中国科学: 技术科学 2025 年 第 55 卷 第 11 期: 1865 ~ 1874
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

面向多能互补新能源大基地的“风光火储”双层优化配置研究

严新荣[1,2], 谢玉荣[2], 黄嵘[2*], 高翔[1], 郑成航[1]

1. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310027
2. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030
* E-mail: rong-huang@chder.com

收稿日期: 2025-03-28; 接受日期: 2025-08-07; 网络版发表日期: 2025-11-12

摘要 为应对当前新能源大基地中调节能力不足、不确定性高、外送通道与电源建设不匹配等问题, 本文基于风电、光伏、火电及储能等多种能源形式的互补特性, 构建了新能源大基地双层配置优化模型. 上层为各类能源的容量配置优化, 下层基于容量配置结果对系统进行日内经济性运行优化, 模型考虑多能互补容量优化以及“风光”发电的不确定性因素, 从而进一步提升系统的可靠性、灵活性与经济性. 仿真结果表明, 本文模型相比传统方法能够增强对不确定因素的应对能力, 显著降低系统的弃风弃光率, 实现了电力供需匹配平衡并提升了可再生能源综合利用率. 本研究旨在有效提升多能互补大基地系统的整体性能, 并为大规模清洁能源基地的建设与优化策略提供一定的参考.

关键词 新能源大基地, “风光火储”, 多能互补, 容量配置, 运行优化

1 引言

随着全球对清洁能源需求的不断增加, 大型新能源基地的建设已成为国家能源结构调整的核心战略之一. 特别是在中国, 大型风电光伏基地规划布局方案, 成为实现“碳达峰、碳中和”目标的重要一环[1]. 新能源大基地承载着清洁电力的外送任务以实现中东部负荷中心的绿色电力供应.

为适应大基地的建设需求, 在此背景下, 已有大量研究从优化系统配置、协同运行、设备选型等多方面探究如何提升新能源大基地的灵活性、稳定性和运行效率.

梅惠等人[2]和丁坤等人[3]基于光热电站与“风光储”联合外送大基地系统, 优化光热电站的投资收益, 提出置信容量评估体系及调峰潜力评价模型, 得到耦合光热电站的“风光火储”容量最优配比. 王玲等人[4]和乔一帆等人[5]利用水电与抽水蓄能调节“风光”资源, 建立时序生产模拟模型并给出安全经济的“风光水”大基地最优容量配置方案. 吴琥等人[6]考虑电源侧投资经济性前提下, 考虑能源供应商参与源-荷双侧投资, 实现电-氢双能源送出、荷随源动的能源大基地容量优化配置. 此部分研究主要从配置层面优化系统投资

引用格式: 严新荣, 谢玉荣, 黄嵘, 等. 面向多能互补新能源大基地的“风光火储”双层优化配置研究. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 1865–1874
Yan X R, Xie Y R, Huang R, et al. Optimization of “wind, solar, thermal, and storage” double-layer allocation for multi-energy complementary new energy bases (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 1865–1874, doi: 10.1360/SST-2025-0061

© 2025 《中国科学》杂志社

经济性.

杨银国等人[7]和黄源烽等人[8]从日前/日内预测的精度方面, 构建多时间尺度协调架构, 改善能源基地“风光火”协同发电能力. 赵攀等人[9]通过基于热电共蓄式长时储能系统的耦合能源基地系统的协同调度策略, 实现了风电灵活消纳及火电调峰能力的协同优化. 易瑞吉[10]提出一种综合利用的新型能源基地调度系统的设计与实现方法, 对能源的协同调度提供决策依据, 实现对能源的预报、调度、评价的闭环管理. 李远征等人[11]构建了新能源系统与分布式数据中心协同运行优化框架, 基于双层非线性方法提升消纳能力并验证多场景有效性. 此部分研究主要针对不同角度从调度运行层面改善调节系统能力.

然而面对解决输电能力与新能源基地开发规模不匹配问题, 上述研究仍未能全面考虑容量配置以及运行优化的协同效应, 以及在处理系统不确定性方面有所欠缺. 针对上述难题, 本研究构建了新能源大基地“风光火储”多种能源系统的双层配置优化模型, 以年总成本最低为目标, 旨在通过双层优化模型循环迭代实现基地能源系统的最优配置与高效协同运行, 并选择国内某地区负荷作为送电受端负荷进行仿真验证. 该模型考虑了不确定性对系统的影响, 同时兼顾了不同储能技术的引入对系统灵活性和经济性的提升, 为大型新能源基地的建设和运营提供了理论依据, 并为大规模清洁能源基地建设提供一定参考.

2 新能源大基地基本架构

新能源大基地数学模型的建立是对其容量配置和协同运行的前提条件与支撑, 新能源大基地整体系统结构图如图1所示.

新能源大基地能源供给主力是风电(wind turbine, WT)和光伏(photovoltaic, PV), 煤电机组(coal-fired unit, CFU)作为输电通道辅助电源, 发挥支撑性、调节性的关键作用, 输电通道配置一定规模储能装置, 促进新能源跨区输送以满足通道清洁能源电量占比需求, 为通道提供可靠电力支撑, 负荷端主要为本地负荷以及将剩余电量进行外送, 输电受端需要系统评估不同季节典型日的负荷曲线特征, 同时需结合新能源发电出力特性等因素综合分析.

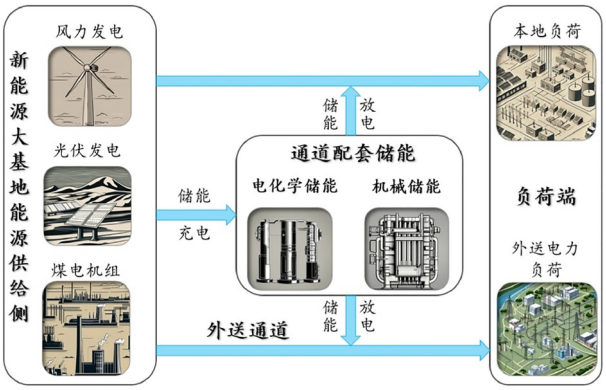


图 1 (网络版彩图)新能源大基地系统结构图

Figure 1 (Color online) New energy large base system structure diagram.

综合考虑新能源基地调峰、调频、调压等灵活性功能需求, 通过合理优化各种能源设备配置种类和规模, 在保障系统安全稳定运行的基础上实现全生命周期成本管控, 并提高直流通道电力支撑能力和送端新能源消纳水平.

3 双层优化配置模型

本研究构建的可再生能源大基地双层优化配置模型的目标在于针对不确定因素在一定区间内朝着极端工况场景变化时经济性最优的容量配置和协同运行方案, 具体形式如下:

$$\max F=\max_{N_k}\ \{F_{\text{sell}}-Cost_{\text{inv}}-\max_{P^{\text{u}}}\min_{P,I}\ Cost_{\text{run}}\},\tag{1}$$

$$P^{\text{u}}=[P^{\text{u}}_{\text{WT}},P^{\text{u}}_{\text{PV}},P^{\text{u}}_{\text{load}}],\tag{2}$$

$$P=[P_{\text{CFU}},P^{\text{ch}}_m,P^{\text{dis}}_m],\ \ m\in\{\text{STES},\text{LTES}\},\tag{3}$$

$$I=[I_k,I_{\text{CFU}}],\tag{4}$$

式中F表示基地年总收益; F_{sell}表示年售电总收益; $Cost_{\text{inv}}$表示上层优化目标即等值年投资成本; $Cost_{\text{run}}$表示下层优化目标即年运维成本; N_k表示设备k的装机数量, 为上层优化决策变量; P^{u}表示风电、光电、负荷的不确定性变量; P_{CFU}表示煤电的输出功率; $P^{\text{ch}}_m,P^{\text{dis}}_m$表示储能$m$的充放电功率; I为布尔变量, 其中I_k和I_{CFU}分别表示储能充放电标识变量和煤电的启停标识变量; STES, LTES表示短时储能和中长时储能.

3.1　上层容量配置优化模型

(1) 上层优化目标函数

上层优化目标函数以全寿命周期成本理论为基础由全年售电收益F_{sell}和等值年投资成本$Cost_{\text{inv}}$组成[12], 具体模型如下:

$$F_{\text{sell}}=\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}p_{\text{e}}\left(\left(P_{s,\text{PV}}(t)+P_{s,\text{WT}}(t)\right)+P_{s,\text{CFU}}(t)\right), \tag{5}$$

$$Cost_{\text{inv}}=\sum_{k=1}^{K}N_k\cdot Cap_k^{\text{rate}}\cdot c_k^{\text{uint}}(1-R)\frac{(1+r)^{\tau_k}-1}{r(1+r)^{\tau_k}}, \tag{6}$$
$$k\in\{\text{WT,PV,CFU,STES,LTES}\}$$

式中p_e表示当地燃煤标杆电价; K表示设备种类数; k表示设备的标识; N_k和Cap_k^{rate}分别表示设备k的装机数量和单机额定容量; c_k表示单位容量建设成本(元); R表示固定资本残值率; r表示贴现率; τ_k表示使用年限.

(2) 上层约束条件

大基地上层配置环节, 需根据资源开发条件对待配置设备的容量上下限进行限定:

$$Cap_k=N_k\cdot Cap_k^{\text{rate}},\quad N_k\in\mathbb{Z}, \tag{7}$$

$$0\leqslant Cap_k\leqslant Cap_k^{\max}, \tag{8}$$

式中Cap_k和$Cap_k^{\max}$分别表示设备k的实际容量以及可配置的最大容量.

3.2　下层协同运行模型

(1) 下层优化目标函数

新能源大基地下层协同运行目标函数主要包含“风光火储”四部分年运维成本, 具体如下:

$$Cost_{\text{run}}=Cost_{\text{run}}^{\text{WT}}+Cost_{\text{run}}^{\text{PV}}+Cost_{\text{run}}^{\text{CFU}}+Cost_{\text{run}}^{m}, \tag{9}$$

式中$Cost_{\text{run}}^{\text{WT}}$, $Cost_{\text{run}}^{\text{PV}}$, $Cost_{\text{run}}^{\text{CFU}}$, $Cost_{\text{run}}^{m}$分别表示风电、光电、煤电以及储能四部分年运维成本.

3.2.1　风电机组模型

风电设备的年运行维护费用与实际输出功率P_{WT}^{u}可近似成正比, 如下:

$$Cost_{\text{run}}^{\text{WT}}=\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}\delta_{\text{WT}}P_{s,\text{WT}}(t), \tag{10}$$

式中D_s表示典型日s对应的天数; T表示划分的时段数, 本文T=24; $P_{\text{WT}}(t)$和$\delta_{\text{WT}}(t)$分别表示风电机组在t时段的实际输出功率和日运维成本系数.

考虑不确定性后, 风电不确定性输出功率变量P_{WT}^{u}需在可控区间内, 实际输出功率P_{WT}受其不确定性以及最大出力边界约束[13]:

$$P_{s,\text{WT}}^{\text{th}}(t)-\Delta P_{s,\text{WT}}^{\text{u}}(t)\leqslant P_{s,\text{WT}}^{\text{u}}(t)\leqslant P_{s,\text{WT}}^{\text{th}}(t)+\Delta P_{s,\text{WT}}^{\text{u}}(t), \tag{11}$$

$$0\leqslant P_{s,\text{WT}}(t)\leqslant P_{s,\text{WT}}^{\text{u}}(t)\leqslant Cap_{\text{WT}}, \tag{12}$$

式中$P_{s,\text{WT}}^{\text{th}}$表示典型日$s$风电理论输出功率; $\Delta P_{s,\text{WT}}^{\text{u}}$表示典型日$s$风电出力的最大波动偏差; Cap_{WT}表示上层优化得到的风电配置容量.

影响风力发电理论输出功率$P_{s,\text{WT}}^{\text{th}}$的主要因素为风速, 由于风速变化随机性较强且预测精准度不高, 风机输出功率曲线呈现非线性关系, 但其功率输出通常近似满足威布尔分布常用分段函数表示[14].

$$P_{s,\text{WT}}^{\text{th}}=\begin{cases}0, & v\leqslant v_{\text{in}},\\ P_{\text{WT}}^{\text{rate}}\dfrac{v-v_{\text{in}}}{v_{\text{rate}}-v_{\text{in}}}, & v_{\text{in}}\leqslant v<v_{\text{rate}},\\ P_{\text{WT}}^{\text{rate}}, & v_{\text{rate}}\leqslant v<v_{\text{out}},\\ 0, & v\geqslant v_{\text{out}},\end{cases} \tag{13}$$

式中$P_{\text{WT}}^{\text{rate}}$表示风机的额定功率; v, v_{rate}, v_{in}和v_{out}分别表示风机的实际、额定、切入和切出风速.

3.2.2　光伏发电模型

光伏发电的年运行维护费用表示如下:

$$Cost_{\text{run}}^{\text{PV}}=\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}\delta_{\text{PV}}P_{s,\text{PV}}(t), \tag{14}$$

式中δ_{PV}表示光伏发电的日运行运维成本系数; $P_{s,\text{PV}}(t)$表示典型日s在t时段的理论输出功率.

本文为更准确表现“风光”实际出力以及负荷的不确定性, 使用区间线性规划方法, 光伏发电不确定性输出功率变量P_{PV}^{u}需在可控区间内, 实际输出功率P_{PV}受其不确定性以及最大出力边界约束:

$$P_{s,\text{PV}}^{\text{th}}(t)-\Delta P_{s,\text{PV}}^{\text{u}}(t)\leqslant P_{s,\text{PV}}^{\text{u}}(t)\leqslant P_{s,\text{PV}}^{\text{th}}(t)+\Delta P_{s,\text{PV}}^{\text{u}}(t), \tag{15}$$

$$0\leqslant P_{s,\text{WT}}\leqslant P_{s,\text{PV}}^{\text{u}}(t)\leqslant Cap_{\text{PV}}, \tag{16}$$

式中$P_{s,\text{PV}}^{\text{th}}$表示典型日$s$的光伏发电理论输出功率; $\Delta P_{s,\text{WT}}^{\text{u}}$表示输出功率的最大波动偏差; Cap_{PV}表示上层

优化得到的光伏发电容量配置.

其中光伏理论输出功率主要受光强、环境温度及自身物理参数等影响, 据工程经验一般可表示为[15]

$$P_{s,\mathrm{PV}}^{\mathrm{th}}=f_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{rate}}\frac{R}{R_{\mathrm{stc}}}\left[1+k\left(Temp+\frac{30R}{R_{\mathrm{stc}}}-Temp_{\mathrm{stc}}\right)\right], \tag{17}$$

式中$P_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{rate}}$表示光伏的额定功率(kW); f_{PV}表示光伏降额因子; k表示功率温度系数; R和R_{stc}分别表示外界和标况下的光照辐射强度; $Temp$和$Temp_{\mathrm{stc}}$分别表示外界实际环境温度和标况下的温度.

3.2.3 煤电机组模型

燃煤机组日运维成本主要由机组出力成本及启停调度费用构成, 其中停机损耗较小可予忽略, 本文仅计算启动成本, 其具体模型如下所示[16]:

$$Cost_{\mathrm{run}}^{\mathrm{CFU}}=\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}aP_{s,\mathrm{CFU}}(t)+I_{s,\mathrm{CFU}}(t)(b+c_{per}), \tag{18}$$

$$P_{\mathrm{CFU}}^{\min}\leqslant P_{s,\mathrm{CFU}}(t)\leqslant Cap_{\mathrm{CFU}}, \tag{19}$$

$$-vCap_{\mathrm{CFU}}\leqslant P_{s,\mathrm{CFU}}(t+1)-P_{s,\mathrm{CFU}}(t)\leqslant vCap_{\mathrm{CFU}}, \tag{20}$$

式中$P_{s,\mathrm{CFU}}$表示典型日s的煤电机组输出功率; a和b分别表示机组出力的可变成本系数和固定成本系数; $I_{s,\mathrm{CFU}}$表示典型日s在t时段机组的启停标识二进制变量, 启机时$I_{s,\mathrm{CFU}}=1$, 停机时$I_{s,\mathrm{CFU}}=0$; c_{per}表示机组单次启动成本; $P_{\mathrm{CFU}}^{\min}$表示机组出力下限; Cap_{CFU}表示上层优化得到的煤电机组配置容量作为其最大出力约束, v表示煤机的爬坡速率.

3.2.4 储能装置模型

储能装置的年运行维护费用如下:

$$Cost_{\mathrm{run}}^{m}=\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}\delta_m\left(P_{s,m}^{\mathrm{ch}}(t)+P_{s,m}^{\mathrm{dis}}(t)\right), \tag{21}$$

式中δ_m表示储能装置m在t时段日运行运维成本系数; $P_{s,m}^{\mathrm{ch}}(t)$和$P_{s,m}^{\mathrm{dis}}(t)$表示储能装置$m$在典型日$s$中$t$时段充放电功率.

根据基地整体方案、现场条件和场景应用需求合理确定储能的具体类型和规模, 输送通道配置储能能够有效提高可再生能源大基地系统运行的可靠性. 储能装置的剩余电量模型可表示为

$$SOC_{s,m}(t+1)=SOC_{s,m}(t)(1-\sigma_m)+\eta_m^{\mathrm{ch}}P_{s,m}^{\mathrm{ch}}(t)\Delta t-\frac{P_{s,m}^{\mathrm{dis}}(t)}{\eta_{s,m}^{\mathrm{dis}}}\Delta t, \tag{22}$$

式中$m\in\{\mathrm{STES,LTES}\}$, σ_m表示储能损失系数; $SOC_{s,m}(t+1)$和$SOC_{s,m}(t)$分别表示典型日s储能装置m在t+1和t时段的剩余电量; $\eta_{s,m}^{\mathrm{ch}}$和$\eta_{s,m}^{\mathrm{dis}}$表示充放电效率.

储能装置的充放电功率受最大充放电功率和当前剩余容量限制, 且储能设备不能同时充放电, 需满足的约束描述如下[17]:

$$0\leqslant P_{s,m}^{\mathrm{ch}}(t)(t)\leqslant I_{s,m}(t)P_m^{\max}, \tag{23}$$

$$0\leqslant P_{s,m}^{\mathrm{dis}}(t)\leqslant\left(1-I_{s,m}(t)\right)P_m^{\max}, \tag{24}$$

$$SOC_{s,m}(0)=SOC_{s,m}(T), \tag{25}$$

$$SOC_m^{\min}\leqslant SOC_{s,m}(t)\leqslant SOC_m^{\max}, \tag{26}$$

式中$P_m^{\max}$表示储能的最大充放电功率; $SOC_{s,m}(0)$和$SOC_{s,m}(T)$分别表示典型日s优化初始和结束时刻储能装置m的电量; $SOC_{s,m}^{\min}$和$SOC_{s,m}^{\max}$分别表示储能装置m所能存储电量的上下限; $I_{s,m}(t)$表示典型日s在t时段储能装置m充电状态标识变量, 充电时$I_{s,m}=1$, 放电时$I_{s,m}=0$.

3.2.5 其他约束条件

(1) 功率平衡约束

新能源大基地运行需维持设备输入输出功率和外送电力负荷需求平衡, 具体描述如下:

$$P_{s,\mathrm{WT}}(t)+P_{s,\mathrm{PV}}(t)+P_{s,\mathrm{CFU}}(t)+P_{s,m}^{\mathrm{dis}}(t)-P_{s,m}^{\mathrm{ch}}(t)=P_{s,\mathrm{load}}^{\mathrm{u}},\quad s\in S. \tag{27}$$

功率平衡约束在各季节典型日中均需满足.

(2) 清洁性指标约束

根据源网荷储一体化发展指导意见, 外送能源基地清洁能源发电量比例需维持50%以上基准[18], 具体表示如下:

$$\frac{\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}\left(P_{s,\mathrm{PV}}(t)+P_{s,\mathrm{WT}}(t)\right)}{\sum_{s=1}^{S}D_s\sum_{t=1}^{T}P_{s,\mathrm{load}}^{\mathrm{u}}(t)}\geqslant 0.5. \tag{28}$$

3.3　模型求解

本文采用双层优化模型对新能源大基地系统进行仿真优化, 主要求解流程如图2所示.

上层规划模块优化机组容量配置, 其输出参数作为下层运行优化的边界约束条件, 下层为协同运行优化模块, 计算出典型日内各设备的最优运行出力方案目标函数并反馈给上层优化模型, 从而实现双层优化决策的相互作用.

4　算法实例

本文以某东部地区作为送电受端, 综合考虑该地区各季节典型日的负荷特性、基地“风光”出力特性及消纳条件等因素分析, 在模型中导入能源价格及负荷时序数据等基础参数, 耦合环境因素预测可再生能源出力功率, 仿真优化求解得到容量规划方案以及各典型日下机组运行出力情况并进行评价.

4.1　参数设置与数据输入

4.1.1　模型基本参数

双层优化模型中设备相关主要参数如表1所示.

4.1.2　受端负荷数据

综合考虑受端区域的负荷特性, 初步考虑最大送电功率不低于500万千瓦的送电规模以保障在受端负荷高峰时能够提供稳定的电力支撑, 如图3所示, 负荷曲线主要呈现夏冬小于春秋两季的分布规律.

4.1.3　可再生能源出力

通过分析该区域的环境数据能够仿真得到风力发电和光伏发电的在四个季节典型日的出力情况, 具体如图4所示.

4.1.4　场景设置

在“风光”建设条件受限且面对送电负荷需求时, 煤电与储能的协同配置+双层优化模型能够以最低年总成本实现大基地系统安全低碳经济的运行.

(1) 场景1: 假设“风光”资源极为丰富的条件下, 不考虑配置煤电和储能设施. 暴露高波动性对输电和可靠性的影响, 作为成本与风险的基准. 这种配置环保但“风光”资源极为不稳定, 且为满足部分高负荷需求易造成极端配置.

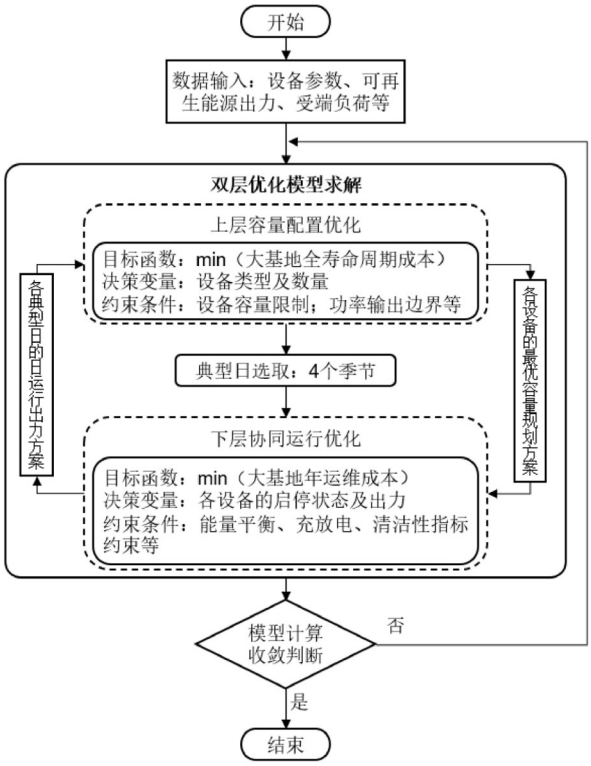


图 2　新能源大基地系统双层优化流程图

Figure 2　Flowchart of two-stage robust optimization of new energy large base system.

表 1　设备相关主要参数

Table 1　Main parameters of the equipment

设备类型	参数名称	数值
风电选型 单机容量7 kW	工程造价 (元/kW)	3600
	运维系数	0.04
	v_{in}, v_{rate}, v_{out} (m/s)	3.5, 12, 13.5
光伏选型550 W	工程造价 (元/kW)	3250
	运维系数	0.012
	f, R_{stc}, T_{stc}	0.9, 1000, 25
电化学储能选型 100 kW/200 kWh	工程造价 (元/kW)	1200
	运维系数	0.018
	δ, η^{ch}, η^{dis}	0.005, 0.95, 0.95
煤电机组选型 660 MW	工程造价 (元/kW)	2177
	标准煤耗率 (g/kWh)	305.8
	标准煤价 (元/吨)	1078
	a, b (MWh/kg)	12, 10363.68

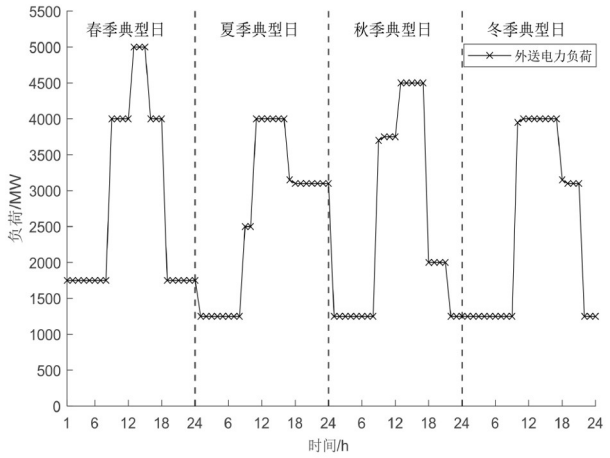


图 3 新能源大基地各典型日负荷曲线图

Figure 3 Typical daily load curves of new energy bases in various seasons.

(2) 场景2: 在场景1的条件下, 考虑合理配置煤电作为补充, 而不配储能. 验证煤电对稳定性的提升, 但暴露碳排放问题, 作为环保性对比基准. 该场景下煤电可以稳定供电, 并在“风光”资源不足时提供电力支持. 但煤电可能带来碳排放的环境污染问题.

(3) 场景3: 根据当地建设条件, “风光”可装机容量均小于等于3 GW, 此时合理配置煤电满足负荷需求. 煤电具有供电稳定和调节灵活的特点, 可以弥补“风光”资源的不足. 但需权衡煤电可能带来的环境问题, 以及煤电与“风光”资源之间的协调问题.

(4) 场景4: 在场景3的基础上配套部署储能, 此时探索煤电与储能的最佳配比成为重要课题. 煤电提供稳定电力, 储能设施在“风光”资源不足时释放电能. 需综合考虑煤电和储能设施的环境、经济因素, 通过技术分析和模拟仿真确定最佳配比方案. 通过双层配置优化模型, 验证煤电与储能的协同如何平衡经济性、可靠性、环保性.

4.2 优化结果分析

通过上述数据输入以及相关场景设置, 模型上层运行优化后的决策变量即能得到4个场景最优配置容量, 如图5所示.

从目标函数角度分析本文构建的新能源大基地优化模型的优劣, 双层优化总目标函数主要包括了等值年投资成本、年运维成本以及年弃电损失成本, 如表2所示为4种场景下不同部分的成本.

统计不同场景下可再生能源的出力情况以及弃电量进行分析, 如图6所示.

观察上述容量配置对比、经济性总览结果以及可再生能源利用情况对比如下.

(1) 场景1(纯“风光”): “风光”虽无建设条件限制, 但“风光”出力受天气影响较大, 根据图5能够看出该场景需依赖极端冗余配置用以保障供电可靠性满足负荷需求. 表2中该场景虽然其年运维成本较低, 但过高的投资成本和极端冗余配置导致年总收益严重亏损, 且

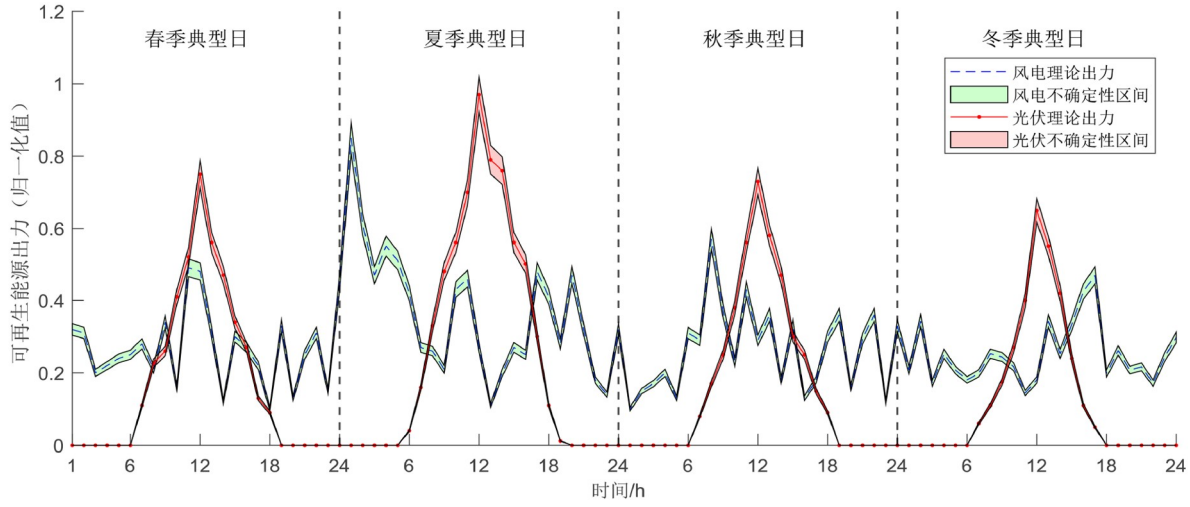


图 4 (网络版彩图)各季节典型日可再生能源出力情况

Figure 4 (Color online) Typical daily renewable energy output by season.

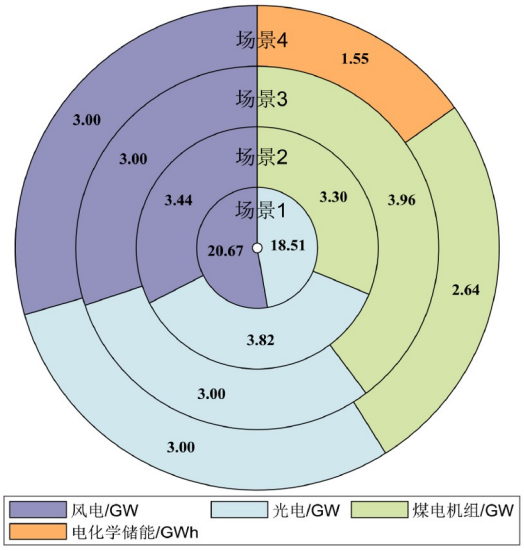


图 5　(网络版彩图)各场景设备容量对比图

Figure 5　(Color online) Comparison of device capacity in various scenarios.

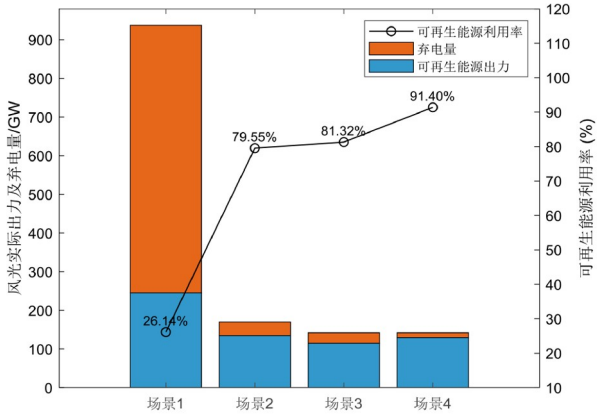


图 6　(网络版彩图)各场景可再生能源利用情况分析图

Figure 6　(Color online) Analytical map of renewable energy utilization by scenario.

图6中显示其实际可再生能源利用率仅26.14%，不配置煤电追求零碳而牺牲了经济性，“风光”出力波动性也未得到任何平抑，供电可靠性极低，需依赖冗余容量勉强维持, 该极端场景是不可持续的.

(2) 场景2(“风光+火电”): 在场景1的条件下考虑了煤电作为稳定电源补充后, 图5中显示仿真计算配置了煤电3.3 GW, 此时“风光”装机大幅下降, 该场景中借助煤电保证基荷的稳定运行和一定的调峰能力，降低对“风光”波动的依赖. 表2中能够看到相比场景1其投资成本下降77%, 并实现了盈利图6也表现出煤电的支撑使可再生能源利用率也上升至79.55%，供电稳定性显著改善. 然而该场景煤电运维成本出现了激增且会造成碳排放大幅上升. 这一配置牺牲了环保性换取一定的经济性与可靠性，但高弃电率表明系统仍存在严重的资源错配，且该场景未考虑“风光”的实际建设条件情况.

(3) 场景3(“风光受限+火电”)考虑了在“风光”装机条件受限的情况下(≤3 GW), 图5中煤电增配至3.96 GW以满足负荷需求，此时更为依赖煤电弥补供电缺口通过煤电灵活性填补“风光”不足. 然而表2中显示煤电装机进一步增加导致了年运维成本攀升至最高，系统被迫以高燃料成本、高碳排放为代价维持供电.

(4) 场景4(“风光火储”)在场景3条件下期望通过储能煤电协同优化, 减少煤电依赖并平抑“风光”波动.

在上层容量配置的优化的结果下，对不同典型日进行各设备的协同运行策略优化，结合场景4运行出力情况进行分析, 如图7所示.

首先结合图5与表2可知, 该场景通过配置了1.55 GW的储能替代部分煤电容量使其降低至2.64 GW，使总投资成本降至最低(22.84万元)，实现了削峰填谷减少煤电调峰需求; 同时通过削峰填谷降低煤电燃料消耗, 年运维成本下降8%; 图6显示其可再生能源利用率提升至91.4%, 弃电损失锐减54%(至396.38万元), 实现了 “投资-运维-弃电”全维度经济性最优，年收益达到7.74万元.

表 2　成本总览表

Table 2　Cost overview

成本/收益 (万元)	场景1	场景2	场景3	场景4
等值年投资成本	111.95	25.7190	23.31	22.84
年运维成本	5.04	34.86	40.12	36.87
年弃电损失成本	2.25	1125.83	860.78	396.38
年总收益	–51.75	6.80	3.97	7.74

通过具体运行情况并结合“风光”出力曲线从不同季节进行如下分析.

春秋季典型日如图7(a)和(c)所示，风电在春秋季的出力相对稳定，全天候保持在15万至24万千瓦之间，表现出较强的稳定性和持续性. 能满足较大部分的电力需求. 有助于优化资源利用，减少了对其他能源的依赖. 煤电机组仅在风电和光伏出力不足时进行补充，减少了化石能源的消耗. 储能主要在光伏发电的高峰期进行充电，并在下午和晚间进行放电(13~18时)，有效平衡了光伏发电在白天的过剩电力.

夏季典型日如图7(b)所示，由于夏季是光伏发电的高峰期，夏季燃煤机组的出力在白天有所减弱，特别是在光伏发电的高峰期，通过降低燃煤出力，减少了对化石能源的依赖，在光伏发电不足的夜间作为主要的电力供应源.

冬季典型日如图7(d)所示，可以看出冬季典型日光伏发电较弱，风电出力较为稳定，同时冬季的负荷曲线可能较为平滑，峰谷差异相对较小，这意味着在负荷高峰时，不需要大量储能设备的支持来平衡供电与需求之间的差异，特别是在光伏发电贡献较低的情况下，依靠储能和燃煤机组的协调，减少了系统的不稳定性.

综上所述, 该场景通过“风光火储”协同控制, 系统充分利用了风电和光伏发电的波动特性，配合储能实现削峰填谷，减少煤电频繁启停和低效调峰，提高煤电机组利用率. 该策略在不同时间段灵活控制储能充放电，降低了传统能源消耗，同时优化了系统运行成本. 整体运行情况提高了可再生能源的利用率，有效平衡了电力供需，为“风光”建设受限地区提供了经济、环保、可靠的最优解.

5 结论

本文构建的新能源大基地双层配置优化模型，上下层模型双向传递参数迭代收敛同时优化利用好“风光火储”等多能源的互补性, 使系统能够更加灵活地应对可再生能源出力的波动性与不确定性，有效提高了可再生能源的利用率的同时还增强了系统的可靠性和经济性. 成功解决了容量配置和协同运行相互影响的问题，在上层中模型依据系统需求进行设备容量的最优配置，下层的运行优化则依据配置结果，计算设备的最优日内运行策略，确保在不确定因素影响下，进一步提升系统的灵活性，维持系统经济性和稳定性. 这种多能互补鲁棒优化模型在构建安全、低碳、高效

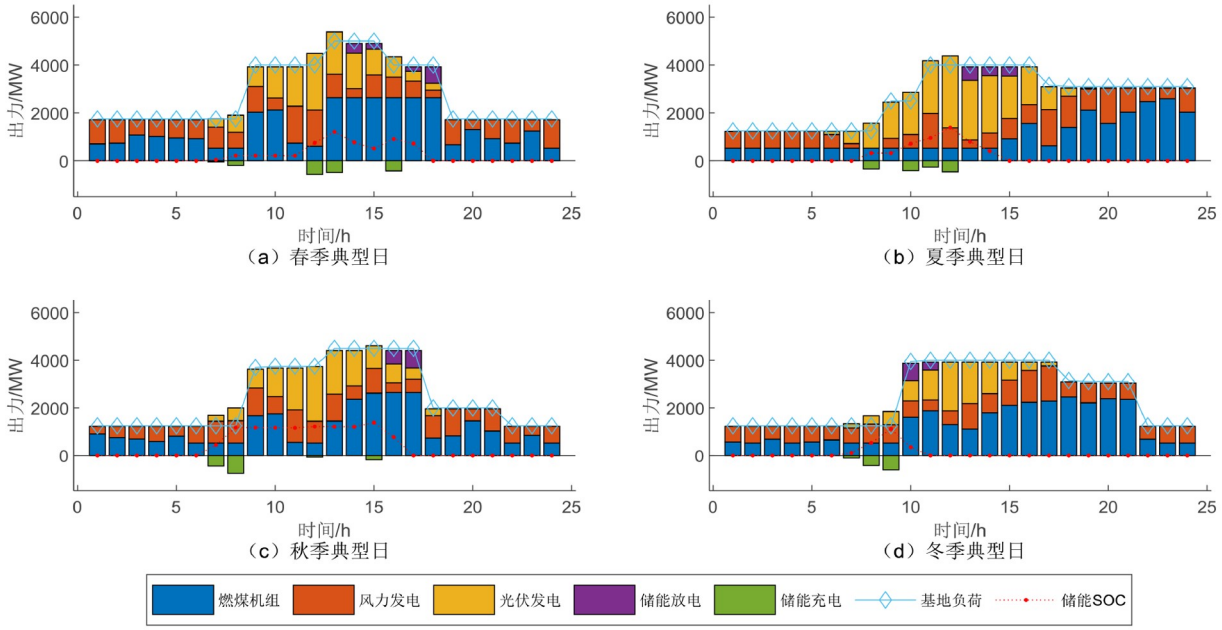


图 7 (网络版彩图)场景4各季节典型日运行出力图

Figure 7 (Color online) Typical daily operational strategy scheduling output chart for each season in Scenario 4.

的可再生能源基地建设中具有广泛应用前景. 通过进一步完善模型中的技术细节, 尤其是针对储能系统的优化和不确定性处理, 能够为清洁能源的高效利用和电力系统的稳定性提供更强的保障.

参考文献

1 Bai J. Planning leads and promotes high-quality and leapfrog development of renewable energy—nine departments jointly issued the “14th Five-Year Plan for Renewable Energy Development” (in Chinese). Sci Tech Ind China, 2022, 8: 26–27 [白静. 规划引领, 推动可再生能源高质量跃升发展——九部门联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》. 中国科技产业, 2022, 8: 26–27]

2 Mei H, Gao B T, Cao Z Y, et al. Optimal allocation of wind-photovoltaic-thermal-storage combined transmission system with CSP station (in Chinese). Acta Energiae Solaris Sin, 2022, 43: 124–133 [梅惠, 高丙团, 曹泽宇, 等. 含CSP电站的风光火储联合外送系统优化配置. 太阳能学报, 2022, 43: 124–133]

3 Ding K, Sun Y L, Wang X, et al. Concentrating solar power plant configuration method of renewable energy base with consideration of confidence capacity and peak shaving capcity (in Chinese). Guangdong Electr Power, 2024, 37: 25–34 [丁坤, 孙亚璐, 王湘, 等. 考虑置信容量和调峰能力的新能源基地光热电站配置方法. 广东电力, 2024, 37: 25–34]

4 Wang L, Li X H, Wang J, et al. Optimal capacity ratio of hydro-wind-solar mega-bases based on DC transmission (in Chinese). Changjiang Technol Econ, 2024, 8: 12–19 [王玲, 李香华, 王军, 等. 基于直流外送的水风光大基地最优容量配比研究. 长江技术经济, 2024, 8: 12–19]

5 Qiao Y F, Gao R R. Model construction and capacity optimization of multi-energy complementary clean energy base (in Chinese). People’s Yellow River, 2024, 46: 97–98, 101 [乔一帆, 高冉冉. 多能互补清洁能源基地模型构建与容量优化配置研究. 人民黄河, 2024, 46: 97–98, 101]

6 Wu J, He B C, Zhang X K, et al. Research on capacity optimization allocation of a grid-friendly large energy base containing wind power, photovoltaic and hydrogen energy storage whose load changes with the power supply (in Chinese). Proc CSEE, 2025, 45: 6259–6269 [吴瑊, 何冰琛, 张勋奎, 等. 荷随源动的电网友好型风光氢储大基地容量优化配置研究. 中国电机工程学报, 2025, 45: 6259–6269]

7 Yang Y G, Feng Y Y, Wei W, et al. Coordinated day-ahead scheduling and real-time dispatch of a wind-thermal-storage energy base considering flexibility interval (in Chinese). J Shanghai Jiaotong Univ, 2025, 59: 1270–1280 [杨银国, 冯胤颖, 魏韡, 等. 基于可消纳区间的风-火-储大基地日前-实时协同调度. 上海交通大学学报, 2025, 59: 1270–1280]

8 Huang Y F, Hao F, Teng J Y, et al. Research on multi-objective and multi-time-scale optimized scheduling of multi-energy complementary energy bases (in Chinese). Inner Mongolia Electr Power Technol, 2024: 32–41 [黄源烽, 郝飞, 滕井玉, 等. 多能互补能源基地多目标多时间尺度优化调度研究. 内蒙古电力技术, 2024, 42: 32–41]

9 Zhao P, Gou F F, Xu W P, et al. Comparison of storage capacity configuration optimization in wind-thermal power-storage coupling system (in Chinese). J Xi’an Jiaotong Univ, 2024, 58: 38–48 [赵攀, 苟非非, 许文盼, 等. 风-火-储耦合系统储能容量配置优化对比. 西安交通大学学报, 2024, 58: 38–48]

10 Yi R J. Design and implementation of coordinated optimal dispatch system for integrated energy base (in Chinese). High-Technol Ind, 2024, 30: 57–61 [易瑞吉. 基于多能互补的综合能源基地协同优化调度系统的设计与实现. 高科技与产业化, 2024, 30: 57–61]

11 Li Y Z, Long X X, Zhou C J, et al. Coordinated operations of highly renewable power systems and distributed data centers (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 119–135 [李远征, 龙信鑫, 周纯杰, 等. 高比例新能源电网-分布式数据中心集群协同优化运行研究. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 119–135]

12 Xu Y Q, Liu Y, Xie Q. Reactive power planning of distribution network based on whole life cycle cost (in Chinese). Power Syst Prot Control, 2018, 46: 30–36 [徐玉琴, 刘杨, 谢庆. 基于全寿命周期成本的配电网无功规划研究. 电力系统保护与控制, 2018, 46: 30–36]

13 Li M X, Fan Y, Wang Y, et al. Coordinated optimal configuration of wind-photovoltaic-energy storage capacity for large-scale renewable energy bases (in Chinese). Electr Power Autom Equip, 2024, 44: 1–8 [李明轩, 范越, 汪莹, 等. 新能源大基地风光储容量协调优化配置. 电力自动化设备, 2024, 44: 1–8]

14 Li R M. Research on hybrid energy storage system integrating distributed renewable energy (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 [李瑞民. 集成分布式可再生能源的混合储能系统研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2019]

15 Zhu J, Liu X X, Yu J, et al. Control system for wind-PV-thermal-storage in renewable energy base (in Chinese). Electr Eng Econ, 2024, 4: 18–20

[朱洁, 刘孝鑫, 于佼, 等. 新能源大基地风光火储控制系统研究. 电气技术与经济, 2024, 4: 18–20]

16 Lu H. Research on energy storage plan optimization and comprehensive value measurement in the new power (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2021 [陆昊. 新型电力系统中储能配置优化及综合价值测度研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2021]

17 Huang Y J, Liu N, Chen Z, et al. Low-carbon and economic operation of energy hub considering cooperative operation strategy with wind farm and photovoltaic station. Sci China Tech Sci, 2024, 67: 3940–3955

18 National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding Opinions of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on Promoting the Integration of Power Generation, Grids, Demand and Storage and the Development of Multi-energy Complementarity (in Chinese). Gazette of the State Council of the People’s Republic of China, 2021, 59–62 [发展改革委 能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见. 中华人民共和国国务院公报, 2021, 59–62]

Optimization of “wind, solar, thermal, and storage” double-layer allocation for multi-energy complementary new energy bases

YAN XinRong[1,2], XIE YuRong[2], HUANG Rong[2], GAO Xiang[1] & ZHENG ChengHang[1]

[1] *College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*
[2] *Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China*

To cope with the problems of insufficient regulating capacity, high uncertainty, and a mismatch between transmission channels and power supply construction in the current new energy base, this paper constructs a two-layer configuration optimization model for the new energy base based on the complementary characteristics of wind power, photovoltaic power, thermal power, energy storage, and other forms of energy. The upper layer focuses on capacity allocation optimization for various energy types, while the lower layer performs intra-day economic operation optimization based on the capacity allocation results. The model accounts for multi-energy complementarity capacity optimization and uncertainty factors in wind power generation to further enhance the system’s reliability, flexibility, and economy. Simulation results demonstrate that compared with traditional methods, the model strengthens the capability to address uncertainties, significantly reduces wind and solar curtailment, achieves supply-demand balance, and improves renewable energy utilization. This study aims to effectively enhance the overall performance of multi-energy complementary large base systems and provide a reference for the construction and optimization strategies of large-scale clean energy bases.

new energy base, “wind, solar, thermal, and storage”, multi-energy complementary system, capacity allocation, operation optimization

doi: 10.1360/SST-2025-0061