

表 1 岩土体力学参数

岩土体	弹性模量 /MPa	泊松比	粘聚力 /MPa	摩擦角 /°	容重 /kN/m ³
粉质粘土	40	0.29	25	18	1830
碎石土	60	0.26	36	20	2010
角砾岩	650	0.24	458	33	2550

在该公路高边坡工程中，为提升边坡整体抗滑与变形控制能力，采用了桩、锚杆及锚索联合支护形式。桩体为 2.4m×1.6m 矩形断面，弹性模量为 25 GPa、泊松比 0.24，可有效承担侧向推力并增强边坡整体刚度。锚杆长度为 12 m，锚索长度为 28 m，两者弹性模量均为 200GPa、泊松比 0.2，具有高强度和良好的抗拉性能，能够深入稳定岩土层，形成可靠的加固结构。

表 2 支护参数

支护形式	参数	弹性模量 /GPa	泊松比
桩	2.4m×1.6m 矩形	25	0.24
锚杆	12m 锚杆	200	0.2
/ 锚索	28m 锚索	200	0.2

3.2 应力分析

如图所示，展示了边坡在支护作用下开挖后的应力分布情况，包括 xx 方向应力和 yy 方向应力的云图。从 zz 应力云图可以看出，边坡整体处于压应力状态，表明坡体受到支护结构的有效约束，垂直应力在坡面处约为 4.93 kPa，整体分布较为均匀。与此同时，xx 应力也保持在压应力状态，坡面应力约为 1.7 kPa，但在坡脚局部区域出现了明显的压应力集中现象，其最大值达到了 0.49 MPa。这种局部应力集中主要是由于边坡自重、开挖引起的应力重新分布以及支护结构与土体相互作用所致。尽管存在局部应力集中，但边坡整体仍处于稳定状态，没有出现超载或潜在破坏的迹象。

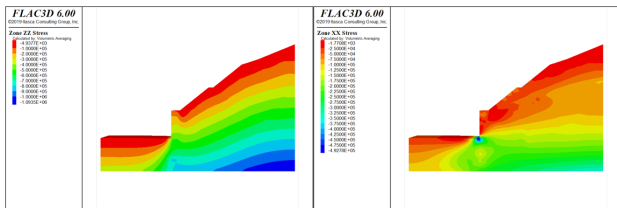


图 2 边坡开挖应力云图

3.3 位移分析

在边坡开挖过程中，由于临空面的形成，边坡不可避免地会发生一定程度的变形。从图中可以直观地观察到，在支护结构的有效作用下，边坡的位移量保持在较小的范围内，表现出较好的整体稳定性。具体来看，沿 Z 方向的

沉降位移最大约为 12.3mm，而沿 X 方向的位移最大约为 14.7mm。这表明边坡在开挖和支护共同作用下，虽然产生了一定的微小位移，但总体仍保持稳定，没有出现大规模滑动或失稳现象。

3.4 安全系数

如图所示，根据强度折减法对边坡进行了安全性分析，并计算得到了边坡的安全系数，通过观察计算结果可以发现，当折减系数取 1.402 时，边坡内部的塑性区已经形成，并且最大剪切应变贯穿整个边坡体。这表明在该折减系数下，边坡刚好达到极限状态，即边坡的失稳边界。基于强度折减法的原理，可将此时的折减系数视为边坡的安全系数。因此，可以认为在支护结构的作用下，该边坡的安全系数为 1.402。

4 结语

通过对永德至勐简高速公路 K42+388~K42+646 右侧高边坡的开挖与支护分析，结合数值模拟和强度折减法，得出以下结论：

支护结构能够有效约束边坡体，整体应力处于压应力状态，坡面垂直应力约为 4.93 kPa，水平应力约为 1.7 kPa。局部坡脚区域存在最大 0.49 MPa 的压应力集中，但并未影响边坡整体稳定。

开挖后边坡受临空面影响产生微小位移，在支护作用下最大垂直沉降 12.3mm，最大水平位移为 14.7mm，说明支护措施能够有效控制边坡变形，边坡整体保持稳定。

基于强度折减法计算，当折减系数为 1.402 时，边坡塑性区贯通，最大剪切应变达到极限状态，可将该折减系数视为边坡安全系数，表明支护结构对边坡稳定性具有明显提升作用。

研究表明，合理的削坡一支护设计能够有效保障高边坡的稳定性，同时为类似工程的边坡加固设计、施工控制及安全评估提供了可靠的参考依据。

参考文献

- [1] 胡嘉豪.基于Geo5的山区高速公路边坡稳定性分析及加固处治研究[J].交通工程,2025,25(10):73-76+80.
- [2] 秦晶.张家界山区公路边坡稳定性的微分方程分析与灾害预警模型构建[J].湖北应急管理,2025,(20):13-15.
- [3] 段海澎,曹皓,赵建军,等.基于机器学习的山区高速公路边坡稳定性评价[J].公路,2025,70(09):15-22.
- [4] 姚俊恒.公路项目边坡加固中抗滑桩的应用探讨[J].交通科技与管理,2025,6(17):46-48.
- [5] 邹育祥.预应力锚索框架梁在边坡加固中的应用[J].工程建设与设计,2025,(12):22-24.

Performance Analysis and Optimization of Novel Energy Storage Technologies in Peak Shaving and Valley Filling for Smart Microgrids

Changcui Wang¹ Zhong Gao² Wei Yang³

1. Liaocheng Guangming Power Service Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252000, China

2. Liaocheng Guangming Electric Power Service Co., Ltd., Chiping Company, Liaocheng, Shandong, 252100, China

3. Liaocheng Luming Building Inspection Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252000, China

Abstract

With the continuous adjustment of the global energy structure and the increasing proportion of various renewable energy sources under the dual carbon background, they have the characteristics of intermittency and high volatility, which leads to the continuous expansion of the peak valley difference in the power grid and has adverse effects on the smooth operation of the power system. This article starts from the perspective of new energy storage technologies such as lithium-ion batteries, flow batteries, and compressed air energy storage, and combines practical cases to construct a comprehensive performance evaluation index system for the comprehensive application scenarios of various energy storage technologies. Quantitative analysis is carried out from multiple dimensions of technology, economy, and environment. Finally, through simulation comparison and case comparison, the applicable scope of various energy storage technologies is clarified. After optimizing energy storage capacity, improving scheduling strategies, and innovating technology coupling, the adaptive application path of new energy storage technologies in smart microgrids is sorted out to help promote the low-carbon development of energy.

Keywords

New energy storage technology; Smart microgrid; Peak shaving and valley filling; Efficiency analysis; Optimized path

新型储能技术在智能微电网削峰填谷中的效能分析与优化

王长翠¹ 高重² 杨伟³

1. 聊城市光明电力服务有限责任公司, 中国·山东 聊城 252000

2. 聊城市光明电力服务有限责任公司茌平分公司, 中国·山东 聊城 252100

3. 聊城市鲁铭建筑检测有限公司, 中国·山东 聊城 252000

摘要

随着全球能源结构不断调整, 双碳背景下各种可再生能源占比不断增加, 其具有间歇性、波动性大的特征, 致使电网峰谷差持续扩大, 对电力系统的平稳运行造成不利影响。本文从锂离子电池、液流电池、压缩空气储能等新型储能技术视角出发, 结合实际案例, 针对多种储能技术综合应用的场景构建综合性能评估指标体系, 从技术、经济、环境多维度开展量化分析。最后通过仿真对比和案例比较, 明确各类储能技术的适用范围, 通过储能容量优化、调度策略改进、技术耦合创新等手段优化后, 梳理出新型储能技术在智能微电网中的适配应用路径, 助力能源低碳化发展。

关键词

新型储能技术; 智能微电网; 削峰填谷; 效能分析; 优化路径

1 引言

随着世界能源与环境形势趋紧, 绿色低碳成为各国核心发展方向。可再生能源高效利用是实现双碳目标的关键, 但因其间歇性强、出力波动大, 易降低电力系统稳定性, 制约规模化应用。具备分布式架构、弹性控制等优势的智能微

电网, 是可再生能源集中消纳与削峰填谷的核心载体, 削峰填谷功能对提升能源利用效率、保障供电意义重大。新型储能技术有高密度、快速响应等优势, 开展其及效能提升策略研究, 对优化微电网运行、提高可再生能源消纳率、构建新型电力生态圈至关重要。

2 智能微电网削峰填谷需求与新型储能技术发展基础

2.1 智能微电网削峰填谷的核心诉求

智能微电网主要由分布式电源、储能装置、负荷终端

【作者简介】王长翠(1987), 女, 中国山东聊城人, 本科, 工程师, 从事电力工程研究。

等核心部分构成,负荷受居民用电、工业用电及商业活动等多因素影响,峰谷变化特征明显^[1]。当负荷过载时,负荷侧电压会出现下降,电网频率也随之降低;而削峰填谷功能则要求在用电高峰时段释放电能(削峰),在用电低谷时段吸收电能(填谷):前者要求储能装置具备响应速度快、容量大、性能稳定的特点,后者还要求储能装置与大电网开展协同调度,以满足不同场景下的能量平衡需求。

2.2 新型储能技术的技术特征与分类

新型储能技术是基于材料和电力电子技术的创新,具有不同的技术路线。电化学储能,如锂离子电池、液流电池、钠离子电池等,具有速度快、密度高、安装方便等优点;机械储能,如压缩空气储能、飞轮储能等,压缩空气储能容量较大、存储时间长,飞轮储能响应时间毫秒级;电磁储能是以超导磁储能为主,具有无损耗、效率高等优点;同时,氢能储能、储热储能等技术也在某些领域得到应用。不同的技术路线在功率水平、储能时间、充放电效率、成本造价等方面都有明显的区别,在智能微电网削峰填谷方面有多种选择。

3 新型储能技术在智能微电网削峰填谷中的效能分析

3.1 效能评价指标体系构建

科学的效能评价需构建综合量化的评价指标体系,该体系主要涵盖技术特性、经济特性、环境特性三大类指标。其中技术特性指标包括:充放电系数(即充放电效率)、充放电时间(即响应时间)、使用寿命、功率调节范围,其中,使用寿命与充放电稳定性共同反映储能装置充放电的长期可靠性^[2];经济特性指标包括:投资成本(含设备投入及安装调试费用)、运行管理成本、度电成本、投资回收期,其中度电成本是经济性指标中最关键的因素;环境特性指标包括:全生命周期碳排放量、污染物排放量、能耗水平,其中,全生命周期碳排放量指储能产品从生产、运行至报废回收全生命周期内产生的温室气体总量,污染物排放量指储能装置在生产及回收过程中产生有害物质的排放量。运用层次分析法结合熵权法,为各类指标赋予合理权重,保证评价的科学性和客观性。

3.2 基于数据驱动的量化分析方法

量化分析主要采取多源数据为基础,采用数据挖掘形式评价新型储能技术的削峰填谷能力,主要考虑是以全生命周期数据为基础,通过统计模型仿真模拟方式多源对比,主要考虑是:建立多源数据挖掘方式,通过微电网监测、储能装置传感、气象站等,采集数据分钟级负荷曲线、光伏风能发电量、储能装置充放电量、储能装置剩余容量等数据信息,采取5G与边缘计算等实时采集数据,频次1-15分钟不等。将采集到的数据通过预处理,采用分层级方式提升数据预处理质量:采用 3σ 原则方式、箱型图法去除离群值,缺值短

期内用插值法弥补、长期用机器学习预测值弥补,采取移动平均法、小波法平滑去噪,标准化方式,统一指标维度,形成含源数据、预处理数据、衍生指标的多源数据库^[3]。三是运用统计分析和仿真模拟相结合的方法,统计部分求解基本统计量,以相关、回归、方差等方法量化指数、识别因素、技术区别;仿真部分运用MATLAB/Simulink等软件建立微电网,设定各类可再生能源不同渗透率和负荷情况,模拟储能系统的输出,量化其对微电网电压、频率以及微电网出力的效果,输出峰谷平抑率等基本结果,进行多场景效能对比和潜力评价。

3.3 基于实际案例的效能验证分析

结合不同规模与场景的智能微电网实际案例开展效能验证,既检验量化分析方法的有效性,也明确新型储能技术的场景适配性。选取三类典型案例:居民社区中小型微电网(总负荷5MW),配置1.5MW/3MWh锂离子电池储能,接入2MW分布式光伏,负荷呈日内双峰分布,峰谷差率35%;工业园区中型微电网(总负荷30MW),配置10MW/40MWh全钒液流电池储能,配套5MW光伏与3MW风电,负荷波动大且峰谷差率达50%;新能源基地大型微电网(总负荷100MW),配置30MW/150MWh压缩空气储能,接入40MW光伏与20MW风电,可再生能源渗透率超60%。

借助能源管理平台与企业储能监控平台,采集12个月内的企业负荷曲线、可再生能源出力数据、储能系统充放电数据、成本数据及碳排放量数据,依据前述评价指标体系,计算并分析负荷真实运行水平及储能系统效能;其中,工业园区全钒液流电池投用后,最高负荷降低22%,可再生能源消纳率提高28%,度电成本降至0.45元/kWh,碳排放量减少35kgCO₂eq/kWh。对真实数据与仿真数据的偏差进行修正,针对偏差较大的情况,调整充放电效率、投资回收期等关键参数;通过敏感性分析,引入负荷波动、电价变化等影响因素,进一步论证了数据驱动量化分析方法的可行性,得出以下结论:锂离子电池适用于中小型微电网的短时削峰填谷场景,液流电池适用于中型微电网的长时储能场景,压缩空气储能适用于大型微电网的可再生能源消纳场景,为下一步技术选型、节能降耗提供参考^[4]。

4 新型储能技术削峰填谷效能的优化路径

4.1 基于负荷特性的储能容量优化配置

考虑到储能容量配置不合理可能导致削峰填谷效益降低,或造成削峰填谷资源浪费,可从负荷特征与场景需求出发进行合理优化。采用机器学习方法构建负荷预测模型,结合历史负荷数据、气象数据、社会经济数据等,短期预测精度可达95%以上,中长期预测精度可达90%以上。以削峰填谷效益最大化为目标,结合负荷预测结果,从技术可行性、成本经济性、环境友好性角度出发,采用遗传算法、粒子群