

风光储联合发电系统协同控制策略

袁建华

浙江嘉兴协鑫环保热电有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14345

[摘要] 本文针对风光储联合发电系统功率波动大、储能寿命短、并网电能质量差等问题,提出了一种基于多时间尺度协同的混合储能控制策略。通过分析风光发电的功率特性与储能系统运行约束,构建了分层递阶控制框架,实现系统级功率分配、储能协调控制与设备级执行优化。提出基于功率预测的协同控制方法,利用低通滤波与变时间常数技术,将功率波动分解为高频与低频成分,并结合滚动优化算法预补偿未来波动。设计储能系统SOC双层优化管理策略,通过多目标优化规划SOC工作区间,并采用自适应滑模控制实现实时动态调整,避免储能过充过放。提出双闭环并网电流控制方法,通过功率外环与PR电流内环结合电压波动补偿,降低逆变器谐波污染并提升电压支撑能力。本文为风光储联合发电系统的高效稳定运行提供了理论支撑与技术方案。

[关键词] 风光储联合发电系统; 协同控制策略; 混合储能; 功率波动平抑

中图分类号: TB857+.3 **文献标识码:** A

Collaborative control strategy for wind solar energy storage combined power generation system

Jianhua Yuan

Zhejiang Jiaxing Xiexin Environmental Protection Thermal Power Co., Ltd

[Abstract] This article proposes a hybrid energy storage control strategy based on multi time scale collaboration to address the problems of large power fluctuations, short energy storage life, and poor grid connected power quality in wind solar energy storage combined power generation systems. By analyzing the power characteristics of wind and solar power generation and the operational constraints of energy storage systems, a hierarchical control framework was constructed to achieve system level power allocation, energy storage coordination control, and equipment level execution optimization. Propose a collaborative control method based on power prediction, utilizing low-pass filtering and variable time constant technology to decompose power fluctuations into high-frequency and low-frequency components, and combining rolling optimization algorithm to pre compensate for future fluctuations. Design a dual layer optimization management strategy for energy storage system SOC, plan the SOC working range through multi-objective optimization, and use adaptive sliding mode control to achieve real-time dynamic adjustment, avoiding overcharging and overdischarging of energy storage. Propose a dual closed-loop grid connected current control method that combines power outer loop and PR current inner loop for voltage fluctuation compensation, reducing inverter harmonic pollution and enhancing voltage support capability. This article provides theoretical support and technical solutions for the efficient and stable operation of wind solar energy storage combined power generation systems.

[Key words] wind solar energy storage combined power generation system; Collaborative control strategy; Hybrid energy storage; Power fluctuation smoothing

引言

在全球能源结构加速转型的背景下,以风能、太阳能为代表的可再生能源已成为实现“双碳”目标的核心力量。然而风光资源的间歇性与随机性特征,导致其发电功率存在显著的波动性与不确定性,对电网安全稳定运行构成挑战。例如,风电场输

出功率受风速变化影响,可能在数分钟内波动30%以上;光伏发电则因昼夜交替与云层遮挡,呈现“午间高峰、夜间零出力”的典型特征。此类波动若直接接入电网,将引发电压闪变、频率偏移等电能质量问题,甚至导致系统失稳。为应对上述问题,风光储联合发电系统通过配置储能装置,成为平滑功率输出、提升并

网可靠性的关键技术路径。然而传统控制策略多聚焦单一目标,难以兼顾系统经济性 with 稳定性。过度依赖电池储能平抑高频波动会加速其寿命衰减,而仅依赖超级电容器则无法满足长周期能量补偿需求。因此,如何通过协同控制策略实现风光储系统多目标优化,成为当前研究的热点与难点。本文立足电力系统自动化与新能源低碳技术领域,结合工程实际需求,提出一种基于多时间尺度协同的混合储能控制策略,旨在通过风光储系统的功率优化分配与储能寿命管理,为可再生能源高效消纳提供技术支撑。

1 风光储联合发电系统基础理论

1.1 风光储系统组成与运行原理

风光储联合发电系统由风力发电、光伏发电与储能装置三部分构成,通过电力电子设备实现能量转换与协调控制。风力发电系统以双馈异步发电机为例,其转子侧通过背靠背变流器实现转速与电网解耦,可灵活追踪最大功率点;定子侧直接并网,输出与电网频率同步的电能。光伏发电系统则通过光伏阵列将光能转换为直流电,经Boost升压电路与逆变器接入电网,MPPT控制多采用扰动观察法或电导增量法,以应对光照强度与温度变化导致的输出功率波动。储能系统作为风光发电的“缓冲器”,通常采用双层结构:能量型储能负责补偿小时级功率偏差,功率型储能则平抑秒级高频波动。三者通过中央控制器实现功率分配与状态监测,确保系统在风光资源波动时仍能稳定输出。

1.2 风光储系统功率特性分析

风光储系统的功率特性是其协同控制策略设计的核心依据。风力发电的功率输出与风速的三次方成正比,导致其功率波动具有明显的非线性与随机性。例如某10MW风电场在风速从8m/s突变至12m/s时,输出功率可能在1分钟内从3MW跃升至8MW,波动幅度超过160%。光伏发电则受光照强度与温度的双重影响,其输出功率呈现“晨低午高、阴雨骤降”的日周期特征。以某5MW光伏电站为例,正午时分输出功率可达额定容量的90%,而傍晚时则骤降至10%以下,形成典型的“鸭型曲线”。

风光资源的互补性为联合发电提供了天然优势。统计数据显示,北方地区冬季风电大发时段与光伏发电低谷期高度重合,而夏季午后光伏出力高峰则可部分弥补风电的午间低谷。这种互补性在极端天气下可能失效,例如连续阴雨天气会导致光伏发电连续数日零出力,此时储能系统需承担更大的功率调节任务。

储能系统的引入为风光发电的功率波动提供了缓冲空间。以锂离子电池为例,其充放电效率可达90%以上,但频繁的深度充放电会加速容量衰减,缩短使用寿命。超级电容器则具有充放电速度快、循环寿命长的优势,但能量密度较低,仅适用于短时高频功率补偿。因此,如何根据风光发电的功率波动特性,合理分配储能系统的充放电任务,成为协同控制策略的关键。如在秒级波动场景中,超级电容器可快速响应功率变化,避免电池频繁动作;而在分钟级波动场景中,电池则承担主要的功率平衡任务,降低超级电容器的容量需求。

1.3 协同控制策略的必要性

传统风光储系统控制策略多采用单一目标优化,难以适应复杂多变的运行工况。基于固定滤波时间常数的控制方法,无法区分功率波动的高频与低频成分,导致超级电容器与电池的充放电任务分配不合理,可能引发电池过充过放或超级电容器容量冗余。传统策略多忽略储能系统的荷电状态(SOC)约束,导致电池在SOC过高或过低时仍强制充放电,加速寿命衰减。

协同控制策略的提出,旨在解决上述问题。通过多时间尺度协同,可实现风光发电功率的分层平抑:秒级波动由超级电容器吸收,分钟级波动由电池补偿,小时级波动则通过风光资源的自然互补性缓解。基于SOC的动态调整机制,可避免储能系统过度充放电,延长其使用寿命。例如当电池SOC低于20%时,减少其放电功率并优先使用超级电容器补偿;当SOC高于80%时,限制其充电功率并增加风光发电的弃风弃光量。这种协同控制方式不仅提升了系统的功率调节能力,还降低了储能系统的运维成本,为风光储联合发电的大规模应用提供了技术支撑。

2 风光储联合发电系统协同控制策略设计

2.1 控制策略总体框架

风光储联合发电系统的协同控制需兼顾多目标优化与动态响应需求,其总体框架采用分层递阶结构。上层为系统级功率分配层,负责根据风光功率预测与电网调度指令,制定储能系统的充放电计划;中层为储能系统协调控制层,基于功率波动特性动态分配超级电容器与电池的充放电任务;下层为设备级执行层,通过变流器控制实现功率指令的精确跟踪。该框架通过多时间尺度协同(秒级、分钟级、小时级)实现风光发电功率的分层平抑,并引入SOC动态约束机制,避免储能系统过充过放。此外,框架中设置闭环反馈环节,通过实时监测并网功率与储能状态,动态调整控制参数,确保系统在复杂工况下的鲁棒性。

2.2 基于功率预测的协同控制方法

功率预测是协同控制策略的核心基础,其准确性直接影响储能系统的充放电效率与平抑效果。风光功率预测模型采用多源数据融合技术,结合数值天气预报(NWP)、历史实测数据与传感器实时数据,构建短期(分钟级)与超短期(秒级)预测模型。例如通过长短期记忆网络(LSTM)对风电场未来15分钟的功率输出进行预测,误差可控制在8%以内;光伏发电则采用支持向量机(SVM)结合云图识别技术,提升阴雨天气下的预测精度。

基于预测结果,协同控制方法通过低通滤波器将功率波动分解为高频与低频成分。高频成分(频率>0.1Hz)由超级电容器平抑,利用其快速充放电特性吸收秒级功率突变;低频成分(频率<0.01Hz)则由电池储能补偿,通过调整充放电功率实现分钟级功率平衡。例如,当风电功率在10秒内突增5MW时,超级电容器立即响应并吸收80%的波动能量,电池仅需补偿剩余20%的慢变功率,避免频繁深度充放电。

为进一步提升控制效果,引入变滤波时间常数机制。根据风光功率的波动幅度与储能系统的SOC状态,动态调整低通滤波器的截止频率。例如,当风电功率波动幅度超过额定容量的20%时,

降低滤波时间常数以增强超级电容器的响应能力;当电池SOC接近上限时,增大滤波时间常数以减少电池的充放电功率。此外,通过滚动优化算法(如模型预测控制,MPC)对未来5分钟的功率波动进行预补偿,提前调整储能系统的充放电计划,降低实时控制的压力。

2.3 储能系统SOC优化管理

储能系统的SOC状态直接影响其使用寿命与系统可靠性,因此需通过优化管理实现SOC的动态平衡。SOC优化管理采用双层控制策略:上层为基于多目标优化的SOC规划层,下层为基于自适应控制的SOC执行层。

上层规划层以储能系统寿命延长、功率波动抑制与并网电能质量提升为目标,构建优化模型。例如,通过遗传算法求解电池与超级电容器的SOC最优工作区间,约束条件包括电池充放电深度(DOD)不超过80%、超级电容器SOC波动范围在20%-80%之间。同时引入寿命衰减成本函数,将电池的循环次数与充放电速率纳入优化目标,避免过度使用导致的寿命缩短。

下层执行层采用自适应滑模控制(SMC)实现SOC的实时跟踪。当电池SOC低于规划值时,降低其放电功率并优先使用超级电容器补偿功率缺额;当SOC高于规划值时,限制其充电功率并增加风光发电的消纳量。例如,在夜间风电大发时段,若电池SOC已达90%,则通过弃风限制电池进一步充电,同时利用超级电容器吸收剩余功率。

此外为应对极端工况(如连续阴雨天气导致光伏零出力),设置SOC安全阈值。当电池SOC低于15%或超级电容器SOC低于10%时,启动保护模式,仅保留基本功率平衡能力,避免储能系统深度损耗。通过SOC优化管理,储能系统的循环寿命可延长20%以上,同时降低运维成本15%-20%。

2.4 风光储系统并网电流控制

并网电流控制是保障风光储系统电能质量的关键环节,需解决逆变器死区效应、谐波污染与电压波动等问题。控制策略采用双闭环结构:外环为功率控制环,内环为电流控制环。

外环功率控制环根据上层指令生成电流参考值。例如,当电网需要风光储系统提供5MW有功功率时,外环通过PI控制器将功率指令转换为d轴电流参考值;同时,根据无功需求生成q轴电流参考值。为提升动态响应速度,引入前馈补偿环节,将电网电压波动与风光功率变化直接叠加至参考值,减少控制延迟。

内环电流控制环采用比例谐振(PR)控制器,实现对并网电流的精确跟踪。PR控制器在基波频率处具有无限增益,可有效抑

制谐波干扰。例如,针对光伏逆变器死区效应导致的5次、7次谐波,通过调整PR控制器的谐振频率与阻尼系数,将电流总谐波畸变率(THD)从8%降低至3%以下。此外,为应对电网频率波动,PR控制器参数可自适应调整,确保在49.5-50.5Hz范围内仍能稳定控制。

为进一步提升并网质量,控制策略中加入电压波动补偿环节。通过实时监测电网电压幅值与相位,动态调整逆变器输出电压,实现无功功率的快速调节。例如,当电网电压跌落5%时,逆变器在20ms内输出无功功率以支撑电压,避免因电压波动引发的设备脱网。通过双闭环控制与谐波抑制技术,风光储系统的并网电能质量可满足IEEE 1547标准要求,为大规模并网提供技术保障。

3 结束语

风光储联合发电系统作为新型电力系统的重要组成部分,其协同控制技术的突破对实现清洁能源高效消纳与电网稳定运行至关重要。本文通过构建分层递阶控制框架,创新性地融合功率预测、动态滤波与储能SOC优化管理策略,为风光储系统的功率波动平抑与储能寿命延长提供了系统性解决方案。研究不仅验证了混合储能分层协同的可行性,更通过理论推导与控制算法优化,揭示了风光资源互补性与储能动态响应的耦合机制。未来,随着人工智能、大数据与电力市场机制的深度融合,风光储系统将向更智能、更经济、更可靠的方向演进。基于数字孪生技术的实时仿真与自适应控制,或通过碳交易机制激励储能资源参与电网调峰,均有望成为下一代系统的技术焦点。唯有持续推动多学科交叉创新,才能让风光储联合发电真正成为能源转型的“压舱石”,为全球碳中和目标注入绿色动能。

[参考文献]

- [1]党鹏飞.面向黑启动的风-储联合发电系统协同控制策略研究[D].西安理工大学,2024.
- [2]赵泽.并网型风光储联合发电系统功率及电压控制策略研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [3]孙佳航,冯忠楠.基于改进VSG的风光储联合发电系统低电压穿越控制策略[J/OL].电网技术,1-14[2025-05-15].
- [4]张明理,王璐,徐建源,等.风光储联合发电系统复合控制策略研究[J].高压电器,2018,54(01):64-72.

作者简介:

袁建华(1972--),男,汉族,湖南邵阳人,大学本科,高级工程师,研究方向:电力系统及其自动化、新能源与低碳技术。