

电力系统与光伏发电的协同优化控制策略研究

罗娜

(湛江中汇电力咨询有限公司, 广东 湛江 524000)

摘要 随着新能源在电力系统总装机量中占比的持续攀升, 有关电力系统与光伏发电协同运行的研究逐渐受到人们的关注。本文深入剖析了光伏电站并入电网后对系统运行稳定性、调度操作灵活性以及电能质量产生的各类影响, 进而提出基于多时间尺度的优化控制构想。同时, 结合源网荷储一体化的先进理念, 搭建一套协调控制方案, 最终达成系统功率平衡与频率稳定的双重目标。通过仿真实验验证, 该控制方案能够有效提高光伏出力的利用效率, 减少电力系统运行中的波动隐患, 为新型电力系统的建设工作提供有益参考。

关键词 光伏发电; 电力系统; 多时间尺度优化模型; 源网荷储; 虚拟同步发电机

中图分类号: TM7; TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.024

0 引言

在“双碳”战略目标的持续推动下, 光伏发电的装机规模呈现快速扩张态势, 其固有的间歇性与波动性特征, 对电力系统保持稳定运行提出了更为严格的要求。如何促进光伏出力与电网调度之间的高效协同配合, 已成为当前能源转型进程中的关键研究方向。从国际研究现状来看, 在分布式控制技术与虚拟同步发电机技术领域, 已建立起相对完善的技术体系; 国内研究则将重点放在源网荷储协同机制构建与分层调度优化方法探索上, 依托多时间尺度开展协同优化控制策略设计, 能够在确保电力系统运行安全的基础上, 进一步提升系统运行的经济性, 同时提高新能源电力的消纳能力。

1 电力系统与光伏发电协同运行的理论基础

1.1 光伏发电特性与并网影响

光伏发电的能量获取依赖太阳辐照, 气候条件、地理区位及昼夜交替都会对其产生显著作用, 使其呈现出明显的间歇性与波动性特征。这类特性导致光伏出力难以维持持续稳定状态, 进而对电力系统的功率平衡状态与调度操作灵活性造成直接影响。当光伏出力出现快速变化时, 电力系统的频率与电压可能随之产生剧烈波动, 最终对电网的稳定运行形成干扰。光伏并网逆变器作为能量转换的关键接口, 在完成直流到交流能量转换的过程中, 还具备无功功率支撑、电压调节及谐波抑制等功能, 其控制特性对电网的动态响应过程具有重要作用, 采用合理的逆变器控制方案, 能够在一定程度上提升系统的惯性响应能力与频率支

撑效果, 改善电能质量水平并增强系统整体稳定性。

1.2 电力系统运行特征分析

传统电力系统以集中式火电机组为核心单元, 其调度机制主要依托机组启停与备用容量调节, 这种运行模式确保了系统的高度可控性和稳定性。然而, 随着可再生能源并网比例的持续攀升, 系统运行面临双重挑战: 一方面, 光伏发电的间歇性特征显著增加了电力平衡的调控难度; 另一方面, 传统调峰资源在容量储备和响应速度方面均存在不足, 难以满足高频率波动场景下的快速调节需求。在此背景下, 源网荷储一体化的发展正推动电力系统运行机制的革新, 通过多能互补与信息交互技术, 实现电源、电网与负荷的协同优化, 并充分发挥储能装置的快速响应特性, 将其纳入电压支撑与频率调节体系, 从而构建更具灵活性、智能化和韧性的新型电力系统架构^[1]。

1.3 协同优化控制的理论框架

协同优化控制的核心要义在于让不同系统层级之间实现信息共享与控制协调, 其所涵盖的层级一般包含规划层、调度层与控制层。其中, 规划层主要承担长期能源结构优化与容量配置任务, 调度层负责达成中短期时段内的发电与负荷平衡调节目标, 控制层则将工作重点聚焦实时动态响应与电能质量控制方面。在优化方法的运用上, 协同控制广泛引入多目标优化理论, 把经济性、稳定性、清洁性等各类指标纳入统一分析框架, 实现全局最优目标与局部协调需求的双重兼顾。随着智能电网与信息通信技术的持续发展, 基于信息融合的动态优化模式逐渐成为发展方向。借助实时数据采集与系统状态感知手段, 电力系统能够

自适应调整运行参数，搭建起预测—反馈—优化的闭环控制体系，最终提升电力系统与光伏发电协同运行的效率及鲁棒性表现。

2 电力系统与光伏发电的多时间尺度优化模型

2.1 日前与实时协同调度模型

当光伏发电并入电网后，电力系统运行呈现出明显的时变性与不确定性，多时间尺度协同调度由此成为提高系统经济性与稳定性的关键举措。日前调度工作的开展主要依托对光照强度、负荷需求及储能系统出力的预测，通过搭建光伏功率与气象参数间的非线性模型，并结合机器学习或时间序列算法，实现对功率的高精度预测，为次日运行计划的制定提供依据。在实时调度层面，调度策略需具备滚动优化属性，依据实际运行数据对预测误差进行动态修正，实现连续的功率平衡调整。通过构建日前与实时耦合模型，能够实现长期计划与短期控制的协调统一。目标函数通常会综合考量发电成本最低化、功率偏差最小化及系统安全约束，实现多层优化的有机衔接与动态修正，进而提升系统的自适应调度能力^[2]。

2.2 系统约束与优化目标

多时间尺度优化模型需在满足各类约束条件的基础上，实现系统运行的全局最优。其一，功率平衡约束要求光伏、储能、电网与负荷之间的实时功率保持匹配，避免电网频率出现波动；其二，储能容量约束对能量的充放电范围与速率加以限制，以延长设备使用寿命并防止过充或过放情况发生；其三，网络潮流约束确保线路电流、电压及变压器容量处于允许运行范围内。优化目标除关注经济性外，还需兼顾系统可靠性与可再生能源消纳率，通过设定权重系数来平衡各目标间的矛盾。

2.3 求解算法与优化流程

针对多时间尺度优化模型存在的高维复杂性，采用基于改进粒子群优化（PSO）算法的求解方式具有突出优势。借助自适应惯性权重与速度调整机制，能够有效避免算法陷入局部最优，提升全局搜索能力、结合分层迭代与并行优化技术，可将系统划分为主调度层与局部控制层，主调度层负责全局目标优化，局部控制层承担局部动态调整任务，从而提高计算效率与模型响应速度。在具体流程方面，首先对输入数据进行归一化处理并完成参数初始化；接着，依据预测信息生成初始调度方案；随后在迭代过程中引入惩罚因子，对违反约束的解进行修正；最终通过多次仿真与

交互计算实现模型收敛。该算法不仅能在较短时间内获取稳定解，还可兼顾计算精度与实时性，为电力系统与光伏发电的协同优化提供有效的计算支持与工程实现途径。

3 光伏发电并网的协同控制策略设计

3.1 层次化控制体系结构

为实现光伏发电系统与电力系统的高效协同运行，需构建层次化控制架构以协调不同层级的能量流与信息流。该架构采用三级控制模式：上层主站能量管理系统（EMS）负责系统级运行策略制定与全局优化，基于气象预测、负荷需求及储能状态等数据生成功率分配方案与调度指令；中层区域分布式控制系统实现区域内电站间的协同运行与信息交互，通过分布式通信技术与协同算法完成多节点自适应控制与故障隔离；下层由光伏逆变器及本地控制器构成，执行电压调节与无功功率补偿等实时控制任务，确保局部系统稳定运行。这种“集中决策—分布执行—实时响应”的三层控制机制，通过全局优化与局部调节的动态配合，为光伏并网运行提供了灵活可靠的控制基础^[3]。

3.2 基于虚拟同步发电机（VSG）的频率控制

虚拟同步发电机（VSG）技术通过在逆变器控制环节引入同步发电机的惯性与阻尼特性，使光伏系统具备频率支撑能力与惯性响应功能。VSG 模型以功率角方程和惯性方程作为核心基础，通过调节有功功率与无功功率的输出情况，模拟同步机转子的动态过程，进而在频率出现波动时自动调整出力，为电网提供暂态稳定支撑。在控制参数优化工作中，需依据系统惯性需求与光伏出力波动特点，合理配置惯性常数与阻尼系数，以此平衡响应速度与振荡抑制效果。在多机并联运行场景下，通过分布式协同控制可实现多个 VSG 节点之间的频率协调与惯性共享，避免出现功率分配不均与振荡共模现象。该方法可有效提升光伏电站的动态响应能力，使光伏电站从被动并网单元转变为主动支撑电网运行的重要组成部分。

3.3 储能系统的辅助控制作用

储能系统在光伏并网控制过程中发挥着关键的缓冲与调节功能。短时储能设备（如超级电容、锂电池等）能够在光伏出力出现快速波动时实现能量平滑处理，削减功率尖峰并稳定电压变化趋势，通过科学设计充放电控制策略，储能系统可在毫秒级时间范围内响应功率变化，参与电网的有功功率与无功功率调节工作。除此之外，储能还能在电压支撑、频率稳定及备用容

量调节中发挥辅助作用，特别是在孤岛运行或弱电网环境下，可明显提升系统的稳态与动态性能。光伏与储能的协同控制借助能量管理算法实现双向优化：一方面最大限度地提高光伏能量利用率；另一方面延长储能设备的使用寿命。综合性能评估结果显示，该协同控制策略能够在提升光伏系统出力平滑性、降低电能质量波动程度的同时，实现系统运行的高效与经济统一，为新型电力系统的构建提供重要支持^[4]。

4 源网荷储协同优化运行与仿真验证

4.1 源网荷储一体化协同框架

在新型电力系统当中，源网荷储一体化协同运行是实现高比例光伏并网安全、稳定且经济运行的重要方式。在源侧层面，通过建立光伏与火电机组的协调运行机制，能够在光伏出力发生波动时，由火电机组提供惯性支撑与调峰补偿，实现有功功率的动态平衡；网侧依托区域能源互联网的柔性调度平台，运用动态潮流控制与分布式能量路由技术，实现电能在不同区域之间的最优流动；荷储侧则结合需求响应机制与储能系统优化策略，利用智能负荷控制与储能参与手段，实现削峰填谷与能量再分配。相关研究表明，当光伏出力波动幅度处于±20%区间时，通过源网荷储协同控制，可将系统频率偏差从0.22 Hz降低至0.08 Hz，电压波动率控制在±2%范围以内，系统稳定性得到显著提升。

4.2 仿真平台与模型构建

为验证协同优化控制策略的有效性，搭建了基于MATLAB/Simulink的电力系统仿真平台。该系统模型包含1台装机容量100 MW的火电机组、2座合计装机60 MW的光伏电站、1套10 MW·h的储能系统以及50 MW的动态负荷。通过设定晴天、阴天与骤阴骤晴三类典型气象条件，模拟光伏出力的快速变化特征。在仿真场景里，采用日前预测与实时优化相结合的滚动调度方案，将控制周期设定为15分钟。当系统在不同负荷特性下运行时，储能系统借助SOC(State of Charge, 荷电状态)调节实现能量平衡，平均充放电效率达到92.4%。协同控制策略通过EMS(能量管理系统)协调指令，在秒级时间内完成功率分配，保障电压、频率及储能状态的动态稳定，为后续性能评估提供可靠的数据支持^[5]。

4.3 结果分析与性能评估

仿真数据显示，采用协同优化控制后，系统在光伏出力波动情况下的功率平衡能力与经济性得到显著

提升。与传统独立控制相比，系统频率波动幅度降低65%，电能损耗减少约18%，光伏出力利用率从87.3%提升至95.1%。在经济性层面，运行成本较基准方案下降约12.6%，同时碳排放强度降低9.8%。表1为不同控制策略下电力系统运行性能对比。

表1 不同控制策略下电力系统运行性能对比

控制策略类型	光伏利用率 (%)	频率偏差 (Hz)	电压波动率 (%)	运行成本下降幅度 (%)	碳排放降低 (%)
传统独立控制	87.3	0.22	±4.5	—	—
分层协调控制	92.8	0.12	±3.0	7.5	5.3
协同优化控制	95.1	0.08	±2.0	12.6	9.8

表1中呈现的数据表明，协同优化控制在提高光伏消纳率、抑制系统波动以及降低运行成本等方面均展现出优异性能，这一结果证实源网荷储一体化协同策略能够有效改善系统运行质量与经济性，为搭建高比例新能源友好型电网提供了切实可行的技术路径。

5 结束语

通过对电力系统与光伏发电协同优化控制进行系统性研究，构建涵盖多时间尺度调度、层次化控制及源网荷储协同运行的综合框架，旨在实现系统稳定性、经济性与绿色低碳目标的协同统一。仿真结果进一步验证了该策略在提升光伏利用率、减少频率波动及优化运行成本方面的显著优势。未来研究应进一步融合人工智能、自适应优化与云边端协同控制技术，搭建智能、高效、可持续的新型电力系统运行模式，为能源结构转型与“双碳”目标达成提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李泽宇. 新型电力系统下的源网荷储协同优化及数字孪生模型研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
- [2] 蔡晓钦. 微电网接入配电网协同优化控制研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- [3] 唐铭泽. 智能电网分布式能源协同优化控制方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
- [4] 王竞敏. 光伏发电与照明控制的协同优化与改进研究 [J]. 光源与照明, 2025(04):26-28.
- [5] 吴成昊. 提升电力系统运行灵活性的输配协同交易与调控策略研究 [D]. 吉林市: 东北电力大学, 2025.