变电站运行安全风险防控技术研究

陆万杰　李君游　史林鹏

国网新疆电力有限公司哈密供电公司　新疆　哈密　839000

摘　要：变电站作为电力系统电能变换与分配的核心节点，其运行安全直接关乎电网全局稳定性与供电可靠性。随着新能源大规模接入、设备老化加剧以及外部环境复杂化，变电站运行面临的风险类型日益多元、耦合程度持续加深，传统以经验驱动和定期检修为特征的风险防控模式已难以满足现代电网精益化管控要求。本文系统梳理变电站运行安全风险的主要类别与演化特征，在此基础上构建涵盖感知层、分析层与执行层的三层防控技术架构，重点论述多源数据融合感知、动态风险评估模型、智能巡检与预警以及协同决策支持等关键技术原理与实现路径，并探讨制度管理与技术手段协同优化的实施策略。研究表明，通过“状态全息感知—风险动态量化—策略精准适配”的闭环防控逻辑，可显著提升变电站运行安全风险的前瞻预见能力和主动控制水平，为智能变电站的安全运维提供理论参考。

关键词：变电站；运行安全；风险防控；多源数据融合

引言

变电站是电力系统核心枢纽，其安全运行至关重要。随着特高压电网发展、分布式电源接入及电力市场化改革，变电站运行环境日益复杂：设备增多、工况复杂导致故障点增加，极端天气等外部扰动加剧了风险不确定性。统计显示，设备故障引发的停电事故占比仍高，部分源于隐患识别不足和防控滞后。传统安全管理依赖人工巡检和周期性试验，虽能保障基本安全，但面对海量数据和瞬态变化时，存在态势感知弱、评估粗糙、响应慢等问题。新一代信息技术（物联网、AI、大数据）的发展，正推动变电站风险防控从“被动应对”向“主动防御”转型，提升本质安全水平。

1 变电站运行安全风险分类与特征分析

1.1 风险分类体系

变电站运行安全风险涉及设备、人员、环境和管理等多个维度。按照风险源属性，可划分为设备固有风险、操作行为风险、外部环境风险和系统耦合风险四大类别。设备固有风险涵盖变压器、断路器、隔离开关、互感器、母线等一次设备的老化、绝缘劣化、机械磨损及二次系统的软硬件故障；操作行为风险包括误操作、误入间隔、检修作业违章以及运维人员状态不佳导致的人因失误；外部环境风险涉及雷击、污闪、洪水、火灾、小动物入侵等自然环境因素，以及周边施工破坏、恶意攻击等社会因素；系统耦合风险则指交直流相互影响、连锁跳闸、电压稳定破坏等由系统层面动态交互引发的蔓延性风险[1]。上述各类风险并非孤立存在，而是具有显著的级联效应与时空叠加特征。

1.2 风险演化特征

变电站运行风险的演化呈现动态性、隐蔽性和突变性三大典型特征。动态性体现在设备状态参数随负载、温度、湿度、运行年限等因素持续变化，风险水平呈非线性时变规律，固定周期的检测难以捕捉瞬态劣化拐点。以某 110kV 变压器为对象，综合负载率、环境温度、湿度及运行年限的影响，模拟连续 90 天内的风险指数变化（0~1，数值越高风险越大）。设定固定检测周期为每 30 天一次（第 0、30、60、90 天）。

表 1 ：某 110kV 变压器模拟风险指数

时间（天）	实际风险指数	固定周期检测值
0	0.15	0.15
10	0.18	—
20	0.22	—
30	0.25	0.25
40	0.32	—
45	0.38	—
50	0.60	—
55	0.78	—
60	0.82	0.82
70	0.88	—
80	0.91	—
90	0.93	0.93

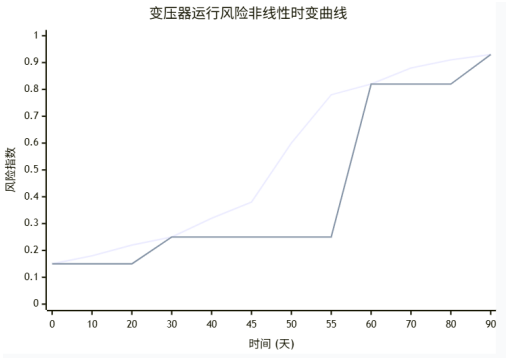


图 1：变压器运行风险非线性时变曲线

（深线固定周期检测曲线、浅线实际风险曲线）

可见，实际风险在第 45 天至第 55 天之间出现瞬态加速劣化（拐点），但固定检测仅在 60 天才捕捉到已升至 0.82 的风险值，错过了从 0.38 跃升到 0.78 的关键过程。

隐蔽性表现为早期绝缘缺陷、局部放电、触点温升等异常信号微弱，常淹没于正常工况噪声中，直至发展到一定程度才显现可测征兆，给早期预警带来极大困难。

突变性源于外部极端事件或内部连锁反应，可导致风险在短时间内急剧攀升，例如雷击过电压引发多路绝缘击穿、保护拒动或误动造成扩大性事故等。

2 变电站运行安全风险防控技术体系

2.1 整体架构设计

基于“感知—分析—执行”三层闭环逻辑，本文提出变电站运行安全风险防控的技术架构。感知层以多类型传感器、智能电子设备、在线监测装置和视频巡检终端为依托，实现对设备电气量、非电气量（温度、振动、气体、图像）以及环境参数的全面采集。分析层承担数据清洗、特征提取、融合处理与风险评估功能，利用机器学习、数理统计和物理模型相结合的方法，对运行态势进行实时研判，生成风险等级、故障概率及影响范围等量化结果。执行层根据评估结果触发预警信号、推送运维策略、辅助操作决策，并联动站内自动控制系统执行相应防护动作。三层之间通过高速通信网络实现信息流闭环，确保风险防控的时效性和准确性。

2.2 在线监测与全息感知技术

在线监测是风险感知的核心手段。针对变压器，可采用油中溶解气体分析、局部超高频监测、绕组变形频响法等技术，实时跟踪绝缘状态与机械结构完整性；针对 GIS 设备，应用特高频局部放电检测、超声波法及微水密度监测，灵敏捕捉内部放电和气体泄漏征兆；对于断路器，通过分合闸线圈电流波形、行程曲线和机械振动信号监测操作机构健康度[2]。值得强调的是，全息感知不仅关注设备自身状态，还应纳入微气象信息（风速、温湿度、降雨量）、接地网腐蚀状况、直流电源系统健康度等辅助变量，构建多维度的环境—设备联合状态视图。

2.3 智能巡检与移动运维技术

智能巡检机器人与无人机巡检技术的成熟应用，有效弥补了固定监测装置的覆盖盲区。巡检机器人搭载可见光、红外、紫外和声音传感器，按照预设路径对站内设备进行自主巡视，可识别表计读数、开关位置、渗漏油迹象以及异响特征，并通过边缘计算就地完成初步诊断，将异常结果上送至分析中心。智能巡检与在线监测形成数据互补，既提升了监测密度，也降低了人工重复劳动强度，使风险感知在时间和空间上更加连续和细密。

3 风险防控关键技术方法

3.1 多源异构数据融合与特征挖掘

变电站内数据来源广、格式异、采样频率不一，包括稳态 SCADA 数据、暂态故障录波数据、在线监测连续量、图像视频非结构化数据以及环境气象离散数据等。实现有效融合需要解决时空对齐、噪声抑制和冗余消除等问题。可采用基于边缘计算节点的数据预处理架构，在站端完成数据标准化和异常值剔除，再利用时间序列对齐算法将不同采样率数据映射至统一时间基准。在特征挖掘层面，引入深度自编码网络对高维监测数据进行降维和重构，提取反映设备健康状态的隐式特征量；同时结合物理规律约束，确保提取的特征符合设备退化机理，避免纯粹数据驱动导致的虚假相关。

3.2 动态风险评估模型构建

动态风险评估的核心在于建立设备故障概率与运行工况、老化程度、环境应力之间的实时映射关系。区别于传统静态可靠度模型，本文提出一种融合贝叶斯动态更新与生存分析的分层评估方法。底层针对单一设备建立比例风险模型，以基准故障率与协变量（负载率、温度、操作次数等）的乘积函数描述当前故障强度。例如，一台运行 15 年的 220 kV 变压器，基准故障率 $\lambda_0(t) = 0.008$ 次/年，选取协变量回归系数后，实时故障强度可表示为：

$$\lambda(t)=0.008\times\exp[1.2\times(L-0.7)+0.04\times(T-60)+0.005\times(N/100)]$$

其中 L 为负载率标幺值，T 为顶层油温（℃），N 为累计操作次数。当 L = 0.85、T = 78℃、N = 300 次时，指数项计算结果为 0.915，对应故障强度 $\lambda(t)\approx0.02$ 次/年，直观反映了工况偏离基准状态对故障风险的量化影响。上层通过贝叶斯网络将各设备风险关联起来，考虑保护配合、母线联结方式及负荷转移路径，量化单一设备故障对站内其他设备和整体供电能力的波及影响。模型采用序贯蒙特卡洛方法实现参数在线更新，每当新的监测数

据到达，便对后验分布进行递推修正，使风险评估值跟随系统状态平滑演进[3]。

3.3 预警机制与决策支持技术

预警机制需兼顾灵敏度和特异性，避免漏报与误报。在动态评估基础上，设置双阈值预警逻辑：第一级为趋势预警，当风险指标变化率连续超过设定门限时提前发出注意信号，提醒运维人员关注可能发展的隐患；第二级为状态预警，当风险值超过等级阈值时触发即时告警。决策支持技术则聚焦于将风险评估结果转化为可操作运维策略。构建基于案例推理与规则引擎相结合的辅助决策模块，其中规则引擎依据规程标准给出标准化处置建议（如限负荷、转移负载、申请停电检修），案例推理则检索历史相似场景下的成功处理方案，供运行人员参考。

3.4 网络安全防护与抗干扰技术

随着智能化水平提升，变电站二次系统网络化程度增高，网络安全本身成为新的风险来源。需在防控技术体系中纳入纵深防御的网络安全架构，包括边界隔离防火墙、横向认证加密、入侵检测系统以及可信计算启动机制。针对工控协议（如 IEC61850、Modbus）的深度包检测，能够识别异常指令和伪造数据报文[4]。同时，电磁干扰和信号衰减对无线感知设备的影响不可忽视，应采用冗余通信链路和自适应调制技术提高数据传输可靠性，并在分析层引入数据有效性校验机制，自动屏蔽质量不达标的感知数据参与评估计算，防止“脏数据”驱动错误决策。

4 风险防控管理策略与技术协同

4.1 基于风险的差异化运维策略

技术手段的有效发挥需要管理制度的适配。基于风险评估结果实施差异化运维策略，摒弃“一刀切”的固定周期模式。对于健康状态优良、风险等级持续偏低且运行环境稳定的设备，可适当延长例行试验周期，将检修资源向风险较高或劣化趋势明显的设备倾斜。差异化管理要求建立设备全生命周期的健康档案，将设计制造参数、运行检修记录、缺陷处理报告与在线评估数据贯通，形成完整的数字孪生映射，使每一台设备的维护决策都有据可依。

4.2 应急响应与恢复预案动态优化

事故无法完全避免，因此应急响应能力是风险防控的最后一道防线。传统的应急处置预案多为静态文本，难以适应事故演变中的不确定性。借助风险防控技术体系提供的实时态势信息，可构建动态应急辅助决策系统。当系统检测到风险指标进入严重等级并判定可能发展为故障时，系统自动推送预想故障集对应的处置流程，包括跳闸策略、隔离范围、恢复供电路径及重要负荷优先恢复次序事后，通过对故障过程的反演分析，反向修正风险评估模型参数和预警阈值，形成闭环学习机制，不断提升防控系统的自适应能力。

4.3 技术与管理融合的实施路径

技术工具只有嵌入日常管理流程才能产生实际效益。建议从三个层面推动技术与管理融合：在组织层面，设立数据专责和风险分析师岗位，负责监测系统的运行维护和评估结果的定期审核；在流程层面，将风险评估报告纳入每日运行交底内容，并作为操作票签发、工作许可和检修开工的前置审核条件；在培训层面，利用虚拟现实技术构建典型风险场景模拟系统，使运维人员熟悉各类告警信号含义和标准处置动作，提高应急心理素质与操作熟练度。此外，建立技术系统与管理制度之间的反馈迭代机制，定期统计风险评估准确率、预警有效率和非计划停运率等指标，持续优化监测参数配置和评估模型算法。

5 结语

本文在系统梳理风险分类与演化特征的基础上，构建了“感知—分析—执行”三层技术架构，围绕多源数据融合、动态风险评估、智能巡检和协同决策等关键环节展开论述，并强调了技术手段与管理制度深度融合的必要性。研究表明，建立以实时数据驱动为核心、以动态量化评估为纽带、以差异化策略和动态应急响应为支撑的闭环防控体系，能够有效提升变电站对复杂风险的前瞻识别和主动驾驭能力。未来研究方向应包括：面向新型电力系统下高比例电力电子设备接入带来的宽频振荡等新型风险，扩展评估模型边界；探索边缘智能与云端协同计算的最优分工模式，以平衡实时性与计算精度；以及研究跨站协同风险防控策略，从单一变电站安全扩展至区域电网群防群控，助力实现更高层面的电力系统安全韧性。

参考文献

[1] 王增平, 李岩, 张执国. 基于多源数据融合的变电站设备状态评估方法研究 [J]. 电力系统自动化,2022,46(8):142-149.

[2] 刘建锋, 陈维江, 周孝信. 面向新型电力系统的变电站安全防护关键技术综述 [J]. 电网技术,2023,47(5):1789-1798.

[3] 赵建国, 高翔, 刘科研. 基于动态风险理论的变电站运维决策优化研究 [J]. 电力自动化设备,2021,41(12):87-94.

[4] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传. 智能变电站网络安全态势感知与主动防御技术 [J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):1-10.