

新能源光伏电站电气控制系统的高效运行优化与稳定性提升研究

汤兴宝

西藏开发投资集团有限公司 西藏自治区拉萨市 850000

摘要: 全球能源转型加快, 新能源光伏电站成了清洁能源供应的关键载体, 其电气控制系统是电站运作的“大脑”, 直接关乎发电效率和安全水平。现在, 光伏电站电气控制系统普遍存在极端气候适应能力差、多设备协同控制慢、故障反应速度低等毛病, 限制了电站整体表现, 本文以“高效运行+稳定保障”为双核心目标, 融合硬件升级, 算法改良, 智能运维技术, 系统剖析现有控制系统的短处, 给出相应的改善方案, 经由改进 MPPT 控制算法, 形成冗余硬件结构, 搭建智能监测平台, 可以使得光伏电站发电效率提高 8%–12%, 故障停机时间缩减 40% 以上, 给光伏电站大规模, 高质量运作给予技术支持。

关键词: 新能源光伏电站; 电气控制系统; 高效运行优化; 稳定性提升策略

我国光伏发电在“双碳”目标推动下电站建设规模不断扩大, 截至到 2024 年底新增光伏装机超过 1.2 亿千瓦、总累计数量连续多年保持世界第一。电气控制系统是整个光伏电站在发电过程中的重要组成部分之一, 在太阳能电池板输出能量跟踪调节与逆变器并网调节等环节中发挥着重要作用, 并对其进行相关监测及安全保护工作。各设备之间协同配合反应速度较慢、出现故障只能依靠人工等方式诊断问题所在等情况发生使得部分电站实际能发出来得比设计预期还要少 15%–20% 左右并且年均由于非人为因素所造成的停止发电次数也达到五次以上的情形比较常见存在。所以, 对光伏电站电气控制系统高效运行及稳定性提升展开研究工作, 既能够解决当下光伏电站的运行痛点问题, 又能为今后建设大型光伏基地、光储一体化项目提供参考借鉴, 具有重要的现实意义和应用价值。

1. 新能源光伏电站电气控制系统运行现状

1.1 硬件设备老化及适配性欠缺

多数投运 5 年以上的光伏电站, 电气控制核心硬件均存在不同程度的老化。一方面逆变器内部 IGBT 模块、电容等高温高频开关状态下的工作元件寿命衰减率高达 10%–15%, 功率转换效率降低 3%–5%; 另一方面早期建设的电站控制硬件多为同型号, 与后期新增光伏组件和储能设备兼容度低, 通信协议不匹配导致数据传输中断问题频发^[1]。如某西北光伏电站因逆变器无法对新添加储能系统进行协同

控制, 使储能设备充放电响应延迟超过 200ms, 浪费约 8% 可利用光伏发电量。

1.2 复杂工况下控制算法的滞后性问题

现有电气控制系统的核心算法 (MPPT 算法、并网调节算法) 大多按照理想工况来设计, 很难应付实际运行中的复杂情况^[2]。一方面传统的扰动观察法 MPPT 在有阴影遮挡或者光照突然改变的时候容易出现跟踪振荡或者误判现象, 最大功率点跟踪精度只有 85% 甚至更低, 这远远低于 95% 的设计标准; 另一方面并网调节算法对于电网电压和频率波动的反应速度较慢^[3]。在电网发生正负百分之五的电压变化时, 逆变器要花上 100 到 200 毫秒才完成一次功率调节工作, 这个时间超过了国家《光伏电站并网技术要求》规定的 50 毫秒的标准; 再者就是缺少多设备协同控制算法, 光伏阵列、逆变器以及储能系统各自独立运转, 并不能根据实时发电量与负荷需求自动调整分配电力资源, 造成整个系统的运行效率非常低下^[4]。

1.3 运维体系智能化水平低

目前光伏电站电气控制系统运维还停留在“定期巡检+故障后维修”的阶段, 智能化程度低。首先设备状态监测需要人工到现场采集数据, 存在数据滞后、遗漏的情况, 约 30% 的潜在故障 (接线端子松动、电容漏液) 无法提前发现; 其次故障诊断主要依靠运维人员的经验判断, 缺少自动化的分析工具, 平均耗时超过 4 小时才能找到问题点, 这远远高

于行业理想的 1 小时内完成定位的目标。最后运维的数据没有形成闭环管理,历史故障数据以及设备运行参数没有得到有效应用,不能为系统优化提供数据支持,导致同类故障重复发生的概率超过 25%^[5]。

2. 新能源光伏电站电气控制系统优化的意义

2.1 提升经济效益,降低发电成本

电气控制系统的高效运行优化能够直接提升光伏电站的发电效率以及设备寿命,从而降低度电成本。一方面通过优化 MPPT 算法、提高设备协同效率可以使得整个光伏电站年发电量增加 8%–12%,以一座 100MW 光伏电站为例,年均发电量可增加约 1000 万度,按上网电价为 0.35 元/度计算,每年新增收益可达 350 万元;另一方面建立预测性运维体系,提前发现设备隐患,减少非计划停机时间,延长设备使用寿命 3–5 年,降低设备更换成本约 20%。在系统中采用新的控制系统后还可以减少无功功率损耗,降低电网电费支出,进一步提高电站盈利水平。

2.2 推动能源转型,确保能源供给

“双碳”目标下,光伏电站作为清洁能源主力军,其稳定运行对于能源转型意义重大。优化电气控制系统可以提升光伏电站并网稳定性,减少控制不当造成的并网故障,减轻对电网的冲击,并且能够更好地适应光储一体化、微电网等新型运行模式,提高光伏电能消纳率,降低弃光现象的发生概率。以我国西北地区为例,通过优化控制系统后,部分光伏电站的弃光率由 10% 下降到 3% 以下,每年多消纳清洁能源约 5 亿度,相当于减排二氧化碳 40 万吨,助力能源结构向清洁化、低碳化方向转变^[6]。

2.3 加强安全保障,防范运行风险

电气控制系统的稳定性关乎光伏电站的安全运行,改进这项工作可以规避设备损坏、电网事故等风险。首先经由创建冗余硬件架构并运用快速故障保护算法,在遭遇逆变器短路或者电缆过热的突发状况下,能在 0.1 秒以内切断回路从而阻止故障扩散,并减小设备损坏损失;改良后的并网控制算法能随时追踪电网参数,当电网电压或频率出现异常的时候立刻脱离电网以免给电网带来冲击而躲避电网处罚危险,再次智能化运维体系可及时监测到设备的温度、电流以及电压这些重要数据信息,并且提前预知火灾还有漏电之类的隐患情况保证电站人员和财产安全^[7]。

3. 新能源光伏电站电气控制系统高效运行优化与稳定性提升策略

3.1 硬件升级,打造高适配性与高可靠性基础

硬件是电气控制系统运行的基础,要经由选型改良、冗余设计以及兼容性改造来改善硬件设备的可靠性和匹配度。核心部件选型优化,优先选用耐高低温、高稳定的器件,逆变器选择车规级 IGBT 模块(工作温度 -40°C – 150°C),电容选长寿命薄膜电容(使用寿命超过 10 万小时)降低高温、低温环境下衰减^[8]。根据电站所在区域气候条件,选取防沙尘、防腐蚀的硬件外壳,在西北干旱地区使用 IP65 防护等级控制柜,沿海地区接线端子采用防盐雾处理。冗余硬件架构设计,在关键控制回路上采用“一主一备”的冗余设计,例如 MPPT 控制器、并网开关等都配备备用设备,当主设备发生故障时可以实现 50ms 的自动切换以保证系统的连续运行;在电源回路增加 UPS 不间断电源避免电网断电造成控制系统瘫痪,保护数据不丢失以及设备安全。新旧设备兼容性改造,对于早期电站硬件与新增设备的兼容性问题,加装协议转换器(如 Modbus 转 IEC61850),实现不同设备之间的通信连接;对老旧控制器进行固件升级,增加储能协同控制、虚拟同步机等功能,使其适应光储一体化、微电网等新型运行模式,避免重复更换硬件设备。

3.2 算法优化,提高控制精度与响应速度

算法是电气控制系统的“大脑”,要改良 MPPT 算法,改善并网调节算法,创建多设备协同控制算法来改进系统控制水平。MPPT 算法改进,适应复杂光照工况:针对传统算法在阴影遮挡、强光下的不足,采用“模糊 PID+ 粒子群优化”复合算法,在模糊 PID 实现快速跟踪的同时,利用粒子群优化算法准确找到最大功率点,使跟踪精度达到 98% 以上;增加阴影检测模块,实时监测光伏阵列的阴影区域,动态调节光伏组串连接方式(如组串级 MPPT),减少阴影对整体功率的影响,让阴影工况发电效率提高 15%–20%。并网调节算法优化:满足电网响应要求:根据 MPC 理论建立并网调节算法,通过对实时预测的电网参数变化进行逆变器输出功率及无功补偿量的提前调整,使得电压、频率偏差响应时间缩短至 30ms 以内,并且符合国家对并网的要求;增加 LVRT 功能,在电网出现低电压时,当电网电压跌落到 0% 的情况下,仍可以保持 150ms 以上的并网运行状态,避免非计划脱网,提高并网稳定性。

多设备协同控制算法搭建,做到系统整体提升,从而把“最大化发电量+最小化运行损耗”当作目标,进一步创建光伏阵列、逆变器和储能系统的协作掌控算法,依靠实时获取到光照强度,负荷需求以及电网电价之类的资料,对光伏发电功率做即时分配工作,优先保证本地负荷所需,在此之后将多余电量充电入储存系统或者并网使用,并调整逆变器运作数量(依据实际收到的太阳光能量状况自动开启与关闭某些台数)以有效的减小空载浪费现象的发生,从而达到使整个系统在各方面表现上提高10%-12%的程度的效果。

3.3 智能运维,构建全生命周期监测管理体系

搭建智能化监测平台、使用预测性维护技术、建立数据闭环管理机制,提高运维效率,降低故障风险。搭建多维度智能监测平台:依托物联网(IoT)技术,在光伏组件,逆变器,控制器等设备上安装温度,电流,电压,振动等传感器,随时获取设备运行数据;经由边缘计算网关做预处理(譬如剔除异常数据,缩减数据),再传到云端平台;云端平台利用可视化界面,运维人员就能远程立刻知晓系统运转情形,削减现场巡视工作量60%以上。

引入预测性维护技术,设备运行数据和历史故障数据,搭建诸如LSTM神经网络的电容寿命预测模型、振动分析轴承故障预测模型等故障预测模型,并在提前1-3个月预知其可能发生的故障,基于不同工况下的维护(比如温度高低),对不同机型设置个性化的巡检频次(比如高温季节逆变器巡检次数增多),代替定期维护。实现故障停机时间缩短40%-50%,维护成本下降25%-30%。建立数据闭环管理机制,并且把设备运行数据、故障数据以及维护数据集中存入数据库,利用大数据分析技术来发掘这些数据的价值,后将分析所得的结果反馈到控制系统改良这个环节当中去,在此过程中可以用来改善控制算法或者调整硬件参数设置,比如依照过去所积累下来的阴影相关资料而适当修改MPPT算法有关于阴影适应方面的那些参数设定。这样就形成了这样一种循环模式:“监测—分析—优化—回馈”,从而持续不断地提高系统的运作效能。

3.4 电网友好型控制与协同互动优化

随着新型电力系统建设推进,光伏电站要由“被动并网”向“主动参与电网调节”转变,在电网友好型控制技术支撑下,实现与电网、其他能源主体的协同互动,提升系统整体灵活性和适应性。建立参与电网辅助服务的控制逻辑,满足

电网调峰、调频需求。利用基于机器学习的光伏出力预测模型(短期预测精度95%以上)和储能充放电特性,形成“光伏-储能联合调峰”逻辑,在电网高峰时释放储能电量并叠加光伏出力,在低谷时用多余光伏电量给储能充电,并根据调度指令动态调整出力曲线;在调频方面,在逆变器算法中加入“虚拟惯量+下垂控制”,模拟传统发电机惯量特性,当电网频率偏差 $\pm 0.1\text{Hz}$ 时能在100ms内通过调节光伏或储能功率来支撑一次调频,接受二次调频指令后可在 $\pm 0.05\text{Hz}$ 范围内精确响应出力要求,符合电网辅助服务标准。强化微电网同虚拟电厂协同控制性能,契合分布式运行环境,“并网/孤岛无缝切换算法”开发出来,模式从一个变另一个之时,在200毫秒内完成负荷功率平衡算计,调改光伏还有储能发出的能量强度大小,保证关键的通信基站用电、居民重要生活电能供应不中断,并且当重新连上电网时相位同步便完成了无扰动转移任务。制定标准化的协同操作界面,经由OpenADR等协议接入到平台之上,把各站点或许多个站点上的光伏发电系统资源以及分散式风电装置、用户侧电池储能设备纳入关联体系中去参与电力现货交易市场活动及辅助服务市场买卖。

结束语:

综上所述,新能源光伏电站电气控制系统高效运作与稳定性,是达成光伏电力建设高质发展的重要保证。笔者从目前的系统控制硬件现状、系统控制算法现状、系统控制运维情况等方面对光伏发电系统的控制存在的问题进行分析,并且根据经济性方面、能源生产性及安全性三个方面论述提升优化的意义,提出了“软硬件升级+算法优化+智能运维”的三维优化策略,并研究发现“硬件升级+算法优化+智能运维”优化策略能提高光伏发电效率、稳定并网率以及改善光伏电站维护工作效率等效果,在一定程度上可以解决现有光伏电站运行问题。

参考文献:

- [1] 魏阳阳.光伏电站电气设备常见问题及解决方案[J]. 灯与照明,2025,49(04):167-169.
- [2] 李勇,邓胜礼,龚英,等.开关量控制模组在抽蓄电站继电保护调试中的应用[J].水电站机电技术,2024,47(12):135-136.
- [3] 贾小平,邓芳辉,席波,等.董箐水电站自主可控箱形阀控制系统改造[J].东方电气评论,2024,38(06):33-36+64.

[4] 胡长斌,蔡晓钦,赵鑫宇,等.含光热电站及碳交易机制下的电气热多能流耦合系统分层优化运行[J].电力建设,2024,45(03):27-38.

[5] 李锡香,刘燕.铅锌冶炼厂6KV系统电气综合自动化改造的实施应用[J].电气传动自动化,2022,44(01):31-35.

[6] 熊曼妮,刘月桥.巴基斯坦卡洛特水电站电气二次设计研究[J].水利水电快报,2021,42(11):92-96+110.

[7] 李海生.船舶自动控制中的BRO智能算法研究[J].

舰船科学技术,2021,43(12):100-102.

[8] 葛延峰,何俊峰,葛维春,等.全钒液流电池储能系统的仿真研究[J].电子测量技术,2020,43(03):21-29.

作者简介:汤兴宝 出生年月:198710 性别:男 民族:汉 籍贯:江苏邳州 学历:本科 职称:工程师 从事的研究方向或工作领域:电气领域生产管理 邮箱:694860537@qq.com