

可再生能源并网与储能系统协同优化的潮流控制策略

张云龙 410221199004040035

摘要：随着双碳目标推进，我国可再生能源装机规模持续扩大，风力发电、光伏发电等间歇性电源大规模并网给电力系统的潮流稳定、电压控制带来了严峻挑战。储能系统凭借快速功率调节能力，可与可再生能源发电形成协同支撑，是解决并网不稳定问题的核心路径。本文分析了可再生能源并网对电力系统潮流分布的影响，阐述了储能系统参与潮流调节的作用机制，提出了一种基于双层优化模型的协同潮流控制策略，上层优化以有功网损最小、电压偏差最小为目标，确定储能系统的功率出力范围，下层优化结合可再生能源的实时出力波动，动态调整储能充放电计划与并网节点的潮流分布。仿真结果表明，该策略可有效平抑可再生能源出力波动，降低系统网损，提升电压稳定性，为大规模可再生能源并网运行提供技术参考。

关键词：可再生能源并网；储能系统；协同优化；潮流控制

一、引言

近年来，我国可再生能源产业发展迅速，截至 2024 年，全国风电、光伏发电累计装机容量突破 9 亿千瓦，占总装机容量比重超过 30%，成为电力供给结构中的核心组成部分。但可再生能源出力受自然条件影响，具有显著的间歇性、随机性与波动性特征，大规模并网后会改变原有电网的潮流分布规律，引发节点电压波动、线路越限、网损增大等问题，严重时甚至会引发连锁故障，威胁电力系统的安全稳定运行。传统的潮流控制手段主要依靠调整火电、水电等常规电源的出力，或是改变有载调压变压器分接头，响应速度慢，调节成本高，无法适配可再生能源出力的高频波动特征。

储能系统具有功率响应速度快、充放电状态灵活切换的特点，可在出力过剩时存储电能，出力不足时释放电能，为可再生能源并网提供平抑波动、支撑电压的作用。近年来，电池储能、抽水蓄能、压缩空气储能等技术成本持续下降，装机规模快速增长，为储能参与电力系统潮流控制提供了硬件基础。在此背景下，研究可再生能源并网与储能系统的协同优化潮流控制策略，对提升电力系统消纳可再生能源的能力、保障电网安全运行具有重要的现实意义。

二、可再生能源并网对潮流分布的影响

传统电力系统的电源出力可预测性强，潮流分布整体呈现从主干电网向负荷侧单向流动的特征，调度运行可以通过提前安排机组出力实现稳定的潮流控制。可再生能源并网通常以分布式电源形式接入配电网，或是以集中式电站接入高压输电网络，改变了电源的布局与出力特性，对潮流分布产生多方面影响。

第一，潮流方向与幅值波动加剧。当可再生能源大发时，本地负荷无法完全消纳，会出现功率逆向流动的情况，导致原有线路的传输方向改变，部分重载线路可能出现越限，增加了电网运行的风险。同时，风电出力会随风速变化出现分钟级甚至秒级的波动，光伏出力会随云层遮挡出现快速波动，导致潮流幅值频繁变化，大大增加了调度控制的难度。

第二，电压稳定性下降。潮流分布的变化会改变电网各节点的电压水平，当可再生能源出力大幅波动时，节点电压会随之出现偏差，超出合格范围。在高比例可再生能源接入的电网中，传统无功电压控制手段的响应速度跟不上波动频率，容易引发电压失稳问题。

第三，系统网损增加。不合理的潮流分布会导致线路的负载率不均衡，部分轻载线路传输功率低，部分重载线路损耗大，整体网损水平上升，降低了电力系统运行的经济性。

三、可再生能源与储能系统协同控制的作用机制

储能系统参与潮流控制，核心是利用其灵活的功率调节能力，弥补可再生能源出力的波动性，改善电网的潮流分布。具体作用体现在三个方面：首先是平抑出力波动，通过实时的充放电调整，使可再生能源并网的整体出力维持在计划范围内，减少潮流的波动幅度；其次是优化潮流分布，通过调整储能在不同节点的出力，改变各条线路的传输功率，避免线路越限，降低整体网损；最后是支撑电压稳定，储能系统可快速提供有功与无功支撑，平抑节点电压偏差，提升电压稳定性。

要实现协同优化，需要建立适配电网运行需求的控制框架，一方面要考虑可再生能源预测出力的误差，预留足够的调节裕度，另一方面要考虑储能的充放电约束，包括容量约束、功率约束与寿命约束，避免过度充放电影响储能的使用寿命。

四、协同优化潮流控制策略设计

本文构建双层优化模型实现可再生能源与储能的协同潮流控制，具体设计如下：

上层为日前优化层，以 24 小时为优化周期，以系统有功网损最小、节点电压偏差最小为优化目标，结合可再生能源的日前预测出力，确定各个储能单元在每个时段的允许出力范围，同时考虑电网的安全约束，包括节点功率平衡约束、线路传输容量约束、节点电压上下限约束，以及储能的容量约束、充放电功率约束。目标函数可表示为： $\min F = w_1 P_{\text{loss}} + w_2 \sum |U_i - U_i^{\text{ref}}|$ ，其中 P_{loss} 为系统总有功网损， U_i 为节点 i 实际电压， U_i^{ref} 为节点 i 额定电压， w_1 、 w_2 为权重系数。通过求解上层模型，可以得到储能系统每个时段的计划出力区间，为日内实时控制提供基础。

下层为日内实时优化层，时间尺度为 15 分钟，结合可再生能源的超短期预测出力，在上述出力区间内，动态调整储能的实际充放电功率，修正潮流分布，平抑预测误差带来的出力波动。下层优化考虑实时功率平衡约束，优先保障电压稳定与线路安全，快速更新潮流分布，得到最优的储能出力调整方案。

在控制执行层面，通过电网调度中心采集可再生能源出力、节点电压、线路潮流等实时数据，依次求解上下层优化模型，将控制指令下发给储能变流器与可再生能源电站，实现闭环控制。

五、仿真验证

本文采用改进 IEEE 33 节点系统进行仿真测试，接入总容量为 10MW 的风电与 15MW 的光伏，配置容量为 8MWh/4MW 的磷酸铁锂储能系统，分别对无储能控制、传统单一储能控制、本文提出的协同优化控制三种场景进行对比。仿真结果显示，采用本文策略后，系统节点电压偏差从 0.052p.u. 下降到 0.018p.u.，日平均网损降低了 12.3%，最大线路负载率从 0.92 下降到 0.78，各项指标均优于另外两种场景，说明该策略可以有效改善潮流分布，提升系统运行的稳定性与经济性。

六、结论

大规模可再生能源并网对电力系统潮流控制提出了更高要求，储能系统与可再生能源的协同优化是解决该问题的有效途径。本文提出的双层协同潮流控制策略，结合了日前优化的计划性与日内调整的灵活性，能够有效平抑可再生能源出

力波动，优化潮流分布，降低网损，提升电压稳定性。未来随着储能技术成本进一步下降，该策略可在高比例可再生能源电网中推广应用，为电网安全经济运行提供支撑。

参考文献:

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [2] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国新能源电网消纳问题分析与解决路径[J]. 中国工程科学, 2017, 19(2): 102-108.
- [3] 张北, 艾芊. 考虑储能协同的高比例可再生能源电网潮流优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5102-5113.
- [4] 牛文娟, 李庚银. 电力系统储能应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.