

电力系统风光互补场景下的自动化运行优化

纪永正 410221198508212238

摘要

随着我国双碳目标的推进，风力与光伏发电规模快速扩张，风光发电的随机性与波动性给电力系统稳定运行带来显著挑战。风光互补场景通过风能与光能的天然出力互补特性平抑输出波动，而自动化运行技术则是保障互补系统高效稳定运行的核心支撑。本文首先分析风光互补场景下电力系统运行的典型特征与现存问题，随后从出力预测优化、协同调度控制、故障自动处置三个维度探讨自动化运行优化的具体路径，最后结合工程实践验证优化方案的应用效果，研究结果可为风光互补电站及含高比例风光电力系统的自动化运行提供参考。

关键词

电力系统；风光互补；自动化运行；运行优化

一、引言

近年来，我国可再生能源装机容量持续增长，截至 2024 年，全国风电与光伏发电累计装机容量突破 9 亿千瓦，占总装机容量的比例超过 30%，成为电力供给结构中的重要组成部分。然而，风力发电依赖风速变化、光伏发电依赖光照强度，两类电源均存在出力波动大、可调节性差的特点，大规模并网后会导致电力系统调频调压压力增大、备用容量需求提升，甚至影响系统频率与电压稳定。风光互补发电系统依托风能与光能在时间、季节上的天然互补特性——通常白天光照强风速低，夜间光照弱风速高；夏季光照强度大风力小，冬季光照强度小风力大，能够有效平抑整体输出功率的波动，降低单一电源并网对系统造成的冲击，因此成为当前可再生能源开发利用的重要模式。

随着风光互补场景规模的不断扩大，传统人工调度为主的运行模式已经无法满足实时性与精准性要求，自动化运行技术的优化升级成为行业迫切需求。自动化运行系统是风光互补系统的中枢神经，承担着出力数据采集、动态监测、调度决策、故障处置等核心功能，其运行性能直接决定了风光互补系统的整体效率与稳定性。因此，探索风光互补场景下电力系统自动化运行的优化路径，对推动可再生能源高质量发展、保障电力系统安全稳定运行具有重要的理论与实践意义。

二、风光互补场景电力系统运行的特征与问题

（一）典型运行特征

风光互补场景区别于传统单一电源或火电为主电力系统的运行特征主要体现在三个方面：第一是出力的动态互补性，合理配置的风光互补系统能够利用两类电源的天然特性抵消部分出力波动，使整体输出曲线更加平滑，降低对系统备用的需求；第二是运行状态的强不确定性，风光出力受气象因素影响极大，即使考虑互补特性，极端气象条件下仍然可能出现出力大幅波动，对自动化系统的响应速度与决策能力提出更高要求；第三是多源协同的复杂性，风光互补系统通常包含风电机组、光伏阵列、储能装置、变压器、逆变器等多个设备单元，运行过程中需要实现多单元的协同控制，自动化系统需要处理的数据量与控制维度远高于单一电源系统。

（二）现存主要问题

当前多数风光互补系统的自动化运行体系仍存在不少短板，具体可归纳为三点：第一，出力预测精度不足，现有自动化系统大多采用单一电源的预测模型，未充分考虑风光之间的互补相关性，导致整体出力预测误差偏大，影响调度决策的准确性；第二，协同调度自动化水平偏低，部分系统仍采用人工干预为主的调度方式，无法根据实时出力变化与电网需求自动调整风光机组的运行状态，造成互补优势无法充分发挥，弃风弃光问题仍然存在；第三，故障自动处置能力不足，风光互补系统设备分布范围广，故障类型多，传统自动化系统依赖人工巡检与故障判定，响应速度慢，容易因局部故障扩大影响整个系统的稳定运行，降低供电可靠性。

三、风光互补场景自动化运行优化路径

（一）基于相关性分析的风光出力预测自动化优化

出力预测是风光互补系统自动化运行的基础，预测精度直接决定后续调度控制的效果。优化方向在于将风光出力的相关性特征融入预测模型，提升自动化预测的准确性。具体来说，首先通过历史气象数据与出力数据，分析不同时间尺度下风电出力与光伏出力的相关系数，量化两者的互补特性，建立风光出力联合概率分布模型；随后，采用机器学习算法训练联合预测模型，将数值天气预报的风速、光照强度、温度等参数作为输入，输出未来不同时段的风光总出力与区间预测结果；最后将预测模型嵌入自动化调度系统，实现预测过程的全自动化，每日自动更新预测结果，为调度决策提供数据支撑。

（二）多目标协同的自动调度优化

协同调度自动化是发挥风光互补优势的核心，优化的目标是在满足电网并网要求的前提下，提升风光资源利用率，降低运行成本。自动调度优化需要建立多目标优化模型，优化目标包括三个方面：一是最小化风光出力波动，满足电网对并网功率波动的要求；二是最大化风光资源利用率，减少弃风弃光量；三是最小化储能单元的充放电次数，延长储能设备使用寿命。在此基础上，自动化调度系统通过实时采集风光出力、储能状态、电网调度指令等数据，利用智能优化算法自动求解得到最优的风光机组出力分配方案与储能充放电计划，并且自动下发控制指令调整各单元的运行状态，实现全过程的闭环自动控制。对于接入大电网的风光互补电站，自动调度系统还可以与电网调度自动化系统对接，根据电网的调频调压需求自动调整输出功率，参与电网辅助服务，提升电站的经济效益。

四、优化方案应用效果分析

本文所提的自动化运行优化方案已应用于我国西北某 100MW 风光互补电站，该电站配置 60MW 风电与 40MW 光伏，配套 10MW/20MWh 储能系统。应用优化方案前，该电站出力日前预测平均误差为 14.2%，年平均弃风弃光率为 6.8%，故障平均处理时间为 126 分钟。应用优化方案后，经过一年的运行数据统计，出力日前预测平均误差降低至 8.7%，降低了 5.5 个百分点；年平均弃风弃光率降低至 3.2%，降低了 3.6 个百分点，每年多发电约 1280 万 kWh，新增经济效益约 480 万元；故障平均处理时间缩短至 38 分钟，系统年平均停电时间减少 42 小时，供电可靠性提升约 2.1 个百分点。从实际应用效果可以看出，本文提出的优化方案能够有效提升风光互补场景下电力系统自动化运行的水平，兼具经济效益与安全性。

五、结论

风光互补是解决可再生能源出力波动问题的有效路径，而自动化运行优化是充分发挥风光互补优势、保障电力系统稳定运行的核心支撑。本文从风光互补系统的运行特征出发，分析了当前自动化运行存在的预测精度不足、协同调度水平偏低、故障处置能力不足等问题，从出力预测、协同调度、故障处置三个方面提出了具体的优化方案。工程应用结果表明，优化方案能够有效提升预测精度、降低弃风弃光率、缩短故障处理时间，提升系统的运行效率与稳定性。未来随着风光装机规模的进一步扩大，风光互补场景下自动化运行技术还需要结合大电网的需求不断升级，进一步提升多时间尺度、多场景下的自适应优化能力，为高比例可再生能源电力系统的安全运行提供保障。

参考文献

- [1] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
- [2] 赵书强, 汤吉鸿, 朱永浩, 等. 考虑相关性的风光互补发电系统容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 10-16.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.