

基于沙戈荒地区源荷随机特性的多能源优化运行研究综述

马爽¹, 张弘毅², 马炜翔², 吴佳艺², 许刚²

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 沙戈荒地区因其独特的自然环境和资源条件形成了丰富的可再生能源, 但其引入的随机性给新能源电力消纳与外送带来了极大的挑战, 采用电能、热能和储能等多种能源互补运行的方式有利于提高能源供应的稳定性。为此, 针对沙戈荒地区的多能源优化运行方法进行了系统性综述。首先, 概述了该地区的能源构成及分布, 在分析沙戈荒地区源荷随机特性的基础上, 探讨了典型的“源网荷储”分布式多能源系统架构与互补运行方案。其次, 从系统运行随机性、多时间尺度和碳市场交易 3 个方面综述了可适用于沙戈荒地区的多能源系统优化运行方法。最后, 通过归纳现阶段研究中存在的问题, 展望了未来的关键技术与发展趋势。研究为可再生能源的高效利用以及沙戈荒地区能源稳定发展提供理论支持。

关键词: 沙戈荒地区; 多能源系统; 源荷随机性; 运行优化; 多时间尺度; 碳市场交易

Research Review on the Optimal Operation of Multi-energy System in Gobi and Desert Areas Based on Stochastic Characteristics of Source-load

MA Shuang¹, ZHANG Hongyi², MA Weixiang², WU Jiayi², XU Gang²

(1. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: There are rich renewable energy resources in Gobi and desert areas due to the unique natural environment and resource conditions. However, the randomness of renewable energy poses significant challenges to the consumption and transmission of electric energy. The synergistic integration of various energy sources, including electricity, heat, and energy storage systems, can significantly enhance the stability of energy supply. This paper presents a systematic review of multi-energy optimal operation methods applicable to Gobi and desert areas. Firstly, the energy composition and distribution within these areas are summarized. Through an analysis of the stochastic characteristics of sources and loads in Gobi and desert areas, a typical “source-grid-load-storage” distributed multi-energy system architecture along with complementary operational schemes are discussed. Afterwards, this paper reviews the optimization operation methods for multi-energy systems from three perspectives as follows: randomness of system operation, multi-time scale, and carbon market trading. By summarizing the existing problems in current research, the prospects in future development trends and key technologies are presented. This research provides theoretical supports for the utilization of renewable energy and promotes energy development in Gobi and desert areas.

Key words: Gobi and desert areas; multi-energy system; source-load randomness; operation optimization; multi-time scale; carbon market trading

0 引言

随着新能源技术的快速发展和能源结构的优化, 我国电力系统正经历迅猛变革, 以新能源为核

心的新型电力系统已成国家电力战略的核心。我国西北地区蕴含丰富的太阳能和风能, 然而该地区存在较多的沙漠、戈壁和荒漠(沙戈荒)地带, 其气温波动大、沙尘侵蚀以及地基条件较差等因素对新能源发电设备提出了更高的要求。为构建清洁安全高效的能源体系, 国家发改委、国家能源局等 9 部门发布的《“十四五”可再生能源发展规划》明确指出,

基金资助项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5200-202456095A-1-1-ZN)。

Project supported by Headquarters Technology Projects of SGCC (5200-202456095A-1-1-ZN).

将加快推进以沙戈荒地区为重点的大型风电太阳能发电基地开发与建设^[1]。除太阳能、风能外,沙戈荒地区还具有较丰富的天然气等能源,为多元化能源的集成与优化运行提供了可能,可探索实现在提高能源利用效率的同时增强系统的可靠性和灵活性。

多能源系统(multi-energy system, MES)作为新一轮能源革命的发展趋势,耦合了电能、天然气、热能等各种能源形式,具有源网荷储一体化、多能互补、供需协调等特点^[2]。沙戈荒地区的光伏、风电资源与其他能源形式构成多能源系统,能够充分利用不同能源的时空耦合特性,灵活地适应能源需求和供应变化,平抑可再生能源出力的波动性^[3]。然而,风能与太阳能发电的间歇性与随机性加剧了系统控制与调度的难度,使得多源系统的高效运行面临严峻的挑战。

目前针对可再生能源出力间歇性和不确定性的分析方法通常以优化算法为主,例如:随机优化和鲁棒优化方法等。随机优化方法通过对新能源的不确定性建立概率模型,依据可再生能源出力场景出现概率将系统分解成有限的出力场景,并以期望值作为目标函数进行运行策略求解^[4],但假定的概率模型难于准确刻画沙戈荒地区特殊环境下的不确定因素变化规律。鲁棒优化利用不确定性集合刻画风光出力的变化范围^[5],虽然改善了概率场景模型存在的问题,但由于其只考虑了最恶劣环境下的最优解,因此求解结果往往过于保守。此外,分布鲁棒优化结合了随机优化与鲁棒优化的特点,采用构建概率场景的不确定性集合来进行优化问题求解,但由于分布鲁棒模型的求解处理过程较为复杂^[6],因此将其应用于沙戈荒地区大型多能源系统时,会面临计算量过大的问题。

沙戈荒地区多能源系统的优化运行研究主要集中在模型构建和运行策略等方面。针对沙戈荒地区的多能源系统模型可重点考虑高比例可再生能源的接入及其源荷随机特性对系统运行造成的影响,从而实现成本最小化、能效最大化或可靠性能提升等优化目标。在运行策略方面,考虑碳交易机制的优化运行方式能够为该地区多能系统运行提供更高的收益;考虑沙戈荒地区风、光资源时空特性的多时间/空间互补运行策略能够充分利用不同能源的耦合特性,有效整合可再生能源,以灵活适应不同能源的供需变化。

综上,高比例可再生能源的接入对沙戈荒地区多能源系统的运行提出了新的要求和挑战,有必要针对沙戈荒地区多能源系统的优化运行技术展开深入研究,以保证新能源基地建设的持续发展,促进能源结构优化。本文在分析沙戈荒地区源荷随机特性的基础上,针对多能源系统的优化运行技术展开研究。在介绍沙戈荒地区地理气候特性、可再生能源随机性与不确定性的基础上,探讨了其对多能源系统运行的影响。其次,总结了沙戈荒地区多能源结构及分布,详细阐述了多能源系统的集成与优化运行策略。最后,针对目前存在的问题对沙戈荒地区多能源系统优化运行关键技术进行展望,旨在为沙戈荒地区的电网发展与新能源基地建设提供参考。

1 沙戈荒能源结构与源荷随机特性

沙戈荒地区主要位于我国的西部、北部,总面积约 170 万 km²,约占国土面积的 1/5。沙戈荒地区普遍属于干旱或半干旱气候,年降水量较少,通常在 100~500 mm 之间。昼夜温差较大,夏季白天气温可高达 40 ℃ 以上,而夜间温度则可能降至 10 ℃ 以下,冬季甚至会出现极端低温。此外,该地区常常受到强风影响,特别是春季风沙现象较为严重。沙戈荒地区浮尘、雷暴、沙尘暴等极端天气频繁,这些环境对新能源发电设备提出了更高的要求,如耐高温、抗风沙侵蚀、耐寒等^[7]。

沙戈荒地区地域辽阔但人口稀疏,电力消耗量较小且与主要用电区域相距甚远。供电区域与用电负荷区域间存在较大空间距离,在实现本地新能源电量消纳最大化的同时,应提升送出通道的利用率。沙戈荒地区拥有丰富的可再生资源,尤其是光照资源十分丰富,基地化、规模化地开发风电和光伏资源对于能源转型和环境保护具有重大推动作用^[8-9]。另外,该地区的能源趋向于多能互补,即电能、热能和储能等多种能源形式存在较明显的互补特性,有利于提高能源供应的稳定性和可靠性。

1.1 沙戈荒地区的能源结构

沙戈荒地区具有日照时间长、日照强度高的特点,根据相关数据显示,内蒙古和新疆的年平均日照时数可达 3 000 h 以上,为大规模太阳能发电提供了良好的自然条件。沙戈荒地区的风能资源同样不可忽视,很多沙漠区域的风速较大且稳定,尤其在内蒙古的草原地区,风能资源的开发潜力巨大。根据风能资源评估,部分风电场的年利用小时数可以

达到 2 500 h 以上^[10]。目前, 我国已在新疆、内蒙古等地已经建设了多个大型光伏、风力发电基地, 为其他地区提供了可借鉴的模式, 具体如下:

1) 内蒙古库布齐沙漠鄂尔多斯中北部新能源基地项目。全球最大规模的风电、光伏基地项目之一, 总装机规模达到 1 600 万 kW, 包括 800 万 kW 光伏和 400 万 kW 风电^[11]。

2) 宁夏腾格里沙漠新能源基地。全国首批首个“沙戈荒”新能源基地, 该项目一期 1 GW 光伏项目已正式投产, 每年可提供清洁电能 18 亿 kWh^[12]。

3) 新疆“沙戈荒”大型风电光伏基地。大规模风能和光伏发电基地项目正在沙戈荒地区加速推进, 目前新能源装机容量突破 5 000 万 kW, 占新疆新能源总装机量的 41%^[13]。

4) 新疆华电天山北麓基地。该基地总装机容量达 610 万 kW, 综合利用风能、太阳能、火电和光热等多种能源, 结合储能技术实现了多种能源互补发电, 每年可新增 142 亿 kWh 的绿色电力^[14]。

预计到 2030 年, 我国以“沙戈荒”为重点的大型新能源基地总装机容量将达 4.55 亿 kW。风电、光伏的发电功率受气象因素影响, 在时序上具有较强的随机性和不确定性, 对沙戈荒地区的可再生能源消纳和电能稳定送出具有较大影响。

1.2 沙戈荒地区的源荷随机特性

沙戈荒地区源荷随机特性主要体现在新能源发电的间歇性和不确定性方面。风能和太阳能资源具有显著的季节性和日间波动性, 要求能源网络具备足够的调节能力。负荷侧的电力需求主要受外界因素和用户用电行为不确定性的影响。现有研究多采用建模法和数据驱动等方法分析源荷随机性和不确定性。

建模法常利用区间变量描述源荷功率波动范围, 以明确不确定性的区间集。文献[15]以超棱锥模型描述功率上升方向的不确定性, 文献[16]指出源端与负荷的不确定性体现为运行点的不确定性和功率变化方向的不确定性。文献[17]采用分布函数定义一个覆盖源荷数据点不确定性的范围, 并依据源荷不确定性变量所遵循的分布函数形式确定该范围的形状, 最终利用初始运行点与局部分岔边界之间的距离作为衡量系统特性的度量标准, 具体模型如图 1 所示。

数据驱动方法不需要深入了解风电、光伏和负荷功率变化的物理原理, 通过对大量数据样本的训

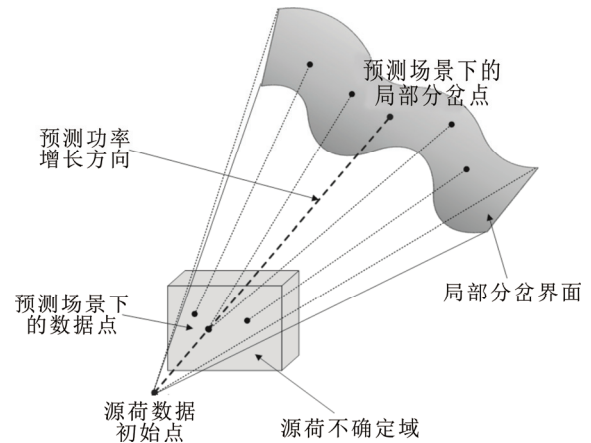


图 1 源荷不确定性建模示意图

Fig.1 Diagram of source-load uncertainty modeling

练自动学习输入量和输出量之间的映射关系, 对处理复杂的非线性数据表现出了较强的鲁棒性。图结构神经网络^[18]、长短期记忆神经网络模型^[19]等能够很好地识别数据的时空相关性, 以应对新能源发电功率的随机频繁波动, 从功率数据中识别出周期性波动特征。注意力机制^[20]和权重因子^[21]的引入为神经网络模型中的大量内部参数提供了全局优化方法, 为准确描述源荷随机性和不确定性提供了新的思路。

光伏和风力发电的显著随机性和不确定性, 在一定程度上影响了可再生能源的利用和外送能力。尽管可再生能源资源潜力巨大, 但沙戈荒地区的多种能源开发仍面临诸多挑战。首先, 沙戈荒地区基础设施建设落后, 配电网建设滞后于电力生产, 导致本地区缺少消纳能力。其次, 沙戈荒地区自然环境较为恶劣, 沙尘暴等自然灾害对系统的平稳运行造成威胁。这些问题始终制约着沙戈荒地区可再生能源的开发和利用, 导致系统安全稳定运行面临较大压力, 从而制约着可再生能源出力规模的增长, 不利于推动我国碳达峰与碳中和目标的实现。

2 沙戈荒地区多能源系统互补运行架构

针对沙戈荒地区面临的问题, 打破风、光、水、火、储多能系统之间相互分立的格局, 实现多能源系统的互补运行与优化, 有利于提高能源供需协调能力, 推动能源清洁生产和利用效率, 减少弃风、弃光、弃水限电, 对于建设清洁低碳、安全高效现代能源体系具有重要的现实意义和深远的战略意义^[22]。

多能源系统利用多元化能源在时间尺度和空间尺度上的差异, 将沙戈荒地区的新能源与火

电等传统化石能源以及其他能源形式相结合,形成互补的能源供应体系,既能减少化石燃料的不可逆转损耗,又能调和可再生能源的不稳定性,从而提高能源供应的稳定性和可靠性。多能源系统包含能源的生产、转换、输送、存储和消费等过程。沙戈荒地区的多能源系统具有较为明显的“源网荷储”一体化特征,可采用如图2所示的多能互补方式描述其多能源系统构架^[23]。

分布式能源系统通常涵盖能源的生成与转换环节。在能源生产的燃料构成中,既有煤炭、天然气等化石燃料,也包含了太阳能、风能等可再生能源。受气候、人口构成与能源构成的关系,沙戈荒区域内的可再生能源在能源配置中的比例显著偏高。能源转化装置涵盖燃料电池、燃气轮机、内燃机、热交换器、电力制氢、制冷装置、储能等设施,而能源传输体系则涉及微电网、天然气输送系统、供冷供热网络、分层次水循环利用管道等集成网络。由于沙戈荒地区缺乏人口集中的乡村与城镇,因此其本地能源体系通常由微电网及输电网络构成。与其他电网相比,微能源网络的参数层级较低,旨在促进电源端与负荷端的互连互通。除传统的冷、热、电、气负荷外,负荷侧还包括移动负荷,如电动汽车和车载应急电源系统等。储能技术在解决能源供应与用户需求之间的时间和空间不匹配问题方面发挥着关键作用^[23]。目前,电化学存储、热能存储与机械能存储技术已经发展成熟,但电能存储及化学能存储尚处于发展阶段^[24]。在沙戈荒区域,可以使用锂离子电池和超导电容器有效地存储可再生

能源。此外,抽水蓄能系统和压缩空气储能等方法也可将电能转化为机械能进行存储,采用电化学储能系统结合熔盐热储能方案也是一种有效的混合储能方式^[25]。

能源互补可分为时间互补、空间互补、热互补和热化学互补等形式。由于沙戈荒地区的发电侧以大型风电、光伏基地为主,电力消费形式以打捆外送为主,因此能源互补形式多采用时间互补,具体包括风光互补和“风光-天然气”互补等形式。在时间尺度上进行源荷协同互补控制,可以根据能源出力和负荷需求的变化,通过调整运行策略和储能技术重新配置能源分配,以提升可再生能源的利用效率,并增强能源供应的可靠性。

3 沙戈荒地区的多能源优化运行方法

沙戈荒地区含高比例可再生能源的电力系统面临时间和空间2个维度的不平衡问题,不仅会对多能源系统的稳定运行造成影响^[26],也将导致多能源系统调度优化愈发复杂。结合沙戈荒地区的能源特点,可采用考虑系统随机性、多时间尺度和碳市场交易的多能源优化运行方法,依据系统的运行规律与设备的特性在多重约束下充分利用多种能源,以增强系统运行的稳定性与能源的使用效率^[27]。

3.1 考虑系统随机性的优化运行方法

考虑系统随机性的优化运行方法主要针对高比例风能、太阳能接入以及负荷随机性对系统带来的不确定性问题^[28],此类优化运行方法主要包括随机优化和鲁棒优化。

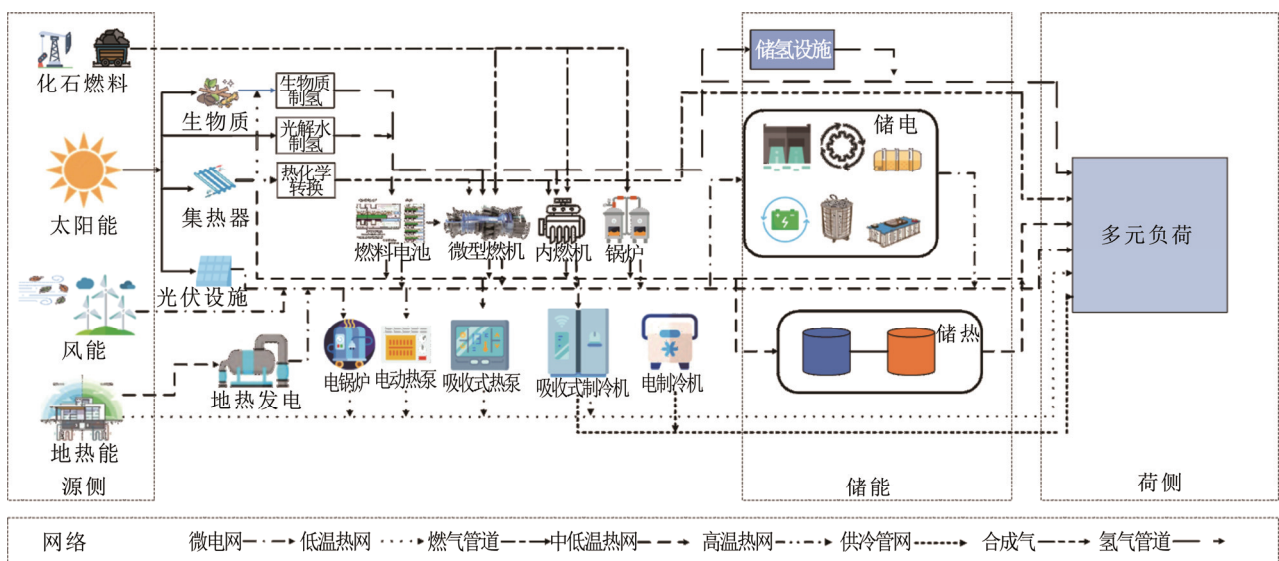


图2 “源-网-荷-储”一体化多能源系统一般性构架

Fig.2 Diagram of general framework of the “source-grid-load-storage” integrated multi-energy system

3.1.1 随机优化模型

随机优化模型利用概率论来处理系统中的不确定性问题, 通常需要预先设定随机变量的概率分布。相较于传统的确定性规划, 随机规划能够提供更为优化的决策方案, 通过调整模型参数来应对可再生能源和负荷波动造成的不确定性。含有随机变量的不确定性数学规划模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} \min f(x, \xi) \\ \text{s.t.} \begin{cases} h(x, \xi) = 0 \\ g(x, \xi) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x, \xi)$ 为目标函数; $h(x, \xi)$ 和 $g(x, \xi)$ 分别为等式约束函数和不等式约束函数; $x \in \mathbf{R}^n$, 为决策变量; ξ 为模型中的随机变量, 可分为连续型与离散型 2 种^[29]。随机优化模型中假设的概率分布有可能无法准确反映系统的不确定性, 同时需要在计算精度与效率之间寻找平衡。

基于随机优化方法, 文献[30]在顾及风力发电波动性的背景下, 提出了一种兼顾系统实时交互作用的双阶段优化框架, 能够很好地适应供需两侧的不确定性。考虑到不确定性问题可能在不同网络之间传播, 文献[31]构建了一种结合风电的电-气互联体系不确定性架构和包含不同层次的随机优化模型, 通过研究各个层级模型, 精确地刻画风电不确定性在网络中的传播。文献[32]考虑电、气和热 3 种能源之间的差异, 以综合能效利用率为指标优化能源互联网的配置, 实现了能源的高效利用。不足之处在于上述模型的构建和求解过程较为复杂, 需要较多的运行数据和计算资源。

文献[33]提出了兼顾风电与太阳能出力及用电需求波动的多时间尺度区域综合能源系统优化调度方案, 可以更好地应对风光出力和负荷的影响, 但需要复杂的协调机制来确保不同时间尺度下优化目标的一致性。文献[34]利用无参数核密度估算与概率情境抽样策略来探索源、网、荷、储各部分的功率调节潜能, 构建了综合能源系统的随机优化运行模型。此方法特别适用于处理数据分布差异化明显的场景, 但其对参数设定的要求严格, 不利于算法在实场景中的推广应用。储能系统是促进可再生能源整合的关键策略, 文献[35]通过剖析电力/热力储能的灵活性与源荷的不确定性, 提出了一种综合能源系统双阶段优化策略, 通过考虑可再生能源的不确定性以及多元化的能源需求, 实现系统规划与运

行的联合优化, 可为沙戈荒地区的多能源系统应用提供参考。

3.1.2 鲁棒优化模型

鲁棒优化方法是一种应对扰动不确定性和变化环境的决策方法, 常用于解决考虑随机因素的不确定优化问题。通过优化资源分配和调度, 提高多能源系统在面对不确定性时的可靠性, 减少潜在风险。基本的鲁棒优化数学模型如式(2)所示。

$$f_1 = \min_{y \in Y} r(y) + \max_{P \in \mathcal{P}} E^P \left[\min_{x \in \Omega(x, \xi, y)} f(x, \xi, y) \right] \quad (2)$$

式中: f_1 为优化结果; f 为运行阶段的目标函数; $r(y)$ 为储能配置阶段的目标函数; y 为规划阶段的决策变量; Y 为 y 的可行域^[36]; x 为运行阶段的决策变量; Ω 为 x 的可行域; \mathcal{P} 为风电的概率分布函数集, 表示综合范数模糊集。鲁棒优化模型在面对不确定性时会力求寻找一个在最坏情况下仍然表现良好的解决方案, 但可能会导致结果比较保守^[37]。

基于鲁棒优化方法, 文献[38]构建了一种以数据驱动为基础, 考虑不确定性概率分布集的电-热-气综合能源系统分布鲁棒优化调度模型。采用数据驱动策略构建不确定性概率分布集合, 但该方法对历史数据的数量与质量要求较高。文献[39]针对风电和太阳能发电的不确定性以及电力、热能和天然气需求预测的最大误差, 设计了一种区域多能源系统的两阶段鲁棒优化日前调度模型, 能够确保系统在极端情况下仍能维持稳定运行状态。文献[40]分别利用鲁棒优化的工程博弈方法和随机优化方法探讨了能源供应方和需求方的不确定性, 并提出了一种考虑电转气技术的多能源系统优化调度策略。该方法虽然能够得到更加精确的调度方案, 但其计算过程繁杂, 不利于在实际场景中应用。文献[41]依据历史风力发电数据建立了两阶段电力与热能协同调度架构, 分别考虑机组启停费用与风力预测情景下的总发电成本优化, 引入基于 1-范数与 ∞ -范数限制条件的不确定性概率分布可信区间, 在最恶劣概率情况下有效平衡成本与风险。然而, 1-范数和 ∞ -范数的引入极大增加了算法的求解难度。文献[42]建立了一种能源管理与定价的双重优化策略, 可以在高比例新能源接入情景下有效促进新能源消纳, 但需要精确的市场价格信号和用户响应模型, 在沙戈荒地区的适应性较差。文献[43]基于鲁棒随机优化理论, 构建了考虑可再生能源不确定性的虚拟电厂随机调度优化模型, 通过虚拟电厂的形式整合多

种能源,提高了系统的调度灵活性。

整体而言,随机优化模型和鲁棒优化模型对历史数据的依赖性较大,求解复杂,数据参数特征提取和多源数据整合是需要面对的主要问题。但是,当数据不足或不准确时,都会严重影响模型的可靠性。此外,鲁棒规划结果比较保守,在特殊情况下可能会造成更多的资源浪费。对于沙戈荒地区而言,除了结合气候条件以确保可再生能源发电历史数据的准确性外,还应充分考虑不同类型可再生能源的特征与耦合方式,在保证系统优化运行的同时提高电源的灵活性。

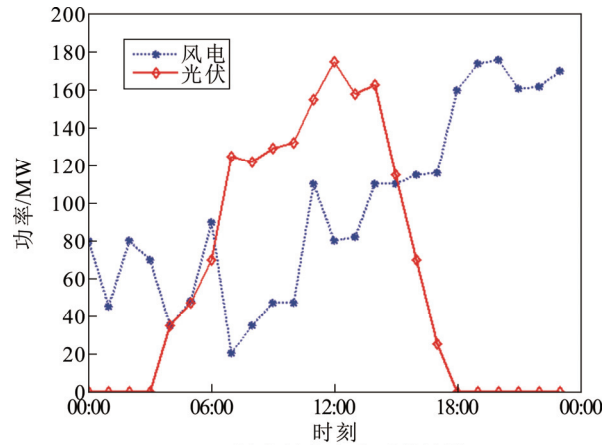
3.2 考虑多时间尺度的优化运行方法

风、光出力的时间互补特性主要分为短期、长期以及极端情况下的互补。短期时间尺度考虑小时以及日内的风光出力互补情况,长期时间尺度则考虑以日为单位的互补。目前已有大量文献探讨了我国多地的风光发电情况,均表现出了较强的时间互补特性^[44-48]。以我国西北某地区10月份的新能源发电情况为例,图3(a)和图3(b)分别给出了某天和连续9d的光伏与风电出力情况,其中光伏发电的峰值出现在白天且夜间不出力,风力发电则在夜间出现峰值且能在日内持续出力。在季节性周期内,沙戈荒地区的光伏出力通常在夏天更强,而风力发电则在冬季更加突出。此外,由于沙戈荒地区环境恶劣,时常发生沙尘暴、特高温等极端情况,此时单一能源发电可能出现停机情况,但另一能源仍可继续工作。

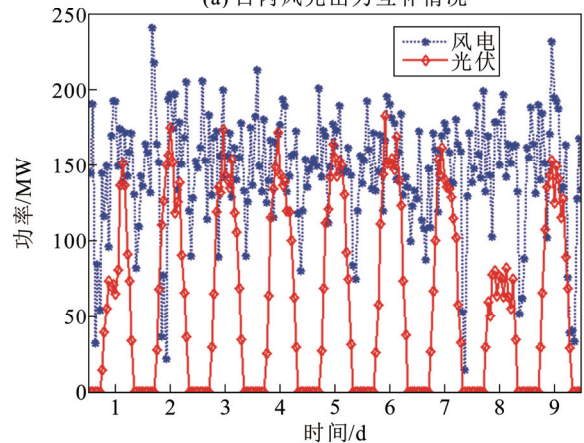
综述,利用不同能源在时间尺度上的互补特性构建协同运行的多能源系统,能够显著减轻依赖单一可再生能源发电给电力系统带来的不稳定性与反调峰特性。在沙戈荒地区采用考虑多时间尺度互补的优化运行方法,是提升高渗透可再生能源发电可控性的关键途径之一。

文献[47]基于中国气象局供给的气象站点实际测量周期内的风速瞬时数据,深入分析了风力发电与太阳能发电站在空间与时间上的互补特性。结果显示,在所监测区域内,风能与太阳能资源在不同时间尺度下均展现出良好的时空互补特性,其输出功率时间序列相关系数计算式如式(3)所示。

$$r_{XY} = \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - X_0)(Y_t - Y_0)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - X_0)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - Y_0)^2}} \quad (3)$$



(a) 日内风光出力互补情况



(b) 长期风光出力互补情况

图3 某地区不同时间尺度的风光出力互补情况

Fig.3 Diagram of complementation of wind-photovoltaic power in a region at different time scales

式中: X 和 Y 分别表示风力发电功率和光伏发电功率; X_t 、 Y_t 为 2 个时间间隔为 t 的时间序列; X_0 、 Y_0 分别为序列 X_t 、 Y_t 的平均值; r_{XY} 为相关系数,表示 2 个随机变量 X 和 Y 之间的关联程度。由于相关系数取值范围为 $[-1, 1]$, 因此当 r_{XY} 趋近于 -1 时, 一个变量增加而另一个变量趋向于减少, 且此时二者线性关系较强。因此, 相关系数越小, 表示 2 个随机变量之间的互补性越强。

为了更详细地分析时间序列的波动情况, 可对相邻时间间隔内的发电功率之差进行观察分析, 计算式如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_X = X_t - X_{t-1} \\ \Delta P_Y = Y_t - Y_{t-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ΔP_X 表示风力发电时间序列相邻时间间隔内的差; ΔP_Y 表示光伏发电时间序列相邻时间间隔内的差。

文献[47]将我国大陆北部和东部沿海地区新能源资源最丰富的地区划分为 3 个大型的虚拟发电厂

(large virtual power plant, LVPP), 并计算了不同时间尺度下各虚拟电厂光伏和风电输出功率时间序列的相关系数, 结果如表 1 所示。表 1 的数据表明, 在我国大部分地区, 2 种可再生能源在日时间尺度下的时空互补性最好, 在月时间尺度下的时空互补性次之, 在小时时间尺度时空互补性较差。

文献[48]利用基于 4 维同化数据的可再生能源评估模型, 对我国风、光资源充沛的三北地区(西北、华北和东北)分别估算当光伏发电量占比为 0、100% 与最佳占比时的系统出力平稳性指标, 得到风光互补特性如图 4 所示。其中, 指标值小表示风-光互补性较好。图 4 表明, 不同地区光伏发电量最优占比呈现较大差异, 在内蒙古北部偏东和新疆北部, 最优光伏发电量占比较高, 超过了 70%; 而在青海、甘肃南部与新疆南部地区, 最优光伏发电量占比较低。

文献[49]考虑到电-热多时间尺度的平衡约束, 构建了一种多能源系统的优化策略, 以实现电能的实时平衡和调度时间内热能总量的平衡, 从而显著提升能源利用效率。然而, 电能与热能之间的调度协调仍面临较高的复杂性。文献[50]构建了融合滚动优化与动态校正的两阶段多周期园区能源体系调度管理策略, 通过最大化设备间的协同效应来快速应对可再生能源与需求的波动。两阶段模型的问题在于较高的计算复杂度和时延性限制了其在实场景中的应用。文献[51]依据分布式架构构建了涵盖日间、日内与实时动态经济优化调度的方法, 以改善系统控制性能, 提高系统运行经济性, 具有良好的适应性。

此外, Copula 方法也被用于描述风、光之间互补特性研究中^[52]。文献[53]提出一种考虑风电与光伏出力相关性的混合藤 Copula 模型, 为搭建联合风能与太阳能等可再生能源出力的能源架构提供了指导。文献[54]研究了风力、太阳能和水力发电在不同时间尺度上的互补潜力, 从波动与斜坡两个维度探讨了太阳能发电、风能发电与水力发电在不同时间周期内的互补效应。文献[55]在评估风能和太阳能的互补潜力时发现, 时间尺度是影响互补性的重要因素。文献[56]利用多能源的时间互补特性, 提出了风、光、水、火、储、荷多能源电力系统源荷协调的双层优化调度模型, 以降低火电的调节波动性, 进而提高系统可再生能源的利用率。

基于多时间尺度的多能源系统优化运行方法

表 1 各时间尺度下广域范围风能和太阳能相关系数

Table 1 Correlation coefficients of wind and solar energy over different time scales

虚拟发电厂	不同时间尺度下的相关系数		
	月	日	小时
LVPP1	0.263 8	0.037 6	0.028 1
LVPP2	0.357 7	0.005 5	0.427 6
LVPP3	-0.166 1	-0.174 2	0.297 6

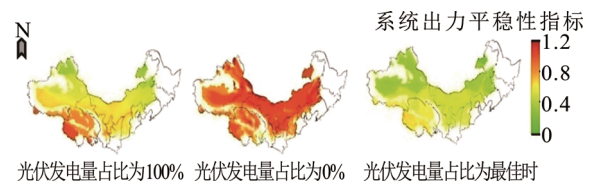


图 4 光伏发电量占风-光互补系统总发电量之比为 1、0 和最优值时系统出力平稳性指标函数的分布

Fig. 4 Diagram of the distribution of the output stationarity index function when the ratio of photovoltaic power generation to the total power generation of the wind-photovoltaic complementary system is 1, 0 and the optimal value

有助于促进沙戈荒地区高比例风电、光伏等可再生能源的整合, 从而减少对传统能源的依赖。但多时间尺度优化问题的建模和求解通常更为复杂, 计算负担较重, 对历史数据和实时数据的准确性和完整性要求较高。可采取对沙戈荒地区特定场景下多时间尺度数学模型的针对性优化, 来提高算法的计算效率。此外, 如何合理整合长、短期规划调度, 以实现不同时间尺度下的优化目标, 还有待深入研究。另外, 沙戈荒地区的可再生能源分布较为分散, 在空间尺度上整合多种能源以保障电力平衡, 同样值得探讨。

3.3 考虑碳市场交易的优化运行方法

随着“碳达峰”和“碳中和”目标的提出, 如何降低碳排放量成为当前研究多能源系统的重点。将碳交易市场引入多能源系统可以有效提高可再生能源的本地消纳, 促进减排目标的实现, 对于推进沙戈荒大型风光基地电能实现就地消纳具有重要参考价值。考虑碳市场交易的多能源优化模型如图 5 所示。

碳交易模型包括碳交易配额模型和实际碳排放量模型两部分^[57]。碳交易配额模型主要包括冷热电联产系统(combined cooling heating and power, CCHP)、燃气锅炉(gas boiler, GB)和常规发电机组, 计算式如式(5)所示。

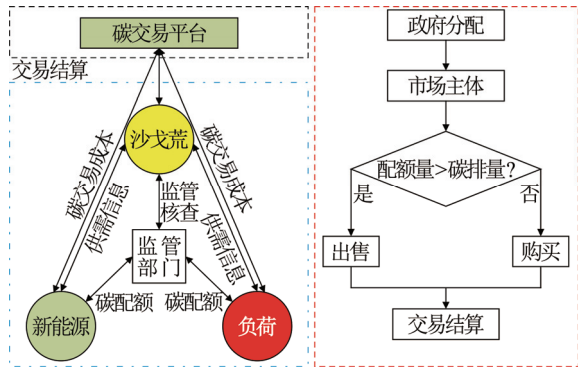


图5 沙戈荒地区碳交易市场参与多能源系统模型

Fig.5 Diagram of the model of carbon markets participate in multi-energy systems in Gobi desert areas

$$\begin{cases} E_p = E_h + E_{CCHP} + E_{GB} \\ E_h = \sum_{n=1}^N \delta_p P_{buy,Grid} \\ E_{CCHP} = \sum_{n=1}^N \delta_h (\varphi P_{GT}^t + H_{WHB}^t + Q_{AR}^t) \\ E_{GB} = \sum_{n=1}^N \delta_h H_{GB}^t \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_p 为总碳配额; E_h 表示外部购电; E_{CCHP} 和 E_{GB} 分别表示 CCHP 和 GB 的无偿碳排放配额; δ_p 和 δ_h 分别表示购电单位电量和国标单位热量碳排放分配额; N 为碳排放设备的总数; φ 为电-热折算系数; $P_{buy,Grid}$ 为购电功率; H_{GB}^t 为 t 时刻燃气锅炉输出热功率; P_{GT}^t 为 t 时刻燃气轮机输出电功率; H_{WHB}^t 为 t 时刻燃气轮机余热利用设备输出热功率; Q_{AR}^t 为 t 时刻将热能转换成冷能的设备输出冷功率。

实际碳排放量模型的计算式为:

$$\begin{cases} E_c = E_{Act,Grid} + E_{Act,Total} \\ E_{Act,Grid} = \sum_{t=1}^{24} (x_1 + y_1 P_{buy,Grid}^t + z_1 (P_{buy,Grid}^t)^2) \\ E_{Act,Total} = \sum_{t=1}^{24} (x_2 + y_2 P_{Total}^t + z_2 (P_{Total}^t)^2) \\ P_{Total}^t = P_{GT}^t + H_{WHB}^t + H_{GB}^t \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_c 为多能源系统的实际碳排放量; P_{Total}^t 为 t 时刻燃气机组的等效输出功率; $E_{Act,Grid}$ 为外购电力碳排放量; $E_{Act,Total}$ 为燃气机组碳排放量; x_1 、 y_1 、 z_1 和 x_2 、 y_2 、 z_2 分别为外购电力和燃气机组的碳排放计算参数。

文献[58]提出一种兼顾用户需求与碳市场交易的电、气、热综合能源系统(electricity-gas-heat integrated energy system, EGH-IES)的双层低碳经济调

度方法,通过分析碳交易机制和不同负荷的特性,实现供需层面的协同优化,从而充分挖掘 EGH-IES 的经济效益与低碳潜力。文献[59]提出一种基于改进碳交易机制的多能源微网低碳经济调度模型,根据设备碳足迹对微网碳交易机制进行修正,并构建碳交易成本模型。文献[60]构建了基于双层奖惩碳交易体系的综合能源服务商与产业园区联动的低碳调度框架,结合需求响应与碳交易实现资源的优化利用,进而提升经济效益。这些模型具有较高的复杂性和计算量,在实际应用中,碳交易机制的变化可能导致模型的适用性受到限制。

阶梯式碳交易模型在能源优化运行领域也得到了广泛的应用。文献[61]提出基于阶梯式碳交易与需求响应的虚拟电厂优化调度架构,实现了虚拟电厂在调度周期内收益的最大化。基于对分层碳交易机制与用户侧需求侧的考虑,文献[62]提出了一种多能源系统优化调度方案,以使能源购买成本、碳排放交易成本、设备维护成本和需求响应成本之和最小。通过分析氢能应用与分层碳交易对多能源系统调度的影响,文献[63]建立了经济成本最低及碳排放最少的多目标框架,实现了更加清洁高效的能源转换和利用。文献[64]在源荷随机特性的基础上,构建了考虑风、电负荷功率线性化的多能源系统低碳优化调度框架,以获得更为可靠的优化结果;但是该模型采用的排序截断分摊法容易引起误差,且对应用条件有一定限制。文献[65]通过分析阶梯型碳交易以及综合需求响应,在碳交易机制框架内构建了一种考虑能源供需不确定性的多能源系统低碳经济优化调度模型,在促进可再生能源消纳的同时可减少碳排放,但对系统控制和协调也提出了更高要求。

考虑碳市场交易多能源优化运行方法可以有效促进沙戈荒地区可再生能源的就地消纳,扩大碳交易市场规模,降低碳排放量。但由于需要综合考虑能源价格、碳价格、供需变化等多种因素,因此优化模型的复杂性大大增加。碳交易机制需要精确的碳排放量计量,目前碳计量方法精确度有待提升,且当前大部分研究多为理论框架,并没有投入到实际应用中。如何将沙戈荒地区能源基地加入到碳交易体系中,仍待进一步研究。

4 沙戈荒地区多能源优化运行技术展望

多能源系统的架构与优化运行方法为沙戈荒

地区高比例可再生能源的建设与运行提供了有力的理论支撑, 但当前仍面临着实施难度较大等诸多问题, 未来可以从以下 4 个方面对沙戈荒地区多能源运行优化技术的应用展开研究。

4.1 利用智能化技术应对系统不确定性

在极端天气频发的沙戈荒地区, 光伏和风电出力存在极大的不确定性, 未来可以基于对沙戈荒地区能源系统历史数据和实时数据的综合分析, 结合智能化手段建立多能源系统的智慧运维与智能调度平台。在新能源出力波动时保障电力传送的稳定性, 从而提高系统的故障防御能力。除了利用智能决策技术优化资源配置、动态调配各能源基地外, 将 5G 与边缘计算等技术引入到多能源系统的优化运行和调度工作中, 也有利于提高沙戈荒地区多能源系统的优化运行和能源管理水平。基于数字化技术的能源综合管理平台建设, 能够将沙戈荒地区的多种清洁能源、负荷信息以及空间信息进行协同调控, 从而实现大范围、多区域的能源优化配置, 进而提高应对极端事件发生的能力。

另一方面, 智能化技术的应用也将有效提升沙戈荒地区多能源系统运行的韧性。利用人工智能技术实现数据与模型的双重驱动结合, 以多能源系统实时数据作为输入, 深度挖掘系统状态与调度控制之间的复杂联系, 可辅助判断系统运行的薄弱环节, 从而改善系统优化运行策略。

4.2 构建能源枢纽提高系统互补能力

沙戈荒地区太阳能和风电在时空上的强互补性目前并未被充分利用, 弃风、弃光现象还较为明显, 未来可以采用能源枢纽作为能源汇聚的中心对系统进行智能调控。能源枢纽作为一个具有多输入-多输出的双端口网络, 可以通过多个能源枢纽之间的合作实现网络间的联合运行优化^[66], 其工作架构如图 6 所示。

能源枢纽作为多种能源间相互转化的中心, 可以利用多种分布式能源的时空特性进行多源互补, 从而实现多种形式能源的“横向突破”与“纵向突破”; 此外, 其与能源路由器进行结合, 可以实现信息流与能量流的深度融合, 从而有利于沙戈荒地区的能源互联网建设, 并能够促进沙戈荒地区多能源系统的发展。另外, 沙戈荒地区还可以考虑设计适应极端气候和环境条件的能源枢纽, 以保证系统在恶劣环境下的平稳运行。

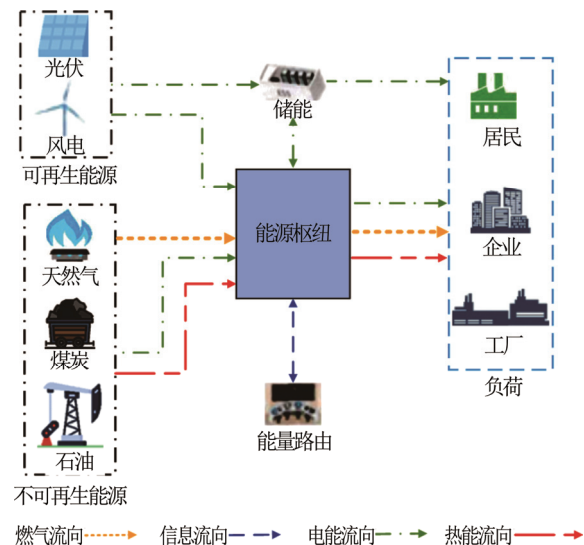


图 6 能量枢纽工作架构图

Fig.6 Diagram of energy hub working architecture

4.3 扩大绿证交易提高碳交易量

风、光资源作为清洁无污染的可再生能源, 能够促进沙戈荒地区多能源系统的低碳发展。现阶段我国主要通过市场监管部门向能源市场主体分配初始碳配额, 市场主体根据实际碳排放量参与碳交易。由于沙戈荒地区地处偏远, 当地的负荷需求不大, 多能源系统的负荷主要来源于上级电网购电以及自身负荷, 因此通过引入碳交易机制来降低上级电网用电量以及多能源系统的化石能源消耗, 并赋予沙戈荒地区能源系统发电全额免费碳排放额, 能够有效提升该地区的新能源消纳水平。

绿证交易机制也可以成为沙戈荒地区多能源系统发展新的助力。作为国家能源局依据风光等绿色能源发电上网电量向市场主体颁发的具有唯一代码识别的电子凭证, 绿证交易的主要目的是将绿色电力从政府直接补贴的方式逐步过渡到市场化补贴的方式^[67]。多能源系统根据自身绿色电力上网电量获得绿证, 根据绿证数量是否满足要求决定盈利还是支出, 其交易模型可描述为式(7)所示形式。

$$C = \pi(C_S - C_B) \quad (7)$$

式中: C 表示绿证交易收益; π 表示绿证交易价格; C_S 和 C_B 分别表示出售绿证数量与购买绿证数量。随着全国统一电力市场的建立, 沙戈荒地区能源大基地参与市场化交易的电量比例将逐步扩大, 绿证交易规模有望持续增长, 绿证交易机制将逐步完善。通过绿证交易能够促进沙戈荒地区多能源系统的发展建设, 对于保持能源的多样性和稳定供应具有重

要意义,同时可促进沙戈荒地区与其他区域间的能源互联和合作。

4.4 建设光热发电站提升碳减排额度

太阳能兼具发电与产热的功能,通过建设光热发电站可以将沙戈荒地区太阳能资源转换为热、电2种能量参与多能源系统的优化运行,光热发电站亦可作为市场主体在碳交易市场向相关企业出售碳减排额度。

光热电站由聚光器、吸热器、发电装置、储热系统以及蓄电池组成,因其具备电热2种能源形式,故可提高对沙戈荒地区太阳能的利用效率。在高温热发电方面,据美国和西班牙权威机构报道,太阳能热发电的生命周期温室气体排放等效CO₂排放量仅为9.8~10 g/kWh,减排效果明显。未来可考虑在沙戈荒地区的能源系统中增加光热发电占比,以增强光热发电技术的集热能力以及储热能力,从而提升能源利用率,促进沙戈荒地区可再生能源的消纳以及我国碳减排目标的实现。

5 结论

随着“碳达峰”和“碳中和”目标的提出,可再生能源在能源系统中占据的地位逐渐提高。发展多能源系统有利于充分开发沙戈荒地区可再生能源的潜力,为可再生能源消纳和送出提供了新的思路。本文探讨了沙戈荒地区多能源系统的一般性架构,归纳总结了现有多能源系统优化运行方法及其优缺点,并对未来的技术发展与应用进行了展望,得出以下结论:

1) 沙戈荒地区的多能源系统具有明显的“源-网-荷-储”一体化特征,可采用多能互补的系统构架,实现不同能源形式的时空互补运行和能源转化,提升可再生能源利用效率。

2) 沙戈荒地区可采用考虑系统随机性、多时间尺度和碳市场交易的多能源优化运行方法,但这些方法对历史数据的高依赖性、高求解复杂度及其在沙戈荒实场景中的适用性问题仍值得探讨。

3) 未来可考虑从推进智能化技术、建设能源枢纽、扩大绿证交易和建设光热发电站等方面继续开展沙戈荒地区多能源优化运行方法研究,以促进能源的跨区域互联。

参考文献 References

[1] 国家林业局. 中国沙漠图集[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 12-117.

- State Forestry Administration. Desert atlas of china[M]. Beijing, China: Science Press, 2018: 12-117.
- [2] 陈艳波, 方哲, 张宁, 等. 基于大语言模型绿电预测和绿电交易的园区综合能源系统集群多目标协同运行方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2849-2863.
- CHEN Yanbo, FANG Zhe, ZHANG Ning, et al. Multi-objective collaborative operation method for park-level integrated energy system cluster based on large language model for green electricity prediction and trading[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2849-2863.
- [3] 杨勇平, 段立强, 杜小泽, 等. 多能源互补分布式能源的研究基础与展望[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 281-288.
- YANG Yongping, DUAN Liqiang, DU Xiaozhe, et al. Research basis and prospect of multi-energy complementary distributed energy[J]. Journal of China Science Foundation, 2020, 34(3): 281-288.
- [4] NING C, YOU F. Data-driven stochastic robust optimization: general computational framework and algorithm leveraging machine learning for optimization under uncertainty in the big data era[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 111: 115-133.
- [5] SHANG C, YOU F. Distributionally robust optimization for planning and scheduling under uncertainty[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 110: 53-68.
- [6] 贺帅佳, 阮贺彬, 高红均, 等. 分布鲁棒优化方法在电力系统中的理论分析与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 179-191.
- HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 179-191.
- [7] 中国储能网. 中国华能技术研究院郭小江: 加强适应“沙戈荒”基地的风光储综合开发技术研究[EB/OL]. [2024-11-18]. <https://www.escn.com.cn/20230718/f2a087f9aa99475e8e57411247cf056a/c.html>.
- [8] China Energy Storage Network. GUO Xiaojiang, China Huaneng Technology Research Institute: Strengthen the research on the comprehensive development technology of landscape storage to adapt to the Gobi-desert base[EB/OL]. [2024-11-18]. <https://www.escn.com.cn/20230718/f2a087f9aa99475e8e57411247cf056a/c.html>.
- [9] 雒德宏. 浅谈在“沙戈荒”大基地开发中推广“新能源+生态治理”模式存在的难题及建议[J]. 风能, 2022, 12: 56-58.
- LUO Dehong. A brief discussion on the problems and suggestions in promoting the “new energy+ecological governance” model in the development of Gobi-desert base[J]. Wind Energy, 2022, 12: 56-58.
- [10] 董梓童, 苏南. “沙戈荒”风电光伏基地开发需走“高定”路线[N]. 中国能源报, 2023-08-07(007).
- DONG Zitong, SU Nan. Wind power photovoltaic base development in Gobi desert areas needs to take the “high fixed” route[N]. China Energy News, 2023-08-07(007).
- [11] 朱洪波, 张俊杰, 霍福鹏. 新型能源-风力发电在国内外的的发展状况[J]. 广东输电与变电技术, 2004(3): 9-14.
- ZHU Hongbo, ZHANG Junjie, HUO Fupeng. Development status of a new energy source-wind power-generation at home and abroad[J]. Transmission and Transformation Technology in Guangdong, 2004(3): 9-14.
- [12] 索尔海姆. 库布其精神为全球沙漠治理提供启迪[J]. 科学大观园, 2023(6): 32-33.
- Solheim. Kubuqi spirit provides inspiration for global desert governance[J]. Grand Garden of Science, 2023(6): 32-33.
- [13] 马宇薇. 腾格里沙漠变身“光伏海”—探访全国首个“沙戈荒”新能源基地[J]. 科学之友, 2023(8): 15-17.
- MA Yuwei. Tengger desert transformed into a “photovoltaic sea”—visit the country’s first Gobi desert new energy base[J]. Friends of Science,

- 2023(8): 15-17.
- [14] 中国储能网. 走进新疆“沙戈荒”大型风电光伏基地不毛之地变身能源蓝海[EB/OL]. [2024-11-21]. <https://www.escn.com.cn/20230921/bf46c3e35ad44542886f2f060189784e/c.html>.
China Energy Storage Network. The Gobi desert land of Xinjiang's large-scale wind power photovoltaic base turns into a blue ocean of energy[EB/OL]. [2024-11-21]. <https://www.escn.com.cn/20230921/bf46c3e35ad44542886f2f060189784e/c.html>.
- [15] 中国能源新闻网. 新疆华电天山北麓戈壁基地 610 万千瓦新能源项目进入全面建设阶段[EB/OL]. [2024-11-21]. https://cpnn.com.cn/news/xny/202408/t20240815_1728098.html.
China Energy News Network. Xinjiang Huadian Tianshan North Gobi Base: 6.1 million kW new energy project entered the stage of comprehensive construction[EB/OL]. [2024-11-21]. https://cpnn.com.cn/news/xny/202408/t20240815_1728098.html.
- [16] FANG S D, CHENG H Z, SONG Y, et al. Interval optimal reactive power reserve dispatch considering generator rescheduling[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1833-1841.
- [17] WANG C, WANG L, DENG X F, et al. Scenario-based line switching for enhancing static voltage stability with uncertainty of renewables and loads[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023: 145.
- [18] 王蕾, 焦提操, 李震梅, 等. 源荷不确定对电压稳定性影响的虚拟仿真实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(3): 62-67.
WANG Lei, JIAO Ticao, LI Zhenmei, et al. Virtual simulation experiment design of impact of uncertain renewables and loads on voltage stability[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(3): 62-67.
- [19] LIAO W, BAK-JENSEN B, PILLAI J R, et al. Short-term power prediction for renewable energy using hybrid graph convolutional network and long short-term memory approach[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 211: 108614.
- [20] 李卓, 叶林, 戴斌华, 等. 基于 IDSCNN-AM-LSTM 组合神经网络超短期风电功率预测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2117-2127.
LI Zhuo, YE Lin, DAI Binhua, et al. Ultra-short-term wind power prediction method based on IDSCNN-AM-LSTM combination neural network[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2117-2127.
- [21] ZHANG Z, YE L, QIN H, et al. Wind speed prediction method using shared weight long short-term memory network and Gaussian process regression[J]. Applied Energy, 2019, 247: 270-284.
- [22] XIONG B R, LOU L, MENG X Y, et al. Short-term wind power forecasting based on attention mechanism and deep learning[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 206: 107776.
- [23] 姚宗君, 张铁岩, 赵琰. 考虑城市多能源系统不确定性的移动能量枢纽规划方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2452-2466.
YAO Zongjun, ZHANG Tiejian, ZHAO Yan. Mobile energy hub planning model considering the uncertainty of urban multi-energy system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2452-2466.
- [24] 王仁顺, 王世龙, 耿光超, 等. 面向风光储系统的多时空尺度容量置信度评估方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 3904-3913.
WANG Renshun, WANG Shilong, GENG Guangchao, et al. Multi-temporal-spatial scale capacity credit assessment method for wind-photovoltaic-storage systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 3904-3913.
- [25] MA W, FANG S, LIU G, et al. Modeling of district load forecasting for distributed energy system[J]. Applied Energy, 2017, 204: 181-205.
- [26] 中国储能网. 电-热储能: 支撑沙戈荒大基地外送[EB/OL]. [2024-11-21]. <https://www.escn.com.cn/20240705/fafe135991d24383b15-ed5899096b0dc/c.html>.
China Energy Storage Network. Electric-thermal energy storage: support Gobi desert base power delivery[EB/OL]. [2024-11-21]. <https://www.escn.com.cn/20240705/fafe135991d24383b15-ed5899096b0dc/c.html>.
- [27] 魏斌, 韩肖清, 李雯, 等. 融合多场景分析的交直流混合微电网多时间尺度随机优化调度策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2359-2369.
WEI Bin, HAN Xiaoqing, LI Wen, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch for ac/dc hybrid micro grid incorporating multi-scenario analysis[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2359-2369.
- [28] 袁越, 苗安康, 吴涵, 等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4019-4036.
YUAN Yue, MIAO Ankang, WU Han, et al. Review of the research framework and key issues for low-carbon integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4019-4036.
- [29] 梅府贤, 李昀熠, 万灿, 等. 计及交互功率不确定性和柔性负荷的输配协同优化调度[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3521-3534.
MEI Fuxian, LI Yunyi, WAN Can, et al. Coordinated optimal dispatch for transmission and distribution networks considering interactive power uncertainty and flexible load[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3521-3534.
- [30] 王文锋. 风电-水电联合调度随机规划模型与方法[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
WANG Wenfeng. Stochastic planning model and method of wind power-hydropower joint dispatching[D]. Nanning, China: Guangxi University, 2012.
- [31] ZENG Q, FANG J, CHEN Z, et al. A two-stage stochastic programming approach for operating multi-energy systems[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Beijing, China: IEEE, 2017: 1-6.
- [32] QADRAN M, WU J, JENKINS N, et al. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network considering the uncertainty in wind power forecasts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 128-138.
- [33] 林晓明, 张勇军, 陈伯达, 等. 计及多评价指标的园区能源互联网双层优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 8-15, 30.
LIN Xiaoming, ZHANG Yongjun, CHEN Boda, et al. Bi-level optimal configuration of park energy internet considering multiple evaluation indicators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 8-15, 30.
- [34] 朱兰, 田泽清, 唐陇军, 等. 计及细节层次直接负荷控制的区域综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2763-2772.
ZHU Lan, TIAN Zeqing, TANG Longjun, et al. Multi-time-scale optimal dispatch of regional integrated energy system considering level of detail direct load control[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2763-2772.
- [35] 韩中合, 祁超, 丁敬, 等. 基于太阳能和生物质能的农村分布式供能系统研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3164-3171.
HAN Zhonghe, QI Chao, DING Jing, et al. Research on distributed energy supply system based on solar energy and biomass energy in rural area[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(11): 3164-3171.
- [36] 郭烈锦, 赵亮. 基于可再生能源的分布式多目标供能系统(二)[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 446-451.
GUO Liejin, ZHAO Liang. Distributed multi-objective energy supply system based on renewable energy (II)[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(5): 446-451.

- [37] 付文龙, 卓庆澳, 吴月超, 等. 多能互补提供频率支撑的储能容量分布鲁棒规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 282-290.
FU Wenlong, ZHUO Qingao, WU Yuechao, et al. Distributed robust planning for energy storage capacity with multi-energy complementarity providing frequency support[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 282-290.
- [38] ZUGNO M, MORALES J M, MADSEN H. Commitment and dispatch of heat and power units via affinely adjustable robust optimization[J]. Computers & Operations Research, 2015, 75(8): 191-201.
- [39] 陈光宇, 张子祥, 李庆, 等. 基于 Hausdorff 距离的电-热-气综合能源系统分布鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4906-4913.
CHEN Guangyu, ZHANG Zixiang, LI Qing, et al. Distributed robust optimal scheduling of electric thermal gas integrated energy system based on Hausdorff distance[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4906-4913.
- [40] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3090-3100.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming. Two-stage robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering network constraints and uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3090-3100.
- [41] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 116-126.
ZHU Lan, WANG Ji, TANG Longjun, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering refined power-to-gas model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 116-126.
- [42] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7235-7247, 7450.
SHUI Yue, LIU Jun-yong, GAO Hong-jun, et al. A distributionally robust coordinated dispatch model for integrated electricity and heating systems considering uncertainty of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7235-7247, 7450.
- [43] 尚文强, 李广磊, 丁月明, 等. 考虑源荷不确定性和新能源消纳的综合能源系统协同调度方法[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 517-526.
SHANG Wenqiang, LI Guanglei, DING Yueming, et al. Collaborative scheduling for integrated energy system considering uncertainty of source load and absorption of new energy[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 517-526.
- [44] TAN Z, FAN W, LI H, et al. Dispatching optimization model of gas-electricity virtual power plant considering uncertainty based on robust stochastic optimization theory[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 247: 119106.
- [45] 吕闫, 李理, 孙略, 等. 基于抽样概率区间修正的典型源荷时序场景生成方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(17): 141-150.
LYU Yan, LI Li, SUN Lue, et al. Typical source-load temporal scenario generation method based on modification of sampling probability interval[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(17): 141-150.
- [46] 张耀聪. 基于深度学习神经网络的可再生能源“源荷”预测研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
ZHANG Yaocong. Research on renewable energy “source-load” prediction based on deep learning neural network[D]. Lanzhou, China: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [47] 张超林, 顾丹珍, 黄阮明, 等. 计及季节特性与日特性的多源-荷联合场景生成方法研究[J]. 现代电力, 2024, 41(5): 822-831.
ZHANG Chaolin, GU Danzhen, HUANG Ruanming, et al. Multi-source-charge joint scene generation method considering seasonal and diurnal characteristics[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(5): 822-831.
- [48] 刘怡, 肖立业, 王海风, 等. 中国广域范围内大规模太阳能和风电各时间尺度下的时空互补特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 20-26, 6.
LIU Yi, XIAO Li-ye, WANG Haifeng, et al. Temporospatial complementarities between China's wide-area wind and solar energy at different time scales[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 20-26, 6.
- [49] 王子琳, 鲁玺, 庄明浩, 等. 中国三北地区风光互补发电系统空间优化研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 97-104.
WANG Zilin, LU Xi, ZHUANG Minghao, et al. Spatial optimization of wind-PV hybrid energy systems for the Three-North region in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 97-104.
- [50] 徐飞, 陈磊, 金和平, 等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 149-154.
XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 149-154.
- [51] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 88-95.
XU Yujie, CHEN Haisheng, LIU Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-95.
- [52] 孟冰冰, 胡林献, 白雪峰, 等. 具有电转气功能的多能源系统消纳弃风效果分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 18-23.
MENG Bingbing, HU Linxian, BAI Xuefeng, et al. Analysis on wind power accommodation effect of multi-energy system with P2G function[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 18-23.
- [53] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2764-2774.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.
- [54] 邱宜彬, 欧阳誉波, 徐蓓, 等. 基于混合藤 Copula 模型的风光联合发电相关性建模及其在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 791-798.
QIU Yibin, OUYANG Yubo, XU Bei, et al. Modeling of multi-dimensional wind and pv farm output correlation based on mixture vine Copula structures and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 791-798.
- [55] HAN S, ZHANG L N, LIU Y Q, et al. Quantitative evaluation method for the complementarity of wind-solar-hydro power and optimization of wind-solar ratio[J]. Applied Energy, 2019, 236(FEB. 15): 973-984.
- [56] SCHINDLER D, BEHR H D, JUNG C. On the spatiotemporal variability and potential of complementarity of wind and solar resources[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 218: 113016.
- [57] 刘涛. 基于时空互补特性的多能源电力系统优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
LIU Tao. Optimization of multi-energy power system based on spatiotemporal complementary characteristics[D]. Nanchang, China: Nanchang University, 2022.
- [58] 张开智, 杨娜, 尹江. 计及绿证-碳交易的综合能源系统运行优化[J]. 自动化应用, 2024, 65(17): 95-100.
ZHANG Kaizhi, YANG Na, YIN Jiang. Optimization of integrated

- energy system operation including green certificate-carbon trading[J]. Automation Application, 2024, 65(17): 95-100.
- [59] 李虹, 林兰心, 赵小军. 基于需求侧用户响应分析的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 97-105. LI Hong, LIN Lanxin, ZHAO Xiaojun. Low carbon economic scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system based on demand-side user response analysis[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(5): 97-105.
- [60] 牛耕, 季宇, 杨安男, 等. 基于改进碳交易机制的多能微网低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 107-116. NIU Geng, JI Yu, YANG Annan, et al. Low-carbon economic dispatch of multi-energy microgrid based on improved carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 107-116.
- [61] LI T, XIAO Q, JIA H, et al. Multi-agent schedule optimization method for regional energy internet considering the improved tiered reward and punishment carbon trading model[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 916996.
- [62] JIN J, WEN Q, ZHANG X, et al. Economic emission dispatch for wind power integrated system with carbon trading mechanism[J]. Energies, 2021, 14(7): 1870-1870.
- [63] 苏志鹏, 王莉, 梁欣怡, 等. 考虑阶梯式碳交易及综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 174-182. SU Zhipeng, WANG Li, LIANG Xinyi, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering stepped carbon trading and comprehensive demand response[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 174-182.
- [64] 王艺霖, 马添翼, 李婷, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与氢能的园区综合能源系统多目标优化运行[J]. 北京印刷学院学报, 2024, 32(8): 28-35. WANG Yilin, MA Tianyi, LI Ting, et al. Multi-objective optimization of comprehensive energy systems in hydrogen energy parks considering a staircase carbon trading mechanism[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2024, 32(8): 28-35.
- [65] 邵冲, 张晓斌, 韩凯莉, 等. 计及源荷随机性的多能源系统低碳优化调度策略[J]. 能源与环保, 2024, 46(8): 193-199, 204. SHAO Chong, ZHANG Xiaobin, HAN Kaili, et al. Low-carbon optimal dispatch strategy for multi-energy systems taking into account source-load stochasticity[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(8): 193-199, 204.
- [66] 洪崇. 碳交易机制下考虑源荷不确定性的综合能源系统低碳经济运行研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024. HONG Chong. Research on low-carbon economic operation of integrated energy system considering source-load uncertainty under carbon trading mechanism[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Technology, 2024.
- [67] 李承周, 王宁玲, 窦潇潇, 等. 多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7127-7149. LI Chengzhou, WANG Ningling, DOU Xiaoxiao, et al. Review and prospect on the system integration of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7127-7149.
- [68] 张翔, 陈政, 马子明, 等. 适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2682-2690. ZHANG Xiang, CHEN Zheng, MA Ziming, et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2682-2690.



MA Shuang
Ph.D.
Corresponding author

马爽(通信作者)

1988—, 女, 博士, 讲师

主要从事智能信息处理、需求侧资源与电网供需互动等研究工作

E-mail: mashuang@bistu.edu.cn

收稿日期 2024-10-08 修回日期 2025-01-18 编辑 何秋萍