

风电并网中储能技术应用研究

靳 建

中核汇能（山东）能源有限公司 山东 济南 250000

摘 要：规模化风电并网是新能源电力发展的核心方向，但风电出力随机性、波动性特征，易引发电网电能质量偏差、调峰压力增大、弃风频发等实际问题，制约风电规模化消纳与电网安全运行。储能技术凭借双向充放电调节能力，可有效适配风电并网调控需求。本文以风电并网储能应用为研究对象，阐述风电并网与储能技术基础理论，对比各类储能技术的运行特性与适配场景，梳理储能能平抑功率波动、电网调峰调频、弃风治理及电网故障支撑中的核心应用场景。同时结合工程实际，分析储能系统拓扑配置、容量优化方法与协同控制策略，总结当前技术应用特点，为风电储能并网系统的工程优化与高效运行提供参考。

关键词：风电并网；储能技术类型；应用场景；优化配置；控制策略

引言：随着国内新能源电力体系持续升级，风电装机规模逐年递增，已成为替代传统化石能源的核心发电形式。风电大规模并网后，自身出力不稳定的特性与电网稳定运行需求形成矛盾，传统电网调控手段难以适配风电的波动特性，导致部分地区风电利用效率偏低、电网运行压力持续增加。为进一步提升风电并网稳定性与资源利用率，本文围绕风电并网中的储能应用展开系统研究，梳理各类储能技术特性、实际应用场景及优化控制方案，为风电储能并网技术的落地应用提供理论与工程依据。

1 风电并网与储能技术基础理论

1.1 风力发电出力特性与并网原理

风力发电依托风能驱动风机叶片旋转，将机械能转化为电能，再通过变流器、变压器等设备完成电能调控与并网输送。风能属于典型的自然可再生能源，风速、风向受季节、天气、时段影响极大，使得风机输出功率无法保持恒定，具备随机性、波动性特点。风电并网核心原理是通过电力电子装置，对风电输出的电压、频率、相位进行调节，让风电参数契合电网运行标准，实现电能顺利并入公共电网。不同于火电、水电等稳定电源，风电出力无人工可控调节能力，完全依赖自然风资源，这也是风电并网适配性较差的根本原因。

1.2 风电并网现存核心问题

风电出力的不稳定特性，给电网安全稳定运行带来以下问题。（1）电能质量失衡，风电功率频繁波动会造成电网电压、频率偏移，产生谐波、电压闪变等问题，影响用电设备稳定运行。（2）电网调峰压力大，风电夜

间出力偏高、日间出力不足的反调峰特性，与用户用电负荷规律相悖，大幅增加电网调峰难度。（3）风电消纳难题突出，部分风资源富集地区电网网架薄弱，输电通道容量有限，无法全额接纳风电，导致大量弃风现象发生。（4）风电并网还会降低电网整体稳定性，故障工况下易出现功率缺口，加剧电网运行风险。

1.3 储能技术适配风电并网的核心优势

储能技术具备电能双向存储与释放能力，可有效弥补风电并网的各类短板，适配性极强。其一，储能系统能够实时吸纳风电多余电能，在风电出力不足时补能，有效平抑风电功率波动，稳定电网电压与频率，提升并网电能质量。其二，储能可参与电网调峰调频，灵活匹配用电负荷变化，缓解电网调峰压力，解决风电反调峰弊端。其三，储能能够储存电网无法消纳的冗余风电，减少弃风电量，大幅提升风资源利用率与风电消纳水平^[1]。

2 风电并网场景下储能技术应用类型与特性对比

2.1 电化学储能

电化学储能是当前风电并网应用最广泛的储能形式，主要包含锂电池、铅酸电池、液流电池等细分类型。该类储能无需机械传动结构，通过电池内部化学反应实现电能与化学能的相互转化。整体设备集成度高，建站场地限制小，可适配集中式风电场与分布式风电并网场景。其响应速度可达毫秒级，循环寿命中等，功率调节精度较高，能够适配小幅、高频的风电功率波动工况。其中锂电池能量密度高、体积小巧，是风电配套储能的主流选型；液流电池安全性高、寿命更长，但能量

密度偏低,设备占地规模更大。

2.2 抽水蓄能储能

抽水蓄能属于成熟的机械储能技术,依靠高低水位落差实现能量存储与释放,是目前电网侧容量最大的储能方式。该技术额定容量大、运行稳定性强、使用寿命长,可长期稳定投入风电并网配套运行。其缺陷在于对地理地形、水资源条件依赖性极高,建站选址受限严重,建设周期长、前期投资成本高。同时抽水蓄能响应速度较慢,仅适用于风电长周期、大幅度的功率调节,无法应对短时高频的风电波动,多应用于大型风电基地的长时调峰场景。

2.3 压缩空气储能

压缩空气储能通过压缩空气储存富余风电能量,释能时驱动发电机完成并网发电,属于大容量机械储能技术。该技术储能容量大、运行寿命久、安全稳定性强,且不受地形水源约束,适配大规模风电并网场景。相较于抽水蓄能,其选址灵活性更高,但系统结构复杂,设备集成度低,运行过程中存在一定能量损耗,转换效率低于电化学储能。

2.4 混合储能

混合储能结合两种及以上储能技术的优势,主流搭配为电化学储能与机械储能组合。该模式可依托电化学储能的快速响应特性处理风电高频小幅波动,依靠机械储能的大容量优势承担长时功率调节,弥补单一储能技术的性能短板。混合储能系统适配性更广,可兼顾风电并网的调频、调峰多重需求,但系统拓扑结构复杂,控制策略难度大,设备运维成本与建设成本高于单一储能形式,对电网调度控制精度要求更高^[2]。

3 储能技术在风电并网中的核心应用场景

3.1 风电出力波动平抑场景

风电出力受气象环境影响存在瞬时波动、短时突变的特征,无序并网会直接造成电网参数偏移,储能系统凭借快速响应特性,成为风电并网波动治理的核心配套手段,实际应用中主要分为两类调控方式。(1)小幅高频波动平抑。风电运行过程中,风速的瞬时变化会造成出力小幅、高频波动,此类波动持续时间短、变化幅度小,但长期累积会造成电网电压震荡、电能质量下降。工程中多采用电化学储能参与调控,依托其毫秒级响应速度,实时跟踪风电出力变化。在风电出力瞬时富余阶段快速吸收冗余功率,在出力骤降阶段瞬时补放功率,精准抵消风电高频波动分量,保障并网点功率输出平稳,满足电网电能质量并网标准。(2)大幅低频波动

调控。极端天气、阵风、季风切换等工况会引发风电出力大幅度、长时段波动,单靠电化学储能难以满足大容量功率调节需求。实际工程中常采用混合储能模式,搭配抽水蓄能、压缩空气储能等大容量储能设备,针对风电长周期、大幅度的出力偏差进行修正,规避单一储能容量不足、续航较短的问题,适配大型陆上风电基地、海上风电场的稳态并网需求。

3.2 电网调峰调频辅助场景

当前电网常规调峰调频电源调节能力有限,风电反调峰特性进一步加剧电网供需失衡,储能系统可作为独立可调电源参与电网辅助服务,适配不同负荷时段的并网调控需求。(1)电网削峰填谷运行。风电普遍存在夜间低谷时段出力过剩、日间高峰时段出力不足的反调峰特征,与用户用电负荷曲线错位。在夜间用电低谷期,储能系统批量存储风电富余电量,规避电网负荷冗余问题;在日间用电高峰期,储能释放存储电能,补充风电出力缺口,平抑电网峰谷差,优化风电与电网负荷的匹配度,减轻传统火电调峰的运行压力。(2)电网一次、二次调频。风电并网后会降低电网整体惯性,削弱电网调频能力,极易出现频率偏移问题。储能系统可根据电网频率偏差信号快速启停调节,参与电网一次调频,实现瞬时功率支撑;同时可配合电网调度指令完成二次调频,精准修正电网频率偏差,维持电网频率稳定^[3]。

3.3 风电消纳提升与弃风治理场景

我国多数风电基地集中于西北、华北等偏远地区,存在电网网架薄弱、外送通道容量不足、本地负荷消纳能力有限等问题,弃风现象常态化存在,储能技术是解决风电就地消纳与外送受限的关键技术手段。(1)就地消纳优化。风电场本地用电负荷较低时,风电出力无法被即时消纳,传统模式下只能通过弃风限功率保障电网稳定。配套储能系统后,可将本地无法消纳的冗余风电储存,在本地负荷提升后释放供电,实现风电就地存储、就地利用,有效降低风电场弃风率,提升风资源利用效率。(2)外送通道扩容辅助。风电外送输电通道存在额定容量限制,风电峰值出力极易超出通道输送能力,造成通道拥堵弃风。储能系统可在风电高峰时段截留超额功率,在风电低谷时段配合外送通道平稳输电,均衡风电外送功率,充分利用输电通道容量,无需新增输电线路即可提升风电外送能力,适配大规模风电基地的并网外送需求。

3.4 风电并网故障支撑与电网稳压场景

风电发电机组低电压穿越能力较弱,电网故障、负荷突变、线路扰动等工况下,极易出现机组脱网、电压

崩溃等问题,储能系统可作为备用电源与稳压装置,保障风电并网系统安全运行。(1)故障电压支撑。当电网出现短时电压跌落、线路扰动等故障时,储能系统可快速输出无功功率,为并网点提供电压支撑,弥补风电机组无功支撑能力不足的缺陷,帮助风机机组顺利完成低电压穿越,避免大规模风机脱网事故,提升风电并网系统的故障耐受能力。(2)孤岛工况稳定控制。在电网线路检修、区域电网脱网等孤岛运行工况下,风电机组单独运行稳定性极差,功率失衡问题突出。储能系统可承担孤岛系统的电压、频率基准调节作用,平衡孤岛内风电出力与负荷需求,维持微网工况下风电系统稳定运行,保障偏远风电片区、分布式风电并网系统的持续可靠供电^[4]。

4 风电并网储能系统优化配置与控制策略

4.1 储能系统整体拓扑架构配置

储能拓扑架构选型需结合风电场装机规模、并网形式及电网接入条件,兼顾运行稳定性与工程经济性。目前风电并网工程主流拓扑包含以下三种配置形式。(1)集中式拓扑配置。该模式将储能设备集中布置于风电场升压站区域,统一接入并网点高压母线,主要应用于大型陆上风电基地。拓扑结构集成度高,便于集中管理与日常运维,可对全场风电出力进行统一调控,适配大规模风电功率波动调节与电网集中调峰场景,是当前大容量风电并网的主流配置方案。(2)分布式拓扑配置。储能单元分散布置于单台风机或箱变端口,就近完成功率调节,多用于中小型风电场与分布式风电项目。该方式可精准抵消单机出力波动,抑制局部电能扰动,并网调节精度更高,但设备布局分散,整体运维与检修难度相对较大。

4.2 储能容量优化配置原则与参数选取

储能容量配置直接影响系统技术指标与经济收益,实际配置需严格遵循工程约束条件。(1)配置基本原则。储能容量配置以电网安全约束、技术适配、经济最优为核心原则。依托电网并网技术标准,结合风电场全年出力特性、负荷匹配规律及弃风数据,确定储能合理充放电区间,确保容量可覆盖常规风电波动与调峰需求,同时综合考量设备投资、运维及折旧成本,杜绝盲目扩容。(2)关键参数选取。核心参数包括额定功率、额定容量、充放电倍率及荷电状态区间。根据风电场历史出力波动数据核定储能额定功率,适配短时功率调节需求;结合昼夜负荷差值、弃风持续时间确定额定容量;依据储能设备类型匹配合理充放电倍率,并严格限定荷电状态上下限值,规避电池过充过放,有效延长

设备使用寿命。

4.3 混合储能功率分配控制策略

单一储能技术难以兼顾风电高频小幅波动与低频大容量调节需求,需通过科学的功率分配策略,实现混合储能单元协同高效运行。(1)分频分层控制。利用滤波算法将风电功率波动拆分为高频与低频分量,高频小幅波动由响应速度快的电化学储能负责调节,低频、大容量功率偏差由抽水蓄能、压缩空气储能等机械储能承担,充分发挥不同储能技术的性能优势,实现优势互补。(2)动态阈值控制。结合实时风电出力、电网负荷及储能剩余容量,动态调整系统充放电阈值。风电波动剧烈时下调阈值,提升系统响应灵敏度;风电出力平稳时上调阈值,减少储能频繁启停,降低设备损耗^[5]。

4.4 储能系统 SOC 均衡与长效运行控制

电池单体参数差异与无序充放电,易引发储能系统 SOC 不均衡、设备老化加速等问题,长效控制策略以均衡荷电状态、保障系统稳态运行为核心。(1)组内 SOC 均衡控制。针对电池单体内阻、容量不一致导致的电量偏差问题,采用主动与被动均衡相结合的方式,实时修正单体电池荷电状态差值,保障电池组运行一致性,避免局部电池过充过放。(2)全局稳态运行控制。结合电网调度指令与系统实时运行数据,建立全局调控机制,统一规范储能充放电时序、时长与输出功率。

结束语: 本文通过对风电并网体系与储能技术的系统性研究,明确了各类储能技术的适配优势与适用场景,梳理了储能在风电并网中的各项核心应用功能,总结了储能系统拓扑配置、容量优化及协同控制的可行方案。研究证实,储能技术可有效解决风电波动并网带来的各类运行问题,显著提升电网消纳能力与供电稳定性。现阶段混合储能优化配置与智能控制仍是风电并网技术的提升重点。

参考文献

- [1] 刘国防. 风电并网中储能技术应用研究 [J]. 新潮电子, 2026(5):187-189.
- [2] 张建宇. 风电并网中储能技术应用研究 [J]. 通信电源技术, 2023, 40(7):98-100.
- [3] 刘建发. 储能技术在可再生能源并网中的应用研究 [J]. 流体测量与控制, 2026, 7(2):63-65+76.
- [4] 朱邦博. 电气自动化技术在风电并网系统中的应用研究 [J]. 今日自动化, 2025(12):122-124.
- [5] 尚素磊. 储能技术在新能源并网消纳中的应用研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 C, 2026(4):175-178.