

新型电力系统下工程咨询对电网灵活性提升的技术经济评估研究

孙 喆

中国电力建设股份有限公司 北京 100000

摘要: 随着“双碳”目标的推进,以新能源为主体的新型电力系统正在加速构建。高比例可再生能源接入对电网的灵活性提出了更高要求。工程咨询作为电力系统规划与建设的关键环节,在提升电网灵活性方面发挥着重要作用。本文立足技术经济评估视角,剖析工程咨询在新型电力系统背景下提升电网灵活性作用机制,分析其技术路径与经济可行性,并提出优化建议,为电力系统转型提供决策支持。

关键词: 新型电力系统; 电网灵活性; 工程咨询; 技术经济评估; 可再生能源

在“碳达峰、碳中和”战略目标的推动下,我国能源结构正经历深刻变革。风能、太阳能等可再生能源发电占比持续提升,电力系统正从以化石能源为主向以新能源为主体的新型电力系统转型。然而,新能源出力呈现间歇性、波动性和不确定性,对电网的调节能力与运行灵活性构成严峻考验。电网灵活性是指系统在应对供需波动时,通过调节电源、负荷、储能及网络结构等资源形态,保障电力供需平衡和系统安全稳定运行的能力。提升电网灵活性已成为新型电力系统构建的核心任务之一。在此背景下,工程咨询机构凭借其在系统规划、技术评估、经济分析和项目管理方面的专业能力,成为推动电网灵活性提升的关键支撑力量。本文旨在探索工程咨询提升新型电力系统电网灵活性的技术经济评估路径,分析其在多能协同、储能配置、需求响应及优化调度等领域的技术支撑作用,并量化评价其经济可行性,为相关决策提供科学依据。

一、新型电力系统对电网灵活性的需求

新型电力系统具有“高比例可再生能源、高比例电力电子设备、高度智能化”的“三高”特征。在此背景下依赖火电调峰的传统调节模式难以为继,亟待建立多元化的灵活性资源调节体系。

首先,新能源出力的不确定性要求系统具备快速响应能力。例如,风电和光伏发电在天气突变时可能在短时间内大幅波动,需要系统具备分钟级甚至秒级的调节能力。其次,负荷侧电气化水平提升(如电动汽车、电采暖等)进一步加剧了负荷波动性,增加了系统调节难度。此外,跨区域电力输送规模扩大和分布式能源广泛

接入,使得电网运行方式更加复杂多变。特高压直流输电的“强直弱交”特性、分布式电源的“即插即用”特点,都对传统电网的电压控制、频率调节等核心功能带来挑战。因此,提升电网灵活性不仅涉及电源侧的灵活调节,还需统筹负荷侧、储能系统和电网结构优化,形成“源-网-荷-储”协同互动的综合解决方案。

二、工程咨询在提升电网灵活性中的技术路径

工程咨询机构在电网灵活性提升中发挥着“智库”和“桥梁”作用,主要体现在以下几个方面:

(一) 系统规划与方案设计

工程咨询机构在系统规划中发挥前瞻性与系统性作用,依托先进的电力系统仿真工具(如PSS/E、DIgSILENT、PLEXOS等),构建涵盖稳态、动态与暂态过程的多维度分析模型,全面评估高比例可再生能源接入对电网潮流分布、电压稳定性、频率调节能力及短路容量的影响。通过设定典型运行场景(如大风日、光伏出力骤降、负荷高峰等),识别系统在不同时间尺度下的灵活性缺口,精准定位关键瓶颈。在此基础上,咨询机构综合技术、经济与政策因素,提出差异化解决方案。如在新能源基地配套建设储能或燃气调峰电站,在受端电网优化网架结构以增强电力消纳能力。同时,结合“双碳”目标与电力市场改革趋势,将碳排放约束与灵活性服务价值纳入规划模型,推动电网向低碳化、智能化、弹性化方向发展,确保规划方案兼具科学性、前瞻性与可实施性。

(二) 储能系统配置与评估

储能作为提升电网灵活性的核心手段,其配置需

兼顾技术适配与经济可行。工程咨询机构基于项目应用场景（如调峰、调频、延缓扩容、黑启动等），对抽水蓄能、压缩空气储能、电化学储能等技术进行全生命周期性能评估，综合考量响应速度、循环寿命、能量效率与环境适应性。通过建立精细化运行仿真模型，模拟储能与新能源、负荷的协同互动，量化其在平抑波动、减少弃电、提升供电可靠性方面的贡献。在经济评估中，采用净现值（NPV）、内部收益率（IRR）和度电成本（LCOS）等指标，结合电价机制、辅助服务市场收益及政策补贴，评估不同配置方案的财务可行性。同时，咨询机构还协助设计储能参与电力市场的交易策略，推动其多重价值在现货、调频、备用等市场中兑现，为储能项目投资决策提供坚实支撑。

（三）需求响应与负荷管理

需求响应是激活用户侧灵活性资源、实现“源荷互动”的关键路径。工程咨询机构应用大数据手段进行负荷聚类等精细化分析，深入挖掘工业、商业及居民用户的可调节潜力，识别具备快速响应能力的负荷类型（可中断生产流程、智能空调系统、电动汽车有序充电等），设计价格型（如分时电价、实时电价）、激励型（如可中断负荷补偿）等多层次响应机制，构建用户响应行为预测模型，提升调度预测精度。同时，推动负荷聚合商（Load Aggregator）模式发展，整合分散资源形成“虚拟电厂”参与电力市场。通过技术经济评估，量化需求响应在降低峰荷、缓解电网阻塞、减少调峰成本方面的效益，为电网企业提供可操作的负荷管理方案，推动电力系统由“以发定用”向“供需协同”转型。

（四）多能互补与综合能源系统设计

在“源-网-荷-储”一体化发展趋势下，综合能源系统（IES）成为提升系统灵活性的重要载体。工程咨询机构通过构建电、热、冷、气多能流耦合模型，分析不同能源转换设备（如热电联产、电锅炉、吸收式制冷机、电解槽）的运行特性与协同潜力，优化系统结构与运行策略。在城市新区、产业园区等典型场景中，咨询机构可设计“光伏+储能+冷热电三联供+氢能”等多能互补系统，实现能源的梯级利用与时空转移，显著提升能源利用效率与系统调节弹性。通过多目标优化算法，在满足供能可靠性的前提下，最小化系统运行成本与碳排放。同时，评估IES作为灵活性资源参与电网调节的能力，推动其与主网协同调度，助力构建安全、高效、低碳的现代能源体系。

三、技术经济评估方法与模型构建

为科学评估工程咨询所提出的灵活性提升方案，需构建综合的技术经济评估体系。常用方法包括：

（一）成本效益分析（Cost-Benefit Analysis, CBA）

成本效益分析是评估灵活性资源投资价值的核心方法，需基于全生命周期视角，涵盖资本支出（CAPEX）、运营维护成本（OPEX）、灵活性服务收益、系统可靠性提升效益及碳减排收益等。关键指标包括净现值（NPV）、内部收益率（IRR）和投资回收期（Payback Period）。例如，在评估电池储能系统时，除考虑初始投资外，还需量化其参与调频辅助服务、峰谷套利及延缓电网升级的潜在收益。此外，需引入影子电价、碳价等外部性因素，以更全面地反映项目的社会经济价值。

（二）多目标优化模型

灵活性资源的优化配置需平衡多个相互冲突的目标，如经济性（成本最小化）、技术可行性（调节能力最大化）和低碳性（碳排放最小化）。可采用混合整数线性规划（MILP）或随机规划（Stochastic Programming）方法构建优化模型。例如，在区域电网灵活性规划中，可建立以系统总成本最小为目标，同时约束可再生能源消纳率、频率调节能力及碳排放上限的优化问题，并通过Pareto前沿分析权衡不同目标间的取舍。

（三）风险评估与敏感性分析

电力市场政策、燃料价格波动及技术进步等因素可能显著影响灵活性投资的经济性。为提升决策稳健性，需采用蒙特卡洛模拟（Monte Carlo Simulation）量化关键参数（如电价、容量补贴、储能循环寿命）的不确定性影响，并计算风险价值（VaR）或条件风险价值（CVaR）。例如，燃气机组灵活性改造的经济性高度依赖气价波动，需通过情景分析评估其在低碳转型不同阶段的适用性。

（四）全生命周期评估（Life Cycle Assessment, LCA）

为满足碳中和目标，需从全生命周期视角评估不同技术路径的碳排放强度、资源消耗及环境外部性。例如，虽然锂电储能具有较高的循环效率，但其制造过程中的锂、钴等关键矿产开采可能带来生态负担；而抽水蓄能虽具备长寿命和低排放优势，但受地理条件限制。LCA分析可结合碳足迹核算与多标准决策分析（MCDA），为绿色低碳技术选择提供依据。

四、案例分析：某省级电网灵活性提升项目

以我国东部某能源转型先行省份为例，该省规划在

“十四五”期间将风电、光伏装机占比提升至40%，但随之而来的新能源波动性与系统调峰压力日益凸显。工程咨询机构受电网公司委托，开展电网灵活性提升专项研究。通过高精度时序生产模拟与多场景安全校核，发现现有火电机组调节能力已接近极限，午间光伏大发时段存在严重“鸭型曲线”问题，最大峰谷差突破2000万千瓦，年弃风弃光率一度超过8%。

针对这一挑战，咨询团队提出“储能支撑、需求侧响应、网架优化”三位一体的系统性解决方案：在西北部新能源集中区域配置1.5GW/3GWh电化学储能系统，实现日内功率平抑与晚高峰顶峰供电；在省内重点工业园区推广可中断负荷机制，聚合可调负荷资源约300MW；同步优化500kV主网潮流分布，增强跨区互济能力。经多维度技术经济评估，方案可提升系统有效调峰能力1200MW，年减少弃电约8亿千瓦时，相当于减排二氧化碳64万吨。项目全生命周期IRR达7.2%，静态投资回收期约9年，兼具良好的经济性与低碳效益。该案例充分体现了工程咨询在复杂能源转型背景下，通过科学建模、多技术集成与系统优化，推动电网向安全、高效、绿色、灵活方向发展的关键作用。

五、挑战与对策建议

尽管工程咨询在提升电网灵活性方面成效显著，但在实际推进过程中仍面临多重挑战。当前技术路径日益多样化，储能、需求响应、多能互补等方案并行发展，但缺乏统一的评估标准与量化指标，导致方案比选缺乏可比性，影响决策的科学性。同时，电力市场机制尚不健全，灵活性资源在调峰、调频等辅助服务中的价值难以通过市场充分兑现，投资回报机制不明确，制约了多元主体的参与积极性。此外，电网灵活性提升涉及规划、运行、市场、政策等多个专业领域，跨部门、跨机构协同难度大，数据壁垒突出，信息共享不畅，制约了系统性解决方案的设计与落地。为此，应加快建立统一的技术经济评估标准体系，涵盖投资成本、运行效益、碳排放等关键指标，推动行业规范化发展。要完善电力现货市场和辅助服务市场机制，建立合理的灵活性服务补偿机制，激励发电侧、用户侧和新兴市场主体积极参与系

统调节。工程咨询机构应加强与电网企业、科研院所的协同合作，整合技术资源与实践经验，提升综合服务能力。同时，应大力推动数字化转型，构建基于大数据和人工智能的智能评估平台，实现方案仿真、运行优化与风险预警的智能化支持，全面提升工程咨询在新型电力系统建设中的技术支撑能力和决策服务水平。

结语

综上所述，在新型电力系统背景下，电网灵活性提升是实现能源转型的关键环节。工程咨询机构凭借其专业技术能力，在系统规划、技术选型、经济评估和项目实施中发挥着不可替代的作用。通过科学的技术经济评估，工程咨询不仅提升了电网的运行效率与安全水平，也为投资决策提供了有力支撑。未来，随着电力系统复杂性持续增加，工程咨询需进一步融合数字化、智能化技术，拓展多能协同与综合能源服务，助力构建安全、高效、绿色、灵活的新型电力系统。

参考文献

- [1] 吴熙, 顾杰峰, 屠月海. 输变电工程全过程工程咨询业务组合模式研究[J]. 项目管理技术, 2020, 18(02): 57-62.
- [2] 秦纲, 张晖文. 湖南电网全过程工程咨询试点的实践与思考[J]. 建设监理, 2020, No.248(02): 18-20+26.
- [3] 沙俊强, 苗艺, 凌宇辰. 电网全过程工程咨询取费分析及统筹费的确定[J]. 建筑经济, 2019, 40(07): 63-65.
- [4] 廖晓虹. 电网全过程咨询项目中造价的管控要点[J]. 低碳世界, 2021, 11(12): 165-166.
- [5] 吴小丽. 全过程工程咨询组织架构与技术瓶颈效应宏观响应[J]. 公路, 2020, 65(03): 200-203.
- [6] 陈楚君. 电力工程咨询平台的建设及价值探索[J]. 科技与创新, 2018, No.105(09): 39-40.
- [7] 熊宁, 王伟, 李泰伟. 考虑本质安全的电网规划方案全寿命周期价值比选方法[J]. 南昌大学学报(理科版), 2020, 44(01): 81-86.