

高比例新能源并网对电力系统稳定性的影响及调控策略

李朴哲, 胡金芳

国网雄安新区供电公司, 河北 雄安 071600

DOI:10.61369/EPTSM.2026040020

摘 要 : 在“双碳”目标推动下, 风电、光伏大规模并网成为新型电力系统重要特征。新能源发电具有间歇性、波动性, 加之电力电子设备低惯量、弱阻尼特性, 从功角、电压、频率三方面改变系统稳定机理, 引发低惯量、低短路比、次同步振荡等问题。本文系统分析其对电力系统稳定性的影响机理, 梳理调控技术路线, 构建源网荷储协同、设备控制优化与机制创新的调控体系, 为高比例新能源电力系统安全稳定运行提供支撑。

关 键 词 : 高比例新能源; 电力系统; 稳定性; 低惯量; 源网荷储协同; 调控策略

Impact of High-Proportion New Energy Grid Connection on Power System Stability and Control Strategies

Li Puzhe, Hu Jinfang

State Grid Xiong'an New Area Power Supply Company, Xiong'an, Hebei 071600

Abstract : Driven by the "dual carbon" goals, large-scale grid integration of wind and solar power has become a defining feature of modern power systems. New energy generation exhibits intermittent and fluctuating characteristics, compounded by the low inertia and weak damping properties of power electronic devices. These factors disrupt system stability mechanisms through power angle, voltage, and frequency variations, leading to challenges such as low inertia, low short-circuit ratios, and sub-synchronous oscillations. This study systematically analyzes the impact mechanisms on power system stability, outlines regulatory technical approaches, and establishes a coordinated control framework integrating source-grid-load-storage synergy, optimized equipment control, and innovative mechanisms. The research provides essential support for ensuring safe and stable operation of high-proportion renewable energy power systems.

Keywords : high proportion of renewable energy; power system; stability; low inertia; source-grid-load-storage coordination; regulation strategy

引言

全球能源转型持续深化, 我国新能源发电已进入规模化快速发展阶段。截至2025年底, 风电、光伏总装机突破12亿千瓦, 发电量占比超30%, 部分省级电网新能源渗透率超过50%^[1]。高比例新能源并网在加速能源结构低碳转型的同时, 显著改变了传统同步机组主导的电力系统动态特性。新能源经电力电子变流器并网, 缺少同步发电机固有的旋转惯量与阻尼能力, 造成系统等效惯量下降、调频调压能力减弱、稳定裕度降低。传统稳定控制理论与技术难以适应新系统特征, 频率、电压及次同步振荡等风险日益突出, 制约新能源消纳与电网安全。因此, 系统分析其对稳定性的影响机理, 研究针对性调控策略, 对保障新型电力系统可靠运行、支撑能源转型与“双碳”目标实现具有重要现实意义。

一、高比例新能源并网的电力系统特性转变

(一) 电源结构与动态特性根本性变革

传统电力系统以火电、水电同步发电机为主体, 其旋转惯量、阻尼转矩与励磁系统是系统稳定运行的关键。高比例新能源并网后, 电源结构呈现“双高”特点: 新能源装机占比持续提

升, 同步机组占比下降; 电力电子变流器广泛应用, 系统由同步机主导转为电力电子主导。逆变型电源与同步机动态特性差异明显: 一是无自然旋转惯量, 系统等效惯量随新能源渗透率升高显著降低, 频率波动加剧; 二是多采用MPPT控制, 与系统频率、电压解耦, 基本不参与调频调压; 三是阻尼能力薄弱, 仅依靠控制算法提供虚拟阻尼, 对系统振荡的抑制能力明显下降。

（二）电网运行环境与稳定边界显著恶化

我国风电、光伏等新能源多集中在三北及西南地区，需经长距离、大容量线路外送，使得整体电网运行条件明显变差。新能源场站接入的交流电网普遍较弱，线路阻抗偏大、短路容量偏低，变流器与电网之间易发生动态交互振荡，直接抬升系统稳定控制难度。受限于变流器容量，新能源场站无功调节能力有限，加之偏远地区电网无功储备不足，在出力波动与故障扰动下，电压易大幅偏离额定值且恢复缓慢。同时，新能源出力具有明显的间歇性与随机性，造成系统潮流频繁剧烈波动，输电断面运行工况多变，进一步压缩功角与电压稳定边界。分布式新能源大量接入配电网后，潮流由单向变为双向流动，配电网在电压控制、继电保护配合及孤岛防范等方面均面临新的难题，高渗透率场景下极易出现电压越限、保护误动等运行风险^[2]。

二、高比例新能源并网对电力系统稳定性的多维影响

（一）对功角稳定性的影响

功角稳定性决定同步机组能否保持同步运行，其核心支撑来自系统转动惯量与阻尼转矩。在高比例新能源并网条件下，系统整体功角稳定特性明显劣化。随着同步机组占比持续降低，系统等效惯量显著下降，故障后不再有充足的转子动能缓冲，暂态稳定裕度大幅降低。以往系统故障后可提供1—2秒的调节窗口期，而在新能源高占比系统中，惯量水平往往不足传统系统的三分之一，故障后功角摆动幅度急剧增大，稳定极限明显降低。甘肃酒泉风电基地曾在阵风影响下出现出力快速波动，造成系统惯量短时大幅下降，部分火电机组功角摆幅超限，最终触发切机并引发局部停电事件。新能源出力的随机波动还会造成电网潮流频繁大幅变动，输电断面输送极限持续变化，进一步扩大功角失稳的影响范围。当新能源渗透率超过30%，系统功角稳定边界将明显收缩，小扰动也容易激发出持续的功率振荡现象^[3]。与此同时，大量电力电子变流器的控制环节与弱交流电网相互作用，容易诱发次同步与超同步振荡。张家口沽源风电基地就曾因风机变流器与电网阻抗耦合产生次同步谐振，造成风机集中脱网和线路保护误动。这类振荡会在电网中快速传播，严重时可直接引发系统功角失稳乃至大面积崩溃。

（二）对电压稳定性的影响

电压稳定性主要依赖系统无功功率平衡与充足的电压支撑，高比例新能源并网会明显削弱系统电压稳定水平。新能源变流器的无功调节区间有限，且运行中多优先保证有功出力，整体无功支撑能力偏弱。在新能源集中接入区域，其出力的随机波动极易造成并网点电压大幅波动，青海某光伏基地曾因出力骤降一半导致电压严重越限；分布式光伏接入配电网后，也常出现午间高峰电压偏高、夜间低谷电压偏低的问题，影响配电网安全运行。多数新能源场站接入短路比较低的弱交流电网，电压对无功变化十分敏感，微小的无功波动就可能危及电压稳定。故障情况下，新能源变流器在低电压穿越过程中会消耗大量无功，进一步扩大系统无功缺口，造成电压深度跌落且难以快速恢复。此外，大量逆

变器并联运行还会带来谐波与振荡问题。多台变流器产生的谐波电流相互叠加，会造成电网电压畸变率超标；不同设备控制参数差异带来的动态交互作用，在弱电网条件下易诱发电压振荡，既威胁电力设备安全，也降低了系统整体电能质量。

（三）对频率稳定性的影响

电力系统频率稳定的核心在于有功功率的实时平衡，以及一次调频、二次调频的快速响应能力，高比例新能源并网会从多方面显著削弱系统的频率稳定水平。传统同步发电机组依靠调速器可在200ms内快速响应频率波动，而新能源机组多采用最大功率点跟踪控制，正常运行时基本不参与系统一次调频，随着同步机占比持续降低，系统整体调频容量不断缩减^[4]。当新能源渗透率超过35%，系统一次调频能力不足传统系统的四成，负荷突增或机组跳闸等扰动下，频率极易突破 $\pm 0.2\text{Hz}$ 的安全范围，2023年江苏某新能源渗透率32%的区域电网就因负荷短时大幅增长引发频率严重偏差，最终触发低频减载造成工业用户停电^[5]。同时，系统低惯量特征使得频率变化率大幅升高，由传统系统的 0.5Hz/s 以下升至 2Hz/s 以上，频率快速波动大幅压缩控制措施的响应窗口，某省级电网在新能源占比40%时，单台600MW火电机组跳闸便在1.5秒内将频率拉至49.0Hz，触及低频减载阈值^[6]。此外，新能源、储能与常规机组在调频响应速度、调节范围及持续时长上差异明显，现有调度模式难以实现多类型资源协同调频，不仅会加大频率波动幅度，还会延长频率恢复时间，进一步威胁系统安全稳定运行并影响设备使用寿命。

三、高比例新能源电力系统稳定性调控技术体系

（一）新能源机组主动支撑技术

虚拟同步机（VSM）控制通过优化变流器控制逻辑，模拟同步发电机的惯量、阻尼与调压特性，可从虚拟惯量、虚拟阻尼及虚拟励磁三个维度为系统提供主动支撑，有效提升系统等效惯量并抑制频率与功率振荡。构网型控制摒弃传统跟网运行模式，采用电压-频率（V-f）控制方式，使新能源机组可不依赖电网同步信号自主构建电压与频率，大幅增强低惯量、弱电网环境下的系统暂态同步稳定性，同时提升故障期间的电压支撑能力。在此基础上进一步优化变流器控制策略，可使新能源具备主动参与系统调频调压的能力，通过下垂控制与虚拟惯量相结合实现快速一次调频，利用电压闭环无功调节实现就地电压支撑，缩短响应时延并提高调节精度。多项控制技术协同应用，能够有效弥补新能源并网带来的惯量不足、阻尼薄弱、调压能力有限等问题，改善系统动态响应特性，增强功角、电压与频率稳定水平，为高比例新能源电力系统安全稳定运行提供设备侧核心支撑。

（二）源网荷储协同调控技术

源网荷储协同调控技术通过多维度协同机制，整合各类调节资源以平抑新能源波动、保障系统功率平衡与稳定运行，核心涵盖多时间尺度协同调度、多资源协同调频调压及虚拟电厂聚合调控三大方向。其中，多时间尺度协同调度构建“日前-日内-实时”分层调度体系，依托新能源预测与广域测量系统，实现不

同时间维度下传统机组、储能、可中断负荷的精准协调与功率调节；多资源协同调频调压则整合新能源、传统机组、储能及各类无功补偿设备，形成“快-慢”结合的调频体系与分层分区的调压机制，提升系统调频调压的响应速度与精度；虚拟电厂聚合调控通过分布式协同算法，将分散的分布式新能源、储能、可控负荷等资源进行聚合，转化为可统一调度、精准控制的规模化调节资源，充分挖掘分散资源的调节潜力，为高比例新能源电力系统提供全方位、多维度的协同支撑^[7]。

（三）电网稳定增强与保护优化技术

电网稳定增强与保护优化技术通过设备配置升级与保护逻辑优化，强化高比例新能源系统的稳定支撑能力，主要包括动态无功支撑、新型储能协同稳定控制及适配性保护控制三个方面。动态无功支撑技术通过在新能源集中并网区域部署 STATCOM、SVG、SVC 等动态无功补偿装置，可快速提供无功支撑，有效提升系统电压稳定裕度，抑制电压波动与崩溃风险；新型储能协同稳定控制采用锂电池、超级电容与飞轮结合的混合储能架构，依据不同储能设备的响应特性，分尺度实现新能源出力波动平抑与系统快速调频，保障系统功率平衡；适配新型系统的保护控制则通过优化继电保护原理与配置，采用广域信息纵联保护、自适应距离保护等方式，解决新能源故障电流特性差异带来的保护误动、拒动问题，同时加装次同步振荡监测与抑制装置，抑制振荡传播，确保系统稳定运行^[8]。

（四）政策机制与市场保障体系

政策机制与市场保障体系是高比例新能源电力系统稳定运行的重要支撑，核心通过强化涉网标准与完善辅助服务市场，规范新能源并网行为、激发各类调节资源活力。一方面，严格落

实 GB/T 19963-2020、GB/T 19964-2020 等相关标准，强制要求新能源机组具备惯量支撑、一次调频、无功调压及故障穿越等主动支撑能力，同时建立健全新能源并网检测与认证体系，对不达标机组实行并网禁令，从源头保障新能源涉网性能^[9]。另一方面，不断完善辅助服务市场，构建涵盖调频、调压、备用、爬坡等多品类的市场体系，通过价格信号引导新能源、储能等主体主动参与系统稳定支撑服务；明确新能源辅助服务的责任与考核规则，将主动支撑能力与并网优先级、补贴政策直接挂钩，同时健全容量电价机制，支持储能、虚拟电厂等新型调节资源参与市场，充分调动各类主体的参与积极性，为系统稳定调控提供坚实的政策与市场保障^[10]。

四、结语

高比例新能源并网是新型电力系统的核心特征，其低惯量、弱阻尼、强波动特性，从功角、电压、频率三大维度深刻改变电力系统稳定机理，使传统稳定控制体系面临严峻挑战。构建适配性调控策略体系，需遵循“设备主动支撑、源网荷储协同、电网强化升级、机制市场保障”路径，通过虚拟同步机、构网型控制赋予新能源主动支撑能力，依托多时间尺度调度、混合储能等实现全资源协同，借助动态无功补偿等强化电网基础，以完善标准与市场机制激发调节活力。未来，需突破稳定基础理论，研发构网型控制、人工智能协同调控等关键技术，构建自适应、自趋稳的新一代稳定控制系统，为高比例新能源电力系统安全高效运行提供保障，助力“双碳”目标实现。

参考文献

[1] 国家发展改革委，国家能源局。关于促进新能源消纳和调控的指导意见 [Z].2025-10-29.

[2] 邱忠涛，格根敖其，贾跃龙，等。新型电力系统供需协同全要素理论框架 [J]. 中国电力，2025, 58 (10):147-162.

[3] 王帅，刘剑。基于虚拟同步发电机的新能源并网控制策略研究 [J]. 电力系统自动化，2022, 46 (8):123-130.

[4] 陈燕东，赵栋利。下垂控制与模型预测控制结合的光伏并网功率平滑策略 [J]. 电工技术学报，2021, 36 (S2):567-575.

[5] 李兴源，王曦，黄媛。高比例新能源电力系统稳定控制技术综述 [J]. 电网技术，2024, 48 (1):1-16.

[6] 刘纯，黄越辉，李楠。高比例新能源并网系统稳定性分析与控制 [M]. 北京：中国电力出版社，2023.

[7] 宋美琪，李洪全，肖赫，等。面向高比例新能源接入主动配电网的多层模型预测电压控制 [J]. 分布式能源，2025, 10 (2):34-41.

[8] 张兴，曹仁贤。光伏并网逆变器控制技术 (第 3 版)[M]. 北京：机械工业出版社，2021.

[9] 谢小荣，贺静波，毛航银，等。“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨 [J]. 中国电机工程学报，2021, 41 (2): 461-475.

[10] 王冠淇，裴玮，熊佳旺，等。新能源场站跟网 / 构网变流器协同控制策略综述 [J]. 高电压技术，2025, 51 (2): 793-805.