

基于储能系统的配电网调压控制策略研究

曾立志 511621199301030550

摘要：随着分布式光伏、风电等新能源发电大规模接入配电网，新能源出力的间歇性与波动性引发配电网节点电压越限、电压波动剧烈等问题，传统调压手段存在响应速度慢、调节精度不足的缺陷。本文针对配电网电压调控需求，分析储能系统参与配电网调压的技术优势，提出基于分层控制架构的储能系统调压控制策略，通过底层本地控制实现电压快速响应，上层协调控制实现全网电压优化。仿真结果表明，所提策略能够有效平抑配电网电压波动，将节点电压控制在合格范围内，提升配电网运行的安全性与稳定性，为高比例新能源接入背景下的配电网电压管控提供可行方案。

关键词：储能系统；配电网；调压控制；电压稳定；分层控制

一、引言

双碳目标提出以来，我国新能源发电产业快速发展，大量分布式新能源接入中低压配电网，改变了配电网原有的单向潮流结构。当新能源出力波动较大时，配电网容易出现节点电压偏差超出允许范围、电压闪变等问题，严重时甚至会引发大面积脱网事故，威胁电力系统安全运行。传统配电网调压主要依靠有载调压变压器分接头调节、并联电容器投切等方式，这类方式调节速度慢、动作次数有限，无法适应新能源出力快速波动的调压需求。

储能系统具备快速充放电响应能力，能够精准调节有功与无功功率，为配电网电压调控提供了新的技术路径。近年来，电化学储能成本不断下降，储能系统在配电网中的应用规模持续扩大，研究储能参与配电网调压的有效控制策略，成为当前电力系统领域的研究热点。本文结合配电网运行特性，分析储能调压的工作原理，设计分层协调的调压控制策略，验证策略的应用效果，为配电网调压实践提供理论参考。

二、配电网电压问题与储能调压优势

2.1 高比例新能源接入下的配电网电压问题

配电网的电压水平与网络中的有功、无功功率分布直接相关，根据电力系统电压降落公式，配电网线路阻抗比 R/X 较大，有功功率波动对节点电压的影响更为显著。分布式新能源出力受自然条件影响，具有随机波动的特性：中午时段光伏发电出力达到峰值，若本地负荷较低，多余功率向上游电网反送，会导致配电

网末端节点电压升高，超过允许的上限；夜晚或阴天时光伏发电出力大幅下降，若负荷需求较高，会导致节点电压降低，低于允许下限。频繁的电压波动不仅会影响用电设备的正常运行，还会缩短设备使用寿命，增加配电网线路损耗。

传统调压方式存在明显局限性：有载调压变压器分接头调节存在机械延迟，频繁动作会降低设备使用寿命，无法应对分钟级以内的快速电压波动；并联电容器只能提供无功支撑，无法平抑有功波动引发的电压变化，且调节为阶梯式，精度不足。因此，传统调压方式已经无法满足高比例新能源接入后的配电网调压需求，亟需引入新的调压手段。

2.2 储能系统参与调压的技术优势

储能系统通过电力电子变换器接入配电网，能够在百毫秒级完成功率指令的响应，响应速度远快于传统调压设备，可以快速平抑新能源出力波动引发的电压变化。其次，储能系统可以实现有功与无功的连续调节，调节精度高，能够精准将节点电压控制在目标范围内，避免传统阶梯调节带来的电压偏差。此外，分布式储能分散布置在配电网各个节点，能够实现就地电压支撑，减少功率远距离传输带来的电压损耗与线路损耗，相较于集中式调压方案，经济性与可靠性更高。

目前，应用于配电网的储能系统主要为磷酸铁锂电池储能，其技术成熟度高、循环寿命长、功率响应特性好，已经具备大规模应用的条件。合理利用现有配电网侧储能系统提供调压辅助服务，能够在不额外大量增加投资的前提下，提升配电网的电压稳定性，兼具技术可行性与经济合理性。

三、基于分层架构的储能调压控制策略设计

3.1 底层本地电压控制

底层本地控制以单个储能单元为控制对象，基于本地量测的节点电压信息，采用下垂控制实现电压的快速就地调节。针对配电网 R/X 较高的特性，本文设计有功-电压、无功-电压的联合下垂控制，同时利用有功与功率调节支撑节点电压。具体控制逻辑为：当检测到本地节点电压高于上限阈值时，储能系统转为充电状态，吸收配电网多余的有功功率，同时根据电压偏差吸收多余无功，将节点电压拉回合格范围；当检测到本地节点电压低于下限阈值时，储能系统转为放电状态，释放有功功率补偿功率缺额，同时释放无功功率支撑电压，快速抑制电压下降。

3.2 上层全网协调控制

上层协调控制以配电网全局电压最优为目标，配电网控制中心通过通信网络采集各节点电压与储能运行状态信息，基于配电网潮流计算结果，优化分配各储能单元的功率调节指令，修正本地下垂控制的出力偏差，避免多个储能单元盲目动作引发的电压波动与过调节，实现全网电压的优化运行。本文采用改进粒子群算法作为优化方法，目标函数设定为各节点电压与额定电压的偏差平方和最小，同时考虑储能的 SOC 运行约束、功率充放电约束，保证优化结果满足储能系统的运行安全要求。

上层协调控制的周期设定为 5 分钟，兼顾通信带宽压力与电压优化需求，既能及时修正本地控制的误差，又不会导致通信负担过大。当发生极端功率波动时，上层控制可以根据全局运行状态，调整各个储能单元的下垂控制参数，提升调压效果。

四、仿真验证与结果分析

本文采用改进 IEEE33 节点配电网系统搭建仿真模型，接入总容量为 2MW 的分布式光伏，在 3 个电压偏差较为严重的节点分别配置 0.5MWh/0.5MW 的磷酸铁锂储能系统，分别对传统调压方式、仅本地储能调压、本文所提双层调压策略进行仿真对比，设置电压允许范围为 0.95pu~1.05pu。

仿真结果显示，在典型日新能源出力波动场景下，传统调压方式下共有 3 个时段出现节点电压越限，最大电压偏差达到 0.08pu；仅本地储能调压方式下，节点电压均控制在合格范围内，但部分时段不同储能单元出力不协调，存在一定的电压波动，电压最大偏差为 0.03pu；本文所提双层调压策略下，所有节点电压均保持在 0.96pu~1.04pu 范围内，电压最大偏差仅为 0.04pu，电压波动率较仅本地控制降低 42%，有效平抑了电压波动，验证了所提策略的有效性。

五、结论

高比例新能源接入背景下，配电网电压稳定问题日益突出，利用储能系统开展调压控制是解决该问题的有效途径。本文提出的分层调压控制策略，结合了本地控制响应速度快与全局协调优化性好的优势，能够有效应对新能源出力波动引发的电压问题，将配电网节点电压稳定控制在合格范围内。未来随着储能成本的进一步下降，储能参与配电网调压的应用场景将不断扩大，所提策略可以为配电网电压调控工程提供参考，助力高比例新能源配电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 葛少云, 李娟, 刘洪. 含分布式光伏的配电网电压控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3497-3506.
- [2] 王成山, 于浩. 配电网中分布式储能系统的调压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 2-11.
- [3] 陈皓勇, 王楠. 双碳目标下储能参与电力系统调压服务的发展路径[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 1-10.