

供配电系统设备运行状态监测与故障诊断技术研究

● 武志强



[摘要] 供配电系统作为电力系统的重要组成部分,其设备运行状态的良好与否直接关系电能质量和供电可靠性。随着电网规模不断扩大,供配电系统日益复杂,传统的定期检修和事后处理模式已难以满足当前的需求。因此,亟须发展先进的状态监测与故障诊断技术,实现设备状态的实时感知与智能决策,从而保障供配电系统安全、经济、高效运行。本文在分析供配电系统设备状态监测与故障诊断重要意义的基础上,重点探讨了状态监测与故障诊断领域的关键技术,如传感器技术、通信技术、人工技术等,并提出了推动相关技术发展的对策建议,为供配电系统的智能化发展提供参考。

[关键词] 供配电系统;状态监测;故障诊断;智能化;运行维护

电力系统作为国民经济的重要基础设施,在现代社会中扮演着不可或缺的角色。其中,供配电系统承担着将电能从输电环节送达用户的重任,是电力系统中与用户联系最为紧密的部分。传统的供配电设备运维模式主要依赖于定期检修和事后处理,存在检修周期长、损耗大、效率低等问题,难以适应当前供电可靠性和电能质量的要求。为解决这一问题,国内外学者和电力企业纷纷开展了供配电设备状态监测与故障诊断技术的研究与应用。通过在设备上部署各类传感器,并运用先进的通信、人工智能等信息技术,实现对设备运行状态的实时感知与智能分析,从而及时发现和预警设备的潜在故障,指导检修维护决策。这不仅可以大幅提高设备运维效率,降低检修成本,还能预防故障的发生,减少停电时间,从而保障供配电系统的安全稳定运行。

供配电系统设备状态监测与故障诊断的重要意义

(一)保障供电可靠性与安全性

供配电系统直接服务于电力用户,其供电可靠性和安全性影响着千家万户的日常生活和生产活动。然而,由于供配电网络点多、面广、环境复杂,加之设备长期处于高负荷、高应力状态,各类故障时有发生,给供电可靠性和安全性带来了挑战。传统的事后检修模式难以及时发现设备隐患,往往是在设备发生故障,甚至引发停电事故后才开展处理,其被动性和滞后性较为突出。为从根本上保障供电可

靠性与安全性,必须建立覆盖广、响应快、分析准的设备状态监测体系。通过对设备运行参数进行实时采集和智能分析,及时掌握其健康状况,预判可能出现的故障类型和严重程度,从而为检修维护决策提供依据。一旦发现设备异常,还可启动应急预案,尽快隔离故障点,防止故障扩大,最大限度地减少对供电可靠性的影响。

(二)提高供电系统运行效率

在当前供给侧结构性改革的大背景下,供电企业面临着降本增效、提质增效的双重压力,传统的事后检修模式已难以为继。为此,必须树立“先诊断、后治疗”的现代设备管理理念,通过状态监测与智能诊断技术的应用,促进检修维护模式从“计划检修”向“状态检修”转变,从而在确保供电可靠性的同时,最大限度地提高设备运行效率。

设备状态监测可实现对设备健康状况的实时感知,帮助维护人员及时发现设备的性能退化趋势,预判其剩余寿命,从而“治未病”,避免设备带“病”运行。同时,故障诊断技术可快速定位设备故障类型和部位,生成最优检修方案,指导检修过程,从而大幅提高检修效率。

(三)推动电力系统智能化发展

当前,在能源革命和数字革命的双重驱动下,全球能源电力格局正在发生深刻变革,电力系统正朝着清洁化、低碳化、数字化、智能化的方向加速演进。面对新挑战,传统的电网监控运维模式已不能满足发展需求,亟需运用现代信息通信和人工智能技术,推动电力系统的智能化升级,构建

安全、可靠、经济、高效的现代电网系统。

作为电力系统的神经末梢，供电环节与用户直接相连，是构建泛在电力物联网的重要切入点。通过在供电系统广泛部署先进的多模态传感器，构建覆盖范围广、测点密度大、异构融合强的状态监测网络，以及引入边缘计算、人工智能等技术，发展具备自感知、自学习、自决策、自执行能力的智能终端，可以实现状态信息的就地处理和智能分析，从而推动供电运维模式从集中监控、人工诊断向分布感知、自主分析转型。

Q 供配电系统设备运行状态监测的关键技术

（一）传感器技术在设备状态监测中的应用

传统电缆式传感器存在布线困难、可靠性差、灵活性不足等问题，难以满足状态监测对测点广、密度大的需求。无线传感器以其布点灵活、扩展方便、低成本等优势，在设备状态监测中得到了越来越广泛的应用。以无线振动传感器为例，可将其直接安装在变压器等关键设备表面，实时采集设备的振动信号，评估其机械状态。由于无需布设通信电缆，降低了施工难度，提高了布点灵活性，使得采集更多测点的振动数据成为可能。同时，多点振动信息的融合分析，还能揭示设备的整体振动特性，发现局部测点难以察觉的异常。无线传感器的应用，使得状态监测从传统的“点式监测”发展到“网状监测”，提高了状态信息的全面性和可靠性。但也应看到，无线传感器在供电、时间同步、电磁兼容等方面仍面临挑战，其规模化应用尚需攻克一系列技术难题。

光纤传感器具有测量精度高、电磁干扰小、耐高温、可远距离传输等优点，特别适用于变电站等强电磁环境下的状态监测。随着光纤传感技术的发展，单根光纤上可集成多个传感器，实现温度、应变、振动、位移等多参数的同时测量，简化了布线系统。例如，在变压器油枕顶部沿环向布设拉格光栅光纤传感器阵列，可实时监测顶部的振动和位移。一旦变压器局部放电引起油枕振动，通过对多点振动信号的空间定位分析，便可确定放电发生的区域，及时采取措施防止事态扩大。类似地，在高压套管表面布设光纤传感器，可实现对局部放电的实时在线监测，及早发现绝缘缺陷。

（二）通信技术在设备状态监测中的应用

光纤通信具有通信距离长、传输容量大、抗干扰能力强等优点。在变电站内，采用光纤环网连接各监测装置，可保证状态数据的高速、可靠传输。变电站之间则可通过光纤通道与调控中心实现互联，构建起覆盖主站、子站、通信管道三级的光纤通信网络，为状态监测数据实现集中管理奠定基础。随着状态监测范围和监测密度的不断扩大，单纯依靠电力光缆已难以满足日益增长的通信需求。光纤复用

技术的应用，则为状态监测提供了新的解决方案。通过在现有光纤上复用出新的波长，可提高系统传输容量，缓解通信瓶颈问题。同时，光纤复用还具备较强的灵活性和可扩展性，便于新增监测节点和通信业务。

（三）人工智能技术在设备状态监测中的应用

设备的状态退化通常伴随电气和热学特性的变化，这些变化在状态监测数据中有所体现。应用机器学习等人工智能技术，可从时域、频域、时频域等多角度提取反映设备状态特征的关键指标，实现状态数据到状态特征量的转化，为后续的状态评估和故障预警奠定基础。以变压器局部放电为例，其往往伴随高频电流脉冲的产生，监测油枕处的电流信号可有效捕捉放电过程。通过对油枕电流数据进行小波分析，提取对放电特征敏感的小波系数，并进一步计算脉冲重复频率、放电量等特征指标，可判断变压器局部放电的严重程度。类似地，通过对铁芯磁通、噪声等监测数据进行频谱分析，提取谐波、频带能量等特征，可评估铁芯的磁饱和水平和绝缘状态。

在特征提取的基础上，引入支持向量机、随机森林等智能分类算法，可实现设备健康状态的自动评估。例如，通过对油色谱、油温等多源监测数据进行特征融合，结合设备的历史状态等对设备状态进行划分，及时识别出设备由健康向亚健康、故障的退化过程。一旦评估出设备处于亚健康状态，还可进一步细化为初期、中期、晚期等不同阶段，直观反映退化的严重程度，为检修策略优化提供决策依据。

Q 供配电系统设备故障诊断的核心技术

（一）基于信号处理的故障诊断技术

供电设备的运行状态可视为多维时空信号的叠加，蕴含着丰富的故障信息。应用小波分析、经验模态分解等先进的信号处理技术，可从时域、频域等角度刻画故障信号的多尺度、多分辨率特征，实现状态信号到故障特征的提取和转化，为故障诊断提供数据支撑。

以断路器机械故障诊断为例，传统方法主要依据分合闸线圈电流的时域特征，难以全面反映断路器的机械状态。采用小波分析方法对线圈电流进行时频域变换，通过构造小波函数匹配故障引起的奇异信号，可增强诊断方法对附着不良、弹簧疲劳等机械缺陷的敏感性。同时，结合多尺度小波能量分布特征，可进一步细化缺陷程度和部位。

（二）基于数据驱动的故障诊断技术

随着状态监测的不断推进，设备故障数据日益丰富，为数据驱动的故障诊断方法提供了难得的机遇。不同于基于信号处理的方法，数据驱动诊断充分利用历史运行数据，通过机器学习算法寻找状态参数与故障类型之间的对应关系，最大限度地开发监测数据的诊断价值。

以变压器故障诊断为例,通过对油中溶解气体、铁芯振动、绕组电流等多源状态数据进行特征融合,结合历史故障案例构建训练样本,再使用支持向量机、随机森林等分类算法对变压器内部故障进行诊断,可有效识别绕组匝间短路、铁芯多点接地、局部放电等典型缺陷。一旦发现故障苗头,还可利用相关性分析、因果推理等方法,溯源故障发生的原因,如过负荷运行、制造缺陷、外力破坏等,为后续的检修决策提供关键依据。

Q 推动供电系统设备状态监测与故障诊断技术发展的建议

(一)加强基础理论研究,突破关键核心技术

设备状态监测与故障诊断涉及传感技术、通信理论、信号处理、人工智能等多个交叉学科。当前,我国在新型传感器、工业大数据等领域的基础研究相对薄弱,在智能诊断、预测性维护等方面的关键技术与发达地区还存在差距。对此,需进一步加大基础研究投入,在多物理场耦合机理、信号特征分析、算法模型研究等方面加强攻关,为关键技术的创新突破提供理论支撑。同时,还应强化产学研用协同创新,充分发挥企业的主体作用,加快科研成果的转化应用,促进技术创新与产业发展的良性循环。

以全光纤传感技术为例,光纤光栅等新型传感器虽已研制成功,但在高精度调节、远距离传输、抗电磁干扰等方面尚不完善,制约了实际应用。未来,需在光纤传感机理上加强探索,攻克光纤传感器的低成本制备、阵列集成等关键技术,并加快光电融合芯片的研制,为全光纤状态监测系统的构建扫除理论和技术障碍。

(二)建立健全技术标准体系,推动行业规范发展

设备状态监测与故障诊断的有效实施,离不开规范、统一的技术标准体系。当前,国家电网等已制定了输变电设备状态检修导则等管理性标准,但在接口规范、通信协议、信息模型等技术标准上仍有很大完善空间。对此,需加快构建覆盖感知层、网络层、应用层等不同环节的标准规范,明确状态监测系统的建设指标、功能需求、实施流程等,推动形成规范统一的行业生态。

在感知层,应完善智能传感器的接口定义、供电方式、安装要求等,实现传感设备的即插即用,降低工程实施难度。在网络层,需统一状态监测通信的数据格式、信息模型、应用协议等,推动不同厂商设备间的互联互通。在应用层,需明确状态评估、故障诊断等应用的功能指标、性能需求、测试规程等,确保监测数据的分析应用满足实际运维需求。在数据治理上,还应制定状态监测数据的采集规范、交换标准、安全防护等要求,促进数据在线汇聚、流通

共享、开放应用。

(三)加快监测诊断装备研发,提升自主创新能力

先进、可靠、经济的监测诊断装备是实施状态检修的物质基础。当前,我国在局部放电测试仪、红外热像仪等常规检测仪器上已实现了自主化,但在状态监测传感器、边缘计算网关、故障诊断软件等高端装备上,仍主要依赖国外进口,制约了技术的规模性应用。

未来,需要把装备研发作为推动自主创新的重要切入点,在新型传感器、智能网关、分析软件等方面加大投入。加强光纤传感器、无线传感器等新型传感装置的工程化和产业化,研发高可靠、低成本的核心元器件,推动监测单元的小型化、集成化发展。研制具备数据归一化、特征提取等功能的智能网关产品,实现状态数据的就地分析处理。加快状态评估、故障诊断等软件平台的升级换代,丰富算法模型库,提升软件的易用性和智能化水平。同时,还需加强监测诊断装备的工程化应用,加快推广具备故障预警、辅助决策功能的状态监测系统,促进全生命周期状态数据的积累和流通,形成从状态感知到诊断决策的闭环。

Q 结束语

展望未来,随着新一轮电力体制改革的持续深化,电力系统必将从传统的集中式架构向分布式、扁平化方向演进。泛在互联、多元融合、柔性互动将成为能源互联网的显著特征。设备状态监测与故障诊断技术也必将借力物联网、大数据、人工智能等新技术,实现由集中监控向分布协同、由事后诊断向预测维护、由专家分析向智能决策的跨越式发展。基于此,需要立足新的发展定位,准确把握技术发展趋势,前瞻性地谋划部署,力争实现基础理论、关键技术的重大突破,加快推进成果的工程化应用,为建设具有全球竞争力的世界一流能源互联网提供有力的技术支撑,助推我国电力事业的发展。

Q 参考文献

- [1]郭昕鹏.基于深度学习的CFETR包层遥控操作液压驱动系统故障诊断方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2023.
- [2]冯昌伟.电厂继电保护常见故障及现场处理对策[J].大众用电,2021,36(07):60-61.
- [3]杨婉璐.浅谈苏州博物馆西馆项目供电设计[J].江苏建筑,2023(04):12-16.

作者简介:

武志强(1992—),男,汉族,山西运城人,本科,工程师,山西北铜新材料科技有限公司,研究方向:电气工程。