

Study on optimization and simulation of joint operation strategy of photovoltaic power generation and energy storage system

Qiongqiong Wu Haifei Dang

1. Yulin Vocational and Technical College, Yulin, Shaanxi, 719000, China
2. Shaanxi Coal Group Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Amid the global imperative to address climate change and energy security, renewable energy development has surged, with photovoltaic (PV) technology experiencing particularly rapid growth. China has emerged as the world's largest PV market. As global energy systems transition toward green and low-carbon models, PV power generation—characterized by its renewable, clean, and distributed nature—has become a vital component of modern electricity infrastructure. This study investigates optimization strategies for integrated PV-storage systems, establishing a multi-objective optimization model validated through simulation analysis using real-world data. The findings demonstrate that strategic allocation of storage capacity and design of coordinated operation protocols can significantly enhance PV output reliability, improve utilization efficiency, and reduce both curtailment rates and energy costs.

Keywords

photovoltaic pgy; simulation studyower generation; energy storage system; joint operation; optimization strate

光伏发电与储能系统联合运行策略的优化与仿真研究

吴琼琼¹ 党海飞²

1. 榆林职业技术学院, 中国·陕西 榆林 719000
2. 陕煤集团榆林化学有限责任公司, 中国·陕西 榆林 719000

摘要

在应对气候变化和能源安全问题的全球大势下, 新能源发展势头迅猛, 光伏发电技术更是高速增长, 我国已成为全球最大的光伏发电市场。随着全球能源结构向绿色低碳转型, 光伏发电因其可再生、清洁与分布式特性, 成为电力系统的重要组成部分。本文基于光伏发电与储能系统联合运行特点, 系统研究了运行策略的优化方法, 构建了多目标优化模型, 并结合实际数据开展仿真分析。研究表明, 通过合理配置储能容量和设计联合运行策略, 可显著提升光伏出力的可控性与利用率, 降低弃光率与能量成本。

关键词

光伏发电; 储能系统; 联合运行; 优化策略; 仿真研究

1 引言

随着光伏电站接入比例持续攀升, 功率波动大、预测误差高、电网调度难等新问题接踵而至。在大规模集中式与分布式光伏大量接入时, 兼顾电力系统安全性、经济性和环保性成为核心课题。储能系统作为调节新能源出力的关键装备, 具备储能、放能及参与多项功能的能力。将储能与光伏电站联合运行, 构建“发-储-用”一体化调度体系, 是提升新能源利用率和电力系统灵活性的有效途径。目前相关研究虽有成果, 但在多目标优化等方面仍有不足, 本文据此提

出系统性优化策略并开展仿真分析。

2 光伏发电与储能系统联合运行特性分析

2.1 光伏发电系统出力特性

光伏发电系统借助太阳辐射实现能源转换, 有着绿色低碳、布局灵活、运维成本低等显著优势, 在全球范围内得到广泛推广。不过, 它存在出力不可控和波动性强的难题, 给大规模接入电力系统带来技术挑战。

从短时尺度看, 气象条件对光伏系统功率输出影响极大。云层移动、遮挡效应以及辐照强度瞬时变化, 都会引发短时波动。比如云层快速掠过光伏组件区域, 辐照量短时间内大幅改变, 致使光伏输出功率剧烈波动。这种快速起伏易使电网频率和电压波动, 影响系统稳定运行, 在光伏占比较

【作者简介】吴琼琼(1990-), 女, 中国陕西延安人, 本科, 从事电气工程及其自动化研究。

高的微电网或孤网中影响更为突出。

从长时尺度讲,光伏出力有明显的昼夜循环和季节变化。白天有太阳辐照时发电,夜晚停止。冬夏季日照时间和辐照强度差异大,导致年平均利用小时数有限,出力曲线与负荷需求曲线错位。如中午光伏出力高峰与居民早晚用电高峰错开,形成“鸭子曲线”。此外,光伏出力预测误差也是调度管理关键因素,虽预测技术不断发展,但受天气预报准确性等制约,复杂气候下误差可能放大,影响电网调度。所以,单一光伏发电难满足现代电网要求,需引入储能等调节手段。

2.2 储能系统性能特点与调节能力

储能系统是解决新能源出力波动与不确定性的关键技术,在光伏领域应用广泛。它类型丰富,包括电化学储能(如锂电池、铅酸电池)、机械储能(如飞轮、压缩空气、抽水蓄能)和电磁储能(如超级电容)等。其中,电化学储能因响应速度快、能量密度高、建设周期短、部署灵活,成为光伏联合运行的主流。

储能系统的主要性能指标有容量、功率、充放电效率、循环寿命和自放电率等。在调节能力方面,它具备毫秒级快速响应特性。当光伏功率骤降时,能及时释放电力保障电网平衡;功率突增时,可吸收多余电力避免过电压风险。而且,通过科学设计充放电策略,储能系统可实现能量时移,在低谷时充电、高峰时放电,提高光伏电力消纳比例和经济效益。例如,在用电低谷储存电能,高峰时供给用户,减少对传统电网的依赖,降低用电成本。

2.3 光伏与储能联合运行系统的优势分析

光伏与储能联合运行系统能带来多方面显著效益。在提升光伏利用率上,单一光伏系统中午常出力超负荷,造成弃光。储能系统可在高峰吸收富余电力,降低弃光率,如某光伏电站配置储能后弃光率大幅下降。

平抑功率波动方面,联合系统能在毫秒至分钟级响应光伏出力变化,在配电网和微电网场景下,实时调节输出功率,维持系统电压与频率稳定,减少对电网主调度系统的依赖。优化负荷匹配上,储能调节可让光伏输出“按需供电”,满足用户需求,像工业园区采用此系统能实现自发自用与削峰填谷,提高用电自给率。

参与电网辅助服务时,储能系统具备调频、调压与无功补偿能力,多地出台政策激励,为光伏电站增添收益渠道。推动能源结构转型上,该联合系统可提高可再生能源占比,降低对化石能源依赖,是实现“双碳”目标的重要技术路径,加速构建新型电力系统。未来,需完善政策、降低成本、优化调度,推动其普及。

3 光伏与储能联合运行策略优化模型构建

3.1 优化目标函数设定

光伏与储能联合运行策略设计需要兼顾多方面目标,

主要包括以下几个方面:第一,最大化光伏发电利用率,减少弃光量;第二,最小化系统运行成本,包括储能系统充放电损耗成本与维护费用;第三,平滑输出功率曲线,降低对电网的调节压力;第四,保证负荷供电可靠性与系统安全性。综合上述因素,本文提出的联合优化目标函数形式如下:

$$\text{Min}\{\alpha \times \text{弃光率} + \beta \times \text{储能系统成本} + \gamma \times \text{输出波动指标}\}$$

其中 α 、 β 、 γ 为权重系数,根据实际工程需求进行设定。目标函数采用加权求和方式,将多目标问题转化为单目标优化问题,便于求解。

3.2 系统约束条件设定

在优化模型构建过程中,必须严格遵循一系列物理与运行约束条件。光伏出力方面,要确保其发电出力始终不超过最大容量,同时,天气因素会对其产生限制,不同天气状况下光伏发电效率不同,需根据实时天气数据动态调整模型参数。储能系统存在容量与功率约束,充放电功率不能超出设备额定值,否则会损坏设备;储能容量 SOC 要维持在设定范围,避免过充或过放影响其使用寿命和性能。电力平衡约束至关重要,任意时刻系统输出功率必须等于光伏发电功率与储能放电功率之和,再减去储能充电功率,以保证系统稳定运行。充放电效率约束也不容忽视,储能设备存在能量转换损耗,在模型计算中必须将充放电效率纳入考量。此外,还要考虑时间序列约束,保证策略在整个调度周期内具有连续性与稳定性 [1]。

3.3 联合优化算法选择与仿真平台搭建

为有效求解前文所述的多目标优化问题,本文经过审慎考量,选用改进型粒子群优化算法(IPS0)作为核心求解工具。粒子群算法本身具备显著优势,其收敛速度较快,能在较短时间内接近最优解;参数调节也较为灵活,可根据不同问题的特点进行针对性调整,因而十分适用于大规模复杂系统的优化场景。在此基础上,对算法进行改进,引入动态惯性权重与自适应学习因子。动态惯性权重可根据搜索进程动态调整,平衡全局搜索与局部搜索;自适应学习因子则能依据粒子状态自动调节学习步长,进一步提高算法的全局搜索能力与局部寻优精度。为验证算法效果,搭建了基于 MATLAB 与 Simulink 环境的仿真平台。该平台整合了光伏出力预测模块、储能状态模拟模块与优化调度模块,可实现对优化策略的全过程模拟,并对结果进行深入分析,为后续研究提供有力支撑。

4 联合运行策略仿真结果分析

4.1 仿真参数与测试方案设定

为切实验证所提优化策略的有效性,我们精心选取了某地区具有代表性的典型光伏出力数据与负荷曲线作为输入条件。在实验设定中,将光伏容量明确设定为 10MW,储能系统容量设定为 2MWh,同时把充放电效率确定为

90%。为保证仿真的全面性与准确性,设定仿真周期为24小时,时间步长为15分钟。

在对比方案上,设置了三种模式,分别是无储能系统模式、传统固定策略模式(即SOC恒定上下限控制)以及本文提出的优化策略模式。通过细致对比分析这三种模式下的系统运行指标,如弃光率、系统功率波动情况、负荷匹配程度以及经济效益等,能够直观清晰地看出不同策略的优劣,从而有力证明本文所提优化策略在提升系统性能、增强运行稳定性以及提高经济效益等方面具备显著优势[2]。

4.2 仿真结果对比与评价

本次仿真结果有力地验证了优化策略的卓越成效。和无储能模式对比,引入储能系统后,弃光率大幅降低,从原本的12.5%锐减至3.8%,这意味着大量原本被浪费的光伏电力得到了有效利用。同时,输出功率波动系数降低超40%,极大改善了电网调度平衡状况,让电网运行更加稳定。

与传统固定策略相较,优化策略在多个关键指标上均有突出表现。在光伏利用率和储能利用率上实现双提升,储能充放电周期次数减少,有效延长了电池的使用寿命,降低了更换成本。系统总成本降低约8%,这主要归功于充放电效率的提高以及能量损耗的减少。而且,优化策略下的输出功率曲线更为平滑,完全符合电网安全运行的高标准要求,为电网的稳定运行提供了坚实保障,凸显出该优化策略在实际应用中的巨大价值。

4.3 敏感性分析与策略适应性探讨

为进一步分析策略的适应性与鲁棒性,开展储能容量、充放电效率与负荷曲线波动三项敏感性分析。结果显示,储能容量增加对系统性能提升具有明显边际效应,当容量超过光伏装机容量20%时,效益增幅趋缓。充放电效率对系统经济性影响较大,建议选用高效率储能设备。负荷波动对策略稳定性影响相对较小,说明优化模型具备较强的实际适应性与推广价值[3]。

5 光伏与储能联合运行策略优化的推广应用建议

5.1 提升系统设计标准化与规范化水平

目前,光伏与储能联合系统的设计领域存在一个突出问题,即缺乏统一标准。这使得在实际项目开展过程中,不同项目的实施效果差异较大,参差不齐。有的项目可能因设计不合理,无法充分发挥光伏与储能联合的优势,导致资源浪费和效益低下;而有的项目则可能因过度设计,增加了不必要的成本。

为了改变这一现状,国家与行业主管部门有必要发挥引领作用,制定明确且细致的设计规范与评价标准。这些标准应涵盖容量配置比例,明确光伏与储能之间合理的容量搭

配,以保证系统在不同工况下都能稳定运行;性能考核指标,对系统的发电效率、储能效果等关键性能进行量化考核。同时,考虑到我国地域广阔,不同区域的负荷特性和新能源资源禀赋存在差异,还应制定差异化的配置方案,根据当地的实际情况进行资源的最优配置,从而实现效益的最大化,推动整个行业朝着健康、有序的方向发展[4]。

5.2 加强信息平台建设与智能调度体系推广

光伏与储能联合运行是一个复杂的系统工程,其高效运行高度依赖实时数据和智能化调度。因此,建设一个覆盖发电、储能、负荷以及电网状态的统一信息平台至关重要。这个信息平台就像系统的“大脑”,需要具备多种功能。它要能够进行数据采集,实时收集各个环节的运行数据;进行预测,提前预判系统的运行趋势;还要具备优化决策功能,根据分析结果和预测情况,为系统的运行提供最优的调度策略,实现“数据—模型—控制”的闭环管理。

此外,随着科技的不断发展,新技术层出不穷。应加大人工智能、大数据与区块链等新技术在光伏与储能联合系统中的应用力度。人工智能可以提高系统的自动化水平,实现更精准的控制;大数据可以更好地处理和分析海量数据,为决策提供更可靠的依据;区块链技术则可以增强系统的安全性,保障数据的安全和隐私。通过这些新技术的应用,推动智慧能源管理平台建设,提升整个系统的运行效率和可靠性[5]。

6 结语

本文围绕光伏发电与储能系统联合运行策略的优化与仿真展开系统性研究,提出了以多目标优化为核心的策略设计方法,并通过实际数据仿真验证了其有效性与适应性。研究表明,通过合理配置储能容量与设计动态优化策略,可显著提升光伏出力的利用率与系统运行经济性,有效降低弃光风险与能量成本。总体而言,光伏与储能联合运行是实现新能源高比例接入与能源系统绿色转型的重要手段,具有广阔发展前景与应用价值。

参考文献

- [1] 张静.光伏发电与风力发电并网技术及其应用研究[J].光源与照明,2024,(12):104-106.
- [2] 汪洋,应愉凡.船舶岸电光伏发电系统最大功率点跟踪控制策略[J].电力与能源,2024,45(06):709-712.
- [3] 张凯,杨雪峰,王强,等.新型电力系统下光伏发电定价决策研究[J].价值工程,2024,43(34):7-11.
- [4] 王立平,马实一,郭旭,等.风电-光伏发电-抽水蓄能联合优化调度方法[J].水利经济,2024,42(06):58-63.
- [5] 申正超.北京市光伏发电开发建设的机遇与挑战[J].太阳能,2024,(10):21-27.