

面向高比例可再生能源接入的电力系统规划框架研究

胡海瑞

内蒙古电力勘测设计院有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 全球能源结构转型与“双碳”目标推进下,风能、太阳能等可再生能源大规模接入电力系统。高比例可再生能源(HPRE)并网带来清洁效益的同时,也因其波动性、间歇性和弱支撑性,给传统电力系统安全稳定运行、经济调度及长期规划带来挑战,传统规划方法已难以适应新需求。本文构建面向HPRE的新型电力系统规划框架,先剖析HPRE带来的核心挑战,如源荷双侧不确定性加剧、系统灵活性资源短缺等,再梳理现有规划方法应对挑战的局限性。在此基础上,提出“多时间尺度协同、多维度耦合、多主体互动”的综合性规划框架,该框架以“灵活性”为核心,融合不确定性建模等关键要素,并阐述其在电源、电网、灵活性资源及综合能源系统规划四个层面的内涵与实施路径,为构建新型电力系统提供理论与实践指导。

关键词: 高比例可再生能源;电力系统规划;不确定性;源网荷储协同

引言

全球气候变化与能源安全压力下,发展可再生能源成各国共识。中国作为最大能源消费与碳排放国,提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标,电力系统低碳化转型是关键。按国家能源局规划,到2030年,中国风电、太阳能发电总装机将超12亿千瓦,可再生能源进入“高比例”阶段。但风电、光伏等可再生能源有随机性、波动性等特性。低渗透率时,系统靠预留备用容量平抑波动;高渗透率(20%-30%以上)时,其接入会改变系统特性与运行规律,使系统从“源随荷动”的确定性系统变为“源荷双侧随机”的复杂巨系统,传统静态、确定性规划范式面临失效风险。具体挑战体现在:安全上,出力波动引发电力电量平衡危机,削弱系统稳定能力;经济上,消纳需大量灵活性资源,增加成本,还可能造成资源浪费;规划上,传统方法难刻画特性与耦合关系,导致决策偏差。因此,亟需构建新规划理论与方法体系,本文将提出综合性规划框架,为新型电力系统建设提供参考。

1 高比例可再生能源接入对电力系统规划的核心挑战

构建高比例可再生能源接入(HPRE)的电力系统规划框架,需先明确其带来的核心挑战:

1.1 源荷双侧不确定性急剧增强

传统电力系统规划主要处理负荷侧的不确定性,通常采用历史数据统计或情景分析法进行预测。而在HPRE场景下,电源侧的不确定性成为主导因素。风电和光伏出力受气象条件(风速、辐照度、云层等)影响极大,其预测精度随时间尺度缩短而降低。这种“源荷双侧”叠加的不确定性,使得系统净负荷的预测难度和波动幅

度呈指数级增长。规划阶段若不能充分考虑这种不确定性,将导致规划方案在未来运行中频繁出现容量不足或过度冗余的问题。

1.2 系统灵活性资源严重短缺

灵活性是指电力系统在不同时间尺度上(秒级、分钟级、小时级乃至跨日)调节其供需平衡的能力。高比例可再生能源接入对系统灵活性提出了前所未有的高要求。一方面,需要快速爬坡能力来跟踪净负荷的快速变化;另一方面,需要长时调节能力来应对可再生能源的连续多日低出力(Dunkelflaute)或大发时段。传统上,系统灵活性主要依赖于燃煤、燃气等火电机组。然而,这些机组的调节能力有限,且深度调峰会损害其经济性和寿命^[1]。在HPRE背景下,仅靠传统电源已无法满足灵活性需求,亟需引入储能、需求侧响应、跨区互联、氢能等多种新型灵活性资源。如何在规划阶段前瞻性地评估灵活性需求,并合理配置各类灵活性资源,成为规划的核心难题。

1.3 电压与频率支撑能力弱化

传统同步发电机通过转子动能提供系统惯量,通过励磁系统提供动态无功支撑,是维持系统频率和电压稳定的关键。风电和光伏电站通过电力电子变流器并网,呈“低/零惯量”和“弱无功支撑”特性。同步机占比下降,系统整体惯量降低,面对大功率扰动时,频率变化率急剧增大,给保护和控制系统带来压力,局部地区还可能出现无功功率不足导致电压失稳。因此,规划阶段要纳入“构网型”技术、动态无功补偿装置及虚拟同步机等新型支撑能力。

1.4 网络潮流分布与阻塞问题复杂化

可再生能源资源多远离负荷中心，需远距离、大容量输电外送，改变了电网潮流分布，强化了“西电东送、北电南送”格局，部分输电断面重载甚至满载，阻塞风险加剧。同时，分布式可再生能源广泛接入，使配电网从“无源”放射状网络转变为“有源”主动配电网，潮流双向或多向流动，对配电网保护、控制和规划提出新要求。传统的基于单向潮流假设的电网规划方法不再适用。

2 面向高比例可再生能源的电力系统规划新框架

针对现有方法的不足和HPRE带来的挑战，本文提出一个“多时间尺度协同、多维度耦合、多主体互动”的综合性规划框架。该框架以“灵活性”为核心价值导向，通过四大支柱支撑整个规划体系。

2.1 核心理念：以“灵活性”为中心

在HPRE时代，“灵活性”取代了传统的“充裕度”和“安全性”，成为衡量电力系统规划优劣的首要指标。规划的目标不再是简单地满足最大负荷需求，而是确保系统在各种不确定性场景下，都具备足够的、多样化的、经济高效的调节能力来维持实时平衡。因此，整个规划框架的设计都应围绕如何量化、获取、配置和优化灵活性资源展开，将灵活性视为一种核心资产进行全生命周期的规划与管理。

2.2 关键支柱一：精细化不确定性建模与场景生成

这是新规划框架的数据基础。必须超越简单的点预测，采用概率预测、区间预测或场景集的方法来表征可再生能源出力和负荷的不确定性。可采用蒙特卡洛模拟、马尔可夫链、Copula函数、Wasserstein距离等方法，生成能够反映可再生能源时空相关性、极端天气事件以及预测误差的代表性场景集。并将生成的场景集嵌入到随机优化或鲁棒优化模型中，使规划方案能够在期望意义上或最坏情况下均表现良好，从而提高方案的鲁棒性和经济性，避免因对不确定性估计不足而导致的重大投资失误。

2.3 关键支柱二：源-网-荷-储多维协同优化

打破传统规划壁垒，将电源、电网、负荷侧资源和储能视为一个有机整体进行联合规划。这意味着在电源选址定容时，必须充分考虑电网的输电能力和阻塞情况，优先在靠近负荷中心或电网薄弱环节部署分布式可再生能源，以减少远距离输电压力。同时，应推动可再生能源与负荷在时空上的匹配，例如发展“源网荷储一体化”项目，或通过绿电交易引导负荷向可再生能源大发时段转移。将储能作为可再生能源的“标配”，通过配置储能平抑其出力波动，提升其可调度性^[2]。此外，还

需利用配电网中的分布式储能和可调节负荷作为灵活性资源，参与主网的调峰调频，形成分层分区的灵活性支撑体系，实现全系统资源的最优配置。

2.4 关键支柱三：市场机制与政策引导

规划不仅是技术问题，更是经济和制度问题。有效的市场机制可以内化外部性，引导社会资源高效配置。在规划模型中引入对未来市场价格（能量价格、辅助服务价格、容量价格）的预期，能够更真实地模拟不同市场主体的投资决策行为。因此，规划方案应能兼容并促进电力现货市场、辅助服务市场（特别是快速爬坡、转动惯量等新型服务）、容量市场以及绿证交易市场的建设。例如，通过设计合理的容量市场机制来保障长期投资回收，从而有效激励灵活性资源的投资，确保规划蓝图能够顺利落地。

2.5 关键支柱四：数字化与智能化技术赋能

充分利用大数据、人工智能、物联网、数字孪生等新一代信息技术，为规划提供强大工具。可以利用海量历史运行数据，通过机器学习算法更精准地预测可再生能源出力和负荷，为规划提供高质量输入。应用强化学习、深度学习等先进算法求解高维、非线性的协同规划模型，克服传统优化方法在复杂场景下的计算瓶颈。更重要的是，通过构建电力系统的数字孪生体，在虚拟空间中对规划方案进行全生命周期、多场景的仿真推演和评估，实现“规划即仿真”，从而在方案实施前就发现潜在问题并进行迭代优化，极大提升规划的科学性和前瞻性。

3 新框架下的具体规划内容

基于上述综合性框架，具体的规划工作可分解为以下四个相互关联的层面。

3.1 电源规划：从“保障容量”到“提供服务”

电源规划的目标应从单纯追求装机容量，转向追求提供多样化的系统服务（能量、容量、灵活性、惯量、无功等）。这要求构建以新能源为主体，水电、核电、气电、煤电（经灵活性改造）为支撑，生物质能、地热能等为补充的多元清洁能源体系。对于存量煤电机组，应大力推进深度调峰、快速启停等灵活性改造，并积极探索其与CCUS（碳捕集、利用与封存）技术结合的可能性，使其在低碳化进程中继续发挥重要的支撑作用^[3]。尤为关键的是，在系统的关键节点和薄弱区域，应部署具备构网能力的新能源电站或储能电站，使其能够主动提供电压和频率支撑，弥补传统同步机退出后的技术缺口，从源头上增强系统的韧性。

3.2 电网规划：从“被动适应”到“主动引导”

电网规划需从被动满足负荷增长，转变为主动引导能源资源优化配置和提升系统韧性。一方面，要继续加强特高压交直流混联骨干网架建设，以提升跨区资源配置能力，但必须紧密结合可再生能源基地的开发时序，进行精准投资，避免因过度超前而导致的资源浪费。另一方面，必须将配电网打造为承载分布式能源、储能和柔性负荷的核心平台，通过推广自动化、信息化、互动化技术，支持分布式资源的可观、可测、可控、可调，使其从被动的电力消费者转变为主动的参与者。此外，应广泛应用FACTS（柔性交流输电系统）、VSC-HVDC（基于电压源换流器的高压直流输电）等柔性输电技术，以增强电网的潮流控制能力和动态稳定性，使其能够灵活应对复杂多变的运行工况。

3.3 灵活性资源专项规划

将灵活性资源作为独立的规划对象，进行系统性布局。这首先体现在储能规划上，需要统筹考虑抽水蓄能、电化学储能、压缩空气储能、飞轮储能等不同类型储能的技术经济特性，对其规模、类型、位置和功能定位（削峰填谷、调频、备用、黑启动等）进行精细化规划。其次，需求侧响应规划同样重要，需要系统性地识别和聚合工业、商业和居民侧的可调节负荷资源，并设计有效的经济激励机制，将其纳入系统资源池，使其能够像传统发电机组一样参与电力平衡^[4]。最后，规划视野应超越电力系统本身，积极探索与热力、交通、氢能等系统的深度耦合，利用跨部门的储能效应（如储热、电动汽车电池、氢储能）来提供长周期、跨季节的灵活性，构建一个更为宏大和坚韧的能源灵活性体系。

3.4 综合能源系统（IES）规划

在园区、城市等局部区域，推动电、热、冷、气、氢等多能互补的综合能源系统规划，是应对高比例可再生能源挑战的重要策略。综合能源系统通过多能耦合和梯级利用，可以在内部消纳大量波动性可再生能源，

显著提升局部区域的能源利用效率和自平衡能力，从而有效减轻主网的消纳和调节压力。其规划重点在于优化多能耦合设备（如CHP、电锅炉、热泵、电解槽）的配置，并设计高效的能量管理策略，以实现多种能源形式间的最优转换与存储。同时，还需精心设计综合能源系统与主网的互动模式，使其既能作为主网的“稳定器”，又能从主网获取必要的支撑，形成良性互动的能源生态。

4 结语

高比例可再生能源接入是电力系统发展必然趋势与能源转型核心路径。本文分析了其带来的挑战及传统规划方法的不足，创新提出以“灵活性”为核心，融合不确定性建模等要素的综合性规划新框架。该框架注重系统性、前瞻性与适应性，能为未来电力系统科学布局提供指导，助力构建新型电力系统。不过，此领域研究仍有挑战，未来可从四方面深入：量化极端天气对系统影响并纳入规划模型以提升韧性；深化多学科交叉融合催生原创成果；建立规划方案实际运行评估反馈机制实现动态修正；借鉴国外经验并结合中国实际，形成具有中国特色的高比例可再生能源规划理论体系。

参考文献

- [1]张凯淳.高比例可再生能源现状下新型电力系统电源侧建设初探[J].科技经济市场,2025,(07):77-79.
- [2]尹鑫.含高比例可再生能源电力系统的输电网鲁棒扩展规划[D].华南理工大学,2024.DOI:10.27151/d.cnki.ghnl.2024.000154.
- [3]彭聪,黄官兵,黄伏林,等.高比例可再生能源集成下的新型电力系统频率稳定性分析[J].电子元器件与信息技术,2024,8(01):154-156+166.
- [4]张蓓.高比例可再生能源并网下电力系统安全风险评估与应急管理体系构建[J].大众标准化,2025,(24):125-127.