

# 光伏发电系统继电保护装置的整定计算与调试方法研究

杨洲

贵州黔源电力股份有限公司，贵州贵阳，550000；

**摘要：**新型电力系统的高比例可再生能源、高比例电力电子装备这两大特征越来越明显。光伏发电系统带有电力电子接口，这让系统故障时的电流出现幅值低、没有明显暂态分量的特点。这种特点让传统继电保护技术很难适配光伏发电系统的运行需求。文章结合虚拟同步机控制技术、广域同步感知技术等新技术，仔细分析光伏发电系统故障特点对继电保护装置整定计算的影响。文章搭建起基于多特征融合的继电保护装置整定计算体系，同时建立包含数字孪生仿真、边缘层协同校验的全流程调试方法，为提高继电保护装置在光伏发电系统里的适应性和可靠性提供技术支持。

**关键词：**光伏发电系统；继电保护；整定计算；调试方法；虚拟同步机

**DOI：**10.64216/3080-1508.26.02.050

## 引言

在能源转型的背景下，光伏发电系统在电力系统中的装机占比不断提高。光伏发电系统依靠逆变器完成能量转换，这种方式彻底改变了传统电力系统的故障响应机制。系统出现故障时，短路电流会受到电力电子器件的限流控制，电流幅值被限制住，暂态特性也变弱了。这种故障特点让原本根据传统电源故障特点设计的继电保护装置，用到光伏发电系统上时，经常出现灵敏度不够或者误动作的情况。继电保护装置是保障光伏发电系统安全稳定运行的重要防线，它的整定计算是否科学、调试过程是否完善，直接影响系统故障处理的速度和准确性。适应光伏发电系统的技术特点，更新继电保护装置的整定计算思路，优化调试流程，是解决传统保护技术应用难题、保障光伏发电系统安全稳定运行的关键。

## 1 基于新型技术特征的整定计算体系

### 1.1 故障特征适配与等效建模

结合光伏发电系统逆变器的控制策略和虚拟同步机技术的特点，分析故障状态下电流电压的多时间尺度特征。在暂态阶段，提取故障电流电压里的高频行波信号，利用故障点反射波和初始行波的时间差，帮助确定故障位置。在稳态阶段，结合电流电压的序分量特征和电流变化率指标，区分故障类型和正常运行时的波动。搭建“虚拟阻抗等效模型”，把光伏电源故障时的输出特性转化成带内阻的电压源形式。

### 1.2 主保护多判据整定逻辑

#### 1.2.1 行波-电流融合速断整定

打破传统继电保护装置只靠电流幅值整定的模式，

把行波特征参数和等效短路电流参数结合起来。根据光伏发电系统故障前的负荷电流和逆变器的限流系数，动态计算故障时的等效短路电流。以这个计算结果为依据，合理设定继电保护装置的电流动作门槛。同时加入行波到达时间差的判断条件，缩短故障识别的时间。行波特征判断和电流幅值判断相互配合，既能避免因故障电流偏低导致保护装置不动作，又能加快保护装置的动作速度，保证保护区内出现故障时，保护装置能快速切断故障。

#### 1.2.2 数字化差动保护整定

符合 IEC 61850-9-2LE 规范里的采样同步技术要求，依据合并单元采集的高精度数据，优化多端电流矢量和的判断条件。考虑到逆变器并联运行时产生的启动暂态电流对保护装置的影响，新增电流变化率制动门槛这个参数。当电流矢量和的变化率低于设定的门槛值时，自动关闭差动保护出口，防止保护装置误动作。系统内部出现故障时，通过 10kHz 高采样率的数据提取电流信号里的基频分量，保证多端电流矢量和的判断条件能可靠触发，提高继电保护装置的抗干扰能力。

#### 1.3 后备保护自适应整定原则

遵循逐级配合和动态适配的原则，搭建基于运行方式识别的后备保护整定机制。用随机森林模型分析光伏发电系统的实时运行数据，判断系统当前的惯量水平和馈电强度类型。通过粒子群算法实时优化过电流保护的动作电流和动作时间，让保护装置的参数和系统当前的运行状态匹配。校验最小运行方式下的灵敏系数时，结合虚拟同步机的调节特性，通过多方面的参数校验和特性分析，保证继电保护装置在各种运行工况下，都能满

足选择性和灵敏性的要求。

## 2 融合数字技术的全流程调试方法

### 2.1 数字孪生仿真预调试

搭建包含光伏阵列、逆变器、输电线路的虚拟模型，这个模型要和实际光伏发电系统的结构、运行情况保持一致。用这个虚拟模型，模拟系统在不同故障类型、不同故障位置、不同运行方式下的反应。通过仿真平台输入多种故障场景的参数，测试保护装置的动作逻辑和整定参数是否匹配。通过仿真测试，提前找出整定参数之间的冲突和保护逻辑里的问题。收集仿真时产生的数据，生成故障录波文件，验证保护装置的录波功能和数据记录是否完整，为后续实际调试提供参考。

### 2.2 硬件-软件协同校验

硬件检测主要关注高精度采样回路和通信模块的性能。用专业设备模拟出不同大小、不同相位的电压电流信号，把信号输入采样回路，检查合并单元的采样精度，同时确认输入输出回路连接是否正确、可靠。搭建5G+TSN网络环境，测试保护装置和监控系统之间的数据传输速度和稳定性，保证远距离数据交互能及时完成。软件校验重点检查保护装置里的整定参数和多个判断条件的配合逻辑。模拟低幅值故障、高阻接地故障等复杂情况，验证行波判断和电流判断的配合效果，保证保护装置在复杂情况下动作准确。

### 2.3 边缘层联动验证试验

利用边缘计算节点搭建分布式联动测试系统，这个系统能模拟保护装置和逆变器、断路器等设备的配合工作流程。进行故障模拟时，重点测试保护装置发出跳闸指令后，断路器的分闸速度，同时记录逆变器闭锁动作的时间顺序，确保各设备动作协调一致。测试故障排除后系统恢复运行的过程，检查保护装置对电压电流波动的抵抗能力，防止保护装置因为系统恢复时的参数变化而误动作，保证系统能平稳恢复正常。

## 3 整定与调试的优化保障措施

### 3.1 技术标准与流程规范

参考新型电力系统继电保护的相关技术要求，结合光伏发电系统的运行特点，制定专门的整定计算规则和调试操作说明。在技术文件中明确数字孪生仿真需要覆盖的场景，列出必须包含的故障类型和运行工况；明确硬件检测的精度要求，确定各项性能指标的合格标准；明确联动试验的工况组合，规定不同测试阶段的内容和判断标准。通过制定这些规范，形成“建模-整定-仿真-

校验-联动”的标准工作流程，保证继电保护装置整定计算和调试各环节操作规范、可重复。

### 3.2 数据驱动的动态优化

建立整定参数和调试数据的闭环管理模式，这个模式要能完成数据收集、存储、分析和使用的全部工作。把调试过程中记录的故障响应数据、保护装置动作时间、灵敏系数等关键指标存入数据库，同时整合光伏发电系统长期运行积累的故障统计信息。依靠数据库中的大量数据，持续优化等效建模的关键参数，调整保护判据的阈值。

## 4 智联协同与预见防护：下一代整定-调试技术演进与实践路径

### 4.1 技术演进核心方向：从“被动适配”到“主动预见”

#### 4.1.1 人工智能与广域感知融合的整定计算革新

依托深度学习算法构建故障特征智能识别模型，该模型需具备深度挖掘海量历史故障数据与实时运行数据的能力。通过对数据的深度挖掘与分析，实现对光伏出力波动、复杂故障耦合等不确定性因素的精准预判。这一技术路径能够有效突破传统整定方法对固定工况的依赖局限，提升整定计算的灵活性与适配性。融合广域同步测量技术（WAMS）的核心功能，实时获取电力系统多节点的电气量数据。以实时电气量数据为基础，动态修正等效建模的关键参数，使整定计算模式从传统的“离线静态”模式升级为“在线动态自适应”模式，以此适应光伏发电系统运行工况的动态变化特性。

#### 4.1.2 边缘-云端协同的分布式调试架构构建

依托物联网边缘计算技术的技术优势，在光伏电站本地部署边缘计算节点。通过边缘计算节点的本地化部署，实现对故障数据的实时采集、快速处理与保护装置的即时响应。这一技术手段能够显著降低云端数据传输的时延，同时减少数据传输过程中的带宽消耗。构建“边缘层实时校验-云层全局优化”的协同调试架构，该架构需明确划分边缘层与云层的核心功能。边缘节点负责承担本地设备联动验证的核心任务，云端平台则依托大数据分析技术开展全系统调试效果评估与策略迭代工作。

#### 4.1.3 数字孪生全生命周期调试体系延伸

突破数字孪生技术仅用于预调试的应用局限，构建覆盖“设计-安装-运行-检修”全生命周期的数字孪生调试平台。该平台需搭建物理设备与数字模型之间的实时数据互通通道，通过实时数据交互实现调试场景的动态

更新与故障演化的精准模拟。依托数字孪生调试平台的技术支撑，支持保护装置在全生命周期内的状态监测、参数优化与故障预演工作。通过全生命周期的动态管控，达成“预见式防护”的核心目标，提升光伏发电系统继电保护的前瞻性与可靠性。

## 4.2 关键技术突破与创新实践

### 4.2.1 基于强化学习的自适应整定算法开发

设计融合光伏系统故障特性的强化学习智能体，该智能体需以继电保护的“动作准确性、选择性、速动性”为核心奖励函数。通过强化学习智能体持续与运行环境进行交互迭代，自动优化整定参数阈值与动作逻辑。这一算法开发路径能够实现对间歇性出力、高比例渗透率等复杂场景的自适应匹配，有效解决传统算法泛化能力不足的技术难题。

### 4.2.2 虚实联动的沉浸式调试平台搭建

集成虚拟现实（VR）/增强现实（AR）技术与数字孪生模型的核心功能，构建沉浸式调试实训平台。该平台需具备模拟极端天气、多设备连锁故障等高危复杂场景的能力，支持参演人员以第一视角开展保护装置操作、故障排查与协同处置实训。在实训过程中，同步记录参演人员的操作数据与故障响应时间，以此实现调试过程的可视化、可追溯与可量化评估。

### 4.2.3 跨设备兼容的标准化调试接口研发

针对不同厂家保护装置、监测设备之间存在的协议差异问题，研发基于 IEC 61850 标准的统一调试接口。通过统一调试接口的技术研发，实现多类型设备之间的数据互通与指令协同。这一技术突破能够有效打破不同设备之间的“信息孤岛”，支持数字孪生仿真系统、边缘计算节点与物理保护装置的无缝对接，显著提升跨平台、跨场景调试的兼容性与效率。

## 4.3 未来应用展望与落地保障

### 4.3.1 多场景应用拓展方向

面向高比例光伏并网、微电网集群运行等新型应用场景，拓展整定-调试技术的应用边界。针对分布式光伏就地消纳、跨省跨区光伏功率输送等不同应用场景，定制差异化的整定计算模型与调试方案。通过差异化的技术方案设计，满足光伏发电系统多样化的运行需求，提升技术应用的针对性与实效性。

### 4.3.2 技术落地的保障体系构建

建立“算法验证-试点应用-标准制定-全面推广”的

阶梯式落地流程，该流程需明确各阶段的核心任务与实施目标。首先在典型光伏场站开展新技术试点应用，积累运行数据与实践经验。联合行业权威机构制定智能化整定-调试技术标准与操作规范，明确技术指标、安全要求与验收标准。加强跨领域人才培养工作，打造兼具电力系统专业知识与人工智能、数字孪生技术能力的复合型团队，为技术落地提供坚实的人才支撑。

### 4.3.3 安全防护体系同步建设

针对智能化技术应用过程中带来的数据安全与网络安全风险，构建“数据加密-访问控制-入侵检测”三位一体的安全防护体系。对整定参数、故障数据等敏感信息进行加密存储与传输，保障数据在全生命周期内的安全性。设置分级权限访问机制，严格管控不同人员对系统的操作权限。部署边缘节点入侵检测系统，实时监测系统运行状态，防范恶意攻击与数据泄露，保障整定-调试系统的安全稳定运行。

## 5 结语

光伏发电系统继电保护装置的整定计算与调试工作，需紧密适配系统自身所具备的技术特性与故障演化规律。在整定计算这一核心环节，需通过构建融合行波特征提取与虚拟阻抗等效建模的技术体系。该技术体系能够有效破解传统整定方法难以适配光伏系统低幅值故障电流的技术瓶颈。未来技术发展需进一步深化人工智能算法与广域同步感知技术的融合应用。依托海量运行数据持续迭代优化整定计算逻辑与调试流程标准。以此构建更为完善的技术保障体系。最终支撑高比例光伏发电系统的安全稳定运行。

## 参考文献

- [1] 刘秀丽. 智能变电站继电保护调试技术研究[J]. 光源与照明, 2025, (02): 198-200.
- [2] 马天骁. 智能变电站继电保护检测和调试技术研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(22): 90-92.
- [3] 徐敏姣, 樊佳辉, 张瀚文. 智能变电站继电保护的检测和调试技术分析[J]. 电子技术, 2024, 53(11): 270-271.
- [4] 孙波. 智能变电站中的继电保护检测和调试技术分析[J]. 电子技术, 2024, 53(11): 372-373.
- [5] 吕晨洁. 智能变电站继电保护检测和调试技术分析[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(11): 76-77+80.