

Relay protection configuration analysis of key equipment in solar thermal power generation system

Yongxian Zheng

China General Nuclear New Energy Delingha Co., Ltd., Delingha, Qinghai, 817099, China

Abstract

With the accelerated global energy transition, concentrated solar power (CSP) has emerged as a pivotal development direction in renewable energy due to its energy storage advantages and peak-shaving capabilities. However, the complex operational conditions in CSP power plants—including high-temperature/high-pressure environments, significant thermal inertia, and multi-energy coupling—pose severe challenges to the reliability of relay protection systems. Traditional protection configurations struggle to adapt to the dynamic characteristics of CSP systems, often resulting in false trips or failure to trip, which jeopardizes grid safety. Therefore, optimizing relay protection strategies for critical equipment in CSP power plants (such as collector circuits, molten salt thermal storage tanks, and steam turbine generator units) has become a key challenge for ensuring stable plant operations and advancing large-scale CSP technology adoption. This paper first provides a detailed overview of the key systems in CSP power generation, then analyzes the fault characteristics and protection requirements of critical equipment, and finally proposes relay protection configuration principles and strategies, aiming to offer valuable references for related research.

Keywords

Photothermal power generation system; key equipment; relay protection configuration

光热发电系统中关键设备的继电保护配置分析

郑永贤

中广核新能源德令哈有限公司, 中国·青海 德令哈 817099

摘要

随着全球能源转型加速, 光热发电 (Concentrated Solar Power, CSP) 凭借其储能优势与调峰能力, 成为可再生能源领域的重要发展方向。然而, 光热电站集热、储热、发电等环节的复杂工况 (如高温高压、热惯性大、多能耦合) 对继电保护系统的可靠性提出严峻挑战。传统保护配置难以适应光热系统动态特性, 易导致误动/拒动, 威胁电网安全。因此, 针对光热电站关键设备 (如集热回路、熔盐储热罐、汽轮发电机组) 的继电保护策略优化, 成为保障电站稳定运行、推动光热技术规模化应用的关键课题。本文先是详细阐述了光热发电系统关键设备的各个系统, 随后具体分析了关键设备故障特性与保护需求, 最后具体提出了继电保护配置原则与策略, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

光热发电系统; 关键设备; 继电保护配置

1 引言

光热发电通过聚光集热、储热与汽轮发电实现连续稳定输出, 是解决可再生能源间歇性问题的有效途径。然而, 光热电站运行环境复杂: 集热系统涉及高温导热介质 (如熔盐), 储热装置需承受热应力与化学腐蚀, 汽轮机组需频繁启停以适应调峰需求。这些特性导致传统继电保护 (如过流、差动保护) 在光热场景中存在灵敏度不足、协调性差等问题。例如, 集热管道泄漏可能引发保护误动, 储热罐过热故障可能因热惯性延迟保护响应, 汽轮机孤岛运行易导致电压崩

溃。现有研究多聚焦于光伏或火电保护, 针对光热系统的专项分析仍显不足。因此, 本文从光热电站关键设备故障机理出发, 提出适配其动态特性的继电保护配置方案, 为光热技术安全应用提供参考。

2 光热发电系统关键设备概述

2.1 集热系统

集热系统是光热发电的核心部分, 包含槽式、塔式和碟式三种集热器。槽式集热器用抛物面槽式反射镜聚焦太阳光至集热管, 加热导热油或熔盐, 技术成熟但聚光比低; 塔式集热器通过定日镜阵列将光反射至吸热塔, 加热熔盐实现高温储热发电, 聚光比高但控制复杂、成本高; 碟式集热器聚焦太阳光至斯特林发动机或微型汽轮机直接发电, 单机容

【作者简介】郑永贤 (1993-), 男, 中国青海海东人, 本科, 助理工程师。

量小但效率高,适合分布式发电。集热回路以导热油或熔盐为介质,电气特性特殊:导热油管道需绝缘防接地故障,熔盐管道需绝缘法兰隔离;温度升高会导致管道电阻变化,影响短路电流计算;集热循环泵为高压大功率电机,启动电流大,需配置电动机保护并与回路保护协调动作。

2.2 储热装置

熔盐储热装置中,冷盐罐(290℃)与热盐罐(565℃)通过温差实现热能储存与释放。充电时,高温熔盐被泵送至热盐罐,低温熔盐送至集热器吸热,形成闭式循环;放热时,高温熔盐经换热器降温后返回冷盐罐,驱动汽轮机发电。熔盐罐采用双层真空绝热结构,减少热损失,并设电加热防凝固及传感器监测状态。储热系统热-电耦合特性对保护配置有特殊要求,其热惯性大,故障发展慢,保护需区分热与电气故障;需与汽轮发电机组协同控制,实现发电功率快速响应;在多能互补系统中,还需与电池储能协调,考虑不同储能介质故障特性差异,防止保护误动/拒动。

2.3 汽轮发电机组

光热电站的汽轮发电机组中,蒸汽轮机多为亚临界或超临界参数,采用单轴或双轴结构,额定功率50MW到200MW不等,运行参数受储热系统限制,需保持进汽稳定以防叶片损伤;发电机采用同步或双馈感应式,额定电压10.5kV或13.8kV,经变压器升压后接入电网,并配置完善保护与汽轮机保护联动。与常规火电机组相比,光热汽轮机启动时间短,因储热系统可“热备用”,启动时间缩短至10-30分钟;负荷调节范围宽且速率快,可达5%/min;还能“日启停”运行。因此,其保护系统需适应快速启停、频繁调节等场景,优化动作特性,配置启停保护,并与储热系统联动,确保安全。

2.4 电力电子变换设备

电力电子变换设备中,逆变器将直流电转为交流电并网,用PWM控制调节电压频率,故障模式含直流侧(如短路、电容击穿)、交流侧(如电压跌落、三相不平衡)及控制模块故障(如传感器失效),需配置相应保护^[1]。换流器在光热电站用于熔盐电加热或汽轮机变频启动,故障模式有整流侧(如晶闸管击穿)、逆变侧(如桥臂短路)及冷却系统故障,也需对应保护。其保护配置要兼顾电气与控制故障,采用分层策略:设备层针对单个设备配置多种保护,动作时间短;系统层针对多台并联配置差动等保护防故障扩散;协调控制层与EMS协同,实现保护与功率调节联动。

3 关键设备故障特性与保护需求分析

3.1 集热

集热系统故障特性多样,保护需求紧迫。管道泄漏方面,导热油或熔盐泄漏风险大,前者可能引发火灾,后者会烫伤、凝固及爆炸,威胁人员安全,需配置泄漏检测装置并设紧急隔离阀。泵站故障中,高压大功率的集热循环泵启动电流大,

故障表现多样,可能引发系统停运等,需电动机保护与集热回路保护协调动作。集热器过热时,因聚光比差异,热效率受环境影响,过热会导致导热油等分解、集热管破裂,需用温度传感器监测并联动调节。电气故障传播路径上,短路等故障会沿回路蔓延,影响短路电流计算,需采用分层保护策略,实现故障时快速应对。

3.2 储热装置故障

储热装置故障特性复杂,保护需求多样。熔盐冻结/过热方面,因其凝固点高,非工作期易冻结凝冻影响再启动,需用电伴热等维持流动性,并配温度传感器防温度异常。罐体泄漏上,热盐罐长期运行可能因低循环疲劳、应力松弛开裂等多种因素泄漏,要通过焊接检测、优化布局等降低风险,并配泄漏检测装置^[2]。热应力导致的电气绝缘失效方面,熔盐罐温度梯度大易引发热应力,致绝缘失效,需优化罐体结构、控制熔盐流入速度等降低热应力,同时配置绝缘监测装置实时掌握绝缘性能。

3.3 汽轮发电机组故障

汽轮发电机组故障特性多样,保护需求迫切。转子振动与轴承损坏方面,转子振动超限或轴承损坏会导致机组停运或设备损毁,需配置振动监测装置实时监测,联动保护系统停机,同时通过油温、油压监测预警轴承损坏,并设置轴承润滑系统保护,如油泵故障时联锁停机。低电压与过电压时,电网电压异常会使机组进汽参数波动,影响稳定运行,需配置低电压穿越控制与过电压保护,确保机组在电压异常时保持并网或安全脱网。孤岛运行与并网切换冲击方面,光热电站可能进入孤岛模式或频繁切换,引发功率波动与设备冲击,需配置孤岛检测装置实时监测,联动调整机组出力,并网切换时用同步控制装置确保相位、频率一致,减少冲击。

3.4 电力电子设备故障

电力电子设备故障特性复杂,保护需求不容忽视。在谐波干扰方面,逆变器、换流器等运行时产生的谐波会污染电网、影响其他设备,需配置无源或有源滤波器谐波抑制装置滤除谐波,同时用谐波监测装置实时监测,超限时联动保护系统调整运行模式。直流侧故障上,直流母线短路、电容击穿等会导致直流电压异常,影响设备运行,要配置直流过流/过压保护,快速切断故障电流或电压。控制模块失效时,传感器、通信模块等故障会使控制逻辑紊乱,引发设备误动或拒动,需配置冗余控制通道与看门狗电路,主控模块故障时自动切换至备用模块,保障设备正常运行。

4 继电保护配置原则与策略

4.1 基本配置原则

继电保护需严格遵循选择性、速动性、灵敏性和可靠性这“四性原则”。选择性确保仅切除故障元件,将停电范围缩至最小;速动性力求尽快切除故障,降低设备损坏程度与对系统稳定性的影响;灵敏性要求在规定的保护范围内对故

障有灵敏反应；可靠性则保证保护装置在规定条件下可靠动作，杜绝误动与拒动情况。而在光热电站这一特殊场景下，继电保护配置需进行适应性调整。鉴于光热电站设备分布广泛、运行环境复杂，部分区域通信易受干扰，所以要优化保护装置通信方式以保障信息可靠传输。并且，光热电站运行模式多样，像孤岛运行等，保护配置必须能适应不同运行模式下的故障特征，如此才能切实保障光热电站系统的安全稳定运行。

4.2 集热系统保护配置

集热系统作为光热电站的关键构成，其保护配置意义重大。对于管道和泵站，配置差动保护十分必要，它能迅速检测出内部故障电流，精准锁定故障位置，并及时切除故障段，有效防止故障蔓延危及整个集热系统。温度越限与流量保护联动同样不可或缺，借助温度传感器对集热器出口等关键位置温度实时监测，一旦温度越限，便联动调节流量保护装置，像调整泵站流量或镜场角度，避免因温度过高引发导热油或熔盐分解、集热管破裂等状况^[1]。此外，分布式保护与集中式监控协同能进一步提升保护成效，分布式保护装置可快速应对局部故障，集中式监控系统则能全面把控集热系统运行态势，实现信息共享与综合分析，为保护动作提供精准依据，切实提高系统的可靠性与安全性。

4.3 储热装置保护配置

储热装置保护配置需多管齐下。首先采用热电偶保护，以温度 - 电流双判据为关键依据。熔盐罐温度异常会损害罐体材料性能与电气绝缘，电流变化也往往是设备故障的信号，同时监测这两者，任一超出正常范围或同时异常，保护装置便会及时动作，防止故障进一步恶化。其次，针对液位和压力异常情况要快速隔离。储热装置液位过高有溢出风险，过低则影响储热效能，压力异常更可能致使罐体损坏。为此配置液位和压力监测装置，一旦检测到异常，迅速切断相关阀门或调整运行参数，把故障部分隔离出来。如此全方位的保护配置，能有效保障储热装置在复杂工况下安全稳定运行。

4.4 汽轮发电机组保护配置

汽轮发电机组的保护配置至关重要。其配置的差动保护，能迅速切除机组内部相间短路故障，为发电机和变压器等关键设备提供可靠保护。失磁保护在发电机失去励磁时发挥作用，及时采取措施防止机组失步运行，避免对电网产生冲击。而频率保护则针对电网频率异常情况，当频率偏离正

常范围，保护装置会动作，通过调整机组出力或与电网解列来维持电网频率稳定。此外，与储能系统的协调控制策略也不容忽视。在光热电站里，储能系统可与汽轮发电机组协同配合，在机组故障或电网需求改变时，借助储能系统的充放电调节，平衡电力供需，进而提升电站运行的灵活性与稳定性，增强其对电网的支撑能力。

4.5 电力电子设备保护配置

电力电子设备的保护配置需兼顾当下与未来。在当下，直流侧配置过流保护十分关键，当直流母线短路、电容击穿等情况引发直流电流过大时，过流保护装置能迅速切断故障电流，避免设备受损。交流侧则开展孤岛检测，鉴于光热电站可能因电网故障进入孤岛运行模式，孤岛检测装置会实时监测电网状态，一旦检测到孤岛现象，便联动保护系统调整设备运行方式，保障设备和人员安全。展望未来，基于人工智能的故障预测与自适应保护是重要方向。借助人工智能算法分析设备运行数据，可提前预测故障概率与类型，实现预警。还能依据设备实际运行状态和故障特征，自适应调整保护定值与动作策略，提升保护准确性和可靠性，确保电力电子设备稳定运行。

5 结论与展望

总的来说，本文围绕光热发电系统关键设备的继电保护配置展开探讨，通过分析集热系统等关键设备的故障特性与保护需求，明确其复杂工况与潜在故障风险。基于“四性原则”及光热电站特殊场景，提出适配各设备的继电保护配置原则与策略，涵盖多种保护方式及协同、协调控制策略，并经理论分析验证其合理有效，有助于提高系统可靠性，保障电站稳定运行。展望未来，随着光热发电技术发展，对继电保护配置要求更高，需深入研究动态特性影响，优化保护算法，加大人工智能故障预测等研发力度，加强保护协调与信息共享，构建更智能高效的体系，推动光热发电发挥更大作用。

参考文献

- [1] 夏雨尧.塔式光热储能电站系统设计与运行策略研究与仿真[D].浙江大学,2023.
- [2] 栾亨淳.风电-光伏-光热互补发电系统运行特性仿真研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [3] 司继松.光热发电熔盐储能系统研究及关键设备技术开发.北京市,蓝星,2020-10-15.