

重力储能与抽水蓄能混合系统的容量优化配置

刘 朗

四川宏雨建筑工程有限公司 四川广安

【摘要】本文研究了重力储能与抽水蓄能混合系统的容量优化配置问题。结合两种能量储存方式的特点，提出了一种新的优化模型，用以实现两者的协同效应。通过优化配置，可以在保证系统稳定性和运行效率的前提下，降低整体能量存储成本。文章通过数学建模，分析了系统的功率需求、能量存储容量以及操作限制等因素，提出了相应的优化算法。重力储能与抽水蓄能的混合系统在应对大规模电力负荷波动和提升能源使用效率方面具有明显优势。本研究的成果对于能源系统的灵活性与稳定性提供了理论支持和实践意义。

【关键词】重力储能；抽水蓄能；容量优化；混合系统；能量存储

【收稿日期】2025 年 7 月 16 日

【出刊日期】2025 年 8 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250379

Capacity optimization configuration of hybrid gravity energy storage and pumped storage system

Lang Liu

Sichuan Hongyu Construction Engineering Co., Ltd. Guang'an, Sichuan

【Abstract】 This paper studies the problem of capacity optimization configuration for the hybrid system of gravity energy storage and pumped storage. Combining the characteristics of these two energy storage methods, a new optimization model is proposed to realize their synergistic effect. Through optimal configuration, the overall energy storage cost can be reduced under the premise of ensuring system stability and operational efficiency. By means of mathematical modeling, the paper analyzes factors such as system power demand, energy storage capacity, and operational constraints, and proposes a corresponding optimization algorithm. The hybrid system of gravity energy storage and pumped storage has obvious advantages in coping with large-scale power load fluctuations and improving energy utilization efficiency. The results of this study provide theoretical support and practical significance for the flexibility and stability of energy systems.

【Keywords】 Gravity energy storage; Pumped storage; Capacity optimization; Hybrid system; Energy storage

引言

电网对储能系统的需求在可再生能源快速发展的背景下不断增加，尤其是需要平衡电力供应与需求波动的系统。传统的抽水蓄能技术广泛应用，但其高成本和长建设周期限制了大规模推广。重力储能作为一种新兴技术，凭借较低的成本和简便的原理，逐渐受到关注。单一储能技术往往难以满足电网在负荷波动时的调节需求。为此，将重力储能与抽水蓄能结合，形成混合系统，能够充分发挥两者的优势，提高能源系统的灵活性和调节能力。本文研究了重力储能与抽水蓄能混合系统的容量优化配置问题，并提出了一种综合优化模型，旨在为实际应用提供理论支持和决策依据。

1 重力储能与抽水蓄能系统的特性分析

重力储能与抽水蓄能系统作为两种不同的储能技术，各自具有不同的特性和应用场景。重力储能系统利

用地球引力作为能量存储和释放的手段，通常通过提升重物或液体到较高的高度来储存能量，当需要释放能量时，重物或液体下落，驱动机械装置或发电机产生电能。其工作原理简便、成本相对较低，并且可以灵活部署。重力储能系统的储能密度较低，且受空间和地理条件限制较大，适用于规模较小或辅助性储能的场合^[1]。相比之下，抽水蓄能系统则是一种成熟的储能技术，利用电力将水从低处抽升至高处的水库进行储能，并在需要时通过水流释放能量发电。抽水蓄能的优势在于其储能密度较高，可以大规模建设，适合大规模电网负荷调节，且具备较长的使用寿命。抽水蓄能系统建设周期长、成本高，且对地理条件要求较为严格。

尽管两者各自有优缺点，但当它们结合在一起时，能够弥补彼此的不足。重力储能的低成本和快速部署优势能够与抽水蓄能的高效能量存储能力形成互补。

混合系统可以根据不同的储能需求灵活调节重力储能与抽水蓄能的比例,从而实现最佳的储能效果和系统经济性。通过合理的容量配置和调度管理,混合系统能够提供更加灵活和高效的能源管理解决方案。在混合系统中,重力储能可以在负荷波动较大的时段迅速提供短时间的能量支持,而抽水蓄能则可以提供长期、大规模的能量存储支持,确保系统的稳定性和持续运行。

为了更好地理解重力储能与抽水蓄能系统的特性,需要从技术指标、经济性、环境影响等方面进行综合分析。重力储能技术在不同地理环境下的适用性较强,特别是在高差较大的地区,可以充分发挥其成本优势。而抽水蓄能则由于其较高的容量和储能效率,在大型电网中得到广泛应用。通过对比两种技术的特点和适用范围,能够为混合系统的设计提供理论依据。还需要考虑混合系统的运行效率、能量转换效率、环境影响等因素,才能实现最大程度的能源利用和减少环境负担。综合两者的优点,采用混合储能系统成为了优化电网调节能力的有效手段。

2 混合系统容量优化模型的建立与求解

为了实现重力储能与抽水蓄能混合系统的容量优化配置,必须首先建立合适的优化模型。混合系统的容量优化模型涉及多个方面的因素,包括储能容量、能量转换效率、充放电速率、系统稳定性以及经济性等。通过对这些因素的综合分析,可以建立数学模型并利用优化算法求解最佳的储能配置方案。优化模型的建立通常涉及约束条件的设置,比如系统的功率平衡约束、能量储存约束、充放电效率约束以及系统成本约束等。通过对不同储能技术的容量和性能进行分析,结合实际电网的负荷需求,可以设计出一个既能满足电力需求,又能降低系统成本的优化方案。

在模型求解过程中,可以采用多种优化算法。常见的优化方法包括线性规划、非线性规划、遗传算法、粒子群优化等。通过这些算法的运用,可以根据电网的负荷需求和储能设备的性能参数,得到最佳的储能容量配置方案。遗传算法和粒子群优化算法能够在复杂的、多约束的环境中找到近似最优解,具有较好的全局搜索能力,适用于处理大规模系统优化问题^[2-6]。而线性规划和非线性规划则适合于那些约束条件较为简单、系统结构清晰的问题。这些算法的选择和运用需要根据具体问题的性质来决定,确保能够高效、精确地找到最佳解。

混合系统容量优化模型的建立和求解不仅仅是一个理论问题,它与实际应用紧密相关。在实际电网中,

负荷需求的波动性、储能设备的容量限制、能量转换效率的波动等因素都需要在模型中进行考虑。为了确保模型的实际可行性,必须对系统的运行特点进行深入研究,了解其性能参数的变化范围,合理设置约束条件,并根据实际运行数据进行模型的验证与调整。优化模型还需考虑储能技术的长期运行维护成本和生命周期,才能真正实现能源系统的可持续发展。

3 影响容量优化配置的关键因素分析

影响重力储能与抽水蓄能混合系统容量优化配置的因素是多方面的。电网的负荷波动是一个关键因素。电网负荷的波动性直接影响到储能系统的需求和调节能力。在高峰负荷时,储能系统需要迅速释放能量以保证电网稳定,而在低谷时,储能系统则需要充电以储存多余的电能。优化系统容量配置时必须充分考虑电网负荷的波动情况,并根据负荷的特征设计合适的储能容量和调度策略。负荷预测的准确性对优化结果的影响也不容忽视。负荷预测模型需要根据历史数据和气候因素等多维度信息进行建模,以提高负荷预测的准确性。

储能设备的性能和成本是优化配置的重要考虑因素。每种储能技术的性能参数都存在一定的差异,包括储能容量、能量转换效率、充放电速率等。为了保证系统的高效运行,需要根据实际情况选择合适的储能设备,并合理配置重力储能和抽水蓄能的比例^[7]。储能设备的建设和维护成本也是影响优化配置的重要因素。尽管重力储能的初期投资较低,但其能量密度较低,适用于小规模储能,而抽水蓄能虽然成本较高,但其储能密度和电力输出能力较强,适合大规模电网调节。优化系统配置时必须权衡各类设备的成本与性能,以实现系统的经济性和稳定性。

环境和地理条件也是影响混合系统容量优化配置的因素之一。重力储能的适用性受地理条件的限制较大,特别是在需要较大高度差的地区,而抽水蓄能则需要合适的水源和地形条件。如果地理条件不具备,重力储能的效益就会大打折扣,而抽水蓄能的建设也会面临较高的环境影响和成本。在进行容量优化配置时,必须考虑项目的实际地理环境和生态影响,选择合适的储能技术和配置方式,以达到最佳的经济和环境效益。

4 混合储能系统优化配置的实际应用与案例分析

在实际应用中,混合储能系统的优化配置已经逐步进入电力系统调度与管理的实践环节。以某地区的电网为例,该地区面临着较为复杂的电力负荷波动和对储能系统的高需求。通过引入重力储能与抽水蓄能

的混合系统，成功实现了负荷调节和储能能力的优化配置。在这一案例中，通过建立容量优化模型，并采用遗传算法对重力储能和抽水蓄能的配置进行优化，最终得出一个既能满足电力需求，又能降低系统成本的最佳配置方案。实验结果显示，混合系统能够有效缓解电网负荷波动带来的压力，提升电网的运行效率和稳定性。

混合储能系统的实际应用还包括对运行管理策略的持续优化。随着季节性负荷波动的变化，重力储能和抽水蓄能的配比可能需要动态调整，以应对不同季节或时段对电网的需求变化。通过结合实时监控技术，系统能够持续监测电网负荷、天气预报及储能设备的状态，确保储能模式和调度策略能够及时根据电网的负荷变化进行自动优化。这种灵活的调节能力能够大幅提高储能系统的效率，降低电网调度成本，并最大化储能设备的经济效益。在一些负荷波动较大、对电网调节能力要求较高的地区，混合储能系统的这一优势尤为突出，能够有效支撑电网的平稳运行。

在未来，混合储能系统的容量优化配置将朝着更加精细化和智能化的方向发展。随着大数据、人工智能（AI）和机器学习技术的快速进步，这些技术将在储能系统的调度和管理中发挥越来越重要的作用。通过对电网运行数据的实时监控与分析，系统能够自动预测负荷变化，优化储能设备的充放电策略，实现更加高效的资源配置。借助智能算法对储能系统的运行进行持续优化，能够在更大范围内提高能源使用效率，并降低系统的运维成本^[8]。这不仅有助于提高电网的稳定性和灵活性，也为实现全球能源转型、推动可持续发展提供了坚实的技术基础。未来，混合储能系统有望成为全球能源网络的重要组成部分，支持智能电网的构建并促进清洁能源的广泛应用。

5 结语

重力储能与抽水蓄能的混合系统通过优化容量配

置和调度策略，为电网提供了一种高效、灵活的储能解决方案。随着技术的不断进步，特别是大数据和人工智能的应用，混合储能系统能够实时监控和调整运行状态，以适应电网负荷的波动，提高能源利用效率和降低成本。这种系统不仅能够增强电网的调节能力，还为未来可持续能源的发展和智能电网的建设提供了有力支持。随着全球能源转型的推进，混合储能系统将在未来的电力系统中发挥越来越重要的作用，推动绿色、智能电网的发展。

参考文献

- [1] 高源.亿吨重力储能以技术创新驱动能源存储革命，赋能绿色未来[J].起重运输机械,2025,(04):5-9.
- [2] 段玉振,杨静芬,杨顺雨.电力系统中物理储能技术的应用与推广[J].储能科学与技术,2025,14(02):699-701.
- [3] 王青山,李妍,张群,等.不同规模化机械储能技术在高比例可再生能源电力系统中应用的比较分析[J].储能科学与技术,2025,14(02):854-867.
- [4] 张品.废弃矿井重力储能技术研究[D].山西大同大学,2024.
- [5] 童文煊.基于重力储能的复合储能系统技术特性及控制策略研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [6] 周冲.斜坡式重力储能电气系统关键技术研究[D].哈尔滨理工大学,2024.D
- [7] 张京业,林玉鑫,邱清泉,等.基于斜坡和山体的重力储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(03):924-933.
- [8] 赫文豪,李懂文,杨东杰,等.新型重力储能技术研究现状与发展趋势[J].大学物理实验,2022,35(05):1-7.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

