

电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理研究

赵毕宇

云南华电金沙江中游水电开发有限公司阿海发电分公司, 云南 丽江 674100

[摘要]随着新型电力系统建设的不断推进,电气设备作为电力传输、分配的核心载体,其运行稳定性直接决定电网安全与供电可靠性。传统定期检修模式存在资源浪费、检修针对性不足等问题,难以适配现代电力系统的运维需求。文章结合状态检修与全生命周期管理的核心内涵,分析当前电力系统电气设备管理的现状与问题,探讨状态检修的关键技术与全生命周期管理的实施路径,提出优化策略,旨在提升设备运维效率、降低运维成本,延长设备使用寿命,为电力系统安全稳定运行提供理论支撑与实践参考。在此基础上,用数字孪生、全生命周期成本模型、协同管理平台等来建立一个包含规划、采购、运维到退役的闭环管理体系,并且展望智能化升级的方向,从而给新型电力系统设备管理提供系统的解决方案。

[关键词]电力系统; 电气设备; 状态检修; 全生命周期管理; 运维优化

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19900

中图分类号: TM732

文献标识码: A

Research on State Maintenance and Whole Life Cycle Management of Electrical Equipment in Power System

ZHAO Biyu

Ahai Power Generation Branch of Yunnan Huadian Jinsha River Midstream Hydropower Development Co., Ltd., Lijiang, Yunnan, 674100, China

Abstract: With the continuous promotion of the construction of new power systems, electrical equipment, as the core carrier of power transmission and distribution, directly determines the safety and reliability of the power grid and power supply through its operational stability. The traditional regular maintenance mode has problems such as resource waste and insufficient targeted maintenance, making it difficult to adapt to the operation and maintenance needs of modern power systems. The article combines the core connotations of condition based maintenance and whole life cycle management to analyze the current status and problems of electrical equipment management in power systems. It explores the key technologies of condition based maintenance and the implementation path of whole life cycle management, and proposes optimization strategies aimed at improving equipment operation and maintenance efficiency, reducing operation and maintenance costs, extending equipment service life, and providing theoretical support and practical reference for the safe and stable operation of power systems. On this basis, a closed-loop management system including planning, procurement, operation and maintenance, and retirement will be established using digital twins, whole life cycle cost models, collaborative management platforms, etc., and the direction of intelligent upgrading will be explored to provide a systematic solution for the management of new power system equipment.

Keywords: power system; electrical equipment; condition based maintenance; whole life cycle management; operations optimization

引言

电力工业是国民经济的支柱产业,电气设备的健康运行是保障电力系统安全、高效、稳定供电的基础。随着新能源并网规模扩大、电网结构日趋复杂,传统“定期检修、事后处置”的运维模式已难以满足现代电网对安全性与经济性的双重要求。状态检修以设备实际运行状态为核心,全生命周期管理贯穿设备规划至退役全过程,二者结合可

实现运维资源优化配置、降低故障风险。目前新型电力系统具有高比例可再生能源接入、高比例电力电子设备应用的“双高”特点,设备运行工况更加严格、多变,对状态感知的实时性以及全生命周期成本控制提出了更高的要求,急需建立数据驱动、全链协同的设备管理体系。因此,深入研究电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理,破解当前运维痛点,对推动电力行业高质量发展具有重要

现实意义。

1 电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理核心内涵

1.1 电气设备状态检修核心内涵

电气设备状态检修是一种基于设备实时运行状态的动态检修模式，核心是通过各类监测技术获取设备运行参数，结合历史数据、运行环境等因素，精准判断设备健康状态，有针对性地制定检修计划，实现“该修则修、修则修好”。与传统定期检修相比，其摒弃了“一刀切”的检修方式，注重检修的科学性与针对性，既能避免过度检修造成的人力、物力浪费，也能防止检修不及时引发的设备故障，核心目标是提升检修效率、保障设备可靠运行。从技术实现角度出发，在部署特高频局部放电传感器、SF6微水密度传感器、光纤测温、振动监测等设备的基础上，利用边缘计算网关对大量的异构数据进行就地预处理以及特征提取，依靠物联网实现海量数据的汇集。在此基础上建立以健康指数和剩余寿命预测为依据的设备状态评价模型，用模糊综合评价、支持向量机、深度学习等算法将设备状态量化成正常的、注意的、异常的、严重的级别，实时生成差异化的检修方案，把检修资源精准投向真正需要维护的设备单元。

1.2 电气设备全生命周期管理核心内涵

电气设备全生命周期管理是贯穿设备规划设计、采购制造、安装调试、运行维护、退役处置全流程的系统性管理模式，核心是统筹考虑设备全生命周期内的成本、性能与安全，实现设备价值最大化。其强调各环节的协同衔接，打破传统管理中各环节脱节的问题，通过全流程管控，优化设备选型、规范运维流程、科学处置退役设备，兼顾经济性、安全性与环保性，为电力企业降本增效提供支撑。其主要抓手是全生命周期成本（LCC），从设备购置费、安装费、运行维护费、故障停电损失费和退役处置费等各方面考虑，在规划设计阶段就进行成本-效益仿真，选择全生命周期经济性最好的方案。对每台设备建立从设计到报废的全部生命周期数字档案，即包含设计参数、出厂试验数据、安装调试报告、历次检修记录、退役评估信息等在内的所有信息，使一台设备有一套档案可查，从而从根本上避免因信息孤岛导致的决策错误。

1.3 二者的内在关联

状态检修与全生命周期管理相辅相成、密不可分。状态检修是全生命周期管理中运行维护阶段的核心内容，为全生命周期管理提供实时设备状态数据，支撑各环节管理决策的科学性；全生命周期管理为状态检修提供统筹保障，

通过规划设计阶段的合理选型、采购阶段的质量把控，为状态检修奠定基础，同时结合退役处置数据，反哺状态检修与设备选型优化，形成“全流程闭环、各环节协同”的管理体系。闭环机制具有动态优化的特点，比如状态检修发现某型号断路器操动机构经常出现卡涩缺陷，相关信息反馈之后就会引发采购选型和设计改良；退役拆解时得到的绝缘老化微观机理，又被用作校正状态评价模型里老化速率参数的依据，从而改善状态预估精确度。数据驱动的不断更新能力，是分段式管理不能达到的。

2 电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理现状及问题

2.1 状态检修实施现状及问题

当前我国电力企业已逐步推广状态检修模式，但仍存在诸多问题。部分企业监测技术较为落后，缺乏高精度、智能化的监测设备，难以精准获取设备内部运行状态数据，导致状态判断存在偏差；部分运维人员专业能力不足，对监测数据的分析解读能力欠缺，无法及时识别设备潜在故障；此外，状态检修标准不统一，不同企业、不同设备的检修流程与判断标准存在差异，影响检修质量与效率，难以形成规范化的检修体系。相当一部分变电站采用人工巡视频次结合定时带电检测的方式，在线监测覆盖率不足30%，变压器内部热点温度、局部放电等重要指标不能及时掌握，状态评价存在空白区域；各种监测系统、SCADA系统、生产管理系统之间没有有效的数据接口，造成各个系统各自为政，形成了一个数据孤岛，严重制约了综合分析水平的提高。但是状态检修策略一般采用固定阈值，不能适应设备之间以及运行工况随时间变化的特点，缺陷预警的及时性和准确性有待提高。

2.2 全生命周期管理实施现状及问题

全生命周期管理在电力行业的应用仍处于初级阶段，核心问题集中在各环节衔接不畅。规划设计阶段未充分考虑设备全生命周期成本与运维便利性，导致设备投运后运维难度大、成本高；采购制造阶段对设备质量把控不够严格，部分设备存在质量隐患，缩短使用寿命；运行维护与退役处置环节脱节，退役设备的回收、拆解与再利用缺乏系统性规划，不仅造成资源浪费，还可能带来环保隐患，未能实现全流程价值最大化。典型问题就是设备招标时过分看重最低价中标，而忽略LCC，造成投运后由于冷却系统、绝缘材料等选型不合理，故障率高、维护费用大。退役处置时大量SF6气体、绝缘油等没有按照环保标准进行回收处理，废旧设备大多采用简单的变卖或者填埋方式，再制造价值较高的部件不能实现梯次利用，资源循环

利用率低, 存在环境违规的风险。

2.3 二者融合过程中存在的问题

状态检修与全生命周期管理的融合程度不足, 缺乏统一的管理平台与数据共享机制, 导致状态检修获取的实时数据无法有效同步至全生命周期管理各环节, 难以支撑全流程决策; 部分企业缺乏全局意识, 过度关注运行维护阶段的状态检修, 忽视了规划设计、退役处置等环节对状态检修的影响, 导致二者协同效应无法充分发挥; 同时, 相关管理制度不完善, 缺乏有效的考核机制, 制约了融合管理模式的推广与落地。另外大多数企业还没有形成覆盖设备全生命周期的数字孪生体, 不能把物理设备的实时状态以及历史轨迹在虚拟空间里完整地反映出来, 状态信息同生命周期各个阶段的业务流程相脱离。目前的绩效考核仍然把检修计划完成率、设备可用率作为主要指标, 没有加入全生命周期成本优化率、状态数据共享度和退役再利用率这些融合导向指标, 造成各部门之间缺少协同动力, 不能形成对设备整体价值的管控合力。

3 电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理优化策略

3.1 完善状态检修技术体系

加大智能化监测技术投入, 推广应用红外热成像、局部放电检测、油中溶解气体分析等高精度监测设备, 实现设备运行状态的实时、全面监测; 搭建智能化数据分析平台, 运用大数据、人工智能技术对监测数据进行深度分析, 精准识别设备潜在故障, 实现故障预警与检修决策的智能化; 制定统一的状态检修标准, 规范检修流程、判断指标与操作规范, 提升检修质量与规范性, 同时加强运维人员专业培训, 提升其数据解读与故障处置能力。应进一步加强数字孪生技术的应用, 创建起关键设备的高保真虚拟模型, 把电气、热、机械等各方面的数据及时同步到虚拟模型当中去, 借助于仿真推演来预估故障的发展走向, 在各种工况下选择最佳的检修方案, “虚实联动”地做出智能决策。从算法上提出使用注意力机制加迁移学习的小样本故障诊断模型来解决电力设备故障样本量少、类别不均匀的问题, 从而提高早期缺陷识别率。从标准角度出发, 推进状态检修导则向智能化方向修订, 创建起依靠动态阈值和差别评价的体系, 依照设备电压等级、重要程度以及运行年限来设定不一样的检修触发条件和健康指数基准值, 进而支持精准检修。

3.2 构建全生命周期闭环管理体系

在规划设计阶段, 结合电力系统发展需求, 统筹考虑设备全生命周期成本、运维便利性与环保性, 优化设备选

型与设计方案; 采购制造阶段, 建立严格的质量管控体系, 加强对设备生产、检测环节的监督, 确保设备质量达标; 运行维护阶段, 将状态检修与日常运维相结合, 及时处理设备隐患, 延长设备使用寿命; 退役处置阶段, 建立规范化的回收、拆解与再利用机制, 实现资源循环利用, 降低环保风险, 形成全流程闭环管理。规划设计时应采用模块化、标准化的设计理念, 减少专用部件, 降低运维复杂度及备品备件成本, 在采购阶段实行全生命周期成本招标方式, 把 LCC 当作评标的主要指标, 联合供应商开展可靠性增长试验和出厂预鉴定工作, 从源头保证设备的固有可靠性。退役处置环节创建废旧设备评估及再制造标准, 对变压器、断路器等拆解后还完好的零部件开展剩余寿命评定, 符合标准的部件可以梯次应用于配电网或者工业用户, 塑造起“资源-产品-再生资源”的循环经济链, 而且还要创建绿色拆解和有害物质无害化处理流程, 保证环境合规。

3.3 推动二者深度融合, 搭建协同管理平台

搭建状态检修与全生命周期管理协同平台, 实现各环节数据的实时共享与互联互通, 将状态检修获取的设备运行数据、故障数据同步至全生命周期管理各环节, 为规划设计、采购制造、退役处置等提供数据支撑; 树立全局管理意识, 强化各环节协同衔接, 将状态检修要求融入设备规划、采购等前期环节, 同时结合全生命周期数据优化状态检修策略; 完善管理制度与考核机制, 明确各环节管理责任, 将融合管理成效纳入考核, 推动融合管理模式落地见效。协同平台应该采用云、边、端三层架构, 感知层使用统一的数据模型和通信协议接入各种智能传感器, 边缘层部署轻量级的智能算法进行异常就地诊断和策略秒级响应, 云端汇集全生命周期数据湖, 给设备画像、状态评价、LCC 剖析和检修策略改良赋予微服务。通过数据中台打通企业资源计划系统、生产管理系统和状态监测系统, 形成设备全生命周期主数据标准, 保证各个环节以同一个信息源为依据进行协同工作。配套建立状态检修覆盖率、全生命周期成本达成率、退役设备再利用率、状态数据共享及时率、故障预防贡献度等融合管理关键绩效指标, 把考核结果同部门绩效联系起来, 促使跨流程协同。

4 结论

电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理是提升设备运维水平、保障电网安全稳定运行的重要举措, 二者的深度融合是现代电力行业运维管理的发展趋势。当前我国电力系统电气设备状态检修与全生命周期管理仍存在监测技术落后、各环节衔接不畅、融合程度不高等问题。通过完善状态检修技术体系、构建全生命周期闭环管理体

系、搭建协同管理平台、完善管理制度等优化策略,可有效提升设备运维效率、降低运维成本,延长设备使用寿命,实现设备全生命周期价值最大化,为新型电力系统建设提供有力支撑。未来,随着智能化技术的不断发展,应进一步推动状态检修与全生命周期管理的智能化升级,助力电力行业高质量发展。为实现“双碳”目标和新型电力系统的建设,高比例新能源接入会使得设备承受更加频繁的功率波动以及更加复杂的谐波环境,急需发展自感知、自诊断、自优化的智能电力设备,将区块链技术深度融合到设备全生命周期的数据可信共享中,实现跨区域、全电压等级的协同检修和资产优化配置,使设备管理朝着安全、高效、零碳的智慧模式不断迈进。

[参考文献]

- [1]孙钊,张一.电力系统变电一次设备状态检修技术研究[J].电力设备管理,2026(1):16-18.
- [2]吕静,赵小宁,谢正青,等.电力设备全寿命周期运维检修策略研究[J].科海故事博览,2025(24):61-62.
- [3]张涛,石兴瑞,朱鸿儒,等.基于云计算的电力变电一次设备智能检修系统设计[J].电气技术与经济,2025(3):202-204.
- [4]于波,史子轶,王俊松.基于实时状态评估与剩余寿命计算的高压断路器预测性维护策略[J].高电压技术,2022,48(7):2716-2726.
- [5]曾建生,马兰,王昭雷.基于系统动力学的电力变压器全寿命周期影响因素分析[J].电器工业,2024(2).
- [6]刘宇鑫,许刚,李本良.配电网变压器剩余使用寿命预测[J].电气技术,2024,25(3):32-37.
- [7]钱庆林,孙炜昊,王真,等.基于非线性尺度空间与极坐标分布熵的GIS局放特征提取方法[J].电网技术,2024,48(8):3525-3533.

作者简介:赵毕宇(1994—),男,汉族,四川广元人,助理工程师,重庆大学本科毕业,现从事水电厂运行值班工作。