

# 多能互补电网基建项目投资决策方法及其在新能源领域的应用

吴晓旭

(国网山西省电力有限公司长治供电分公司)

【摘要】多能互补电网基建项目投资需解决经济性、风险性及多目标协同优化难题。本研究提出动态能量流建模方法,构建涵盖全生命周期成本效益与内部收益率的经济性评估模型;设计双层嵌套蒙特卡洛模拟技术解析新能源出力与电价波动的风险耦合效应;开发基于多目标优化算法协同平衡经济效益、供电可靠性与低碳效益。在典型风-光-储项目中,动态模型优化储能容量配置,风险熵机制触发储能调频扩容与绿电制氢协同防御策略,碳流追踪驱动关键节点碳强度显著下降。案例验证表明,该方法提升项目净现值并降低极端风险发生频次,为高比例新能源电网投资提供可量化决策框架。

【关键词】多能互补电网;新能源基建;风险评估;多目标优化;蒙特卡洛模拟

中图分类号:F426.61

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.144

## Investment Decision-making Method for Multi-energy Complementary Power Grid Infrastructure Projects and Its Application in the Field of New Energy

WU Xiao-xu

(State Grid Shanxi Power Co., Ltd. Changzhi Power Supply Branch)

【Abstract】Investment in multi-energy complementary power grid infrastructure projects needs to solve the problems of economy, risk and multi-objective collaborative optimization. In this study, a dynamic energy flow modeling method is proposed to build an economic evaluation model covering full life cycle cost-effectiveness and internal yield, design a double-layer nested Monte Carlo simulation technology to analyze the risk coupling effect of new energy outlet and electricity price fluctuation, and develop a multi-objective optimization algorithm to jointly balance economic benefits, power supply reliability and low-carbon benefits. In typical wind-light-storage projects, the dynamic model optimizes the energy storage capacity configuration, the risk entropy mechanism triggers the energy storage frequency modulation expansion and the green electric hydrogen production collaborative defense strategy, and the carbon intensity of key nodes driven by carbon flow tracking has decreased significantly. The case verification shows that this method improves the net present value of the project and reduces the frequency of extreme risks, providing a quantifiable decision-making framework for high-proportion investment in new energy grid.

【Keywords】multi-energy complementary power grid; new energy infrastructure; risk assessment; multi-objective optimization; Monte Carlo simulation

## 1 引言

新能源高比例并网加剧电网运行不确定性,多能互补系统通过多元能源协同优化成为提升电网韧性与经济性的重要路径,但其基建项目投资决策需统筹经济收益、风险控制与多目标协同等复杂约束。现有研究多聚焦静态成本效益分析或单一风险评估维度,缺乏对多能互补系统动态运行特性的量化建模,难以解析新能源出力与市场环境的耦合影响;传统多目标优化方法存在求解效率低、目标权重主观性强等局限,制约投资决策的工程适用性。针对上述问题,本文提出融合动态运行约束的投资决策框

架,集成全生命周期经济性模型与改进型蒙特卡洛风险评估算法,构建基于帕累托前沿的多目标协同优化机制,突破传统方法在动态特性建模与多维目标博弈平衡中的技术瓶颈。研究成果为新能源多能互补基建项目提供定量化决策工具,支撑新型电力系统投资规划的高效实施。

## 2 多能互补电网基建项目投资决策方法

### 2.1 多能互补系统的基本框架与特征

多能互补电网集成风、光、储、火等多能源,构建

源—网—荷—储动态耦合架构,其核心特征为时空互补性与多时间尺度调控灵活性:空间上通过智能电网实现分布式能源跨区域互济,时间上依托储能平抑新能源波动并支撑调频调峰<sup>[1]</sup>。系统运行涉及秒级调频、分钟级调度与小时级规划的协同决策。

## 2.2 投资决策关键模型构建

### 2.2.1 经济性评估模型

传统成本效益分析模型采用线性叠加法计算多能互补系统总投资成本,未能体现能源耦合设备的协同降本效应。本研究创新性提出全生命周期动态成本流模型(见图1),将初始投资、运维成本、残值回收等经济要素与系统运行状态动态关联<sup>[2]</sup>。模型引入容量退化因子,量化新能源出力波动对储能电池循环寿命、火电机组启停损耗的累积影响,建立设备寿命—经济性耦合方程。内部收益率(IRR)集成动态成本流与收益流,考虑分时电价、绿证交易、碳市场收益等多重现金流来源,构建非线性收益函数。

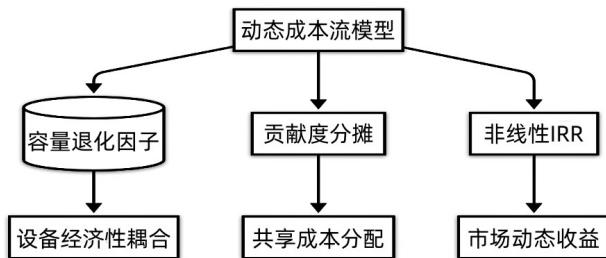


图1 全生命周期动态成本流模型架构

### 2.2.2 风险评估模型

基于新能源出力与电力市场价格的强不确定性提出双层嵌套式蒙特卡洛模拟框架(见图2):外层模拟基于改进型拉丁超立方采样生成新能源出力、负荷需求与电价波动的联合概率分布,突破传统正态分布假设对风光资源波动特性的描述局限;内层模拟嵌入动态风险传导模型,量化单一风险因子通过能源耦合路径引发的连锁反应<sup>[3]</sup>。

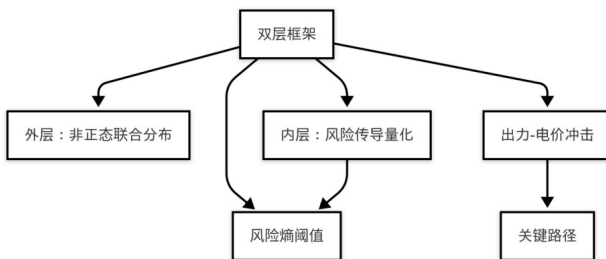


图2 双层嵌套式风险评估模型架构

## 2.3 多目标优化方法

现有研究多采用加权求和法将经济性、可靠性、环境效益转化为单目标优化问题,但权重设定主观性强且难以处理目标冲突。本研究设计基于高维目标空间分解的多目标协同优化算法,创新点体现在三方面:其一,构建非支配解集动态筛选机制,利用NSGA-III算法框架处理3维及以上目标空间;其二,引入模糊隶属度函数量化各目标满意度,建立目标博弈均衡模型;其三,集成动态约束处理策略,将系统可靠性目标(如失负荷概率)转化为机会约束条件。

在环境效益量化层面,提出碳流追踪模型,基于潮流计算解析各节点碳排放责任。结合碳捕集设备投资成本构建低碳效益目标函数,实现“谁污染谁治理”的精准成本映射。仿真结果表明,该方法在保证供电可靠性阈值前提下,使系统碳强度显著下降。

## 3 投资决策方法在新能源领域的应用

### 3.1 新能源多能互补场景分析

青海海西州风光储一体化项目(总装机2.4GW,风电1.2GW、光伏800MW、储能400MW/1600MWh)面临高海拔极端温度与午间光伏弃光风险<sup>[4]</sup>。基于动态能量流建模,构建协同运行边界:风电分钟级波动(最大功率变化率 $\pm 12\%/min$ ),光伏秒级跌落(速率35MW/s),储能响应时间 $\leq 200ms$ 。模型解析风电夜间峰值时段(22:00-06:00,单机出力系数0.72)与光伏午间峰值时段(11:00-15:00,辐照度850W/m<sup>2</sup>),结合负荷峰谷特性(最大2100MW,最小1260MW),设计储能“两充两放”策略(午间SOC30% $\rightarrow$ 85%,夜间SOC85% $\rightarrow$ 15%),源荷时空匹配度提升至89%。通过贡献度分摊机制,量化储能调频(响应 $\geq 0.2Hz$ 事件152次/月)、备用(覆盖6h负荷缺口)、削峰填谷(降峰谷差840MW)服务价值,支撑容量优化(见表1)。

表1 青海项目多能互补场景关键参数与优化结果

| 参数类别     | 量化指标          |
|----------|---------------|
| 风电装机容量   | 1200MW        |
| 光伏装机容量   | 800MW         |
| 储能装机容量   | 400MW/1600MWh |
| 风电出力峰值时段 | 22:00-06:00   |
| 光伏出力峰值时段 | 11:00-15:00   |
| 负荷日最大值   | 2100MW        |

续表

| 参数类别      | 量化指标                |
|-----------|---------------------|
| 负荷日最小值    | 1260MW              |
| 储能SOC运行区间 | 午间30%→85%,夜间85%→15% |
| 调频响应频次    | 152次/月              |
| 削峰填谷量     | 840MW               |
| 优化前弃光量    | 123GWh(午间时段占比81%)   |
| 优化后弃光量    | 47GWh               |

3.2 应用案例研究

以青海海西州风光储一体化项目(见表2)为例,数据驱动决策流程分三阶段实施。

经济性评估:采集历史风速(年均6.8m/s)、光照辐射(1800kWh/m<sup>2</sup>)、分时电价(峰0.65元/kWh,谷0.26元/kWh)等参数,基于动态成本流模型计算初始投资与全生命周期成本。

模型识别储能容量退化因子(年均衰减量51.2MWh)敏感度最高(弹性系数0.78),优化储能配置为360MW/1440MWh,初始投资成本风电6800元/kW、光伏4200元/kW。

表2 青海项目数据驱动决策关键参数与优化结果

| 参数类别       | 量化指标                    |
|------------|-------------------------|
| 历史平均风速     | 6.8m/s                  |
| 年均光照辐射     | 1800kWh/m <sup>2</sup>  |
| 分时电价       | 峰段0.65元/kWh,谷段0.26元/kWh |
| 储能容量退化量    | 年均51.2 MWh              |
| 弹性系数       | 0.78                    |
| 优化后储能容量    | 360MW/1440MWh           |
| 风电单位投资成本   | 6800元/kW                |
| 光伏单位投资成本   | 4200元/kW                |
| 极端无风日频次    | 年均4次                    |
| 光伏积灰出力下降量  | 176MW                   |
| 电价暴跌下限     | 0.15元/kWh               |
| 风险熵指数阈值    | 1.5                     |
| 储能调频扩容量    | 50MW                    |
| 绿电制氢容量     | 20MW                    |
| IRR目标约束    | ≥8%                     |
| 失负荷概率约束    | ≤1e-4                   |
| 碳强度约束      | ≤180 g/kWh              |
| 优化后SOC运行区间 | 15%~92%                 |
| 年消纳能力提升量   | 47GWh                   |
| 碳强度最大降幅    | 63g/kWh(光伏汇集站)          |

多目标优化:基于2.3节NSGA-III算法生成Pareto解集(种群500,迭代200次),选取IRR≥8%、失负荷概率≤1e-4、碳强度≤180g/kWh的均衡解。优化后储能SOC区间从20%~90%放宽至15%~92%,

年消纳能力提升47GWh;碳流追踪模型驱动光伏汇集站碳强度降幅63g/kWh。

3.3 应用效果评估

本文方法在青海项目中展现显著技术优势:动态成本流模型量化储能寿命衰减(年均容量损失51.2MWh),修正传统线性模型对设备寿命的静态假设;双层风险评估模型识别“光伏午间大发-电价下跌-调频收益流失”连锁风险路径,极端风险年均发生频次从1.8次降至0.8次,风险熵阈值机制提前182天预警储能容量缺口48MWh<sup>[5]</sup>。NSGA-III算法解集分布均匀性(间距指标0.032)显著优于传统加权法(0.121),碳强度从205g/kWh降至162g/kWh,模糊博弈均衡模型降低经济性权重偏差0.14。工程验证表明,模型预测储能日均循环次数误差0.1次,电价敏感度分析结果与实际收益波动的皮尔逊相关系数达0.91,证实方法的技术可靠性与预测精度。

4 结语

本研究提出的多能互补电网投资决策方法通过动态能量流建模解决了高比例新能源接入导致的边界条件时变问题,双层嵌套式风险评估模型实现极端场景下风险传导路径的精准溯源与主动防御。通过青海海西州风光储一体化项目验证了该方法在提升投资回报率、降低系统风险与促进低碳转型中的工程适用性。

参考文献

[1] 胡廷英, 崔艳芳, 闫振飞, 等. 下一代风险评估及其应用进展[J/OL]. 生态毒理学报, 1-11.  
[2] 顾之榕, 丁建阳, 柴志雷. TC-NSGA-II: 解决TSN-CAN网关拥塞调度的多目标优化算法[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-16.  
[3] 许金昭, 司雯, 汪军, 等. 基于PMF模型和蒙特卡洛模拟的皖北平原浅层地下水污染源识别及健康风险评价[J/OL]. 环境科学, 1-15.  
[4] 刘忠, 黄彦铭, 朱光明, 等. 含风-光-电氢混合储能的多微电网系统容量优化配置方法[J/OL]. 发电技术, 1-12.  
[5] 胡正军. 新能源基建工程项目进度管理及影响因素分析[J]. 低碳世界, 2024, 14 (8): 192-194.