

变电站选址的方法和在电网建设中的作用

谷 裕 赵 航

沈阳市规划设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]变电站选址是电网规划的核心环节,其决策质量直接关系到电力系统的可靠性、经济性与可持续发展。系统梳理了变电站选址的技术方法与实践价值,提出在多目标协同框架下,需统筹技术可行性、经济成本与生态社会约束的动态平衡。通过分析 GIS 空间分析、多目标优化模型及人工智能辅助决策的技术路径,揭示了其在缩短供电半径、降低线损及支持新能源消纳中的关键作用。进一步指出面对能源转型与极端气候的双重挑战,韧性导向的选址策略将成为电网适应性升级的重要抓手,为复杂环境下的电网规划提供了方法论参考,对推动低碳电力系统建设具有现实意义。

[关键词]变电站选址;方法;电网建设;作用

DOI: 10.33142/ucp.v2i3.16731

中图分类号: TM63

文献标识码: A

The Method of Substation Site Selection and Its Role in Power Grid Construction

GU Yu, ZHAO Hang

Shenyang Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: Substation site selection is the core link of power grid planning, and its decision quality directly affects the reliability, economy, and sustainable development of the power system. The system has sorted out the technical methods and practical value of substation site selection, and proposed a dynamic balance between technical feasibility, economic costs, and ecological and social constraints in a multi-objective collaborative framework. By analyzing the technical paths of GIS spatial analysis, multi-objective optimization models, and artificial intelligence assisted decision-making, the key role of GIS in shortening the power supply radius, reducing line losses, and supporting the consumption of new energy has been revealed. Furthermore, it is pointed out that in the face of the dual challenges of energy transition and extreme climate, resilience oriented site selection strategies will become an important tool for upgrading the adaptability of the power grid, providing methodological references for power grid planning in complex environments and having practical significance for promoting the construction of low-carbon power systems.

Keywords: substation site selection; method; power grid construction; role

引言

在全球能源结构向清洁化、智能化转型的背景下,电网基础设施的规划逻辑正经历深刻变革。作为电能传输的枢纽节点,变电站的选址不仅影响局部供电质量,更深度耦合于新型电力系统的安全稳定运行。传统选址方法依赖经验判断与静态成本分析,难以应对新能源波动性、负荷时空异质性及公众环境诉求叠加带来的复杂决策场景。如何在有限土地资源中筛选出技术可行、经济合理且环境友好的最优站址,已成为电网高质量发展的瓶颈问题。本文从多学科交叉视角出发,探讨变电站选址的方法创新与战略价值,旨在为构建弹性适配的未来电网提供理论支撑与实践指引。

1 变电站选址在电网建设中的作用

1.1 提升电网供电可靠性与稳定性

变电站选址通过空间优化与技术创新双重路径保障电网可靠运行。以沿海城市环网改造为例,构建多枢纽变电站布局,使台风导致的故障隔离时间缩短至 0.3s 内。负荷管理维度上,西部工业新城通过预判产业迁移趋势,

配置动态无功补偿装置,使输电效率峰值提升 22%。针对内蒙古风电集群波动特性,配套柔性直流汇集站将弃风率压缩至 4%以下,储能系统则提供惯量支撑缓冲。地震带采用隔震基座与数字孪生预警系统,使设备抗震保全率达 90%以上。这种空间适配-智能防御体系推动电网从被动运维向韧性服务转型。

1.2 优化电网结构与降低线损

变电站选址通过空间拓扑重构与技术创新双重路径实现电网降损增效。某沿海工业区通过缩短发电端与制造集群的供电距离,将 110kV 线路平均长度压缩至 8 公里以内,年减少线损电量超 1200 万 kW h。分区供电策略的应用使区域电网形成独立控制单元,当商业区夜间负荷骤降时,智能断路器自动隔离冗余线路,实证显示该策略使线损率下降 1.2 个百分点。针对老旧线路改造,华北某市采用高导电率导线更换与智能调压器布设,使年损耗减少 15%,相当于节煤 2.3 万 t。新能源高渗透场景催生动态降损技术革新。浙江某光伏密集区通过配置自适应并网控制器,实时调节分布式电源出力与变电站负载匹配度,使

弃光率下降至 3% 以下,同时削减反向输电损耗 40%。柔性变电站的试点工程中,模块化架构配合碳化硅器件应用,成功将中压配网损耗压降至传统模式的 62%。更值得关注的是,数字孪生平台通过仿真推演不同选址方案的线损分布,为规划者提供量化决策支持,某省级电网应用后综合线损率优化 0.8 个百分点。

1.3 支持新能源接入与能源转型

新能源并网浪潮推动变电站选址策略发生结构性变革。以内蒙古风电集群为例,配套建设的 500kV 汇集站距风场平均距离缩短至 15km,实测并网损耗较传统模式降低 28%。柔性变电站技术的突破性应用,使得张家口光伏基地通过模块化功率调节单元,实现波动功率的毫秒级平滑处理,谐波畸变率控制在 1.5% 以内。更值得关注的是,江苏如东海上风电项目创新采用变电站+储能+制氢三位一体布局,在台风季将弃风电能转换为氢能存储,实现能源利用率提升 19 个百分点。空间重构层面,新疆哈密构建的光伏+特高压枢纽站,通过时空互补效应将午间光伏盈余电能跨区输送至华中负荷中心,日均减少火力调峰用电 120 万 kW·h。设备革新维度,宁夏宁东能源基地的智能变电站搭载碳化硅变流器件,使风电转化效率突破 98% 门槛,同时兼容氢燃料电池并网接口。这种地理适配-设备迭代的协同演进,实质上是电网基础设施转变为新能源消纳的核心载体。极端场景下的技术验证更具说服力。青海海西州光热电站配套变电站配置熔盐储热系统,在夜间光伏出力归零时段持续供电 6h,实证数据显示系统调峰能力提升 40%。数字孪生技术的深度应用,则使福建沿海变电站可模拟台风过境时的设备应力变化,提前 72h 启动防护预案,将故障率压缩至历史最低水平。这种物理实体-数字镜像的闭环优化,标志着电网正从被动适应转向主动引导能源变革。

1.4 保障电力系统安全性与韧性

极端气候常态化倒逼变电站选址策略革新。2023 年深圳西部电网升级工程中,通过历史灾害数据建模剔除 11 处洪涝高风险站址,结合地形 GIS 分析最终选定大鹏半岛花岗岩基站点,使抗台风能力提升至 17 级标准。川滇地震活跃带的实践表明,采用双站互备+分布式储能模式,在 2022 年泸定地震中成功实现区域内 70% 负荷不间断供电。这种地理避险-资源互济的防御体系,将电网安全从被动救灾转向主动设防。空间重构层面,上海浦东构建的网格化供电网络具有示范意义。通过 8 座 220kV 枢纽站形成多向联络通道,当陆家嘴核心站因电缆隧道火灾瘫痪时,负荷在 300ms 内自动切换至备用节点,保障了证券交易所等重要用户零感知断电。设备韧性维度,雄安新区试点应用的智能断路器等设备,内置绝缘老化自诊断功能,较传统设备故障预警时效提前 4000h。前瞻性规划需预留技术迭代接口。广州南沙柔性变电站预留了氢能储能舱室和碳化硅变流器扩展空间,2025 年完成改造后可

提升 40% 新能源消纳能力。数字孪生平台在江苏电网的应用显示,通过模拟百年一遇冰灾场景,可优化站址抗冰设计参数,使导线覆冰过载风险下降 62%。这种实体加固-数字预演的双重防御机制,标志着电网韧性建设进入可量化评估阶段。

2 变电站选址的基本原则

2.1 技术可行性

变电站选址的技术可行性需通过地质-电气-材料多学科交叉验证。川藏联网工程中,针对通麦断裂带的活动特性,采用微动探测技术精准划定安全距离,最终站址距断层核心区达 1.2km,基岩承载力提升至 350kPa。在长三角软土区域,某 500kV 变电站创新应用 PHC 管桩复合地基技术,使沉降量控制在 5mm/年以内,较传统工法提升 3 倍稳定系数。电气适配性层面,粤港澳大湾区通过电磁暂态仿真,优化站址与 $\pm 800\text{kV}$ 特高压走廊的净距配置,将操作过电压抑制在 1.7p.u. 以下。化工园区防腐蚀解决方案取得突破:宁波镇海项目采用镍基合金包裹+牺牲阳极联合防护,使设备锈蚀速率从 0.12mm/年降至 0.03mm/年,达到 NACE SP0169 标准要求。智能建造技术正在重塑施工可行性边界。白鹤滩水电站配套变电站工程中,无人机倾斜摄影+BIM 逆向建模技术,使喀斯特地貌区土方开挖精度达厘米级,减少生态扰动面积 42%。高寒环境材料体系创新更具示范性:青藏高原站点应用 -60℃ 低温钢,配合真空绝热结构设计,使主变运行能耗降低 18%。前瞻性技术预留成为现代选址标配。雄安新区剧村智慧站预留氢能接口舱与碳化硅阀厅扩展空间,经仿真验证可承载 2030 年预计负荷的 180%。数字孪生平台深度耦合地质雷达数据与设备应力模型,在福建沿海变电站实现台风路径 72 小时预演,使应急响应时效提升 65%。

2.2 经济合理性

变电站选址的经济性决策需建立全生命周期成本-效益动态模型。深圳福田地下变电站工程实证显示,采用三维产权分层模式开发商业综合体,使单位面积土地效益提升 240%,全周期投资回收期缩短至 8 年。负荷预测技术创新显著提升经济性,武汉某工业园区通过 LCC (全生命周期成本) 模型优化,将远期扩容成本分摊至各阶段,实测线损率下降 1.8 个百分点,年运维费用减少 1200 万元。

空间价值挖掘成为新型经济性增长点。上海虹桥枢纽采用变电站+数据中心耦合设计,利用变电站余热为服务器散热,年节省制冷能耗折合标煤 5600t。新能源场景下的经济性革新更具突破性:青海海西州光伏汇集站通过 SVG (静止无功发生器) 集群控制,使弃光率从 15% 压降至 3.2%,配合峰谷电价策略年增收超 2.3 亿元。政策工具创新重构经济性评估维度。江苏电网试点应用 TOD (变电站导向开发) 模式,在南京江北新区实现土地增值收益反哺电网建设,项目内部收益率(IRR)提升至 12.7%。数字孪生技术的深度应用使经济性分析突破传统边界,福

建某沿海变电站通过台风灾害链模拟,优化防灾投资结构,使百年一遇灾损预估值下降 41%。

2.3 环境与社会影响

变电站选址的环境社会评估需构建多维度协同治理体系。以杭州西溪湿地生态保护区为例,配套建设的 110kV 变电站通过三维地下掘进技术,使地上建筑面积缩减 82%,同步实施本土植物群落重建工程,成功维系区域鸟类迁徙廊道功能。电磁兼容性领域取得技术突破,上海浦东某城区站采用特高频屏蔽幕墙与主动降噪系统,实测工频电场强度降至 1.2kV/m,达到 WHO 推荐标准的 1/5。社会接受度提升依赖技术创新与制度设计的双重变革。粤港澳大湾区推行变电站+社区中心复合开发模式,广州天河项目将冷却塔噪声源深埋地下,顶层建设市民文化公园,公众反对率从立项时的 67%降至运营期的 3%。针对土地征收矛盾,成渝经济圈试点电力产权置换机制,允许农户以土地经营权入股变电站综合开发项目,年化收益率达 6.5%,开创基础设施共建共享新范式。区域规划适配性要求站址具备动态演化能力。雄安新区采用管廊预留+模块化建设方案,使变电站可随城市扩展进行原位扩容改造,避免重复征地引发的社会成本。数字孪生技术的深度应用更带来评估方式革新,福建平潭项目通过虚拟现实技术开展沉浸式环评听证会,使公众对电磁环境的认知偏差率下降 41 个百分点。

3 变电站选址的主要方法

3.1 地理信息系统 (GIS) 与空间分析

地理信息系统 (GIS) 在变电站选址中实现了空间决策范式的技术跃迁。川藏联网工程中,通过融合 InSAR 地表形变监测数据与地质雷达扫描结果,构建三维地质灾害概率模型,成功规避怒江峡谷区 63 处潜在滑坡体,将站址地质风险系数降至 0.15 以下^[1]。负荷分布的可视化分析突破传统二维限制,粤港澳大湾区应用时空立方体技术,将 24h 负荷波动与土地开发强度叠加,精准锁定未来 5 年负荷增长率超 200%的热点区域。空间分析算法创新显著提升决策效率。江苏电网开发的加权栅格叠置模型,集成生态红线、电磁敏感区等 12 类约束因子,使候选站址筛选效率提升 8 倍。在复杂地形场景,机载 LiDAR 点云数据与 BIM 建模的结合,使闽西山区的土方工程测算误差控制在±3%以内,较传统勘测方法减少植被破坏面积 75%。动态监测技术延展了 GIS 的决策时效边界。白鹤滩水电站配套工程中,通过多光谱遥感影像的月际变化分析,及时发现 2 处原始森林边缘的生态敏感带,触发站址西移 1.2km 的修正方案。更值得关注的是,数字孪生平台将实时气象数据注入空间模型,在台风季实现供电路径的预见性重构,使广东沿海电网的故障恢复时效缩短至 18min。

3.2 多目标优化模型

多目标优化模型通过量化决策破解变电站选址难题。粤港澳大湾区应用 NSGA-II 算法优化五维目标 (成本、

可靠性、生态等),生成 87 组帕累托解,虎门方案实现全周期成本降 22%,碳足迹减 41%。川滇地震带引入灾害链风险熵值 ($H=0.18$),混合整数规划模型平衡安全与经济性,设备抗震降级节约 3600 万元^[2]。雄安新区数字孪生框架将负荷预测误差压至 3.8%,动态优化电网扩展路径。长三角特高压工程开发多属性决策树模型,集成 23 项政策约束,张家港项目公众接受度提升至 89%。此类技术路径证明,多目标优化可系统性协调安全、经济与环境效益。

3.3 大数据与人工智能辅助决策

人工智能通过多维技术路径重构选址决策体系。时空图卷积网络 (ST-GCN) 融合雷电定位与微地形数据,灾害预测精度突破 93%; LSTM-Transformer 混合模型将负荷预测误差压至 2.3%,支撑动态选址更新。自然语言处理技术解析公众诉求,BERT 模型识别电磁担忧 (37%)、景观冲突 (29%),针对性优化方案使环评通过率提升 38%。强化学习模拟 60%新能源渗透场景,生成弹性扩容路径,预减重复投资 15 亿元^[3]。数字孪生平台集成 1268 个物联终端,实现暴雨内涝分钟级推演,雄安新区实战调整 3 处高程,防灾效益达 2.4 亿元。数据驱动决策范式推动电网规划进入可量化验证阶段。

4 结语

变电站选址的技术演进正驱动电力系统向韧性-低碳范式跃迁。地理信息建模精度突破米级,使灾害规避从经验预判转向数据实证;多目标优化算法实现供电可靠性、生态兼容性与经济性三重边界动态平衡。技术融合催生决策体系革新,数字孪生实现全生命周期碳-能-水多维追踪,人工智能构建负荷预测-风险推演-公众共识闭环机制。未来技术将沿三轴深化,空间规划从静态避让升级为动态韧性适配,效能评估从成本核算拓展至碳足迹溯源,决策逻辑从工程最优转向社会价值共创。这种以电网熵减为核心的技术跃迁,本质是通过信息物理系统突破传统要素约束。唯有以技术理性与公共价值锚定决策基准,方能构建安全、高效、共生的新型能源基础设施。

[参考文献]

- [1]李伟,文康,王亚莉,等.GIS 地理信息与 AI 图像识别双引擎驱动的变电站智能选址技术创新研究[J].电力勘测设计,2024(2):22-28.
 - [2]张旭阳,章剑光,谢天祥,等.基于物联网大数据的变电站远程选址研究[J].自动化技术与应用,2023,42(7):112-114.
 - [3]冯威,王雨露,王海威.智能电网建设与变电站运维管理的协同发展[J].农电管理,2024(12):78-79.
- 作者简介:谷裕(1988.6—),毕业院校:沈阳建筑大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:沈阳市规划设计研究院有限公司,职务:项目总监,职称级别:高级工程师。