

适应新型电力系统发展的电力电子电源并网安全管理模式研究

樊丽娟¹, 黄河², 梅勇², 周保荣¹, 苏寅生²

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 中国南方电力调度控制中心, 广州 510663)

摘要: 在“双碳”目标的推动下, 我国电力系统正经历深刻变革。随着电力电子电源大规模接入, 系统稳定性问题日益突出, 呈现多种稳定深度耦合、元件群体行为不可预测的突出特征。针对上述问题系统分析了现行电力电子电源并网管理中基于“黑盒”的外特性管理模式、并网检测体系、仿真建模准确性等方面存在的局限性, 并借鉴国际先进经验, 研究提出以并网控制框架标准化和模型透明化为核心的新型并网技术管理体系, 从并网控制框架及参数整定方法标准化、并网标准修编、并网测试和仿真建模、数字化监测及市场激励等方面提出系统性改进措施。通过这些变革, 有望推动并网管理由被动适应转向主动深度协同, 提升新型电力系统的安全稳定运行水平。

关键词: 新型电力系统; 电力电子电源; 并网技术管理; 控制框架标准化; 模型透明化

Research on Grid Integration Safety Management Mode of Power Electronics-Based Resources for New Power Systems

FAN Lijuan¹, HUANG He², MEI Yong², ZHOU Baorong¹, SU Yinsheng²

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: China's power system is undergoing a profound transformation driven by the “dual-carbon” targets. With the large-scale integration of power electronics-based resources, system stability issues have become increasingly prominent, exhibiting strong coupling among multiple stability phenomena and unpredictable collective behaviors. To address these challenges, the limitations of the existing grid integration management framework is systematically analyzed, including the “black-box” external characteristics, inadequate grid integration testing system, and insufficient modeling accuracy. Drawing on international best practices, a new management framework is proposed, centering on the standardization of grid-connected control frameworks and model transparency. Comprehensive enhancement measures are proposed, covering the development of standardized control models and parameter tuning methods, technical standard revision, grid integration testing and simulation modeling optimization, digital monitoring, and market incentive mechanisms. The proposed framework aims to transform grid integration management from passive adaptation to proactive deep coordination, thus improving the secure and stable operation of new power systems.

Key words: new power systems; power electronics-based resources; grid integration technology management; control-framework standardization; model transparency

0 引言

在全球气候变化加剧的背景下, 加快能源转型已成为世界各国的迫切任务。受中国“双碳”目标、

欧洲“超级电网”计划^[1]、北美“建设更好的电网”等政策的驱动^[2], 电力系统正经历历史性变革。新型电力系统是我国实现“双碳”目标的关键载体, 保障能源安全的战略选择。随着我国新型电力系统加快建设, 新能源发电装机总量呈现加速扩增的趋势。截至 2024 年末, 全国累计新能源装机总容量突破 1.4 TW(风电 0.52 TW、光伏 0.89 TW)^[3], 同比增

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22B20122)。

Foundation item: Supported by the Joint Fund Key Project of National Natural Science Foundation of China (U22B20122)。

长超 33%，提前 6 年完成 2030 年 1.2 TW 新能源装机总量的目标^[4]。根据“十五五”规划，2035 年新能源装机总量将达到 3.6 TW。

电力电子电源是指通过变流器接入电网的各类电源，包括风电、光伏、电化学储能、动态无功功率补偿装置(static var generator, SVG)等。随着风电、光伏等新能源装机占比突破 40%，电力电子电源渗透率持续攀升，电力系统正面临“双高”(高比例新能源、高比例电力电子设备^[5-6])特性引发的低惯量、弱支撑、宽频振荡等问题^[7-12]。为应对这些挑战，国家能源局于 2023 年发布《关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见》^[13]，2024 年发布《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027 年)》^[14]，2025 年发布《关于促进新能源消纳和调控的指导意见》等文件^[15]，提出了新型电力系统稳定工作的目标和具体行动方案。

与此同时，近年来全球范围内与电力电子电源相关的大停电事故呈多发态势。2019 年 8 月 9 日英国大停电事故中，雷击导致风电场脱网，引发连锁反应^[16]。2023 年 8 月 15 日巴西全国性大停电事故暴露了新能源仿真模型不准确导致系统稳定特性不及预期的问题^[17]。特别值得关注的是 2025 年 4 月 28 日发生的西班牙和葡萄牙伊比利亚半岛大停电事故^[18]。这次事故影响了整个伊比利亚半岛，造成数百万人供电中断。根据初步调查报告，事故发生前系统内出现了多次低频振荡，系统运营商采取增强网架联系的措施后整体电压上升，引发部分新能源场站因电压耐受能力不足而脱网，同时由于系统动态调节能力不足，更多新能源场站因过电压而脱网，造成短时间内频率急剧下降，最终导致系统进入不可逆转的连锁跳闸而崩溃。事故暴露出，因仿真模型不准确，事前分析难以充分揭示运行风险，且事故演化过程呈现系统振荡、电压稳定和频率稳定问题的深度耦合特征^[19]。

结合国内多起新能源场站脱网事故，可知现有电力电子电源并网安全管理模式在应对新型电力系统带来的挑战方面仍存在不足。亟需在标准、测试、模型与运行管理层面形成系统的工程体系，这也是落实国家《“十四五”现代能源体系规划》中“加快能源系统调整以适应新能源大规模发展”的重要内容。

1 新型电力系统安全稳定分析与控制面临的挑战

《电力系统安全稳定导则》^[20](GB 38755—2019，以下简称导则)确立了以“三道防线”为核心的防御体系，是我国电力系统规划设计、调度运行、事故处置的统一技术基准。导则结合三级稳定标准，明确了电力系统安全稳定的计算分析是实现“三道防线”的技术基础，并提出了模型建立、参数实测、计算内容等方面的具体要求。随着电力电子电源成为主力电源，仿真分析的重要性越发突出，对仿真模型和参数的准确性提出了更高的要求。

1.1 电力电子电源与同步发电机的本质差异

传统同步发电机与电力电子电源在物理结构与运行机理上的差异，直接造成了二者在扰动下的动态行为差异显著，从而导致系统安全稳定呈现不同的特性。

同步发电机动态特性主要由转子的机械特性和定转子电磁感应特性共同决定，使得不同同步机在外部表现上具有较强的相似性与可预测性。同时，其暂态过流能力通常为额定电流的 5~10 倍，在故障期间能够同时提供较强的有功与无功功率支撑，且对频率电压异常具有较强的适应能力，是现代电力系统稳定运行的基础。

相比之下，电力电子电源以电力电子器件与控制系统为核心，惯性、阻尼、电压支撑等特性主要通过控制策略实现^[21]。两台硬件相同的逆变器，若控制策略(如锁相环、限流与故障穿越逻辑)不同，其动态行为仍可能存在显著差异。同时，逆变器总输出电流受半导体器件耐受能力限制(即 $I_p^2 + I_q^2 \leq I_{\max}^2$ ，其中， I_p 和 I_q 分别表示有功、无功电流)，最大电流 $I_{\max}$ 通常不超过 1.1 p. u.，在接近限幅时有功和无功功率存在瞬时的硬性约束关系，控制策略需明确优先级(如低电压穿越期间无功功率优先)。此外，多时间尺度控制(电流内环、功率外环、锁相环、保护逻辑等)之间可能产生相互作用，尤其在弱电网或复合扰动情形下更易出现相位跟踪性能下降、限流切换振荡等非预期行为^[22]。与同步机的物理一致性不同，电力电子电源的“软件定义”特性导致其外部行为的差异性和不确定性更加突出，为系统安全稳定计算分析及控制带来了新挑战。

1.2 新型电力系统安全稳定分析方法的挑战

传统电力系统通常采用机电仿真开展大系统安全稳定计算, 并利用电磁暂态仿真开展包含直流输电、新能源场站、SVG 等电力电子设备的等值系统的精细化建模、运行特性模拟、控制策略优化及核心装置的研发。长期运行与工程实践表明, 在传统同步机为主体电源的系统中, 上述方法总体上能满足安全稳定管理的需求。

但随着电力电子电源成为主体电源, 且其与传统同步机存在上述本质差异, 新型电力系统安全稳定分析正面临重大挑战。新型电力系统的稳定问题呈现出多种稳定深度耦合、群体行为不可预测的突出特征。功角稳定、频率稳定和电压稳定通过电力电子电源的快速控制环节被紧密地耦合在一起^[23]。故障不再是单一问题的线性发展, 而是“电压-频率-功角-振荡”等多问题耦合、相互激发的链式反应, 使得故障的演化路径极难预测^[24-25]。同时, 来自不同制造商、不同软件版本与参数定值的设备, 其在相同扰动下的响应差异明显, 整体表现不再是单机响应的线性叠加^[26], 呈现典型的复杂系统“涌现”和场景敏感特性^[27-28]。传统的区域等值与线性叠加分析方法, 由于难以刻画跨区域、跨时间尺度的强耦合与群体性行为, 准确性显著下降, 因此, 安全稳定分析必须高度依赖能够准确再现各设备动态行为的系统性仿真。

理论上, 系统性仿真应以电磁暂态仿真为基础, 实现对电力电子装置开关行为和快速控制的准确刻画。但受计算效率低、成本高及平台兼容性差等因素制约, 电磁暂态仿真难以满足大电网在电力市场出清、运行方式安排等场景下海量算例的计算效率与吞吐能力需求。因此, 工程实践仍需依托机电仿真开展大规模系统性仿真, 这对电力电子电源机电仿真模型的准确性提出了更高的要求^[29]。

然而, 在当前的并网安全管理模式下, 作为主体的电力电子电源, 其机电仿真模型多基于有限工况外特性的拟合和外推构建, 难以准确反映设备的暂态行为和控制交互, 已成为制约大规模系统性仿真准确性与安全稳定分析可靠性的主要因素之一。

2 现行电力电子电源并网安全管理模式的问题

现行电力电子电源的并网安全管理以单一机组的外特性为核心, 对设备内部关键控制策略缺乏统

一规范和有效约束。该模式适用于电力电子电源渗透率较低的阶段, 但在其成为主体电源的场景下, 外特性合规难以等同于系统级安全稳定。其内在局限性正逐步暴露, 主要体现为“黑盒”外特性管理无法揭示群体交互风险, 以及测试与评估体系难以覆盖复杂工况的系统级动态过程, 导致无法建立准确的仿真模型。

2.1 “黑盒”外特性管理模式的局限性

当前, 逆变器制造商常将控制策略视为商业机密, 仅向调度机构提供“黑盒”模型, 系统运行人员无法获知其控制逻辑、底层参数与保护触发机制等。这种“黑盒”模式由于难以对设备的暂态响应、保护动作及协调配合等进行有效校核, 随着电力电子电源渗透率的提高, 已难以应对系统安全运行需求。其局限性主要体现在系统规划、运行调度、事故分析 3 个层面, 严重削弱了系统的可观性、可控性与可预测性^[30-31]。

在系统规划层面, 粗粒度的黑盒模型缺乏对控制机理与关键参数的可验证刻画, 难以对未知工况进行准确外推, 无法准确预测低惯量、弱电网条件下的动态响应特性和群体交互行为, 无法开展系统级的控制逻辑和参数协同优化。影响对系统稳定性、可靠性和电能质量的精准评估, 后果表现为安全性与经济性的失衡: 或是在规划中遗留未知的稳定薄弱环节, 或是在运行中因过度预留裕度而牺牲了资产利用效率。

在运行调度层面, 面对海量异构“黑盒”设备, 调度机构难以掌握各装置在扰动下的实际响应与控制交互特性, 无法实施统一、精准的参数整定和协同控制策略。各制造商设备响应特性的差异性和不透明性, 使得系统调频调压、故障穿越与事故后恢复等关键功能的可预期性大幅下降。调度机构对系统运行状态的可操纵空间与安全裕度评估存在较大不确定性, 系统可控性受到实质性削弱。这一系统性挑战在实际运行中已多次引发严重问题: 2023 年 8 月 15 日甘溪甲线功率振荡, 源于光伏场站在低穿门槛附近的模式频繁切换, 体现了黑盒设备在稳态下因控制逻辑及参数不透明引起的振荡风险; 2024 年 3 月 2 日黄仁线相间故障, 约 28 % 的光伏机组因过压过流保护脱网, 体现了故障过程中黑盒控制保护策略导致系统供电中断的风险。

在事故分析层面, 故障复现与责任界定高度依

赖厂商对专有控制逻辑的解析,而技术支持能力的参差不齐常使事故归因与反措制定缺乏可靠依据,使安全管理陷入“事故发生—无法精确归因—纠正措施失效—系统性风险固化”的失效闭环。

2.2 并网检测体系的不足与失效风险

当前电力电子电源的并网检测在标准体系、检测方法、检测及技术监督成本等方面均存在较多不足,经常出现通过测试的机组在运行中脱网的情况,比如前述黄仁双线相间故障,所有的新能源机组均通过了并网测试,但是系统电压未达到低穿允许跳闸的边界时依然发生了 28 % 机组脱网的情况。

具体而言,首先是标准体系存在滞后与冲突。一是现行国家标准与行业标准难以满足高比例新能源接入下的系统稳定需求,在低/高电压穿越、相位突变与波形畸变耐受、宽频振荡抑制等方面的技术要求亟待提升。二是现有并网标准不一致、要求不明确,不同标准之间存在差异甚至冲突,如 SVG 并网性能测试中的无功功率控制、响应时间和调节时间,新能源机组自动发电控制(automatic generation control, AGC)试验和自动电压控制(automatic voltage control, AVC)试验在控制精度、调节速度等方面的要求在多种标准中不一致。

其次,检测方法与实际工况严重脱节。现有基于线性叠加原理的解耦测试方法无法反映电力电子设备在真实复合故障下的非线性耦合特性,忽略电压/频率暂态、谐波与阻抗变化等多重动态耦合效应,致使锁相环性能下降、控制冲突、宽频振荡等系统级风险无法在单元测试中暴露。此外,单元级电磁暂态测试与场站级准稳态验收之间存在严重割裂,缺乏对场站集群动态行为的高精度仿真验证,无法识别异构设备交互引发的暂态过电压或振荡等系统风险。测试条件设置亦不合理,如低电压穿越中电压跌落过程电压变化率(dV/dt)远低于实际故障的阶跃特性,掩盖了暂态过电流导致的保护误动问题,削弱测试有效性。

最后,检测监督机制不健全且成本高企。第三方检测机构资质要求模糊,监管缺位,导致市场秩序混乱、报告真实性难以保障。部分机构为迎合厂商需求,在测试中配合优化参数,但厂商在现场可能使用不同版本的控制程序。同时,并网试验工况复杂、模型格式多样,使得测试成本显著高于传统电厂,加重企业负担,制约新能源行业的高质量

发展。

2.3 仿真模型建立及管理方面的问题

当前,电力电子电源的仿真模型建立及管理方面存在明显不足。在模型建立方面,普遍存在的“黑盒”方式导致模型机理不透明、关键参数失真,基于有限工况下外特性拟合的机电暂态模型,因其未能反映真实的内部控制逻辑,在复杂扰动下将产生系统性偏差;场站建模过度简化,忽视设备间耦合效应,难以准确表征群体动态响应。在模型管理方面,版本管理薄弱,策略、固件或参数变更后,仿真模型未能同步更新,响应与实际不一致;跨平台一致性与合规测试不足,缺乏标准化基准系统与测试用例集;缺乏规范的元数据管理和定期复核机制,使得仿真结果的可信度大幅降低。

如前所述,大规模系统分析仍需依赖机电暂态仿真工具,确保输入模型的准确性是提升整体仿真可信度的先决条件。为此,需从以下两方面着手:一方面,必须在机电暂态与电磁暂态的多时间尺度下,以控制逻辑透明、关键参数准确的场站级模型为基础,系统性开展包括复合扰动场景、参数不确定性及灵敏性分析在内的全面评估;另一方面,为降低分析的复杂性,提高系统的可控性,必须通过推动控制框架标准化来约束电力电子电源的控制特性差异。只有将准确透明的仿真与标准化的设备相结合,才能有效识别潜在耦合风险与薄弱环节,为规划设计与运行控制提供可信的决策依据。

3 并网控制框架标准化与模型透明化的必要性

电力电子电源内部控制逻辑的不统一与黑箱化对系统的可预测性、安全性、运行效率及产业生态构成了根本性挑战。因此,推动控制框架的标准化和透明化,从技术、安全与经济 3 个层面审视,已成为构建新型电力系统不可或缺的基石。

3.1 技术层面:控制框架标准化是系统行为可预测与可控的基础

当前并网标准主要对电力电子电源的外部电气特性提出要求,而未规范“如何做”的内部控制框架。2021 年 5 月 9 日美国德州“奥德赛扰动”事件表明,一次常见的单相接地故障引发约 1.1 GW 光伏脱网,事后分析涉及锁相环失锁、直流母线过压、交流过压等多种内因,反映出不同制造商的控制策

略在真实扰动中表现差异巨大。因此,标准化应延伸至控制框架层面,在不替代既有性能指标的前提下,补充对锁相环动态性能、有功/无功功率协调限流策略、故障穿越期间电流分配、恢复时序、直流电压控制与过压处理逻辑、模型透明度与验证方法等关键环节的统一规范。通过统一控制路径,可有效降低设备间负面交互与集群不确定性,提升系统可控性和稳定裕度。

3.2 电网安全层面:标准化和透明化是防范系统性风险的关键举措

高比例电力电子电源系统的核心挑战在于多类稳定问题的强耦合,2025年西葡大停电充分揭示了振荡—电压—频率链式放大的严峻后果。

在风险分析层面,设备控制框架与参数的不透明使模型的可信度、可核验性与跨平台可复现性受限,难以及时、准确刻画耦合机理与动态安全边界;通过对关键控制环节与接口的标准化,并辅以一致性验证,可在行为层面形成统一约束,推动模型透明化与数据规范化,提升仿真结果的可验证性。需要强调的是,仅提供透明化的电磁暂态模型仍不足以准确识别系统级风险,因为在缺乏统一控制框架时,其向机电暂态模型的降阶转换与参数等值难以实现,易产生场景依赖与结果偏差。对控制器关键控制模块实施标准化,明确行为边界与参数集合,可形成电磁暂态—机电暂态的可追溯映射,提升机电暂态模型的准确性与适用范围,并为规划与调度中的动态安全边界评估提供更可靠依据。

在精准调控方面,标准化的控制框架可显著降低异构设备响应差异,增强响应一致性与可预测性,使调度指令能够有效落地,及时切断耦合放大链条。

在事故分析方面,标准化的控制框架与模型使设备行为可追溯、有据可依,便于开展客观高效的技术复盘,较快定位事故根本原因并制定有效的改进措施。

总体而言,标准化与透明化相互支撑、相互促进,可在“分析—控制—复盘”的全链条上降低不确定性,提升新型电力系统的韧性与可控性。

3.3 产业发展层面:标准化是构建健康产业生态的必由之路

现有并网管理模式要求对每个新能源场站独立开展并网检测和模型参数测试,导致工作量大、检

测成本高昂、并网周期冗长,难以适应未来新能源大规模发展的需求。同时,由于不同制造商采用各异的控制框架和模型接口,形成了技术壁垒,推高了系统集成成本,并使设备检测、维护费用居高不下。在项目全生命周期中,标准化能够显著降低系统集成、调试测试及后期运维的复杂度与成本,提升项目交付效率与资产收益稳定性,为电力电子电源产业规模化、高质量发展奠定基础。

4 国际经验借鉴

面对同样的挑战,全球领先的电网运营商和研究机构已经开始行动,其核心思路高度一致,均为推动控制策略的标准化和仿真模型的透明化^[32-34]。

首先,在变流器控制策略的标准化方面,目前澳大利亚、欧洲和美国等国家均采用外特性管控的策略,重点关注场站公共连接点处的动态响应能力,如电压支撑、故障穿越与频率调节,而不强制统一设备内部硬件或专有控制算法。但在此框架下,美国西部电力协调委员会通过其机电暂态“第二代通用模型”,进一步实现了控制策略的间接标准化^[32]。该模型提供了覆盖发电机/变流器、电气控制及电厂级控制器的模块化参考架构及参数范围,强制要求设备制造商将其专有控制策略映射至此框架内。通过模型仿真与实测响应的高度匹配验证,实质上约束了控制逻辑的多样性,从而在行为层面达成了标准化的效果。

其次,在仿真模型透明化方面,针对电磁暂态模型,各国的基本要求均为动态链接库文件、策略或参数说明文档及验证报告组成的灰盒模型。针对机电暂态模型,美国西部电力协调委员会主要采用第二代通用模型,通过预定义模块和参数文件实现高效集成和验证;相比之下,除了通用模型外,澳大利亚能源市场运营商还使用用户自定义模型,部分厂家在与运营商签订保密协议后,提交完全透明的机电白盒模型源代码,部分厂家同时提供极为详尽的技术文档(完整控制框图与参数解释),实现模型的适度透明化。

最后,在并网测试方面,所有地区均侧重场站整体响应,而非单台设备的独立性能。其根本原因在于,单台设备满足并网标准并不能保证场站整体满足并网标准,集电网络自身的动态特性也可能放大设备间的潜在交互问题。因此,无论是澳大利亚

的 R2 测试、北美的 MOD-027 标准，还是欧洲的并网合规性测试，均通过现场扰动试验或场站详细模型仿真来验证在公共连接点的整体动态行为与稳定性。

5 构建适应新型电力系统要求的电力电子电源并网安全管理体系

为应对新型电力的系统性挑战，本文以提升系统整体的可控性和安全稳定计算分析的准确性为目标，提出以“框架标准化、标准精细化、测试保真化、管理数字化、机制市场化”为核心的电力电子电源并网安全管理全链条路线。该路线通过技术标准化与管理协同化双轮驱动，既从源头规范设备控制特性，又全面提升仿真验证、运行监控与市场调节能力，为实现新型电力系统的安全稳定运行与高效经济调度，提供了系统、可行且具备落地条件的解决方案。

5.1 构建电力电子电源标准化并网控制框架及参数整定方法

由电网企业牵头，联合电源业主、设备制造商等行业力量制定一套针对不同系统强度的电力电子电源标准化并网控制框架和参数整定方法。该框架作为标准化功能模块与接口规范，引导并约束制造商的设计，覆盖测量滤波、锁相环、有功控制、无功电压控制、动态电压支撑、惯量响应、阻尼控制、故障穿越等关键模块，统一数据接口和通信规约。

可行性方面，技术上已有成熟国际实践，如前文提到的美国西部电力的第二代通用模型，通过建立公开的标准化模型框架，要求设备商将私有控制策略映射其中并完成一致性验证，实现了动态行为的深度标准化与可预测性，为国内实践提供了成熟的参考范例。国内主流逆变器普遍采用的“电流环—电压环—锁相环”等模块化结构，同样具备抽象为通用功能模块与接口的充分基础，国内外仿真平台亦支持此类模块化通用模型及参数映射。

5.2 修编国家标准细化并网要求

建议对现行国家标准(如《光伏发电站接入电力系统技术规定》^[35]等)中的强制性条款进行增强与细化，修改方向侧重于：明确故障穿越期间的控制目标与模式切换规则(含无功功率支撑策略的一致性要求、有功功率的响应要求)、对控制量变化率与

过渡过程设置量化边界以抑制二次扰动、提升暂态过流能力要求并将暂态过流能力及其持续时间转化为强制性指标以保障故障支撑能力、在主保护配合时段内不脱网等，从而提升故障期间的电压与频率支撑能力、减少不确定性并保障保护选择性与灵敏度。

5.3 构建以高保真仿真模型为核心的并网测试体系

首先优化单机测试方法，修订相关并网测试规程，对按照标准控制框架开发的机型，开展型式试验，同时充分考虑现场实际故障场景，比如强制采用能在机端直接施加短路故障的测试装置，替代缓慢调压的理想化方法，真实复现电压不平衡与谐波畸变等电磁暂态，为单机电磁暂态模型的参数辨识与行为校核提供数据。

其次，针对场站级测试，考虑场站现场短路试验在安全与成本上的限制，应制定明确的测试标准，允许以高保真电磁暂态仿真替代部分现场试验。标准需明确仿真与必要现场验证的测试内容与方法(如故障类型与参数、扰动组合、录波与数据质量要求、分析流程)，设定合格指标(如电压与频率偏差、无功与有功功率支撑能力、限流与恢复时序、模式切换平滑性、振荡衰减与稳定裕度等)，并规定模型交付范围、参数清单与一致性校核流程。

最后，依照既定标准开展场站级仿真验证，在并网审查中提交覆盖发电设备、动态无功功率补偿、汇集线路、场站主控与保护的精细化电磁暂态模型，按标准化故障与运行场景组织仿真，完成模型准确性、一致性与可复现性验证。在此基础上，建立机电暂态等值模型，用于潮流计算、暂态稳定分析与低频振荡评估，实现从电磁暂态到系统级仿真的模型贯通。

特别地，对于接入弱电网的大容量场站，在签订保密协议后，发电商应交付完全开放的白盒电磁模型，以便调度机构利用此模型开展详尽的接入系统方案研究，包括多工况下的系统安全稳定评估，如次/超同步振荡、谐波稳定等。

5.4 建设数字化监控与全生命周期管理平台

为实现对电力电子电源动态行为的实时高精度监控，建议在并网点及关键汇集点建设并接入同步相量测量装置或具备宽频量测能力的终端，并统一

数据接口和格式,在此基础上,建立“电力电子电源全生命周期并网管理平台”。一方面,实时测算并网点系统强度,根据强度整定并下发各场站并网参数;另一方面,利用人工智能算法在每次实际扰动或事故后自动提取场站响应录波数据,并与投产前的型式试验、出厂测试与并网测试结果进行多维量化比对,将并网管理由一次性“准入”转变为贯穿全寿命的常态化“过程”监督,及时识别因交流系统变化、软件升级、设备老化或参数变更导致的性能劣化,支撑精益化安全稳定管理。

5.5 完善电力市场机制与辅助服务补偿

建议依托电力电子电源技术能力提升,加快完善电力市场。在现有调频、调峰等辅助服务基础上,增设能够体现主动支撑能力的品种,如转动惯量、快速频率响应、动态无功功率支撑、黑启动、系统强度支撑、故障穿越支撑、阻尼控制等,并在线监测评估的实际响应效果(响应速度、调节精度、支撑强度)为依据实施“按效果付费”,实现优质优价,促使场站通过更高性能设备与先进控制形成“技术要求—市场回报—性能提升”的良性闭环。

6 结论

新型电力系统的安全稳定特性因高比例电力电子电源接入而发生深刻变化。电力电子电源与传统同步发电机在物理结构和控制机理上的本质差异,导致系统呈现多种稳定问题强耦合、动态行为不确定等新特征。现有并网安全管理模式在外特性管理、并网测试、仿真建模等方面存在不足,难以有效应对新的挑战。推动并网控制框架标准化和模型透明化,构建适应新型电力系统要求的并网安全管理体系,是保障系统安全稳定运行的必由途径。

建议试点开展电力电子电源并网控制框架标准化示范工程建设,通过实际运行检验成效,在此基础上修订并网标准,细化并网要求,构建以高保真仿真模型为核心的并网测试体系,建设数字化监控与全生命周期管理平台,完善电力市场机制与辅助服务补偿。

通过上述系统性的变革,将我国电力电子电源的并网安全管理从被动适应、事后应对的传统模式,提升到主动支撑、事前预防、全景透明的新阶段,支撑构建清洁、低碳、安全、高效的新型电力系统。

参考文献

- [1] MACILWAIN Colin. Energy: super grid [J]. Nature, 2010, 468(1): 624 - 625.
- [2] Department of Energy. Building a better grid initiative [EB/OL]. [2022 - 01 - 22]. <https://www.energy.gov/oe/articles/building-better-grid-initiative>.
- [3] 国家能源局. 2024年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2025 - 01 - 21]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [4] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. [2021 - 10 - 24]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021 - 10/26/content_5644984.htm.
- [5] 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.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461 - 475.
- [6] 董武, 张健, 周勤勇, 等. 中国电力系统安全稳定演化综述[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 115 - 127.
DONG Wu, ZHANG Jian, ZHOU Qinyong, et al. An overview of the evolution of security and stability of China's power system[J]. Electric Power, 2025, 58(1): 115 - 127.
- [7] FANG Jingyang, LI Hongchang, TANG Yi, et al. On the inertia of future more-electronics power systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2130 - 2146.
- [8] WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei, et al. An improved electromechanical oscillation-based inertia estimation method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2479 - 2482.
- [9] SHABESTARY Masoud M., MOHAMED Yasser Abdel-Rady I. Asymmetrical ride-through and grid support in converter-interfaced DG units under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1130 - 1141.
- [10] ZHANG Yang, TIAN Jiyang, JIA Ke, et al. System-level low-voltage ride-through control for the renewable power plant connecting to weak grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(8): 8007 - 8016.
- [11] WANG Xiongfei, BLAABJERG Frede. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858 - 2870.
- [12] 胡家兵, 朱建行, 郭泽仁, 等. 电力电子化电力系统多时间尺度时变动态小干扰稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7349 - 7361.
HU Jiabing, ZHU Jianhang, GUO Zeren, et al. Small-signal stability in power-electronized power systems considering multi-timescale time-varying dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7349 - 7361.
- [13] 国家能源局. 加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见[EB/OL]. [2023 - 09 - 21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6912028.htm.
- [14] 国家能源局. 《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》. [2024 - 07 - 25]. <https://www.gov.cn/zhengce/>

- zhengceku/202408/content_6966863.htm.
- [15] 国家发展改革委.《关于促进新能源消纳和调控的指导意见》. [2025 - 10 - 29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202511/content_7047707.htm.
- [16] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8.9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183 - 6191.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183 - 6191.
- [17] 王国春, 董量, 许涛, 等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9461 - 9470.
- WANG Guochun, DONG Yu, XU Tao, et al. Analysis and lessons of Brazil blackout event on August 15, 2023 [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9461 - 9470.
- [18] 郭琦, 王庆红, 谭伟涛, 等. “4.28”西班牙、葡萄牙大停电事故分析及对我国电网的启示[J]. 南方电网技术, 2025, 19(8): 1 - 10.
- GUO Qi, WANG Qinghong, TAN Weitao, et al. Analysis on blackout in Spanish and Portuguese power systems on April 28 th, 2025 and Its enlightenment to power system in China [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 1 - 10.
- [19] 舒印彪, 汤涌, 张正陵, 等. 欧洲伊比利亚半岛电网“4.28”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(17): 6603 - 6612.
- SHU Yinbiao, TANG Yong, ZHANG Zhengling, et al. Analysis and lessons of the April 28, 2025 blackout in the Iberian Peninsula power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(17): 6603 - 6612.
- [20] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019 [J]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [21] 胡家兵, 袁小明, 程时杰, 等. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457 - 5467, 5594.
- HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, et al. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457 - 5467, 5594.
- [22] TANG Wangqianyun, ZHENG Waisheng, ZHOU Baorong, et al. Transient stability analysis between grid-following DFIG-WT and grid-forming converter in electromechanical timescale [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(3): 2485 - 2495.
- [23] 袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1904 - 1917.
- YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904 - 1917.
- [24] PENG Qiao, JIANG Qin, YANG Yongheng, et al. On the stability of power electronics-dominated systems: challenges and potential solutions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 7657 - 7670.
- [25] CHENG Huijie, LI Chang, GHIAI Amer Mohammad Yusuf Mohammad, et al. Dynamic coupling mechanism analysis between voltage and frequency in virtual synchronous generator system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2365 - 2368.
- [26] LIAO Shuhan, CHEN Yandong, HUANG Meng, et al. Clustering-based modeling and interaction analysis of multiple differently parameterized grid-side inverters in PMSG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3031 - 3043.
- [27] 郭剑波, 于群, 贺庆. 电力系统复杂性理论初探 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [28] CHENG Yunzhi, FAN Lingling, ROSE Jonathan, et al. Real-world subsynchronous oscillation events in power grids with high penetrations of inverter-based resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 316 - 330.
- [29] AHMED Faraedoon, KEZ Dilar Al, MCLOONE Seán, et al. Dynamic grid stability in low carbon power systems with minimum inertia [J]. Renewable Energy, 2023, 210(1): 486 - 506.
- [30] LIAO Yicheng, WANG Xiongfei, WANG Xiao. Frequency-domain participation analysis for electronic power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 2531 - 2537.
- [31] ZHU Yue, GU Yunjie, LI Yitong, et al. Participation analysis in impedance models: the grey-box approach for power system stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 343 - 353.
- [32] POURBEIK Pouyan. WECC second generation wind turbine models: Specification of the second generation generic models for wind turbine generators [EB/OL]. [2014 - 01 - 23]. <https://www.wecc.biz/Reliability/WECC%20Second%20Generation%20Wind%20Turbine%20Models%20012314.pdf>.
- [33] AEMC National Electricity Rules. Schedule 5.2 conditions for connection of generators [EB/OL]. [2025 - 09 - 03]. <https://energy-rules.aemc.gov.au/ner/171/13994>.
- [34] CHMIELOWIEC Krzysztof, TOPOLSKI Łukasz, PISZCZEK Aleks, et al. Photovoltaic inverter profiles in relation to the European network code NC RFG and the requirements of polish distribution system operators [J]. Energies, 2021, 14(5): 1486 - 1509.
- [35] 国家市场监督管理总局. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2024.

收稿日期: 2025-11-07; 网络首发日期: 2025-12-02

作者简介:

樊丽娟(1984), 女, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为交直流混联电力系统安全稳定分析与控制、电力电子电源并网技术, fanlj03@163.com;

黄河(1972), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制;

梅勇(1980), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电网稳定分析与控制。