

风光储协同一体化能量管理平台设计

丁亮

国电联合动力技术有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7105

[摘要] 在“双碳”目标驱动下,风光储复合场站成为新型电力系统重要组成部分,传统风电场能量管理平台难以适配多种电源协同运行需求。针对风光出力随机波动、功率预测考核严苛、一次调频小扰动工况多等工程问题,本文开展风光储协同一体化能量管理平台设计研究。首先梳理传统风电场能量管理系统架构,剖析其面向复合新能源场站存在的技术短板;其次从出力规律与多时间尺度动力学角度对比风电、光伏、电化学储能的运行特性,阐明光伏-储能承担快速调控任务、风电执行稳态功率调节的物理机理;在此基础上阐述一体化能量管理平台的分层架构,实现功率预测偏差补偿、差异化一次调频、储能充放电优化、全场功率协同调度等核心能力。该架构可充分发挥多种电源特性互补优势,兼顾并网考核、电网频率支撑与设备运行安全,可为风光储复合场站智能化管控与工程实践提供理论参考。

[关键词] 能量管理; 风光储协同控制; 功率控制; 一次调频; 数据融合

中图分类号: TK018 文献标识码: A

Design of Wind-Solar-Storage Collaborative Integrated Energy Management Platform

Liang Ding

Guodian United Power Technology Co., Ltd.

[Abstract] Driven by the "Dual Carbon" goal, wind-solar-storage hybrid power stations have become a vital component of the new-type power system. Conventional energy management platforms for wind farms can hardly adapt to the collaborative operation requirements of multiple power sources. Aiming at engineering challenges including stochastic fluctuations of wind and solar output, stringent assessment on power prediction, and numerous small-disturbance working conditions for primary frequency regulation, this paper investigates the design of a wind-solar-storage collaborative integrated energy management platform. Firstly, the architecture of traditional wind-farm energy management systems is reviewed, and their technical deficiencies for hybrid new-energy power stations are analyzed. Secondly, the operating characteristics of wind power, photovoltaic power and electrochemical energy storage are compared from the perspectives of output patterns and multi-timescale dynamics. The physical mechanism whereby photovoltaic-storage systems undertake fast regulation tasks while wind power performs steady-state power adjustment is illustrated. On this basis, the layered architecture of the integrated energy management platform is elaborated to realize core capabilities such as power prediction deviation compensation, differentiated primary frequency regulation, optimal charging and discharging of energy storage, and whole-station collaborative power dispatching. The proposed architecture can give full play to the complementary advantages of various power sources, take grid-connection assessment, grid frequency support and equipment operational safety into account, and provide theoretical references for intelligent management-control and engineering practice of wind-solar-storage hybrid power stations.

[Key words] Energy management, wind-solar-storage collaborative control, power control, primary frequency regulation, data fusion

引言

“双碳”目标是党中央统筹全局作出的重大战略部署,也是我国绿色高质量发展的必然要求^[1]。在能源低碳转型背景下,

风光成为新型电力系统主力电源。风电受机械结构制约,功率调节时延达秒级,频繁小幅调频易造成设备损耗;光伏、储能依靠电力电子器件实现毫秒级快速响应。风光出力均存在随机间歇

性,单独并网功率波动大,通过配置储能形成风光储能联合发电系统,依靠储能灵活充放电平抑风光全时段出力波动,依托光储快速调节能力弥补风机时域短板、抵消功率预测偏差,减小新能源并网冲击,提升风电消纳水平^[2-4]。实现上述多源资源的协同优化调控,亟需一体化能量管理平台提供技术支撑。

围绕风电场能量管理与运行控制,国内外已开展多方面研究,相关成果已涉及场站建模、功率预测、有功调度、无功电压控制等诸多领域,为风电场能量管理平台的构建积累了较好的理论基础。但现有研究大多聚焦单一风电场景,针对风光储复合场站的一体化协同研究尚不够完善,文献^[5]采用PSO调整储能系统的充放电计划,以提升协同调度效果,但仍聚焦于储能单元的单一环节优化,对于风光储三者之间功率层面的实时协同与动态分配机制涉及较少,缺乏面向多源全局协调的系统性框架;文献^[6]采用长短期记忆网络风功率预测模型、设计加权一致性功率分配机制,并引入基于运行状态的动态参数调控策略,实现了储能系统在多变工况下的快速响应与稳定运行,但未考虑储能进行新能源场站进行电网频率支撑的相关问题。

本文针对风光储一体化能量管理相关问题开展综述研究,梳理传统风电场能量管理系统的架构与现存短板,对比风电、光伏、储能在响应时间、调节能力方面的差异,探讨风光储协同一体化能量管理平台分层架构,剖析一体化平台应用价值与研究边界。

1 传统风电场EMS架构及现存缺陷

1.1 传统风电场能量管理系统基本架构

传统风电场能量管理系统(W-EMS)主要面向单一风电场业务需求搭建,整体采用分层架构,一般划分为现场设备采集层、数据处理层、业务应用层以及调度交互层。其设计目标以保障风电场安全运行、响应电网调度指令为主,能够满足纯风电场景下的监控与基础调度需求,在国内集中式风电场得到较为广泛的工程应用。但系统在设计之初并未考虑光伏、储能设备接入,属于面向单一电源的专用管控平台。

1.2 传统风电场能量管理系统主要缺陷

传统风电场能量管理系统的局限性逐步显现,难以适配多源电源协同运行的工程需要,主要存在以下几方面问题。

(1)多源设备数据相互割裂。针对场站调度管理的多元化需求,现行方案通常分别部署能量管理系统、功率预测系统及一次调频系统等若干独立子系统。由于关键信息分散存储于多个平台,难以实现全局信息的融合共享,致使风电、光伏、储能各环节之间难以开展联合优化与协同调度。(2)场站功率预测不准确,偏差缺少补偿手段。受气象条件等因素影响,风光实际出力与预测值经常存在较大偏差,传统系统无法联动储能对该偏差进行实时补偿,只能依靠风机自身调节应对,难以满足日趋严格的电网考核。(3)一次调频能力不足,过度依赖风机机械调节。当电网发生一次调频小扰动需求时,传统系统长期依靠风机桨距角调节实现功率响应。有功功率小幅、高频调节会加剧桨距机构、传动部件磨损,增加设备运维成本;系统缺少调用光伏、储能参与频率支撑的业务逻辑,没有充分发挥电力电子设备快速响应

的优势。(4)缺少风光储一体化协同调度功能。传统W-EMS调度逻辑以风机为唯一调控对象,未考虑光伏出力波动、储能SOC约束等运行边界,不具备风光储联合优化充放电策略,无法兼顾平抑功率波动、补偿预测偏差、参与电网频率支撑等多重运行目标,难以支撑复合新能源场站的运行管控要求。

2 风电、光伏、储能出力特性及对比

本文从出力波动规律、调节响应能力角度对比风电、光伏、储能的运行特征,以表格归纳关键指标,为后续一体化平台协同调控提供特性依据。

2.1 三类电源特性

(1)风电出力及调节特性。风电出力由实时风速决定,具有较强随机性、波动性,受季节、湍流影响明显。风电机组频繁开展小幅、高频的功率调节,会加剧变桨系统、传动链的机械疲劳与设备损耗,因此风机并不适合持续承担短时、小幅的快速频率支撑任务。(2)光伏出力及调节特性。光伏出力主要取决于光照强度,受云层移动、昼夜交替影响显著,夜间出力为零。光伏不限电时不具备主动增发功率的能力。在短时扰动场景下可快速下调出力参与电网支撑,但受光照约束,无法长时间稳定输出指定功率。(3)储能出力及调节特性。电化学储能依托变流器实现功率控制,支持充电、放电双向功率调节。但运行受荷电状态SOC、最大充放电功率、循环寿命等约束。在连续补偿波动、参与调频场景下,需要兼顾储能运行边界,避免越限。

2.2 三类电源多时间尺度动态特性对比

风电、光伏与储能内部包含不同的物理动态过程,涵盖电力电子开关、电流环控制、电磁暂态、发电机、轴系动态、气动特性以及系统低频振荡,从时间尺度分布可以看出,光伏与储能以电力电子动态为主,可实现快速功率调节;而风机受轴系动态、桨叶气动等机械环节约束,整体对外调节时间尺度显著大于光伏和储能,难以胜任高频、小幅的快速响应任务。

在上述动力学特征基础上,从制约因素、响应时延、调节方向、运行约束、适配调控任务开展横向对比,如表1所示。

表1 指标对比

对比指标	风电	光伏	储能
主要制约因素	风速、轴系与气动机械特性	光照强度、环境条件	SOC、充放电功率
出力调节响应时间尺度	百毫秒级	十毫秒级	十毫秒级
功率调节方向	可降低功率,无法主动增发	可降低功率,无法主动增发	可主动放电,增发功率
出力调节约束	频繁小幅调节易产生机械疲劳	夜间零出力	受设备容量限制,无法长时间放电

结合上表特性可知,三类电源调控短板与运行约束差异显著。单一电源自身均存在不可规避的运行局限,仅依靠独立调控难以兼顾场站功率平稳、电网调频支撑与设备安全运行。因此,亟需通过全域数据互通机制,统一协调风光储的出力分配、储能充放电时序与动态调控行为,实现多源资源优势互补、短板互补。在此背景下,风光储协同一体化能量管理平台成为实现多源协同优化调控的核心技术载体。

3 风光储协同一体化能量管理平台架构

基于前文风光储差异化的出力特性与时间响应,本章构建了风光储协同一体化能量管理平台架构,通过分层设计实现多源数据统一融合、协同调度、智能调控与标准化对外交互。如图1所示。

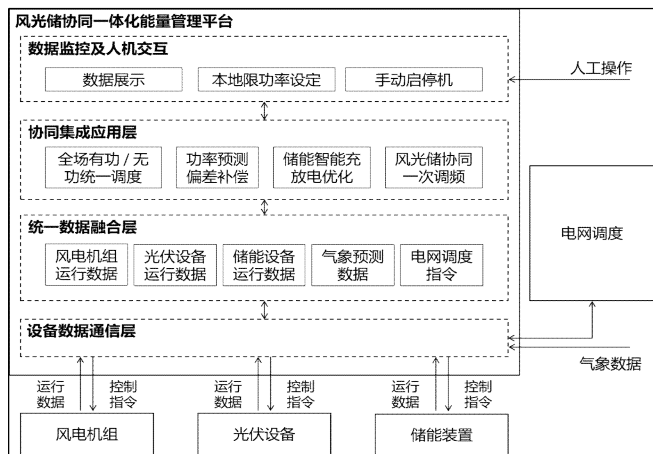


图1 风光储协同一体化能量管理平台架构

3.1 平台总体设计思路

一体化平台采用自下而上分层递进、数据统一、功能集成、协同调控的设计思想。平台通过全局数据互通,统一分配不同时间尺度调控任务:将高频小幅快速调节交由光储承担,中长期大幅功率跟踪由风电主导,储能动态补偿出力偏差,实现三类电源特性互补、最优匹配,从架构层面解决传统EMS多源协同能力缺失的问题。

3.2 统一数据融合层

设备采集层为平台最前端数据入口,全覆盖接入风电场、光伏电站、储能系统全场设备。主要包含双馈/直驱风机、光伏逆变器、储能PCS、电池管理系统、升压站测控装置、功率预测系统等终端设备;同时完成与电网调度的通信交互,接收AGC出力指令、频率信号等信息,并从外部气象服务接口获取实测及预报气象数据。

该层实时采集风速、光照、机组出力、设备状态、储能SOC、充放电功率、电网频率、调度AGC指令、外网气象预报、功率预测数据等多维度运行信息,为上层协同调控提供完整、实时的原始数据支撑。

3.3 协同集成应用层

应用层为平台核心功能层,核心功能包含:

(1)功率预测偏差补偿功能。基于全场预测与实际出力数据,实时识别风光出力偏差,优先调用储能快速充放电平抑短时波动,提升场站并网考核精度。(2)风光储协同一次调频功能。根据电源时域特性分配调频任务:毫秒级小幅高频扰动由光伏、储能快速响应,规避风机频繁微调造成的机械疲劳;大幅、持续性功率调整由风电承担,充分适配各电源物理约束。(3)储能智能充放电优化功能。依托平台打通的全场共享数据,储能可综合功率预测结果、AGC调度指令以及风光实时出力信息,结合SOC动态边界约束,自适应判定充放电时机与功率大小,规避长时间大功

率放电工况,保障储能持续调节能力,实现对风光出力波动的长期有效平抑。(4)全场有功/无功统一调度功能。平台接收上级电网AGC指令后,结合风光储实时运行状态开展多源功率优化分配。当调度指令发生快速变化时,优先调动光伏、储能,随后再逐步调节风机出力。以此规避风机频繁快速动作引发的机械疲劳损伤,最终实现场站整体出力平稳可控。

3.4 数据监控及人机交互

该层承担场内运行监控与人机操作功能。对内搭建可视化人机交互界面,除实时展示风光储发电设备运行状态、调频记录、预测偏差等关键运行信息外,还支持设备手动启停机、场站本地限功率下发、调控参数等操作,实现场站运行状态可视可控。调度相关的指令接收、应答及数据上送功能统一由下层设备数据通信层完成。

4 结论与展望

本文针对风光储协同一体化能量管理设计开展综述研究,剖析了传统风电场能量管理系统存在的技术局限,对比分析风光储在出力规律、出力响应与运行约束上的本质差异。在此之上阐述了分层式一体化能量管理平台架构,依靠全域数据融合和协同控制实现功率预测偏差补偿、差异化一次调频分配、储能充放电优化及全场有功无功统一调度,优先利用光储完成快速功率响应,风电承担稳态功率调整任务,能够兼顾并网考核、电网支撑与设备安全运行,为复合新能源场站运行管控提供架构层面的参考。

面向新型电力系统建设需求,风光储协同能量管理后续仍存在若干值得深入探索的方向:一是复杂气象、储能寿命衰减、设备故障等多不确定条件下的鲁棒协同调控策略,兼顾调控效果与储能循环寿命;二是结合虚拟惯量、快速频率响应的多目标协同优化,解决多重调控目标之间的冲突问题;三是解决工程落地过程中的实际问题,推动一体化能量管理技术从理论架构走向现场工程应用。

[参考文献]

- [1]矫勇.“双碳”目标下大力推进水风光储一体化发展的现状与对策建议[J].中国水利,2025,(4):1-6.
- [2]王桂松,肖碧涛,赖晓路.计及风功率波动和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略[J].太阳能学报,2021,42(11):280-286.
- [3]李建林,郭斌琪,牛萌,等.风光储系统储能容量优化配置策略[J].电工技术学报,2018,33(6):1189-1196.
- [4]张平新,闫璐阳,高永康,等.风光储协同优化控制策略及研究进展[J].能源与节能,2025,(12):6-8+124.
- [5]吕韬,占鑫星.风光储联合并网发电系统中的储能单元与协同调度设计与验证[J].光源与照明,2025(4):167-169.
- [6]潘振宇.面向风电消纳的风储系统自适应协同控制方法研究[J].电气技术与经济,2026,(7):31-34.

作者简介:

丁亮(1989—),男,回族,吉林伊通人,本科,中级工程师,国电联合动力技术有限公司,主要研究方向:新能源场站能量管理技术研究及并网软件产品开发。