集中式并网光伏电站中电气自动化技术应用

李金全
广西桂冠电力股份有限公司柳州事业部　广西柳州　545000

摘　要：集中式并网光伏电站作为新能源发电的核心载体，其运行效率与并网安全性直接影响新能源电力系统的稳定发展，电气自动化技术为解决电站复杂工况下的监测、控制与保护难题提供了支撑。本文基于电站电气系统构成，系统研究电气自动化技术在光伏组件状态采集、MPPT 控制、孤岛效应保护等关键环节的应用机制，分析数据传输优化、功率精准调控、故障快速处置等技术要点。本文通过梳理技术应用逻辑与实践路径，为提升电站运行可靠性、增强电网兼容性提供技术参考，对推动新能源发电自动化技术规模化落地具有实践意义。

关键词：集中式并网光伏电站；电气自动化技术；监测控制；故障保护；并网运行

引言

随着全球能源结构转型不断加快，集中式并网光伏电站依靠其规模化发电的优势，已成为清洁能源供应体系中相当重要的一部分，但是该电站的运行会受到光照、温度等自然条件的影响，同时电网接入方面的要求也在持续提高 [1]。基于此，本文将集中式并网光伏电站电气系统的构成作为基础，从监测、控制、保护等三大核心场景入手，深入剖析电气自动化技术的具体应用，以此为提升电站运行效率、保障电网稳定提供理论与实践方面的支撑。

1 集中式并网光伏电站电气系统构成

集中式并网光伏电站的电气系统将光伏阵列作为能量采集的重要部分，光伏组件借助串并联的方式组成光伏方阵，把太阳能转变为直流电，然后汇聚到汇流箱中，汇流箱完成多路直流电的汇流工作以及初步的防雷保护，在经过直流配电柜分配后，输送到逆变器中，逆变器可实现直流电向交流电的转变，同时保证输出电能的质量。交流配电柜接收逆变器输出的交流电，开展电压等级匹配以及回路分配工作，通过主变压器把电压提升到电网接入的标准，最终经过并网断路器与公共电网实现连接，该系统涉及测控保护装置、通信设备以及后台监控系统，前面的负责实时监测电气量与设备状态，并且执行故障保护，后面的保障各环节的数据传输以及远程操控。系统的核心构成如表 1 所示，各个部分协同运行，保证电站稳定且高效地并网运行。

表 1　集中式并网光伏电站电气系统核心构成

系统模块	核心设备 / 组件	核心功能
能量采集模块	光伏组件、光伏方阵	太阳能转化为直流电并汇聚
直流汇流模块	汇流箱、直流配电柜	直流电汇流、分配及防雷保护
电能转换模块	逆变器	直流电转交流电，优化电能质量
交流配电模块	交流配电柜、主变压器	电压匹配、回路分配及升压处理
并网控制模块	并网断路器、测控保护装置	电网接入控制与故障快速处置
监控通信模块	通信设备、后台监控系统	数据传输、状态监测及远程操控

2 电气自动化技术在电站监测中的应用

2.1 光伏组件运行状态实时数据采集

光伏组件运行状态的实时数据采集把分布式传感网络作为核心，在组件串列以及关键节点布置电压、电流与温度传感器，分别捕捉直流电压波动、电流变化以及组件与环境温度的数据 [2]。传感设备借助数字化协议把原始数据转变为标准信号，经过工业以太网或者无线链路传送到本地采集终端，终端里设置了滤波算法与异常识别逻辑，经过降噪校验后去除无效数据，保证传送到监控中心的数据精确且及时，为判断组件衰减、遮挡以及潜在故障提供支持。

2.2 电气设备绝缘性能在线监测

电气设备绝缘性能的在线监测主要关注汇流箱、逆变器等设备，在这些设备上部署局部放电传感器、介质损耗角传感器以及绝缘电阻传感器。局部放电传感器可检测电脉冲信号，以此来识别绝缘缺陷，介质损耗角传感器借助能量损耗情况判断设备性能是否下降，绝缘电阻传感器依据电阻的变化发现设备是否受潮污染。监测系统采用定时巡检与实时

监测相结合的模式，对于高压设备，每小时采集一次参数，中低压设备则每半小时采集一次参数，采集到的参数会与额定标准进行实时比对，一旦超过阈值，标记为异常，并关联运行年限、环境湿度等数据，为故障预判提供多维度的参考依据。

2.3 电网侧电压与频率动态监测

在并网断路器出线端以及电网连接点处，部署高精度同步相量测量装置与频率分析仪对电网侧电压与频率进行动态监测，其中同步相量测量装置依靠 GPS 授时，每秒可进行 200 次采样，以此捕捉电压幅值、相位波动以及三相不平衡度等情况，频率分析仪则运用数字信号处理技术跟踪频率，其精度可以达到 ±0.01Hz[3]。监测得到的数据会与电网接入标准进行实时比对，当电压超出额定范围 ±5% 或者频率偏离 50Hz ± 0.2Hz 时，会触发预警，并记录异常参数，并结合历史数据以及气象条件分析关联因素，为电站调控以及电网稳定提供数据方面的支撑。

2.4 监测数据传输与存储优化

监测数据传输与存储优化运用分层架构开展，对于关键监测点借助工业光纤以保障其稳定性，而在偏远区域则采用 LoRa 无线通信方式降低成本。在数据传输过程中采用了压缩算法与加密协议，其中压缩算法的压缩比为 10:1，以此实现冗余剔除以及安全传输，数据存储采用边缘计算与云端相结合的模式，本地节点负责存储 72 小时的高频实时数据，云端分布式数据库用于存储经过预处理的历史数据，并且可支持每秒万级的读写操作。系统借助 24 小时全量同步以及异地备份的方式保障安全，采用时间戳与设备编号双重索引，保证数据可按照维度快速检索，为电站分析决策提供高效服务。

3 电气自动化技术在电站控制中的应用

3.1 最大功率点跟踪（MPPT）自动化控制

最大功率点跟踪自动化控制依据光伏组件输出特性曲线，结合凭借实时监测所获取的组件电压、电流以及环境温度数据，运用改进型 perturbandobserve 算法实现动态追踪，控制单元依据环境光照强度的变化，实时计算光伏方阵当下的输出功率，借助微小步长调整直流侧 Boost 变换器的占空比，改变组件工作电压与电流的匹配关系。当光照强度突然大幅上升时，算法自动加大步长以便可快速接近新的最大功率点，而当光照强度处于稳定状态时，则减小步长提高跟踪精度，防止功率出现振荡[4]。控制系统为每个光伏子阵配备独立的 MPPT 控制器，针对组件衰减程度的不同进行有差异的调控，即便部分组件出现遮挡或者性能衰减的情况，也可保证其他正常的组件始终处于最大功率点工作，提升整个光伏方阵的能量利用效率。

3.2 逆变器输出功率精准调控

逆变器输出功率的精准调控，以电网调度指令以及光伏组件实际输出能力作为双重依据，借助数字信号处理器实现功率指令的实时解析与执行，控制单元接收监测系统传输的光伏方阵直流侧功率数据，再结合电网侧电压、频率的动态监测结果，计算出逆变器当前可输出的最大安全功率。运用空间矢量脉宽调制（SVPWM）技术，调整逆变器内部开关器件的导通与关断时间，以此精确控制输出交流电的幅值与相位。当电网负荷需求增加时，在组件输出能力允许的范围内提升逆变器输出功率，当电网出现电压波动或者频率异常时，及时降低输出功率保障并网稳定性。调控过程中引入功率预测模型，结合短期气象预报数据提前调整控制参数，减少突发光照变化所导致的功率输出波动，保证逆变器输出功率可契合电网需求，又不会超出设备额定运行范围。

3.3 并网切换自动化控制

并网切换自动化控制依靠同步监测装置获取电站侧与电网侧的交流电参数，这些参数有电压幅值、频率、相位以及相序，借助自动准同期控制单元实现平滑切换。在并网前，控制系统计算两侧电压幅值的差值，凭借调节逆变器输出电压把差值控制在 ±5% 以内，对频率进行同步校准，保证两侧频率偏差不超过 ±0.1Hz，运用相位锁定环路技术让两侧相位精确对齐，相位差控制在 ±5° 范围内。当满足并网条件后，控制单元发出指令驱动并网断路器合闸，合闸过程采用预同步控制策略，缩短冲击电流持续的时间，将合闸瞬间的冲击电流限制在设备额定电流的 1.5 倍以下，解列切换时，控制系统先逐渐降低逆变器输出功率直至零，然后断开并网断路器，防止突然解列造成电网电压波动与设备冲击，同时记录切换过程中的关键电气参数，为后续切换策略的优化提供数据支持。

3.4 无功功率补偿自动化调节

无功功率补偿自动化调节为了能够维持电网功率因数稳定，依据监测系统实时收集的电网侧有功功率以及无功功率数据，借助无功功率计算器确定补偿需求量，补偿装置采

用静止无功发生器和电容器组的组合模式，SVG 负责动态跟踪快速变动的无功负荷，电容器组承担固定无功补偿工作[5]。当电网功率因数低于 0.95 时，控制单元依据无功缺额大小，优先投入 SVG 进行精确补偿，如果无功缺额超出 SVG 补偿容量，再分级投入电容器组，当电网出现容性无功过剩时，及时切除部分电容器组并控制 SVG 吸收多余无功功率，调节过程中结合电网电压变化趋势，当电压偏低时适当增加感性无功补偿提升电压，当电压偏高时增加容性无功补偿来抑制电压升高，借助无功功率的动态平衡，保障电网电能质量，又降低电站有功功率损耗。

4 电气自动化技术在电站保护中的应用

4.1 过流与过压故障自动化保护

在电站直流侧以及交流侧的关键节点位置，过流与过压故障自动化保护系统部署智能型过流继电器、过压保护器以及高速采样模块，过流保护会实时监测回路电流值，将其与设备额定电流以及短路电流阈值进行对比，一旦电流超出允许范围，过流继电器就会马上触发跳闸指令，切断故障回路的电源。该保护系统还可以区分过载电流和短路电流的不同特性，在过载情况下采用延时跳闸机制避免误动作，在短路情况下实现毫秒级的快速切断，过压保护针对直流侧组件串联过压以及交流侧电网波动过压分别设定保护阈值，当直流侧过压时，会凭借泄放电阻释放多余的电能，当交流侧过压时，会联动逆变器调整输出电压。如果电压持续超标，会断开对应回路，防止过压致使设备绝缘击穿或者电子元件损坏。

4.2 孤岛效应快速检测与保护技术

孤岛效应快速检测与保护技术运用被动检测和主动检测相结合的方法，被动检测是依靠监测电网侧电压频率、相位以及谐波畸变率的异常变动，以此判断电网是否断开连接。主动检测则是朝着电网注入微小的频率偏移或者谐波信号，依靠观察反馈信号的变化规律确认孤岛状态，当检测系统判定孤岛效应出现时，保护控制器会在 20ms 内发出解列指令，促使并网断路器断开，切断电站与孤立电网的连接。保护系统还有抗干扰设计，可有效区分电网正常检修停电和故障停电，防止非孤岛状态下的误解列，解列后持续监测电网状态，等电网恢复正常并且满足并网条件时，支持自动重合闸功能，保障电站快速恢复并网运行。

4.3 设备过热故障自动化预警与处置

设备过热故障自动化预警与处置系统会在逆变器、主变压器、汇流箱等容易发热的设备的关键部位，安装红外温度传感器以及光纤测温探头，其中红外温度传感器可实时监测设备表面的温度情况，而光纤测温探头则会深入到设备内部的绕组、触头等高发热部件，精准地采集内部温度数据，其测温精度可达到 ±0.5℃。然后将温度数据与设备运行负荷、环境温度进行关联分析，建立发热趋势预测模型，当温度接近预设的预警阈值时，系统会发出声光预警并且推送至运维平台，如果温度持续升高达到故障阈值，便会立即启动处置措施，比如逆变器过热时会自动降低输出功率，变压器过热时会联动冷却系统加大散热强度，如果降温没有效果会切断设备电源，以此防止设备由于过热而致使绝缘老化加速或者出现烧毁故障。

4.4 电网故障下电站解列保护

在电网出现故障的情况下，电站解列保护将电网侧故障类型的识别作为核心要点，借助故障录波装置以及同步相量测量装置，迅速捕捉到电网短路、电压突然下降、频率崩溃等故障所呈现出的特征，如果电网发生了三相短路故障，保护系统会马上触发全站紧急解列，把所有并网回路切断，以此防止故障电流反向灌入电站设备[6]。当电网出现电压骤降并且持续的时间超过了 0.5 秒时，会启动低电压穿越辅助保护，如果电压在规定的时间内无法恢复，执行解列操作，保护系统和电网调度中心维持实时通信，接收电网故障隔离状态的信息，保证解列动作和电网故障处置可协调同步，防止电站过早解列对电网恢复产生影响，或者过晚解列导致故障范围扩大。

5 结论

集中式并网光伏电站电气自动化技术的应用构建了全流程智能化运行体系，其核心价值体现在通过多维度监测实现运行状态的精准感知，借助闭环控制策略优化能量转换效率，依托快速保护机制筑牢设备与电网安全防线。不同应用场景的技术协同联动，既解决了自然条件波动带来的运行不确定性问题，又满足了电网对并网电能质量的严格要求。电气自动化技术的深度应用不仅降低了电站运维成本，更提升了新能源发电的可靠性与可控性。

参考文献：

[1] 张明 . 电气自动化技术在智能电网中的创新应用研

究 [J]. 电子元器件与信息技术 ,2025,9(08):230–232.

[2] 梁伟 . 集中式并网光伏电站中电气自动化技术运用 [J]. 电力设备管理 ,2025,(14):143–145.

[3] 汪钢 , 伍鸿兵 , 龚雷 , 刘春阳 , 李锐 , 王磊 . 集中式光伏电站功率因数调整电费超标的解决方案 [J]. 农村电气化 ,2025,(03):65–68.

[4] 唐静 . 大型光伏电站并网特性和运行控制技术研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2024,(32):1–3.

[5] 赵帧频 . 集中式光伏电站发电效率影响因素与提升对策分析 [J]. 中国高新科技 ,2024,(18):106–108.

[6] 李浩闪 . 集中式光伏电站并网对变电站负荷的影响 [J]. 农村电工 ,2024,32(04):31.

作者简介: 李金全(1998—), 男 , 彝族 , 云南省曲靖市人 , 大学本科，就职于广西桂冠电力股份有限公司柳州事业部，助理工程师，研究方向为电气工程及其自动化专业。