DOI: 10.19666/j.rlfd.202505117

风光水火储多能互补能源基地电源容量规划研究

李 祥[1]，龚 里[1]，陆 峥[2]，周 航[1]，李夏阳[1]，黄泽毅[1]，李佩杰[2]
（1. 中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司，广西 南宁 530007；
2. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室（广西大学），广西 南宁 530004）

［摘 要］随着电源结构逐步向多元化格局转变，区域性新能源消纳风险增大。为最大限度地利用现有的水电和火电调节能力，提升风电与光伏的消纳水平，构建了包含风电、光伏、水电、火电以及储能的多能互补能源基地，分析了风光水火储互补发电相比于其他发电模式的优势，并基于全年 8 760 个时序点，构建了兼顾系统可靠性、经济效益、环境效益、新能源消纳水平的多目标电源容量规划模型，通过目标函数单位标准化的线性加权法实现了多目标优化，最后选取某地的年历史风光数据进行了仿真实验。结果表明：相比于单目标优化，多目标优化能够有效权衡不同优化目标之间的平衡点，避免单一目标优化的局限性，并通过合理调节水电、火电和储能的出力，实现风光水火储在多时间尺度上的互补协同。

［关 键 词］风光水火储；多能互补能源基地；电源容量规划；多目标优化

［引用本文格式］李祥，龚里，陆峥，等. 风光水火储多能互补能源基地电源容量规划研究[J]. 热力发电，2026，55(2)：139-146.
LI Xiang，GONG Li，LU Zheng，et al. Power generation capacity planning for multi-energy complementary energy base including wind，solar，hydropower，thermal power and energy storage[J]. Thermal Power Generation，2026，55(2)：139-146.

Power generation capacity planning for multi-energy complementary energy base including wind, solar, hydropower, thermal power and energy storage

LI Xiang[1], GONG Li[1], LU Zheng[2], ZHOU Hang[1], LI Xiayang[1], HUANG Zeyi[1], LI Peijie[2]
(1. China Energy Engineering Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

Abstract: As the power supply structure gradually shifts toward a diversified pattern, the risk of regional renewable energy consumption increases. In order to maximize the utilization of the existing adjustment capacity of hydropower and thermal power and improve the consumption level of wind power and photovoltaic power, a multi-energy complementary energy base including wind power, photovoltaic power, hydropower, thermal power and energy storage is constructed, and the advantages of complementary power generation among wind power, photovoltaic power, hydropower, thermal power and energy storage compared to other power generation modes are analyzed. Based on 8 760 time series points throughout the year, a multi-objective power generation capacity planning model that takes into account system reliability, economic benefits, environmental benefits, and the consumption level of renewable energy is constructed, and multi-objective optimization is achieved through the linear weighting method of unit standardization of the objective function. Finally, the annual historical wind and solar data of a certain place are selected for simulation experiments. The results show that, compared with single-objective optimization, multi-objective optimization can effectively balance the equilibrium points among different optimization objectives, avoid the limitations of single-objective optimization, and by rationally adjusting the output of hydropower, thermal power and energy storage, the complementary coordination of wind power, photovoltaic power, hydropower, thermal power and energy storage on multi-time scales can be achieved.

收 稿 日 期：2025-05-27 修 回 日 期：2025-07-12 接 受 日 期：2025-07-28 网络首发日期：2026-01-23
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52267006）
Supported by：National Natural Science Foundation of China (52267006)
第一作者简介：李祥（1990），男，硕士，工程师，主要研究方向为电力系统规划，lixiang@gxed.com。
通信作者简介：陆峥（2002），男，硕士，主要研究方向为电力系统最优化，2412301032@st.gxu.edu.cn。

Key words: wind-solar-thermal-hydro-storage; multi-energy complementary energy base; power capacity planning; multi-objective optimization

我国明确了“2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和”的战略目标[1]，随着电源结构逐步向水、火、核、风、光伏等多元化格局转变，区域性新能源高效消纳风险增大，制约新能源高效利用[2]，多能互补能源基地的建设与发展被视为推动能源结构转型、实现“双碳”目标的重要抓手[3-4]。

多能互补能源基地开发的关键在于确定基地内电源的最优配置[5]，包括调节电源选型和待建电源容量规划。在调节电源选型问题上，当前研究主要集中在风光储[6]、风光水[7]、风光火[8]互补 3 种开发模式。待建电源容量规划需要考虑规划模型和规划方法 2 个方面。在规划模型上，大多数研究考虑经济效益，将收益最大[9]或成本最低[10]作为规划模型的求解目标；在“双碳”战略背景下，文献[11]考虑环境效益，将全生命周期下的碳排放最小纳入优化目标；面对高比例新能源接入带来的电力短缺问题，文献[12]考虑系统可靠性，将年度缺电量最小作为 优化目标，文献[13]将源荷偏差最小作为优化目标；在新能源大规模建设的背景下，部分研究考虑新能源消纳水平，分别将弃风弃光最小[14]、风光波动最小[15]或风光电量最大[16]作为优化目标。在规划方法上，通常采用场景聚类[17]、场景缩减[18-19]或场景生成[20]的方法得到典型场景后进行规划。

以上研究围绕电源最优配置的诸多问题开展并取得了丰富成果，但仍存在以下不足：一是研究大多集中在“风光+单一调节电源”的互补模式上，均存在不同方面的局限性（将在后文详细分析）；二是研究大多采用典型场景规划法以提高计算效率，尽管涉及多个场景，但本质上仍是静态框架，未能充分考虑系统长周期运行下的动态特性，且带来的信息损失风险可能会导致决策偏差的问题[21]，解决这一问题除改进算法外，研究全时序规划法也很有必要；三是研究大多虽采用多目标优化方法，关注经济性和环保性等核心目标，但在新的发展要求下，仍需进一步考量系统运行的综合效益。

基于上述背景，本文构建了包含风电、光伏、水电、火电以及储能的多能互补能源基地，并针对不同电源类型组合的互补发电开展研究，从而分析风光水火储互补发电相比于单一能源发电和其他电源类型组合互补发电的优势；结合我国能源建设现状，基于全年 8 760 个时序点构建兼顾 4 部分综合效益的多目标电源容量规划模型，采用单位标准化的思想将各目标函数的数量级调整至同一水平，通过线性加权法实现多目标优化；最后选取某地的年历史风光数据进行仿真实验，对比多目标和单目标优化的规划结果，分析各类型电源的出力时序特性，验证规划模型的有效性以及各类能源在多时间尺度上的互补性。

1 风光水火储互补能源基地

1.1 组成结构

多能互补能源基地分别由风电场、光伏站、水电站、火电厂和电池储能五大电源单元组成，采用集中送出、远端消纳的运行模式，所有能源集中送出至电网，最终消纳位置由电网调度动态确定，而非直接输送至特定负荷中心，电源结构如图 1 所示。风电场和光伏站是能源基地的主力电源，负责将风能和太阳能转化为电能，通过多能互补机制与其他类型电源协同调节后集中送出。由于风光出力具有间歇性和波动性的特点，直接并网会对电力系统的稳定性造成影响，所以水电站、火电厂和电池储能承担着调节风光出力的任务，以提高能源基地总出力对电力系统的友好性。其中，火电厂机组选用经过灵活性改造的机组，电池储能相比于其他类型储能具有快速响应的优势，能够通过频繁调整出力承担调节任务中的高频部分。

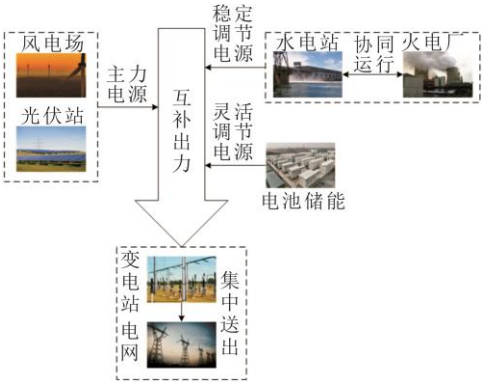


图 1 多能互补能源基地电源结构

Fig.1 Power source structure of the multi-energy complementary energy base

1.2 风光水火储互补发电

由于多能互补能源基地一般采用集中式建设

的方式，各类型电源建设于同一地理区域，并经由单个接入点或电气距离较近的多个接入点并网，因此本文从时间尺度上的互补特性展开研究，而非空间分布上的互补特性。从理论层面来看，风光资源在时间分布上具有天然的互补特性，能够在一定程度上缓解单一风电或光伏接入电网时面临的间歇性、低效性和脆弱性问题，但存在以下不足：1）互补效果受地域气候限制，在极端天气需依赖电网兜底保障；2）互补存在盲区，风光出力的峰谷难以完全匹配。针对上述问题，需要在风光互补中引入可以提供稳定调节能力的能源。

当前，行业内广泛采用的风光储、风光水以及风光火互补均存在不同方面的局限性：风光储互补储能成本高昂，且储能配置容量会随风光规模扩大而显著增加，难以实现经济上的最优解；水电本质上属于可再生能源，仍受自然条件约束，在来水不足时难以提供稳定的调节能力；火电经灵活性改造后调节能力显著提升，但在频繁调整出力场景中仍显吃力，且碳排放水平远高于水电和储能。

为解决上述问题，本文所构建的多能互补能源基地将具备调节能力的电源类型扩展至 3 种，形成风光水火储互补体系：水电和火电作为稳定调节电源，通过协同运行以实现对风光出力的互补，一是在来水不足时由火电应对水电调节能力下降的问题，二是在来水充足的其他时段，由水电主导调节任务，从而减少火电的碳排放量；储能作为灵活调节电源，可提供额外调节能力以实现对风光出力的互补，表现为在风光高峰时段充电，在负荷高峰和风光低谷时段放电，将弃电转化为可用能源，实现时间尺度上的削峰填谷。

2 电源容量规划模型

在“双碳”大背景下，国家严控煤炭消费的增长，新建火电项目的审批较为严格，且水电项目的开发趋向饱和，推动风光新能源装机存量持续稳定增长，并确保其实现高质量消纳，仍是当前国家能源建设的工作重心。为此，本文的研究方向为：在火电、水电装机规模明确的前提下，确定风电、光伏以及储能的容量配置方案。

现阶段工程中，电源容量规划所采用的最大负荷法或备用容量法的主要问题在于未能充分考虑系统的动态特性。本文采用基于优化模型的方法，将容量规划建模为数学优化问题，系统的动态特性通过约束条件加以体现。

为实现上述研究方向，本文基于全年 8 760 个时序点，构建风光水火储互补能源基地的多目标电源容量规划模型并进行电源投资决策和优化运行模拟，框架结构包括目标函数、决策变量和约束条件，充分考虑各类型电源因技术特性而在实际运行中面临的约束条件，并兼顾系统的综合效益：

1）在经济效益层面，分别将目标函数中的综合投资成本最低和综合售电收益最高作为优化方向；

2）在环境效益层面，以目标函数中的碳排放量最小作为优化方向之一；

3）在系统可靠性层面，通过约束条件中的能源基地保供率约束进行考量；

4）在新能源消纳水平层面，一方面以目标函数中的新能源弃电量最小作为优化方向之一，另一方面通过约束条件中的新能源弃电率约束和新能源电量占比约束进行考量。

2.1 目标函数

1）综合投资成本最低

$$\min C_{\mathrm{tz}}=\left(\sum_{i=1}^{n_1}c_{\mathrm{W}i,\mathrm{tz,gl}}P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}+\sum_{i=1}^{n_2}c_{\mathrm{P}i,\mathrm{tz,gl}}P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}+\sum_{i=1}^{n_5}\left(c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,gl}}P_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}}+c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,rl}}E_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}}\right)\right)\frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y-1} \tag{1}$$

式中：C_{tz}为综合投资成本，万元；n_1、n_2和n_5为风电、光伏、储能的数量；$c_{\mathrm{W}i,\mathrm{tz,gl}}$、$c_{\mathrm{P}i,\mathrm{tz,gl}}$和$c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,gl}}$为第 i 号风电、光伏、储能的单位功率投资成本，万元/MW；$P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}$、$P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}$和$P_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}}$为第 i 号风电、光伏、储能的终期规划功率，MW；$c_{\mathrm{W}i,\mathrm{tz,rl}}$为第 i 号储能的单位容量投资成本，万元/(MW h)；$E_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}}$为第 i 号储能的终期规划容量，MW h；r 为年贴现率；Y 为系统运行周期，年。

2）新能源弃电量最小

$$\min P_{\mathrm{qd}}=\sum_{t=1}^{8\,760}\left(\sum_{i=1}^{n_1}(k_{\mathrm{W}i,t}P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}-P_{\mathrm{W}i,t})+\left(\sum_{i=1}^{n_2}(k_{\mathrm{P}i,t}P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}-P_{\mathrm{P}i,t})\right)\right) \tag{2}$$

式中：P_{qd}为新能源弃电量，MW h；$k_{\mathrm{W}i,t}$、$k_{\mathrm{P}i,t}$为第 i 号风电、光伏第 t 时段的典型出力值，分别定义为该时段实时风速与额定风速、实时太阳辐射强度与额定太阳辐射强度的比值，大小范围为[0,1]；$P_{\mathrm{W}i,t}$、$P_{\mathrm{P}i,t}$为第 i 号风电、光伏第 t 时段的实时出力，MW。

3）碳排放量最小

$$\min q_{\mathrm{tpf}}=\sum_{t=1}^{8\,760}\sum_{i=1}^{n_4}f_{\mathrm{Fi,tpf}}u_{\mathrm{Fi},t}(a_{\mathrm{Fi}}P_{\mathrm{Fi},t}^2+b_{\mathrm{Fi}}P_{\mathrm{Fi},t}+c_{\mathrm{Fi}}) \quad (3)$$

式中：q_{tpf}为碳排放量，t（以单位质量 CO_2 计，下同），在本模型中，只考虑火电碳排放；n_4为火电机组的数量；$f_{\mathrm{Fi,tpf}}$为第 i 号火电机组按照燃料消耗计算碳排放的系数，t/t（以单位质量煤的 CO_2 排放质量计）；$u_{\mathrm{Fi},t}$为第 i 号火电机组第 t 时段的启停状态，1 表示开机状态，0 表示停机状态；$P_{\mathrm{Fi},t}$为第 i 号火电机组第 t 时段的实时出力，MW；a_{Fi}（t/MW^2）、b_{Fi}（t/MW）和 c_{Fi}（t）为第 i 号火电机组的燃料消耗系数（均以单位质量煤计），用于根据出力计算火电机组的燃料消耗。

4）综合售电收益最高

$$\max R_{\mathrm{sd}}=\sum_{t=1}^{8\,760}\rho_{\mathrm{sd}}P_{\mathrm{Z},t} \quad (4)$$

式中：R_{sd}为综合售电收益，万元；ρ_{sd}为售电单价，万元/(MW·h)，采用中长期合同约定的固定值形式；$P_{\mathrm{Z},t}$为第 t 时段的能源基地实时总出力，MW。

2.2 决策变量

决策变量包括：

1）风电、光伏的终期规划功率；

2）储能的终期规划功率、容量；

3）风电、光伏、水电、火电机组和储能的实时出力，以及火电机组的启停状态、储能的实时容量。

2.3 等式约束

1）功率平衡约束

$$P_{\mathrm{Z},t}=\sum_{i=1}^{n_1}P_{\mathrm{Wi},t}+\sum_{i=1}^{n_2}P_{\mathrm{Pi},t}+\sum_{i=1}^{n_3}P_{\mathrm{Hi},t}+\sum_{i=1}^{n_4}P_{\mathrm{Fi},t}+\sum_{i=1}^{n_5}P_{\mathrm{Si},t} \quad (5)$$

式中：n_3为水电的数量；$P_{\mathrm{Hi},t}$、$P_{\mathrm{Si},t}$为第 i 号水电、储能第 t 时段的实时出力，MW。

2）水电用水量平衡

$$\sum_{t=1+24(d-1)}^{24d}(a_{\mathrm{Hi}}P_{\mathrm{Hi},t}^2+b_{\mathrm{Hi}}P_{\mathrm{Hi},t}+c_{\mathrm{Hi}})-Q_{\mathrm{Hi},d}=0 \quad (6)$$

式中：a_{Hi}（m^3/MW^2）、b_{Hi}（m^3/MW）和 c_{Hi}（m^3）为第 i 号水电的用水量系数，用于根据出力计算水电的用水量；$Q_{\mathrm{Hi},d}$为第 i 号水电第 d 天的用水量，m^3。

3）储能荷电状态

$$\begin{cases}E_{\mathrm{Si},t+1}=E_{\mathrm{Si},t}+\eta_{\mathrm{Si,cd}}P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}-\dfrac{P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}}{\eta_{\mathrm{Si,fd}}}\\ P_{\mathrm{Si},t}=P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}-P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}\end{cases} \quad (7)$$

式中：$E_{\mathrm{Si},t}$为第 i 号储能第 t 时段的实时容量，MW·h；$\eta_{\mathrm{Si,cd}}$、$\eta_{\mathrm{Si,fd}}$为第 i 号储能的充电、放电效率；$P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}$、$P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}$为第 i 号储能第 t 时段的实时充电、放电功率，MW。

2.4 不等式约束

1）待规划机组容量约束

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Wi,pr,min}}\leqslant P_{\mathrm{Wi,pr}}\leqslant P_{\mathrm{Wi,pr,max}}\\ P_{\mathrm{Pi,pr,min}}\leqslant P_{\mathrm{Pi,pr}}\leqslant P_{\mathrm{Pi,pr,max}}\\ P_{\mathrm{Si,pr,min}}\leqslant P_{\mathrm{Si,pr}}\leqslant P_{\mathrm{Si,pr,max}}\\ E_{\mathrm{Si,pr,min}}\leqslant E_{\mathrm{Si,pr}}\leqslant E_{\mathrm{Si,pr,max}}\\ E_{\mathrm{Si,pr}}=T_{\mathrm{Si}}P_{\mathrm{Si,pr}}\end{cases} \quad (8)$$

式中：$P_{\mathrm{Wi,pr,min}}$、$P_{\mathrm{Wi,pr,max}}$分别为第 i 号风电的规划功率下限、上限，MW；$P_{\mathrm{Pi,pr,min}}$、$P_{\mathrm{Si,pr,min}}$、$P_{\mathrm{Pi,pr,max}}$和 $P_{\mathrm{Si,pr,max}}$同理；$E_{\mathrm{Si,pr,min}}$、$E_{\mathrm{Si,pr,max}}$分别为第 i 号储能的规划容量下限、上限，MW·h；T_{Si}为第 i 号储能的储能时长，h。

2）各机组出力约束

$$\begin{cases}0\leqslant P_{\mathrm{Wi},t}\leqslant k_{\mathrm{Wi},t}P_{\mathrm{Wi,pr}}\\ 0\leqslant P_{\mathrm{Pi},t}\leqslant k_{\mathrm{Pi},t}P_{\mathrm{Pi,pr}}\\ P_{\mathrm{Hi,min}}\leqslant P_{\mathrm{Hi},t}\leqslant P_{\mathrm{Hi,r}}\\ u_{\mathrm{Fi},t}P_{\mathrm{Fi,min}}\leqslant P_{\mathrm{Fi},t}\leqslant u_{\mathrm{Fi},t}P_{\mathrm{Fi,r}}\\ 0\leqslant P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}\leqslant z_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}P_{\mathrm{Si,pr}}\\ 0\leqslant P_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}\leqslant z_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}P_{\mathrm{Si,pr}}\\ z_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}+z_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}\leqslant 1\end{cases} \quad (9)$$

式中：$P_{\mathrm{Hi,min}}$、$P_{\mathrm{Hi,r}}$分别为第 i 号水电的最小出力、额定装机容量，MW；$P_{\mathrm{Fi,min}}$、$P_{\mathrm{Fi,r}}$分别为第 i 号火电机组的最小出力、额定装机容量，MW；$z_{\mathrm{Si},t,\mathrm{cd}}$为第 i 号储能第 t 时段的实时充电状态，1 表示充电状态，0 表示停机或放电状态；$z_{\mathrm{Si},t,\mathrm{fd}}$为第 i 号储能第 t 时段的实时放电状态，1 表示放电状态，0 表示停机或充电状态。

3）火电启停约束

$$\begin{aligned}\sum_{k=t}^{t+T_{\mathrm{Fi,on,min}}^{-1}}u_{\mathrm{Fi},k}&\geqslant T_{\mathrm{Fi,on,min}}(u_{\mathrm{Fi},t}-u_{\mathrm{Fi},t-1})\\ \sum_{k=t}^{t+T_{\mathrm{Fi,off,min}}^{-1}}(1-u_{\mathrm{Fi},k})&\geqslant T_{\mathrm{Fi,off,min}}(u_{\mathrm{Fi},t-1}-u_{\mathrm{Fi},t})\end{aligned} \quad (10)$$

式中：$T_{\mathrm{Fi,on,min}}$、$T_{\mathrm{Fi,off,min}}$分别为第 i 号火电机组允许的最小连续开机、停机时间，h。本模型中火电机组运行状况的时间单位为小时，因此不考虑爬坡约束。

4）水电用水量约束

$$Q_{\mathrm{Hi},d,\mathrm{min}}\leqslant Q_{\mathrm{Hi},d}\leqslant Q_{\mathrm{Hi},d,\mathrm{max}} \quad (11)$$

式中：$Q_{\mathrm{Hi},d,\mathrm{min}}$、$Q_{\mathrm{Hi},d,\mathrm{max}}$分别为第 i 号水电第 d 天的

用水量下限、上限，m³，根据当天的来水量确定。

5）储能容量约束

$$k_{\mathrm{S}i,\mathrm{rl},\min}E_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}}\leqslant E_{\mathrm{S}i,t}\leqslant k_{\mathrm{S}i,\mathrm{rl},\max}E_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}} \tag{12}$$

式中：$k_{\mathrm{S}i,\mathrm{rl},\min}$、$k_{\mathrm{S}i,\mathrm{rl},\max}$ 分别为第 i 号储能的容量下限、上限系数，大小范围为[0,1]。

6）新能源弃电率约束

$$0\leqslant\frac{\sum_{t=t_1}^{t_2}\left(\sum_{i=1}^{n_1}(k_{\mathrm{W}i,t}P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}-P_{\mathrm{W}i,t})+\sum_{i=1}^{n_2}(k_{\mathrm{P}i,t}P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}-P_{\mathrm{P}i,t})\right)}{\sum_{t=t_1}^{t_2}\left(\sum_{i=1}^{n_1}k_{\mathrm{W}i,t}P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}+\sum_{i=1}^{n_2}k_{\mathrm{P}i,t}P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}\right)}\leqslant r_{\mathrm{qd},\max} \tag{13}$$

式中：t_1、t_2 分别为约束的起始点、终止点，通过调整两点之间的跨度，实现对不同时间尺度下的新能源弃电率约束；$r_{\mathrm{qd},\max}$ 为设定的新能源弃电率上限。

7）新能源电量占比约束

$$r_{\mathrm{dl},\min}\leqslant\frac{\sum_{t=t_1}^{t_2}\left(\sum_{i=1}^{n_1}P_{\mathrm{W}i,t}+\sum_{i=1}^{n_2}P_{\mathrm{P}i,t}\right)}{\sum_{t=t_1}^{t_2}P_{\mathrm{Z},t}}\leqslant 1 \tag{14}$$

式中：同理可实现对不同时间尺度下的新能源电量占比约束；$r_{\mathrm{dl},\min}$ 为设定的新能源电量占比下限。

8）能源基地保供率约束

$$r_{\mathrm{bg},\min}\leqslant\frac{\sum_{t=t_1}^{t_2}P_{\mathrm{Z},t}}{\sum_{t=t_1}^{t_2}P_{\mathrm{Zjh},t}}\leqslant r_{\mathrm{bg},\max} \tag{15}$$

式中：同理可实现对不同时间尺度下的能源基地保供率约束；$P_{\mathrm{Zjh},t}$ 为第 t 时段的能源基地计划总出力，MW，根据负荷需求确定；$r_{\mathrm{bg},\min}$ 为设定的能源基地保供率下限；$r_{\mathrm{bg},\max}$ 为设定的能源基地保供率上限。

2.5 线性加权法

在优化求解中，采用线性加权法将多个目标函数转化为单个目标函数。考虑到各目标函数之间存在较明显的数量级差距，采用单位转换的思想对线性加权的目标函数进行单位标准化，单位标准化后的目标函数线性加权为：

$$\min Y=\omega_{\mathrm{tz}}C_{\mathrm{tz,N}}+\omega_{\mathrm{qd}}P_{\mathrm{qd,N}}+\omega_{\mathrm{tpf}}q_{\mathrm{tpf,N}}-\omega_{\mathrm{sd}}R_{\mathrm{sd,N}} \tag{16}$$

式中：ω_{tz}、ω_{qd}、ω_{tpf} 和 ω_{sd} 分别为综合投资成本最低、新能源弃电量最小、碳排放量最小和综合售电收益最高的权重系数；$C_{\mathrm{tz,N}}$、$P_{\mathrm{qd,N}}$、$q_{\mathrm{tpf,N}}$ 和 $R_{\mathrm{sd,N}}$ 分别为单位标准化后的综合投资成本函数、新能源弃电量函数、碳排放量函数和综合售电收益函数。

对综合投资成本进行单位标准化的思路是依次除以单位投资成本的平均值、规划对象的数量，且不考虑年贴现率的影响。

$$C_{\mathrm{tz,N}}=\frac{\sum_{i=1}^{n_1}c_{\mathrm{W}i,\mathrm{tz,gl}}P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}+\sum_{i=1}^{n_2}c_{\mathrm{P}i,\mathrm{tz,gl}}P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}+\sum_{i=1}^{n_5}(c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,gl}}P_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}}+c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,rl}}E_{\mathrm{S}i,\mathrm{pr}})}{\frac{\sum_{i=1}^{n_1}c_{\mathrm{W}i,\mathrm{tz,gl}}+\sum_{i=1}^{n_2}c_{\mathrm{P}i,\mathrm{tz,gl}}+\sum_{i=1}^{n_5}c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,gl}}+\sum_{i=1}^{n_5}c_{\mathrm{S}i,\mathrm{tz,rl}}}{n_1+n_2+2n_5}\cdot(n_1+n_2+2n_5)} \tag{17}$$

对新能源弃电量进行单位标准化的思路是依次除以风电光伏的数量、模拟运行的时间长度。

$$P_{\mathrm{qd,N}}=\frac{\sum_{t=1}^{8\,760}\left(\sum_{i=1}^{n_1}(k_{\mathrm{W}i,t}P_{\mathrm{W}i,\mathrm{pr}}-P_{\mathrm{W}i,t})+\sum_{i=1}^{n_2}(k_{\mathrm{P}i,t}P_{\mathrm{P}i,\mathrm{pr}}-P_{\mathrm{P}i,t})\right)}{8\,760\cdot(n_1+n_2)} \tag{18}$$

对碳排放进行单位标准化的思路是依次除以火电机组燃料消耗量表达式线性化后一次项系数的平均值、碳排放系数的平均值、火电机组的数量和模拟运行的时间长度。

$$q_{\mathrm{tpf,N}}=\frac{\sum_{t=1}^{8\,760}\sum_{i=1}^{n_4}f_{\mathrm{F}i,\mathrm{tpf}}u_{\mathrm{F}i,t}(a_{\mathrm{F}i}P_{\mathrm{F}i,t}^2+b_{\mathrm{F}i}P_{\mathrm{F}i,t}+c_{\mathrm{F}i})}{8\,760\cdot\frac{\sum_{i=1}^{n_4}a_{\mathrm{F}i,\mathrm{L}}}{n_4}\cdot\frac{\sum_{i=1}^{n_4}f_{\mathrm{F}i,\mathrm{tpf}}}{n_4}\cdot n_4} \tag{19}$$

式中：$a_{\mathrm{F}i,\mathrm{L}}$ 为第 i 号火电机组燃料消耗量表达式线性化后的一次项系数。

对综合售电收益进行单位标准化的思路是依次除以售电单价、发电单元的数量和模拟运行的时间长度。

$$R_{\mathrm{sd,N}}=\frac{\sum_{t=1}^{8\,760}\rho_{\mathrm{sd}}P_{\mathrm{Z},t}}{8\,760\cdot\rho_{\mathrm{sd}}} \tag{20}$$

3 算例分析

3.1 基本信息

为验证本文提出的风光水火储互补能源基地电源容量规划模型的有效性，进行仿真实验。已知机组包括 1 个装机容量为 540 MW 的水电站、1 个装机容量为 630 MW 的火电机组，最小技术出力分别为装机容量的 10%和 40%，选取某地的年历史风光数据，分别确定风电场、光伏站以及电池储能的容量配置方案，风电场的规划功率上限 1 200 MW、下限 960 MW，光伏站的规划功率上限 1 000 MW、下限 800 MW，电池储能的规划功率上限 200 MW、下限 50 MW，储能时长 2 h。

为兼顾系统的综合效益，选择相同的权重系数进行多目标优化，并分别进行以综合投资成本最低（简称投资最低）、新能源弃电量最小（简称弃电最小）和碳排放量最小（简称碳排最小）为目标的单目标优化，通过 Gurobi 求解器得到各个算例的优化结果。将多目标与单目标算例的规划结果进行对比，以验证多目标优化相较于单目标优化的有效性；分析多目标算例中各类型电源出力时序特性，包括 12 个月的各类型电源发电量和全年 8 760 h 的各类型电源出力情况，验证各类能源在多时间尺度上的互补性。

3.2 规划结果对比

电源容量规划结果见表 1。分析表 1 可知：为尽可能减少新能源弃电量，弃电最小单目标算例的储能达到规划上限；为尽可能减少火电出力以降低碳排放量，碳排最小单目标算例的风电、光伏和储能均达到规划上限；其余算例的规划量均处于上限与下限之间。

表 1 电源容量规划结果 单位：MW

Tab.1 Results of power generation capacity planning

优化目标	风电功率	光伏功率	储能功率	储能容量
多目标	1 170.15	835.84	95.77	191.55
投资最低	1 091.87	842.03	91.63	183.25
弃电最小	1 139.95	873.39	200.00	400.00
碳排最小	1 200.00	1 000.00	200.00	400.00

为更加直观地展示多目标优化相对于单目标优化的优越性，图 2 给出了目标函数优化结果。分析图 2 可知：相较于多目标算例，投资最低单目标算例的综合投资成本减少了 4.34%，但新能源弃电率和碳排放量分别提高了 0.57%和 26.8%，减少的综合投资成本所带来的其他问题，其影响程度远超成本减少所获得的收益；弃电最小单目标算例和碳排最小单目标算例同样存在此类顾此失彼的问题；与之相对，多目标算例的综合投资成本、新能源弃电率和碳排放量分别仅次于将其作为优化目标的单目标算例。此外，各算例的风光年发电量占比分别为 58.8%、54.2%、57.6%和 62.1%，其中多目标算例仅次于碳排最小单目标算例。根据现阶段的市场交易情况，设定售电单价为 0.35 元/(kW·h)，优化计算得到多目标算例的年度综合售电收益为 3.355×10^5 万元，符合该级别能源基地的收益预期。

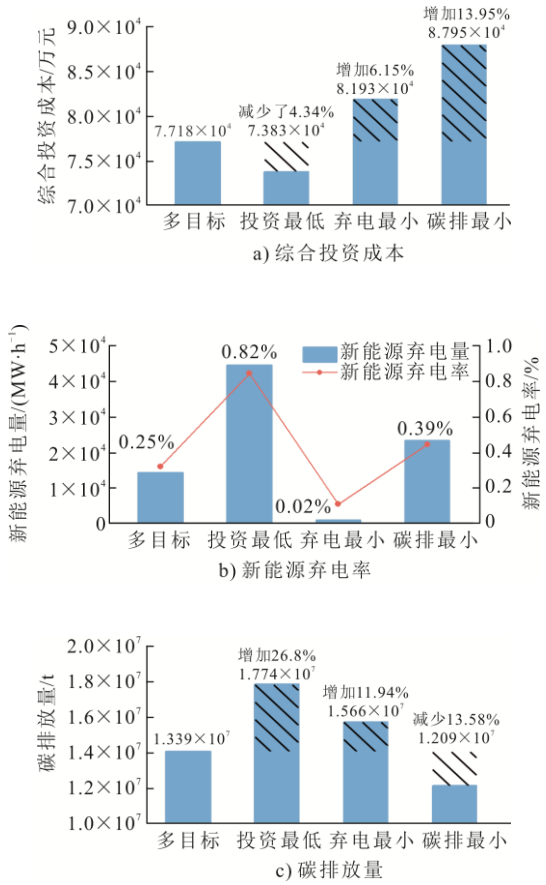


图 2 目标函数优化结果

Fig.2 Optimization results of objective functions

因此，多目标优化能够有效权衡不同优化目标之间的平衡点，避免单一目标优化的局限性。

3.3 出力时序特性分析

各类型电源月发电量如图 3 所示。分析图 3 可知：风电发电量在冬、春季节达到高峰，夏、秋季节达到低谷；光伏发电量在春季达到低谷，夏季达到高峰。风电和光伏发电在季节尺度上呈现互补趋势，但由于光伏发电量远低于风电，互补趋势并不能有效转换成互补效果。水电发电量受不同季节来水量的影响，在夏季达到高峰，春季与秋季次之，冬季达到低谷，变化趋势与光伏发电量相同，与风电发电量相反；火电发电量整体变化幅度较小，在风光发电量较高的 6 月达到低谷，在风光较低的 9 月达到高峰，与水电相互协同，形成月尺度上的风光水火互补体系。

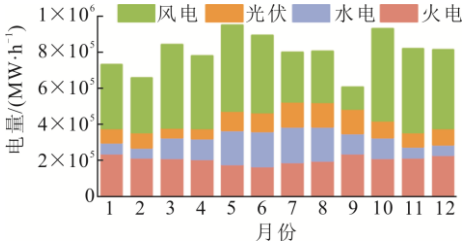
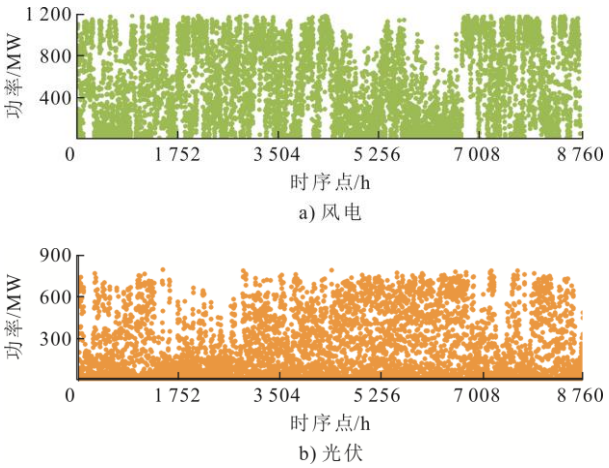


图 3　各类型电源月发电量

Fig.3 Monthly power generation of each power source type

各类型电源全年 8 760 h 出力如图 4 所示。分析图 4 可知：风电和光伏的出力受气候因素影响，波动较为明显；水电和火电受限于最小技术出力约束，存在一段出力死区。总出力较小对应风光低谷时段，若此时负荷需求较大，则水电和火电增加出力、储能放电；总出力较大对应风光高峰时段，若此时负荷需求较小，则水电和火电减少出力甚至停机、储能充电。因此，风光水火储能够在全年 8 760 个时序点上实现互补协同，水电、火电和储能根据风光出力状况调整自身的出力，使总出力尽可能满足负荷需求。



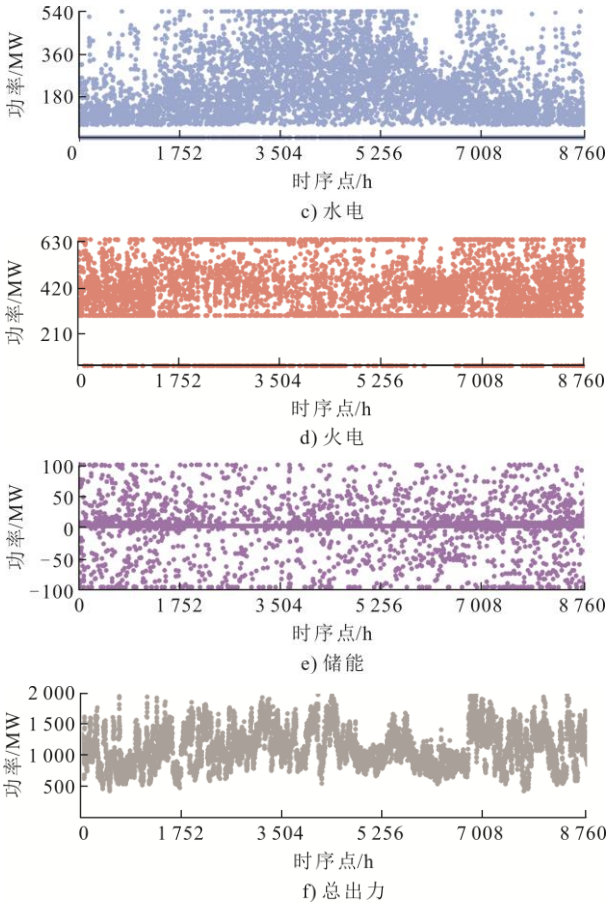


图 4　各类型电源全年 8 760 h 出力

Fig.4 Annual 8 760-hour power output of each power source type

4 结　论

1）相比于其他电源类型组合的互补发电，风光水火储互补发电将具备调节能力的电源类型扩展至 3 种，进一步增强了各类能源之间的互补效果。

2）电源容量规划模型基于全年 8 760 个时序点，兼顾系统可靠性、经济效益、环境效益、新能源消纳水平，并通过目标函数单位标准化的线性加权法实现多目标优化。

3）选取某地的年历史风光数据进行仿真实验，结果表明，多目标优化能够平衡系统的综合效益，避免陷入单一目标优化的局限性，并通过合理调整水电、火电和储能的出力，实现风光水火储在月尺度和全年 8 760 个时序点上的互补协同。

4）研究仍存在以下不足：一是全时序规划法带来计算用时较长的问题；二是使用线性加权法来实现多目标优化，本质上还是单目标优化。这些问题需在后续研究中进一步改进完善。

［参 考 文 献］

［1］ 李双成，王巧玲，刘迎陆．“双碳”目标下的中国可再

生能源发展: 机遇与挑战[J]. 气候与环境研究, 2024, 29(3): 390-398.
LI Shuangcheng, WANG Qiaoling, LIU Yinglu. Renewable energy development in China under dual carbon goal: opportunities and challenges[J]. Climatic and Environmental Research, 2024, 29(3): 390-398.
[2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
[3] WANG G, ZHANG Z, LIN J Q. Multi-energy complementary power systems based on solar energy: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 199: 114464.
[4] 韩逸飞, 徐婧, 谢典, 等. 考虑碳捕集的风光火储综合能源系统多目标运行优化[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 30-37.
HAN Yifei, XU Jing, XIE Dian, et al. Multi-objective operation optimization of wind-solar-thermal-storage integrated energy system considering carbon capture[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 30-37.
[5] 刘楠, 康俊杰, 赵春阳. 多能互补能源基地开发模式及综合效益提升方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1339-1352.
LIU Nan, KANG Junjie, ZHAO Chunyang. Development model of multi-energy complementary energy base and comprehensive benefit enhancement method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1339-1352.
[6] 向开端, 王辉, 彭婷婷, 等. 含混合储能的风光储系统容量优化配置[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13415-13422.
XIANG Kaiduan, WANG Hui, PENG Tingting, et al. Optimal capacity allocation of wind-solar-storage system with hybrid energy storage[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13415-13422.
[7] ZHANG Y S, LIAN J J, MA C, et al. Optimal sizing of the grid-connected hybrid system integrating hydropower, photovoltaic, and wind considering cascade reservoir connection and photovoltaic-wind complementarity[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123100.
[8] 周保中, 刘敦楠, 张继广, 等. “风光火一体化”多能互补项目优化配置研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 10-18.
ZHOU Baozhong, LIU Dunnan, ZHANG Jiguang, et al. Research on optimal allocation of multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 10-18.
[9] WEI D N, ZHANG Z L, ZHANG W Q, et al. Optimization of multi-energy complementary power generation system configuration based on particle swarm optimization[J]. Energy Reports, 2024, 12: 2257-2269.
[10] WANG Y, LIU J J. Optimal capacity allocation of wind-light-water multi-energy complementary capacity based on improved multi-objective optimization algorithm[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 1115769.
[11] 刘忠, 陈星宇, 邹淑云, 等. 计及碳排放的风-光-抽水蓄能系统容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 9-18.
LIU Zhong, CHEN Xingyu, ZOU Shuyun, et al. Optimal capacity configuration method for wind-photovoltaic-pumped-storage system considering carbon emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 9-18.
[12] 李宁, 齐尚敏, 刘海洋, 等. 基于机组出力特征解析的风光储联合规划[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 91-98.
LI Ning, QI Shangmin, LIU Haiyang, et al. Wind power-photovoltaic-energy storage joint planning based on unit output characteristic analysis[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 91-98.
[13] 廖超豪, 李根. 基于现有火电容量的多能互补能源基地风光储容量优化配置研究[J]. 水力发电, 2024, 50(9): 74-81.
LIAO Chaohao, LI Gen. Optimal allocation of wind-photovoltaic-battery capacity of multi-energy complementary energy base based on existing thermal power capacity[J]. Hydropower Generation, 2024, 50(9): 74-81.
[14] 路小娟, 白建聪, 范多进, 等. 风光热储互补发电系统容量配置技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 51-58.
LU Xiaojuan, BAI Jiancong, FAN Duojin, et al. Research on capacity configuration technology of wind-solar-thermal-storage complementary power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 51-58.
[15] FU J M, ZENG G, JI Y, et al. Development of a capacity allocation model for the multi-energy hybrid power system[J]. Journal of Thermal Science, 2025, 34(3): 936-952.
[16] 陈安琪, 王丽娟, 罗永钦, 等. 考虑季节性波动的水火风光多能互补系统容量优化配置方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2025(12): 193-199.
CHEN Anqi, WANG Lijuan, LUO Yongqin, et al. Reach on optimal capacity configuration for seasonal hydroelectric-thermal-wind-photovoltaic multi-energy complementary system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(12): 193-199.
[17] 阮前途, 叶荣. 保障极端天气下供需安全的新型电力系统电源规划[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(4): 103-115.
RUAN Qiantu, YE Rong. Power source planning of new power system for guaranteeing supply-demand security under extreme weather[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 103-115.
[18] 马燕峰, 傅钰, 赵书强, 等. 基于 WGAN 风光资源场景模拟和时序生产模拟的新能源电源容量配置[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 77-86.
MA Yanfeng, FU Yu, ZHAO Shuqiang, et al. Capacity allocation of new energy source based on wind and solar resource scenario simulation using WGAN and sequential production simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 77-86.
[19] LI W Y, DONG F G, LIU J M, et al. A three-stage decision-making study on capacity configuration of hydropower-wind-photovoltaic-storage complementary systems considering uncertainty[J]. Energy, 2024, 313: 134007.
[20] 刘金华, 陈璐, 刘凡骞, 等. 风-光-抽水蓄能互补系统经济容量配置研究[J]. 供用电, 2025, 42(4): 99-107.
LIU Jinhua, CHEN Lu, LIU Fanqian, et al. Study on economic capacity allocation for wind-solar-pumped storage complementary system[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(4): 99-107.
[21] ZHUANG Y R, CHENG L, QI N, et al. Problem-Driven scenario reduction framework for power system stochastic operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40: 3232-3246.

（责任编辑 李园）