

光伏电站继电保护配置方案优化研究

赵忠立*, 贾 焜

(内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 文章对光伏电站主要电气设备的保护现状进行了分析, 发现其存在选择性差、动作延时长不足, 提出了主变压器增配低压侧分支零序方向过流保护; 集电线路主保护配置低电压闭锁延时的短延时方向电流速断保护、短延时零序电流速断保护; 接地变增配零序方向过流保护的优化方案。分析及计算表明, 该方案可提高系统的可靠性与选择性, 有利于光伏电站经济运行。

关键词: 光伏电站; 分支零序; 方向保护; 集电线路; 低电压; 闭锁延时

中图分类号: TM77

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2605F052

CSTR: 32400.14.ncdqh.2605F052

Optimization of Relay Protection Configuration for Photovoltaic Power

Zhao Zhongli*, Jia Kun

(Inner Mongolia Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Inner Mongolia Hohhot 010020, China)

Abstract: This paper analyzes the existing protection configuration of major electrical equipment in photovoltaic power stations and identifies poor selectivity and long operating delays. It proposes an optimized scheme that adds zero-sequence directional overcurrent protection to the low-voltage-side branches of the main transformer. For collector lines, the scheme uses short-delay directional instantaneous overcurrent protection with undervoltage blocking and short-delay zero-sequence instantaneous overcurrent protection as the primary protection. It also adds zero-sequence directional overcurrent protection to the grounding transformer. Analysis and calculations show that the proposed scheme improves system reliability and protection selectivity and facilitates the economical operation of photovoltaic power stations.

Keywords: photovoltaic power station; branch zero-sequence protection; directional protection; collector line; undervoltage; blocking delay

光伏发电作为一种重要的可再生能源, 近年来发展迅猛, 装机规模持续扩大, 其安全稳定运行的重要性日益凸显。光伏电站继电保护方案配置是否合理, 直接关系到电站的经济稳定运行。为了提高光伏电站的可用率, 有必要深入研究光伏电站主要设备的常规保护配置, 探索更为完善的方案, 以提升全站保护的可靠性与选择性。

1 光伏电站主要电气设备保护现状

大型光伏电站升压站根据装机容量的不同, 一般建设 1 台或 2 台主变压器, 设 220、35 kV 2 个电压等级。主变压器 220 kV 侧采用单母线接线, 通过一条 220 kV 线路接入系统站。主变压器 35 kV 侧采用单分支或双分支接线, 设 I 段或 II 段 35 kV 母线。每段 35 kV 母线规划若干条光伏集电线路。每条集

收稿日期: 2026-05-26

电线路并接多台箱式变压器, 每台箱式变压器高压侧装设断路器。主变压器 220 kV 侧中性点采用直接接地方式, 升压站 35 kV 系统采用经小电阻接地方式, 在某段 35 kV 母线设置专用接地变, 专用接地变 35 kV 侧中性点经小电阻接地。根据 GB/T 14285—2023《继电保护和安全自动装置技术规程》^[1] 和 GB/T 32900—2025《光伏发电站继电保护技术要求》^[2], 主变压器电气量保护按双重化配置, 非电量保护独立配置。光伏集电线路、接地变压器保护按单套配置, 保护配置图见图 1。

主变压器主保护配置纵差保护、差动速断过流保护。主变压器高压侧后备保护配置 I 段式复压闭锁(方向)过电流保护、II 段式零序过流保护、I 段式间隙过流保护。主变压器低压侧后备保护配置 II 段式过电流保护、I 段式复压闭锁(方向)过电流保护。主变压器本体配置本体重瓦斯、本体压力释

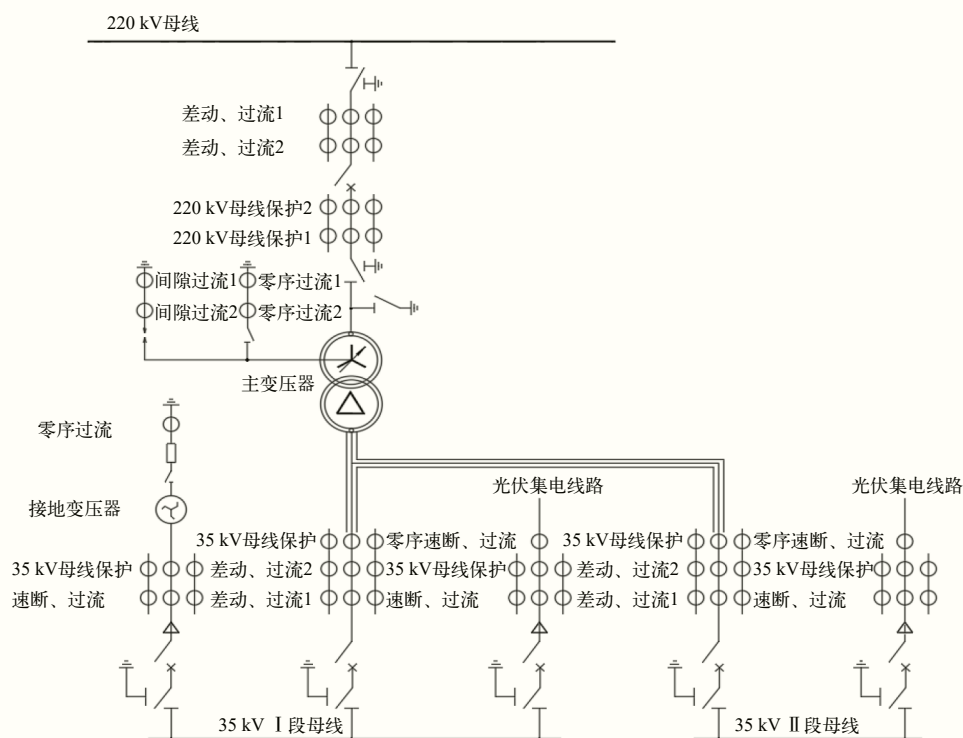


图1 保护配置图

放、调压重瓦斯、调压压力释放、冷却器全停、本体轻瓦斯、本体油位异常、本体油面温度、本体绕组温度等非电量保护。

集电线路相间故障主保护采用电流速断保护，定值按线路末端相间故障有灵敏度整定，灵敏系数不小于 1.5，0 s 动作于跳闸。后备保护采用过电流保护，定值按躲过本线路最大负荷电流整定，尽量对本线路最远端光伏电站箱式变压器低压侧故障有灵敏度，延时 0.3 s 动作于跳闸。

集电线路单相接地故障主保护采用零序电流速断保护，定值按线路末端单相接地故障有灵敏度整定，灵敏系数不小于 2，0 s 动作于跳闸。集电线路单相接地故障后备保护采用零序过电流保护，定值按躲过线路的容性电流整定，延时 0.3 s 动作于跳闸。

接地变压器配置电流速断保护、过电流保护作为内部相间短路故障的主保护和后备保护。配置 II 段式零序电流保护作为系统各元件单相接地故障的总后备保护。零序电流 I 段与母线各连接元件零序电流 I 段配合，延时 0.3 s 动作于跳母线上的所有断路器及主变压器两侧断路器。零序电流 II 段与母线各连接元件零序电流 II 段配合，延时 0.6 s 跳母线上的所有断路器及主变压器两侧断路器。

2 常规保护配置方案存在的不足及优化方案

2.1 主变压器保护

主变压器常规保护配置方案在应对典型短路故障时虽能起到保护作用，但面对 35 kV 母线单相接地故障，其选择性不高，存在越级跳闸、延时动作等风险。

对于 35 kV 采用双分支接线的主变压器，当 I 段 35 kV 母线（不带接地变压器的母线）发生单相接地故障时，由于 35 kV 母线保护差动电流定值按最小运行方式下母线发生两相短路有灵敏度整定（灵敏系数不小于 2），定值较大，35 kV 母线差动保护难以启动，35 kV 零序后备保护会越级跳闸，跳开 II 段 35 kV 母线，扩大了停电范围，不利于光伏电站稳定运行。

对于 35 kV 采用单分支接线的主变压器，当主变压器与 35 kV 断路器之间发生单相接地故障时，由于单相接地故障电流通常小于主变压器差动保护的电流启动值，主变压器差动保护无法启动，须依靠接地变 35 kV 侧中性点 35 kV 零序后备保护延时 0.3 s 跳开 35 kV 母线上的所有断路器及主变压器高压侧断路器。这一较长延时，一方面延长了故障切

除时间，加重了设备承受故障电流的风险；另一方面导致跳闸范围过大，不利于迅速缩小排查范围、准确查找故障点。

为解决上述不足，可增设主变压器低压侧分支零序方向过流保护，零序电流采用电流互感器三相自产电流。对于 35 kV 采用双分支接线的主变压器，零序方向指向主变压器。一段母线发生单相接地故障（无接地变压器母线），分支零序方向过流保护延时 0.2 s 跳开故障分支断路器，保证另一段母线正常运行。对于采用单分支接线的主变压器，零序方向指向母线，当主变压器与 35 kV 断路器之间发生单相接地故障时，分支零序方向过流保护瞬时跳开主变压器高、低压侧断路器，不必跳开母线上的所有断路器，缩小了故障跳闸时间和跳闸范围，有利于精准定位故障点，快速恢复供电。

分支零序方向过流保护虽然解决了主变压器保护的选择性和速动性问题，但如果零序电流定值计算偏大，会导致接地变压器 35 kV 侧中性点电阻柜电流无形增加，影响整个电站的投资。通常，零序方向过流保护电流定值按躲过分支最大不平衡电流整定。光伏电站正常运行时不平衡电流较小，根据 GB/T 37408—2019《光伏发电并网逆变器技术要求》^[3] 相关规定，逆变器的不平衡度小于 5%；按最严重工况考虑，整个系统的正常不平衡电流不会超过 5%。主变压器 35 kV 侧分支母线发生三相短路时，最大不平衡电流一般不大于 15% 额定电流。考虑到三相自产零序电流存在一定的误差，结合保护装置最小精工度的要求，建议零序电流定值按 25% 额定电流整定。

2.2 集电线路保护

集电线路相间故障主保护常规配置方案中，电流速断保护定值按线路末端相间故障有灵敏度整定，因此在光伏箱式变压器高压侧短路时，集电线路保护会越级跳闸，扩大事故范围。

在早期建设的光伏电站中，此问题无法解决。原因是当时为节约投资，光伏电站箱式变压器高压侧普遍采用负荷开关加熔断器方案，同时光伏逆变器不具备 0.15 s 的零电压穿越能力，故光伏电站的集电线路主保护未考虑与箱式变压器保护配合问题。随着箱式变压器高压侧普遍采用断路器，以及光伏逆变器零电压穿越能力的提高，集电线路电流速断

保护的优化已具备条件。

为提高集电线路保护的选择性，集电线路相间故障主保护可采用低电压闭锁延时的短延时方向电流速断保护，方向指向光伏箱式变压器。依据 GB/T 19964—2024《光伏发电站接入电力系统技术规定》^[4]，光伏电站并网点电压跌至 0 时，光伏逆变器应能够不脱网运行 0.15 s；光伏电站并网点电压跌至标称电压 20% 时，光伏逆变器应能够不脱网运行 0.625 s。据此规定，假设集电线路故障时，面临其他正常集电线路的第一个单元的光伏逆变器刚好进入 0.2 倍的低电压穿越，电压基准值取 35 kV，则有

$$U_{s*} = \sqrt{3}(U_{m*} + U_{l*} + U_{t*}) = 0.2 \quad (1)$$

式中： U_{s*} 为光伏逆变器并网点线电压标幺值； U_{m*} 为 35 kV 母线残压（相电压）标幺值； U_{l*} 为正常集电路线电缆至 35 kV 母线的电压降（相电压）标幺值； U_{t*} 为光伏箱式变压器电压降（相电压）标幺值。在实际工程中，光伏箱式变压器的短路电压百分数一般选 8%。依据 GB/T 19964—2024《光伏发电站接入电力系统技术规定》，并网点电压跌落期间，光伏电站的无功电流的最大输出能力应不低于光伏逆变器额定电流的 1.05 倍，则

$$U_{t*} = 1.05 \times 0.08 = 0.084 \quad (2)$$

为保证可靠性，忽略 U_{l*} 压降，联立 (1) (2) 式，得 $U_{m*} = 0.031$ ， U_{m*} 取值为 0.03。

整个保护系统的整定原则：电流定值按集电线路末端两相短路有灵敏度整定，低电压定值按 $0.04U_n$ （ U_n 为 35 kV 额定相电压，考虑 1.3 倍灵敏系数）整定。保护动作逻辑：集电线路故障，电流判据启动后；如 35 kV 母线相电压残压 $\leq 0.04U_n$ ，保护闭锁延时，瞬时动作于跳闸，保证其他正常集电线路光伏逆变器不脱网运行。如 35 kV 母线相电压残压大于 $0.04U_n$ ，则延时跳闸。延时时间与光伏箱式变压器主保护动作跳开高压侧断路器总的全开断时间配合，以保证在光伏箱式变压器高压侧短路时，集电线路保护有选择性。光伏电站光伏箱式变压器高压侧一般选用高速断路器，断路器的分闸时间小于等于 0.05 s，考虑到差动保护动作时间小于等于 0.03 s、断路器的燃弧持续时间小于等于 0.02 s，断路器总的开断时间小于等于 0.1 s，延时时间可按 0.15 s 整定。由于集电线路 35 kV 开关柜断路器的

总的开断时间小于等于 0.1 s, 加上 0.15 s 延时, 集电线路 35 kV 开关柜断路器实际开断时间小于 0.625 s。当故障发生在集电线路, 设置 0.15 s 延时同样满足相邻正常集电线路光伏逆变器低电压穿越的要求。

通过以上分析可以看出, 优化后的方案与常规配置方案相比没有安全隐患, 是否能得以推广, 取决于光伏电站集电线路箱式变压器高压侧相间短路时, 35 kV 母线电压跌落的深度。下面通过光伏电站案例计算加以论证。目前, 光伏大基地项目装机容量已达到 500 MW 及以上。根据工程实际经验, 光伏电站单条集电线路的 35 kV 电缆总长度在 3~6 km 之间, 35 kV 电缆的平均电抗为 0.12 Ω/km , 折算到基准容量为 100 MV·A (以下计算均以 100 MV·A 为基准容量) 的标么值分别为 0.026~0.052。大部分集电线路第一台箱式变压器距离 35 kV 开关柜的距离在 1~1.5 km 之间, 折算到标么值为 0.008~0.013。根据 GB/T 40581—2021《电力系统安全稳定计算规范》^[5] 的要求, 新能源并网点短路比应不小于 2。以 500 MW 的光伏电站为例, 不考虑相邻新能源厂站的影响, 系统的短路容量应大于等于 1 000 MV·A。为方便计算, 取系统短路容量等于 1 000 MV·A, 折算到标么值的系统阻抗值为 0.1。升压站选用 2 台 250 MV·A 的主变压器, 主变压器短路电压百分数为 0.14, 折算到标么值的主变压器阻抗值为 0.056。通过计算可知, 集电线路末端箱式变压器高压侧相间短路时, 35 kV 母线相电压为 $(0.142 \sim 0.25)U_n$; 第一台光伏箱式变压器高压侧短路时, 35 kV 母线相电压为 $(0.049 \sim 0.077)U_n$ 。以上计算未考虑 SVG 及其他正常集电线路光伏逆变器无功电流的助增效果, 且系统阻抗按较大值假设, 实际工程中系统阻抗标么值多数都小于 0.1。考虑到这些因素, 所有集电线路远区末端箱式变压器高压侧相间短路时, 35 kV 母线相电压大于 $0.04U_n$; 大多数集电线路近区第一台箱式变压器高压侧相间短路时, 35 kV 母线相电压大于 $0.04U_n$ 。优化后的方案适用于大多数光伏电站, 具备较高的工程推广价值。

集电线路单相接地故障主保护常规配置方案由于采用零序电流速断保护, 在光伏箱式变压器高压侧发生单相接地故障时, 同样存在集电线路保护越级跳闸问题。为解决这一问题, 集电线路单相接地

故障主保护可采用短延时零序电流速断保护, 电流定值按线路末端单相接地故障有灵敏度整定, 延时间按 0.15 s 整定。对于 35 kV 小电阻接地系统, 发生单相接地故障时, 线电压保持不变。光伏电站 (以 10 kV 及以上电压等级接入系统) 的逆变器交流侧采用 IT 系统, 35 kV 侧发生单相接地时, 通常不存在低电压穿越问题, 具备短时带故障运行能力。因此, 当 35 kV 侧发生单相接地故障时, 集电线路保护设置 0.15 s 延时, 逆变器不会因故障而大面积脱网, 方案可行。

光伏箱式变压器配置差动保护, 35 kV 系统的接地故障电流值按大于差动保护最小启动电流 $(0.5I_n, I_n$ 为变压器额定电流) 选取, 保证光伏箱式变压器 35 kV 侧发生单相接地故障时, 箱式变压器保护能快速动作。光伏子阵箱式变压器一般选 3.3 MV·A (组串式) 或 4.4 MV·A (集中式), 箱式变压器 35 kV 侧最大额定电流为 72.6 A, 差动保护最小启动电流为 36.3 A, 接地故障电流大于 36.3 A 即能满足要求。光伏电站接地变 35 kV 侧中性点电阻电流一般按几百安培选取, 远大于箱式变压器差动保护最小启动电流, 部分站甚至大于箱式变压器的电流速断定值。当箱式变压器 35 kV 侧发生单相接地故障时, 其差动保护能瞬时跳开 35 kV 侧断路器, 与集电线路单相接地主保护配合实现选择性跳闸, 从而有效提升集电线路单相接地主保护的选择性。

2.3 接地变压器保护

目前接地变压器的常规保护配置未设置接地变压器本体的零序过流保护。当接地变压器本体发生单相接地故障时, 接地变压器 35 kV 侧中性点零序保护无法有效甄别故障位置 (内部故障或外部故障), 只能通过保护延时跳开母线上所有断路器及主变压器两侧断路器, 延长了故障跳闸时间, 扩大了跳闸范围。为弥补这一不足, 接地变压器可配置零序方向过流保护, 零序电流通过三相自产方式获得, 其零序方向经分析确定。当 35 kV 母线或集电线路发生单相接地故障时, 流经接地变压器 35 kV 开关柜的三相自产电流矢量和为阻性电流, 方向指向接地变压器; 而当接地变压器内部发生单相接地故障时, 该电流矢量和为 35 kV 系统的容性电流, 方向指向母线。基于上述特性, 零序方向按指向 35 kV 母线整定, 零序电流定值按躲过接地变压器

正常运行的不平衡电流和内部三相短路产生的最大不平衡电流整定。正常运行时,接地变压器不平衡电流较小,内部三相短路产生的最大不平衡电流一般不超过 15% 额定电流,建议零序电流定值按额定电流的 25% 整定。根据 DL/T 5222—2021《导体和电器选择设计规程》^[6],接地变压器的额定电流约为阻性电流的 0.03 倍(干式变压器 10 s 电流过载倍数为 10.5);阻性电流通常按系统总容性电流的 3~5 倍选取(保证主变压器分支零序方向过流保护有灵敏度)。由此折算,接地变压器的额定电流约为系统容性电流的 0.09~0.15 倍。按额定电流的 25% 整定零序电流定值时,灵敏系数为 26~44,满足要求。接地变压器内部发生单相接地时,保护装置可瞬时动作跳闸。由于故障点已明确了位于接地变压器内部,排除了主变压器与 35 kV 进线断路器之间发生故障的可能,跳闸出口仅需跳开 35 kV 母线上所有断路器,无须联跳主变高压侧断路器,缩小了跳闸范围,减轻了调度的相关考核。

3 结束语

光伏电站的保护配置不仅要遵循常规变电站的

相关要求,还须特别考虑其 35 kV 侧的接地方式以及光伏逆变器的低电压穿越特性。本文在深入分析上述关键技术要点的基础上,对保护配置方案进行了系统优化。优化后的方案有效弥补了常规保护配置中存在的动作盲区,显著提升了保护的选择性,能够更精准地区分故障区域,避免不必要的停电,为光伏电站的安全稳定运行提供了坚实保障。这不仅有助于降低运维成本、减少非计划停运带来的经济损失,也有利于提升光伏电站的整体运行效率和并网友好性,从而更好支持其长期经济、可靠、高效运行。

参考文献

- [1] GB/T 14285—2023 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [2] GB/T 32900—2025 光伏发电站继电保护技术要求[S].
- [3] GB/T 37408—2019 光伏发电并网逆变器技术要求[S].
- [4] GB/T 19964—2024 光伏发电站接入电力系统技术规定[S].
- [5] GB/T 40581—2021 电力系统安全稳定计算规范[S].
- [6] DL/T 5222—2021 导体和电器选择设计规程[S].

作者简介

赵忠立(1977),男,本科,高级工程师,从事电气设计工作,E-mail: zzhongli@nmdsy.com。

(责任编辑:刘艳玲)

(上接第 46 页)

表2 投资回报关键指标

指标名称	数值
初始投资/亿元	1.42
折现率/%	7
NPV/亿元	0.96
静态回收期/a	6.4
储能成本敏感点/%	-15
回收期缩短值/a	1.2

4 结束语

本文提出的“储能-无功-拓扑”联合控制策略在高渗透电网中实现了显著降损,验证了多时间尺度协同优化的技术可行性;经济性评价进一步表明,在现行电价与碳价水平下,项目具备商业吸引力,且对储能成本下降高度敏感。未来工作将引入分布式光伏集群动态等值,并研究市场机制下收益分配的公平性,以推动成果在区域电网的规模化

落地。

参考文献

- [1] 竺建国,李琪,翁秉宇,等.考虑源-网-荷-储侧设备的微网协调运行控制策略研究[J].电测与仪表,2026,63(3):114-125.
- [2] Wang S,Kong L,Leung P,et al.Collaborative Control Strategy of Megawatt-Level Zinc-Iron Flow Battery Energy Storage System Based on Source-Grid-Load-Storage Integration[J].Batteries,2026,12(4):139-139.
- [3] 王文苑.新型电力系统下电网线损分析及降损措施研究[J].电力设备管理,2025(3):20-22.
- [4] 杨凡.智能电网线损计算机管理控制系统的研究[J].张江科技评论,2024(7):96-98.
- [5] 刘大为.电网线损数据质量控制研究[J].中国质量监管,2023(6):90-91.
- [6] 王凌波,马建峰,王慧娟.高渗透率新能源接入电力系统对线损的影响及降损措施[J].农村电气化,2024(9):28-32.
- [7] 程慧琳,武剑,张晶,等.计及电动汽车充放电时空分布的输电网协同降损低碳策略研究[J].电测与仪表,2024,61(11):122-132.

作者简介

段星(1985),男,研究生,工程师,研究方向为电力系统及其自动化、电力市场、新能源,E-mail: koijb2335@163.com。

(责任编辑:张峰亮)