

风光新能源协同发电对电力系统稳定性影响分析

刘广宇

中国华电集团有限公司经济技术咨询分公司, 北京 100031

摘要: 在全球能源转型加速推进的时代背景下, 风光新能源协同发电已成为电力系统绿色低碳转型的核心路径, 对优化能源结构、实现双碳目标具有关键支撑作用。然而, 风光新能源的出力特性与并网模式, 给电力系统稳定性带来全新挑战。本文系统剖析风光新能源协同发电的时空互补、波动特性、并网特征及调度复杂性, 深入探究其对电力系统频率、电压、功角稳定及调度运行的影响机理, 针对性提出虚拟惯量控制、多时间尺度调度、源网荷储一体化及需求侧响应等优化策略, 为破解风光协同发电下的稳定性难题、保障电力系统安全高效运行提供理论支撑与实践指引, 助力新能源产业与电力系统协同高质量发展。

关键词: 风光协同发电; 电力系统稳定性; 虚拟惯量

DOI: 10.64649/yh.shfzykcx.issn3078-8994.202605004

0 引言

能源安全和低碳转型已经成为全球能源发展的主要问题, 风能、太阳能等新能源因为清洁可再生的特点, 逐渐成为电力供应的主要增量。风光新能源协同发电依靠风、光资源的时空互补特点, 较好地解决了单一能源出力的间歇性问题, 提高了新能源的利用率, 是破解新能源消纳瓶颈、构建新型电力系统的重要手段。但是风光新能源出力随机波动、电力电子化并网等特性, 打破了传统电力系统以同步机为核心的稳定运行基础, 使系统面临惯量不足、电压支撑薄弱、功角稳定风险加剧等多重挑战。传统电力系统稳定性调节模式不能满足高比例新能源接入的要求, 必须弄清风光协同发电对系统稳定性的作用途径, 探寻科学有效的改善办法。本文从风光协同发电运行特性出发, 对稳定性影响机理进行深入剖析, 提出系统的解决办法, 为电力系统安全转型、能源可靠供应提供有力的支撑。

1 风光新能源协同发电运行特性分析

风光新能源协同发电的运行特性, 是决定电力系统稳定性的主要前提, 它的时空互补规律、波动差异、并网模式、调度难度等都会直接影响到对电网的支持和扰动水平, 准确把握这些特性, 是解决稳定性难题的前提。

1.1 风光出力呈现显著时空互补

风能和太阳能资源在时空上具有天然的互补性, 风光协同发电的主要价值就是互补。从日内时间尺度上来说, 光伏出力集中在白天光照充足时段, 风电出力在夜间和凌晨风力充沛时段更明显, 两者叠加之后可以很好地平滑总出力曲线, 大大降低峰谷差, 提高发电连续性。从季节和地域的角度来说, 我国北方冬季风资

源丰富, 光照少, 夏季光照充足, 风力小; 南方地区虽然资源分布存在差异, 但是整体上仍然存在时空互补的特点, 这种互补性可以大大缓解单一能源出力的季节波动和地域偏差, 提高发电设备的利用率, 给电力系统的调度提供更大的灵活性, 是风光协同发电成为新能源消纳最优方案的核心原因, 也是系统稳定运行的资源基础。

1.2 出力波动性存在时间尺度差异

风光出力波动在不同的时间尺度上具有不同的特点, 对系统的调节能力有不同的要求。风电出力在秒级到分钟级受到阵风、湍流的影响, 波动最剧烈, 单台风机出力短时间内可以出现大幅跳变, 小时级尺度上呈现渐变趋势。光伏出力在分钟级受云层遮挡影响较大, 出力易出现陡降陡升的斜坡效应, 小时级随日照角度变化呈平滑曲线。两者波动特性不同, 风光协同在长时间尺度上可以互相补充, 但是短时间尺度上可能会出现同时波动的情况, 这对系统短时功率平衡、快速响应能力提出更高的要求, 成为系统稳定运行的重要扰动因素, 需要有针对性地提高短时调节能力。

1.3 电力电子化并网特征突出

风光新能源大多采用全功率或者部分功率变流器并网, 具有明显的电力电子化特点, 与传统的同步发电机存在本质的不同^[1]。变流器型电源没有物理旋转惯量, 输出功率完全由控制算法决定, 虽然具有毫秒级响应速度, 但是没有自然的频率功率下垂特性, 不能给系统提供惯量支撑。双馈风电机组虽然保留了部分机械惯量, 但是经过变流器解耦之后, 对系统频率的支撑作用大大降低; 直驱永磁风机完全依靠全功率变流器并网, 具有零惯量的特点。由于大量电力电子设备接入, 系统短路比持续降低, 电网由强系统向弱系统演变, 抗扰动能力

明显下降,这是风光协同发电给电力系统稳定性带来挑战的技术根源,也是亟待突破的核心瓶颈。

1.4 协同调度复杂性显著增强

风光协同发电系统调度难度远大于单一电源,复杂性贯穿预测、优化、交易全过程。风光出力受多种气象因素影响,准确预测需要考虑风速、辐照度、温度、气压等参数,目前预测仍然存在误差,给调度决策带来不确定性。协同调度要在满足电网安全约束的基础上,对风电、光伏、储能的功率进行实时的优化,属于复杂的混合整数非线性规划问题,计算难度成倍增加。同时风光储多主体参与电力市场交易时,要兼顾中长期合约执行、现货市场偏差考核、辅助服务补偿等多重目标,调度决策维度大大增加,传统的以火电为主的调度模式已经不能适应,急需建立面向高比例新能源的智能协同调度体系来解决调度复杂性问题。

2 风光新能源协同发电对电力系统稳定性的影响机理

风光新能源协同发电会改变系统的电源结构和运行特性,给电力系统频率、电压、功角稳定以及调度运行带来全方位的影响,准确地找出它的影响机理,是制定有针对性的优化策略的前提,给系统稳定调控提供精准的靶向。

2.1 系统惯量下降引发频率失稳

由于大规模风光并网造成系统等效惯量不断下降,这是造成频率不稳定的根本原因。传统电力系统中,同步发电机组的旋转动能给系统提供天然的惯量支撑,负荷突变时,机组释放动能来抑制频率变化。风光机组经过变流器并网之后,几乎不能给系统提供惯量响应,当新能源占比持续提高,系统惯量会降到临界值以下,频率变化率远远超过安全阈值,一次小扰动就会导致频率保护动作,造成大面积脱网。双馈风机虽然可以参与一次调频,但是转子转速恢复过程中有功功率容易出现二次跌落,造成调频反噬效应,使系统频率稳定面临严峻挑战,需要弥补惯量缺口。

2.2 电压支撑能力显著减弱

风光出力随机波动、并网特性都会直接削弱系统电压支撑能力,增大电压稳定风险^[2]。同步发电机依靠自动电压调节器给予足够无功支撑,风机变流器无功调节能力受容量约束,光伏逆变器夜间全部退出运行,造成系统无功储备缺乏。在负荷中心远离电源的弱电网中,长距离输电线路的无功损耗又加大了电压跌落。当风光出力突然下降的时候,系统无功缺额迅速增大,电压短时间内会跌到安全阈值以下,触发低电压脱网保护;部分地区午间光伏大发时段还会出现反向过电压问题,电压稳定成了制约新能源消纳的瓶颈,要提升无功电压支撑

能力。

2.3 功角稳定面临严峻考验

高比例风光接入改变了系统的功角特性,给功角稳定带来了前所未有的考验。传统系统中,同步发电机依靠电磁耦合来维持功角稳定,变流器型电源的功率输出是由控制算法决定的,不受功角自然约束的影响,使得系统等效转移阻抗增大、功角稳定裕度降低。在风光火打捆经特高压直流送出的场景中,直驱风电机组、火电机组、直流输电控制器之间存在着复杂的交互耦合,很容易产生次同步振荡。当风电渗透率不断上升,系统阻尼比会降到安全阈值以下,一旦出现大扰动,功角失稳就会引起连锁脱网,造成大停电事故,风险不可小视,必须加强功角稳定防控能力。

2.4 功率预测偏差放大调度风险

风光功率预测偏差属于放大系统运行风险的重要因素,存在于调度运行的全过程。由于气象预报的不确定性,风光出力预测在不同的时间尺度上都会存在误差,超短期预测误差和日前预测误差都不能完全消除。当实际出力与预测值相差较大时,系统要启动备用容量来平衡供需,如果备用不够就会造成频率、电压越限。在电力市场环境下,预测偏差还会造成偏差考核费用增加,新能源企业面临巨大的经济风险,同时加剧实时电价波动,进一步放大调度不确定性的恶性循环,需要破解预测偏差带来的调度风险。

3 提升风光协同发电下电力系统稳定性的优化策略

针对风光协同发电对电力系统稳定性的影响,要从源网荷储全环节出发,从惯量支撑、调度优化、协同运行、需求调节四个方面入手,构建系统的优化策略,全方位提高系统的抗扰动能力,保证电力系统的安全稳定运行。

3.1 虚拟惯量控制增强系统阻尼

针对系统惯量不足造成的频率失稳问题,创建以虚拟同步机为依托的虚拟惯量控制体系,是加强系统惯量支撑和阻尼能力的主要手段^[3]。对直驱永磁风机、光伏逆变器等核心并网设备进行改造,在变流器控制算法中加入虚拟惯量和阻尼模块,模拟传统同步机的旋转动能特性,使风光电源具有主动参与系统频率调节的能力。当系统频率发生波动的时候,虚拟同步机会根据频率偏差迅速释放或者吸收虚拟动能,抑制频率变化率,弥补物理惯量的不足,提高系统的频率抗扰动能力。对双馈风电机组,优化转子动能控制策略,用变流器精确调节转子转速,释放转子存储动能参与一次调频,解决转子转速恢复阶段的功率二次跌落问题,避免调频反噬效应。在电网关键节点部署分布式虚拟同步

机集群,形成分布式惯量支撑网络,进一步提高系统的整体惯量水平,保证新能源高占比场景下频率变化率控制在安全阈值内,从源头上筑牢频率稳定防线。

3.2 多时间尺度协同优化调度

根据风光出力波动、预测偏差给调度带来的风险,建立多时间尺度协同优化调度体系,是提高调度精度、系统平衡能力的重要途径。整合日前、日内、实时多时间尺度调度资源,形成分层协同调度机制。日前调度阶段,根据风光功率预测数据、负荷需求、电网安全约束,优化风光发电计划和备用容量配置,给系统运行打下基础;日内调度阶段,根据最新的预测数据和实际出力情况,动态调整发电计划、优化储能充放电策略和常规电源出力,提高调度的灵活性;实时调度阶段,利用高精度监测数据,快速响应风光出力突变,用储能、可调节负荷等资源实现功率实时平衡,避免频率、电压越限。同时采用人工智能算法优化调度模型,提高预测精度和调度决策效率,建立预测偏差补偿机制,动态调整备用容量,解决预测偏差造成的调度问题,实现风光出力和系统需求的精准匹配,保证系统平稳运行。

3.3 源网荷储一体化深度运行

打破源网荷储各个环节的壁垒,形成一体化深度运行体系,是提高系统整体稳定性和灵活性的主要途径^[4]。在电源侧推进风光机组智能化升级,提高设备对电网运行状态的感知和响应能力,使风光电源主动参与到系统调节中,根据电网需求动态调整出力,为系统的稳定提供支撑;在电网侧加快坚强智能电网建设,优化电网拓扑结构,完善输电通道布局,提高电网功率输送能力及抗扰动能力,为风光电力外送和消纳筑牢网架基础;在负荷侧整合工业、商业、居民等各种可调节负荷资源,形成灵活负荷资源池,提高负荷响应能力;在储能侧科学布局各种储能系统,根据电化学储能、抽水蓄能等不同储能类型的特点,合理配置储能规模和布局,建立储能与风光、电网的协同控制机制,发挥储能平滑出力、削峰填谷、应急支

撑的作用。同时建立源网荷储一体化协同控制平台,把各个环节的数据和资源进行整合,实现信息实时共享、资源统一调配,形成源随荷动、网随源动、储随需动的协同运行模式,全方位提高系统的稳定性及调节能力,构建起全链条保障体系。

3.4 需求侧响应挖掘调节潜力

挖掘需求侧响应潜力,是缓解系统调节压力、提高稳定性的补充。建立需求侧响应机制,用价格激励、政策引导等方式调动工业、商业、居民等各类用户参与负荷调节,把需求侧资源变成可调度的灵活调节能力^[5]。风光出力高峰时段引导用户增加用电消纳过剩新能源,在出力低谷或者负荷高峰时段引导用户减少用电缓解供需压力。整合分布式储能、可调节负荷等资源,创建需求侧灵活调节资源库,加快负荷响应速度和精确度。建立需求侧响应和电网调度的协同机制,把需求侧资源纳入到电网调度体系当中,实现源荷动态匹配,平抑风光出力波动,缓解系统调节压力。完善需求侧响应的配套政策和市场机制,保证用户的参与积极性,形成长效运行模式,充分释放需求侧调节潜力,为系统稳定运行提供有力支撑。

4 结束语

风光新能源协同发电是能源转型、双碳目标的重要途径,它给电力系统稳定性带来的影响存在于运行、调度、控制的各个环节,既是机遇又是挑战。本文对风光协同发电的运行特性进行系统分析,准确找到它对系统频率、电压、功角稳定以及调度运行的影响机理,提出包含虚拟惯量控制、多时间尺度调度、源网荷储一体化、需求侧响应的系统性优化策略,为解决新能源接入下稳定性问题提供有效的方案。随着技术更新和政策完善,需要不断加深风光协同发电和电网的深度融合,加强技术创新和机制突破,不断提高电力系统的稳定性、灵活性,为能源绿色转型、电力可靠供应打下基础,助力双碳目标稳步推进,实现新能源产业和电力系统协同高质量发展。

参考文献:

- [1] 张运智,赵德明,李士宗.新型电力系统中天然气发电“两部制”电价机制研究[J].价格理论与实践,2025,(11):116-122+291.
- [2] 刘骏荣.电力系统中光伏发电并网技术研究[J].电力设备管理,2025,(24):133-135.
- [3] 刘一苇,王浩,周连干.光伏发电对电力系统的影响分析[J].张江科技评论,2025,(12):130-132.
- [4] 梁勇.面向电力系统自动发电控制的声音增强技术研究[J].电声技术,2025,49(12):177-179.

作者简介:刘广宇(1993.05—),男,汉族,黑龙江齐齐哈尔市,硕士研究生学历,工程师,研究方向:电力项目技经评价、电力市场研究。