

光伏 - 充电桩联合运行模式下配电网短路电流特性与保护配置研究

张佳军

国网宁夏电力有限公司银川供电公司 宁夏自治区银川市 750001

摘要：随着“双碳”目标的推进，光伏与电动汽车充电桩在配电网中的渗透率迅速提高，形成了“光伏 - 充电桩”联合运行系统。该系统改变了配电网传统的单向放射状潮流结构，其故障特性与传统配电网存在显著差异，对现有继电保护构成了严峻挑战。本文旨在深入研究 PV-EVCP 联合系统接入下的配电网短路电流特性，并提出相应的保护优化配置方案。提出了一种基于多源信息融合的保护配置优化方案，该方案结合了改进的自适应过电流保护、方向纵联保护以及基于通信的区域保护，以应对分布式电源接入带来的多电源、弱馈特性。仿真验证表明，所提保护方案能有效识别故障并快速隔离，提高了复杂配电网的供电可靠性。

关键词：配电网；光伏；充电桩；短路电流；继电保护；自适应保护

引言

随着能源危机和环境问题的日益严峻，我国提出“双碳”目标，并加快推动电动汽车普及和光伏能源使用。然而，大规模电动汽车充电设施的接入，给传统电网带来了诸多挑战，如负荷峰谷差增大、电能质量下降等。同时，分布式光伏发电不稳定，就地消纳率偏低。而光储充一体化技术通过整合光伏发电、储能装置与充电桩。光储能充电桩作为一种创新的能源解决方案，正逐步成为城市能源未来的主流选择。光储能充电桩通过高效的光伏板将太阳能转化为电能，并智能地储存在电池中，以供房屋的用电需求。该技术不仅有助于减少对传统能源的依赖，更能有效缓解电网压力，提升能源利用效率。基于此，文章旨在深入探究光储能充电桩的能源管理策略，探究其在达成能源清洁低碳利用这个目标的也对配电网的物理结构以及动态特性产生了深刻的改变，给电网的安全稳定运行给予了全新的挑战，其中短路故障特性与继电保护配置方面的问题表现得最为突出^[1]。

传统的配电网一般呈现为单电源放射状的结构，潮流是单向流动的，短路电流是由系统侧的同步发电机来提供的，其数值要远远大于负荷电流，并且相位特征十分明确，基于这样的特性，三段式电流保护以及反时限过电流保护得到了广泛的应用而且效果不错，然而当大量带有电力电子接口的光伏和充电桩接入之后，配电网转变成为了多电源、双向潮流的复杂网络结构。光伏电源是凭借逆变器并入电网的，其

故障输出特性完全受逆变器控制策略的支配，为了契合低电压穿越也就是 LVRT 的要求，光伏逆变器在电网出现故障的时候不能脱网，还需要向电网注入一定量的无功电流来支撑电压恢复，其输出的短路电流受到控制并且被限制在比较小的范围之内。而充电桩在故障期间主要呈现出恒功率负荷的特性，对短路电流的贡献基本可以忽略不计，但其接入改变了系统正常运行时的基波潮流，对保护定值的整定产生了影响^[2]。

鉴于以上情况，本文对光伏 - 充电桩联合系统接入下配电网的短路电流特性展开了系统性的研究，并依据此提出了一套经济实用的保护配置优化方案^[3]。本文主要建立了 PV - EVCP 联合系统的精细化故障分析模型，全面指出不同故障条件下短路电流的幅值、相位以及谐波性的变化规律，提出了一种融合本地自适应保护和区域通信保护^[4]。

1 光伏 - 充电桩联合系统故障特性分析

1.1 光伏逆变器故障等效模型与控制策略

光伏阵列通过 DC/AC 逆变器接入电网。故障期间，其等效电路可视为一个受控电流源。其输出电流主要取决于低电压穿越 (LVRT) 控制策略。

当电网出现故障致使电压跌落时，逆变器的控制策略呈现如下状况：电流限幅方面，为保证器件的安全性能，逆变器输出的总电流会被限定在最大值 I_{max} ，此值一般为额定电流的 1.5 倍，无功支撑方面，依据 LVRT 的相关要求，

会向电网注入与电压跌落深度成正比例关系的感性无功电流 $I_q = K(0.9 - U)$ ，其中 K 代表系数， U 表示并网点电压标幺值。有功电流削减方面，在总电流受到限制的情形下，有功电流 $I_d = \sqrt{(I_{max}^2 - I_q^2)}$ 会被迫降低，如此一来，光伏逆变器所提供的短路电流可表示为： $I_{\{pv-fault\}} = I_d + jI_q$ ，其有幅值受限、相位受控以及富含谐波等特点^[5]。

1.2 充电桩负荷故障等效模型

电动汽车充电桩主要被区分为交流慢充以及直流快充这两种类型，在电网出现故障的这段期间，其前端的 AC/DC 变流器会进入到保护模式当中，一般会呈现出以下表现：有恒功率负荷特性，也就是试图去维持直流侧电压以及功率处于恒定状态，从电网吸收的电流会随着电压的跌落而增大，不过在电压严重跌落的时候，会因为欠压保护而退出运行。拥有高阻抗特性，从故障点进行观察，充电桩等同于一个高阻抗，对短路电流的贡献要远远小于系统电源以及光伏电源，在短路计算里大多时候会被忽略或者等效为恒阻抗负荷^[6]。

1.3 联合系统对短路电流的综合影响

表 1 不同故障位置下各电源对短路电流的贡献对比

故障位置	系统侧电流	光伏侧电流	总短路电流	对保护的影响
靠近主网 (F1)	很大	受电压跌落严重，很小	略小于	速断保护可能灵敏
靠近光伏 (F2)	中等	受电压跌落较轻，较大	Is 与Ipv 相量和，相位可能突变	方向保护可能误判
线路末端 (F3)	较小	很小	可能小于最小动作电流	过电流保护可能拒动

2 仿真模型与短路特性分析

2.1 仿真模型搭建

于 PSCAD/EMTDC 里构建了如同图 2 所呈现的 10kV 配电网模型，其中主网短路容量是 100MVA，配电线路的长度为 10km，光伏电站的容量为 2MW，充电桩集群的总功率是 1MW，光伏逆变器运用了图 1 所示的 LVRT 控制策略。

2.2 仿真结果与分析

案例 1：线路中点发生三相短路故障

从图 2 可明显看到故障发生之后电压出现了跌落情况，系统侧的电流快速增大，其相位相较于电压滞后了大约 80° ，光伏侧的电流被限制在 1.3p.u.，不过其相位因为注入了无功电流发生了改变，总电流的相位处于光伏侧电流与系统侧电流之间，

这一案例充分说明，光伏的接入使得短路电流的相位产生了变化，要是上游安装有方向元件，那么有可能会因为

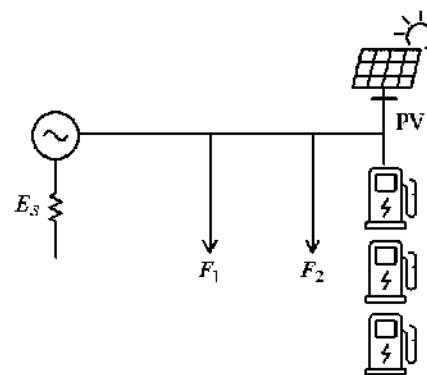


图 1：光伏 – 充电桩接入的配电网等效故障电路图

假设系统侧给出的短路电流是某个特定数值，光伏提供的短路电流记为 I_{pv} ，那么故障点的总短路电流 I_f 就是： $I_f = I_s + I_{\{pv\}}$ ，由于 I_{pv} 的幅值有一定限度且相位出现偏移，导致：在幅值上出现变化： $|I_f| < |I_{pv}| + |I_s|$ ，甚至可能低于传统保护定值。在相位上出现变化： I_f 的相位由 I_{pv} 和 I_s 的相量和确定，可能与纯系统供电时的相位有较大差别，影响方向元件的判断。

相位不契合动作条件而出现拒动的情况。

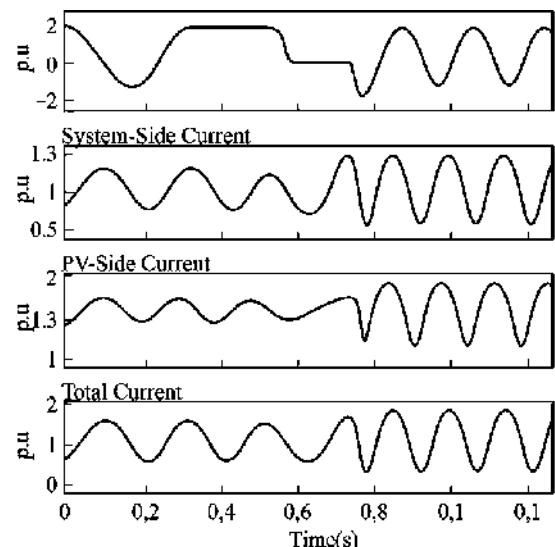


图 2：案例 1 的故障波形 (故障点电压、系统侧电流、光伏侧电流、总电流)

案例 2: 线路末端发生两相短路故障

图表所展示的内容为线路首端保护安装处的 A 相、B 相以及 C 三相电流情况, 从中可清晰地看到, 故障相的电流出现了升高的现象, 然而其稳态值仅仅是 1.5kA, 与之相对的是, 传统意义上依据负荷电流来进行整定的速断保护定值有可能达到 2.0kA, 如此一来便致使保护装置无法启动。



图 3: 案例 2 的保护安装处测量电流与保护定值对比

分析: 此案例验证了由于光伏短路电流贡献有限, 在远距离故障时, 总短路电流水平可能低于保护定值, 导致过电流保护拒动。

案例 3: 不同光照强度下的短路电流

表 2: 光照强度对光伏短路电流幅值的影响

光照强度 (W/m^2)	光伏故障前出力 (MW)	光伏短路电流 (p.u.)	总短路电流 (kA)
1000 (满发)	2.0	1.5	3.2
500 (半发)	1.0	1.5	2.9
0 (夜晚)	0.0	0.0	2.5

分析: 光伏短路电流幅值主要受电流限值控制, 与故障前出力关系不大, 但其存在与否直接影响总电流大小, 增加了系统运行方式的不确定性, 使保护整定复杂化。

3 保护配置优化方案

针对上述挑战, 本文提出分层分区的保护配置优化方案。设计一个配电网区域其中包含着变电站、多条不同的馈线、光伏以及充电桩, 同时标明三种保护, 第一种是在本地安装的自适应过电流保护, 第二种是在关键节点安装的方向纵联保护, 比如在联络开关处安装的此类保护, 第三种是基于集中控制器的区域保护系统, 它会借助通信网络来收集各个智能终端即 IED 的信息。

3.1 改进的自适应过电流保护

传统的过电流保护定值是固定不变的, 难以适应多种运行方式的要求, 改进后的方案可让其定值依据运行状态进行

自适应调整, 整定原则方面, 保护定值需要大于最大负荷电流, 同时要小于最小短路电流, 自适应逻辑部分, 其中可靠系数取值范围在 1.2 至 1.3 之间, 该系数会凭借本地测量或者能量管理系统进行实时更新, 并且会考虑光伏出力以及充电桩负荷的变化情况。其优点在于, 解决了因正常潮流变化而引发的误动问题以及因短路电流减小所导致的拒动问题。

3.2 方向纵联保护

在分布式电源接入点的附近位置以及联络开关等地方配置方向纵联保护。

原理: 借助通信通道来比较线路两端的功率方向或者故障电流方向, 要是两端都判定故障处于正方向, 那么就会进行跳闸操作,

作用: 可有效地识别出故障区域, 解决双端电源供电情形下的选择性难题, 避免出现误动情况。

3.3 基于多源信息融合的区域保护

作为后备保护, 构建起一个基于通信的区域保护系统,

结构: 由一个区域保护控制器以及多个分布式的智能终端共同组成,

流程: 故障发生的时候, 各个 IED 会把测量信息上传给区域控制器, 控制器依据全网络信息开展综合故障诊断, 准确判断出故障的位置和类型。控制器向对应的断路器发出跳闸指令, 抗干扰能力比较强, 定位较为准确, 是解决复杂配电网保护问题的终极方案之一。

4 结论

本文依靠理论建模与仿真分析, 对光伏 - 充电桩联合运行模式下配电网的短路电流特性展开系统研究, 并且提出了相应的保护配置优化方案。光伏逆变器的控制策略致使其提供的短路电流有幅值受限、相位偏移的特性, 而充电桩对短路电流的贡献比较微弱, 这使得配电网故障后的总短路电流水平有可能降低, 相位关系变得复杂, 造成传统过电流保护和方向元件性能变差, 单一的固定定值保护已经很难契合要求。要采用基于本地自适应、区域通信协作的综合保护体系, 的自适应过电流保护、方向纵联保护和区域保护相结合的分层分区方案, 可有效应对分布式电源接入带来的挑战, 保证故障可被快速、选择性地切除, 未来工作会侧重于所提保护算法的硬件在环测试, 并且研究基于人工智能的故障诊断方法在区域保护中的应用, 提升保护系统的智能化水平和可靠性。

参考文献:

- [1] 蒋冲, 范必双, 徐向前, 等. 计及传热效应的配电网弧光接地故障模型及混合消弧方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53 (15): 1-12.
- [2] 林万里, 杨耿杰, 郭谋发. 配电网弧光高阻接地故障仿真与实测波形差异性分析 [J]. 电气技术, 2025, 26 (06): 38-44.
- [3] 李晓昊. 金融高水平开放下跨境资本流动对我国系统性金融风险的影响研究 [D]. 四川大学, 2024.
- [4] 张华, 苏学能, 任杰, 等. 基于时频域瞬时特征的配电网弧光接地故障检测 [J]. 四川电力技术, 2024, 47 (05): 53-60.
- [5] 李佳鑫. 基于双端行波测距的配电网线路单相弧光接地故障检测 [J]. 光源与照明, 2024, (08): 75-77.
- [6] 李晓新. 我国系统性金融风险传导与政策影响研究 [D]. 吉林大学, 2024.