

地铁光伏并网继电保护适配不足引发的安全风险治理研究

李渊 霍俊芳

内蒙古工业大学 内蒙古呼和浩特市 010010

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21597

[摘要] 在“双碳”目标推动下，城市轨道交通领域光伏并网应用规模持续扩大，地铁车辆段、停车场及车站屋面已成为分布式光伏的重要应用场景。本文从地铁光伏并网系统的典型架构出发，梳理保护定值偏差、动作时序失配、孤岛保护适配性差三类核心问题，分析故障特性差异、多源并网复杂化、特殊负荷工况三大深层成因，并从自适应定值整定、时序协同逻辑优化、孤岛保护方案重构、分级风险防控体系构建四个方面提出治理策略，助力城市轨道交通绿色低碳转型。

[关键词] 地铁；光伏并网；继电保护；适配性；安全风险治理

引言

随着我国提出实现碳达峰和碳中和的策略，地铁作为耗电大户，光伏发电是地铁持续发展的必然选择。光伏电源接入地铁配电系统后，原本的单电源辐射型网络转变为多源供电网络，潮流方向由单向变为双向，故障电流的幅值、持续时间、频率特性均发生显著改变。本文围绕地铁光伏并网继电保护适配不足问题，从技术特性、风险表现、成因机制、治理策略四个层面展开系统分析，旨在构建适配地铁场景的继电保护风险治理体系，保障光伏并网后的供电安全与运营可靠性。

1 地铁光伏并网系统的典型架构

地铁段场占地面积大，规模大，建筑群集中，用电负荷稳定，适宜装设光伏发电系统。地铁分布式光伏电站主要建设于车辆段、停车场的屋面及高架车站顶棚，普遍采用组件、汇流箱、逆变器、升压变与并网开关的架构，多数通过 0.4kV 低压母线或 35kV 中压母线接入地铁配电系统，运行模式以自发自用、余电上网为主。光伏系统与地铁原有主变电所、牵引变电所、动力照明配电所共同构成多源供电网络，供电范围覆盖牵引整流机组、风机水泵、照明系统、自动扶梯等各类负荷。光伏发电主接线系统图如图 1 所示。

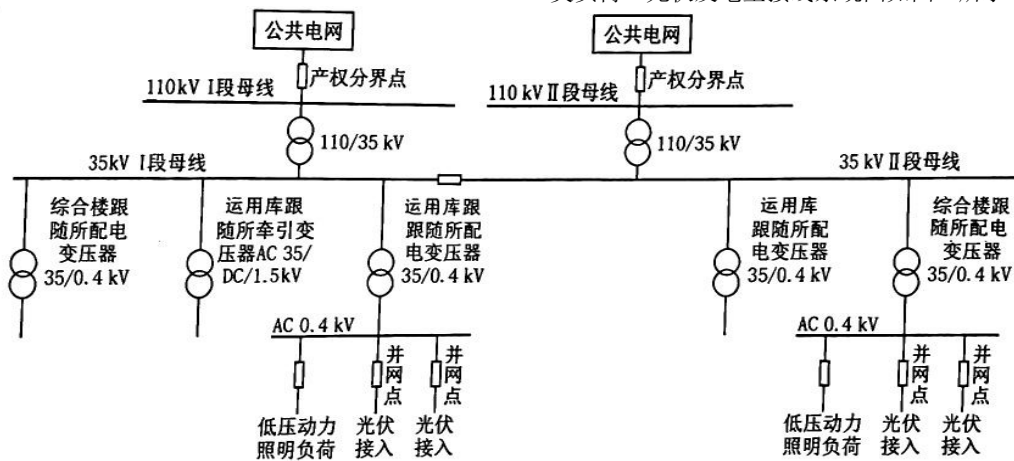


图 1 光伏发电接入系统示意图

2 地铁光伏并网继电保护适配不足的主要问题及安全风险

2.1 保护定值与故障特性适配偏差

传统地铁配电系统为单电源辐射网络，故障电流由主网单一供给，短路电流幅值稳定、工频特性明显，过流保护、速断保护的定值基于常规故障场景整定。光伏并网后，故障电流由主网与光伏逆变器共同提供，而逆变器受电力电子器件控制策略限制，短路电流通常仅为额定电流的 1.2~1.5 倍，

且持续时间短、谐波含量高，与同步发电机的故障特性存在本质差异。在此条件下，传统保护定值出现双向偏差。一方面，当配电系统外部发生故障时，光伏电源提供的助增电流会使线路电流增大，可能导致上级保护误动作。另一方面，当光伏侧内部发生故障时，逆变器限流作用导致故障电流幅值偏低，传统过流保护灵敏度不足，出现拒动风险。部分地铁试点工程中，曾出现光伏侧轻微接地故障时保护无法识别，

最终发展为相间短路的案例。

2.2 保护动作时序与并网逻辑协同失效

地铁原有配电保护采用阶梯式时限配合原则,按照电源侧、配电所、馈线与负荷的层级逐级增加动作时限,保证故障时下级保护优先动作,实现选择性跳闸。光伏并网后,多电源接入使配电网络出现双向潮流,原有单向时序配合关系被打破。当并网开关处的保护与上级配电所出线保护、下级负荷馈线保护之间的时限差失效,故障电流方向改变时,原本的上下级关系发生反转,容易出现越级跳闸现象。

2.3 孤岛保护与地铁负荷特性适配性差

目前主流的被动式孤岛保护基于电压偏差、频率偏差判据,适用于负荷特性平稳的普通工商业场景。而地铁配电系统包含大量牵引整流机组、变频风机、电梯等冲击性与非线性负荷,正常运行时电压幅值、频率本身存在周期性波动,谐波畸变率也高于普通配电网。在此工况下,孤岛保护容易出现两类适配问题:一是负荷大幅波动时,电压频率短时偏离正常范围,导致孤岛保护误判,不必要地断开光伏并网开关,影响光伏消纳效率。二是当电网侧真正停电时,地铁大容量电机的反馈电压会延缓电压频率的衰减速度,导致孤岛保护动作延迟,延长非计划孤岛持续时间,增加安全风险。

2.4 适配不足引发的安全风险传导路径

继电保护适配不足并非单一故障,而会因为装置异常产生局部故障,进而导致系统扰动,进一步产生运营影响,风险逐步放大。其中,保护拒动会导致故障扩大,造成设备烧毁、母线失电;保护误动会引发非正常停电,导致生产作业中断;孤岛保护失效则可能造成人身触电与设备冲击。严重情况下,配电系统故障会波及牵引供电系统,导致列车区间停运、乘客滞留,引发运营安全事件。

3 继电保护适配不足的深层成因分析

3.1 故障电流特性差异导致保护原理失效

传统继电保护的设计基础是同步发电机的暂态故障特性,短路电流幅值可达额定电流的数倍,且包含明显的周期分量与非周期分量,保护装置通过工频电气量即可准确识别故障。而光伏电源属于电力电子型电源,其输出电流完全由逆变器控制策略决定,故障时为保护器件不受损坏,逆变器会快速触发限流机制,将输出电流限制在1.5倍额定电流以内,且故障电流中含有大量高次谐波分量。这种特性差异直接导致传统保护原理失效:基于工频幅值的电流速断保护因故障电流不足而灵敏度不够;基于相位变化的方向保护因谐波干扰而判别精度下降。本质上,传统继电保护的原理假设与光伏并网后的实际故障特性不匹配,是适配性不足的技术根源。

3.2 多源并网场景下保护配合关系复杂化

地铁配电系统原本为典型的单电源放射状网络,电源点唯一、潮流方向固定,保护配合关系清晰,只需按照线路长度与负荷容量设定阶梯时限即可满足选择性要求。分布式光伏接入后,网络中出现多个电源点,潮流方向随光伏发电出力与负荷大小动态变化,故障电流的分布与方向不再固定。同时,部分地铁存在多点并网的情况,同一配电所下接入多组光伏电源,进一步加剧了网络结构的复杂性。原有固定定值、固定方向的保护方案无法覆盖所有运行方式,若按最大并网容量整定,低出力工况下易误动;若按最低出力整定,高出力工况下易拒动,整定边界难以兼顾。

3.3 地铁特殊负荷工况加剧保护整定难度

地铁负荷具有显著的时段性与冲击性特征:早晚高峰时段牵引负荷大幅波动,短时间内电流变化可达数倍;夜间列车停运后,牵引负荷归零,仅保留少量照明与安保负荷;同时大量变频设备、整流设备产生谐波与无功冲击,导致电能质量扰动频繁。继电保护定值需要在“不误动”与“不拒动”之间寻找平衡,而地铁宽范围的负荷波动压缩了整定裕度。尤其对于低压侧并网的光伏系统,动力负荷启动电流与故障电流的区分度降低,进一步加大了保护整定难度。此外,地铁供电系统对供电可靠性要求极高,保护方案既不能轻易跳闸影响运营,也不能在故障时失效扩大事故,对适配性提出了比普通配电网更严苛的要求。

4 地铁光伏并网继电保护安全风险治理策略

4.1 基于故障特性修正的保护定值自适应整定

针对光伏故障电流的限流与谐波特性,对传统保护定值进行自适应修正,从原理层面提升适配性。通过故障分量识别算法提取故障暂态过程中的暂态分量与变化率,替代单一的工频幅值判据,提高故障识别灵敏度。针对逆变器限流特性,适当降低过流保护动作阈值,同时增加谐波畸变率辅助判据,区分正常负荷电流与故障电流。同时,全线配置方向过流保护,根据实时潮流方向自动投退对应方向的保护元件,解决双向潮流下的保护选择性问题。在并网开关处设置功率方向判别单元,反向故障时闭锁正向保护,正向故障时快速动作。此外,建立多运行方式定值库,覆盖满发、半发、停运等不同光伏出力工况,以及高峰、平峰、夜间等不同负荷水平,保护装置根据实时运行数据自动切换对应整定值,实现全工况适配。

4.2 多时序协同的保护动作逻辑优化

重构上下级保护的时序配合体系,构建主网侧、并网开关与逆变器侧三级协同保护逻辑,解决时序失配问题。通过优化并网开关保护的时限整定,将其作为配电所与逆变器之间的中间保护层级,向上与配电所出线保护配合,向下与逆变器保护配合,形成新的阶梯时限差。通过动态时限调整技

术,根据并网容量与潮流方向实时修正动作时限,保证不同运行方式下的选择性。当配电所出线侧检测到故障时,向各并网开关发送闭锁信号,防止光伏侧保护误动;当光伏侧内部故障时,并网开关优先动作,不向上级传递跳闸信号,避免越级跳闸。同时配置故障录波与保护信息管理系统,实时记录各级保护的動作时序,定期开展配合校验,及时发现并修正时序偏差。

4.3 适配地铁负荷的孤岛保护方案重构

采用多判据融合与主动检测、分级管控的方案,提升孤岛保护与地铁负荷的适配性。通过构建多参量融合的被动检测判据,将电压偏差、频率偏差与电压谐波畸变率、有功功率变化率相结合,建立综合判别模型。通过多参量加权计算,

降低单一参量波动导致的误判概率,适应地铁冲击性负荷场景。在此基础上,配置主动式孤岛检测装置,在并网点注入小幅扰动信号,通过检测系统阻抗变化识别孤岛状态。主动检测不受负荷特性影响,可有效弥补被动检测的不足,缩短孤岛检测时间。对于电网计划性停电检修场景,提前通过通信链路闭锁孤岛保护,允许光伏系统向地铁重要负荷供电,提升应急供电能力;对于故障型孤岛,则快速断开并网开关,保障检修安全。

4.4 构建分层分级的风险防控与管理体系

从技术与管理双重维度,构建“装置级—站级—系统级”三级风险防控体系,实现全流程适配管控(如图2)。

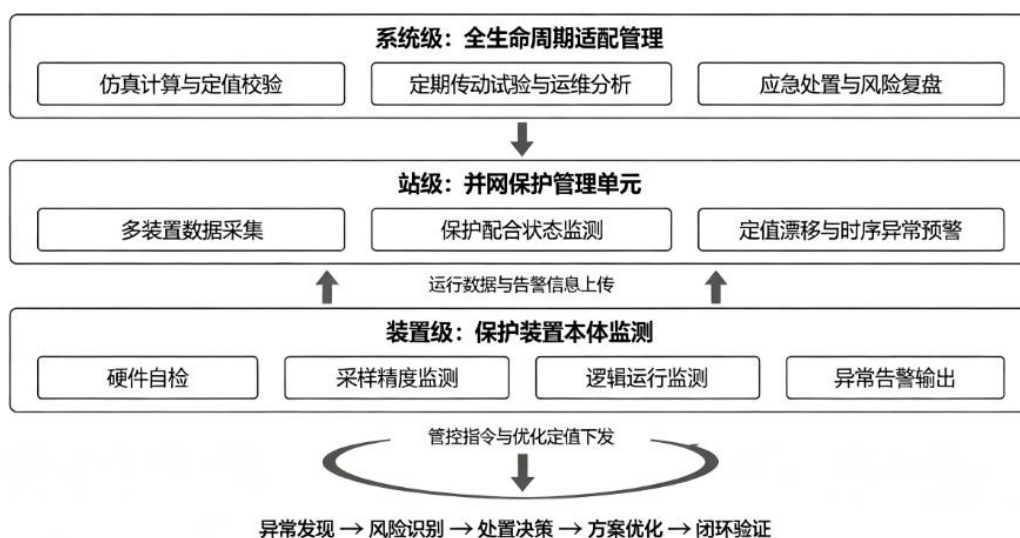


图2 地铁光伏并网继电保护适配治理图

在装置级中,要求保护装置具备完善的自检功能与异常告警机制,实时监测硬件状态、采样精度与逻辑运行状态,出现异常时及时告警,避免保护装置带病运行。在站级层面,在并网配电所配置光伏并网保护管理单元,统一采集各级保护的运行数据与动作信息,实时监测保护配合状态,识别定值漂移、时序异常等潜在风险,提前预警处置。通过系统级建立继电保护适配性全生命周期管理制度。并网前开展专项仿真计算与定值校验,确保保护方案与系统特性匹配,并网后定期开展保护校验与传动试验,结合运营数据动态优化定值。同时制定应急处置预案,明确保护误动、拒动及孤岛事件的处置流程,降低风险影响。

5 结束语

地铁光伏并网是城市轨道交通绿色转型的重要方向,而继电保护适配不足是制约其规模化应用的关键安全瓶颈。本文研究表明,故障电流特性差异、多源并网结构变化与地铁特殊负荷工况,是导致保护定值偏差、时序失配、孤岛保护失效的核心原因。通过自适应定值整定、协同逻辑优化、孤

岛方案重构与分级体系构建,能够系统性提升继电保护的场景适配能力,有效防控各类安全风险。

[参考文献]

- [1] 王小虎,斯那都吉,何贤彪,等. 地铁出入口分布式光伏发电系统的关键技术研究[J]. 建筑电气, 2026, 45(5) 26-30.
- [2] 蒲玥旻,马金雨,汤泽军,等. 分布式光伏在地铁出入口的应用方案研究[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2026, 26(1) 33-38.
- [3] 彭锦辉. 碳中和背景下地铁段场光伏发电设计研究[J]. 价值工程, 2025, 44(20) 130-132.
- [4] 闵杰. 地铁车辆段分布式光伏发电并网功率控制方法研究[J]. 江苏科技信息, 2024, 41(1) 128-131.
- [5] 胡剑强,单辉,康崇皓,等. 光伏并网下城市轨道交通供电系统动态运行仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5) 243-250.

作者简介:李渊,1986年10月,男,蒙古族,硕士,内蒙古乌兰察布市,高级工程师,工程管理,轨道交通工程。