

新型电力系统下基于多目标优化的源网荷储协同规划方法研究

加康

临汾汾能电力科技试验有限公司, 山西 临汾 041000

DOI: 10.61369/SDME.2025330001

摘 要 : 在“双碳”战略与全球能源转型背景下, 新型电力系统更加追求清洁、低碳、安全与高效。新能源的大规模介入、负荷柔性化转型以及储能技术的发展, 推动电力系统向源网荷储协同互动方向转变。源网荷储协同规划是优化资源配置、提升系统韧性、降低综合成本的关键手段, 需要考虑经济性、安全性、低碳性等目标。本文基于新型电力系统的需求与源网荷储协同规划现状, 探究新型电力系统下源网荷储协同规划多目标体系构建及求解思路, 期望能根据当前规划过程中存在的问题提出改进路径, 为新型电力系统下能源储协同规划的实践应用提供有益参考。

关 键 词 : 新型电力系统; 源网荷储; 多目标优化; 协同规划; 改进鲸鱼优化算法

Research on Source-Grid-Load-Storage Coordinated Planning Method Based on Multi-Objective Optimization Under the New Power System

Jia Kang

Linfen Fenneng Electric Power Technology Test Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041000

Abstract : Against the background of the "dual carbon" strategy and global energy transition, the new power system pursues higher standards of cleanliness, low carbon, safety and efficiency. The large-scale integration of new energy, the flexible transformation of loads, and the development of energy storage technologies have promoted the transformation of the power system towards the direction of source-grid-load-storage coordinated interaction. Source-grid-load-storage coordinated planning is a key means to optimize resource allocation, improve system resilience, and reduce comprehensive costs, which needs to consider objectives such as economy, safety, and low carbon. Based on the requirements of the new power system and the current status of source-grid-load-storage coordinated planning, this paper explores the construction of a multi-objective system and the solution ideas for source-grid-load-storage coordinated planning under the new power system. It is expected to propose improvement paths according to the existing problems in the current planning process, providing useful reference for the practical application of energy storage-load coordinated planning under the new power system.

Keywords : new power system; source-grid-load-storage; multi-objective optimization; coordinated planning; improved whale optimization algorithm

引言

风能、光伏等可再生能源规模化并网、电动汽车、数据中心等新型负荷快速增长, 储能技术与虚拟电厂、智能调控等技术逐渐融合, 种种趋势推动传统电力系统在结构形态、运行模式等方面产生变革。国家能源局发布的《新型电力系统发展蓝皮书》明确提出, 需强化源网荷储多环节协同优化, 提升新能源消纳能力与系统稳定性。源网荷储系统发展是新型电力系统的核心运行模式, 其通过打破源、网、荷、储四个环节的割裂状态, 并使各环节协同工作, 优化资源配置。源网荷储协同规划是协同发展的前提, 影响资源配置的合理性、系统运行的稳定性以及综合效益的最大化。当前源网荷储协同规划仍面临一些困境, 本文结合多目标优化理论与智能算法改进思路, 构建“经济成本-新能源消纳-系统稳定”三位一体的协同规划目标体系, 建立多约束理论模型, 提出改进智能算法求解思路, 期望为源网荷储一体化项目规划提供理论支撑与实践参考。

一、相关理论与研究现状

（一）源网荷储协同规划的核心内涵

源网荷储协同规划是指在新型电力系统框架下，以全生命周期理论为基础，统筹电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧的能源配置与运行优化，进而实现能源供需平衡的系统性规划方法。其特征主要为以下三方面：

一是目标多元化，规划目标不再局限于单一的导向，而是将经济可行性、环境友好性、系统安全性等需求纳入统一规划框架中，经多目标耦合分析追求整体效益的最优水平；二是主体互动化，即各参与主体要联动起来，源、网、荷、储各环节不再是独立运行，而是可以依靠信息交互实现双向联动。负荷主动参与到系统调节中，储能也不再单纯地承担储备功能，而是承担起能量缓冲、稳定调节与市场参与的多重角色；三是约束系统化，规划过程中需考量各类关键因素，如新能源波动性、电网传输极限、负荷响应能力、储能充放电特性，构建贯穿不同时间尺度的系统性约束逻辑^[1]。

（二）国内外研究现状

国外在源网荷储协同规划领域的研究起步较早，并取得一些具有代表性的成果。美国 PJM 电力市场搭建储能调频服务相关机制，为负荷侧资源参与电网协同优化搭建基础框架；德国 Enercity 等企业探索“分布式能源 + 储能”模式，聚焦本地化能源协同；欧盟更关注跨国能源协同研究，推动多能互补系统的标准化建设，为跨境源网荷储协同提供参考。

国内该领域近些年发展势头迅猛，在理论建模、算法改进等方面取得一定进展。部分学者提出基于多目标优化算法的源网荷储协调调度方法，将经济成本与新能源消纳作为目标，搭建初步模型^[2]；也有研究对比“源 - 储”“源 - 荷”“源网荷储”三种协同模式的优势与不足，进一步验证了全环节协同的优势；另有学者还通过构建源网荷储协同控制模型，提出了基于节点分裂法的模型解耦思路，为复杂系统的优化求解提供了新思路。

尽管前人已经展开研究，但是相关研究仍存在不足。一是多目标体系构建不够全面，对新能源消纳、经济成本与系统稳定的耦合关系量化不足；二是时空尺度下各类相关约束缺乏系统梳理，约束条件设置不够全面；三是优化算法的收敛性与全局搜索能力有待增强以适应复杂场景下的规划需求^[3]。本文针对上述问题，开展新型电力系统下多目标协同规划方法研究。

二、新型电力系统下源网荷储协同规划多目标体系构建

（一）规划目标的设计

结合新型电力系统清洁低碳、安全高效的要求，构建三大核心目标，形成多目标优化体系：

1. 经济成本最小化

经济成本最小化是源网荷储协同规划的基础目标，其核心是涵盖源网荷储全生命周期的投入与运行开销，保障资源配置的经

济可行性^[4]。从构成来看，经济成本包括初始投资成本、运维成本、能源购买成本、弃能损失成本四大类。

初始投资成本包含新能源电站建设、电网改造等一次性投入的分摊；运维成本包括能源元件检修、储能设备维护等持续性支出；能源购买成本则包括主网购电、天然气等化石能源采购的相关费用；弃能损失成本则是指未被消纳的风电、光伏资源造成的经济损失，其核心依据是能源资源的稀缺性与机会成本原理。

2. 新能源消纳最大化

新能源消纳最大化是指通过多环节协同优化，提升风电、光伏等可再生能源的就地消纳水平，减少弃风弃光现象。新能源消纳能力的提升依赖于三个关键路径：

一是通过储能系统的时空平移作用，平抑新能源出力波动性，实现能源供给与负荷需求在时间维度的精准匹配^[5]；二是通过电网的柔性调控能力，优化潮流分布，拓展新能源的输送通道；三是通过负荷侧的需求响应机制，引导用户调整用电行为，实现新能源出力与负荷需求的适配。

3. 系统稳定性最优

系统稳定性最优是电力系统安全运行的基本保障，其主要是通过源网荷储各环节的联动与调控，持续维持电网电压、频率的平稳状态，同时不断提升电力供应的可靠程度^[6]。

系统稳定性主要通过三个指标表征：

一是电压稳定性：各节点电压在允许范围内波动，避免因新能源出力突变或负荷剧烈变化引发电压骤升、骤降等异常情况，确保各类用电设备的正常运行；

二是频率稳定性：维持系统频率在额定值附近，通过源侧出力调节、储能快速响应与负荷柔性适配的协同作用，应对新能源波动与负荷突变带来的冲击^[7]；

三是供电可靠性：通过优化电网结构、强化设备运维与完善应急响应机制，减少停电时间与停电范围，保障电力持续供应。

（二）约束条件的构建

为保障协同规划方案的可行性与安全性，基于新型电力系统的运行特征，构建多维度约束条件框架：

1. 能源元件约束

电源侧出力需遵循技术运行极限约束，即各类电源的实际出力不得超出其最小与最大技术限额。例如火力发电机组的最小稳定出力、风力发电机组的切入与切出风速限制等，让能源元件在安全运行区间内发挥作用。

2. 电网安全约束

输配电网需满足潮流约束与电压约束。潮流约束是为确保输电线路的传输功率不超过其热稳定极限，一旦线路过载便有可能引发安全隐患。电压约束是为维持各节点电压在额定值的允许偏差范围内，保障电能质量与设备正常运行^[8]。

3. 负荷响应约束

柔性负荷的响应行为需遵循调节能力极限约束，即可转移负荷、可削减负荷、可调节负荷的调整幅度不得超出其技术允许范围。

4. 储能运行约束

储能设备的运行需满足充放电功率约束与容量约束。充放电功率约束核心是储能设备的充放电速率不得超出其技术极限，防止因过度充放电影响设备的使用寿命^[9]；容量约束因为储能设备的剩余容量需维持在安全范围内，确保其具备足够的调节空间应对新能源波动与负荷变化。

三、基于改进智能算法的多目标协同规划求解思路

（一）多目标权重确定的方法

多目标权重的确定是协同规划的关键环节，直接影响规划方案的整体效益。本文采用粗糙集理论作为权重确定的核心方法，其优势在于能够基于客观数据进行权重赋值，规避主观经验带来的偏差^[10]。

粗糙集理论的应用逻辑主要包括三个步骤：

1. 构建决策信息系统，以历史运行数据为样本，将多目标函数值作为条件属性，系统综合性能作为决策属性。
2. 计算各条件属性对决策属性的依赖度，依赖度越高表明该目标对整体效益的影响越大；
3. 基于依赖度计算各目标的权重系数，实现权重的客观赋值。

（二）改进智能算法的理论设计

针对传统智能算法在多目标优化中存在的收敛速度慢、易陷入局部最优等问题，本文基于鲸鱼优化算法的基本原理，引入非线性权重系数进行改进，形成适配源网荷储协同规划的求解算法。

鲸鱼优化算法是模拟鲸鱼的捕食行为，通过包围捕食、气泡网捕食、随机搜索三种策略实现最优解的搜索。为提升算法的性能，改进思路主要包括两个方面：

一是引入非线性权重系数，通过权重的动态调整平衡全局搜索与局部搜索能力，在算法迭代初期强化全局搜索以寻找最优解方向，在迭代后期强化局部搜索以提高解的精度；

二是优化位置更新模型，结合源网荷储协同规划的约束条件，对鲸鱼个体的位置更新规则进行调整，确保搜索过程符合各环节的运行约束。

（三）求解的理论步骤

基于改进智能算法的多目标协同规划求解过程，遵循系统化的理论步骤：

1. 第一步，初始化参数：设置鲸群规模、最大迭代次数、多目标权重等。其中鲸群个体代表源网荷储资源配置的潜在方案；
2. 生成初始种群：基于源网荷储的约束条件与资源禀赋，随机生成符合要求的初始规划方案；
3. 适应度计算：基于多目标优化体系，结合权重系数计算每个个体的适应度值，评估方案的综合效益；
4. 更新最优解：记录适应度最优的个体位置，作为当前最优规划方案；
5. 位置更新：根据改进鲸鱼优化算法的位置更新规则，结合非线性权重系数调整鲸群个体位置，生成新的规划方案；
6. 收敛判断：若达到最大迭代次数或适应度值趋于稳定，输出最优方案；否则返回第三步重复迭代。

这一求解流程主要是通过智能算法的启发式搜索，在多约束、多目标的复杂空间中寻找最优解，在保证方案的可行性的同时，实现多目标的协同优化。

四、结语

本文立足新型电力系统的发展需求，探索构建源网荷储协同规划多目标体系及相应的约束框架，提出基于粗糙集权重确定与改进鲸鱼优化算法的求解思路，为源网荷储一体化项目的规划设计提供新的理论视角。未来，希望广大研究者继续深入研究源网荷储协同规划方法，提升电力系统的经济性、可靠性和环境友好性，助力能源转型与绿色发展。

参考文献

- [1] 黄元平，何国彬，杨金新，等. 适应新型电力系统的源网荷储一体化电力平衡探究[J]. 电工技术，2024，(S2):519-521.
- [2] 付立国. 新型电力系统中源网荷储的协同优化与互动技术[J]. 灯与照明，2024，48(04):88-91.
- [3] 张翔，李明，邱沐楚. "双碳"背景下源网荷储协调控制助力新型电力系统发展[J]. 张江科技评论，2024，(10):45-47.
- [4] 徐菲菲，苑锦霞. 基于新型电力系统的源网荷储协同互动技术[J]. 中华建设，2024，(10):175-177.
- [5] 宋秀芳，张国瑞，周予聪，等. 源网荷储一体化在新型电力系统中的应用与性能评估[J]. 光源与照明，2024，(08):210-212.
- [6] 张旭，赵倩. 新型电力系统下的源网荷储协同控制方法研究[J]. 电工技术，2024，(16):112-114+120.
- [7] 刘学孔. 电力系统源网荷储协同规划策略研究[D]. 山东大学，2024.
- [8] 姜超，丁傲，陈乃新，等. 基于新型电力系统的源网荷储协调关键技术分析[J]. 石河子科技，2024，(02):76-78.
- [9] 魏旭，刘东，高飞，等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术，2023，47(09):3648-3661.
- [10] 梁荣. 新型配电系统源网荷储多层级协同规划关键技术及应用. 山东省，国网山东省电力公司经济技术研究院，2023-01-17.