

基于多能协同的水风光一体化运行控制策略研究

李杰

嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司，四川 广元 628400

[摘要]处于能源结构转型以及可再生能源大规模发展这样的大背景之下，把水电、风电还有光伏发电整合起来所形成的多能互补系统，已然变成了提高能源利用效率以及保障电网能够安全且稳定地运行的一条极为重要的途径。本研究着重关注水风光一体化系统的运行控制方面的问题，仔细分析了水力发电所具备的灵活调节的能力还有风光发电呈现出的随机波动性的这些核心特性，同时对多能源在时间以及空间维度上互补耦合的内在机理也做了相应的阐释。在这样的基础之上，论文搭建起了一个控制框架，其总体目标是要最大限度地消纳可再生能源，要保证系统在安全的状态下也能实现经济运行，这是一个分层分级的控制框架，并且还设计出了多时间尺度下协调运行的模式。

[关键词]水风光一体化；多能协同；运行控制；互补机理；分层调度

DOI: 10.33142/aem.v7i10.18223 中图分类号: TM732 文献标识码: A

Research on Integrated Operation Control Strategy of Water, Wind and Solar Energy Based on Multi-energy Collaboration

LI Jie

Jialingjiang Tingzikou Water Conservancy and Hydropower Development Co., Ltd., Guangyuan, Sichuan, 628400, China

Abstract: Against the backdrop of energy structure transformation and large-scale development of renewable energy, the integration of hydropower, wind power, and photovoltaic power generation to form a multi energy complementary system has become an extremely important way to improve energy utilization efficiency and ensure the safe and stable operation of the power grid. This study focuses on the operational control issues of the water injection wind solar integrated system, carefully analyzing the flexible adjustment capability of hydropower and the core characteristics of random fluctuations exhibited by wind solar power generation. At the same time, the internal mechanism of complementary coupling of multiple energy sources in time and space dimensions is also explained accordingly. On this basis, the paper constructs a control framework with the overall goal of maximizing the consumption of renewable energy and ensuring that the system can operate economically in a safe state, which is a hierarchical control framework, and a coordinated operation mode at multiple time scales is also designed.

Keywords: integration of water, wind, and solar energy; multi-functional collaboration; operation control; complementary mechanism; hierarchical scheduling

引言

在全球能源转型和应对气候变化的背景下，中国作为全球最大的能源生产国和消费国^[1]，面临着能源结构转型的紧迫任务。为实现碳达峰、碳中和目标^[2]，大力发展战略性新兴产业已成为必然选择。风电以及光伏发电所具备的间歇性、波动性特点，再加上其反调峰特性，这无疑给电力系统的功率平衡以及安全稳定运行造成了极为严峻且前所未有的挑战。在这个情况之下，那些拥有调节水库的水电站，由于其能够实现快速启停，出力调节的范围也较为宽广，并且在调峰调频方面的性能表现得相当

优越，所以它被当作是平抑风光波动极为关键的灵活性资源。将水能、风能、光能等多种不同类型的异质能源展开一体化的开发工作，同时让它们协同运行起来，这已然成为解决可再生能源消纳方面难题的必然之举，对于相关的运行控制策略展开研究，其有着颇为重要的理论价值，同时也存在着不容忽视的现实紧迫性。

1 水风光一体化系统特性分析

1.1 水力发电的运行特性与调节优势

水力发电的运行特性受到诸多因素的显著影响，其中包括水库库容、来水预测精度以及电站综合运用要求等

等,它能够给予稳定且持续的基荷电能,然而其更为突出的长处在于有着极为出色的灵活调节能力。那些具备年调节或者多年调节能力的水电站,可借助水库蓄放水这一方式达成对电能的时空重新分配,如此一来便能够在较长的时间跨度里参与到系统的电量平衡工作当中;至于拥有日调节以及以上能力的水电站,则可迅速对负荷变化或者风光功率波动做出反应,于分钟乃至秒级的时间尺度上给出调峰、调频以及事故备用等一系列辅助服务。这样从秒级一直到年度的宽泛时间尺度调节能力,乃是水电所独具的优势,也为平抑风光发电那种剧烈的波动打下了颇为坚实的物理方面的基础。

1.2 风电与光伏发电的出力特性与不确定性

风电以及光伏发电的出力情况是完全依靠自然气象条件来决定的,这就使得它们有着十分突出的随机性、波动性还有间歇性的特点。风电出力会随着风速按照三次方的方式发生变化,存在明显日变化和季节变化的规律,在短时间内还可能出现大幅度爬坡或者骤然下降的情况;光伏发电具备典型的昼发夜停以及午间出力比较大的日周期特性,而且很容易受到云层移动的影响,进而产生快速的波动情况。这两种电源的出力状况不但很难精准预测,而且其预测误差会随着时长的增加而变得更为显著,这给电力系统的实时功率平衡造成了巨大的压力。所以,怎样去量化并且妥善应对风光出力的不确定性,是设计水风光一体化运行控制策略的时候必须要去攻克的关键科学难题。

1.3 多能互补的时空耦合机理

水风光一体化系统的价值在于水、风、光三种能源在时间与空间方面存在的互补特性。从时间维度来讲,水电有快速调节的能力,可弥补风光出力出现的短期波动情况。而且水库具备蓄能功能,在风光资源丰富的时候能够蓄水,当资源匮乏之际便放水发电,以此达成能量在较长周期内的转移效果。就空间维度而言,我国西部地区一般同时拥有丰富的水能、风能以及太阳能资源,不过这些资源的分布并非完全同步,这种地理分布方面的差异给跨区域的多能互补提供了条件。多能互补的时空耦合机理主要是借助不同能源出力特性在时序上的错位以及空间上的差异,经由优化调度让其相互补充,进而从系统整体层面形成比单一能源叠加更为平滑、可靠且经济的总出力曲线。

2 水风光一体化运行控制目标与框架

2.1 总体控制目标

水风光一体化运行控制所确立的总体目标,实则是一个将安全性、经济性以及清洁性等多种价值导向都纳入其

中的复合体系。其最为关键的目标在于要切实保障电力系统能够安全且稳定地运行起来,务必要确保能够满足系统功率在实时状态下达成平衡这样一项基本的要求。在这一基础已经打好的情况下,控制策略着重去努力实现最大限度地消纳风电以及光伏发电,尽力把弃风弃光这类现象减少到最低程度。与此在控制的整个过程当中,还必须要充分考虑到运行时的经济性方面的情况,竭尽全力去降低这个一体化系统整体的综合运行成本。除此之外,控制目标还得兼顾水力发电自身所存在的综合利用方面的各种需求,像防洪、灌溉、供水还有生态流量保障等这些约束条件也都需要一并予以考虑。

2.2 分层分级控制框架设计

为了切实有效地对上述多个目标加以协调并促使其达成,有必要去构建起一个明晰且合理的水风光一体化分层分级控制框架。这个框架一般能够划分成三个层级:处在最顶层的是协同优化决策层,它属于一体化范畴,主要承担着在较长的时间跨度里制定水电站水库中长期运行计划以及风光电站预期发电计划的任务^[1];处于中间位置的是区域协调控制层,它的关键职责在于把上一层所做出的决策进一步细化成更为详尽的调度指令,同时还要负责应对在日内的运行过程当中所出现的预测偏差以及局部不平衡的相关问题;位于最底层的是厂站本地自动控制层,在这一层当中,各个电站会依据所接收到的调度指令或者本地的测量信号,以较快的速度并且较为精准地去执行有关功率调节的命令。

2.3 多时间尺度协调运行模式

水风光一体化系统运行控制需贯穿从规划年直至实时的完整时间序列,形成多时间尺度紧密相连的协调运行模式。在年度以及月度等中长期尺度方面,关键任务在于制定水库的长期调度曲线,预留足够调节库容来应对风光资源的季节性变化情况。在日尺度层面,依据最新的风光以及负荷短期预测,开展日前发电计划编制工作,优化确定次日各电站的计划出力情况。在日内以及实时尺度层面,主要借助水电的自动发电控制能力,滚动修正计划内容,实时平抑由于风光预测误差以及负荷波动所引发的功率偏差情况。这三个时间尺度的运行模式彼此嵌套,信息前馈与反馈相互交织,一同构成一个动态调整的闭环控制流程。

3 多能协同运行控制策略研究

3.1 中长期电量平衡与水库调度策略

中长期时间尺度着重关注电能总量的平衡情况以及水库能量的战略储备事宜。此策略的关键点在于科学合理

地制定水库的蓄放水计划，让水库的蓄能状态能够与预期的风光资源变化趋势实现较好匹配。当风能和太阳能资源预计会比较丰富的时候，可适当安排水电减少发电或者多蓄水，优先去利用风光电能；而要是风光资源预计会匮乏的时候，那么就要加大水电的出力程度。在这个过程中，得依靠长序列的历史数据、预测模型，同时还要考量风险的优化方法，以此来制定出既能兼顾预期效益又能具备风险抵御能力的水库调度规则，进而为短期运行的灵活性给予充足的调节容量空间。

3.2 短期日前计划与出力优化分配策略

短期日前发电计划的编制工作，这在中长期规划以及实时运行之间起到关键的衔接作用。该优化问题一般把系统总运行成本要尽可能小或者弃风弃光量要尽可能少当作目标函数。其约束条件涵盖了系统功率需要保持平衡、水电发电所用的水量还有水库库容的动态情况、机组出力的上下限以及网络安全方面的约束等等^[2]。因为风光预测会存在一定误差，为了提高计划的鲁棒性，常常会运用随机优化或者是鲁棒优化的方法。优化得出的结果，不但能够给出各个电站的计划数值，而且更为重要的是能明确水电在平抑风光波动时的预期调节任务。出力优化分配策略是否有效，完全依赖于预测的精度以及优化模型的适应性情况。

3.3 实时平衡与水电快速调节策略

实时运行这个阶段所面临的关键挑战在于要处理那种分钟级甚至秒级的功率不平衡情况，在此之时，维持系统瞬时平衡的重担便主要由具备快速调节能力的水电机组来肩负了。实时平衡策略是依靠自动发电控制系统来施行的，该系统会不停地去监测系统频率或者联络线功率出现的偏差情况，并且会给水电机组发出相应的调整指令。水电站自身有着响应速度比较快以及调节精度较高的优势，所以它可以较为有效地去跟踪风光呈现出的那种快速波动状况。为了尽可能地将水电的调节效能发挥到最大，或许得依据实时风光出力的具体情形来动态地去调整水电的工作点，同时要留出足够多的双向调节容量。

3.4 信息交互与协同控制流程

高效且可靠的信息交互在其中充当着极为关键的角色，它好比是实现上述多时间尺度以及分层分级控制策略协同执行的神经系统。整个协同控制流程是从数据采集开始的，在各个电站当中分布着各式各样的测量装置，这些装置会实时地把多源数据上传到一体化调度平台。平台里面的高级应用软件凭借这些数据来完成预测以及优化决策方面的相关工作。之后，决策指令会通过调度数据网络

传达至各个电站的控制系统，而电站的执行结果以及运行状态又会反馈回调度中心，如此便形成了一个闭环。这一流程对信息流有着严格的要求，即信息流必须要保持畅通无阻、准确无误并且传递要及时。在设计协同控制流程的时候，务必要明确各个环节的时序要求以及异常处理机制，从而确保调度人员可以清晰地掌握全局的运行状态。

4 策略实施的支撑条件分析

4.1 一体化调度平台与技术支持

水风光一体化运行控制策略要顺利落地实施，得依靠一个功能颇为强大且能融合各类数据的一体化调度平台当作技术方面的承载工具^[3]。这个平台要把水电监控系统、新能源功率预测系统以及能量管理系统等诸多系统的各项核心功能都给集成起来。并且，该平台务必要备有较为先进的应用软件，像那些考虑了多能互补特性所涉及的中长期优化调度功能、短期安全约束经济调度功能以及实时自动发电控制功能等高级功能模块都得包含在内。与此要想让调度决策得以优化，那么提升风光功率预测的精度便是其基础所在。除此之外，这个平台还得具备较强的仿真推演以及决策支持的能力，能够针对各种各样的可能场景展开模拟分析。

4.2 市场机制与政策保障

必须构建与之相适应的电力市场机制与政策环境。在现货市场里，一体化运营主体能够作为一个整体去参与报价，借助水电所具备的灵活性来对冲风光出力方面存在的不确定性风险。辅助服务市场应当合理地体现出水电所提供的调峰、调频等服务所具有的价值，要建立起成本传导机制。从政策层面来讲，需要对可再生能源配额制以及绿色电力证书交易制度加以完善。与此针对那些承担着重要调节任务的水电站，应当着手研究并建立与之相应的生态补偿或者容量补偿机制。市场机制和政策保障发挥共同的作用，这能够为水风光协同运行给予持久且强劲的内在经济驱动力。

4.3 通信与数据安全要求

水风光一体化系统在广泛互联以及高度自动化的进程当中，其通信网络和数据安全面临着颇为严峻的考验。数量众多且实时更新的数据得在调度中心和电站之间实现高速并且可靠的传输，这就要求构建起覆盖范围较为完备且具备高可靠性特点的电力专用通信网络。就数据安全来讲，务必要建立起严谨的数据分级分类保护方面的制度，并且运用加密传输、访问控制这类技术手段^[4]。与此还得强化针对一体化调度平台以及各类终端设备的安全防护举措，制定出详尽周全的网络安全应急预案，以此来抵御

有可能出现的网络攻击情况。

4.4 对现有电网运行模式的适应性分析

水风光一体化运行控制新模式的引入,会对我国现有的电网运行模式产生影响。在技术层面,新模式要求调度机构有更强的跨区域协调优化能力。在管理层面,一体化运行可能涉及跨省跨区的利益协调,需要建立更有效的利益分配机制。在运行习惯上,需要改变传统的调度思维与工作流程。新模式的成功推广依靠通过试点示范积累经验,逐步完善技术标准与管理规范,实现向新型电力系统运行模式的平稳过渡。

5 结束语

本研究围绕水风光一体化系统的运行控制问题展开了系统性探讨,从分析电源特性与互补机理出发,构建了多层次、多时间尺度的协同控制目标框架。研究提出的系列化控制策略及支撑条件分析,初步形成了一个相对完整的策略体系。水风光一体化协同运行是提升可再生能源消纳水平的有效路径,但其成功实施是技术、市场、管理协

同演进的结果。未来控制策略会朝着智能化、市场化方向发展。

[参考文献]

- [1]付德志,周佳,李亮,等.流域水风光一体化基地电源配置模式研究[J].人民长江,2025,56(9):242-251.
- [2]王进,曹辉,徐杨,等.水风光系统极端运行场景识别及调度方法研究[J].人民长江,2025,12(8):1-11.
- [3]曹海,许誉赛,张迪,等.“双碳”目标下西南地区水风光能源协同发展对策 [J]. 水利水电技术 (中英文),2025,56(2):733-739.
- [4]吴双杰,赵乔,余安琪,等.基于误差补偿机制的流域梯级水风光一体化多时间尺度滚动优化调度[J].水利水电技术 (中英文),2025,12(8):1-16.

作者简介: 李杰 (1987.6—), 男, 毕业院校: 西安交通大学, 所学专业: 热能与动力工程, 当前就职单位: 嘉陵江亭子口水力水电开发有限公司, 职务: 运维部总值长, 职称级别: 中级工程师。