

Research on dynamic evaluation model of power system reliability and security based on big data

Xiaoli Wu Ke Zheng Yong Li Yuejing Su Changlu Shen

Samsung Medical Electrical Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315034, China

Abstract

In the process of accelerating the construction of new power systems, the penetration rate of renewable energy is continuously increasing, leading to strong uncertainty and complex time-varying characteristics in grid operations. Traditional evaluation methods, which rely on static analysis based on historical statistical data, can no longer meet the needs of modern dynamic grid management. Under the background of big data, a dynamic evaluation system that integrates multi-source heterogeneous data streams has broken through the limitations of traditional methods in temporal resolution and spatial coverage. This system demonstrates unique advantages in scenarios such as identifying weak points in the grid and predicting cascading failures. This paper focuses on the reconstruction of evaluation models driven by data, aiming to establish a dynamic evaluation framework with self-evolution capabilities, providing theoretical support for advancing the safety defense line of the power grid.

Keywords

power system; big data analysis; dynamic evaluation; reliability; security

基于大数据的电力系统可靠性与安全性动态评估模型研究

吴小莉 郑克 李勇 苏岳景 沈昌禄

三星医疗电气股份有限公司, 中国·浙江 宁波 315034

摘要

新型电力系统加速建设的进程中, 可再生能源渗透率不断提升, 电网运行随之呈现出强不确定性以及复杂时变的特征, 传统评估方法依赖历史统计数据的静态分析模式, 已无法满足现代电网动态管理方面的需求。在大数据背景下的动态评估体系, 通过对多源异构数据流的融合而突破了传统方法在时间分辨率与空间覆盖度上的局限, 在电网薄弱环节辨识、连锁故障预警等场景中展现出独特优势。本文聚焦在数据驱动之下评估模型的重构上, 目的在于建立具备自我进化能力的动态评估框架, 为电网安全防线能够前移提供相应的理论支撑。

关键词

电力系统; 大数据分析; 动态评估; 可靠性; 安全性

1 引言

现有评估体系主要采用基于概率统计的静态模型, 难以对高比例新能源接入的随机波动特性做到准确刻画, 在应对极端天气事件以及突发负荷冲击时还存在评估盲区。不过, 大数据技术给电力系统的状态感知开拓出了新的路径, 借助 PMU 量测数据、设备在线监测信息和外部环境参数的深度融合手段, 使得构建时空连续的动态评估体系成为可能。本文核心围绕数据价值挖掘展开, 致力于探索建立一种能融合实时监测以及趋势预测的评估模型, 重点对多源数据耦合分析、动态边界条件建模等技术问题加以解决。通过构建在线更新的评估算法框架, 达成电网风险态势能够动态可

视化呈现的效果, 为运行决策提供精准量化的参考依据。

2 电力系统可靠性与安全性评估的理论基础

2.1 可靠性与安全性的评价指标

电力系统可靠性与安全性评估依赖于多维度的量化指标体系构建, 可靠性评价聚焦于供电连续性与设备运行稳定性, 典型指标包括负荷削减概率反映系统在极端工况下维持供需平衡的能力, 系统不足期望值刻画长时间尺度内电力缺口的累积效应, 停电频率及平均持续时间揭示故障事件对用户侧的影响强度。安全性评价关注系统抵御扰动与维持稳定运行的水平, 节点电压偏移指数衡量各母线电压偏离额定值的程度, 支路潮流越限概率统计关键输电断面承受过载风险的可能性, 暂态稳定裕度表征故障切除后发电机功角保持同步运行的安全边界, 谐波畸变率评估电能质量对敏感设备的潜在损害。这些指标通过时空关联构建动态评估框架, 为系统运行人员提供全景式态势感知支持(如图1、图2所示)。

【作者简介】吴小莉(1983-), 女, 中国浙江宁波人, 本科, 高级工程师, 从事电力系统可靠性设计、动态性能及应急研究。

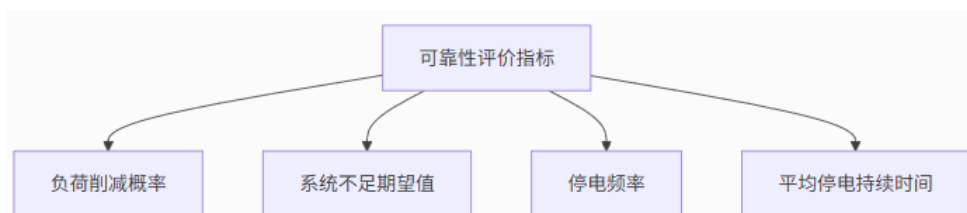


图 1 电力系统可靠性评价指标关联关系图

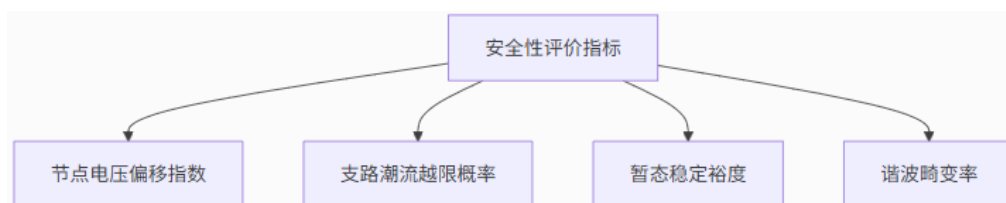


图 2 电力系统安全性评价指标关联关系图

2.2 传统评估方法的局限性

传统评估模型往往依赖确定性场景的离线计算，核心参数多基于历史统计均值或典型工况预设，难以准确表征高比例新能源接入后电力系统运行状态的随机波动特性。离线分析框架受限于固定时间尺度的稳态假设，无法有效捕捉负荷突变、设备瞬态故障等动态事件对电网安全裕度的实时影响，导致风险预警存在时间滞后性。数据维度单一化问题突出，传统方法通常仅关注电气量测信息，缺乏对气象环境、设备老化状态、用户需求响应等多源异构数据的整合能力，削弱了评估结果对复杂耦合风险的解析深度。模型更新机制僵化，多数评估工具依赖人工干预完成参数修正，面对电网拓扑频繁调整或新型电力设备投运时，难以实现评估基准与系统物理结构的动态匹配。极端事件处理能力不足，传统方法对飓风、冰灾等小概率高冲击事件的建模多采用简化等效手段，忽略时空关联性对连锁故障传播路径的影响，造成潜在风险的低估或误判。

2.3 大数据技术的赋能潜力

大数据 (big data)，或称巨量资料，指的是所涉及的数据规模巨大到无法透过主流软件工具，在合理时间内达到撷取、管理、处理、并整理成为帮助企业经营决策更积极目的的资讯。大数据技术与电力系统评估的深度融合催生多维认知范式升级，海量异构数据源的实时采集与智能解析重构了传统评估模型的时空边界，基于广域测量系统与物联网传感器的动态数据流可捕捉设备健康状态的微小劣化趋势，结合气象环境与社会用电行为的关联分析，形成覆盖物理信息层与人类活动层的全景式监测网络。数据驱动方法在复杂系统建模中的突破性应用打破了机理方程对高维非线性问题的求解局限，深度神经网络通过提取设备运行日志中隐含的故障前兆特征，建立具有强泛化能力的风险预警知识图谱，这种自学习机制使评估模型具备持续进化能力。跨领域数据资产的有机整合开创了评估维度延伸的新路径，电力市场交易数据与社交媒体舆情信息的交叉挖掘揭示出需求侧响应潜力

与公共安全风险的潜在关联，区块链赋能的分布式数据共享架构在保障隐私安全前提下激活了沉睡在垂直行业中的价值信息，为构建数字孪生系统提供多粒度信息支撑^[1]。

3 动态评估模型的设计框架

3.1 多源数据采集与融合机制

数据采集架构需建立覆盖发输变配用全环节的感知网络，整合调度自动化系统的 SCADA 量测数据、广域相量测量装置的动态同步信息、配电物联网的终端负荷曲线以及气象卫星的地面观测资料，形成时空分辨率互补的数据资源池。针对不同采集终端存在的时标偏差问题，设计基于北斗授时信号的多源时钟校准模块，消除量测数据在分钟级到毫秒级不同时间尺度上的异步误差。面对海量异构数据格式不兼容的挑战，开发具备语义解析功能的智能网关设备，将设备状态监测报告中的半结构化文本、巡检无人机的影像资料、用户智能电表的 JSON 格式报文统一转换为可计算的时间序列数据集。数据融合层采用数字孪生技术构建电网物理信息模型，将线路温度监测数据与气象台站的温湿度观测值进行空间插值匹配，通过场域耦合分析实时修正设备载流能力评估参数。在负荷预测模块中，融合商业区人流热力图、工业园区生产计划、居民区智能家居启停日志等社会化数据，建立负荷特性与人类活动模式的关联映射规则。数据安全传输采用分层加密策略，对变电站振动监测等低时延数据实施轻量化加密，对涉及用户隐私的用电行为数据实行联邦学习下的分布式计算，在保障数据可用性的前提下满足不同业务场景的保密要求。

3.2 实时性与预测性算法设计

动态评估模型在实时性与预测性算法设计层面采用分层递进的计算架构，基于高速数据流处理引擎构建毫秒级响应通道，利用滑动窗口机制对 SCADA 系统上传的拓扑状态量测值进行滚动校核，通过自适应滤波消除传感器噪声对潮流计算精度的影响。预测性算法融合时间序列分解与时空卷

积运算,将历史负荷曲线与气象卫星云图进行像素级特征匹配,采用注意力机制动态调整不同区域用电模式的权重系数,使短期预测误差控制在可接受区间。模型参数更新模块设计双通道校验机制,在线学习环节引入迁移学习框架复用相似场景下的训练成果,离线训练阶段采用对抗生成网络扩充设备老化样本数据,这种双重迭代策略有效缓解数据稀疏性导致的模型漂移问题。为平衡计算精度与资源消耗,在边缘侧部署轻量化推理引擎,将复杂的暂态稳定评估任务拆解为多个子问题分布式求解,借助内存计算技术减少跨节点数据交换频次^[2]。

3.3 模型动态更新与自适应机制

动态评估模型的核心参数采用滑动窗口机制进行滚动修正,根据 SCADA 系统上传的实时负荷波动曲线和设备健康度监测数据,自动调整潮流计算中的阻抗修正系数与变压器老化速率参数。评估算法内置残差反馈模块,对比分析预测负荷分布与实际量测值的偏差分布特征,触发线路过载概率模型的在线校核程序,使得风险评估结果能够跟随电网运行状态的渐变过程持续优化。当系统检测到新能源场站并网或重要输电断面拓扑变更时,增量学习引擎立即启动局部模型重构,在保留历史运行规律认知的基础上,快速融合光伏功率预测误差的时空分布特性与储能系统的充放电策略约束条件,避免传统全局模型更新带来的计算资源浪费。针对气象灾害预警事件,模型激活预设的极端场景快速响应通道,调用历史台风路径数据库与杆塔应力监测信息构建动态安全域边界,为调度人员提供适应天气演变节奏的防御策略调整建议。

4 动态评估模型的优化与改进

4.1 数据质量与数据安全的保障措施

对数据采集系统应建立多源异构数据校验机制,针对 PMU 装置与智能电表产生的时序量测数据设计动态补偿算法,当检测到电压相角跳变或功率因数异常波动时自动触发多设备交叉验证流程,利用相邻节点电气量变化的时空相关性修正异常数据点。数据处理平台部署基于特征工程的智能清洗模块,将传统阈值过滤与机器学习预测残差分析相结合,构建覆盖数据完整性、一致性、准确性的三层校验体系,对于缺失的负荷曲线数据采用时空克里金插值法进行修复,同时保留原始数据指纹供质量追溯使用。安全防护体系采用区块链与联邦学习融合架构,在数据存储环节通过默克尔树

结构实现台账信息的不可篡改存证,数据传输过程应用动态密钥分片技术防止中间人攻击,模型训练阶段利用同态加密保护用户用电行为隐私,权限管理模块设计基于设备指纹与操作行为的双因子认证机制,有效隔离未授权访问对核心评估模块的干扰。

4.2 模型的实时性与适应性优化

实时性提升依赖于计算引擎架构的深度重构,将原有串行处理模式改造为基于电力物理网架分区的分布式并行框架,使负荷预测模块能够同时处理配电台区智能电表上传的秒级数据与输电网 PMU 装置的毫秒级同步量测信息。模型参数的自适应优化采用双重触发机制,常规工况下依据调度员交接班周期执行小步长微调,当检测到新能源出力波动超过预设阈值时立即激活紧急修正模式,动态调整电压稳定判据中的安全裕度系数。针对跨区域电网协同评估需求,开发基于区块链技术的模型版本管理平台,记录不同省级调度中心对联络线过载评估参数的调整轨迹,在保证区域自治权的前提下实现关键评估规则的可控共享。极端天气应对模块集成气象雷达回波外推算法,结合铁塔倾斜监测装置上传的微气象数据,动态修正风偏放电概率模型的输入参数,使得灾害预警时间窗能够跟随台风移动路径实时滑动更新^[2,3]。

5 结语

通过建立数据流与电网状态内在映射关系的动态评估模型,实现了对系统安全风险早期识别能力的有效提升。基于多源数据融合的评估框架能够突破传统方法的时空局限,在电网运行状态的全景感知与趋势推演呈现出显著优势。电力企业应加强建设的数据治理体系,重点在于对异构数据标准化处理与信息物理系统协同分析技术瓶颈的突破,并且重视验证评估模型在不同运行场景下泛化能力。未来研究可对数字孪生技术与动态评估模型深度融合的路径展开探索,结合边缘计算架构来实现对实时数据处理效率的优化,在源网荷储协同互动场景下对评估维度进行拓展,进而给构建具备主动防御能力的智能电网提供技术储备。

参考文献

- [1] 孔祥飞,张帆. 基于大数据技术的电力系统调度优化 [J]. 光源与照明, 2024, (12): 213-215.
- [2] 祁立. 基于大数据的电力系统运行自动化控制系统 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 144-146.
- [3] 王善渊. 基于数据挖掘技术的典型电力设备风险评估方法研究 [D]. 东北大学, 2021.