

光伏集群并网工况下输变电路继电保护适应性分析

蒋超 周亚菲 杨坤

(四川能源建设集团有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.003

摘要: 高比例光伏集群规模化并网后, 逆变器电力电子调控特性改变了传统电网故障电气规律, 使依托同步机组整定的继电保护难以适配新型工况, 现场易出现灵敏度衰减、测距失准等问题。本文以高压光伏集群送出线路为研究对象, 结合光伏多机响应差异、长线电容谐波扰动等工程特征, 基于短路比构建多维度工况评价体系, 系统剖析各类保护的失效机理与适配边界。机理分析表明, 低短路比、低出力与不对称故障的耦合工况是保护性能劣化的核心诱因, 本文构建的分层优化策略可为新能源线路保护整定与运维提供理论支撑。

关键词: 光伏集群; 输变电路; 继电保护适应性; 电流差动保护引言

Adaptability Analysis of Relay Protection of Transmission Lines Under Grid-Connected Conditions of Photovoltaic Clusters

Chao Jiang, Yafei Zhou, Kun Yang

Sichuan Energy Construction Group Co., Ltd.

Abstract: Large-scale grid integration of high-proportion photovoltaic clusters changes the fault electrical characteristics of traditional power grids due to the power electronic regulation characteristics of inverters. Relay protection settings originally designed for synchronous units are no longer adaptable to new operating conditions, resulting in reduced protection sensitivity and inaccurate fault location in practical engineering. Taking the outgoing transmission lines of high-voltage photovoltaic clusters as the research object, this paper establishes a multi-dimensional operating condition evaluation system based on the short-circuit ratio, fully considering multi-machine response differences of photovoltaic units and long-line capacitive harmonic disturbances. The failure mechanism and adaptive boundary of various relay protection modes are systematically analyzed. Mechanism analysis shows that the coupling conditions of low short-circuit ratio, low photovoltaic output and asymmetric faults are the core causes of protection performance degradation. The hierarchical optimization strategy proposed in this study can provide theoretical support for relay protection setting, operation and maintenance of new energy transmission lines.

Keywords: photovoltaic cluster; transmission line; relay protection adaptability; current differential protection

前言

随着新型电力系统稳步建设, 集中式光伏集群已广泛接入高压输电网, 新能源并网架构与故障特性的革新, 对传统电网继电保护的适配能力提出了全新挑战。高压光伏集群采用多级汇集、长线升压的并网模式, 依托电力电子器件实现故障调控, 无同步机组的稳定故障电气特性, 易造成电网故障波形紊乱、电气量波动, 进而引发保护动作异常, 影响新能源送出通道安全稳定运行。目前学界相关研究多聚焦低压分布式光伏场景, 针对高压光伏集群多机耦合、长线输电工况的针对性分析偏少, 且多为定性研究, 难以精准界定保护失效边界, 无法有效解释工程极端工况的保护缺陷。为此, 本文依托短路比开展多维度工况分析, 系统探究光伏并网下各类保护的适配缺陷, 构建分层优化策略, 可为高比例新能源电网保护优化提供参考。

一、光伏集群并网系统故障特征与工况评价体系

(一) 光伏集群并网拓扑与差异化故障响应特征

高压光伏集群采用多层级并网拓扑, 经由光伏阵列、逆变器、箱变、汇集线路及升压站逐级衔接送电, 多座子集群并联接入同一条高压送出线路, 形成典型多电源并网架构, 与配网单点光伏接入模式存在明显区别。电网发生故障时, 故障电压随电气距离呈现梯度跌落, 致使集群内各逆变器采集的故障参数存在差异。各设备独立触发故障穿越策略, 输出故障电流的幅值与相位难以同步, 差异化电流在升压站汇集叠加后, 会引发电流相量偏移与波形紊乱。该集群特有响应特征彻底改变了送出线路的故障电气形态, 显著干扰继电保护运算与判别精度, 是光伏并网线路保护动作异常频发的重要诱因。

(二) 电力电子逆变器主导的故障电气量特性

光伏并网故障特性由逆变器控制策略主导,与传统同步机组故障特性差异显著。受电力电子器件耐受能力限制,光伏故障电流仅维持在额定电流 1.2 ~ 2.0 倍,短路支撑能力远弱于同步机组。同时逆变器可依据电网工况动态调节有功、无功输出,故障电流相位具备可控性,不再服从电网阻抗约束规律。系统发生不对称故障时,逆变器启动负序抑制与快速调压功能,会产生大量谐波与间谐波,造成故障波形严重畸变,干扰保护基于工频分量的故障判别逻辑。此外,高压长线分布电容对高频谐波较为敏感,谐波激励下的电容电流会显著放大,掩盖微弱故障特征,进一步提升继电保护的故障识别难度^[1]。

(三) 多维度继电保护工况量化评价体系

为量化不同场景下继电保护的适配性能,贴合光伏电站实际运行规律,本文构建包含电网强度、光伏出力水平、故障类型的三维工况评价体系。依托电力系统通用短路比指标划分电网支撑能力,将短路比大于 5、3 ~ 5、小于 3 的电网分别界定为强、中、弱支撑系统。结合光照波动特性,将光伏工况划分为晴天额定出力与阴天、晨昏低出力两类模式;根据现场故障形态,将故障统一划分为三相对称短路与单相、两相不对称故障。多维度工况组合可覆盖光伏集群绝大多数运行场景,能够为后续保护失效机理分析、适配边界判定提供标准化研究基础。

二、传统输变电继电保护原理及固有适配条件

(一) 主保护核心原理与适配前提

高压输变电线路主保护体系由电流差动保护与距离保护组成,主要负责线路区内故障快速切除,保障输电设备稳定运行。电流差动保护基于基尔霍夫电流定律,通过比对线路两端电流幅值与相位差异定位故障,其可靠动作依赖规整工频电气量、两端电流参数对称、系统不平衡电流可控的运行条件。距离保护通过计算电压、电流比值获取故障阻抗,依托故障阻抗与故障距离的线性关系判定故障点位,精准测距的核心前提是故障电气量受电网阻抗约束、无明显波形畸变。两类保护均依托同步机组稳定的故障电气特征设计,难以适配光伏集群电气量紊乱、波形畸变的并网工况。

(二) 后备保护及重合闸适配基础

零序电流保护作为接地故障核心后备保护,依托故障激发的零序电气分量实现故障识别,可靠判别高度依赖线路双侧零序电源协同供电,通过两端电气参数比对完成故障判定。传统重合闸适配同步电网工况设计,依靠固定时序区分故障类型,同步机组故障后电弧熄灭快、电网恢复性好的特性是其稳定运行的基础^[2]。而光伏机组具备低电压穿越不脱网特性,故障持续馈电会改变电弧熄灭规律,导致传统重合闸时序逻辑与适配条件无法适配光伏并网故障场景。

三、光伏集群并网下继电保护失效机理与适应性缺陷

(一) 电流差动保护多维度失效机理

结合光伏集群并网工程的长期运行反馈,电流差动保

护的现场异常主要集中在灵敏度不足、不平衡电流超标两类问题上。光伏电源的弱馈入特性会大幅限制故障电流出幅值,弱电网工况下的故障有效分量极低,导致差动保护难以精准捕捉故障信号,即便金属性短路故障场景也无法满足 1.5 的行业最低灵敏度标准,故障回路接入过渡电阻后保护拒动风险会进一步提升。与此同时,集群多机组差异化的故障响应特性会造成各支路故障电流相位紊乱,电流叠加过程中有效故障分量相互抵消,持续削弱保护检测灵敏度。高压长线电容电流的谐波放大效应会进一步加剧系统不平衡电流,缩小电网正常运行与轻微故障状态的电气量差值,导致故障特征信号被紊乱电气量淹没,频繁触发差动保护制动机制,最终引发无故障误动、轻微故障拒动等现场缺陷。

(二) 距离保护测量失准与动作异常机理

距离保护对故障电气量的稳定性要求较高,在光伏并网场景中极易出现测距失准问题,是工程现场保护异常的高发类型。弱电网工况下光伏侧短路容量严重不足,故障过程中电压大幅跌落、故障电流幅值受限,彻底打破故障电压与电流之间的线性阻抗对应关系,使得保护测算的测量阻抗普遍偏大,大幅压缩线路有效保护范围,短路比低于 3 的极端工况下阻抗测量误差可突破 30%,直接造成距离保护 I 段基本失效。不对称故障发生时,逆变器负序抑制调控会彻底打乱传统故障电流相位规律,引发保护方向元件判别失效,进而出现误动或拒动问题^[3]。叠加光伏出力随光照实时波动、多机组故障响应动态变化的特性,保护测量阻抗持续漂移偏移,传统静态整定参数无法适配动态工况,最终造成线路各级保护配合逻辑紊乱,故障动作行为难以预判。

(三) 零序保护与重合闸结构性适配短板

光伏升压站普遍采用的 Y/Δ 接线结构具备阻隔零序分量传输的特性,使得高压输电线路的零序电流仅能依靠主网侧单端供给,彻底颠覆传统双侧零序电流比对的故障判别逻辑,造成零序保护基础判别机制失效。弱电网工况下主网侧零序电流输出幅值偏低,难以触发保护启动门槛,大幅提升接地故障后备保护拒动的概率。同时光伏机组的低电压穿越特性使其故障全程保持不脱网持续馈电的状态,无法快速熄灭故障电弧且极易出现电弧重燃现象,导致重合闸大概率重合于永久性故障点位,给电网带来二次冲击,显著增加设备损坏与逆变器大规模脱网的运行风险。除此之外,重合闸合闸瞬间存在光伏侧与主网侧电源相位偏差,相位失步引发的大幅冲击电流,会直接威胁高压线路及配套电力设备的运行安全。

(四) 多工况耦合分析与最严峻工况识别

多维度工况对比分析结果表明,电网短路比是决定继电保护运行可靠性的核心主导因素,光伏出力水平与故障类型起到关键辅助调控作用。短路比大于 5 的强支撑电网具备充足的系统电源支撑,能够有效弱化光伏并网带来的电气扰动,仅需小幅优化保护定值即可保障设备稳定运行。

短路比处于3至5区间的中等支撑电网会出现小幅的保护灵敏度与测距精度衰减,可通过增设辅助判别逻辑改善设备运行性能。而短路比低于3的弱电网会出现保护性能的整体性大幅劣化,其中弱电网、低光伏出力与不对称接地故障的耦合工况为现场最恶劣运行场景,多重负面条件会形成叠加效应。弱光照工况进一步压缩故障电流幅值,不对称故障诱发逆变器剧烈的相位调控,弱电网无法提供有效的电压电流支撑,多重扰动叠加后会让传统继电保护体系基本丧失故障判别与切除能力,成为现场保护可靠性最差、故障隐患最高的工况组合。

四、光伏集群并网继电保护分层适配提升策略

(一) 传统保护工程整定与逻辑优化

中、高短路比电网的运行工况稳定性较强,无需更换现有保护设备,仅通过参数整定与逻辑优化即可适配光伏并网运行场景,具备落地成本低、工程实用性强的优势。针对电流差动保护的灵敏度不足、抗干扰性差等问题,可引入谐波动态补偿算法抵消长线电容电流的谐波扰动,结合光伏最大、最小出力的动态变化区间匹配最优启动门槛与制动系数,兼顾保护灵敏度与运行稳定性^[4]。针对距离保护测距失准、方向误判的缺陷,可适度缩减Ⅰ段保护整定范围以规避弱馈工况的测距偏差,同时增设电压跌落辅助判据修正相位判别误差。针对零序保护与重合闸的适配短板,可结合光伏侧无零序输出的结构特性重新整定保护启动门槛,适配单端零序馈入工况,并优化重合闸动作延时、匹配光伏低电压穿越恢复时长,规避电弧重燃风险,有效降低重合闸引发的电网故障概率。

(二) 新型无工频依赖保护原理适配应用

极端弱电网工况下的传统工频保护存在原理性短板,单纯依靠参数与逻辑优化无法彻底解决保护失效问题,需要引入新型无工频依赖的保护原理提升故障防护能力。暂态量保护依托故障初期微秒级高频暂态信号完成故障判别,响应速度显著快于逆变器的控制响应速度,可在电力电子调控动作生效前完成精准故障定位,不受工频波形畸变、相位偏移等扰动因素的影响,高度适配弱电网恶劣故障场景。波形相似度纵联保护则摒弃传统工频相量运算模式,通过比对线路两端电流波形的时序形态差异区分区内、区外故障,具备优异的抗谐波、抗相位扰动能力,能够适配光伏集群故障电气量杂乱、波形畸变的运行特征,有效弥补传统工频保护的原理缺陷。

(三) 源网协同的系统级优化策略

前述保护优化手段均为设备端的局部整改,想要从根源上改善保护运行工况,需要通过源网协同调控优化电网整体故障电气环境。电网发生故障扰动时,集群调控系统可统一调度所有逆变设备的有功、无功输出指令,实现多机组故障响应的同步统一,有效消除多机响应差异、稳定故障电流幅值与相位,减少电气量无序波动^[5]。故障切除后,系统可快速复位光伏机组运行参数,通过精准无功调控抑制电网过电压、消除双侧电源相位偏差,让机组恢复时序与重合闸动作时序精准匹配,从根源上规避合闸冲击风险。光伏控制策略与继电保护动作逻辑的深度协同,能够全方位优化电网故障电气特性,从系统层面提升继电保护对光伏集群并网场景的整体适配能力。

结语:

本文系统探究高压光伏集群并网线路的继电保护适配特性,阐明了多机响应差异、长线电容谐波扰动引发保护性能劣化的内在机制,梳理了不同工况下保护装置的性能演变规律。机理分析表明,短路比是影响保护可靠运行的核心因素,弱电网、低出力与不对称故障的耦合工况为高危运行场景。本文构建的分层优化体系可有效提升光伏并网场景下的保护稳定性,后续可通过自适应算法优化,进一步强化新能源电网保护的动态适配能力。

参考文献:

- [1] 沃建栋,潘武略,李跃辉,等.基于综合谐波驱动的光伏场站集电线路保护新方案[J].中国电力,2025,58(2):133-139.
- [2] 于溯,周泽昕,王兴国.基于电流复平面的新能源送出线路差动保护适应性分析[J].浙江电力,2025,44(8):66-77.
- [3] 陈水耀,徐峰,潘武略,等.适应高比例光伏接入的有源配电网自适应电流差动保护[J].浙江电力,2025,44(1):34-43.
- [4] 季亮,张林楠,姜恩宇,等.提升距离保护适应性的新能源主动故障控制研究[J].太阳能学报,2022,43(7):22-29.
- [5] 叶远波,王吉文,汪胜和,等.基于故障暂态低频分量积聚值的新能源送出线路保护方案研究[J].电网与清洁能源,2023,39(10):113-121+128.

作者简介: 蒋超(1988年12月-)、男、汉族、四川南充、大学本科、研究方向:输变电、光伏。