



“双碳”背景下抽水蓄能在智能变电站的应用

关 宁, 张艺翔

(郑州铁路职业技术大学, 河南 郑州 451460)

摘 要: 在“双碳”目标的引领下, 现代电力系统需要更高比例的新能源支持, 这对电网的灵活调节能力提出了更高要求。抽水蓄能作为现代规模大、技术领先、寿命周期长的物理储能方式, 在电能存储、系统调峰、频率支持等方面具有重要作用。智能变电站作为现代电力控制枢纽, 正不断向数字化和网络化升级。对此, 研究围绕抽水蓄能的技术构成和国内外研究现状, 重点探讨了智能变电站在工程应用模式、运行机制等方面的融合路径, 重点分析了其在高效消纳、电压支撑、黑启动和故障应急等方面的核心应用, 对推动新型电力系统建设服务, 保证“双碳”战略落地具有较大的工程价值和现实意义。

关键词: 抽水蓄能; 变电站; 电力调节; 消纳

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0793

中图分类号: TM 76

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3665-03

Application of pumped storage energy in intelligent substations under the background of dual carbon

GUAN Ning, ZHANG Yixiang

(Zhengzhou Railway Vocational & Technical University, Zhengzhou 451460, Henan, China)

Abstract: Under the guidance of the "dual carbon" goal, modern power systems require a higher proportion of new energy support, which puts higher demands on the flexible regulation capability of the power grid. Pumped storage, as a modern large-scale, technologically advanced, and long-life physical energy storage method, plays an important role in electricity storage, system peak shaving, frequency support, and other aspects. As a modern power control hub, intelligent substations are constantly upgrading towards digitization and networking. In this regard, the research focuses on the technical composition of pumped storage energy and the current research status at home and abroad, with a focus on exploring the integration path of intelligent substations in engineering application modes, operation mechanisms, and other aspects. The core applications of intelligent substations in efficient consumption, voltage support, black start, and fault emergency response are analyzed, which has great engineering value and practical significance for promoting the construction of new power systems and ensuring the implementation of the "Dual Carbon Strategy".

Keywords: pumped storage energy; substation; power regulation; consumption

“碳达峰”和“碳中和”是我国能源科技革命 应对能源危机的重要战略部署。以风电、光伏为核

收稿日期: 2026-09-09; 修改稿日期: 2026-09-14。

第一作者及通信联系人: 关宁 (1988—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电气工程及其自动化, E-mail: gn0512@163.com。

引用本文: 关宁, 张艺翔. “双碳”背景下抽水蓄能在智能变电站的应用[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3665-3667.

Citation: GUAN Ning, ZHANG Yixiang. Application of pumped storage energy in intelligent substations under the background of dual carbon[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3665-3667.

心的可再生能源发电,在未来将会成为国内电力供应的主力。但是其波动性特征给电网功率平衡带来了巨大的挑战。传统变电站电力调节能力有限,对于极端情况响应速度不足,难以适配大规模新能源并网后可能出现的复杂工况^[1]。抽水蓄能具有容量大、寿命长、效率高等优势,是全球范围内应用最广泛的储能技术之一。将抽水蓄能与智能变电站进行一体化规划和协同控制运行,可以充分发挥储能技术的动态调节优势,弥补智能变电站在功率缓冲、紧急响应、新能源适配等方面的短板。

1 抽水蓄能系统构成与研究进展

1.1 抽水蓄能系统结构分析

抽水蓄能整体结构主要包括上、下水库、输水系统、可逆水轮发电机组以及电气控制系统等。其中上水库和下水库共同构成了能量存储与能量循环的基础载体,不同位置的水库可以通过空间差和水位控制构建势能储备。输水系统主要包括两端水口、引水渠道、压力管道、调压设施以及尾水系统,多部分协同承担水体的输送工作。可逆机组是系统的核心,一般具有水泵和水轮机的双重工作模式。在用电低谷期,将下水库水体抽送到上水库,完成电能向重力势能的能量转换,而在用电高峰期,则反过来利用水流驱动机组发电,实现重力势能到电能的释放,电气系统则可以通过变压器、开关设备、电力保护设备实现电网的交互与连接,保证整个发电结构的闭环和稳定^[2]。

1.2 国内外抽水蓄能技术研究进展

国际上抽水蓄能发展历史较长,整个技术体系较为成熟。其研究重心一般集中在高水头、大容量、高效率的大型机组开发,变速调节技术优化以及地下储能、海洋抽水蓄能、矿坑改造等场景拓展。其中,欧美、日本等发达国家更多倾向于开发变速抽水蓄能技术、全数字化控制技术,近年来在系统集成优化等方面取得了重要突破,其开发设计较为注重提升机组工况效率,快速响应能力以及与电网的协调控制能力。

我国的抽水蓄能在近代呈现出跨越式发展态势,已经形成了完整的设计制造、建设和运行体系^[3],其研究方向大多聚焦于大型机器设备的国产化改造,关键设备自主研发以及工程标准的智能化升级。在机组本体方面,目前国内相关研究团队已

经突破大容量可逆机组、变速机组、高水头装备等核心技术;在系统控制方面,围绕智能调度、状态监测、故障诊断、数字孪生等方向开展深度研究;在应用场景方面,积极推进混合式抽水蓄能、城市紧凑型储能、新能源配套储能等新模式。总体来看,我国抽水蓄能正朝着大容量、高参数、智能化、市场化方向快速发展,为其在智能变电站中的规模化应用奠定了坚实技术基础^[4]。

2 抽水蓄能在智能变电站中的技术应用

2.1 高效消纳

在新能源电力大规模并入电网的背景下,风电、光伏等清洁能源通过智能变电站并入电网时,出力波动会直接影响母线侧功率,从而引发电压波动和弃风弃光等现象。抽水蓄能凭借自身容量大多可调等技术特征,可以与智能变电站形成闭环控制,从而实现新能源功率的平滑消纳以及高效利用。

现代智能变电站可以通过站内测控设备、合并单元以及通信网络实时采集新能源发电数据、负荷波动数据、母线电压电流运行数据,并将上述数据集中传输到统一的分析测控平台,平台可以根据功率偏差,向抽水蓄能机组下发控制指令,实现功率实时匹配。电网出现功率过剩时,抽水蓄能以抽水模式运行,将多余清洁电能转化为水的势能进行存储,避免因功率倒送或电压越限导致新能源限电;当夜间或无风时段新能源出力不足,电网供电压力增大时,抽水蓄能快速切换至发电模式,通过智能变电站向负荷中心输送电能,弥补功率缺口^[5]。

2.2 系统调频与电压支撑

在现代电网中,智能变电站是维持电网频率稳定,保证电压合格的重要载体。随着系统惯量的不断下滑,传统电力调节手段越来越难以满足电网快速波动时的工况控制需求。抽水蓄能可以为智能变电站提供有功调频和无功调压的多项支撑,明显提升电网运行的稳定性。在系统频率调节方面,抽水蓄能具有快速反应和双向调节能力,可以同时参与一次调频和二次调频。当电网频率出现小范围波动时,抽水蓄能相关设备可以在毫秒响应范围内,响应频率偏差,然后通过快速增减出力,维持系统平衡。而当电网出现较大的频率扰动或者需要在较长

时间内维持额定频率时,智能变电站就可以根据指挥中心命令,控制抽水蓄能持续在额定功率下进行输出,完成二次调频,保证电网频率可以稳定保持在一个安全范围内。而在电压支撑方面,抽水蓄能发电电机可以持续调节无功功率,协同智能变电站内的电容、电抗、SVG设备形成协同补偿体系。在正常运行状态下,抽水蓄能承担平滑类无功调节任务,实时跟踪电压变化,并对其进行感应输出。一旦出现雷击、故障跳闸、大容量设备启动后的电压骤变,抽水蓄能可瞬时输出无功支撑母线电压,抑制电压闪变与跌落,避免保护装置误动或设备绝缘损坏。

2.3 黑启动与故障应急恢复

极端情况下,智能变电站如果出现全站失压,将可能导致区域供电中断。传统恢复策略一般是依靠尾部电源和小型的应急机组。这种方式整体恢复速度较慢,可靠性低。抽水蓄能具备独立的黑启动能力,可以作为智能变电站应急恢复的可靠外部能源连接,大幅度提高电网故障自适应水平。在电网出现严重故障且智能变电站失去外部电源时,抽水蓄能设备无需依赖传统电网励磁同步,可以仅依靠自身蓄水和厂用电设备设施自主启动,快速建立稳定的电压,并提供智能变电站的供电链路。一般情况下,黑启动过程会按照分步策略执行,首先由抽水蓄能机组进行空载启动,建立稳定的机端电压完成同期并网;随后为智能变电站主变压器、站用电系统、保护测控装置、断路器操作机构等关键设备供电,恢复站内二次系统运行;最后就是根据重要负荷的优先级权重,逐步恢复线路,包括配电装置和用户供电等,实现电网有序重构。在整个应急恢复过程中,抽水蓄能需要与智能变电站保护系统紧密配合,通过故障检测、闭锁逻辑等方式避免故障合闸,确保黑启动安全运行。抽水蓄能参与黑启动可以有效缩短用电恢复时间,提高智能变电站在极端工况下的生存能力,对于保障重要用户供电,提高电网韧性有着重要作用。

3 结 语

在“双碳”目标推进和新型电力系统升级的双重背景下,智能变电站作为电网核心枢纽,需要更灵活的调节能力以及更安全稳定的运行环境。抽水蓄能技术目前已经趋于成熟,整体调节性能优越,环保效益突出,是支撑智能变电站升级发展的重要储能形式。本研究从抽水蓄能的系统构成、研究进展出发,系统分析了抽水蓄能在智能变电站中的各类应用,包括其技术路径和运行机理。研究表明,抽水蓄能与智能变电站的深度绑定,可以有效提高电网运行的灵活性、安全性和经济性,从而促进社会与环境收益。

参 考 文 献

- [1] 王洪,苗树国,冷旭东.变电站站用电源系统一体化设计的研究[J].电力系统装备,2026(3):55-57.
WANG H, MIAO S G, LENG X D. Research on integrated design of power supply system for substation[J]. Electric Power System Equipment, 2026(3): 55-57.
- [2] 张沈习,王浩宇,李然,等.考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法[J].中国电机工程学报,2023,43(1):48-60.
ZHANG S X, WANG H Y, LI R, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 48-60.
- [3] 陈峰,赵鹏.基于可逆抽水蓄能的新能源配电网协调优化方法[J].中国电力,2025,58(8):103-108.
CHEN F, ZHAO P. Coordination optimization method for new energy distribution network based on reversible pumped hydro-storage[J]. Electric Power, 2025, 58(8): 103-108.
- [4] 赵国斌,郭德存,王汉斌.新时代抽水蓄能电站工程地质勘察重点[J].水力发电,2023,49(3):33-39.
ZHAO G B, GUO D C, WANG H B. Key points of engineering geological investigation of pumped-storage power station in new era[J]. Water Power, 2023, 49(3): 33-39.
- [5] 韩俊伟,张璐璐,刘建新.玉米秸秆饲料化预处理研究进展[J].饲料工业,2025,46(11):155-160.
HAN J W, ZHANG L L, LIU J X. Research progress on feed pretreatment of corn straw[J]. Feed Industry, 2025, 46(11): 155-160.