

高比例风电并网条件下发电技术监督指标体系优化研究

高坡

国华(山西)新能源有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8534

[摘要] 风电装机规模的不断拓展促使电力系统运行形态产生深层次变革,传统发电技术监督指标存在反馈迟缓、适配性不足等缺陷,已无法契合高比例风电并入电网场景下的调控要求、为增强电网运行稳定性与新能源接纳能力,对现有指标体系实施系统性优化显得尤为必要、依托文献调研、系统剖析与实证检验,搭建适配新能源运行特征的监督指标框架,同步纳入全新的动态性能及并网质量相关指标,研究所得成果具有良好的实际应用推广前景与参考价值。

[关键词] 高比例风电并网;发电技术监督;指标体系优化;电网稳定性;动态响应指标

Optimization research on the supervision index system of power generation technology under the condition of high proportion wind power grid connection

Gao Po

Guohua (Shanxi) New Energy Co., Ltd

[Abstract] The continuous expansion of wind power installed capacity has led to a profound change in the operation mode of the power system. Traditional power generation technology supervision indicators have shortcomings such as slow feedback and insufficient adaptability, which can no longer meet the regulation requirements of high proportion wind power integration into the power grid. In order to enhance the stability of power grid operation and the ability to accept new energy, it is particularly necessary to implement systematic optimization of the existing indicator system. Based on literature research, system analysis and empirical testing, a supervision indicator framework that adapts to the characteristics of new energy operation should be built, and new dynamic performance and grid connection quality related indicators should be included simultaneously. The research results have good practical application and promotion prospects and reference value.

[Key words] high proportion of wind power grid connection, power generation technology supervision, optimization of indicator system, grid stability, dynamic response indicators

引言:

全球能源结构转型进程持续加快,风电作为关键清洁能源完成了突破性发展,其并网占比不断提高、高比例风电接入电网既给系统调节能力、电能质量及运行稳定性带来全新挑战,也驱动电力系统朝着智能化与低碳化方向演进、当前发电技术监督体系主要以传统机组为核心,难以覆盖风电波动性、间歇性等特性引发的动态监管诉求,本文围绕这一核心问题,重点聚焦指标体系的重构完善、适配能力提升及实践应用可行性展开研究。

1、风电高占比并网背景下的运行特征变化

1.1 风电并网规模增长趋势分析

作为可再生能源的核心构成之一,风电近年发展势头极为迅猛。全球风能理事会(GWEC)相关统计数据显示,到2024年末,全球风电累计装机容量已逾1000GW,中国以约430GW的规模稳居全球第一、众多国家及地区均将风电列为未来能源结构升级的关键方向、国内范围内,风电资源主要集中于华北、西北、东北“三北”区域,该区域风电电网接入占比已超40%,部分特定区域更是超过50%、横向对比而言,丹麦、德国等欧洲国家的风电占比也已步入高位稳定阶段,分别达到52%和29%,高比例风电并网已然成为当前能源系统运行的普遍状态。如表1所示。

表1 国内部分省份风电装机容量与并网占比 (截至2024年)

省份	装机容量 (GW)	并网占比 (%)	年均增长率 (%)
内蒙古	78	51.2	13.5
甘肃	42	48.7	12.8
河北	39	33.6	11.2
江苏	21	17.4	9.5
广东	15	8.9	7.6

1.2 并网运行特性及技术挑战

风电固有的间歇性与波动性造成其输出功率难以保持稳定，这给电网的调度运行带来了不小压力。当大规模风电接入电网后，传统火电所承担的“以稳为基、灵活调控”功能被逐步弱化，电网必须能够快速应对风速变化引发的功率波动问题、风电场大多采用电力电子变流器，这类设备的惯性支撑能力有限，会导致系统频率支撑作用减弱、传统一次调频模式已难以满足当前需求，更具灵敏性的频率响应机制亟待建立；无功电压调节水平也需相应提高，从而保障电压处于稳定状态、风电并网绝非单纯的容量叠加问题，更是对电网动态稳定性、运行灵活性及可控性进行全面重塑的过程。

1.3 对现有监督指标体系提出的新要求

随着风电在能源结构中的占比持续提升，传统以常规发电单元为核心搭建的技术监督指标体系，其适配性不足的问题日益凸显。原有指标往往侧重设备完好程度、运行效率、功率输出稳定性等静态或稳态运行条件下的指标数据，缺乏对实时响应能力、电能质量水平、频率波动应对效果等动态特性的有效衡量。风电接入引发的频繁功率扰动，使得指标在时效性、测量精度及覆盖范围等方面的要求大幅提高。倘若依旧沿用传统指标体系作为监管依据，将难以及时识别风电场运行中因功率波动或并网扰动造成的潜在隐患，进而限制系统稳定性调控工作的开展及智能化监管模式的推进。因此，亟需从指标维度拓展、粒度细化及动态性强化等方面，对现有指标体系进行系统性优化。

2、现行发电技术监督指标体系分析

2.1 当前指标体系组成

风电技术监督指标体系是保障风电设备安全运行、提升机组可利用率与促进清洁能源高效转化的重要支撑工具，覆盖运行状态监测、设备运维管理及并网质量管控等多个关键维度。运行类指标包括风机出力稳定性、可利用小时数、功率曲线符合率等内容，用于直观反映风电机组整体运行效能；运维类指标重点关注设备完好率、计划检修执行率及故障停机时长等，以此评判运维管理的规范程度与可靠性水平；并网类指标则聚焦电能质量、无功支撑能力、频率响应速度及电压偏差控制等，体现风电场在系统运行中的适应性与协调性。当前这套指标体系主要围绕风电场运行特性构建而成，虽已具备一定体系化基础，但指标间关联度有限、动态响应能力不足，仍需在实时性与灵活性方面进一步完善以适应高比例风电并网场景。

2.2 现行指标体系存在的问题

随着风电等新能源的大规模并入电网，传统监督指标体系在适配性方面的显著短板逐渐显现。现有指标大多集中于传统机组稳定运行状态的评估，缺乏对电源波动特性及并网运行行为的响应分析，诸如频率支撑能力、电压扰动控制效果等关键

方面尚未形成量化评估维度；现行指标的更新节奏相对滞后，尚未建立起覆盖风电场实时运行数据的闭环监测机制，难以精准呈现功率预测偏差范围、爬坡率约束情况、低电压穿越能力等核心运行参数；传统指标体系的响应周期偏长，无法及时捕捉系统运行状态的快速波动变化，进而影响调控决策的效率与科学性、在新能源占比持续提升的发展趋势下，现行指标体系已难以承担起统一、协调且高效的技术监管任务，图1呈现了现行风电技术监督指标体系的构成架构，涵盖运行、运维和并网等主要监督领域，并列出了各类核心指标（如风机出力稳定性）。图中同时明确指出现有体系存在的核心问题，包括对新能源特性的适配性不足、指标更新不及时以及未能有效监测实时动态性能等，为后续指标体系的优化完善提供了坚实的理论支撑。

图1 现行发电技术监督指标体系及其问题分析



图1 现行发电技术监督指标体系及其问题分析

2.3 指标适应性评价框架构建

为精准识别并改进现有指标体系对新能源适配性不足的问题，构建系统性的适应性评价框架十分必要。该评价框架需围绕技术相关性、响应时效性与可量测性三个核心维度，搭建三维评价矩阵，对现有指标开展逐一筛查分析。以“风能利用率”指标评估为例，其与风电系统运行的技术关联性较高，但在部分复杂地形或气象条件下响应速度偏慢，且在不同风场间测量精度差异较大，综合适应性评价结果为中等水平。通过这类结构化评估方法，可逐步厘清传统指标在高比例风电并网场景下的适用边界。结合实际应用案例来看，某地区风电并网占比已达45%，该区域电网频率偏差波动较为频繁，但“功率曲线符合率”等现有指标未能及时捕捉这一系统风险，导致调度决策响应滞后。这一现象充分印证了传统指标有效性的下降趋势。构建结构化的适应性评价框架，不仅能够高效识别低效或失效指标，更为后续指标体系的重构优化提供了坚实的数据支撑与严谨的逻辑依据。

3、高比例风电并网条件下的指标体系优化设计

3.1 优化原则与设计思路

构建高比例风电并网场景适配的技术监督指标体系，需严格遵循全面性、前瞻性、可实施性与可量化四项核心原则。全面性原则要求指标体系既覆盖传统发电系统，又纳入风电系统的动态运行特性；前瞻性原则需确保指标体系能够适配未来新能源占比持续提升的发展趋势；可实施性原则着重关注数据采集的现实可行性与评估机制的落地操作难度；可量化原则则保障各项指标均能通过实际运行数据进行计算分析与科学评价、指标体系的设计需从源头数据获取环节着手，整合风电场监控

系统、变电站运行数据与调度平台信息,构建多维度数据集,借助数据驱动模型构建方法,提炼出灵敏度高且易于落地实施的核心指标,同时设定科学合理的指标阈值与评估标准,最终形成兼具实用性与针对性的技术监督指标架构。

3.2 新增关键指标建议

针对风电并网催生的新型运行挑战,需在原有指标体系基础上补充一批专用核心指标。风功率预测误差率可作为衡量预测模型精准度与调度风险水平的关键指标,其计算公式可基于日内滚动预测数值与实际输出功率的偏差比值确定;需重点纳入反映并网后电能质量的全新指标,诸如电压波动率与频率偏差均方根值(RMS),用于实时追踪风电引发的电压稳定问题及系统惯性下降后的频率波动隐患;还应建立动态调频响应时效指标,以此评估风电场在高频扰动场景下的有功响应速率与调频控制系统的实际执行效能、这些新增指标不仅具备较强的动态敏感性,且可通过现有监控系统便捷获取数据,拥有极高的工程应用可行性、通过补充上述关键指标,能够有效填补现有监督体系在风电场特性监管方面的空白,为电力系统稳定运行提供坚实技术支持。

3.3 指标权重与综合评估模型

形成多维度新型监督指标体系后,需进一步构建科学合理的综合评价模型,实现对发电单元综合运行状态的量化评估。为避免各类指标影响力出现失衡情况,可采用层次分析法(AHP)为各指标赋予相应权重、该方法通过搭建指标两两两比较矩阵,融入专家判断意见与一致性检验流程,确保权重分配兼具逻辑一致性与专业权威性、以风电并网场景下的系统稳定性评估模型为例,可给予频率响应类指标更高权重占比;而在火电机组并列运行的场景中,则可适当提升能效效率指标的比重、在此基础上,进一步构建风火联合系统下的综合监督评价模型,将所有指标按对应权重进行聚合运算,输出统一的系统状态评分与预警等级。

4、优化指标体系的应用验证与前景分析

4.1 案例分析:内蒙古锡林郭勒风电基地并网监测实践

为验证优化后发电技术监督指标体系的实际应用成效,选取内蒙古锡林郭勒盟风电基地作为典型案例开展对比验证。该区域风电装机容量已突破 20GW,年度风电并网电量占比达到 48%,兼具案例代表性与实际运行复杂性、原有监督体系中,常规评估主要依赖机组可用率、电能利用小时数、功率曲线偏移量等指标,但这类指标对频率波动、电压扰动的感知灵敏度不足,难以反映风电出力变化给系统稳定性带来的潜在影响、引入优化后的指标体系后,尤其是新增的风功率预测误差率、电压波动率及动态调频响应时效等指标,实现了对运行状态更精细化的识别与把控、2024年12月该基地遭遇强冷空气侵袭,风速突变引发功率剧烈波动,优化后的指标体系仅用15秒便捕捉到系统频率下探趋势,而原体系的响应耗时约3分钟,风险提前识别能力得到显著提升。

4.2 实施建议与应用机制构建

指标体系的落地推行需以电网调度平台的智能化升级为支撑,建议优先完成与国家电网调控平台(如AGC、EMS系统)的数据接口对接工作,达成风电场SCADA系统与调控主站之

间的实时数据互通共享。针对技术监督流程,需同步开展机制性重构,可设立“新能源运行质量监测专项组”,专门负责新指标的日常监测与异常预警判定,建立“动态监督与静态评估相融合”的监督模式、推动各风电场建立指标月度分析制度,对预测误差率、调频响应速度等关键性能指标进行常态化评价,将评价结果作为并网资质评优、运维管理优化及调度调控决策的重要参考依据,进而构建全流程闭环式监督体系,让新指标的实用价值得到充分发挥。

4.3 学术与实际参考价值分析

本研究构建的优化型技术监督指标体系,其应用场景并非局限于风电领域,对其他新能源发电形式同样具有较强的拓展适配性。光伏发电系统中同样存在出力波动明显、电压支撑能力不足等问题,可借鉴本体系引入相近动态响应指标,诸如辐照强度波动下的电压扰动响应系数等;对于生物质能这类可控性较强的新能源发电形式,可适度融合火电机组运行评估思路,搭配新增动态指标形成组合式评估方案、该指标体系由此具备了良好的跨能源种类适配潜力、政策制定层面,可为新能源并网技术标准拟定、电力系统柔性运行指标设定、辅助服务补偿机制构建等工作,提供扎实的理论支撑与科学的决策参考,推动电力系统从被动适应新能源接入向主动控制运行状态转变,有望成为未来电力监管体系向数字化、智能化转型的核心支撑工具。

结语:

在风电高比例并网成为能源发展常态的背景下,传统发电技术监督指标体系已难以适配新能源快速发展带来的各类新挑战,对其进行系统性优化势在必行。优化后的指标体系不仅显著提升了对风电运行特性与电网稳定性变化的响应能力,还兼具较强的工程实施可行性与发展前瞻性,为电力系统智能化监管模式的构建奠定了理论基础、未来随着风电在能源结构中的占比持续攀升,需对指标体系开展动态调整与持续完善,并积极探索人工智能辅助监管体系的融合应用,从而实现更为精准、高效的发电运行监控与调度管理,为新型电力系统稳定发展提供有力保障。

[参考文献]

- [1]迟永宁,张占奎,李琰,魏林君.大规模风电并网技术问题及标准发展[J].华北电力技术,2017(03):1-7.
- [2]卓振宇,张宁,谢小荣,李浩志,康重庆.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(09):171-191.
- [3]刘威.高比例新能源并网系统振荡机理及交互作用规律研究[D].合肥工业大学,2022.DOI:10.27101/d.cnki.ghfgu.2022.001725.
- [4]石文辉,屈姬贤,罗魁,李钦森,何永君,王伟胜.高比例新能源并网与运行发展研究[J].中国工程科学,2022,24(06):52-63.
- [5]张乃心.高比例风电并网对系统频率的影响及优化平抑策略研究[D].燕山大学,2024.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2024.002159.