

特高压输电通道电磁环境评估 技术精度提升路径研究

廖逸驹

(国网四川省电力公司特高压直流分公司, 四川 宜宾 644000)

摘要 随着特高压 (UHV) 输电技术的不断发展, 输电通道电磁环境评估的精准度成了保障电网安全运行以及环境保护的重要一环。本文着眼于特高压输电通道电磁环境评估技术现状, 全面剖析影响评估精准度的核心要素, 把电磁场强度计算公式与电磁辐射功率密度公式关联起来, 提出多维度精度提高途径, 通过提高传感器精度的量级、优化建模的整体方法、强化数据处理的核心能力, 实现电磁环境评估既高精度又高可靠, 以期为特高压输电线路的设计和环境监管提供有益参考。

关键词 特高压输电; 电磁环境评估; 电磁场强度; 功率密度

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.004

0 引言

特高压输电作为实现电力系统长距离、大容量输送目标的关键技术途径, 社会对其电磁环境问题的关切度日益提升。由于电磁辐射会对周围环境及人体健康造成影响, 因此精准估算输电线路四周电磁场分布及强度大小成为电网规划与环保监管不可缺少的技术手段。但电磁环境评估面临传感器测量误差、模型不完整状况、数据处理能力短板等诸多挑战, 基于此, 推进特高压输电通道电磁环境评估技术精度的提升探究具有关键的理论意义及工程价值。

1 特高压输电通道电磁环境评估技术现状

鉴于电压档次高、输送的容量大, 特高压输电线缆产生的电磁场强度同样相对较高, 电磁环境评估多数采用现场测量与数值模拟相结合的形式开展, 现场测量采用布置电场强度及磁场强度的传感元件, 采集实际环境的初始数据; 数值模拟借助输电线路的几何轮廓与运行参量要素, 采用电磁场计算模型预估辐射区域及强度大小。

传统的电场强度计算采用点电荷模型近似, 利用公式:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (1)$$

式(1)中, E 是电场强度, ϵ_0 是真空介电常数, Q 是电荷量, r 是测量点距电荷的距离。

2 影响特高压输电电磁环境评估精度的关键因素

2.1 传感器精度与布设方案

电磁环境评估对测量数据的精准度要求极高, 尤其是在特高压 (UHV) 输电线路近旁, 场强变化迅猛, 对传感器性能赋予更严格的要求, 目前针对输电线路附近电场测量的电容式场强感应仪器, 其测量范围多在 $0 \sim 50 \text{ kV/m}$ 之间, 其分辨率约为 10 V/m , 在理想实验环境下, 测量误差能限制到 $\pm 1.5 \text{ kV/m}$ 这个范围内, 处于特高压输电的作业现场, 如 $\pm 1 \sim 100 \text{ kV}$ 直流线路旁边位置, 导线下方垂直电场的最高峰值可达 $25 \sim 30 \text{ kV/m}$, 超出了部分商用传感器线性响应的合理范围, 易引发饱和现象与非线性的响应。

以某 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流输电工程为例, 现场安排了 9 个传感器采集点, 按与线路垂直的方向布置, 每排 3 个点, 依次设置于导线正下方、往侧面 10 m 和 20 m 处, 获取电场相关数据, 靠近导线中心线的传感器所显示的数据, 波动频率高达 $\pm 2.8 \text{ kV/m}$, 而外侧传感器波动仅 $\pm 0.5 \text{ kV/m}$ 。评估精度的关键影响因素中也包含布设密度^[1]。详情如表 1 所示。

2.2 建模方法的准确性

数值模拟为特高压输电线路电磁环境评估关键方法, 依托于对输电线路几何架构及电气参量的准确构建模型, 电磁场计算大量采用有限元法, 可较精准地对电场和磁场的空间分布进行模拟, 然而在进行实际

表1 传感器精度与布设方案

传感器型号	测量范围 (kV/m)	分辨率 (V/m)	响应时间 (ms)	误差范围 (kV/m)
A型电容式传感器	0~50	10	5	±1.5
B型磁通门传感器	0~40	20	8	±2.0
C型数字式传感器	0~60	5	2	±1.2
D型无线传感器	0~45	15	3	±1.8
E型工业级传感器	0~70	10	1	±1.0

应用中，模型往往会忽略输电导线的振动属性，以及周围如风速和温度这类气象条件的变动，还有复杂地形造成的效果，这些因素将引发电磁场分布的动态转变与局部偏差现象。

针对模型参数的简化与假定，如舍弃导线间的耦合效应或假定是理想的均匀介质，皆会使得模拟结果与实际测量出现偏离，当导线振动时，会引起测量点电磁场强度周期性的波动。

2.3 数据处理与分析能力

特高压输电电磁环境评估阶段出现大量测量数据，如何对这些数据开展有效处理与分析，是提升评估精确水平的关键。传统的数据处理办法依赖人工筛选和简单统计分析来开展，不易迅速识别出异常点和剔除掉噪声信号，造成评估结果出现较大偏差，不同传感器在不同时间段采集的数据存在异构情况和时空不统一现象，缺少有效的数据融合技术，阻碍了结果整体一致性的实现^[2]。

2.4 环境因素影响

气象状况与地形特点对特高压输电通道电磁环境影响突出，且呈现出动态的变化特质，湿度、温度、风速等相关气象因素可改变空气的电导率以及介电常数，继而对电磁场的传播属性造成影响。就湿度这一现象举例，在高湿度状态的环境下，空气中水分子数目增长，造成电导率上扬，电场传播距离及强度会出现衰减现象。风速以及风向会引发输电线路导线的振荡，继而造成电磁场时变相关的波动，地形高低起伏、

植被错落分布以及建筑物的遮挡，也会对电磁波传播路径产生反射、折射和衍射效应，引发局部场强呈现异常分布。

3 特高压输电通道电磁环境评估技术精度提升路径

3.1 提高传感器性能与布设优化

高质量数据采集是电磁环境评估工作的根基，若要提升精度，首先要提升传感器性能，传统电场传感器多凭借电容式结构，磁场测量采用磁通门原理实现，这些技术在碰到特高压输电线路复杂电磁环境时，会因外界干扰导致精度下降。新一代数字传感器已逐渐代替了模拟型设备，具备更卓越的灵敏表现、更低的噪声状况、更迅速的响应时间，即使在电磁干扰严重的区域，也可稳定输出有效数据。但提高硬件性能仅是基础要素，尤为重要的科学合理的安置方案，空间中电磁场分布体现出显著的不均匀情形，尤其是导线正下方以及近距离的区域，电场和磁场强度的变动最为猛烈，应把传感器布设工作围绕这些关键区域开展，采用多节点冗余布局方案，防止局部异常干扰整体评估结论^[3]。详情如表2所示。

3.2 引入先进建模方法

评估工作核心为电磁场建模，关乎模拟预测空间精度及物理真实性的实现。多数传统建模方法依托二维近似或理想条件假定，不能有效展现特高压输电线路下繁杂的场分布特点，为实现评估的高精度，需引入高分辨率三维有限元模型，对导线结构、绝缘子串

表2 提高传感器性能与布设优化

传感器类型	响应时间 (ms)	分辨率 (V/m)	最大测量值 (kV/m)	抗干扰能力等级
数字式一体型	1	5	60	高
模拟电容式	5	10	45	中
光纤感应式	2	8	70	高
无线分布式	3	15	50	中
高灵敏差分型	1.2	4	55	高

位置、地面电导率、建筑物反射影响等参数描述做进一步细化。尤其在高电压条件下，导线的抖动、电晕的放电现象、线路上附着的物体等微小的扰动，均会引发电场局部异常，在粗糙建模过程中，这些细节大多被忽略，造成实际测量值与模拟值间的偏差不断增大，借助全三维模型，不仅能还原电场和磁场的实际耦合态势，还能对不同工作电流及负载条件下趋势的变化做出预测。为解决模型计算负荷重、参数更新频繁等难题，可采用人工智能优化算法，如遗传算法、粒子群算法或梯度下降优化手段，实施模型参数的迭代式训练活动，自动探索最佳答案。在气象、地形持续变化的情况下，模型可凭借输入数据实时对模拟结果做调整，让模拟结果进一步贴近现场实际情形，保证仿真结果跟实际更接近，需采用现场测量的数据对模型开展多轮的校验与改动，创立模型可信度相关数据库^[4]。

3.3 智能数据处理技术的应用

特高压输电工程覆盖范围广阔，数据源众多，采集的电磁场数据数量快速增长，复杂度更是呈爆发式跃升，鉴于这一情形，采用人工处理和传统统计方法，高效、精准的数据分析任务已超出其能力范围，采用智能数据处理技术为提升评估效率精度的关键所在。在原始数据汰选阶段，要运用机器学习算法实现对异常数据的自动识别，如采用孤立森林、支持向量机(SVM)等分类模型，可把由传感器漂移、短时干扰、电晕放电突发等因素引发的非正常信号从海量数据里去除，可有效避免异常值对整体场强趋势分析的错误引导。

就数据融合与校正而言，多源数据往往存在时间未同步、空间覆盖不统一等问题，采用时序探究及加权聚合策略，可统一重构多传感器的各类数据，提高结果一致性水平，通过构建多点数据的动态加权函数，对高频波动做平滑处理相关工作，排除局部异常对整体数据质量造成的干扰。数据处理平台也需进行升级，依托边缘计算与云平台架构构建的评估系统，能实现现场数据初步剖析与核心区域迅速回应，平台应配备图形样式界面、异常现象告警机制、历史趋势可视化呈现等功能，便于运维人员实时把控电磁环境状态。

3.4 考虑环境动态影响的多场耦合评估

在真实工程场景中，多种外部环境因素对特高压输电线路的电磁场强度产生动态干扰，如湿度的高低、风速的快慢、有无降雨、地表导电性的变动等，单一物理场建模难以达到动态精度评估的要求，鉴于此需

引入多物理场耦合建模方法，实现电磁场与气象、水文、地形等场景的协作仿真。

该方法首先将电磁场仿真模型与气象模型（如 WRF 天气模型）进行数据对接工作，采集实时湿度、风速等参数并输入电磁模型，再运用耦合边界条件对导线间空气电导率和介电常数进行实时修正，实现动态电场的有效调节，若湿度由 50% 上涨到 90%，空气的电导率也会从 1×10^{-14} S/m 增加到 3×10^{-14} S/m，电场强度降低约 $1.5 \sim 2$ kV/m。

系统需要将地形高程数据进行整合操作，识别出低洼地带或突起对电场传播路径的干扰，搭建三维环境场分布简图，最终形成一个支持动态输入、实现快速响应且精准预测的电磁环境仿真平台。多场耦合仿真的核心计算可表示为：

$$\vec{E}_{total}(t) = \vec{E}_0(t) + \Delta \vec{E}_{env}(t) \quad (2)$$

式(2)中， $\vec{E}_0(t)$ 为基础电场模型计算值， $\Delta \vec{E}_{env}(t)$ 为因环境因素变化引起的修正电场量（如因湿度或风速变化引起的时变电场分量）。该表达式为构建动态场强预测模型提供了理论基础^[5]。

4 结束语

本文系统分析了影响特高压输电通道电磁环境评估精度的主要因素，包括传感器性能、建模准确性、数据处理能力及环境动态影响。通过结合电场强度和功率密度公式，提出了传感器升级、多维建模、智能数据处理及多场耦合技术路径，旨在提升评估的精度和可靠性。未来，随着技术进步和数据积累，特高压输电电磁环境评估将更加科学和精准，为电网安全与环境保护提供坚实的技术保障。

参考文献：

- [1] 李彦锋,杨岩,杨廷斌,等.大理典型密集输电通道雷击特性分析[J].电瓷避雷器,2024(04):46-54.
- [2] 张建新,唐卓尧,徐光虎,等.南方电网电磁环网解合环运行方式研究[J].南方电网技术,2020,14(03):49-53,61.
- [3] 时伯年,孙刚,瞿艳霞.柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J].电力科学与技术学报,2019,34(04):137-142.
- [4] 蔡晖,万振东,孙文涛,等.高受电比例受端电网的输电网网架结构优化技术研究[J].电网与清洁能源,2018,34(12):6-13,26.
- [5] 杨引虎,李鹏程,申滔.陕北—关中第二条 750kV 输电通道建成后陕北电磁环网解环问题研究[J].电网与清洁能源,2018,34(03):33-37.