



分布式水力发电与超级电容器联合调频控制策略

潘越

(河南省水文水资源中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 分布式水力发电具有灵活度高、环境污染小等优势, 但是自身也存在受外界影响大、单机容量小、调频困难等问题。超级电容器作为高效储能设备, 充放电速度快、功率高, 可以与分布式水力发电系统联合运行, 实现电力电网调频控制。本文对分布式水力发电与超级电容器联合调频控制技术进行综述, 首先探讨了分布式水力发电技术类型, 然后重点分析了超级电容器技术在分布式水力发电调频控制中的应用, 包括二者的系统集成方式以及相应的控制路径等, 为分布式水力发电与超级电容器联合调频系统的工程应用和技术优化提供参考。

关键词: 水力发电; 超级电容器; 调频控制; 系统集成

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0416

中图分类号: TM 53

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2338-03

Joint frequency control strategy of distributed hydroelectric power generation and supercapacitors

PAN Yue

(Henan Provincial Hydrology and Water Resources Center, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Distributed hydropower generation has the advantages of high flexibility and low environmental pollution, but it also has problems such as being greatly affected by external factors, small single unit capacity, and difficult frequency regulation. As an efficient energy storage device, supercapacitors have fast charging and discharging speeds and high power, and can be operated in conjunction with distributed hydroelectric power generation systems to achieve frequency regulation control of the power grid. A research review on the combined frequency regulation control technology of distributed hydropower generation and supercapacitors was conducted. Firstly, the types of distributed hydropower generation technology were discussed, and then the application of supercapacitor technology in distributed hydropower generation frequency regulation control was analyzed, including the system integration mode and corresponding control path of the two, providing reference for the engineering application and technical optimization of the combined frequency regulation system of distributed hydropower generation and supercapacitors.

Keywords: hydroelectric power generation; supercapacitors; FM control; system integration

分布式能源因为自身布局灵活、可以就近供电、环境影响小等优势, 成为现代电力系统的重点开发项目。而分布式水力发电, 作为分布式能源生产的核心, 可以依托小型河道、灌溉渠道等多类型

收稿日期: 2026-05-15; 修改稿日期: 2026-05-22。

作者简介: 潘越 (1990—), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事水资源调度管理工作, E-mail: py906py@163.com。

引用本文: 潘越. 分布式水力发电与超级电容器联合调频控制策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2338-2340.

Citation: PAN Yue. Joint frequency control strategy of distributed hydroelectric power generation and supercapacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2338-2340.

水资源载体, 无需大规模建坝, 即可实现水资源与电能之间的高速转化。但是分布式水力发电的大规模并入电网, 也给电网频率稳定性带来了挑战。传统分布式水力发电调频响应速度慢、调节精度较低, 电网功率失衡问题日益突出。超级电容器的出现, 有效缓解了上述问题, 通过二者协同调频, 可以明显提升水力发电并网稳定性^[1]。

1 分布式水力发电技术研究

1.1 小型引水式水力发电技术

小型引水式水力发电技术目前应用最广泛, 也是技术最成熟的发电技术类型之一^[2]。其核心原理是通过修建引水渠道, 将天然河道内的水资源与下游河道联通, 构建水流势能, 驱动水轮机带动发电机发电。设备配置上, 小型引水式发电系统主要包括引水建筑物、前池、压力管道、小型水轮机、发电机、控制系统, 单机装机容量普遍在 100 kW~5 MW。其技术要点升级在于提高水资源的势能和饮水效率, 降低水头损耗。从实际应用角度, 小型引水式发电系统受上游来水量影响较大, 存在明显的处理波动。目前, 该技术普遍应用于我国西南山区和江南丘陵地区。

1.2 管道分布式水力发电技术

管道式分布式水力发电技术主要依托固定输水管道, 通过管道内水流的额外压力动能, 实现发电的新型节能水力发电技术。其核心原理是通过盛水供水管网、水库和灌溉渠道引水, 形成管道水流压力差 (通常为 0.1~1.0 MPa), 然后将水流压力动能转化为机械能, 驱动管式水轮机发电。该技术的核心设备一般为管式水轮机, 结构紧凑、体积小, 可以根据水流压力灵活定制。单机装机容量一般在 10~100 kW, 属于微型分布式发电范畴^[3]。

1.3 免筑坝分布式水力发电技术

免筑坝分布式水力发电技术是最近几年开发并兴起的水力发电技术, 最直观的特征就是无需修建拦河坝, 直接应用天然河道的水流动能发电。根据设备部署方式, 免筑坝分布式水力发电技术一般为漂浮式和固定式两类, 其中漂浮式就是将水轮机与发电机控制系统集成在漂浮台上, 然后通过锚链固定在河道上, 可以通过水流变化灵活调整位置。而固定式就是将水轮机固定在河道底部, 通过支架支撑, 适用于水深较低的中小河流。该技术的核心设

备为低水头、大流量水轮机, 常用类型包括轴流式、贯流式水轮机, 设计重点是提升水流动能的捕获效率, 通过优化水轮机叶片形状、增大叶片面积、优化叶片角度, 提高水轮机的能量转化率, 单机装机容量通常在 50 kW~1 MW。

2 超级电容器在分布式水力发电调频控制中的应用

2.1 超级电容器与分布式水力发电系统的集成

超级电容器在分布式水力发电调频控制中的核心工作, 就是通过自身快速充放电性能, 及时调节功率, 平抑出力波动, 同时响应调频指令。实现上述目标的前提就是发电系统和超级电容器的集成。

2.1.1 单机分布式水电系统超级电容器集成

单机分布式水电系统是超级电容器应用最广泛的水电系统之一, 其集成路径一般会采用直流侧并联集成模式。这种模式是将超级电容器模块通过双向 DC-DC 变换器, 与水轮机发电直流侧并联, 实现电能充放电与功率调节。其优势在于拓扑结构相对简单, 具有更强的适配性, 可以直接适配现有的单机发电系统, 并支持后续的升级和改造。具体集成步骤如下: 首先根据单机发电系统额定功率、出力波动幅度值结合调频需求, 设定超级电容器容量和功率参数。然后选择合适的双向 DC-DC 变换器, 额定功率需与超级电容器额定功率匹配, 转换效率不低于 95%, 最后将超级电容器模块与 DC-DC 变换器组合, 通过控制线与发电系统建立 PLC 控制连接, 实现调频功能。

2.1.2 多机集群分布式水电系统超级电容器集成

多机集群分布式水电系统的电力出力波动更复杂, 单一的超级电容器模块很难满足调频需求。因此, 需要设置集中式的超级电容器储能站, 再通过 AC-DC-AC 变换器与集群系统的母线连接, 实现对整个集群系统的统一调频控制。首先建立多机集群出力波动分析模型, 一般会通过 MATLAB 或 Simulink 仿真工具, 模拟不同工况下的出力波动情况, 确定集中式超级电容器储能站的总功率和总容量; 然后设计集中式超级电容器储能站的拓扑结构, 最后将集中式超级电容器储能站和多机集群系统的公共母线连接, 建立 EMS 控制通信系统, 同时接入区域电网调度控制系统, 影响电网调频指令。

2.2 超级电容器调频控制路径

2.2.1 SOC 分层控制

超级电容器的荷电状态 (SOC) 会直接影响其充放电性能, 所以目前许多电站选择 SOC 分层控制策略, 就是将 SOC 值划分不同层级, 实现对超级电容器储能设备的精准控制, 然后作用于整个电网网。

SOC 分层控制策略的核心是通过储能管理系统 (EMS) 实时监测超级电容器的荷电状态, 通过分析其电压、温度等参数, 结合分布式水电系统的出力数据、电网调频控制指令, 基于 PLC 控制系统, 建立控制逻辑, 执行对应的充放电规则, 最终实现对电网的调频工作。

2.2.2 模糊 PID 协同控制

由于分布式水力发电系统的出力波动具有明显的不确定性特征, 常规的 PLD 控制技术很难满足其动态调频精度要求, 因此现在许多电站开始采用模糊 PID 协同控制策略。因模糊 PID 协同控制策略有效结合了模糊控制的自适应特征和 PID 的调频响应精度, 可以根据水电站电力波动的动态变化, 自适应调整超级电容器控制参数, 从而提高调频精度和响应速度, 是现代超级电容器控制策略的核心选择之一。具体应用路径如下: 首先是确定控制目标参数, 该参数需要将分布式水电系统的出力波动幅度控制在 5% 以内, 同时跟踪电网调频指令误差控制在 2% 以内; 然后是设计模糊控制规则, 根据输入参数变化范围, 确定模糊子集, 设计相关 PID 调节系统模块, 将模糊控制器的输出值作为 PID 控制的定值, 确保系统稳定运行。最后实现协同控制逻辑, 也就是将模糊 PID 控制器和超级电容器管理系统建立实时通信和指令循环通路。

2.2.3 虚拟同步机控制

分布式水力发电系统大规模接入电网, 传统同步电源占比不断下降, 电网惯量支撑能力也在不断衰减, 区域电网可能出现惯量轻、阻尼弱等问题。虚拟同步机 (VSM) 可以构建模拟情景, 将超级电容器储能系统转化为同步发电机, 并构建运行轨迹, 保证其具备虚拟惯性和阻尼特征, 可以为电网

提供稳定的惯量支持。同时提升分布式水电系统和电网协同控制能力, 缓解惯量异常下的电网频率波动问题。虚拟同步机控制技术最重要的部分就是构建超级电容器的虚拟同步机模型。该模型一般会以同步发电机的转动运动方程为基础, 结合超级电容器的充放电特征, 生成虚拟同步机数学逻辑模型, 将超级电容器的储能特征有效转化为虚拟转动惯量。然后设计虚拟同步机的控制逻辑, 包括虚拟同步机控制器实时监测网络, 最后与分布式水电系统协调运行, 构建虚拟同步机和水轮机控制系统。

3 结 语

分布式水力发电技术作为可再生能源的重要组成部分, 在新型电力系统开发中具有重要地位。但是因其自身波动性大, 调频响应慢等特性, 难以直接适应国内电网调频需求。超级电容器储能技术凭借自身充放电速率快, 功率密度高等优势, 可以有效提升系统调频效果。未来, 相关研究可以进一步优化超级电容器集成拓扑结构算法, 提高储能效率和调频精度, 帮助新型电力系统向稳定化、可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 贾东梨, 任昭颖, 刘科研, 等. 协调分布式发电商与负荷用户利益的综合能源站的优化运行[J]. 中国电力, 2025, 58(12): 128-136.
JIA D L, REN Z Y, LIU K Y, et al. Optimization operation of integrated energy station coordinating the interests of distributed generation provider and load users[J]. Electric Power, 2025, 58(12): 128-136.
- [2] 苏新凯, 赵璐璐, 陈彦桥, 等. 超级电容器产业化研究与应用综述[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(8): 2994-3003.
SU X K, ZHAO L L, CHEN Y Q, et al. Review of the research on industrialization and applications of supercapacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(8): 2994-3003.
- [3] 蔡春强, 周海勇, 宋俊毅, 等. 基于超级电容器的稳压技术对变频器电压暂降耐受能力研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 115-124.
CAI C Q, ZHOU H Y, SONG J Y, et al. Research on voltage sag tolerance of variable frequency drive based on supercapacitor voltage stabilization technology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 44(2): 115-124.