

输电线路运行维护技术的研究进展与挑战

宋增悦

国网宁夏电力宁夏送变电工程有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i4.15071

[摘要] 新型电力系统建设推动输电线路运维向数字化、智能化转变。本文综述全球输电线路运维技术进展,从环境适应性、智能感知、故障诊断、决策优化四方面梳理关键技术。环境适应性研究聚焦材料改进与抗干扰技术,新型复合材料等提升了线路耐受性。智能感知技术融合物联网传感器、无人机与卫星遥感,实现多维度监测,但数据传输与边缘计算效率待提升。故障诊断结合AI算法与数字孪生模型,实现精准定位与预测,但模型迁移能力不足。决策优化依托大数据与优化算法,推动策略转向主动预测,但数据融合精度与算法鲁棒性需提升。研究显示,多源数据融合与跨学科方法集成是突破运维瓶颈的路径,全生命周期数字孪生体系构建是未来研究方向。最后提出建立“空-天-地”协同监测网络、发展自愈型输电设备等建议,为智能运维提供理论参考,助力能源互联网可靠性与安全性提升。

[关键词] 输电线路; 智能运维; 数字孪生; 状态评估; 故障预测

中图分类号: TM621.5 文献标识码: A

Research Progress and Challenges in Operation and Maintenance Technologies for Power Transmission Lines

Zengyue Song

Ningxia Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd. of State Grid Ningxia Electric Power Company

[Abstract] The construction of new power systems is driving the digital and intelligent transformation of transmission line operation and maintenance. This paper reviews global advancements in transmission line operation and maintenance technologies, systematically analyzing key technologies from four aspects: environmental adaptability, intelligent sensing, fault diagnosis, and decision optimization. Research on environmental adaptability focuses on material improvements and anti-interference techniques, with novel composite materials enhancing line durability. Intelligent sensing technologies integrate IoT sensors, drones, and satellite remote sensing to achieve multidimensional monitoring, though challenges remain in data transmission and edge computing efficiency. Fault diagnosis combines AI algorithms with digital twin models to enable precise localization and prediction, yet model transferability requires further improvement. Decision optimization leverages big data and optimization algorithms to shift strategies toward proactive prediction, but data fusion accuracy and algorithm robustness need enhancement. Studies indicate that multi-source data fusion and interdisciplinary method integration are pathways to overcoming operation and maintenance bottlenecks, with the construction of full-lifecycle digital twin systems emerging as a future research direction. Finally, recommendations are proposed, including establishing an "air-space-ground" collaborative monitoring network and developing self-healing transmission equipment, providing theoretical references for intelligent operation and maintenance and contributing to enhanced reliability and security in energy internet systems.

[Key words] transmission line; intelligent operation and maintenance; digital twin; condition assessment; fault prediction

引言

随着全球能源转型的加速推进,新型电力系统正逐步构建以可再生能源为主体的能源互联网架构。输电线路作为电力系

统“大动脉”,其安全性和可靠性直接影响电力系统的稳定运行。传统运维模式依赖人工巡检和定期检修,存在效率低、响应慢、资源浪费等问题,难以满足新型电力系统对实时监测、精准预测

和智能决策的需求。近年来,数字化、智能化技术快速发展,为输电线路运维带来了新的变革机遇。本文从环境适应性、智能感知、故障诊断、决策优化四个核心维度,系统综述输电线路运维技术的研究进展,分析现存挑战,并展望未来发展方向,旨在为智能运维体系的构建提供理论参考与实践指导。

1 环境适应性技术: 极端环境与材料革新

输电线路长期暴露于复杂自然环境,极端气候(如台风、暴雨、冰雪灾害)、腐蚀、污秽等环境因素是导致线路故障的主要原因。为提升环境适应性,研究集中在材料改进、结构优化与主动防护技术。新型复合材料通过添加纳米填料,提高了耐腐蚀性能,延长了线路使用寿命。

1.1 材料改进与抗干扰技术

新型复合材料(如碳纤维增强复合材料)在输电杆塔中的应用,显著提升了抗风、抗冰性能。例如,中国某特高压线路采用碳纤维复合横担,在极端冰雪条件下减少覆冰重量30%,有效降低倒塔风险。此外,耐候性涂层(如纳米涂层)与腐蚀监测传感器结合,实现了导线与金具的腐蚀状态实时评估。然而,复合材料长期老化机制及成本问题仍需深入研究。

1.2 主动防护与自适应调节

针对微气象区(如峡谷风场)的灾害预测,基于数值模拟与气象数据的区域风险预警系统已在北美地区部署。这些系统如同输电线路的“气象雷达”,能够提前识别潜在威胁。通过利用先进的数值模拟技术,结合实时气象数据,这些预警系统可以精确地预测到灾害发生的可能性,为输电线路的运行维护提供了有力的支持。自适应调节装置(如自动张力补偿器)则像智能舞者一样,能够根据风速变化动态调整导线张力,以减少微风振动损伤。这些装置通过内置的传感器和智能算法,实时监测和调整线路状态,提高了输电线路的稳定性和安全性。然而,现有的系统在应对极端气象事件时,响应速度与调控精度仍有待优化。

挑战与方向: 环境适应性技术需突破多物理场耦合建模与极端场景模拟,开发兼具高性能与经济性的材料体系,建立环境-设备-运维策略的闭环优化机制。为了应对这些挑战,未来的研究可以重点开发更加精确的多物理场耦合模型,以便更好地模拟极端天气条件对输电线路的影响。此外,研究和开发新的材料体系,不仅要提高其性能,还要考虑经济性,确保在实际应用中的可行性。最后,建立一个闭环优化机制,将环境、设备和运维策略紧密结合,实现输电线路运行维护的全面优化。

2 智能感知技术: 多源数据融合与实时监测

智能感知是运维智能化的基础,通过物联网(IoT)、无人机、卫星遥感等技术,实现线路状态的全面监测,获取温度、湿度、图像等关键数据,帮助运维人员及时了解线路状态。然而,智能感知技术仍面临数据融合的复杂性和实时性挑战。由于数据来源多样且格式不统一,整合和处理这些数据成为关键。未来,随着人工智能和大数据技术的进一步发展,智能感知系统将更加集成和自动化。先进的算法将提高数据融合的效率,系统能够自主学习和优化,实现精准的实时监测和预测性维护。边缘计算技术

的应用也将提升数据处理速度和实时性,使得维护决策更为迅速有效。这样,输电线路的运维将更智能高效,降低故障概率,确保电力系统稳定运行。

2.1 物联网传感器网络

分布式传感器(如振动传感器、温度传感器)部署于杆塔、导线等关键部位,实时采集机械应力、温度等信息。这种实时监控不仅提高了输电线路的运行安全性,还能有效预防潜在故障。例如,欧洲某输电公司采用光纤光栅传感器监测导线温度,成功预警多起过热故障,大大减少了因设备故障导致的停电事故。然而,尽管有这些显著的优势,传感器技术仍面临一些关键挑战,如寿命较短、功耗问题以及大规模部署的高成本。这些挑战限制了物联网传感器网络在输电线路运维中的普及。因此,提升传感器的耐用性、降低功耗和部署成本是推进智能运维亟需解决的关键问题。

2.2 无人机与卫星遥感巡检

无人机搭载可见光/红外相机、激光雷达(LiDAR)等设备,实现线路精细化巡检。结合卫星遥感的大范围覆盖能力,可快速识别线路走廊的植被生长、地质变化等隐患。例如,中国国家电网利用无人机巡检与卫星影像融合,将故障定位时间缩短至2小时。然而,数据实时传输带宽限制、复杂地形下的巡检路径规划等挑战依然存在。

2.3 边缘计算与数据融合

边缘计算节点部署于变电站或杆塔,对原始数据进行预处理,降低云端传输压力。通过多源数据融合技术,比如将传感器数据与气象数据进行关联分析,可以大幅提升状态评估的精度。然而,在实际操作中,异构数据的时间同步以及数据清洗算法的鲁棒性仍然是亟待优化的关键问题。

挑战与方向: 为了应对这些挑战,需要突破低功耗长寿命传感器技术,实现边缘计算资源的优化分配。同时,构建一个高效的“空-天-地”协同感知网络,从而实现数据的高效采集与实时分析。这一网络将通过集成各类传感器和先进的数据处理技术,确保输电线路的运行维护更加智能和可靠。

3 故障诊断技术: AI 驱动的精确定位与预测

故障诊断从传统基于规则的专家系统向AI算法与数字孪生技术融合的方向发展,实现故障的快速定位与预测。尽管该技术具有显著优势,但在实际应用中仍面临数据质量要求高、模型训练复杂等挑战。未来的发展方向包括进一步提升算法的鲁棒性和降低对大量标注数据的依赖,以实现更广泛的实用性和推广性。

3.1 AI算法在故障分类中的应用

卷积神经网络(CNN)和递归神经网络(RNN)被广泛用于故障波形识别与分类。例如,某研究团队利用CNN对雷击与短路故障的暂态电流波形进行区分,准确率超过95%。另外,一家电力公司采用RNN进行故障预测,通过大量历史数据训练,实现了早期故障预警,减少了停电时间。但模型泛化能力受限于训练数据多样性不足。

3.2 数字孪生与故障模拟

基于物理模型与数据驱动的混合数字孪生系统,可以高度逼真地模拟输电线路在不同运行状态下的故障演化过程。这种模拟使运维人员能够预见潜在问题并采取预防措施。例如,美国某电力公司构建的输电线路数字孪生平台,成功预测了绝缘子老化引发的闪络故障,从而显著降低了意外停电的风险。然而,该技术在模型参数校准的实时性和跨场景迁移能力上仍需改进。

挑战与方向:面对这些挑战,研究者需要开发轻量化的AI模型,以提高在小样本情况下的学习性能。此外,构建能够动态更新的孪生模型也至关重要,这将有助于解决模型参数随时间漂移的问题。进一步探索故障机理与数据驱动的混合诊断方法,将为提升故障预测的准确性和系统的可靠性提供有力支持。

4 决策优化技术:从被动响应到主动预测

运维决策已从传统的周期性检修转变为基于状态评估的主动预测与优化,利用大数据分析和优化算法实现资源的高效配置。技术进步使得现代运维系统能够利用实时数据监控和先进分析工具,在故障发生前进行准确预测,并相应调整维护计划。这种前瞻性方法不仅提高了输电线路的可靠性,还大幅降低了维护成本,延长了设备使用寿命。

4.1 状态评估与剩余寿命预测

基于多源数据的综合健康指数(HI)评估方法通过整合来自不同传感器和监测系统的数据,结合粒子滤波、蒙特卡洛模拟等先进技术,如同为输电线路赋予生命,能够有效地量化设备的剩余寿命。这种方法不仅关注设备的实时运行状态,还融入了历史数据和环境因素的影响,提供更为精准的评估结果。例如,日本某电力公司采用HI评估方法,成功将检修成本降低了15%。通过这种评估,电力公司能够如预测未来般准确把握设备的维护时间,避免不必要的检修,从而实现成本节约。然而,评估模型的精度犹如天平般依赖于数据的质量和评估指标体系的完善程度。高质量的数据和精细化的指标体系可以显著提高评估结果的可靠性,从而优化维护决策,提高输电线路的运行效率和安全性。

4.2 优化算法与维护策略

遗传算法、粒子群优化算法等被广泛应用于制定巡检路径和检修时序等决策中。这些算法通过模拟自然选择和进化过程,寻找最优的解决方案。例如,有研究提出基于动态规划的无人机巡检路径优化方法,通过精确计算每一步的最佳路径,使得巡检效率显著提升40%。这种方法通过减少不必要的路径重复和优化时间安排,提高了整体的操作效率。然而,在实际运行中,多目标优化问题,如成本、时间、可靠性的综合权衡,仍需要更加精细化的建模,以确保在各种实际约束条件下达到最佳效果。

挑战与方向:主要挑战在于提升多源数据质量评估和误差修正技术。数据准确性与完整性对决策至关重要,故需开发鲁棒优化算法,以应对数据误差或缺失。研究将致力于构建全局最优的运维决策体系,整合多数据和优化方法,全面优化输电线路运维管理。但当前算法在适应环境变化、数据隐私保护等方面存

在局限,需进一步研究。

5 未来发展方向与挑战

综合现有研究,输电线路运维技术的未来发展方向主要集中在以下方面:首先,构建全生命周期数字孪生体系,实现从设计到退役的数字化管理。通过实时数据提升维护效率和精准度。例如,在设计阶段通过数字孪生模拟测试,预测潜在问题,减少修改成本。其次,跨学科方法集成,融合材料科学、气象学、AI等技术,突破单一技术瓶颈。例如,结合气象数据和AI预测模型,预知恶劣天气影响,采取预防措施。第三,研发自愈型输电设备,通过自愈合涂层和动态调控机制,实现自主故障应对,提高设备可靠性,降低维护成本。例如,自愈合涂层可以自动修复线路表面损伤。最后,建立“空-天-地”协同监测网络,利用卫星遥感、无人机、地面传感器构建三维监测体系,实时获取运行状态数据,及时发现和处理异常。例如,无人机巡检难以到达的区域。然而,面临的挑战包括数据隐私保护、标准体系缺失和高昂的初期投入成本。需通过政策支持、技术攻关和产学研合作解决。政府应制定数据保护法规,推动统一技术标准,而产学研合作可分担研发成本,加快新技术推广。

6 结论

新型电力系统背景下,输电线路运维技术正经历从经验驱动到数据智能的深刻变革。环境适应性、智能感知、故障诊断、决策优化四大技术维度协同发展,推动运维模式向数字化、智能化方向演进。未来需以多源数据融合与数字孪生为核心,构建“设备-环境-运维”闭环系统,助力能源互联网的安全稳定运行。

[参考文献]

- [1]许剑冰.基于数字孪生的安全稳定控制系统试验验证展望[J].电力系统自动化,2024,48(05):1-10.
- [2]Smith J,et al.Integration of IoT and AI for transmission line condition monitoring[C].IEEE Power & Energy Society General Meeting,2021.
- [3]国家电网公司.输电线路智能运维技术指南[S].2023.
- [4]Siemens Energy.Digital twin for power transmission systems:From design to operation[White paper].Siemens AG,2022.
- [5]ABB.Smart grid technologies for self-healing systems[R].ABB Ltd.,2023.
- [6]NASA.Earth observation for energy infrastructure monitoring[Technical report].National Aeronautics and Space Administration,2023.
- [7]国家电网有限公司.输电线路智能运维技术指南[S].北京:中国电力出版社,2023.

作者简介:

宋增悦(1999--),女,汉族,宁夏石嘴山市人,大学本科,单位:国网宁夏电力宁夏送变电工程有限公司,职称:助理工程师,研究方向:输电线路运检。