

基于故障电弧检测的智能配电系统电气安全评价研究

靳学明

河南安平安全技术服务有限公司 河南郑州

【摘要】随着智能电网的快速发展，配电系统的安全性成为电气工程领域的重要关注点。故障电弧因其隐蔽性与破坏性，常导致线路过热、设备损坏甚至火灾，对电力系统的稳定运行构成严重威胁。本研究围绕故障电弧检测技术展开，建立智能配电系统电气安全评价模型。通过分析电弧特征信号与系统运行状态的耦合关系，提出基于智能算法的综合评价方法，实现对潜在风险的动态监测与预警。研究结果显示，该方法能有效提升配电系统的安全等级，为智能电网的可靠运行提供理论依据与技术支撑。

【关键词】故障电弧；智能配电系统；电气安全；检测技术；风险评价

【收稿日期】2025年11月5日 **【出刊日期】**2025年12月6日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250227

Study on electrical safety evaluation of intelligent power distribution system based on fault arc detection

Xueming Jin

Henan Anping Safety Technology Service Co., Ltd. Zhengzhou, Henan

【Abstract】With the rapid development of smart grids, the safety of power distribution systems has become a critical concern in electrical engineering. Fault arcs, due to their hidden nature and destructive potential, often cause line overheating, equipment damage, and even fires, posing serious threats to the stable operation of power systems. This study focuses on fault arc detection technology and establishes an electrical safety evaluation model for smart distribution systems. By analyzing the coupling relationship between arc characteristic signals and system operating conditions, we propose a comprehensive evaluation method based on intelligent algorithms to achieve dynamic monitoring and early warning of potential risks. The research results demonstrate that this approach can effectively enhance the safety level of distribution systems, providing theoretical support and technical foundations for the reliable operation of smart grids.

【Keywords】Fault arc; Smart distribution system; Electrical safety; Detection technology; Risk assessment

引言

电气事故在能源利用过程中屡见不鲜，其中由故障电弧引发的安全隐患更具隐蔽性与危险性。弧光放电常伴随非正常能量释放，极易导致设备绝缘老化及火灾事故，给电力系统带来不可忽视的风险。随着智能配电系统的逐步应用，实时监测与快速响应成为保障电气安全的核心环节。故障电弧检测不仅是发现隐患的重要手段，更是实现安全评价与风险防控的关键基础。如何借助先进检测技术与智能算法实现精准识别与科学评价，正成为电气工程研究的前沿焦点。

1 智能配电系统中故障电弧的安全隐患分析

在智能配电系统的运行过程中，故障电弧常常表现为异常放电现象，其本质是由于线路绝缘损坏、接触不良或电气设备老化等因素导致电流在空气中击穿形成的持续高温电弧^[1]。弧光放电伴随强烈的能量释放和

电磁干扰，会使导体表面发生熔蚀和碳化，从而引发绝缘层进一步劣化。长时间未被识别的电弧现象往往潜藏极高风险，不仅会造成局部温升和电缆过热，还可能诱发连锁反应，破坏系统的稳定性和可靠性。因此，故障电弧被视为智能配电系统中最为隐蔽且危险的安全隐患之一，其潜在危害已成为电气安全研究的重要议题。

在配电网中，故障电弧的存在极易导致火灾事故和大面积停电。弧光产生的高温足以点燃周边可燃材料，同时伴随的电磁干扰会影响继电保护装置的正确动作，增加误动作和拒动作的概率。当弧光发生在变电站母线、开关柜等关键设备处，后果更为严重，不仅会造成设备损毁，还可能使整个区域的供电系统陷入瘫痪。从电力用户角度来看，弧光事故带来的供电中断会对工业生产、商业运行和居民生活造成巨大影响，尤

其在关键负荷场所，安全隐患的代价更为不可估量。由此可见，智能配电系统若无法有效监测和抑制故障电弧，其安全性能将大打折扣。

随着智能化程度的提高，配电系统逐渐具备了信息交互和状态感知能力，但在故障电弧的检测与识别方面依然面临挑战。传统的保护手段多依赖电流、电压等一次量的监测，而电弧信号具有间歇性和非线性特征，往往难以通过常规检测手段精准捕捉。这种特征不仅导致安全隐患难以及时暴露，还会增加误判率，从而削弱系统的风险防控能力^[2]。在智能配电环境下，如何通过多源信息融合、特征信号提取以及智能算法的应用来准确识别和定位故障电弧，已经成为保障电气安全的核心问题。通过深入分析这些隐患的复杂性和破坏性，可以为后续的检测技术研究和安全评价方法奠定坚实基础。

2 故障电弧特征信号识别与检测技术研究

故障电弧的特征信号识别是智能配电系统电气安全评价中的关键环节。电弧放电在形成过程中会产生非工频的谐波成分、尖峰电流以及高频噪声，这些异常信号与正常运行状态下的电能质量参数存在显著差异。通过对电弧特征信号的建模与分析，可以提取出幅值波动、谐波畸变率以及暂态脉冲等特征指标。由于故障电弧具有间歇性、非线性和不稳定性，其信号表现往往掺杂随机性与突发性，需要依赖频域分析、时频联合分析等先进方法进行处理^[3]。借助小波变换、快速傅里叶变换和经验模态分解等工具，不仅能够揭示电弧信号的多尺度特征，还能为后续的智能识别与分类提供坚实数据基础。

在检测技术方面，传感器和监测装置的配置对电弧特征捕捉至关重要。高灵敏度电流互感器、光纤传感器以及超声波检测装置被广泛应用于配电网中，以便实时获取电弧产生的多源信号。同时，信号处理系统需要具备较强的抗干扰能力和高速运算性能，才能确保电弧信号在复杂电磁环境下不被掩盖。在一些关键场所，还引入了基于电磁辐射检测和红外成像的辅助手段，用于提高电弧检测的准确性与可靠性。通过多种传感技术的融合，可以形成较为完整的信号特征集合，为智能配电系统的安全监测提供数据支持。

随着人工智能和大数据技术的快速发展，基于智能算法的故障电弧识别方法逐渐成为研究热点。利用支持向量机、深度神经网络以及随机森林等模型，可以在特征参数的基础上实现对电弧信号的分类与识别。这些算法能够有效降低误判率，并实现对不同类型电

弧的精细化区分^[4]。通过引入机器学习的特征选择和模式识别机制，系统能够在大规模运行数据中自动发现潜在隐患，提高实时检测和在线监测的效率。在智能配电系统中，构建融合多源信息与智能算法的电弧检测框架，不仅能够实现对隐患的快速响应，还能为电气安全评价提供科学依据。

3 基于智能算法的电气安全综合评价方法构建

电气安全综合评价方法的构建需要充分结合智能算法的优势，以应对故障电弧信号复杂性和配电系统运行环境多变性的挑战。传统的安全评价往往依赖于静态指标和经验规则，难以全面反映系统在动态工况下的风险状态。通过引入智能算法，可以将多维度运行数据进行特征提取与融合，实现对电弧信号、电能质量参数及设备健康状态的综合建模^[5]。基于此模型，能够建立量化风险指标体系，对潜在的安全隐患进行实时评估。该方法不仅提高了评价结果的客观性和精确性，还能有效减少因人为判断带来的不确定性，从而增强配电系统的安全防护能力。

在具体实现过程中，机器学习与深度学习技术发挥了重要作用。通过支持向量机、卷积神经网络和循环神经网络等算法，可以对采集到的电弧特征信号进行训练与识别，提取出与系统运行安全密切相关的关键因子。模型训练过程中结合历史故障数据与实时运行数据，能够逐步优化分类与预测的准确度。模糊综合评价与灰色关联分析等方法也被应用于智能配电系统中，用于处理不确定性信息和模糊性特征。不同算法之间的优势互补，使得综合评价方法能够兼顾准确性、鲁棒性和可解释性，为电气安全风险的量化和分级提供科学支撑。

智能算法在电气安全评价中的应用不仅局限于数据分析与模型构建，还体现在决策辅助和风险预警机制的设计上。通过引入多目标优化算法和贝叶斯推断框架，可以对系统在不同运行条件下的安全水平进行动态调整，并形成实时预警信号。智能配电系统在获得安全评价结果后，可通过自动化控制策略对运行方式进行优化，从而降低故障电弧进一步扩大的可能性^[6]。该过程实现了从检测、评价到决策的闭环控制，使电气安全防护具备了自适应和进化能力。在这一体系中，智能算法不仅提升了评价方法的科学性，也使得智能配电系统能够在复杂环境中保持更高的安全等级。

4 电气安全评价结果对智能配电系统运行的意义

电气安全评价结果在智能配电系统中的价值不仅体现在风险识别上，更直接关系到系统运行的稳定性

与可靠性。通过对故障电弧检测数据与电气安全评价模型的综合分析，可以形成动态化的风险等级划分，使潜在隐患在早期阶段就被发现和干预。这类评价结果为运行人员提供了客观依据，避免因经验不足或判断失误而导致的延误^[7]。智能配电系统在掌握安全状态后，能够通过自动控制与策略调整来降低风险，使系统运行更加稳健。同时，评价结果还可作为运维决策的参考，为设备检修周期、备用电源配置以及负荷调整提供科学数据支持，从而实现资源的合理分配和运行效率的全面提升。

在实际应用中，电气安全评价结果不仅是对故障电弧等隐患的定性判断，更是对系统整体运行水平的量化体现。通过大数据与智能算法生成的评价结果，可以直观呈现出配电系统中存在的薄弱环节，包括设备老化程度、线路负荷不平衡以及电能质量波动情况。这种定量化结果为设备状态评估和风险管理提供了有效工具，有助于制定针对性的改进措施。对于关键区域或重要用户负荷，安全评价能够为应急预案的优化提供参考，确保在发生异常时系统能够迅速采取隔离与切换措施，最大限度地减少事故影响范围。电气安全评价因此不仅是静态分析工具，更是保障系统在复杂环境下安全运行的动态支撑手段。

电气安全评价结果对智能配电系统的运行意义还在于推动智能化水平的不断提升。通过实时采集与处理运行数据，评价模型能够不断优化算法参数和风险阈值，使系统具备自学习与自适应的能力。在这一过程中，智能配电系统逐渐形成从监测、诊断到决策的闭环机制，使电气安全不再依赖传统的被动防御，而是转向主动预测与动态防控^[8]。评价结果的应用不仅提升了系统的安全等级，也为电力行业数字化和智能化发展提供了重要支撑。随着配电网规模的扩大和用户需求的多样化，电气安全评价结果将成为维持电能质量、保障供电连续性和实现高效运维的核心依据，对智能配电系统的持续健康运行具有不可替代的意义。

5 结语

故障电弧检测在智能配电系统电气安全评价中的

重要性已经得到充分体现，其特征信号的准确识别与智能算法的有效应用为系统安全运行提供了坚实保障。研究所形成的综合评价方法不仅能够揭示潜在隐患，还能实现对运行状态的动态监控和风险分级，推动配电系统由传统被动防护向主动预测转变。电气安全评价结果在实际运行中发挥了决策参考与优化调控的双重作用，使配电系统具备更强的稳定性与自适应能力。这一研究思路为智能电网安全建设提供了理论基础和技术支撑，也为电力系统的高效与可靠运行奠定了重要条件。

参考文献

- [1] 崔诗淼,王金龙,刘乙雁. 电动汽车回路串联故障电弧特征提取与检测[J/OL].电力电子技术,1-11[2025-09-13].
- [2] 王博文,崔梦宇,尹庆隆,等. 一种面向无人化发射支持领域的远程智能供配电系统[J].航天工程大学学报,2025,2(04):34-39.
- [3] 史宇辉. 智能配电网中分布式能源接入对输配电系统的影响分析[J].信息与电脑,2025,37(16):130-132.
- [4] 李强. 电气工程及其自动化在智能输配电系统中的应用与优化[J].电气开关,2025,63(04):86-90.
- [5] 应科. 面向电气线路火灾安全防控的智能配电系统设计与研究[J].现代职业安全,2025,(08):95-97.
- [6] 陈泽浩,谈淑恒. 利用快速接地开关的开关柜故障电弧保护方法[J].高压电器,2025,61(07):27-33+43.
- [7] 汪亚龙,李华亮,熊超琳,等. 低压配电网故障电弧引燃导线绝缘材料研究综述[J].广东电力,2025,38(05):85-96.
- [8] 吴荣俊,郑昕. 基于阻抗匹配的单线自补偿式电弧故障检测方法[J].电机与控制学报,2025,29(05):108-122.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS