

智能电气设备在核电厂的应用

边永文

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 本文围绕智能电气设备在核电厂的应用展开研究, 阐述其核心概念、分类及支撑技术, 结合核电厂电气系统高安全、高可靠的核心需求, 分析智能设备在核岛、常规岛、辅助系统及运维阶段的具体应用。指出当前应用中存在的设备适配、技术、运维管理及安全层面的问题, 剖析问题成因, 提出针对性优化策略, 并展望行业发展趋势, 为核电厂智能化转型、提升运维效能及保障运行安全提供理论与实践参考。

关键词: 智能电气设备; 核电厂; 应用

引言: 随着核电产业数字化转型推进, 智能电气设备凭借感知、通信、决策、控制一体化优势, 成为破解核电厂高温、高压、强辐射环境下运维难题的关键。核电厂作为清洁低碳能源核心载体, 对电气系统稳定性、安全性要求严苛, 传统电气设备已难以满足全流程智能化运维需求。基于此, 本文聚焦智能电气设备在核电厂的应用, 探索其应用路径、现存问题及优化方向, 助力核电产业高质量、安全高效发展。

1 相关理论与核心技术基础

1.1 智能电气设备核心概念与分类

(1) 核心概念: 智能电气设备是融合感知、通信、决策、控制功能于一体的新型电气设备, 以数字化技术为核心, 可实现自身状态感知、数据交互传输、自主分析决策及精准控制执行, 打破传统电气设备单一操作的局限, 核心特征体现为感知、通信、决策、控制一体化, 为设备智能化运维提供基础。(2) 主要分类: 按功能可分为五大类, 分别是智能监测设备、智能控制设备、智能保护设备、智能巡检设备及智能检测设备, 各类设备分工明确、协同运作, 覆盖核电厂电气系统全流程运维需求。

1.2 核电厂电气系统核心需求与特点

(1) 核心需求: 基于核电厂运行的特殊性, 其电气系统核心需求聚焦于高安全性、高可靠性、实时性、可追溯性及冗余备份, 各项需求紧密契合核电纵深防御理念, 保障系统稳定运行, 规避安全风险。(2) 系统特点: 运行环境具有高温、高压、强辐射的复杂性, 设备间关联性极强, 任一设备异常可能引发连锁反应; 同时运维要求严苛, 对设备全生命周期管理的需求突出, 需实现从安装、运行到报废的全程管控^[1]。

1.3 智能电气设备核心支撑技术

(1) 感知与检测技术: 以高精度传感器、红外探测、超声波探测等技术为核心, 可实时采集设备运行参数、状

态信息, 为后续分析决策提供精准的数据支撑。(2) 通信与组网技术: 依托工业以太网、5G专网、OPCUA协议等, 构建高速、安全、稳定的通信网络, 保障设备数据高效传输、互联互通, 避免数据丢失或泄露。(3) 智能分析与决策技术: 融合AI算法、大数据分析、核领域大模型等, 对采集的数据进行深度分析, 实现设备故障提前预警、异常精准定位及智能决策, 提升运维效率。

1.4 核电厂智能化转型相关标准基础

(1) 国内标准: 涵盖数字化转型管理参考架构、核电数据治理相关规范等, 明确国内核电厂智能化转型的实施路径与要求, 规范设备应用与数据管理。(2) 国际标准: 重点包括核电设备智能化安全规范, 为核电厂智能电气设备的应用落地提供合规依据, 保障设备运行符合国际安全标准, 推动技术国际化适配。

2 智能电气设备在核电厂的具体应用

2.1 核岛电气系统中的智能设备应用

(1) 反应堆相关智能电气设备: 核心应用于控制棒驱动机构智能控制与稳压器压力智能调节, 其中控制棒驱动机构智能设备可实时采集驱动参数, 精准控制控制棒升降, 保障反应堆功率稳定; 稳压器压力智能调节设备通过内置高精度传感器, 实时监测压力变化, 自动启动调节装置, 避免压力异常引发安全隐患, 契合核岛高安全性要求。(2) 核岛配电系统应用: 重点部署中低压配电柜智能检测设备与智能保护继电器, 例如中压配电盘智能检测小车, 可深入配电盘内部, 实时检测线路温度、电流、绝缘性能等参数, 及时发现接触不良、过载等隐患; 智能保护继电器可快速响应短路、漏电等故障, 自动切断故障线路, 防止故障扩大, 保障核岛配电系统可靠运行^[2]。(3) 核岛辅助电气设备: 主要应用智能应急电源与直流电源系统智能监控设备, 智能应急电源可在主电源中断时, 毫秒级自动切换供电, 保障反应堆冷却、

控制等关键系统不间断运行；直流电源系统智能监控设备实时监测电源电压、电流等状态，及时预警电源异常，确保核岛辅助系统稳定供电。

2.2 常规岛电气系统中的智能设备应用

(1) 汽轮发电机组智能控制：部署转速、功率智能调节设备及状态实时监测系统，智能调节设备可根据电网负荷变化，自动调节汽轮机转速与发电功率，实现机组高效运行；状态实时监测系统通过采集机组振动、温度等参数，精准判断设备运行状态，提前预警潜在故障，减少非计划停机。(2) 常规岛配电与输电设备：应用智能变压器、真空断路器等设备，智能变压器可实时监测绕组温度、油位等参数，自动调节电压，降低能耗；真空断路器具备智能检测与快速分断功能，可精准识别短路、过载等故障，快速切断故障线路，保障配电与输电系统安全稳定，提升供电可靠性。(3) 辅助设备智能化：在凝汽器、给水加热器等设备上部署智能监测与控制设备，实时采集设备运行参数，智能调节运行状态，优化换热效率，降低能耗；同时可及时发现设备泄漏、结垢等问题，为检修提供精准依据，保障常规岛辅助系统高效运转^[3]。

2.3 核电厂辅助系统中的智能设备应用

(1) 智能巡检应用：投入四足机器人、轨道巡检机器人，替代人工完成高辐射、高温等危险区域的巡检任务，机器人搭载红外探测、高清摄像头等设备，实时采集设备状态数据，同步传输至后台系统，实现无人值守巡检，既保障人员安全，又提升巡检效率与精度。(2) 安全防护智能化：部署智能消防设备、三废处理系统智能监测设备，智能消防设备可快速识别火灾隐患，自动启动报警、灭火装置，遏制火灾蔓延；三废处理系统智能监测设备实时监测废水、废气、废渣处理过程，确保处理达标，规避环境安全风险。(3) 数字化控制系统(DCS)：作为核电厂电气系统的“神经中枢”，整合全厂区各类智能电气设备的数据，实现对核岛、常规岛及辅助系统电气设备的统一监控、调度与管理，可实时呈现设备运行状态，支持远程操作与故障应急处置，提升全厂智能化管控水平。

2.4 核电厂运维阶段的智能设备应用

(1) 设备状态监测与预警：应用基于AI的故障诊断系统，整合设备全生命周期运行数据，通过大数据分析 with AI算法，精准识别设备潜在故障，实现预测性维护，提前排查隐患，减少非计划停机时间，降低运维成本。(2) 智能检修设备：采用焊缝智能评片系统、多合一智能检测设备，焊缝智能评片系统通过机器视觉技术自动

识别焊缝缺陷，提升评片精度与效率；多合一智能检测设备可集成多种检测功能，实现设备多维度检测，大幅提升检修工作的智能化水平。(3) 运维数据管理：应用数字孪生技术构建虚拟核电厂，映射真实厂区电气设备的运行状态，整合运维过程中的各类数据，实现运维流程可视化、智能化调度，为运维决策提供科学依据，支撑核电厂运维全流程智能化升级^[4]。

3 智能电气设备在核电厂应用中的现存问题与原因分析

3.1 应用过程中存在的核心问题

(1) 设备适配性问题：核电厂运行环境具有高温、高压、强辐射的特殊性，部分智能设备的防护等级、抗干扰能力不足，难以长期稳定运行，同时不同厂家设备的接口、协议不统一，兼容性较差，导致设备间无法高效协同，影响应用效果。(2) 技术层面问题：智能设备核心技术国产化率偏低，核心芯片、高精度传感器等依赖进口，存在技术卡脖子风险；AI算法多适配通用工业场景，在核电复杂工况下的适配性不足，数据处理精度和故障诊断准确率有待提升，且各系统数据壁垒明显，共享不畅。(3) 运维与管理问题：现有运维人员多熟悉传统电气设备操作，缺乏智能化设备操作、数据分析的专业能力，操作水平不足；同时设备全生命周期管理体系不完善，对设备研发、安装、运维、报废的全流程管控不到位，影响设备使用寿命和应用效能。(4) 安全层面问题：智能设备依赖网络传输数据，网络攻击、数据泄露等安全风险突出；部分智能设备安全冗余设计不足，一旦发生故障，可能导致核电厂关键电气系统停运，进而引发核安全隐患，契合核电高安全性需求的保障能力不足。

3.2 问题产生的原因分析

(1) 技术研发层面：针对核电极端场景的智能设备研发难度大、周期长、投入成本高，企业研发投入不足；核心零部件研发技术门槛高，国内相关产业发展不成熟，导致核心零部件依赖进口，制约国产化进程。(2) 标准与规范层面：核电厂智能电气设备应用起步较晚，智能化标准体系不完善，缺乏统一的设备接口、数据传输、安全防护等标准，导致不同厂家设备无法高效兼容，影响系统集成与协同运行。(3) 人才与管理层面：核电领域复合型人才短缺，既懂核电专业知识，又掌握智能化技术的人才供给不足；传统运维管理模式较为固化，未能及时适配智能化设备的运行特点和管理需求，管理效率偏低。(4) 安全管控层面：智能设备应用带来的网络安全风险被忽视，网络安全防护体系不健全，缺乏针对

性的防护技术和应急处置方案；部分企业过度追求智能化功能，忽视安全冗余设计，导致设备故障引发的安全风险提升。

4 智能电气设备在核电厂应用的优化策略与发展展望

4.1 应用优化策略

(1) 技术优化：聚焦核电极端运行场景，加大核电专用智能设备研发投入，重点攻关核心芯片、高精度传感器等关键零部件，提升核心技术国产化水平，打破进口依赖；针对核电复杂工况，优化AI算法适配性，结合核电厂运行数据训练专属模型，提升故障诊断、参数调节的精准度，强化技术支撑能力。(2) 设备与系统优化：推动智能设备与核电厂现有电气系统、数字化控制系统(DCS)深度兼容，梳理现有设备接口差异，统一设备接口与通信协议标准；构建一体化数据共享平台，打破各系统数据壁垒，实现设备运行数据、运维数据的集中整合与高效共享，提升系统协同运行效能。(3) 运维与人才优化：开展运维人员智能化技能专项培训，重点覆盖智能设备操作、数据分析、故障处置等内容，提升运维人员专业能力；建立高校、企业、核电厂联动的复合型人才培养体系，定向培养既懂核电专业知识、又掌握智能化技术的人才；完善设备全生命周期管理机制，实现设备研发、安装、运维、报废的全程可控^[9]。(4) 安全优化：构建全方位网络安全防护体系，部署专用防火墙、数据加密等技术，加强数据传输、设备控制环节的安全管控，防范网络攻击风险；强化智能设备安全冗余设计，增加备份设备与应急处置机制，落实核电纵深防御理念，确保设备故障时不影响核电厂核心系统安全运行。

4.2 行业发展展望

(1) 技术发展趋势：未来，AI、数字孪生、核领域大模型将与智能电气设备深度融合，推动核电厂电气系统实现全流程智能化升级。通过数字孪生技术构建核电厂虚拟仿真场景，精准映射真实设备运行状态，实现设备运行模拟、故障预判、运维演练和优化调度；核领域大模型结合核电行业海量数据，持续优化智能决策算法，推动核电厂从预测性维护向主动性、智能化运维转变，大幅

提升运行可靠性和运维效率。(2) 产业发展趋势：随着国家对核电产业的重视和研发投入的持续加大，智能电气设备核心技术攻关将不断突破，国产化率将持续提升，逐步形成从核心零部件研发、设备整机生产、系统集成到运维服务的完整产业链；同时，将推动算电协同发展，实现算力资源与核电电力资源的优化配置，推动核电智能化产业高质量发展，提升我国核电产业的国际竞争力。(3) 应用场景拓展：智能电气设备的应用范围将进一步延伸拓展，不仅覆盖大型核电厂的全流程运维，还将逐步应用于小型模块化核反应堆的智能化管控，适配小型堆灵活部署、高效运维的需求；同时，拓展至核电厂退役阶段，实现退役过程中设备拆解、辐射监测、环境治理、废料处理等环节的智能化管控，全方位支撑核电产业全生命周期安全、高效发展。

结束语

智能电气设备在核电厂的应用，是核电产业智能化转型的必然选择，其有效破解了传统运维模式的局限，提升了核电厂运行安全性与运维效率。尽管当前应用中仍面临设备适配不足、核心技术待突破等问题，但通过技术攻关、系统优化、人才培育及安全防控，可逐步完善应用体系。未来，随着技术融合深化，智能电气设备将进一步拓展应用场景，为核电产业全生命周期安全高效发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]夏万鹏.核电厂非安全级配电设备的智能化趋势[J].电气时代,2021,(9):15-21.
- [2]杨强,胡心宇.田湾核电站设备管理智能化应用的研究与实践[J].电工技术,2021(12):41-44.
- [3]褚雪芹,骆孟华.核电厂主控制室计算机化报警系统设计与实现[J].仪器仪表用户,2023,30(2):75-78.
- [4]管祥宇,黄泽群.核电厂电气设备温度实时监测及预警系统设计[J].电脑爱好者,2020,(11):363-364.
- [5]向健,李静.核电厂电气设备温度实时监测及预警系统设计[J].电气开关,2021,59(3):41-45.