

# 新能源电气系统构网储能协同优化控制策略研究

戴俊雄

云南电力技术有限责任公司 云南昆明 652701

**摘要:** 随着风电、光伏等新能源在电力系统中的平均渗透率不断上扬,其波动性、间歇性特征给电网安全稳定运行带来巨大挑战,传统源网荷调度模式与高比例新能源接入场景矛盾突出。构网型控制技术与储能系统的协同应用,为应对电网频率/电压支撑、新能源消纳等问题给出了可行办法。本文采用聚焦方式研究新能源电气系统构网储能协同优化控制策略,构建“源-储-网”协同控制框架,对构网型控制策略设计、储能系统优化调度、多目标协同优化算法、仿真验证与工程应用五个方面展开系统性钻研。依靠引入虚拟同步机技术提升新能源的组网能力,以模型预测控制为手段实现储能系统的动态调度,采用优化后的多目标粒子群算法对新能源消纳、电网稳定和储能经济性目标进行平衡。

**关键词:** 新能源电气系统; 构网型控制; 储能系统; 协同优化; 虚拟同步机; 模型预测控制; 多目标优化

## 引言

在“双碳”目标引领下,全球背景下能源转型加速推进的态势明显,以风电、光伏为主的新能源成为电力系统的核心增量电源。我国新能源装机容量不断累积迅猛增长,2025年风光总装机容量预计突破10亿千瓦,新能源在电力系统内的占比会进一步上扬。新能源发电的波动性、间歇性与低惯量特性,从因果关系的角度谈及电网频率稳定性与电压支撑能力变弱,就当前情况而言,新能源消纳艰难、电网故障穿越能力不佳等问题极为关键。与其他发电不同,传统新能源发电多采用跟网型控制模式,凭借电网拿到电压与频率的参照,缺少积极支撑能力,在高比例新能源全面接入的局面中,极大概率造成电网振荡、频率崩溃等安全风险。在此背景下,开展新能源电气系统构网储能协同优化控制策略研究既具有理论奠基意义,更有工程实践价值。

## 一、新能源电气系统构网储能协同控制框架设计

确立科学有效的协同控制框架乃实现构网储能高效协同的基础,本文基于“分层控制、分布式决策、集中式协调”的理念,设计“源-储-网”三级协同控制框架,界定各层级控制目标、主体以及交互模式,实现新能源、蓄能与电网的深度协同。

协同控制框架划分为底层设备控制层部分、中层协同调度层部分与顶层全局优化层部分。构网型新能源发电单元与储能系统成为底层设备控制层控制主体,主要

目的是实现本地功率平滑与电网支撑,具有构网特性的新能源相关单元采用虚拟同步机控制策略,模拟同步发电机的惯性、阻尼与下垂特性,经由调节虚拟惯量系数及下垂系数,提供频率与电压支撑;基于响应机制,储能系统采用本地快速控制,凭借下垂控制达成功率率的实时补足,平抑新能源功率高频波动,底层设备依靠工业以太网与CAN总线实现数据交互,切实保证控制指令的高速传送。

中层协同调度层以区域能源控制器作为关键支撑,承担区域内新能源与储能的统筹协同调度,预期取得平抑新能源功率中低频波动、契合日前调度计划的成果<sup>[1]</sup>。该层级以即时的方式采集新能源出力预测数据、电网运行状态与储能状态,采用模型预测控制算法来制造储能系统的动态调度指令,协调构网型新能源的控制参数,防止底层设备控制出现冲突。

顶层全局优化层以电网调度中心为管控核心,承担起全网范围内的资源优化配置,最大化新能源消纳、保障电网安全稳定运行以及使系统运行成本达到最低是核心目标。该层级凭借全网新能源出力预测、负荷需求、电网拓扑与约束条件的数据支撑,运用改进后的多目标优化算法制订日前调度安排,界定各区域新能源发电的上限标准、储能充放电的具体计划及备用容量的配置方式。通过广域测量系统,顶层优化层采集全网运行数据,结合中层协同调度层实际意义进行监督与调整,着重让区域调度计划与全网优化目标相符。

## 二、构网型新能源发电单元控制策略设计

构网型控制策略作为核心为新能源发电单元赋予了主动支撑的能力，从研究视角依托虚拟同步机技术，设计契合新能源电气系统的构网型控制策略，采用参数优化和控制逻辑的优化手段，提升新能源对电网频率与电压的支撑水平，提升系统稳定性。

VSM控制策略围绕核心模拟同步发电机机电暂态特性发挥作用，其具体的数学模型涵盖虚拟惯性环节、虚拟阻尼环节与下垂控制环节。虚拟惯性环节以模仿同步发电机转动惯量的形式开展工作，产生与频率变动速率成正比的虚拟功率，公式为： $\Delta P=2H \cdot (df/dt)$ ，其中H为虚拟惯量系数， $df/dt$ 为频率变化率。增大H能显著增强系统惯性，抑制频率快速波动，但会让系统响应的灵敏水平变差；减小H则相反，虚拟阻尼环节借助引入阻尼系数D发挥作用，引发与频率偏差成正比的阻尼功率，公式为： $\Delta P=D \cdot (fN-f)$ ，其中 $fN$ 为额定频率， $f$ 为实际频率，阻尼系数D的增大可加快频率恢复速度，提升系统稳定性。下垂控制环节借助设定有功-频率（P-f）下垂系数与无功-电压（Q-U）下垂系数，完成新能源发电单元的合理的功率分配与电压调节。

针对新能源出力呈现大幅起伏变化的显著特点，本文针对传统VSM控制策略作出改进：一是引入自适应虚拟惯量与阻尼控制，结合新能源出力波动范围和电网频率偏差实时改变H与D的值，当新能源输出能量波动迅猛或电网频率偏差较大时，增加H与D的量值以强化系统惯性与阻尼，抑制频率波动；当系统运行稳定时，减小H与D以提升响应速度<sup>[2]</sup>。二是优化无功-电压控制逻辑，把电网电压偏差与新能源发电单元无功输出约束相结合，采用分段下倾控制策略，电压偏差处于极轻微的小幅度状态，选取规模较小的Q-U下垂系数，保证电压调节精度；当电压偏差较大时，采用数值上较大的下垂系数，迅速把电压恢复到额定的标准范围。三是增加故障穿越控制模块，在电网发生电压骤然降低或频率急剧变化时，采用限幅控制与crowbar电路保护相结合的方式，聚焦保证新能源发电单元不脱离电网运行，赋予必要的为故障提供支撑的功率。

依靠MATLAB/Simulink的强大功能搭建仿真模型，从性能方面对比传统VSM控制与改进VSM控制。仿真结果表明，从新能源发电单元频率响应时间缩短30%能看出改进VSM控制策略的意义，电压恢复速度提升25%，当新能源出力出现幅度为 $\pm 20\%$ 的波动时，电网频率偏

差控制在 $\pm 0.15\text{Hz}$ 以内，电压波动幅度降低18%。

## 三、储能系统协同优化调度策略研究

储能调度策略剖析其核心作用所涉及的目标有三个方面：一是平抑新能源功率波动，采取手段将新能源出力波动把控于电网许可范围；二是提供电网频率与电压支撑，配合实现电网的调频、调压需求；三是优化储能充放电策略，减少储能系统的循环损耗，延长使用寿命，提升经济性，为实现多领域多目标协同，调度策略采用“日内滚动优化+实时修正”的双层架构。

基于超短期新能源出力预测、储能SOC状态与负荷需求构建日内滚动优化层，凭借模型预测控制算法敲定储能系统的5分钟滚动充放电方案<sup>[3]</sup>。MPC算法的目标函数包括：新能源功率波动平抑误差最小、储能充放电损耗最小、电网频率/电压偏差最小，主要约束条件包括储能SOC约束、充放电功率约束、电网线路潮流约束与频率/电压约束，通过求解MPC优化模型，得到储能系统的最适充放电功率轨迹。

将电网实时运行数据与新能源出力实际值作为实时修正层的基础，聚焦滚动优化计划进行实时性的调校，当电网频率实际低于额定值的时候，储能系统加大放电功率助力实现调频支撑；当电网频率高于规定的额定数值时，其增加充电功率吸收多余功率；当电压开始出现偏差之际，采用调节储能系统的无功出力开展电压调控，在即时修正层引入预测误差补偿机制，根据新能源出力预测误差的大小与方向，实时调控储能充放电功率，使功率波动平抑效果切实地达成目标。

为凸显储能调度经济性提升的关键意义，将目标函数引入与储能循环寿命损耗模型相关逻辑中，基于储能SOC变化量与充放电深度得出损耗成本。例如，锂离子电池储能系统的循环寿命损耗与DOD近似呈指数关系，DOD越大，循环寿命越短，损耗成本越高。于优化操作中兼顾功率平抑效应和储能损耗费用，突出达成结果实现储能系统经济高效运转。仿真结果表明，所提储能调度策略极大地缩小了新能源功率波动幅度，从 $\pm 25\%$ 缩至 $\pm 5\%$ 以内，储能系统的循环寿命损耗降低百分之十二至百分之十五，一起实现电网调频调压需求，达成了多目标同步优化。

## 四、多目标协同优化算法设计与实现

多目标协同优化是实现“源-储-网”全局优化的核心，本文针对新能源消纳、电网稳定与储能经济性三大目标开展相关研究，研发出优化后的多目标粒子群优

化算法, 鉴于要应对复杂问题而引入自适应权重与精英保留策略, 增进算法收敛的速度与优化的精度, 实现多目标的 Pareto 最优解。

具备求解多目标功能的传统 MOPSO 算法应用时, 在实际应用中存在收敛速度慢、易陷入局部最优解等棘手问题<sup>[4]</sup>。本文对常规的 MOPSO 算法进行三方面改进: 一是引入自适应惯性权重与学习因子, 惯性权重采用非线性递减方案, 凭借初期较大状况提升全局搜索水平, 在搜索的后期阶段, 取值缩窄以提升局部搜索精度; 学习因子实施动态调整策略, 依照粒子适应度值动态调控个体学习因子与全局学习因子, 管控个体经验跟群体经验造成的效应。二是改进外部存档集维护策略, 选用拥挤度排序与精英保留相关机制, 抹除存档集中拥挤度偏大的粒子, 保留分布均一、适应度值较优的杰出粒子, 确保 Pareto 解集的多样性与收敛性。三是引入约束处理机制, 采用罚函数法将约束性条件转化为目标函数的一部分, 以违反约束的判定为前提对粒子实施惩罚, 确认优化结果符合电网运行及储能系统约束范围。

### 五、仿真验证与结果分析

为检验所提构网储能协同优化控制策略的有效性, 依据实际状况, 借助 MATLAB/Simulink 与 PSCAD/EMTDC 建立含高比例新能源、储能系统与常规电源的仿真模型, 筹备不同工况开展仿真核查, 基于新能源消纳成效、电网稳定状态、储能经济实惠三个范畴分析策略性能。

仿真系统参数如下: 风电装机容量 100MW, 光伏装机容量 50MW, 锂电池储能系统容量 30MW/60MWh, 常规火电容量 80MW, 负荷峰值 150MW, 采用实测数据进行新能源出力, 风电出力波动幅度为  $\pm 25\%$ , 光伏出力波动幅度为  $\pm 30\%$ , 对比场景包括。

仿真结果表明: 在新能源消纳方面, 场景 3 的新能源消纳率达到 92.3%, 较场景 1 提升 11.8%, 较场景 2 提升 8.5%, 确切证明构网型控制跟储能协同对新能源消纳的推动作用; 在电网稳定性方面, 场景 3 的频率最大偏差为 0.18Hz, 电压最大波动幅度为 2.3%, 均优于场景 1 (频率偏差 0.52Hz, 电压波动 5.8%) 与场景 2 (频率偏差 0.35Hz, 电压波动 3.7%), 说明所提构网型控制策略从

优势方面切实提升电网频率与电压支撑能力; 在储能经济性方面, 针对场景 3, 储能系统的循环寿命损耗降低 14.6%, 辅助服务收益提升 12.8%, 运行成本降低 13.5%, 表露了优化调度策略体现的经济性好<sup>[5]</sup>。

因设备老化导致电网故障工况下, 场景 3 的新能源发电单元未脱网运行, 故障切除后频率与电压快速回归到额定范围, 因场景变化, 恢复时间较场景 1 缩短了 40%, 较场景 2 缩短 25%, 凭借所提策略的先进特质验证了其故障穿越能力与系统恢复能力。仿真结果充分表明, 本文提出的构网储能协同优化控制策略能够有效解决高比例新能源接入引发的电网稳定与消纳问题, 展现出在技术特性方面的良好表现与应用前景。

### 总结

综合仿真与工程应用的成果表明, 所提协同控制策略达成有效提升新能源消纳率、增强电网稳定性、降低储能运行成本目标意义重大。针对高比例新能源电力系统的安全稳定运行给出了可靠方案, 研究在完整性上存在一定局限: 一是储能系统的老化特性对控制策略的影响未被充分考量; 考虑到当下新能源发展形势, 其出力预测误差造成的影响未能彻底去除; 三是策略在大规模电网中的扩展性仍需进一步验证。

### 参考文献

- [1] 林俐, 马笑寒, 丁文敏. 计及构网型储能电站的新能源基地无功协调优化控制 [J]. 电力系统自动化, 2025 (1).
- [2] 郭佳俊, 徐志, 翟保豫, 等. 构网型新能源-储能联合并网系统 LVRT 控制策略研究 [J]. 电气传动, 2024, 54 (7): 58-65.
- [3] 唐小婷. 气电联合微能网运行能量管理策略研究 [D]. 山东理工大学, 2021.
- [4] 马骏超, 周浩浩, 江全元, 等. 储能参与一次调频的优化控制策略研究 [J]. 浙江电力, 2021.
- [5] 尤森槟. 微电网梯次异构储能系统优化策略研究 [D]. 新疆大学, 2020.