

输配电及用电工程配电网故障定位技术研究

刘停

江西和惠配售电有限公司 江西宜春 336000

摘要：随着全球能源转型的深入推进，高比例新能源（如风电、光伏）接入输配电及用电系统已成为必然趋势。然而，新能源发电固有的间歇性、波动性和低惯量特性，对电力系统的频率稳定构成了严峻挑战。本文聚焦输配电及用电工程场景，深入研究高比例新能源并网下的频率调节问题。首先，分析了新能源渗透率提升对系统惯量、一次调频和二次调频能力的影响机制；其次，探讨了源侧（新能源场站虚拟惯量与一次调频控制）、网侧（柔性交流输电系统辅助调节）、荷侧（需求响应与虚拟电厂）以及储能系统在频率调节中的协同作用机理；最后，指出了该领域当前面临的关键技术瓶颈，如分布式资源协同控制、通信时延影响、经济性与调节性能平衡等，并展望了未来的研方向，为高比例新能源电力系统的安全稳定运行提供理论参考与技术支撑。

关键词：输配电工程；用电工程；高比例新能源；多源协同控制

引言

全球能源结构正经历深刻变革，风能、太阳能等可再生能源以其清洁低碳特性成为能源转型的核心力量。输配电及用电系统作为电力系统的关键组成部分，是新能源消纳和用户电力供应的重要载体。然而，当新能源发电在系统中占比显著提升（即高比例新能源场景）时，其出力的随机波动、抗扰动能力弱以及传统同步发电机被大量替代导致的系统转动惯量降低等问题，使得电力系统在发生功率扰动时，频率动态响应恶化，频率偏差增大、变化率提高，严重威胁系统的安全稳定运行。因此，研究输配电及用电工程中高比例新能源并网下的频率调节技术，对于保障电力系统可靠供电、促进新能源大规模消纳具有重要的理论价值和现实意义。

一、高比例新能源对输配电及用电系统频率特性的影响

（一）系统惯量降低及其影响

传统电力系统中，同步发电机旋转质量提供大惯量，可延缓系统频率变化速度，为调频争取时间。高比例新能源场景下，大量新能源通过逆变器接入，无旋转惯量，随渗透率提高，系统等效惯量降低。这使有功不平衡时频率变化率增大、稳定裕度减小，对调频响应速度和容量要求更高。输配电中，分布式新能源接入使惯量分布不均，局部惯量支撑不足问题严峻。

（二）一次调频能力减弱

传统同步发电机靠调速器有差调节特性进行一次调

频，能快速响应调整出力。高比例新能源替代后，一次调频资源减少。部分新能源场站虽可参与，但响应特性与传统机组有差异，且受自身最大有功出力和爬坡率限制。输配电及用电系统中，负荷波动大，若新能源调频能力不足或响应不及时，会影响用电质量和设备安全。

（三）二次调频响应压力增大

二次调频由自动发电控制（AGC）负责，调整可控电源出力恢复系统频率。高比例新能源出力波动增加功率平衡难度，使AGC指令幅值和频率提高，对AGC机组调节灵活性和快速性要求更高。可调节传统同步机组减少，AGC备用容量可能不足，响应压力增大。新能源出力预测误差也会增加二次调频负担，加剧频率波动^[1]。

（四）输配电及用电侧特殊场景的影响

输配电系统结构复杂、节点多、负荷多样。高比例分布式新能源接入会改变潮流分布，引发电压与频率问题耦合。用电侧大量电力电子设备使负荷特性改变，敏感负荷对频率偏差更敏感。微电网、虚拟电厂等新兴形态对局部频率控制和与主网频率协调提出新挑战，如微电网孤岛运行时惯量低，频率调节难度大。

二、高比例新能源频率调节的关键技术路径

（一）源侧新能源调频技术

1. 虚拟惯量控制（VSG/VSM技术）

虚拟惯量控制通过控制新能源逆变器模拟同步发电机转子运动方程，使逆变器在系统频率变化时呈现类似同步机的惯量响应。核心是引入频率反馈，在频率变化时释放或吸收能量，提供暂态功率支撑，降低RoCoF和

最大频率偏差。主要通过 VSG 或 VSM 技术实现，合理设计虚拟惯量和阻尼系数可改善系统频率动态特性。该技术仅靠软件算法实现，无需额外硬件，但要注意控制参数设计与系统稳定性之间的关系以及在弱电网条件下的适应性。

2.一次调频辅助控制策略

新能源场站可在控制系统植入一次调频控制模块以响应系统频率变化，实现方式有下垂控制（模拟同步发电机调速器特性，按频率偏差比例调整输出功率）、下垂控制与虚拟惯量控制结合（同时提供惯量响应和一次调频能力）。关键是合理设置调频死区、下垂系数、调节速率限制和出力上下限，确保调频效果，避免影响新能源自身稳定运行和最大发电量。此外，多新能源场站间的一次调频协调控制，避免抢调或调节分配不均，对提升整体调频效果很重要^[2]。

（二）网侧辅助调频技术

1.柔性交流输电系统（FACTS）

FACTS 装置如静止同步补偿器（STATCOM）、晶闸管控制电抗器（TCR）等，主要用于电压控制和潮流优化，其快速的有功/无功调节能力也可辅助频率调节。例如，STATCOM 可控制换流器输出的有功功率，在系统频率下降时，若配有储能则快速释放有功，或吸收过剩无功间接支持有功平衡，参与暂态频率支撑。在输配电系统中，FACTS 装置安装在关键节点，可改善局部区域的频率动态特性。

2.高压直流输电（HVDC）系统的频率支援

对于采用 HVDC 并网的大规模新能源基地，HVDC 系统的控制系统可设计为具有频率支援功能。当送端或受端系统发生频率扰动时，HVDC 可快速调整传输功率提供频率支持^[3]。例如，受端系统频率下降时，临时增大 HVDC 输送功率；送端系统频率下降时，适当减小输送功率，缓解送端功率缺额。这种跨区域的频率支援对多区域互联的高比例新能源电力系统意义重大。

（三）荷侧资源参与调频技术

1.需求响应（DR）与可调节负荷控制

需求响应通过价格信号或激励机制引导用户改变用电行为，在系统频率出现偏差时，快速削减或增加可控负荷的用电功率，参与频率调节。可调节负荷主要包括工业可中断负荷、商业楼宇空调负荷、电动汽车充电负荷等。这些负荷具有一定的调节潜力，通过先进的通信和控制技术，可实现对其功率的快速、精确控制。在输配电及用电系统中，需求响应资源分布广泛，响应速度

快，可作为频率调节的重要补充力量，尤其在系统惯量较低、一次调频资源不足时，能有效抑制频率跌落或飞升。

2.虚拟电厂（VPP）聚合调频

虚拟电厂通过先进的信息通信技术和优化控制策略，将分布式电源、储能系统、可控负荷等分散资源聚合起来，作为一个整体参与电力市场和系统运行调节。VPP 可以整合其内部资源的调频潜力，通过统一的控制中心响应系统频率指令。在高比例新能源场景下，VPP 能够灵活协调内部新能源出力与负荷消费，平抑出力波动，并在系统需要时提供快速的调频服务，提升配用电系统的频率稳定性和新能源消纳能力^[4]。

（四）储能系统调频技术

储能系统（ESS）具有响应速度快、调节精度高、充放电灵活的特点，是理想的频率调节资源。锂电池储能、超级电容器、飞轮储能等不同类型的储能技术，因其功率密度、能量密度和充放电次数的差异，适用于不同时间尺度的频率调节需求。例如，飞轮储能和超级电容器可提供毫秒级的快速功率响应，用于抑制高频次、小幅度的频率波动和提供惯量支撑；锂电池储能则可提供持续数分钟至数小时的功率调节，辅助一次和二次调频。在输配电及用电系统中，储能系统可安装在新能源场站侧、负荷侧或关键变电站，根据不同场景需求提供针对性的频率调节服务。其控制策略需与系统调度紧密配合，实现充放电的优化管理，以提高利用率和经济性。

三、输配电及用电系统多源协同频率调节控制策略

（一）协同控制总体架构

针对输配电及用电系统高比例新能源接入特点，本文提出“分层协同、分域控制”的多源协同频率调节总体架构。该架构分系统层、区域协调层和资源层。系统层由输电网调度中心或上级 AGC 系统负责，根据系统频率及区域调节潜力，制定全局调节目标、下发指令，实现大区域功率平衡与频率稳定。区域协调层在关键区域设控制器，接收系统层指令，结合区域内信息优化分配资源、协调控制，下发指令到资源单元。资源层包括各类执行主体，精确执行区域协调层指令，响应频率变化，提供惯量支撑或调频服务。此分层架构结合全局优化与局部自治，保障系统频率稳定，发挥本地资源调节潜力。

（二）基于多时间尺度的协调控制策略

考虑到不同调节资源的响应速度和作用时间尺度存在差异，设计基于多时间尺度的协调控制策略，将频率调节过程划分为：

瞬时惯量支撑阶段（0–数百毫秒）：当系统发生大的功率扰动，频率变化率（RoCoF）超过阈值时，优先调用响应速度最快的资源，如具备虚拟惯量控制的新能源场站、飞轮储能、超级电容器等。通过快速释放或吸收能量，抑制RoCoF，为后续调节争取时间。

一次调频阶段（数百毫秒–数秒）：在频率开始偏离额定值后，启动一次调频资源。包括具备下垂控制的新能源场站、传统同步发电机（若有）以及快速响应的储能系统。此阶段主要目标是限制频率最大偏差（nadir）。区域协调控制器需根据各资源的调频死区、下垂系数和当前可用容量，合理分配调节指令，避免过度调节或调节不足。

二次调频与持续稳定阶段（数秒–数分钟及以上）：在一次调频的基础上，启动二次调频资源。主要包括AGC机组（若有）、可调度的储能系统、需求响应资源以及虚拟电厂聚合的可调负荷。此阶段目标是消除频率静态偏差，恢复系统频率至额定值。区域协调控制器根据系统层AGC指令或区域内频率静态偏差，优化调度各类二次调频资源，考虑其调节成本、响应速度和容量约束，实现经济高效的频率恢复^[5]。

通过这种多时间尺度的有序协调，可充分发挥各类资源的优势，实现频率的快速稳定控制。

（三）考虑通信时延与不确定性的鲁棒控制

输配电及用电系统中，信息传输存在不可避免的通信时延，同时新能源出力预测、负荷预测以及各类设备参数存在不确定性，这些因素都会影响协同控制策略的效果。因此，在控制策略设计中需引入鲁棒控制思想：

通信时延补偿：采用预测控制、史密斯预估器等方法对通信时延进行补偿，或在控制算法中引入时延裕度，确保控制指令的时效性和准确性。

不确定性处理：采用鲁棒模型预测控制（RMPC）或基于概率的随机优化方法，将新能源出力和负荷的不确定性描述为概率分布或区间范围，在优化决策中考虑这些不确定性，使控制策略具有较好的抗干扰能力和稳定性。

分布式控制与去中心化决策：对于大规模分布式资源，可采用分布式控制方法，减少对中心通信的依赖。各资源单元在一定规则下自主决策并进行局部信息交互，实现协同控制，提高系统的可靠性和可扩展性。

（四）经济性与调节性能的优化平衡

在满足频率调节性能要求的前提下，需考虑控制策略的经济性。区域协调控制器在进行资源分配时，应建立计及调节成本、设备损耗、用户舒适度（针对需求响应）等多目标的优化模型。例如，优先调用边际成本较低的调节资源，或在调节效果相近时选择更经济的组合。同时，通过对储能系统充放电策略的优化，减少深度充放电次数，延长其使用寿命，降低全生命周期成本。对于需求响应资源，合理设计激励机制，在保证用户参与积极性的同时，控制总体激励成本。通过经济性与调节性能的多目标优化，实现高比例新能源系统频率调节的可持续运行。

结语

高比例新能源接入输配电及用电系统，对频率稳定性提出了新的挑战。本文从惯量分布、调频能力、二次调频压力以及特殊场景影响等方面分析了系统频率特性变化，并探讨了源侧、网侧、荷侧及储能系统的调频关键技术路径。在此基础上，提出了多源协同频率调节的分层控制架构和多时间尺度协调控制策略，同时考虑了通信时延与不确定性的鲁棒控制方法，以及经济性与调节性能的优化平衡。这些研究成果为构建适应高比例新能源的输配电及用电系统频率调节体系提供了理论支撑和技术参考。未来，随着新型电力系统建设的推进，需要进一步深化相关研究，提升系统的安全稳定运行水平。

参考文献

- [1] 詹樟煜. 输配电与用电工程的安全管理[J]. 安防科技, 2020, 000 (003): P.94–94.
- [2] 彭田, 陈雪圆. 复合储能技术在主动配电网中的运用研究[J]. 电器工业, 2022 (8): 3.DOI: 10.3969/j.issn.1009-5578.2022.08.019.
- [3] 乐可定, 许慧. 新型输配电电网建设及新能源微电网并网研究[J]. 电力系统装备, 2021.
- [4] 王聪博. 含高比例分布式光伏的柔性直流配电系统保护研究[D]. 华北电力大学(北京), 2020.
- [5] 汪忠, 汪芷芷. 新型输配电电网建设及新能源微电网并网思考[J]. 华东科技: 综合, 2020 (3): 2.