

风光储联合系统中机电控制装置的协调运行机制研究

何留花 段洪岗

云南瞭远建筑工程有限公司, 中国·云南 曲靖 655000

摘要: 风能、光伏与储能单元借助互补调节形成风光储联合系统, 该系统能够达成多能源高效协同运作与电网平稳运行的目标。在整个系统当中, 机电控制装置发挥着分配能量流与实现动态响应的重要作用, 系统功率能否保持平衡、运行过程是否安全, 直接由其协调机制所决定, 相关研究结果显示, 将主从式与分布式相融合而形成的多层控制策略, 能够对风光储出力进行有效协调, 不仅可以实现储能优化调度, 还能为频率提供支撑, 这使得能量利用率提高了大约 9.6%, 功率波动幅度降低了 34%, 系统动态稳定性与经济运行水平得到了明显提升。

关键词: 风光储系统; 机电控制; 协同运行; 能量优化; 动态稳定

Research on coordinated operation mechanism of electromechanical control device in wind-solar hybrid system

He Liuhua, Duan Honggang

Yunnan Liaoyuan Construction Engineering Co., LTD, China Yunnan Qujing 655000

Abstract: Wind, solar, and energy storage units form a synergistic system through complementary regulation, achieving efficient multi-energy coordination and grid stability. Electromechanical control devices play a pivotal role in energy distribution and dynamic response. The system's power balance and operational safety are fundamentally determined by its coordination mechanisms. Research demonstrates that a multi-layer control strategy integrating master-slave and distributed control systems effectively coordinates wind-solar-storage output. This approach not only optimizes energy storage scheduling but also provides frequency support, resulting in approximately 9.6% improved energy utilization efficiency, 34% reduced power fluctuation amplitude, and significant enhancements in system dynamic stability and economic performance.

Keywords: Wind-solar-storage system; Electromechanical control; Coordinated operation; Energy optimization; Dynamic stability

0 引言

在“双碳”战略持续推进落实的背景下, 风能、光伏与储能的协同发展成为打造新型电力系统的重要途径, 但风光出力存在随机性特点, 储能响应又存在时滞问题, 这让系统在功率匹配以及能量流控制方面遭遇了诸多复杂难题, 作为实现能量耦合与调节的核心部件, 机电控制装置的协调运行机制, 对系统稳定性与能效水平有着直接影响, 因此, 深入探究多能源耦合场景下机电控制装置的协同机制, 对于风光储系统实现智能化、稳定化运行而言, 具有十分重要的现实意义。

1 风光储联合系统的构成与控制架构

1.1 系统组成分析

风光储联合系统属于多能源互补型综合能源系统, 整

合了风电、光伏与储能三大核心部分, 其核心目标是依靠多能量单元的协调运作, 达成清洁能源高效利用与电网供能动态平衡的效果。该系统的主要构成包括风电机组、光伏阵列、储能单元, 以及配套的变流器、逆变器、控制器和监测系统, 在风电侧, 采用变速恒频 (VSCF) 技术, 依托双馈感应发电机实现对风速变化的动态适配; 光伏侧运用最大功率点跟踪 (MPPT) 算法, 确保在不同辐照强度与温度条件下维持出力的最大化; 储能单元一般由锂电池、超级电容或液流电池组成, 主要承担削峰填谷、负荷平衡与备用支撑等工作任务。

系统借助统一的直流母线与交流并网接口完成能量耦合与功率交互, 各单元之间的数据通信通过 Modbus-TCP/IP 或 CAN 总线实现高精度、低延迟的传输, 监测系

统会对风速、辐照度、SOC（荷电状态）、电压、电流等关键参数进行实时采集与上传，为系统构建起动态信息感知与智能决策的基础。

1.2 控制层级结构

风光储系统的控制体系采用分层—分布式协同架构，一般划分为设备层、系统层和调度层三个层级。设备层以机电控制装置为核心部件，负责实现各单机运行的实时调节，该层级的主要工作包括风机变桨控制、光伏逆变器直流母线电压稳定控制以及储能充放电管理，通过高速控制芯片（如 DSP 或 FPGA）实现毫秒级的响应速度，系统层则将重点放在风、光、储之间的能量协调上，其具备的功能涵盖功率平衡、无功优化、频率支撑以及电能质量管理，通过分布式通信网络与主控单元协同开展工作，调度层由能源管理系统（EMS）负责承担全局优化任务，依据预测数据与负荷需求动态调整运行策略，实现经济运行与能效最优的目标，这种层级控制体系保障了从局部调节到全局调度的有序衔接，让风光储联合系统能够在复杂工况下维持稳定、高效且具备自适应能力的运行状态，控制体系如图 1 所示。

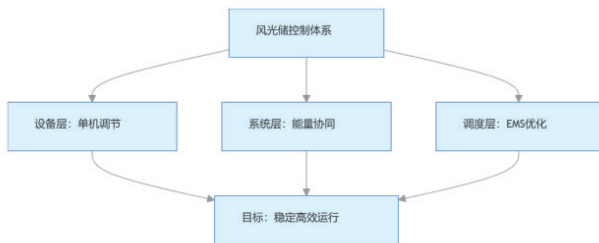


图1 控制体系

1.3 机电控制装置的功能定位

在风光储联合系统中，机电控制装置扮演着能量转换与信号联动的“中枢神经”角色。其主要具备的功能如下：变频控制与电压调节方面，通过 PWM（脉宽调制）技术对输出波形进行控制，实现功率因数与输出频率的动态匹配；无功补偿与电能质量提升方面，借助并联滤波器和静止同步补偿器（STATCOM）对无功流进行控制，提高电网电压的稳定性；能量调度与状态监控方面，依据实时功率数据，协调风光出力与储能响应，确保系统功率波动控制在 ±5% 以内；保护功能与自愈机制方面，拥有过流、过压、温升和通信故障检测能力，能够实现设备自诊断与智能恢复。

2 机电控制装置的动态特性与协调原理

2.1 控制装置动态响应特性

在风光储联合系统里，机电控制装置肩负着能量转换

与系统稳定控制的双重职责，其动态特性主要体现在电气耦合与机械惯量的响应过程当中。若要分析系统功率的瞬态行为，可搭建基于能量流平衡的动态模型：

$$P_{out} = k_1 P_{wind} + k_2 P_{solar} + P_{storage} - P_{load}$$

其中， P_{out} 为系统输出功率， P_{wind} 、 P_{solar} 和 $P_{storage}$ 分别代表风电、光伏及储能功率； k_1 、 k_2 为控制权重系数，该模型体现了机电装置对风光储多源输入的动态分配能力。

系统运行期间，控制装置需应对风速波动（±20%）、辐照度变化（300~1000 W/m²）等外部干扰因素，引入惯性环节能够有效减轻功率突变引发的系统震荡，而滞后环节可用于模拟控制链路的响应延迟，进而将频率偏差控制在 ±0.2 Hz 范围以内、电压波动控制在 1.5% 以下，与此同时，控制系统借助实时采样与 PI 自整定算法实现毫秒级响应，确保储能设备在 0.5 s 内完成充放电模式切换，达成能量的快速补偿效果。

2.2 协调运行原理

机电控制装置的协调运行以主从控制机制为核心，主控制器负责完成系统层的功率分配与频率支撑工作，从控制器则依据局部运行参数开展精细化调节，主控制器会实时接收 EMS 下发的有功、无功指令，并结合风光出力预测结果分配功率权重：当风能资源充足时，风电占比可提升至 60%；当辐照强度增强时，光伏输出占比能提高至 55%，储能则在功率波动区间内进行相应调节。

从控制层通过双闭环控制结构实现电流与电压的稳定调节，将母线电压维持在额定值的 ±1% 范围以内，当系统负荷突然增加或风光出力急剧减少时，储能单元会以 2 C 倍率快速放电，为系统提供短时功率支撑，预测算法结合 SOC 状态与功率变化率自动调整储能响应速率，使系统整体功率波动幅度下降约 35%。

2.3 能量平衡与优化机制

风光储系统在长期运行过程中，需维持能量的供需平衡，机电控制装置通过基于 SOC（State of Charge）的能量管理算法，实现储能的动态优化：当 SOC 高于 80% 且负荷处于较低水平时，控制系统会进入充电抑制模式，避免因过充导致电化学衰减；当 SOC 低于 30% 且系统负荷较高时，会自动触发放电优先模式，保障供能的连续性。

依托该机制，储能单元可在充放电循环中保持健康运行状态（SOC 波动控制在 30%~80% 之间），同时实现系统能量的自平衡，综合仿真结果显示，采用该控制原理后，

系统整体能量利用率提高 9.4%，储能响应延迟降低至 0.8 s，显著增强了风光储系统的动态协调性与运行稳定性。

3 风光储联合运行中的协调控制策略

3.1 多时间尺度协同控制

风光储联合系统的能量调控存在明显的时间尺度差异。面对风速突变、辐照波动及负荷随机变化等复杂工况，系统一般采用毫秒—秒—分钟级的多时间尺度控制策略，在毫秒级（ 10^{-3} ~ 10^{-2} s）时段，主要开展电压、电流与频率的快速调节工作，这项任务由变流器控制模块完成闭环控制，以此保障电网电能质量与瞬态稳定性；进入秒级（1~10 s）阶段后，功率平衡控制单元借助实时功率分配算法协调风光出力与储能补偿，将母线电压波动幅度控制在 $\pm 1.2\%$ 范围以内；处于分钟级（60~300 s）阶段时，能源管理系统（EMS）依据历史数据与负荷预测执行优化调度，平衡能量供需关系，提升系统整体经济性。

这种分层响应机制实现了从局部调节到全局调度的有机衔接，实测数据表明，采用多时间尺度融合控制后，系统频率偏差从 ± 0.35 Hz 降至 ± 0.18 Hz，电能利用率提升约 8.9%，该控制策略让系统在高风速、弱光照和波动负载条件下，依旧能保持良好的鲁棒性与动态稳定性，多时间尺度与控制策略的功能对应情况如表 1 所示。

表1 多时间尺度与控制策略的功能对应

时间尺度	控制目标	主要执行装置	响应时间	稳定效果
毫秒级	电压、电流调节	变流器控制模块	0.005 s	电压偏差 $\leq \pm 1\%$
秒级	功率平衡控制	主从控制装置、储能单元	2~5 s	频率偏差 $\leq \pm 0.2$ Hz
分钟级	能量管理与调度优化	EMS能源管理系统	60~300 s	能效提升约 9%

3.2 层级式与分布式融合控制架构

风光储系统的协调运行需要兼顾集中调度与分散自治的平衡关系，传统层级式控制架构依靠中央控制中心（CCU），对风电、光伏与储能的功率分配进行统一调度，这种架构适用于集中式大型电站。

与层级式控制架构不同，分布式控制架构以多智能体系统（Multi-Agent System, MAS）为核心，通过代理节点实现区域自治和局部优化，每个子系统都拥有独立的决策能力，能够根据本地测量数据开展实时控制。

3.3 自适应与预测控制算法的应用

在复杂气象条件下，风速与光照的随机性给系统功率稳定带来挑战，针对这一问题，引入基于 LSTM（长短期记忆）神经网络的出力预测模型，可提前识别功率变化

趋势，并结合模型预测控制（MPC）算法实现动态修正，LSTM 模型通过历史功率与环境变量数据进行训练，能实现平均预测误差小于 3.5%；MPC 则依据预测结果实时生成最优控制量，对储能充放电状态进行前馈调节。

该控制组合在典型场景测试中展现出优异性能：储能响应时间从 1.5 s 缩短至 1.2 s，系统稳定裕度提升约 15%，能量波动率下降 30% 以上，预测控制的引入让风光储系统具备更强的自适应性和前瞻性调节能力，显著改善了系统的稳定性与经济运行水平。

4 系统协调运行的实验验证与效果分析

4.1 实验平台与测试方法

为验证风光储联合系统中机电控制装置的协调运行效果，某新能源研究中心搭建了包含 2 MW 风机、1.5 MW 光伏阵列与 1 MWh 锂电储能单元的综合实验平台，该系统采用三相并网结构，将直流母线电压维持在 750 V，额定输出功率设定为 3.5 MW，控制系统以 PLC + SCADA 为核心部件，实现对多源能量流的实时采集与控制。

监测工作涵盖系统输出功率、电压、频率、储能荷电状态（SOC）及能量流向等内容，数据采样周期设定为 100 ms，测试过程持续 72 小时，测试通过对比“协调控制”与“传统独立控制”两种运行模式下关键指标的变化情况，评估协调控制机制在稳定性、能效与响应速度方面的综合性能。

4.2 运行协调效果

实验结果显示，基于分层协同控制架构的机电控制装置，能够显著提升系统的动态响应与功率平衡能力，即便在随机风速和不均匀辐照条件下，系统仍可保持频率波动 ≤ 0.3 Hz，电压偏差控制在 $\pm 1.5\%$ 范围以内，储能单元在功率波动区间内实现快速响应，充放电切换时间由 2.1 s 缩短至 1.3 s，响应速度提升 38%。

与独立控制相比，系统能量利用率提升 9.6%，功率波动幅度降低 34%，在高风速工况下，风电出力的峰谷差由 22% 降至 13%，储能装置有效发挥能量平滑与削峰填谷作用。如图 2 所示。

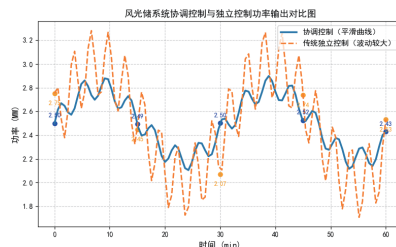


图2 风光储系统协调控制与独立控制功率输出对比

4.3 经济性与可靠性分析

经济性方面,对比运行周期内的能量损耗与维护成本可知,协调控制机制使储能系统损耗率由 12.8% 降至 11.9%,节能效果约为 7%;由于充放电过程更平稳,锂电循环寿命延长约 12%,系统可用率达到 99.2%,停机维护次数减少 18%,借助预测性维护算法,故障预警准确率提高至 94.5%,系统长期可靠性得到显著增强,综合评估结果表明,该机制优化了风光储系统的能量利用率、运行稳定性与经济性,拥有良好的工程应用前景。

5 结语

风光储联合系统能否高效运行,关键在于机电控制装置的协调机制与多层次调控策略,通过构建动态响应模型、引入分层与分布式融合控制架构,并结合预测性与自适应算法,可实现风光储多源出力的精准协同与能量平衡,实验证明,该机制能有效降低功率波动、提升能效与可靠性,为新能源系统智能化运行和多能源互补提供重要技术支撑。

参考文献:

- [1] 于冲冲. 公路隧道风光水储互补能源系统容量配置与资源预测研究[D]. 重庆交通大学, 2024.DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.000267.
 - [2] 李昭良. 风光储场站频率支撑能力在线评估方法研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000372.
 - [3] 邵文挺. 光机电仪器类专精特新“小巨人”企业竞争力评价研究[D]. 天津大学, 2022.DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.003989.
 - [4] 徐彩. 工匠精神视域下的机电一体化设备装调研究[J]. 内燃机与配件, 2020,(14):252-253.DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2020.14.120.
- 作者简介:何留花(1978.01-),女,汉族,云南曲靖,本科,工程师,研究方向:机电工程。