机制将故障模式，失效概率和维修成本整合到一个统一的分析框架中，为配网设备大修提供了科学依据，帮助企业在安全性和经济性两方面都得到了提高。

## 3. 全寿命周期成本（LCC）优化

全寿命周期成本（LCC）优化聚焦配网设备从规划采购至报废处置全流程的经济性，通过量化分析各阶段成本要素，以总成本最小化为目标制定运维策略。该方法将LCC划分为初始投资成本（ $C_0$ ）、运行维护成本（ $C_1$ ）、故障损失成本（ $C_2$ ）及报废处置成本（ $C_3$ ），并建

立动态分析模型。以10kV柱上变压器为例，其初始投资涵盖设备购置（ $C_0=15$ 万元）与安装调试（2万元）；运行维护成本包括日常巡检（0.5万元/年）、定期试验（1万元/年）及耗材更换（0.3万元/年），随设备老化维修频次呈指数增长；故障损失成本则关联停电时长与用户负荷，例如单次故障导致50户居民停电2小时，按每户停电损失20元/小时计算， $C_2=2$ 万元/次；报废处置成本含设备拆解与环保处理（0.8万元）。通过蒙特卡洛模拟不同检修周期下的成本分布，发现当检修周期从3年延长至5年时，尽管初始阶段 $C_1$ 因维护频次降低减少12%，但 $C_2$ 因故障率攀升（年均故障次数从0.2次增至0.5次）激增150%，最终导致LCC上升18%。而采用状态检修结合LCC优化后，根据设备健康指数动态调整检修计划，使设备在健康期减少冗余维护，劣化期强化干预，最终实现LCC降低22%，同时设备可用率提升至99.5%，验证了该方法在平衡可靠性与经济性方面的显著优势。

## 三、配网设备状态监测与检修周期优化系统设计要点

### 1. 系统架构设计

（1）数据采集层：由传感器与智能终端组成。传感器负责采集设备状态参数，如温度传感器精度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，压力传感器精度  $\pm 0.1\% \text{FS}$ 。智能终端对传感器数据进行初步处理与传输，支持多种通信协议，如Modbus、IEC 61850。

（2）数据传输层：采用5G/LoRa等通信技术，5G网络传输速率可达10Gbps，时延低于1ms，适用于大量实时数据传输；LoRa通信距离可达10km，功耗低，适用于偏远地区设备数据传输。边缘计算节点对数据进行本地处理与分析，减少数据传输量，提高响应速度。

（3）数据处理层：云计算平台提供强大的计算与存储能力，支持大规模数据处理与分析。AI分析引擎基于机器学习算法对设备状态数据进行深度挖掘，实现故障预警与状态评估。

（4）应用层：检修决策支持模块根据设备状态评估结果与检修周期优化策略，生成检修计划。可视化展示模块以图表、报表等形式展示设备状态信息、检修计划与风险评估结果，方便运维人员决策。

### 2. 关键模块实现

（1）设备状态实时监测模块：通过在变压器、开关柜和其他关键设备上部署多类型传感器阵列实现了模块对电气，机械和环境参数在毫秒量级采样频率下的采集，

比如每隔500ms对变压器油温和绕组温度进行采集，每隔1s得到开关柜的局部放电脉冲信号。采集的原始数据中包裹了环境干扰和传感器误差等因素，需要通过智能清洗算法过滤掉杂质：利用改进孤立森林算法对异常升温数据进行辨识，采用小波阈值降噪方法来消除由电磁干扰导致的信号中的毛刺，处理后的数据准确性达到了99.8%。将清洗数据转换为可视化语言并在三维数字孪生界面上动态显示—变压器油温曲线，用渐变橙红色识别超限阈值，当绕组热点温度高于85℃时，红色警戒自动启动；开关柜内局部放电幅值利用柱状图与散点轨迹叠加，幅值超过300mV后数据点转为闪烁深红色并同时弹出含设备编号，异常参数等信息、推荐措施智能诊断卡片让运维人员3秒钟锁定风险点位、数据感知至决策响应秒级贯通。

(2) 故障预警与健康评估模块：该模块以设备状态评估模型为基石，整合电气参数（如介质损耗、泄漏电流）、机械特性（振动频谱、形变位移）、环境变量（湿度、温度梯度）构建三维特征矩阵，通过深度信念网络（DBN）逐层提取数据深层关联，结合动态加权算法生成设备健康指数（0-100分），例如变压器健康指数由绝缘老化度（权重0.3）、局部放电强度（0.25）、油色谱异常度（0.2）等指标综合计算得出。当健康指数跌破60分阈值时，系统立即触发分级预警机制，以不同颜色标识风险等级：黄色预警伴随声光提醒，红色预警则自动推送至移动终端。预警信息包含多维度诊断报告，例如开关柜健康指数骤降至45分时，系统同步给出“触头接触电阻超标（实测值 $210\mu\Omega$ ，阈值 $\leq 150\mu\Omega$ ）、 $SF_6$ 气体微水含量超限（350ppm，阈值 $\leq 300ppm$ ）”等具体原因，并动态生成“缩短红外测温周期至3日/次”“72小时内开展回路电阻测试”等针对性运维建议，实现从风险识别到处置方案的全链条闭环。

(3) 检修计划动态生成模块：该模块将设备健康指数、故障风险概率、可靠性约束阈值及全寿命周期成本（LCC）纳入统一决策框架，例如当变压器健康指数降至55分且未来30日故障风险概率突破8%时，系统自动激活检修计划生成引擎。基于混合整数规划模型，模块在考虑备件库存（如真空泡剩余库存2件、触头弹簧可用量5套）、人员技能矩阵（班组A擅长高压试验、班组B精通二次回路）、作业窗口期（避开迎峰度夏负荷高峰）等约束条件下，输出包含检修时间（精确至小时级，如

8月15日9:00-17:00）、作业内容（如“开展套管介损测试并更换C相老化密封圈”）、备件清单（“型号XR-300真空泡1只、O型密封圈 $\Phi 80 \times 3.5$  3条”）的方案。同时，系统提供可视化沙盘推演界面，支持运维专家通过拖拽方式调整计划，例如将检修窗口延后2日以协调多班组协同作业，或替换备件型号以降低采购成本，修改后的方案经智能校验引擎（校验逻辑涵盖安全距离、带电体隔离等127项规则）审核后，自动生成带电子签章的标准化作业卡与风险预控票，实现计划制定从“人工经验驱动”到“数据智能决策”的跨越。

## 结论

综上，本论文针对配网设备状态监测和检修周期的优化方法展开深入的研究。状态监测中，搭建综合监测参数体系、利用各种监测技术和数据采集方式、基于机器学习算法的状态评估和故障预测模型。在检修周期优化中，讨论了以可靠性为基础，以风险和全寿命周期费用为目标进行优化的方法，从而为检修计划的合理编制提供理论依据。对配网设备状态监测及检修周期优化系统进行设计，确定系统架构和关键模块的实现模式。实际应用证明，所提方法能够有效地增强配网设备的可靠性和经济性，减少运维成本，对电力系统的平稳运行起到了强有力的支撑作用。今后，可以深入研究将多源数据融合和深度学习算法应用于设备状态监测和检修周期优化等方面，提升系统智能化水平。

## 参考文献

- [1] 孔庆泽, 李岩, 张勇, 等. 基于5G网络的配电网设备状态在线监测和控制研究[J]. 信息技术, 2024, 48(3): 110-115.
- [2] 张靖莹. 基于深度学习的主配网设备运行状态监测与预测研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(7): 250-252.
- [3] 袁拓, 宋翔宇. 10kV配网设备运行状态监测研究[J]. 科学与信息化, 2023(15): 117-119.
- [4] 王朝, 白杨. 配网设备状态检修及运维管理的实践分析[C]//2024精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集(中册). 2024.
- [5] 赵山尧, 赵钰, 徐守洋, 等. 基于改进SIFT算法的配网设备状态监测方法研究[J]. 信息记录材料, 2024, 25(5): 64-66.