文章编号：1674-0629(2026)09-0037-17 中图分类号：TM712 文献标志码：A
DOI：10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2026.09.004

新型电力系统安全稳定运行挑战与实践

张建新[1,3]，左可[2]，刘宇明[2]，高琴[1]，付超[2]，李诗旸[2]
（1. 中国南方电网有限责任公司调度控制中心，广州 510663；2. 南方电网科学研究院，广州 510663；3. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京 100084）

摘要：新型电力系统安全稳定运行是支撑能源绿色低碳转型和保障电力可靠供应的重要基础。随着高比例新能源、电力电子装备、储能及分布式资源广泛接入，系统稳定的物理基础、动态机理、分析方法和控制体系均发生了深刻变化，传统安全稳定分析与控制模式已难以充分适应新的形势。围绕高比例新能源接入条件下新型电力系统安全稳定运行问题构建了“挑战分析-研究框架-工程实践”的总体论述逻辑。首先，从稳定物理基础、建模仿真分析和稳定控制适配3个方面梳理了高比例新能源接入条件下新型电力系统安全稳定运行面临的主要挑战。其次，提出了以坚强的物理基础、科学的系统运行管理和可靠的扰动防御3道防线为核心的安全稳定控制研究框架。然后，结合南方电网在网架优化、建模仿真、特性认知、智能分析计算、协同控制以及安全稳定控制市场机制与政策支持等方面的探索与实践，归纳了新型电力系统安全稳定控制体系的实现路径。最后，对在线自适应控制、全景感知与混合仿真、市场机制与协同支撑等发展方向进行了展望。

关键词：新型电力系统；安全稳定控制；高比例新能源；电力电子化；在线自适应防御

Challenges and Practices of Secure and Stable Operation in New Power System

ZHANG Jianxin[1,3], ZUO Ke[2], LIU Yuming[2], GAO Qin[1], FU Chao[2], LI Shiyang[2]
（1. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China）

Abstract: The secure and stable operation of new power systems is essential for supporting the green and low-carbon energy transition and ensuring reliable power supply. With the large-scale integration of high-penetration renewable energy, power-electronics-based equipment, energy storage, and distributed resources, the physical basis for maintaining power-system stability, dynamic mechanisms, analysis methods, and control paradigms have changed substantially. As a result, conventional security and stability analysis and control approaches are becoming difficult to fully adapt to the new situation. conditions. Focusing on the secure and stable operation of new power systems under high penetration renewable energy, this paper develops an overall review framework covering challenge analysis, research framework, and engineering practice. Firstly, the major challenges are summarized from three perspectives: the evolution of the physical basis for stability, modeling and simulation analysis, and the adaptability of stability control. Then, a security and stability control research framework is proposed, centered on a strong physical basis, scientific system operation management, and reliable three lines of defense against disturbances. Based on the explorations and practices of China Southern Power Grid in grid structure optimization, modeling and simulation, stability characteristic analysis, intelligent analysis and computation, coordinated control, and market mechanisms and policy support for security and stability control, the practical implementation path of the security and stability control system for new power systems is summarized. Finally, future development directions are prospected, including online adaptive control, panoramic perception and hybrid simulation, market mechanisms, and coordinated support.

Key words: new power system; security and stability control; high penetration renewable energy; power electronics; online adaptive defense

---

基金项目：智能电网国家科技重大专项资助项目(2024ZD0801200)。
Foundation item: Supported by the National Science and Technology Major Project for Smart Grid(2024ZD0801200).

0 引言

在“双碳”目标牵引下，我国正加快规划建设新型能源体系，推动构建以新能源为主体的新型电力系统[1]。随着风电、光伏、储能及分布式能源的大规模开发利用，电力系统正在由以同步机为主导的传统运行形态逐步演变为高比例电力电子装备并网、源网荷储多元主体广泛互动的新形态[2]。新型电力系统不仅是实现能源绿色低碳转型的重要载体，也使安全稳定运行问题呈现出更加复杂的机理特征，提出更高的控制要求。

近年来，南方电网新能源装机和发电量持续快速增长，新能源装机年均增长超过 30 %，统调新能源电量年均增长超过 20 %，新能源已逐步成为网内第一大电源和新增装机、新增电量的“双主体”；在春节等低负荷时段，系统新能源渗透率进一步升高，全网新能源最大电力渗透率已超过 50 %，局部省级电网甚至达到更高水平。新能源高比例接入在显著提升系统清洁低碳水平的同时也深刻改变了系统惯量分布、短路容量、动态无功功率支撑能力以及故障响应特性，使传统安全稳定理论、分析方法与控制模式面临新的适应性挑战[3]。

从稳定机理看，新型电力系统安全稳定问题已不再是传统问题的简单延伸，而是体现为物理基础、稳定机理、分析方法与控制体系的系统性重构。一方面，源网结构演变和新能源大规模接入削弱了系统惯量支撑、短路支撑和动态无功功率储备[4-5]，电力系统安全稳定的物理基础发生了深刻变化[6]；另一方面，新能源控制策略复杂、设备类型众多、接入位置分散，导致建模仿真、参数表征与校核难度显著增加[7]。与此同时，系统稳定问题也由传统频率稳定、电压稳定和功角稳定进一步扩展至变流器驱动稳定、谐振稳定等新风险形态[8]，多类型稳定问题相互耦合、相互影响，故障后的连锁反应更加复杂[3]。

除稳定机理演变外，海量运行场景和快速变化边界也使传统分析校核与稳控实施方式面临突出瓶颈。新型电力系统中，运行方式呈现显著的多维不确定性，离线计算、人工校核和经验匹配主导的安全稳定分析模式已难以满足系统性、准确性、时效性和适应性要求；传统稳控系统在资源组织、策略生成和在线适配方面也暴露出架构固化、灵活性不足等问题[9]。尤其在极端气象、源荷双侧波动增强以及运行边界快速变化[10]的背景下，如何实现从“离线保守型防御”向“在线精准型防御”的转变[11-12]已成为新型电力系统安全稳定控制研究和工程实践必须回答的关键问题。

在此背景下，围绕高比例新能源接入条件下新型电力系统安全稳定运行问题开展系统研究具有突出的理论价值和工程意义。一方面，安全稳定运行是新能源大规模并网和新型电力系统持续演进的前提条件，若缺乏对关键风险来源、稳定机理变化及控制体系适应性的系统认识，新能源高质量消纳和电网安全运行将面临显著约束。另一方面，高比例电力电子装备接入使传统以同步机为主导的稳定理论、分析方法和控制模式面临重构需求，亟需从结构基础、模型支撑、机理认知到控制实施等层面构建更具整体性的研究框架。与此同时，我国新能源渗透率持续提升，源网荷储协同关系复杂、交直流混联特征突出，其在安全稳定控制体系建设中的探索具有较强的代表性和实践参考价值，因此对相关挑战、研究框架及工程实践进行系统总结具有重要的现实意义。

基于上述认识，本文立足于高比例新能源接入条件下新型电力系统安全稳定运行问题构建了“挑战分析-研究框架-工程实践”的总体论述逻辑。首先，从稳定物理基础、建模仿真分析和稳定控制适配 3 个方面总结了高比例新能源接入条件下新型电力系统安全稳定运行面临的主要挑战。其次，提出了以坚强的物理基础、科学的系统运行管理和可靠的扰动防御 3 道防线为核心的安全稳定控制研究框架。然后，总结了南方电网在网架优化、建模仿真、特性认知、智能分析计算、协同控制以及安全稳定控制市场机制与政策支持等方面的探索与实践。最后，对新型电力系统安全稳定控制体系的发展方向进行了讨论与展望。

1 新型电力系统安全稳定运行面临的主要挑战

在高比例新能源接入背景下，电力系统安全稳定运行的约束条件、风险来源与防御需求均发生深刻变化。传统同步机主导系统中相对清晰、相对独立的安全稳定问题正在演变为源网荷储多元耦合条件下的系统性问题。其变化集中体现在 3 个方面：

一是高比例电力电子装备接入削弱了系统惯量支撑、短路支撑和动态无功功率支撑，安全稳定运行的物理基础发生重构；二是新能源控制策略复杂、接入层级多样、运行场景海量增长，使建模仿真、参数校核和分析计算难度显著增加；三是传统稳定控制体系在资源组织、策略生成和在线适配方面面临新的压力，难以完全适应运行边界快速变化和多元资源广泛接入的新形势。基于此，本节从稳定物理基础、建模仿真分析和稳定控制适配3个方面对新型电力系统安全稳定运行面临的主要挑战进行梳理。

1.1　稳定物理基础与风险形态演化

随着风电、光伏、储能及分布式电源的大规模接入，电力系统电源结构和网络形态正在发生显著变化。新能源逐步由补充性电源转变为主体性电源，传统由同步机提供主要支撑的运行格局逐渐被打破；同时，新能源多通过电力电子设备接入中低压电网，接入位置分散、并网层级下移，并与大规模交直流输电相互耦合，使系统源网关系更加复杂。

传统电力系统的安全稳定运行较大程度上依赖同步机提供的转动惯量、短路电流支撑和动态无功功率支撑。随着同步电源占比下降、新能源占比持续提升，系统惯量水平、短路容量和电压支撑能力均呈减弱趋势，电网抵御扰动的物理基础被削弱[13]。在新能源高渗透率运行场景下系统频率变化更快，电压支撑更弱，故障后的恢复能力下降，安全稳定裕度相应收缩。新能源接入位置、网架强度、开机方式和潮流分布对系统稳定水平的影响也更加突出，相同新能源渗透率下不同网架条件和电源组合方式可能对应完全不同的稳定结果。这表明新型电力系统安全稳定问题并非单一控制问题，而是源网结构演变引起的物理基础重构问题。

在物理基础演化的同时系统稳定风险形态也呈现出扩展和交织特征。传统电力系统中安全稳定分析主要围绕频率稳定、电压稳定和功角稳定展开；在高比例新能源和电力电子装备广泛接入后，变流器驱动稳定、谐振稳定等新类型问题逐渐显现，系统稳定边界不再仅由同步机功角、电压幅值和频率偏差决定，还受到变流器控制策略、并网强度、限流逻辑、故障穿越及恢复过程等因素影响。

从空间分布看，南方电网新型稳定风险在高比例新能源送端、受端负荷密集区域及局部新能源汇集区呈现差异化特征。送端云南与主网异步互联，新能源占比较高、系统惯量水平相对较低，频率稳定和新能源动态响应对送出通道故障更为敏感；水风光互补送出场景下，送出通道故障后的暂态稳定分析必须考虑新能源故障穿越控制特性及其与同步机组的耦合影响。2023年8月15日，云南某地区一回110 kV线路跳闸后，备自投动作将约10 MW负荷倒由220 kV某光伏电站片区供电，导致逆变器累计33次反复进出从而发生低电压穿越，光伏电站有功功率在0～220 MW之间反复波动，并引起云南某主力电厂对主网功率振荡，振幅约130 MW、振荡频率约0.63 Hz，持续73 s后部分新能源脱网，振荡平息。该事件表明，在弱支撑和高新能源渗透场景下，局部变流器控制及穿越恢复过程可能通过有功功率波动与同步机电气耦合，诱发区域性低频振荡和连锁脱网风险。

受端及沿海新能源汇集区则更多表现为电压稳定、短路电流约束风险交织。一方面，负荷密集地区为提升电压支撑能力，需要加强动态无功功率补偿和厂站间电气联系；另一方面，为限制短路电流又可能需要停运线路、配置串抗或增大厂站间电气距离，二者在运行安排上存在一定矛盾。此外，局部新能源汇集站内大量变流器、静止无功发生器（static var generator，SVG）及电缆网络相互作用，易在特定运行方式或调试阶段暴露谐振稳定风险。2023年9月12日，广东某500 kV海风场陆上站调试期间，500 kV母线电压和SVG换流阀中电容电压均出现明显振荡，振荡频率约15 Hz，且振荡幅值逐渐增大，最终电容电压达到过压保护定值并跳闸。该事件说明，谐振稳定问题往往具有较强的局部性和设备控制相关性，但其影响可能通过电压扰动和保护动作向场站及近区电网扩展。

从时间尺度看，上述新型稳定风险既可能发生在故障穿越期间，也可能发生在故障清除后的控制恢复阶段，还可能在设备调试、运行方式调整期间或弱网运行条件下逐步暴露之后。其动态表现既包括机电耦合振荡，也包括更高频段的宽频振荡，体现出多时间尺度并存特征。如图1所示，春节方式下云南省90 %新能源并网点多场站短路比（multiple renewable energy stations short circuit ratio，MRSCR）低于2，电压支撑能力不足，存在宽频振

荡和谐振风险。随着源荷两侧电力电子化程度提高，局部场站控制异常、低电压穿越反复动作、电压支撑不足和广域功率振荡之间的耦合更加紧密，原本局限于局部场站或局部网络的动态异常，可能通过功率波动、电压扰动或控制相互作用扩展至更大范围，增加系统连锁失稳风险。

不同稳定问题之间的边界趋于模糊。新能源并网后的动态响应不再完全服从同步机主导下的传统机电暂态规律，而更多受到控制策略、并网强度和局部网络条件影响。同一扰动下，系统可能同时表现出频率波动、电压跌落、功角摆动以及宽频振荡等多重响应[3,14]，不同类型稳定问题相互诱发、相互放大，使故障后的演化路径更加复杂。

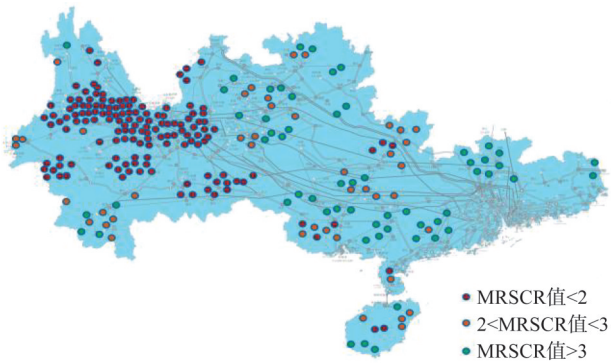


图 1　春节方式下南方电网多场站存在宽频谐振风险示意图

Fig. 1　Schematic diagram of wide-frequency resonance risks at multiple plants in China Southern Power Grid under the spring festival operating mode

由此可见，新型电力系统安全稳定问题已由单一主导机制下的分类分析问题转变为多时间尺度、多空间尺度和多控制环节共同作用下的综合性问题。如何在高比例新能源条件下重塑惯量支撑、电压支撑和抗扰动能力，并准确识别不同稳定问题之间的耦合关系，是新型电力系统安全稳定运行面临的基础性挑战。

1.2　建模仿真复杂化与分析校核困境

与传统同步机相比，新能源发电设备的控制结构更加复杂，设备类型、厂商型号及软件版本差异显著，导致其涉网特性呈现明显的多样性和差异性。风电、光伏等新能源机组大多通过变流器并网，其控制逻辑涉及锁相环、电流内外环、无功功率控制、故障穿越控制等多个环节，动态响应特性与并网点强度、控制参数整定和运行工况密切相关。这使得新能源设备难以像传统同步机那样采用相对统一、成熟的模型进行描述。

新能源设备控制策略开放程度有限，部分关键控制逻辑和参数具有较强的厂商封闭性，实际工程中往往只能基于外特性开展模型拟合和等值表征，模型精度易受试验条件、参数完整性和设备一致性影响。对于大规模集中式新能源场站，需要解决单机模型向场站模型、场站模型向区域聚合模型的等值问题；对于分布式新能源，还面临接入层级多、资源分散、运行状态多变等困难。若模型参数失真或关键控制特性刻画不足，仿真结果与实际运行之间的偏差将被放大，进而影响对系统稳定特性和控制需求的判断。因此，如何建立兼顾精度、可用性与可维护性的涉网模型体系已成为新型电力系统安全稳定分析的重要基础问题。

除模型复杂化外，海量运行场景也显著增加了分析校核难度。新能源出力、负荷水平、水电来水过程、储能状态、交直流运行方式以及市场交易结果等因素相互叠加，使系统运行方式呈现出更强的时变性、随机性和复杂性。如图 2 所示，全年不同日期、不同时段下系统负荷、新能源出力及水电出力呈现明显差异：春节等低负荷时段可能出现新能源集中大发，汛前水电出力相对较低，夏季负荷尖峰与水电大发相互交织，晚高峰又可能面临新能源出力下降等典型场景。由此可见，与传统电力系统相比，新型电力系统安全稳定分析已不再面对数量有限、边界相对清晰的典型方式，而需要在全年连续变化的海量运行组合中识别潜在风险场景，分析对象和校核范围均显著扩大[11]。

在这一背景下，传统依赖少量典型方式、预想故障集和人工经验筛选的分析校核模式已难以满足新型电力系统安全运行需求。运行方式数量快速增长，故障后系统响应对源网荷储组合更加敏感，有限场景下得到的结论难以全面反映系统稳定特性；同时，现有分析流程在基础数据处理、场景生成、仿真计算和结果筛选等环节仍存在较强的人工依赖，分析效率和规范性受到制约。新型电力系统安全稳定校核还需要考虑多类安全稳定控制逻辑及动作过程，这对基础模型完整性和分析工具能力提出了更高要求。若分析场景覆盖不足、模型表达不完整或校核流程不够高效，均可能出现风险识别不充分、稳定裕度判断不准确等问题[15]。因此，面向海

量运行场景建立高效、系统、可信的安全稳定分析校核方法是新型电力系统安全稳定运行面临的关键挑战。

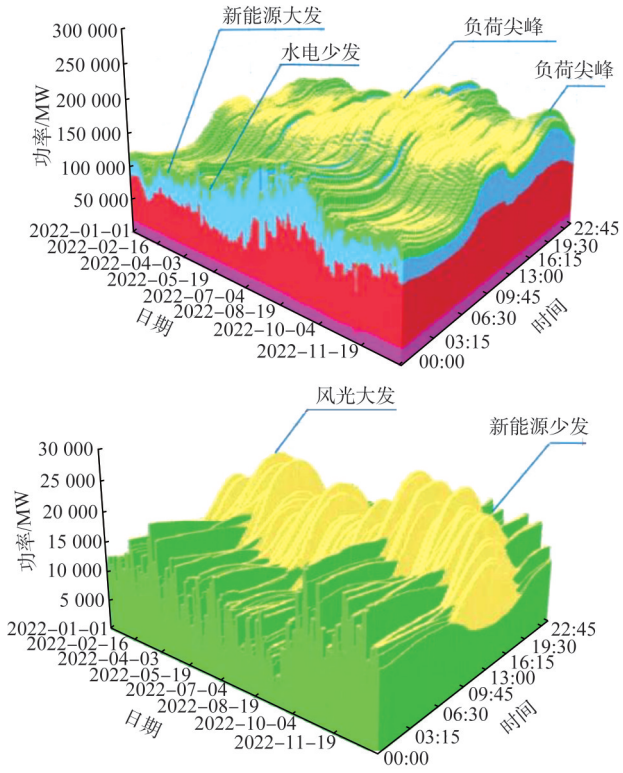


图2　新型电力系统全年典型运行方式变化示意图

Fig. 2　Schematic diagram of annual typical operating mode variations in new power system

1.3　稳定控制资源组织与防御策略适配瓶颈

随着新能源、储能及可调负荷等新型资源大量接入，电力系统稳定控制对象由传统的少量集中式机组逐步扩展为类型多样、分布广泛、响应特性差异明显的多元资源集合。与之相比，传统安全稳定控制体系主要围绕常规电源和固定网架条件构建，在控制资源接入方式、组织模式和调用机制等方面已难以适应新型电力系统对灵活性和精细化的要求。

如图3所示，现有稳控资源配置仍较多依赖预先整定的控制对象和固定策略。面对新能源高渗透率、运行方式快速变化等新场景，容易出现可用控制资源不足、控制对象匹配不优或控制代价偏高等问题。传统稳控系统长期采用离线分析、人工整定和现场调整相结合的工作模式，策略制定周期较长，对装置状态变化和实时运行方式变化的响应能力有限，存在策略与实际运行场景适配性不足的风险。

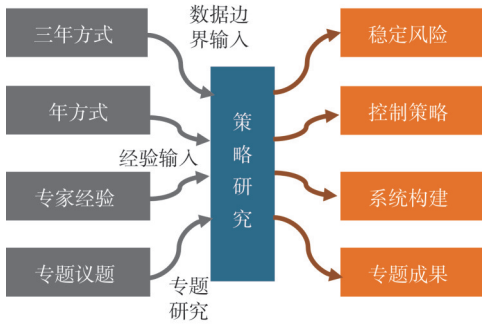


图3　稳定控制策略制定流程

Fig. 3　Formulation process of stability control strategies

新型控制资源虽然数量庞大、调节速度快，但广域汇集、分层协调和统一调用仍面临接口不统一、组织复杂和控制耦合增强等现实困难。新能源、储能、可调负荷和虚拟电厂等资源的动态特性、可控能力和响应约束存在较大差异，若缺乏统一的资源表征、状态感知和协同控制机制，就难以将其有效转化为可用于系统安全稳定防御的控制能力。在稳定控制策略所调控资源配置不合理的情况下会出现图4所示的切量不足等问题。

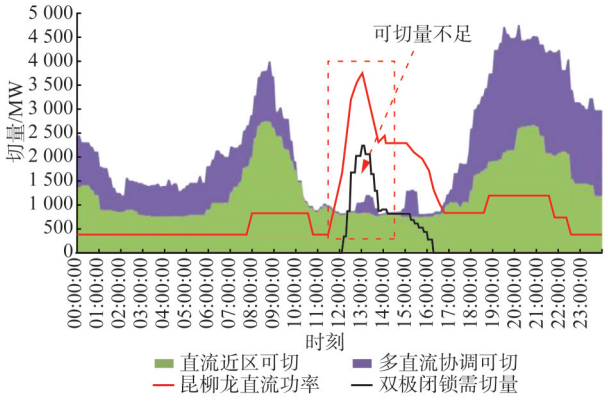


图4　新能源高渗透场景下传统稳控切机资源不足示例

Fig. 4　Example of insufficient generator tripping resources in traditional stability control under high renewable penetration scenarios

因此，新型电力系统稳定控制问题已经不只是“是否具备控制资源”的问题，更是“如何高效组织资源、如何准确生成策略、如何实现精准适配”的问题。面向新型电力系统的稳定控制体系，需要突破传统固定对象、固定策略和离线整定模式的约束，提升多元控制资源的标准化接入、集群化组织和在线化调用能力；同时，需要增强控制策略对实

时运行方式、设备状态和运行边界变化的感知与适配能力，推动安全稳定防御由离线保守型防御向在线精准型防御转变。

2 面向新型电力系统的安全稳定控制研究框架

针对前述挑战，传统以离线分析校核和固定策略为主的安全稳定控制思路，已难以适应高比例新能源接入条件下系统结构深刻演变、动态特性显著变化及安全防御高可靠需求提升的新形势。因此，有必要面向新型电力系统运行特征，构建更加系统化、层次化的安全稳定控制研究框架。结合新型电力系统安全稳定控制体系的总体要求，本文将该框架概括为3个相互衔接的层面，即坚强的物理基础、科学的系统运行管理和可靠的扰动防御3道防线。其中，坚强的物理基础是保障系统安全稳定运行的前提，科学的系统运行管理是实现运行状态认知、稳定特性分析与安全校核的关键支撑，可靠的扰动防御3道防线则是应对扰动冲击、防止风险扩展和保障系统安全的重要机制。三者相互联系、相互支撑，共同构成面向新型电力系统的安全稳定控制研究框架，并为后续工程实践分析提供总体思路。

1）坚强的物理基础。新型电力系统安全稳定运行首先建立在坚实的物理基础之上。随着源网结构持续演变，高比例新能源和电力电子装备广泛接入，传统依赖同步机提供惯量支撑、电压支撑和短路支撑的运行基础正在发生深刻变化。因此，安全稳定控制研究需要从源网结构整体出发，统筹考虑交直流协调发展的电网结构、科学合理的电源结构以及关键设备与元件的支撑能力，探索适应高比例新能源接入条件的稳定基础重塑路径。其关键不在于单一环节支撑能力的局部提升，而在于通过网架优化、源网协调和构网能力增强，提升系统整体惯量支撑、电压支撑和抗扰动能力，形成与新型电力系统运行特征相适应的安全稳定基础。

2）科学的系统运行管理。在物理基础之上，安全稳定控制的有效实施还依赖于科学的系统运行管理。面对新能源涉网模型复杂、关键参数不确定、多类型稳定问题耦合以及海量运行场景下分析校核难度显著增加等新特征，有必要围绕运行方式安排、调节能力配置和源网荷储协调关系，构建覆盖模型支撑、机理认知、边界分析和智能校核的系统运行管理体系。其核心在于通过高保真模型构建、关键参数校核和多场景分析提高对系统运行状态、稳定特性和潜在风险的认知能力；同时结合智能计算、场景生成和在线校核等技术手段，增强对海量运行方式的分析效率和决策支撑能力，推动安全稳定分析由传统离线、经验主导模式向机理与数据协同驱动模式转变。

3）可靠的扰动防御三道防线。在复杂扰动条件下，仅依靠物理基础和运行管理仍不足以全面保障系统安全稳定，还需要构建可靠的扰动防御体系。面向稳定控制资源配置约束、策略适配能力不足以及运行边界快速变化下防御响应滞后等问题，安全稳定控制研究应以预防性控制、继电保护以及稳定控制与防崩溃控制3道防线为主线，系统研究多元控制资源组织、控制策略动态生成、装置定值适应性校核以及在线自适应防御等关键问题。其重点在于推动安全稳定防御由传统固定对象、固定策略和离线整定模式，逐步向海量异构资源可调、控制策略可更新、运行边界可感知的闭环防御模式演进，从而提高系统在单一故障、严重故障乃至多重扰动条件下的综合防御能力。

综上所述，本文提出的3层安全稳定控制研究框架是面向高比例新能源和高比例电力电子化特征，对资源对象、执行手段和机理逻辑进行拓展。其一，物理基础不再仅依赖同步机惯量、短路容量和常规动态无功功率支撑，而是需要通过主网架优化、合理分区与柔性互联降低大范围强耦合运行风险，并利用新能源和电力电子装备主动建立电压和频率支撑，提供等效惯量、阻尼和动态无功功率支撑；故障期间，新能源变流器也可通过自适应虚拟阻抗[16]、改进型虚拟振荡控制[17]、有功-无功功率联合控制与自适应下垂控制等[18-19]增强系统第一层物理支撑能力。其二，系统运行管理不再主要依赖少量典型方式和离线人工校核，而是需要面向海量运行方式，结合高保真涉网模型、稳定边界刻画、智能场景生成和在线校核，提高对运行状态和稳定裕度的实时认知能力；其中，高保真模型应重点刻画限流、模式切换和等约束[20-21]，智能场景筛选和在线分析则用于提升临界风险识别和策略校核效率[22]。其三，扰动防御不再局限于三道防线，而是需要充分利用新能源、储能、柔性负荷等资源的快

速可控特性[23]，通过标准化接口、分区集群主/子站架构和策略在线适应性校核将分散资源汇集为可观、可测、可控的稳定控制资源池[24]。

总体来看，面向新型电力系统的安全稳定控制研究不再是对传统分析方法和控制手段的局部修正，而是围绕物理基础、运行管理和扰动防御3个层面展开的系统性重构。其中，坚强的物理基础是安全稳定运行的前提，科学的系统运行管理是风险识别与分析决策的支撑，可靠的扰动防御三道防线是应对扰动冲击和防止风险扩展的保障。其中，坚强的物理基础是安全稳定运行的前提，科学的系统运行管理是风险识别与分析决策的支撑，可靠的扰动防御三道防线是应对扰动冲击和防止风险扩展的保障。三者相互衔接、协同作用，共同构成从稳定支撑、运行认知到控制实施和动态适应的完整链条。为使前述挑战、研究框架与后续工程实践之间的对应关系更加清晰，本文将其归纳如表1所示。

表1　新型电力系统安全稳定运行的挑战、框架与实践

Tab. 1　Challenges, framework and practices for secure and stable operation of new power systems

主要挑战	研究框架	实践探索
稳定支撑弱化与新型风险显现	坚强的物理基础；稳定特性认知	网架优化与物理基础重塑；频率安全域和局部稳定特性分析
模型复杂与海量场景校核困难	科学的系统运行管理	新能源建模与参数校核；智能分析计算与在线校核
控制资源分散与策略适配不足	可靠的扰动防御三道防线	新能源快调；多元资源聚合；稳控在线监测与市场机制支撑

3　新型电力系统安全稳定控制探索与实践

本节围绕前述安全稳定运行挑战及研究框架，结合南方电网的典型工程实践，按照“物理基础重塑-建模仿真支撑-稳定特性认知-智能分析校核-协同控制实施-体制机制保障”逻辑主线，说明相关技术在高比例新能源接入电网中的实施路径与应用成效。

3.1　网架优化与稳定物理基础重塑

针对高比例新能源接入和大规模交直流混联运行背景下系统惯量支撑、短路支撑及动态无功功率支撑能力减弱，跨区潮流组织与安全稳定约束日益复杂，电网安全稳定运行物理基础面临弱化等问题[25-26]，工程实践中通过持续优化主网架结构不断增强新型电力系统安全稳定运行的物理支撑能力[27-31]。相关研究也从优化构网换流站的选址[32]、柔直换流站跨区功率转移[33]、构建直流外送能力优化提升模型[34]等方面，为网架优化和输电能力提升提供了方法支撑。

依托西电东送持续升级与跨省区主网协调发展，南方电网逐步形成了适应大规模电力跨区配置和高比例新能源接入的主网架格局[35]。相关实践由天生桥二级水电站送出工程起步，历经交直流并联、云南异步联网、广东目标网架等阶段，逐步发展形成“八交十一直”西电东送大通道及较强受端网络；按照“十五五”跨省区主网架规划，未来将进一步形成“八交十七直”的主网架格局，输电规模由58 GW提升至110 GW。

在上述主网架持续演进过程中，云南异步联网和广东目标网架等典型结构优化措施发挥了重要作用[36-38]。异步联网不仅使得云南对贵州、云南对广东的振荡模式消失，南方电网主网系统稳定性显著提高，而且有效改善了电网结构，降低电网大面积停电风险，增强大电网事故可控性。世界首个柔性直流与常规直流混合并联运行的鲁西换流站攻克柔性直流运维技术难关，全年零跳闸、零非停，2024年度送电总量为7 509 GWh，能量可用率达到99.17 %，在背靠背直流输电系统主要可靠性指标中排名第一。同时，云南电网西电东送能力也大幅提高，有效解决云南境内水电送出通道“卡脖子”问题，促进云南的优质水电在广东、广西的消纳，为节能减排、减少化石能源消费和碳排放作出应有的贡献；后者则降低了珠三角强耦合电网中交直流相互影响及大面积停电风险，工程从根本上化解了广东电网大面积停电、短路电流超标、多直流落点风险等3大风险，显著提升了广东电网的电力供应和配置能力，在故障情况下可以在不到0.1 s的时间里快速进行功率支援，大幅提高粤港澳大湾区电网的安全稳定水平，标志着长期困扰广东电网运行的短路电流超标、交直流相互影响、大面积停电风险3大问题得到有效解决。广东省东西部电力互济能力由4 GW提升至10 GW，广东省电力供应能力升

至 300 GW，是原来的两倍以上，同时，粤港澳大湾区供电能力提升 80 %，有力地保障了广东经济社会发展的用电需求，支撑广东经济发展走在全国前列，背靠背近区 500 kV 站点短路电流均未超过 61 kA，三相短路导致 6 回及以上直流同时换相失败的站点数量由工程实施前的 31 个减少至 17 个，降幅 45 %；导致 9 回及以上直流同时换相失败的站点数量由 1 个减少至 0，彻底消除了多直流连锁换相失败的极端风险。上述相关实践表明合理的主网架分层分区与交直流协调布局是增强新型电力系统稳定物理基础的重要工程手段。

3.2 新能源建模仿真与参数校核实践

针对新能源设备类型多、控制策略复杂、运行工况差异大，导致涉网模型构建、仿真分析与参数校核难度增加等问题[39-40]，工程实践中围绕检测验证、暂态建模和定值规范化管理等环节，逐步形成新能源涉网模型构建与参数校核的技术路径，以提高新能源并网特性分析与安全稳定校核的准确性。相关研究提出了一种基于阻抗参数自适应的大规模风电场等值建模方法，为大规模新能源场站高效建模提供了方法支撑[41]。

在集中式新能源方面，目前按变流器型号和软件版本开展故障穿越、电网适应性、仿真建模等检测验证，半实物仿真中重点开展阻抗特性扫描和短路比适应性等内容，具体测试中，故障穿越能力测试重点校核不同工况下新能源设备的故障穿越能力及有功、无功功率特性是否满足技术要求；相角突变适应性测试要求光伏逆变器、风机和 SVG 等设备在机端电压相角突变 0 ~ 120 °范围内不脱网；谐波适应性测试重点评估截止频率范围内谐波扰动是否会导致设备反复进入故障穿越或保护误动；阻抗扫描测试扫频范围覆盖 1 ~ 3 000 Hz，除 40 ~ 60 Hz 工频邻域外，阻抗角不宜超过 90 °，以识别弱网条件下潜在的负阻尼和宽频振荡风险[42]；同时，针对重点厂站开展新能源涉网安全定值整定，并通过定值进行规范化管理，主要包括频率电压保护定值和故障穿越定值等[27,43]。并网性能检测严格按照系统稳定需要实施，除开展基于硬件在环的半实物仿真检测外还在云南、贵州等省区开展故障穿越和电网适应性的现场实测。如图 5 所示，围绕电气仿真模型评价，进一步开展高/低电压穿越试验、一次调频及惯量响应试验、电网适应性试验、自动发电量控制（automatic generation control，AGC）/自动电压控制（automatic voltage control，AVC）试验、SVG 并网性能试验和电能质量测试。在建模方面，机电暂态模型单机数据源采用现场实测、半实物仿真和型式试验测试“三选一”原则，全站模型采用基于阻抗特性的倍乘或分区等值方法。



图 5 新能源并网性能检测与电气仿真模型评价内容

Fig. 5 Grid-connection performance tests and electrical simulation model evaluation for renewable energy

在分布式新能源方面，为适应中低压分布式资源快速增长带来的建模需求[44]，进一步开展了中、低压分布式新能源控制器典型机型的抽样检测与聚合等值建模，系统梳理了 220 kV 厂站各电压等级分布式新能源容量信息，并在仿真数据中完成了分布式新能源模型搭建。为兼顾计算收敛性与工程可用性，采用综合负荷模型思想提出了 110 kV 及以下网络建模方法，覆盖 110 kV 新能源和常规电源以及 35 kV 及以下分布式新能源。相关模型在故障过程中的响应与详细网络模型保持一致，并能够反映低压网络阻抗特性对暂态过程的影响，为新能源高渗透率条件下的专题分析和安全稳定计算提供了基础支撑。

3.3 安全稳定特性认知与边界刻画实践

针对新能源高渗透率下系统频率响应特性和局部稳定机理发生显著变化、稳定边界呈现动态演化特征等问题，工程实践中围绕高渗透率频率特性和新能源参与下局部稳定特性开展分析研究，逐步形成了面向新型电力系统的安全稳定特性认知与边界刻画方法，为稳定分析和控制策略制定提供支撑[44-46]。

为加深对高渗透率频率特性的认识，从频率稳定机理入手，推导了新能源高渗透率系统频率响应

模型，提出了如图 6 所示考虑“三大指标+五大因素”的多维度运行空间暂态频率安全域构建方法，其中，三大频率安全指标可从最大频率变化率、暂态频率最大偏差和一次调频稳定裕度等方面表征系统频率安全水平；五大影响因素主要包括扰动功率、系统惯量、负荷调频能力、直流频率限制控制（frequency limit control，FLC）容量和一次调频能力。新能源渗透率则主要通过改变系统等效惯量和一次调频参与能力，进而影响频率响应过程。建立了频率安全指标体系，规范了如图 7 所示的新能源高渗透电网频率安全稳定分析范式，并开发了频率安全域自动计算软件，实现了海量运行方式场景下频率安全的量化分析，为实际系统安全运行提供了可靠决策支撑。

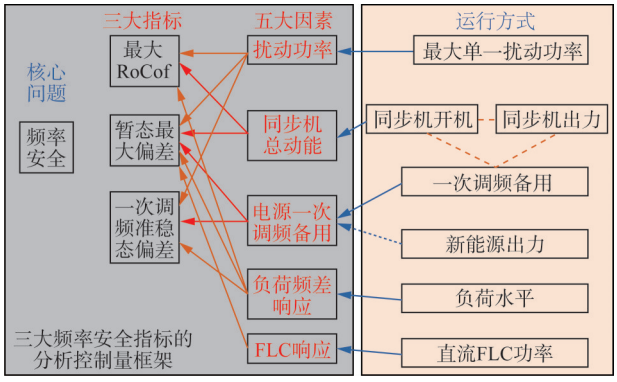


图 6　三大频率安全指标的五大影响因素

Fig. 6　Five critical factors affecting three frequency security indices

在局部稳定特性方面，围绕新能源与常规火电、水电打捆送出的典型场景，分析了新能源渗透率变化及故障穿越控制特性对局部稳定性的影响。在常规机组出力不变条件下，新能源出力增加会使故障后加速面积及所需减速面积增大，导致同步机组功角及近区电压摆动幅度增加，更易诱发功角失稳，并使新能源更易进入低电压穿越；而在送出断面不变、由新能源逐步替代同步机的场景下，随着功角主导作用减弱，渗透率提升后功角稳定特性改善，表现为功角稳定极限提升；但需要注意极高渗透率下新能源弱支撑导致的运行风险。进一步地，新能源故障穿越控制特性通过影响穿越过程中的有功、无功功率动态输出而作用于局部稳定性：故障期间暂态有功功率控制跌落越深、暂态无功功率支撑能力越强，则等效加速面积越小，功角稳定性越好；故障后退出低穿时有功功率恢复速率越慢，则等效减速面积越大，功角稳定性越好，以凰龙 N−2 稳定计算为例，优化新能源暂态穿越控制、增强故障期间无功功率支撑并适当放缓故障后有功功率恢复，可提升局部区域送出稳定特性，部分场景下断面稳定极限提升最大接近 400 MW。基于上述认识，针对未建模或参数不完善的情况形成了一套新能源典型模型参数，用于充分暴露新能源对局部稳定性的影响，并支撑粤西风火打捆送出等场景下的稳定计算和稳控定值整定。

3.4　智能分析计算与在线校核体系建设

针对海量运行场景下高维不确定性突出、离线分析适应性不足、人工校核周期长、控制代价偏高以及控制策略在线适配能力不足等问题，工程实践从在线分析平台建设、短路电流智能决策、稳控场景自动生成和策略在线校核等方面开展体系化探索，推动安全稳定分析由离线计算向在线评估转

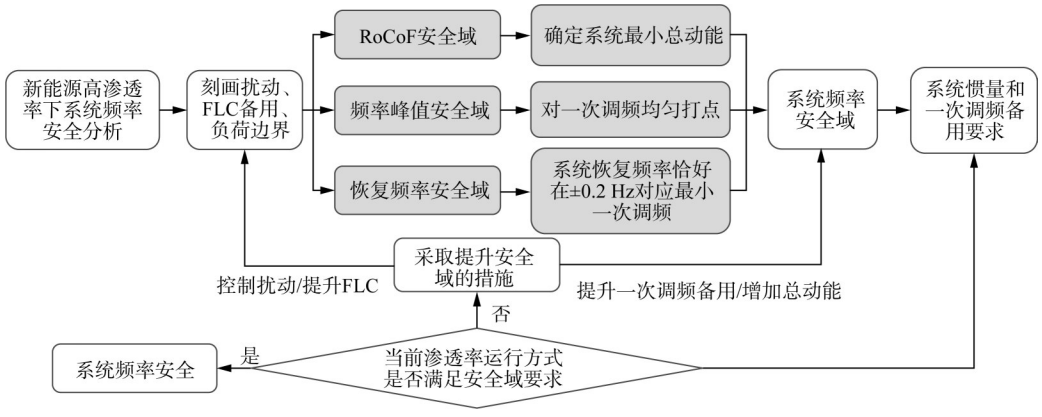


图 7　新能源高渗透电网频率安全稳定分析范式

Fig. 7　Frequency security analysis paradigm for power grids with high renewable penetration

变，提高运行方式安全性的实时评估、风险识别和辅助决策能力。

依托图 8 所示的在线安全稳定分析计算平台，持续优化机电暂态、电磁暂态及稳控校核等多类型仿真工具，提升系统安全日前校核能力；同时推进电力仿真软件云化部署与计算加速，开展海量仿真结果智能分析技术研究，推动安全稳定计算分析模式由“人工、离线”向“智能、在线”转变[47-49]。该平台已部署于调度云和科研云，可支撑调度机构及科研人员开展多类型分析业务，显著提升计算资源供给能力与业务支撑能力。

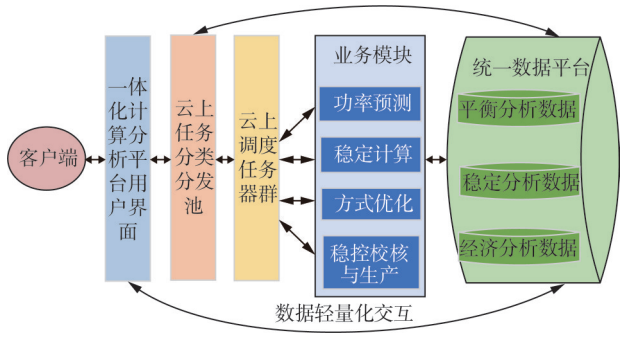


图 8 安全稳定智能一体化计算分析平台架构示意

Fig. 8 Integrated intelligent platform for security and stability analysis

针对短路电流约束下运行方式优化与安全校核需求[50]，形成了如图 9 所示的限制短路电流运行方式智能决策闭环控制系统[51]，实现了日前计划校核、日内实时监视、未来趋势预测及历史数据反演等多时间尺度的短路电流分析与管控，为运行方式优化和短路电流风险防控提供了技术支撑。

针对稳控分析中运行场景数量庞大、稳定边界识别效率低、全量时域仿真计算代价高等问题，提出了如图 10 所示的稳控分析场景集智能自动生成方法。该方法以多维运行参数表征系统运行状态，综合电源出力、负荷水平、关键断面潮流、直流输送功率、新能源渗透率及预想故障类型等因素，构建了覆盖典型运行方式与潜在风险区域的候选场景集。在候选场景生成阶段，引入基于领域先验知识的智能初始排序机制，依据关键稳定影响因素及历史仿真经验，对不同场景的稳定指标进行快速预估，优先选取稳定裕度较低、失稳风险较高的场景开展了时域仿真。在样本迭代阶段，以支持向量机（support vector machines，SVM）为核心建立场景集

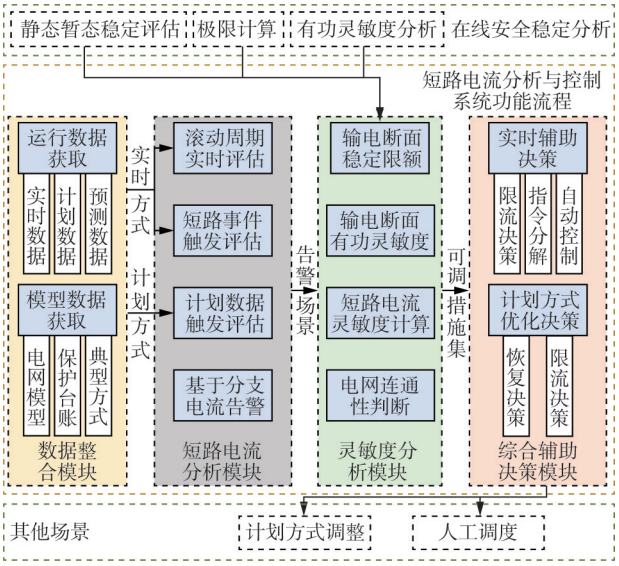


图 9 短路电流在线分析和优化决策系统功能架构

Fig. 9 Functional architecture of the online short-circuit current analysis and optimal decision-making system

与仿真顺序动态优化方法，将已仿真样本作为训练数据，构建运行特征与稳定状态之间的分类映射，判别未仿真场景的稳定类别及其边界邻近程度。伴随仿真样本逐步更新，分类模型持续修正场景筛选结果，引导后续样本向稳定边界附近聚集，避免对全部场景节点进行网格化遍历。通过“先验排序-重点仿真-边界分类-动态更新-自动筛选”的闭环过程，可在有限仿真规模下逼近系统稳定边界，形成覆盖关键风险区域的有效场景集，为在线校核与控制策略优化提供场景支撑。从应用效果看，以直流送出稳定分析场景智能构建为例，基于场景海量计算可发现传统典型方式计算中未充分暴露的稳定风险，提高了稳定边界附近关键风险场景的识别能力。在方式生成效率方面，人工进行单个方式潮流调整约需 300 s，智能模型调整耗时约 14 s，智能场景生成软件可使方式生成效率提升约 20 倍。

基于在线分析平台、智能场景生成及多类型仿真工具的支撑，进一步面向复杂运行场景下稳控策略适应性问题，开展了多场景稳控策略运行状态监视及校核技术研究，研发了稳定控制系统全景监测预警和在线决策系统。该系统基于电网实时数据、装置运行状态、运行方式信息及策略模型等在线数据，动态校核稳定控制策略的有效性，识别策略失配、控制量不足及装置异常等潜在风险，并生成策略失效后的辅助决策优化信息。从流程效率看，传

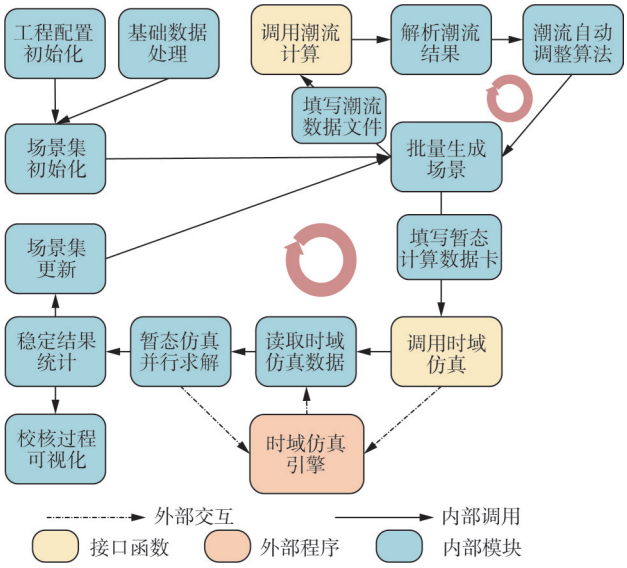


图 10　基于自主化软件的场景构建方法

Fig. 10　Scenario construction method based on indigenous software

统策略适应性决策通常需要安自计算人员开展离线核算、调度台下达调整指令并由现场配合执行，整体耗时约 3 ~ 5 h；而基于全景在线仿真与预警决策流程，可将典型场景下的策略校核、风险预警和辅助决策时间压缩至 15 ~ 30 min，提高了稳控策略在线适应性处置效率。针对典型复杂场景，可进一步开展精细化模拟下的稳定控制策略在线“机电-电磁”混合仿真与决策支撑，提升稳控策略在线适应性校核、风险预警和辅助决策能力。

3.5　协同控制体系与多元资源聚合实践

针对新型电力系统中稳定控制资源分散接入、资源体量大、接口类型多、组织协调困难，传统稳控体系对海量电力电子资源纳控能力不足等问题[52-57]，工程实践围绕新能源快速可调资源利用、海量异构资源标准化汇集和多区域集群资源广域协同控制等方面开展探索，逐步形成协同控制体系与多元资源聚合技术路径，以提升稳定控制资源的组织效率和广域协同能力。

在控制资源利用方面，围绕新能源资源快速可调特性，开展了光伏功率快速调控示范，探索将新能源作为第二道防线稳定控制资源加以利用。相关实践联合光伏逆变器厂家明确了如图 11 所示稳控装置与光伏电站接口控制器的接口方式、通信协议以及面向通用对象的变电站事件（generic object oriented substation event，GOOSE）控制块数据交互规范。依托兴安直流稳控系统，光伏功率快速调控示范工程得以建立，并开展兴安双极闭锁稳控动作现场试验。2024 年 10 月 26 日现场试验相量测量单元（phasor measurement unit，PMU）录波结果表明，数据采收到快调命令并发送至逆变器控制器的时延约为 11 ~ 12 ms，兴安稳控启动至接口控制装置发出功率快调命令的时延约为 44 ~ 45 ms，故障触发至光伏功率被限制到位约为 60 ms。试验结果表明，光伏功率快调可实现百毫秒内快速响应，动作效果与传统切机措施基本相当，能够满足系统稳定控制对快速动作时限的要求。上述实践说明，新能源不再只是被动保护和脱网对象，也可依托电力电子设备快速有功调节能力，作为第二道防线稳定控制资源参与系统稳定控制。

在资源汇集与协同控制方面，针对新能源控制资源接口复杂、控制相互耦合以及广域接入条件下组织困难等问题，提出了海量异构控制资源标准化汇集和多区域集群控制资源广域协同柔性共享的控制方法。通过设计灵活可靠、宽频可控、支撑海量控制资源纳控的新型电力系统稳定控制架构，形成新能源分区集群的可拓展主/子站控制模式，实现海量稳定控制资源的分层接入、集约管理和柔性调用。相关研究也从主配网协同、配网侧源荷储恢复、储能分层控制等方面提供了方法支撑。在主配网协同层面，双层双时间尺度协同优化模型可协调主网机组组合、直流功率调制与配网柔性资源、网络重构，为海量分布式资源参与广域协同控制提供支撑[58]，在弱网架配电网场景中，分布式储能与动态拓扑重构协同优化可提升配网对分布式新能源的承载能力[59]，在配网故障恢复场景中，“源-荷-储”协同调控可支撑受灾孤岛运行方案生成，提高重要负荷恢复能力和局部电网弹性，为多元资源参与扰动后恢复控制提供补充思路[60]。此外，动态可重构混合储能及多尺度分层优化控制可实现能量型储能与功率型储能的分频段响应，提升储能参与新能源场站稳定控制的响应能力[61]，有助于推动稳定控制由传统少量集中式对象控制向海量异构资源协同控制转变。

在工程应用方面，面向云南高比例电力电子异步电网，南网科研院牵头研发了高比例电力电子异步电网多时空协同稳定控制技术及装备，构建了调度端、区域级、场站级三级技术装备体系，推动高

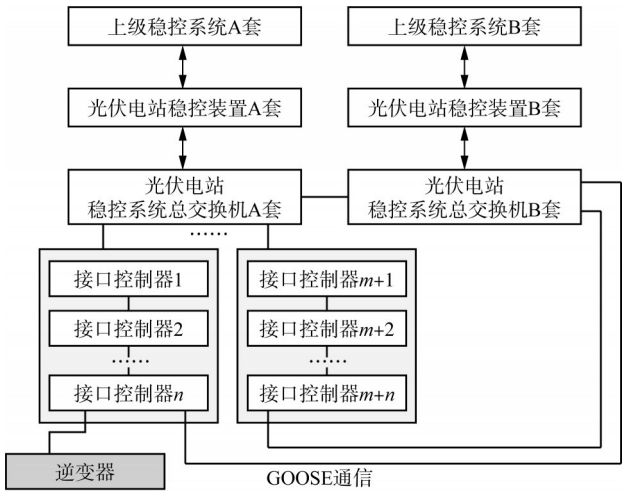


图 11 光伏功率快速调控示范控制架构

Fig. 11 Demonstration control architecture for fast photovoltaic power regulation

比例电力电子电网的风险预警与稳定决策由“离线匹配”向“在线实时”控制转变。相关成果已在云南电网全面应用，实现了 10 回直流和近 180 个水火风光主力场站全接入，支撑了云南电网在新能源渗透率超过 70 %工况下保持系统安全稳定运行。该实践表明，面向高比例新能源和电力电子化电网，稳定控制体系需要由传统单点、离线、固定策略控制进一步向多层级、多时间尺度、多资源协同的精准控制方向演进。

3.6 安全稳定控制市场机制与政策支持探索

针对新型电力系统中安全稳定控制责任边界拓展、参与主体多元化以及传统技术措施与市场机制衔接不足等问题，通过工程实践逐步认识到安全稳定控制能力建设不仅取决于网架结构优化、模型支撑和控制技术进步，也依赖与之相适应的市场机制和政策支持体系。随着新能源、储能、可调负荷和虚拟电厂等新型主体广泛接入，系统安全稳定控制对象已由传统以常规机组和固定负荷为主的有限集合，扩展为源网荷储多元主体共同参与的资源体系，已有研究表明，我国虚拟电厂仍处于由邀约型向市场型过渡阶段，市场机制不健全、价值识别不充分和技术标准不统一等问题仍制约其规模化参与电力市场，因此有必要面向系统安全稳定需求进一步完善新型主体参与辅助服务的市场规则[62]。如何通过合理的机制设计引导各类主体在事故扰动和紧急控制场景下主动提供安全稳定支撑能力已成为新型电力系统安全稳定控制体系建设中的重要内容。

当前，电力辅助服务市场主要围绕调峰、调频、备用、无功功率和黑启动等常规服务展开[63-65]。以一次调频辅助服务为例，相关研究表明，通过引入电力辅助服务考核与补偿机制可将储能等快速响应资源纳入调频容量优化配置过程，从而引导飞轮储能等主体承担瞬时频率调节任务，降低常规机组调节压力，并提升系统调频性能与经济性[66]。在高比例新能源接入背景下，安全稳定控制已不再只是调度机构和传统稳控装置单向实施的技术问题，而是涉及发电侧、负荷侧、储能侧及新型市场主体协同参与的系统性问题。缺乏明确的价格机制、补偿机制和责任分担机制，一方面不利于调动多元主体参与安全稳定控制的积极性，另一方面也难以形成源网荷储共保系统安全的长效机制。

基于上述认识，南方区域率先围绕安全稳定控制辅助服务开展探索，于 2022 年提出稳定切机、稳定切负荷事故应急辅助服务品种，为将安全稳定控制需求纳入市场机制提供了先行实践。其中，稳定切机服务是指电力系统发生故障时，稳控装置正确动作后，发电机组自动与电网解列所提供的应急支撑服务；稳定切负荷服务是指电网发生故障时，安全自动装置正确动作切除部分用户负荷，用户在规定响应时间及条件下以损失负荷方式保障电力系统安全稳定所提供的服务。在具体的补偿机制设计上，南方区域“两个细则”[67-68]明确了这两项服务费均由“能力补偿”和“使用补偿”两部分构成（即稳定切机服务费=能力费 R_{12}+使用费 R_{13}；稳定切负荷服务费=能力费 R_{14}+使用费 R_{15}），产生的费用由发电侧并网主体和市场化电力用户按分摊系数 K_{10} 与（1−K_{10}）共同承担。同时，针对不同省区（广东、广西、云南、贵州、海南）及不同电源类型制定了差异化的补偿标准。相关探索标志着安全稳定控制由单纯依赖行政调度和技术装置执行，开始向“技术措施-市场补偿-多主体协同”相结合的机制建设阶段演进。

从实施意义看，安全稳定控制市场机制的建立，有助于进一步明确不同主体在系统安全保障中的功能定位和经济责任，推动形成源网荷储共担风险、共保安全的协同格局。对于发电侧主体而言，可通过机制设计引导其提供稳定切机、快速功率调节等安全稳定服务；对于负荷侧和虚拟电厂等主体而言，则可通过可中断负荷、快速响应资源等形式

参与稳定切负荷或应急支撑；对于储能及新能源主体而言，也可在未来通过完善规则设计，逐步纳入安全稳定控制资源体系。由此，安全稳定控制机制建设不仅能够提升系统在严重故障条件下的防御能力，也有助于降低单一技术路径下的控制成本，提高安全稳定控制体系的灵活性和可持续性。

4　新型电力系统安全稳定控制的发展方向与未来展望

综上，围绕网架优化、涉网模型构建、稳定特性认知、智能分析校核、协同控制与市场机制探索，已形成面向新型电力系统安全稳定控制的初步实践路径。但随着新能源高比例接入、运行边界快速变化以及多元主体广泛参与，现有方法在实时性、适应性、协同性和机制保障等方面仍需进一步提升。未来需从网架优化与物理基础强化、在线自适应控制、市场机制建设与协同支撑等方面持续深化，并将全景感知、混合仿真和多元资源协同能力嵌入安全稳定控制体系建设全过程。

4.1　网架优化与物理基础强化

面向系统规模持续扩大、新能源渗透率持续提升以及跨区跨域大容量电力交换需求，未来应持续优化网架结构，进一步夯实新型电力系统安全稳定运行的物理基础。在此基础上，可进一步推动柔性构网等新型技术发展，按照“合理分区、柔性互联”的思路适度控制同步电网规模，增强电力电子设备与同步机协同提供频率支撑、电压支撑及阻尼提升的能力，不断提升系统安全稳定支撑水平[29, 69]。

4.2　在线自适应控制

新型电力系统海量运行边界快速变化，对系统安全稳定裕度及控制体系提出了更高要求，传统依赖人工校核和策略设计的方法已难以兼顾安全、保供、时效和经济等多重目标，因而有必要进一步发展在线自适应控制技术[70-71]。如图 12 所示，一方面，可基于未来运行方式在线分析电网稳定情况精准刻画稳定边界，实时校核系统稳定裕度适应性并自动调整系统运行点，实现系统稳定裕度自适应；另一方面，可通过高保真镜像模拟厂站端控制策略实时校核稳控策略及定值适应性，并结合远方修改定值及控制策略，实现稳控策略及定值自适应，从而全面提升电网安全保障能力。

在预防控制方面，通过实时校核系统安全稳定裕度并动态调整系统运行点实现稳定裕度带宽式精准控制；在紧急控制方面，推动稳定控制策略由长周期离线制定向月周时间尺度自动生成、日前乃至实时在线更新迭代转变，逐步实现稳定控制技术由“年周期保守型控制策略”向“月、周、日及实时多时间尺度精准匹配型控制策略”的演进。

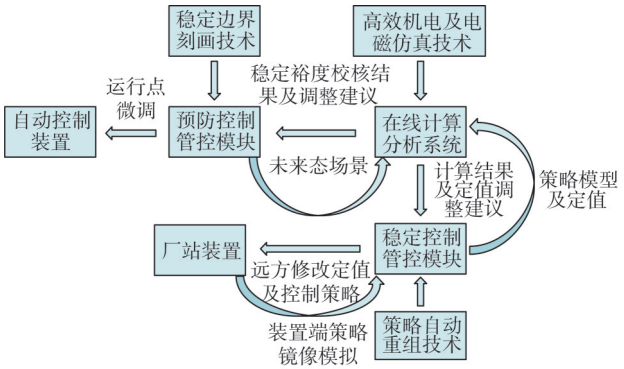


图 12　在线自适应控制框架

Fig. 12　Online adaptive control framework

4.3　市场机制建设与协同支撑

当前电力辅助服务市场中，面向新能源、储能、虚拟电厂等多主体的安全稳定控制辅助服务品种仍不完善，惯量、频率/电压快速控制等运行服务需求迫切，新型电力系统源网荷储共保安全的需求与市场机制协同之间仍存在一定不足[72]。未来应进一步健全新型电力系统安全稳定控制的市场机制和政策支持体系，统筹电能量市场、完善辅助服务品种设计、费用分摊和共保机制，促进多元主体更好参与系统安全稳定控制。与此同时，还应加强科技创新与管理创新协同，推动政、产、学、研、用多方联动，为新型电力系统安全稳定控制能力持续提升提供制度保障和协同支撑。

5　结语

高比例新能源接入正在深刻改变电力系统的源网结构、动态特性和运行边界，使得由传统同步机主导的安全稳定问题逐步演变为电力电子化、多元主体耦合条件下的稳定问题。本文从挑战、研究框架和工程实践 3 个层面对新型电力系统安全稳定控制体系进行了系统梳理。研究表明，面向高比例新能源接入的新型电力系统，需以坚强的物理基础为前提，以科学的系统运行管理为支撑，以可靠的扰动防御 3 道防线为保障，推动安全稳定控制体系不

断向更高水平演进。结合相关探索可见，网架优化、涉网建模、特性认知、智能分析、协同控制以及市场机制与政策支持正在成为提升新型电力系统安全稳定水平的重要路径。

总体来看，新型电力系统安全稳定控制体系建设仍处于持续演进阶段，未来仍需在理论研究、方法创新、装备支撑和机制协同等方面进一步深化。本文旨在为高比例新能源接入背景下安全稳定控制研究与工程实践提供参考，并为新型电力系统安全发展、能源绿色低碳转型以及新型能源体系建设提供有益借鉴。

参考文献

[1] 康重庆，杜尔顺，郭鸿业，等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术，2023，47(5)：1741－1750.
KANG Chongqing，DU Ershun，GUO Hongye，et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology，2023，47(5)：1741－1750.

[2] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806－2819.
ZHANG Zhigang，KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(8)：2806－2819.

[3] SHAIR J，LI H，HU J，et al. Power system stability issues，classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2021(145)：111111.1－111111.8.

[4] 李国庆，刘先超，辛业春，等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1165－1181.
LI Guoqing，LIU Xianchao，XIN Yechun，et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy：a review[J]. High Voltage Engineering，2024，50(3)：1165－1181.

[5] SALEH A M，ISTVÁN V，KHAN M A，et al. Power system stability in the era of energy transition：importance，opportunities，challenges，and future directions[J]. Energy Conversion and Management：X，2024(24)：100820.1－100820.10.

[6] 卓振宇，张宁，谢小荣，等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化，2021，45(9)：171－191.
ZHUO Zhenyu，ZHANG Ning，XIE Xiaorong，et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(9)：171－191.

[7] STRINGER N，HAGHDADI N，BRUCE A，et al. Observed behavior of distributed photovoltaic systems during major voltage disturbances and implications for power system security[J]. Applied Energy，2020(260)：114283.1－114283.9.

[8] HATZIARGYRIOU N，MILANOVIC J，RAHMANN C，et al. Definition and classification of power system stability - revisited & extended[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(4)：3271－3281.

[9] 黄萌，舒思睿，李锡林，等. 面向同步稳定性的电力电子并网变流器分析与控制研究综述[J]. 电工技术学报，2024，39(19)：5978－5994.
HUANG Meng，SHU Sirui，LI Xilin，et al. A review of synchronization-stability-oriented analysis and control of power electronic grid-connected converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(19)：5978－5994.

[10] COLLADOS-RODRIGUEZ C，CHEAH-MANE M，PRIETO-ARAUJO E，et al. Stability and operation limits of power systems with high penetration of power electronics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2022(138)：107728.1－107728.10.

[11] 韩英铎，陆超，宋文超，等. 电力系统在线安全稳定计算分析技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6733－6761.
HAN Yingduo，LU Chao，SONG Wenchao，et al. Review and prospects of online calculation and analysis techniques for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(17)：6733－6761.

[12] SOBBOUHI A R，VAHEDI A. Transient stability prediction of power system；a review on methods，classification and considerations[J]. Electric Power Systems Research，2021(190)：106853.1－106853.11.

[13] 张礼浩，刘翔宇，顾雪平，等. 新型电力系统频率安全稳定研究综述及展望[J]. 浙江电力，2024，43(10)：12－26.
ZHANG Lihao，LIU Xiangyu，GU Xueping，et al. Review and prospects of frequency security and stability research in new-type power systems[J]. Zhejiang Electric Power，2024，43(10)：12－26.

[14] LIM S，KIM T，LEE K Y，et al. Impact of high penetration of renewables on power system frequency response：a review and verification[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2025(217)：115728.1－115728.12.

[15] 李碧君，李威，董希建. 新型电力系统中主控型安全稳定服务质量的在线评估[J]. 中国电力，2024，57(8)：168－181.
LI Bijun，LI Wei，DONG Xijian. Online assessment of control-based system security and stability service quality for new power system[J]. Electric Power，2024，57(8)：168－181.

[16] 黄炳政，陈俊儒，刘牧阳，等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(12)：57－68.
HUANG Bingzheng，CHEN Junru，LIU Muyang，et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance[J]. Power System Protection and Control，2025，53(12)：57－68.

[17] 李建林，裴盛泽，游洪灏，等. 基于虚拟振荡控制的构网型储能暂态特性优化方法[J]. 高电压技术，2026，52(5)：2150－2158.
LI Jianlin，PEI Shengze，YOU Honghao，et al. Transient characteristics optimization method for grid-forming energy storage based on virtual oscillation control[J]. High Voltage Engineering，2026，52(5)：2150－2158.

[18] 肖晃庆，何宏亮，杨苹，等. 具备跟网-构网二象性的并网VSC自适应混合控制及其暂态稳定性分析[J]. 电力自动化设备，2025，45(6)：108－115.
XIAO Huangqing，HE Hongliang，YANG Ping，et al. Adaptive hybrid control of grid-connected VSC with grid-following and grid-forming duality and its transient stability analysis[J].

Electric Power Automation Equipment，2025，45（6）：108－115.

[19] 刘菁锐，屠增泽，张宇飞，等. 考虑限流的基于直流电压同步的构网型换流器稳定判据[J]. 电力工程技术，2025，44(2)：3－12.
LIU Jingrui，TU Zengze，ZHANG Yufei，et al. Transient stability criterion of grid-forming converter based on DC voltage synchronization control considering current limit [J]. Electric Power Engineering Technology，2025，44(2)：3－12.

[20] 熊永新，文劲宇，姚伟. 变流器并网系统暂态稳定性研究综述：现状、挑战与展望[J]. 电力建设，2026，47(4)：132－151.
XIONG Yongxin，WEN Jinyu，YAO Wei. Transient stability of converter-connected systems：a review of research status，challenges and prospects [J]. Electric Power Construction，2026，47(4)：132－151.

[21] 苏寅生，高琴，李豹，等. 计及变频电机类负荷的广义综合负荷精细化建模[J/OL]. 南方电网技术，2025－10－23. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20251022.1756.014.
SU Yinsheng，GAO Qin，LI Bao，et al. Refined modeling of generalized comprehensive load considering variable frequency motor-type loads[J/OL]. Southern Power System Technology，2025－10－23. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20251022.1756.014.

[22] YE Z，WU Y，WANG X，et al. Batch assessment of short-term voltage stability based on proactive searching of critical operating point [J]. IEEE Transactions on Power Systems，2026，41(3)：2406－2409.

[23] 朱江峰，裴志刚，方珺，等. 基于偏好可控强化学习的分布式储能系统调峰-增容功能复用策略优化方法[J/OL]. 南方电网技术，2026－03－31. Https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260331.0921.002.
ZHU Jiangfeng，PEI Zhigang，FANG Jun，et al. Optimization method for peak shaving-capacity increase function reuse strategy of distributed energy storage systems based on preference controllable reinforcement learning [J/OL]. Southern Power System Tech-nology，2026－03－31. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260331.0921.002.

[24] 余洋，王中晶，孙梓朔，等. 变频空调集群参与调峰的聚合建模及双层优化控制策略[J/OL]. 南方电网技术，2025－09－30. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250929.1646.016.
YU Yang，WANG Zhongjing，SUN Zishuo，et al. Aggregation modeling and two-layer optimal control strategy for inverter air conditioner clusters participating in peak regulation [J/OL]. Southern Power System Technology，2025－09－30. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250929.1646.016.

[25] WANG Q，LI F，TANG Y，et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control [J]. IEEE Transactions on Power Systems，2019，34(6)：4557－4568.

[26] SHAO Z，ZHAI Q，GUAN X. Physical-model-aided data-driven linear power flow model：an approach to address missing training data [J]. IEEE Transactions on Power Systems，2023，38(3)：2970－2973.

[27] 朱益华，饶宏，常东旭，等. 含大规模新能源接入的多直流馈入系统典型算例[J]. 电力系统自动化，2026，50(11)：117－127.
ZHU Yihua，RAO Hong，CHANG Dongxu，et al. Typical case of multi-infeed HVDC system with large-scale renewable energy integration[J]. Automation of Electric Power Systems，2026，50(11)：117－127.

[28] 郑外生，饶宏. 新型电力系统柔性构网技术及其应用[J]. 电力系统自动化，2025，49(12)：1－10.
ZHENG Waisheng，RAO Hong. Flexible grid-forming technology and its application in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems，2025，49(12)：1－10.

[29] 饶宏，黄伟煌，郭知非，等. 柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3347－3355.
RAO Hong，HUANG Weihuang，GUO Zhifei，et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid[J]. High Voltage Engineering，2022，48(9)：3347－3355.

[30] BUCHER D，PORAWSKI D，WIMMER B，et al. Evaluating quantum optimization for dynamic self-reliant community detection[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2025，16(2)：1339－1350.

[31] FARHAT I，EKOMWENRENREN E，SIMPSON-PORCO J W，et al. A multi-area architecture for real-time feedback-based optimization of distribution grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2025，16(2)：1448－1461.

[32] 刘超男，黄勇，赵成勇. 基于多目标粒子群算法的新能源汇集网架规划[J]. 南方电网技术，2026，20(1)：108－118.
LIU Chaonan，HUANG Yong，ZHAO Chengyong. Renewable energy collection grid planning based on multi-objective particle swarm algorithm[J]. Southern Power System Technology，2026，20(1)：108－118.

[33] 李岩，周博昊，何佳伟，等. 沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统中交流继电保护面临的挑战与对策[J]. 高电压技术，2025，51(2)：489－506.
LI Yan，ZHOU Bohao，HE Jiawei，et al. Challenges and countermeasures of the AC relay protection in grid-forming MMC integrated with large-scale renewable generations in deserts [J]. High Voltage Engineering，2025，51(2)：489－506.

[34] 张丹，付宇昂，刘艳，等. 异步联网方式下基于送端系统支撑能力调整的直流外送能力优化策略[J]. 南方电网技术，2025，19(12)：112－123.
ZHANG Dan，FU Yuang，LIU Yan，et al. Optimization strategy of DC external transmission capability based on the support capability adjustment of the sending-end system under asynchronous networking mode [J]. Southern Power System Technology，2025，19(12)：112－123.

[35] 周保荣，洪潮，金小明，等. 南方电网同步运行网架向异步运行网架的转变研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2084－2092.
ZHOU Baorong，HONG Chao，JIN Xiaoming，et al. Study of backbone structure change from synchronous to asynchronous in China Southern Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(8)：2084－2092.

[36] 郑外生，陈亦平，周保荣. 云南新型电力系统运行控制体系的构想[J]. 南方电网技术，2022，16(9)：83－89.
ZHENG Waisheng，CHEN Yiping，ZHOU Baorong. Concept of operation and control system on Yunnan new power system [J]. Southern Power System Technology，2022，16(9)：83－89.

[37] 郭知非，李峰，郑秀波，等. 广东在运直流柔性化改造提升系统稳定效果研究[J]. 南方电网技术，2019，13(9)：6－12.
GUO Zhifei，LI Feng，ZHENG Xiubo，et al. Study of the stability improvements of VSC-Based refurbishment of

conventional HVDC in Guangdong Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(9): 6 - 12.

[38] 蔡万通, 洪潮, 周保荣, 等. 广东电网内外双环网架结构向组团网架结构的转变研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6557 - 6569.
CAI Wantong, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Research on structure change from double-ring to cluster of Guangdong Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6557 - 6569.

[39] YANG K, WANG X, CHEN X, et al. Data-driven dynamic modeling for inverter-based resources using neural networks [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 11696.1 - 11696.7.

[40] WEBER M, JANECKE L, ÇAKMAK H K, et al. Open data-driven automation of residential distribution grid modeling with minimal data requirements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5721 - 5732.

[41] 卢倚平, 赵晓斌, 冯俊杰, 等. 基于倍乘元件阻抗参数自适应的大规模风电场多机等值建模方法[J/OL]. 南方电网技术, 2026 - 06 - 02. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20260601.1304.004.
LU Yiping, ZHAO Xiaobin, FENG Junjie, et al. Adaptive-impedance multiplier element based multi-machine equivalent modeling of large-scale wind farms[J/OL]. Southern Power System Technology, 2026 - 06 - 02. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20260601.1304.004.

[42] YANG K, WANG X, ZHANG Q, et al. Dynamics enhanced quasi-steady-state model of LCC-HVDC systems based on neural network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(4): 2017 - 2028.

[43] 李诗旸, 张建新, 付超, 等. 一种基于随机-鲁棒混合整数规划的电网离线稳控策略定值规范化整定方法[J]. 南方电网技术, 2025, 19(12): 88 - 99,111.
LI Shiyang, ZHANG Jianxin, FU Chao, et al. A normative setting approach of power system off-line stability control strategy based on stochastic-robust mixed integer programming[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(12): 88 - 99,111.

[44] XUE A, WU F F, LU Q, et al. Power system dynamic security region and its approximations[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(12): 2849 - 2859.

[45] 宋嘉启, 鲍颜红, 张金龙, 等. 面向新型电力系统的暂态稳定边界表征与计算: 综述与展望[J/OL]. 电力系统自动化, 2025 - 08 - 14. https://link. cnki. net/urlid/32.1180. TP.20250813.1719.006.
SONG Jiaqi, BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, et al. Characterization and calculation of transient stability boundaries for new power systems: —a review and outlook. automation of electric power systems[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2025 - 08 - 14. https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250813.1719.006.

[46] 别朝红, 李更丰, 肖云鹏, 等. 新型电力系统形态构建的关键机制与技术路径[J]. 中国科学:技术科学, 2026, 56(1): 97 - 112.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng, XIAO Yunpeng, et al. Key mechanisms and technical paths for the construction of new power system[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2026, 56(1): 97 - 112.

[47] 甄鸿越, 苏寅生, 赵利刚, 等. DSP与BPA同步发电机模型对比研究[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 26 - 33.
ZHEN Hongyue, SU Yinsheng, ZHAO Ligang, et al. Comparison research of DSP and BPA synchronous generator models[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 26 - 33.

[48] 赵利刚, 甄鸿越, 洪潮, 等. 交直流电力系统计算分析软件DSP研究与开发[J]. 南方电网技术, 2017, 11(4): 64 - 70.
ZHAO Ligang, ZHEN Hongyue, HONG Chao, et al. Research and development of AC/DC power system calculation and analysis software DSP [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(4): 64 - 70.

[49] 苏寅生, 周挺辉, 郑外生, 等. 基于云计算的电力系统计算分析平台构建[J]. 南方电网技术, 2022, 16(7): 67 - 75.
SU Yinsheng, ZHOU Tinghui, ZHENG Waisheng, et al. Construction of power system computing and analysis platform based on cloud computing[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 67 - 75.

[50] 李力, 李爱民, 吴科成, 等. 广东电网短路电流超标问题分析和限流措施研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(S1): 20 - 24.
LI Li, LI Aimin, WU Kecheng, et al. Analysis of short-circuit current exceeding standard of Guangdong power grid and research on limitation measures[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(S1): 20 - 24.

[51] 杨欢欢, 杨君军, 徐伟, 等. 互联电网短路电流在线分析与优化决策方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2218 - 2226.
YANG Huanhuan, YANG Junjun, XU Wei, et al. Online analysis and optimal decision-making of short-circuit current in interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2218 - 2226.

[52] ZHANG H, XIANG W, LIN W, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239 - 1256.

[53] WANG F, CAI F, HUANG D, et al. Multiobjective model predictive control of LCL grid-connected inverter based on an improved gray wolf algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(9): 13977 - 13990.

[54] LI F, LI B, ZHENG X. Coordination of power flow control in large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 776 - 781.

[55] AN Y, ZHAO Z, WANG S, et al. Coordinative optimization of hydro-photovoltaic-wind-battery complementary power stations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 410 - 418.

[56] 薛翼程, 张哲任, 徐政, 等. 构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 103 - 113.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 103 - 113.

[57] 束洪春, 邵宗学, 赵伟, 等. 大规模水电直流外送柔直同频控制与常直FLC协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 189 - 196.
SHU Hongchun, SHAO Zongxue, ZHAO Wei, et al. Coordinated control strategy between flexible DC synchronous frequency control and conventional DC frequency limit control-

ler for large-scale hydropower DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 189 - 196.

[58] 陈锋，路小敏，李云舒，等. 计及高比例光伏波动与配网灵活极限的主配网动态协同优化模型[J/OL]. 南方电网技术，2026 - 02 - 04. https://link. cnki. net/urlid/44.1643. TK. 20260203.2237.015.
CHEN Feng, LU Xiaomin, LI Yunshu, et al. Dynamic collaborative optimization model for main and distribution networks considering high-penetration photovoltaic fluctuation and distribution network flexibility limits [J/OL]. Southern Power System Technology, 2026 - 02 - 04. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260203.2237.015.

[59] 邱泽坚，周谦，梅傲琪，等. 计及动态拓扑重构的弱网架配电网分布式储能优化配置[J/OL]. 南方电网技术，2026 - 06 - 02. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260601.1601.025.
QIU Zejian, ZHOU Qian, MEI Aoqi, et al. Distributed energy storage optimization configuration of weak grid distribution network considering dynamic topology reconstruction [J/OL]. Southern Power System Technology, 2026 - 06 - 02. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260601.1601.025.

[60] 罗世坚，李德祥，杜志坚. 配电网故障不确定扩大孤岛"源-荷-储"协同调控优化模型[J/OL]. 南方电网技术，2026 - 03 - 06. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20260305.1334.010.
LUO Shijian, LI Dexiang, DU Zhijian. Optimization model of "source-load-storage" collaborative regulation for expanding islanding due to uncertain faults in distribution networks [J/OL]. Southern Power System Technology, 2026 - 03 - 06. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20260305.1334.010.

[61] 杨毅，阮益闽，彭湃，等. 动态可重构混合储能拓扑及其多尺度分层优化协同控制[J/OL]. 南方电网技术，2025 - 10 - 09. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251009.0859.006.
YANG Yi, RUAN Yimin, PENG Pai, et al. Dynamic reconfigurable hybrid energy storage topology with multi-time-scale hierarchical collaborative optimization control [J/OL]. Southern Power System Technology, 2025 - 10 - 09. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251009.0859.006.

[62] 牛振勇，许星原，赵宏伟，等. 交易品种创新与政策协同：北美虚拟电厂实例分析及经验借鉴[J/OL]. 南方电网技术，2026 - 03 - 09. https://link. cnki. net/urlid/44.1643. TK. 20260308.1455.004.
NIU Zhenyong, XU Xingyuan, ZHAO Hongwei, et al. Innovation in trading varieties and policy coordination: case analysis and lessons from virtual power plants in north america [J/OL]. Southern Power System Technology, 2026 - 03 - 09. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260308.1455.004.

[63] 尚楠，陈政，冷媛. 电碳市场背景下典型环境权益产品衔接互认机制及关键技术[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7)：2558 - 2578.
SHANG Nan, CHEN Zheng, LENG Yuan. Mutual recognition mechanism and key technologies of typical environmental interest products in power and carbon markets [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2558 - 2578.

[64] 夏清，杨知方，赖晓文，等. 基于分时容量电价的新型电力现货市场设计[J]. 电网技术，2022，46(5)：1771 - 1779.
XIA Qing, YANG Zhifang, LAI Xiaowen, et al. Electricity market design based on temporal pricing of renewable capacity [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1771 - 1779.

[65] 董九舟，郭鸿业，姜涛，等. 新型电力系统的电碳耦合交易研究[J]. 中国电机工程学报，2025，45(15)：5752 - 5771.
DONG Jiuzhou, GUO Hongye, JIANG Tao, et al. Research on electricity-carbon coupling trading in the new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5752 - 5771.

[66] 梁海峰，聂璐瑶，吴允博，等. 飞轮储能辅助核电机组一次调频的容量优化配置[J/OL]. 南方电网技术，2026 - 02 - 04. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260203.1605.011.
LIANG Haifeng, NIE Luyao, WU Yunbo, et al. Optimal capacity configuration of flywheel energy storage assisting nuclear power units in primary frequency regulation [J/OL]. Southern Power System Technology, 2026 - 02 - 04. https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260203.1605.011.

[67] 国家能源局南方监管局. 南方区域电力辅助服务管理实施细则：修订版[EB/OL].（2025 - 02 - 14）[2026 - 04 - 24]. https://nfj. nea. gov. cn/xwzx/tzgg/202502/t20250214_276632.html.

[68] 国家能源局南方监管局. 南方区域电力并网运行管理实施细则：修订版[EB/OL].（2025 - 02 - 14）[2026 - 04 - 24]. https://nfj. nea. gov. cn/xwzx/tzgg/202502/t20250214_276632.html.

[69] 饶宏，周月宾，陈煜坤，等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报，2024，22(3)：1 - 14.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, CHEN Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1 - 14.

[70] 刘颂凯，艾迪，胡畔，等. 基于深度学习的新能源电力系统暂态稳定预防控制研究[J/OL]. 电气工程学报，2026 - 03 - 20. https://link.cnki.net/urlid/10.1289.tm.20260320.1142.002.
LIU Songkai, AI Di, HU Pan, et al. Research on transient stability prevention and control of new energy power system based on deep learning[J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 2026 - 03 - 20. https://link. cnki. net/urlid/10.1289. tm. 20260320.1142.002.

[71] 刘云，杨晗露，潘建宏，等. 计及系统强度约束的设备异构新能源场站集群协同紧急控制策略[J/OL]. 电工技术学报，2026 - 03 - 12. https://doi. org/10.19595/j. cnki. 1000 - 6753. tces.251679.
LIU Yun, YANG Hanlu, PAN Jianhong, et al. Collaborative emergency control strategy for multiple heterogeneous renewable energy plants considering system strength[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026 - 03 - 12. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000 - 6753.tces.251679.

[72] WANG H R, FENG T T, ZHONG C. Effectiveness of CO_2 cost pass-through to electricity prices under "electricity-carbon" market coupling in China[J]. Energy, 2023(266): 126387.1 - 126387.8.

收稿日期：2026-04-29

作者简介：

张建新(1983)，男，高级工程师(教授级)，硕士，研究方向为电力系统安全稳定分析与控制，zhangjx@csg. cn；

左可(1998)，男，通信作者，博士，研究方向为电力系统稳定分析与控制，zuoke@csg. cn；

刘宇明(1995)，男，工程师，硕士，研究方向为新能源并网稳定性分析与控制，liuym4@csg. cn。