光伏风电并网对电力系统稳定性影响与策略

宁剑平

内蒙古华电蒙东能源有限公司　内蒙古　通辽　028000

摘　要：高比例光伏风电并网重塑了传统电力系统的运行模式，新能源出力受气象条件制约，存在明显的间歇性与波动性，加之电力电子并网设备低惯量特性，容易引发电网频率偏移、电压波动及功角振荡等不稳定现象。本文结合新能源并网实际运行工况，剖析电力电子设备集群运行带来的谐波干扰、潮流分布紊乱、机组故障穿越能力不足等突出问题，从电源调控、电网升级、储能配套、智能调度层面制定针对性的稳定控制策略。研究可有效提升电网抗扰动能力与新能源消纳水平，保障新型电力系统安全平稳运行。

关键词：光伏风电；并网运行；电力系统；稳定性；调控策略

引言

双碳建设推进过程中，国内光伏、风电新能源装机规模持续增长，清洁能源发电占比不断提高，逐步替代传统火电成为电网主力电源。新能源设备依托电力电子变流器并网，缺乏传统同步机组的机械惯量与阻尼支撑，大规模接入彻底改变了原有电网的电源结构与动态运行规律。本文结合新能源并网实际现状，梳理并网运行衍生的各类稳定性隐患，剖析电网扰动的核心成因，探索适配新型电力系统的调控优化路径，为电网安全平稳运行提供可行的技术保障。

1 光伏风电并网核心运行特性

1.1 发电出力随机波动性

光伏发电、风力发电的出力水平高度依赖自然气象条件，不具备传统火电、水电电源的稳定可控输出特性，其中光伏发电效能受光照时长、云层遮挡、环境温度等因素制约，昼夜运行差异显著，日间出力波动剧烈且夜间彻底停机，风电出力则随风速、湍流强度与季节气候变化产生无规律波动，整体出力稳定性极差。随着集中式与分散式光伏风电项目批量投运，新能源大规模并网的格局逐步形成，电源出力的不确定性问题被进一步放大，叠加新能源出力时序曲线与电网负荷时序需求难以精准匹配的现实特点，用电高峰时段新能源出力不足、用电低谷时段新能源富余扎堆的供需错配现象频繁出现，大幅增加了区域电网的供需调控难度，持续干扰电力系统稳态运行的平衡性与稳定性。

1.2 低惯量弱阻尼运行特征

传统电力系统的动态稳定依托同步发电机组支撑，机组自带的机械转动惯量能够缓冲电网频率波动，固有阻尼特性可快速抑制系统功率振荡，为电网平稳运行提供基础保障。区别于传统发电设备，光伏与风电机组依靠逆变器、变流器等电力电子装置完成并网发电，整体结构无机械旋转部件，不具备同步机组的惯量支撑与阻尼调节功能[1]。随着新能源并网规模不断扩张，传统火电机组、水电机组的上网空间被压缩，电网在运行过程中同步机组投运数量持续减少，直接造成全网整体惯量与阻尼水平持续走低。电网系统惯量衰减后，功率扰动出现时的频率响应能力大幅弱化，功率供需失衡产生的频率偏移幅度更大、恢复周期更长，微小的出力波动都极易诱发明显的频率震荡。同时，电力电子设备阻尼调控性能薄弱，系统整体阻尼不足会导致故障工况下的功率振荡难以快速衰减，振荡存续时间大幅增加，极易引发区域电网低频振荡隐患，严重威胁电力系统动态运行安全。

1.3 电力电子设备扰动特性

光伏风电并网发电主要依靠电力电子变流器完成电能变换，设备工作时通过高频开关运作实现交直流电能转换，该工作模式会持续生成谐波与间谐波，对电网电能质量造成直接污染。当下新能源电站多为集群化投运，大量变流器同步工作会产生谐波叠加效果，极易引发电网电压波形畸变、三相电压失衡等诸多电能质量问题。长期的谐波扰动不仅会加重变压器、输电线路等核心电力设备的运行损耗，缩短设备服役年限，还会干扰继电保护、自动化控制装置的精准运行，间接增加电网故障发生概率。除此之外，这类电力电子并网设备的故障耐受与穿越性能相对薄弱，电网出现电压跌落、瞬时短路等轻微故障时，并网新能源机组极易发生脱网停机

现象，进一步放大电网功率缺口，扩大故障波及范围，阻碍电网故障后的快速自愈与稳定恢复。

2 光伏风电并网对电力系统稳定性的影响

2.1 对频率稳定性的影响

电力系统频率稳定依托有功功率实时动态平衡维系，系统惯量储备与调频备用容量是抵御功率扰动、维持频率稳定的核心基础。光伏、风电发电受自然环境影响极大，出力状态存在极强的不确定性，光照与风速的突发性变化会造成新能源出力剧烈波动，瞬间引发电网有功功率盈余或缺口，而传统调频机组响应速度相对滞后，难以快速适配新能源的动态出力变化，直接造成系统频率偏离标准运行区间。伴随新能源装机并网体量的不断扩张，电网内传统同步发电机组的运行占比持续缩减，全网整体惯量水平逐步衰减，电网抵御功率扰动的能力大幅弱化，一旦出现功率失衡问题，频率波动速率会显著加快、最低频率点位持续下移，极易触发低频减载、高频切机等保护装置误动作，诱发区域性供电故障。同时，主流新能源机组仅支持最大功率跟踪运行模式，不具备主动参与电网调频的运行能力，无法弥补电网调频缺口，进一步加剧了系统备用容量不足的问题，持续压缩电力系统频率稳定裕度。

2.2 对电压稳定性的影响

电力系统电压稳定的核心在于电网无功功率的动态供需平衡，光伏、风电机组普遍无功调节能力有限，难以满足电网电压稳定运行要求。光伏发电基本无自发无功输出，仅可通过逆变器实现小幅被动无功调节，风机的无功输出能力也会随气象工况大幅波动，稳定性较差。现有新能源电站的就地无功补偿设备响应速度慢、调节灵活性不足，难以适配电网电压的动态波动[2]。多数新能源并网站点位置偏远、输电线路阻抗较大，新能源出力频繁波动会持续改变线路无功损耗，造成并网点电压大幅浮动，出力峰值易出现无功堆积、电压越限，低谷时段则无功不足、电压偏低。长期电压偏移易引发电网电压失稳甚至电压崩溃，加之电力电子设备产生的谐波会扭曲电压波形、劣化电能质量，进一步破坏电网电压稳态运行的稳定性。

2.3 对功角稳定性的影响

功角稳定是衡量电力系统动态运行稳定性的核心标准，主要体现为电网内同步发电机组转子相对运行角度的平衡状态，传统电网依靠同步机组电磁功率耦合作用维持各机组功角同步运行，依托自身阻尼力矩有效抑制各类功角振荡问题。新能源机组采用电力电子并网模式，不存在机械耦合结构，无法参与电网功角动态调节，大规模并入电网后，原有同步机组之间的电气关联强度持续降低，系统整体阻尼性能不断弱化。当电网出现短路、线路断线等突发故障时，新能源出力的瞬时剧变会造成电网潮流大幅偏移，致使同步机组电磁功率剧烈波动，转子功角产生大幅度摇摆，在系统阻尼储备不足的情况下，功角振荡难以快速消退，极易形成持续性低频振荡，严重时会造成机组失步解列。尤其在新能源集中并网区域，电网电源结构相对单一、动态调节资源匮乏，功角失稳风险更为突出，故障发生后的系统恢复难度也显著增加。

2.4 对电能质量与故障稳定性的影响

光伏风电大规模并网带来的谐波畸变、电压波动与闪变等问题，会全方位拉低电网整体电能质量水平，其中谐波扰动会干扰电力计量设备的计量精度，对普通用户用电设备的稳定运行造成负面影响，极易导致工业精密生产设备出现运行异常，而电压闪变则会引发日常照明频闪、电力电机运行抖动等问题，显著降低整体用电可靠性。与此同时，新能源并网机组普遍存在低电压穿越性能薄弱的短板，电网出现轻微电压异常、瞬时故障时，容易出现大批量机组脱网停机的情况，造成电网瞬时功率大幅跌落，持续扩大故障影响范围[3]。电力电子并网设备还会改变电网固有故障电流特性，使得故障电流幅值、持续时长相较于传统电网出现明显变化，原有依托同步机组故障特征整定的继电保护装置无法适配新型电网运行工况，频繁出现保护拒动、误动现象，大幅降低电网故障排查与处置效率，给整体电力系统的安全稳定运行带来实质性隐患。

3 提升光伏风电并网电力系统稳定性的优化策略

3.1 优化电源侧调控运行模式

为切实优化电源侧整体调控水平，可对光伏、风电机组逆变器控制系统进行升级改造，打破传统机组单一最大功率跟踪的运行局限，依据电网实时负荷工况与运行状态，实现机组有功、无功功率的灵活动态调节，赋予新能源机组自主参与电网调频调压的运行能力。同时可在机组控制端加装惯量模拟模块，依托优化后的电力电子算法与虚拟同步机技术，为电网补充虚拟惯量与阻尼支撑，有效弥补高比例新能源并网带来的系统惯量缺失问题，抑制电网频率与功角振荡波动。在此基础上，结合气象大数据与机器学习技术搭建覆盖短期、超短期的新能源出力预测模型，有效提升风光出力预判精准度，依托可靠的预测数据制定适配电网负荷特性的发电与消纳方案，配合传统发电机组的启停调度与辅助调节

工作，平稳化解新能源出力波动引发的功率扰动问题，持续维系电网有功功率的动态供需平衡。

3.2 完善电网侧网架与调控体系

电网侧稳定性提升需从网架结构优化、无功补偿升级、继电保护改良多方面同步推进，针对新能源集中并网区域的输电短板，可通过翻新老旧输电线路、增设外送输电通道的方式解决新能源电力输送拥堵问题，合理梳理全网潮流分布，减少输电线路损耗，削弱电网电压波动幅度。在此基础上搭建分区协同电网运行架构，细化电网稳定管控分区，让区域内新能源电源、传统可控电源与用电负荷形成精准适配，切实提升电网整体资源调配水平[4]。为进一步适配新能源并网工况，需要对传统无功补偿体系进行迭代升级，在新能源主要并网点加装静止无功发生器、柔性交流输电装置等高性能设备，替换响应滞后、调节精度有限的传统电容电抗设备，实现无功功率的动态就地平衡，有效抑制电压异常波动。同时结合新能源电网特殊的故障电流特征重构继电保护算法与整定标准，适配电力电子设备并网后的全新故障运行特点，提升电网故障识别、响应与处置精度，杜绝保护装置误动、拒动问题，筑牢电网安全运行防线。

3.3 搭建储能协同调控系统

针对新能源并网引发的功率波动、电压与频率不稳问题，需推进储能设施与新能源电站一体化配套建设。结合区域新能源装机规模与出力波动特征，科学配置电化学储能、抽水蓄能等多元储能设备，依托其充放电双向调节能力，在风光出力过剩时段消纳冗余电能，在供电缺口时段补充电网负荷，有效平抑有功功率波动，保障电网频率稳定。同时，储能具备良好的无功调节性能，可辅助电网实施动态电压调控，改善新能源并网点电压偏移、波动等问题[5]。在此基础上搭建源储协同调控体系，打通储能设备、新能源机组与电网调度的数据交互链路，实现多主体协同联动。通过分层分类管控模式，电网侧储能负责跨时段功率平衡与常态化调频调压，用户侧储能配合完成负荷削峰填谷，全面增强电网动态调节水平。故障工况下，储能可快速提供电压与功率支撑，提升新能源低电压穿越能力，有效避免机组大规模脱网，显著提升电网运行容错性与安全稳定性。

3.4 构建多源协同调度运行机制

为适配高比例新能源并网的运行场景、提升电网整体调度适配能力，行业层面需搭建新能源与传统电源联动的协同调度体系，科学排布火电、水电与风光新能源机组的联合运行方式，依托传统电源输出稳定、调节可靠的特性承担基础负荷供给与调频调压备用工作，有效缓冲新能源出力波动带来的电网扰动，同时结合新能源出力波动规律动态调整系统备用容量配置标准，在保障电网运行安全的前提下兼顾系统经济运行效益。依托大数据、物联网与智能算法等数字化技术搭建智能化电网调度平台，对新能源出力变化、线路潮流分布、用户负荷波动以及各类电力设备运行状态开展全天候实时监测与动态研判，根据电网实时运行工况自动输出精准调控指令，实现新能源机组、储能装置与传统电源的一体化联动调控，显著提升电网动态响应与资源统筹调配能力。同步完善新能源并网运维管理规范，细化电站并网检测、日常运行管控与突发故障处置的全流程标准，以制度化管理模式夯实新能源并网后的电网整体运行安全基础。

结束语

综上所述，光伏风电的波动特性、低惯量特性及电力电子扰动，会从多方面影响电力系统稳定运行，增大电网故障风险，限制新能源消纳空间。通过优化电源调控、完善电网网架、配套储能系统、健全协同调度机制，可有效削弱新能源并网带来的不利影响。相关优化方式能够提升电网动态调节与抗扰动能力，保障新型电力系统安全、稳定、高效运行，助力新能源产业平稳高质量发展。

参考文献

[1] 张翔. 光伏风电并网对电力系统稳定性影响与策略 [J]. 读报参考,2026,(7):120-121.

[2] 刘贤斌. 大规模光伏发电并网对电力系统稳定性影响与对策 [J]. 电力设备管理,2025,(15):94-96.

[3] 王展澳, 任东朝. 光伏并网对电力系统影响及光伏并网柔性控制 [J]. 农村电工,2025,33(10):33-34.

[4] 陈洪波, 付捷. 光伏并网对电力系统频率稳定性的研究 [J]. 科技风,2025,(16):58-60.

[5] 于玺昌, 刘冠一. 风电光伏大规模接入下电力系统频率稳定性分析与控制策略 [J]. 通信电源技术,2024,41(20):206-209.