

基于多目标优化的大型新能源基地风光储 容量联合规划配置

韩培东, 王伟胜, 李湃, 张金平

(可再生能源并网全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Joint Planning and Configuration of Wind-solar-storage Capacity for Large-scale Renewable Energy Bases Based on Multi-objective Optimization

HAN Peidong, WANG Weisheng, LI Pai, ZHANG Jinping

(State Key Laboratory of Renewable Energy Grid-integration (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Rationally optimizing and allocating the wind, solar, and storage capacities at the desert-wasteland-Gobi renewable energy base is a crucial foundation for achieving efficient outbound transmission and reliable power supply support of the base's renewable energy. A multi-objective joint planning method for the capacities of wind, solar, and storage based on a bi-level time-sequential simulation optimization model is proposed, which considers the low-carbon, economic aspect of investment, and the adequacy of power supply. The upper-level optimization model aims to maximize renewable energy generation and minimize the total investment cost of wind, solar, and storage, considering constraints on the installed capacity of these resources. The lower-level optimization model aims to meet the peak evening demand of the receiving grid as its optimization objective, considering the coordinated operation constraints of renewable energy, conventional power sources, storage, and ultra-high voltage direct current, and achieves source-storage-grid coordinated operation optimization through annual 8760-hour sequential production simulation. The upper model uses the NSGA-II algorithm for multi-objective optimization solving, and the lower model, based on the input parameters from the upper model, performs operational simulations and feeds the renewable energy absorption back to the upper model. Iterative solving yields the Pareto front, from which the optimal configuration capacity of a large-scale renewable energy base that balances economic, low-carbon, and sufficient power

supply considerations is selected using the ideal point method. Based on a simulation test at a renewable energy base in China, the case studies verify the effectiveness of the proposed multi-objective optimization model.

KEY WORDS: desert-wasteland-Gobi renewable energy base; wind-solar-storage capacity configuration, two-layer optimization model; multi-objective optimization; time-series production simulation; NSGA-II algorithm; ideal point method.

摘要: 合理优化配置沙戈荒新能源基地的风光储容量, 是实现基地新能源高效外送消纳与可靠供电支撑的重要基础。提出了一种基于多目标双层优化与时序生产模拟的新能源基地风光储容量多目标联合优化配置方法, 能够兼顾基地发电清洁低碳、投资经济性与供电充裕性, 上层优化模型以新能源发电量最大、风光储总投资成本最小为目标, 考虑风光储装机范围约束; 下层优化模型以满足受端电网晚高峰保供需求为优化目标, 考虑新能源、常规电源、储能、特高压直流运行约束, 通过全年 8760h 时序生产模拟实现源、储、直的协调运行优化。上层模型采用 NSGA-II 算法进行多目标优化求解, 下层模型基于上层模型得到的装机结果进行 8760h 运行模拟, 并返回新能源消纳量输入至上层模型, 通过迭代求解得到帕累托前沿, 基于理想点法从帕累托前沿中筛选出兼顾投资成本、碳排放量和供电充裕性的新能源基地风光储最优配置容量。算例基于我国某新能源基地数据进行仿真测试, 验证了所提出多目标优化模型和方法的有效性。

关键词: 沙戈荒新能源基地; 风光储容量配置; 双层优化模型; 多目标优化; 时序生产模拟; NSGA-II 算法; 理想点法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2229

0 引言

2021 年, 我国提出加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电太阳能发电基地建设^[1],

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目: “荒漠地区大型新能源基地直流送出系统构建与综合评估技术研究” (5100-20225354A-2-0-YS)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China: “Research on Construction and Comprehensive Evaluation Technology of Large-Scale Renewable Energy Base Connected Into HVDC Transmission System” (No. 5100-20225354A-2-0-YS).

沙戈荒大型新能源基地通过特高压直流外送消纳是实现我国新能源大范围资源优化配置,满足受端电网清洁可靠用电需求的重要基础^[2-4]。沙戈荒新能源基地同步电源装机占比低,基地出力随机波动性与一致性强,新能源高效外送消纳和基地可靠供电面临巨大挑战。

目前,我国在建的若干沙戈荒新能源大基地普遍采用 800 万 kW 直流通道送出,配置 400 万 kW 火电和一定规模的电化学储能。大规模配置储能能够有效提高新能源利用率,减少火电开机,提升基地发电低碳与可靠供电能力,但也会大大增加投资成本,降低外送电在受端电网的竞争力。因此,需要兼顾投资经济性、发电清洁性与供电充裕性等目标,合理优化配置风光储容量,挖掘风光互补特性与受端电网负荷匹配特性,发挥储能与直流灵活调节能力,提升基地稳定供电能力。

新能源基地的规划与运行优化是当前的研究热点^[5-10]。在新能源随机波动特性考虑方面,现有方法主要采用基于典型日场景^[11]或基于 8760h 运行模拟^[12] 2 种方式,文献[13]构建了典型日选取综合评估指标体系,建立了微电网风光储双层规划模型。文献[14]通过聚类对运行场景进行削减,以电、储能配置及损耗和联络线功率波动惩罚等成本最小为目标进行优化配置。基于典型日场景的方式难以覆盖风光全部的运行场景,影响计算结果的准确性,近几年学者普遍采用基于 8760h 生产模拟的方法,文献[15]以风/光全年 8760h 理论出力序列为输入,通过求解模型得到兼顾系统经济、安全和清洁性的电/热/氢储能最优配置容量。文献[16]将年度 8760h 全景时序运行模拟纳入优化模型,建立了面向高比例清洁能源电力系统、考虑多种灵活性资源参与的规划模型。文献[17]提出基于 8760h 生产模拟的规划模型,实现风光储氢系统规划。

在规划模型^[18-19]方面,双层优化模型是目前开展系统电源规划计算的常用模型^[20],其基本原理是上层模型对系统装机进行优化,下层模型优化系统运行,能够兼顾规划和运行方面的相关约束,进而实现电源容量的最优配置。文献[21]以系统净收益和储能收益为上/下层目标,提出了一种多能互补系统储电和储热容量分层优化规划方法;文献[22]以系统全生命周期运行经济性和每个调度周期内经济性最优为上/下目标,提出了风光水储多能互补发电系统双层优化配置方法。现有规划模型主要基于清洁能源最大化消纳或系统收益最大或投资成本最小等单一目标^[23-27],也有部分学者采用多目标规

划^[28]方法,如文献[29]提出了计及弃风事件耦合关系的源-储-网联合规划方法,考虑了常规火电装机投资、储能投资、弃风惩罚等因素,通过折算成成本相加实现多目标向单目标的转化。文献[30]考虑储能系统净收益、火电机组出力标准差改善量等多因素指标,通过各指标归一化并生成配置集合进行运行模拟,选取最终的储能配置方案。文献[31]提出了一种风光火储联合外送系统优化配置方法,构建了计及碳排放成本的系统收益和系统新能源消纳能力为多目标优化模型,并通过增广 ϵ -约束法进行求解。沙戈荒新能源基地风光储容量规划需要兼顾投资经济性、发电清洁性、供电充裕性多目标因素,现有研究对供电充裕性目标考虑得还不够充分,特别是受端电网负荷晚高峰时段的保供需求。

针对上述问题,本文提出了一种基于多目标双层优化与 8760h 时序生产模拟的大型新能源基地风光储容量联合规划方法。建立了兼顾投资经济性、发电清洁性和供电充裕性的多目标双层优化模型,模型考虑系统晚高峰时段供电需求、直流通道利用率、新能源外送电量比例、常规电源与储能运行等约束条件,上层模型优化风光储配置容量,下层模型开展全年 8760h 的运行优化模型,能够充分考虑风光随机波动与互补特性,采用 NSGA-II 结合时序生产模拟双层优化方法求解模型,获取风光储配置容量的帕累托前沿解集合,考虑投资成本、碳排放量和供电充裕性,通过理想点方法筛选出风光储最优配置方案。算例基于我国西北某新能源基地数据开展仿真测试,验证了方法的有效性。

1 基于多目标优化的容量规划配置模型

本节将介绍多目标容量优化配置模型,模型采用双层优化的结构,上层模型以新能源外送消纳量最大、新能源与储能投资成本最小为优化目标,决策变量包括风电装机、光伏装机、储能装机和容量。下层模型以基地运行供电充裕性最高为优化目标,优化系统 8760h 运行方式,决策变量包括风电/光伏出力、储能的充放电功率与充放电状态、火电机组出力与运行台数、直流外送功率等。

1.1 上层模型

1) 目标函数。

目标函数为多目标形式,最大化新能源发电量和最小化风光储投资成本:

$$F = \min[-f_1, f_2] \quad (1)$$

式中: F 表示总体目标函数; f_1 表示新能源消纳量目标; f_2 表示新能源与储能投资成本目标,计算公

式如下。

①新能源发电量最大目标。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T [p_w(t) + p_v(t)] \quad (2)$$

式中： T 表示每个场景内的时段数量； t 表示时段序号； $p_w(t)$ 表示风电场在第 t 时段的发电功率； $p_v(t)$ 表示光伏电站在第 t 时段的发电功率，两者均为优化变量。

②风光储总投资成本最小目标。

$$f_2 = C_w \lambda_w + C_v \lambda_v + C_B \lambda_B + C_1 \lambda_1 \quad (3)$$

式中： C_w 表示风电配置容量； C_v 表示光伏发电配置容量； C_B 表示储能配置容量； C_1 表示储能逆变器额定装机，均为优化变量； λ_w 表示风电单位装机成本； λ_v 表示光伏单位装机成本； λ_B 表示单位储能容量成本； λ_1 表示储能逆变器单位装机成本，三者为给定参数。

2) 约束条件。

上层优化模型的约束条件主要考虑新能源与储能装机容量范围约束。

①装机和容量范围约束。

$$\begin{cases} C_w^{\min} \leq C_w \leq C_w^{\max} \\ C_v^{\min} \leq C_v \leq C_v^{\max} \\ C_B^{\min} \leq C_B \leq C_B^{\max} \\ C_1^{\min} \leq C_1 \leq C_1^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中： C_w^{\max} 和 C_w^{\min} 分别表示风电装机容量的上限和下限； C_v^{\max} 和 C_v^{\min} 分别表示光伏发电装机容量的上限和下限； C_B^{\max} 和 C_B^{\min} 分别表示储能容量的上限和下限； C_1^{\max} 和 C_1^{\min} 分别表示储能逆变器装机的上限和下限；以上均为已知量。

②储能最低配置需求约束。

$$r_1(C_w + C_v) \leq C_1 \quad (5)$$

式中： r_1 表示储能占新能源装机容量的最小比例，对应各省区规定的新能源场站最低的配储能比例。

1.2 下层模型

1) 目标函数。

模型目标函数为基地供电综合缺口最小，包括：供电不足加权平均值、供电不足功率的平方和、供电不足功率最大值3个部分：

$$\min \frac{\sum_{t=1}^T w(t)\varepsilon(t)}{T} + \frac{\sum_{t=1}^T \varepsilon^2(t)}{T} + \varepsilon^{\max} \quad (6)$$

式中： $\varepsilon(t)$ 表示新能源基地在第 t 时段的供电不足功率； ε^{\max} 为新能源基地的最大供电不足功率，均为优化变量； $w(t)$ 表示新能源基地在不同时刻的保

供优先级，可根据用户偏好进行设定，通常设置负荷晚高峰时段权重最大。

供电不足功率加权平均值可优先保证受端电网重要时段的用电需求，供电不足功率平方和项可使供电缺口的分布更加均匀，与供电不足功率最大值一起发挥作用，避免出现缺口过大的情况发生。

2) 约束条件。

下层模型约束条件主要考虑新能源基地各类电源与直流运行约束。

①基地外送功率约束。

$$p_L(t) = p_w(t) + p_v(t) + p_B(t) + p_{TH}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

式中： $p_L(t)$ 表示基地在第 t 时段的外送功率； $p_L(t)$ 表示储能能在第 t 时段的发电功率； $p_{TH}(t)$ 表示常规电源在第 t 时段的发电功率，均为优化变量。

②直流输电运行约束。

$$\begin{cases} p_L^{\min}(t) \leq p_L(t) + \varepsilon(t) \leq p_L^{\max}(t) \\ 0 \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon^{\max} \\ p_L^{\text{down}} \leq p_L(t) - p_L(t-1) \leq p_L^{\text{up}} \\ p_L(t) = p_L(t+i-1), \text{mod}(t, \zeta) = 1, 1 \leq i \leq \zeta \\ \sum_{t=1}^T p_L(t) \geq \frac{TNp_L^{\max}}{8760} \end{cases} \quad (8)$$

$$t = 1, 2, \dots, T$$

式中： p_L^{\max} 为系统外送通道容量； $p_L^{\max}(t)$ 和 $p_L^{\min}(t)$ 分别表示基地在第 t 时段的外送功率上限和下限，均为已知量； p_L^{up} 和 p_L^{down} 分别表示直流的最大爬坡和爬降功率； ζ 表示直流功率保持恒定的最短时长； $\text{mod}(\cdot)$ 表示求余数函数；直流量利用小时数约束中， N 表示直流最低年利用小时数，为已知量。

③新能源发电量占比约束。

$$\sum_{t=1}^T [p_w(t) + p_v(t)] \geq \alpha \sum_{t=1}^T p_L(t) \quad (9)$$

式中： α 表示新能源最低发电量占比，为已知量。

④新能源利用率约束。

$$\sum_{t=1}^T [p_w(t) + p_v(t)] \geq \beta \sum_{t=1}^T [\delta_w^{\max}(t)C_w + \delta_v^{\max}(t)C_v] \quad (10)$$

式中： β 表示新能源最低利用率； δ_w^{\max} 表示风电场在第 t 时段的归一化理论最大发电功率； $\delta_v^{\max}(t)$ 表示光伏电站在第 t 时段的归一化理论最大发电功率，以上均为已知量。

⑤新能源发电功率范围约束。

$$\begin{cases} 0 \leq p_w(t) \leq \delta_w^{\max}(t)C_w \\ 0 \leq p_v(t) \leq \delta_v^{\max}(t)C_v \end{cases}, t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

⑥储能运行约束。

$$\begin{cases} p_B(t) = p_B^{dc}(t) - p_B^{ch}(t) \\ p_B^{ch}(t) \leq \delta_W^{\max}(t)C_W + \delta_V^{\max}(t)C_V \\ 0 \leq p_B^{ch}(t) \leq C_1 \\ 0 \leq p_B^{ch}(t) \leq C_1^{\max} x_B^{ch}(t) \\ 0 \leq p_B^{dc}(t) \leq C_1 \\ 0 \leq p_B^{dc}(t) \leq C_1^{\max} x_B^{dc}(t) \\ x_B^{ch}(t) + x_B^{dc}(t) \leq 1 \\ 0 \leq E_B(t) \leq C_B \\ E_B(t+1) = E_B(t) + \eta_B^{ch} p_B^{ch}(t) - p_B^{dc}(t) / \eta_B^{dc} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $p_B^{dc}(t)$ 和 $p_B^{ch}(t)$ 分别表示储能在第 t 时段的放电功率和充电功率，均为优化变量； $x_B^{dc}(t)$ 和 $x_B^{ch}(t)$ 分别表示储能在第 t 时段的放电状态和充电状态，均为0-1优化变量； $E_B(t)$ 和 $E_B(t+1)$ 分别表示储能在第 t 时段和第 $t+1$ 时段的储电量，均为优化变量； η_B^{dc} 和 η_B^{ch} 分别表示储能的放电效率和充电效率，均为已知量。

⑦火电运行约束。

火电运行约束包括火电出力范围约束、火电启停机台数约束、火电出力爬坡约束等。

$$\begin{cases} p_{TH}^{\min} S_{TH}(t) \leq p_{TH}(t) \leq p_{TH}^{\max} S_{TH}(t) \\ -Z_{TH}(t)S_{TH}^{\max} \leq S_{TH}(t) - S_{TH}(t-1) \leq Y_{TH}(t)S_{TH}^{\max} \\ Y_{TH}(t) + Z_{TH}(t) \leq 1 \\ S_{TH}^{\min} \leq S_{TH}(t) \leq S_{TH}^{\max} \\ \sum_{t=1}^T Y_{TH}(t) \leq N, \sum_{t=1}^T Z_{TH}(t) \leq N \\ p_{TH}(t) - p_{TH}(t-1) \leq p_{TH}^{\min} [S_{TH}(t) - S_{TH}(t-1)] + \Delta_{TH}^{up} S_{TH}(t-1) \\ p_{TH}(t-1) - p_{TH}(t) \leq p_{TH}^{\min} [S_{TH}(t-1) - S_{TH}(t)] + \Delta_{TH}^{down} S_{TH}(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $p_{TH}(t)$ 表示火电机组在 t 时段的发电功率； $S_{TH}(t)$ 为整数变量，表示火电机组在 t 时段的运行台数； $Y_{TH}(t)$ 和 $Z_{TH}(t)$ 分别表示火电机组在 t 时段的启机状态和停机状态，均为0-1变量。当 t 时段有机组启机时， $Y_{TH}(t)=1$ ，有机组停机时， $Z_{TH}(t)=1$ ，并且同一时刻启机和停机状态互斥； N 为火电机组台数； p_{TH}^{\max} 和 p_{TH}^{\min} 分别表示火电机组最大和最小技术出力； S_{TH}^{\max} 和 S_{TH}^{\min} 分别表示火电机组的最大和最小运行台数； N 表示机组在优化周期内的最大启/停机次数； Δ_{TH}^{up} 和 Δ_{TH}^{down} 分别表示火电机组的最大爬升和爬降功率。

2 容量规划配置模型求解方法

新能源基地风光储容量双层优化模型结构如

图1所示。上层优化模型对风电装机、光伏装机、储能装机与容量进行优化，并将参数输入至下层模型作为优化边界；下层模型通过8760h时序生产模拟优化，得到系统的最优运行方式，进而得到在上层模型给定参数下的新能源消纳量、投资成本的目标函数适应度函数值。上层模型采用NSGA-II算法对多目标模型进行优化求解，会产生多个解决方案，这些方案在不同的目标(如新能源利用率、电源投资成本)上有不同的表现，通过不断寻优迭代形成帕累托前沿。下层优化模型为混合整数线性规划模型，可直接调用商业求解器进行求解，通过求解下层优化模型获得新能源消纳量、供电缺口、碳排放量，并返回至上层优化模型，新能源消纳量和碳排放量用于上层优化模型的适应度函数值。

利用理想点法对优化方案结果集合进行决策，通过筛选帕累托前沿点所对应的装机，得到最优容量配置方案。在本案例中，综合考虑新能源消纳量、投资成本、供电缺口、碳排放量，选取理想点，设置一定的权重并归一化，通过计算欧氏距离，选出最终的配置方案点。其中，新能源消纳量与投资成本为目标函数式(2)与式(3)优化结果，供电缺口为式(14)。

$$E_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \varepsilon(t) \quad (14)$$

式中： E_{loss} 为优化运行供电总缺口。

碳排放量为所有火电机组发电碳排放量之和，通过火电机组煤耗量与单位煤耗碳排放量系数相乘得到。火电机组的碳排放量(煤耗)是与机组出力相关的二次函数^[32]，如图2所示，当火电出力较低时，度电煤耗高，出力较高时度电煤耗低。为简化计算，考虑煤耗负荷变化率对碳排放量(煤耗)计算进行线性化处理，计算公式如式(15)所示。

$$G_{TH} = e \sum_{t=1}^T [c_{\text{avg}} + c_{\Delta} (1 - \frac{p_{TH}(t)}{p_N})] p_{TH}(t) \quad (15)$$

式中： G_{TH} 为火电机组碳排放量； p_N 为火电装机容量； e 为单位煤耗的碳排放系数； c_{avg} 为平均煤耗系数，表示平均消耗的煤炭量； c_{Δ} 为煤耗负荷变化率，表示随发电机组负荷率降低而额外增加的煤炭消耗量。

3 算例分析

3.1 算例设置

以我国西北某新能源基地场景为例进行仿真测试，相关参数如表1所示：风电和光伏理论发电小时数分别为2556h和1365h，系统电力外送通道

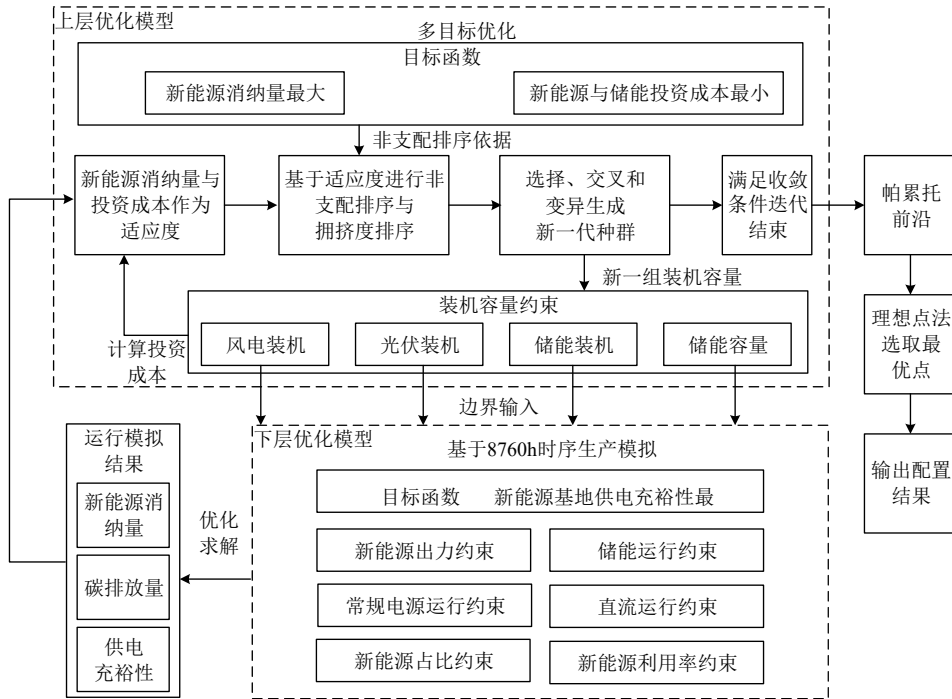


图 1 多目标优化双层规划模型结构

Fig. 1 Structure of the multi-objective optimization bi-level planning model

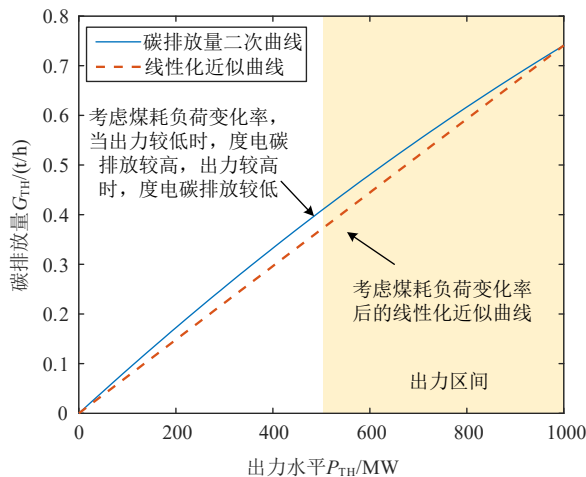


图 2 火电机组碳排放与出力关系示意图

Fig. 2 Relationship between thermal power output and carbon emissions

容量 8000MW, 晚峰(18:00—21:00)直流最低外送功率 5000MW, 其他时段直流最低外送功率 3000MW, 直流最低年利用小时数 4500h, 火电装机容量 4000MW, 新能源最低利用率 90%, 直流全年输电量中新能源最低发电量占比 50%。投资成本方面, 风电装机成本为 6000 元/kW, 光伏装机成本为 3200 元/kW, 储能逆变器成本为 500 元/kW, 储能电池成本为 2000 元/(kW·h)。

3.2 容量优化配置结果

基于多目标算法求解, 获得各个目标函数下的帕累托前沿, 将所得的电源配置所得供电缺口添加至帕累托前沿中, 如图 3 所示。可以发现随着新能

表 1 案例边界参数
Table 1 Case boundary parameters

参数	取值
风电理论发电小时数/h	2556
光伏理论发电小时数/h	1365
系统电力外送通道容量/MW	8000
非高峰时段最低外送功率/MW	3000
晚峰时段	18:00—21:00
直流最低年利用小时数/h	4500
新能源最低利用率/%	90
新能源最低发电量占比/%	50
火电机组容量与台数/(MW·台)	1000×4
火电机组最小出力系数	0.5
储能最低电量系数	0.2
储能充放电效率	0.9
平均煤耗/(g/(kW·h))	285
煤耗负荷变化率/(g/(kW·h)/%)	0.58
风电装机成本/(元/kW)	6000
光伏装机成本/(元/kW)	3200
储能逆变器成本/(元/kW)	500
储能电池成本/(元/(kW·h))	2000
单位煤耗碳排放系数	2.6

源发电量的上升, 新能源基地的投资成本随之升高, 碳排放量随之下降。最优决策点的系统配置和运行结果如表 2 所示: 风电装机为 5989MW, 光伏装机为 4805MW, 储能装机为 3721MW/5879MW·h, 风光储总投资成本为 711 亿元, 新能源利用率为 94.4%, 新能源发电量占比为 50%, 全年无供电缺口。

图 4 展示了最优配置结果下连续 7 日的基地时序运行曲线, 结果显示, 通过所提出方法能够合理优化风光火储直逐时段的发电运行方式, 满足了新

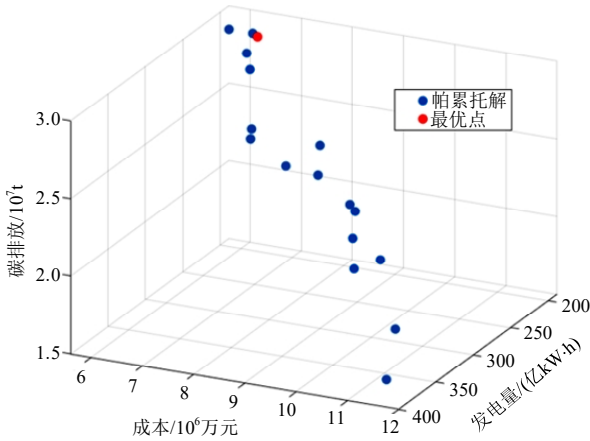


图3 多目标优化帕累托前沿结果

Fig. 3 Pareto frontier results of multi-objective optimization

能源高效外送消纳、火电低碳运行和晚高峰时段受端电网用电需求，如：在第1、第3—4、第7日18:00

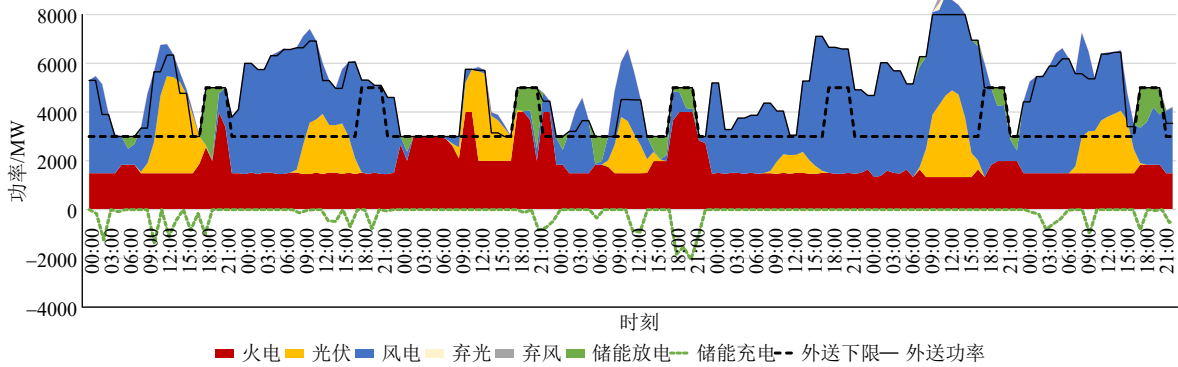


图4 连续7日发电运行曲线

Fig. 4 Seven days of power generation operation curve

3.3 多目标优化结果验证

为验证所提出多目标优化方法的有效性，将所提出方法与投资成本最小、供电缺口最小2个单目标优化模型进行对比分析。单目标优化模型的约束条件在下层优化模型基础上，引入新能源与储能装机容量范围约束，其他边界条件与双层优化一致。表3展示了容量优化配置结果，总投资成本最小目标时，在供电缺口为0的约束下，配置的新能源装机规模最小，优先配置度电成本较小的风电，与其他场景相比系统总投资成本降低，但碳排放量较大，新能源发电量与利用率较低，无法兼顾投资成本、新能源发电量、碳排放量的平衡；在供电缺口

规划容量	单位	取值	运行结果	单位	取值
风电装机	MW	5989	新能源发电量	亿 kW·h	207
光伏装机	MW	4805	新能源利用率	%	94.4
储能逆变器装机	MW	3721	新能源发电量占比	%	50
储能电池容量	MW·h	5879	投资成本	亿元	711
储能时长	h	1.6	供电缺口	亿 kW·h	0

至21:00晚高峰时段，风电出力较低，通过储能放电和火电增加出力满足了晚高峰送电需求，并且为满足低碳目标，优先实施储能放电；在第2、5日晚高峰18:00—21:00时段，风电大发，火电降至最小技术出力；在第6日11:00—15:00时段风电和光伏同时大发时段，火电维持最小技术出力，直流已达到最大外送功率，储能通过充电消纳了大部分弃风弃光。

最小目标下，系统供电缺口为0，但配置的风光储容量最多，总投资成本和火电碳排放量高于其他2个场景。多目标优化计算结果能够在保证系统稳定供电和新能源外送消纳需求的情况下，尽可能地降低风光储投资成本和火电碳排放量，并且目标结果与理想点的距离最小，与单目标优化配置结果相比体现出了较好的优势。

表4展示了所提多目标双层优化方法和传统的多目标加权法的优化配置结果。多目标加权法将供电缺口、总投资成本、新能源发电量的负值直接进行加权求和，其中，权重组合1将更大的权重赋予总缺口最小目标，权重组合2将更大的权重赋予投

表3 不同目标函数下的新能源与储能配置情况
Table 3 Configurations of renewable energy and energy storage under different objective functions

目标函数类型	风电装机/MW	光伏装机/MW	储能逆变器装机/MW	储能电池容量/(MW·h)	新能源利用率/%	新能源发电量占比/%	新能源发电量/(亿 kW·h)	碳排放/万 t	总缺口/(亿 kW·h)	总成本/亿元	目标与理想点距离
总投资成本最小	8392	1796	1000	3927	90	50	200	1607	0	644	0.376
供电缺口最小	8947	7987	20000	20000	97	51	237	1545	0	1292	0.439
所提方法	5989	4805	3721	5879	94.4	50	207	1534	0	649	0.324

表 4 双层优化与多目标加权优化对比
Table 4 Comparison between bilevel optimization and multi-objective weighted optimizations

目标函数类型	风电装机/MW	光伏装机/MW	储能装机/MW	储能容量/(MW·h)	新能源利用率/%	新能源发电量占比/%	新能源发电量/(亿 kW·h)	碳排放/万 t	总缺口/(亿 kW·h)	总成本/亿元	理想点距离
权重组合 1 (缺口最小优先)	16754	10553	6542	20000	90	65	342	1514	0	1776	0.636
权重组合 2 (成本最小优先)	9153	8897	750	1040	90	86.8	328	1444	1.2	858	0.448
权重组合 3 (新能源消纳优先)	8198	15359	6612	20000	90	65	344	1463	0	1416	0.656
所提方法	5989	4805	3721	5879	94.4	50	207	1534	0	649	0.324

资成本最小目标，权重组合 3 将更大的权重赋予新能源发电量最大目标。结果显示，缺口最小优先与新能源消纳优先的权重组合配置下，新能源发电量大且供电缺口为 0，风光储装机量较大，导致投资成本明显较高；成本最小优先优化配置结果投资成本相对较小，但存在大量供电缺口。因此，相比于目标函数加权，本方法结果距离理想点相对更近，结果更优。

由此可见，所提出的双层优化多目标方法较单目标优化和多目标加权优化方法具有显著的优势：双层优化能够更全面地探索 Pareto 前沿，提供更多样化的优化解，同时增强模型的灵活性和适应性，更直观地反映在新能源基地优化配置时的偏好，并有效处理层间的约束和依赖关系；通过层次化的决策结构，能够更清晰地反映不同目标的优先级，避免了权重设定的主观性和不确定性，且无需预先确定各目标权重，减少了模型对权重敏感性的依赖。

3.4 供电充裕性目标验证

为验证本文所提出的下层优化模型供电充裕性目标函数的有效性，与仅考虑供电缺口总量最小的目标进行对比，为此，构造具有供电缺口的风光储配置场景：设置风电装机 4000MW，光伏装机 8000MW，储能装机 1200MW，储能容量 2400MW·h，基于下层模型进行全年 8760h 时序生产模拟优化计算，对比 2 种案例的供电缺口分布情况。

2 个目标函数所得优化运行结果如表 5 所示。结果显示，“总缺口最小目标”的供电不足电量略小于“综合缺口最小目标”目标，但其均值、标准差、最大值结果均高于“总缺口最小目标”结果。图 5 分别展示了 2 个目标函数下在 18:00—21:00 供电缺口的分布直方图。“总缺口最小目标”所得的供电缺口分布更加分散和不均匀，“综合缺口最小目标”结果分布更加集中，并且最大缺口明显小于“总缺口最小目标”。

表 6 进一步展示了“综合缺口最小”目标下，晚峰最低外送功率由 5000MW 增至 6000MW 时的

表 5 不同目标函数下的供电缺口分布情况
Table 5 Distribution of power supply gaps under different objective functions

目标函数	供电不足功率均值/MW	供电不足功率标准差/MW	供电不足功率最大值/MW	供电不足电量/(MW·h)
总缺口最小目标	578	296	1000	82713
综合缺口最小目标	230	141	460	82795

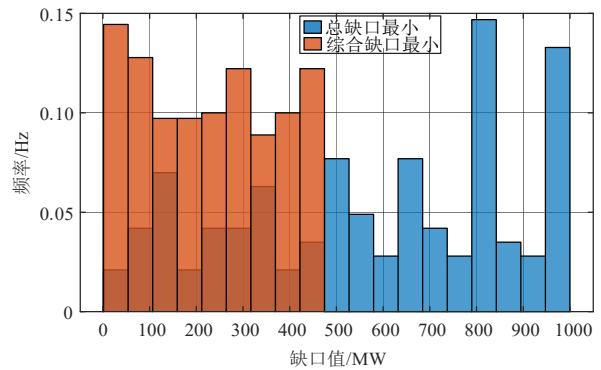


图 5 供电缺口分布结果对比

Fig. 5 Comparison of power supply gap distribution

系统供电不足结果。结果显示，随着受端电网晚峰保供需求的增加，基地供电不足各项指标均相应增加。图 6 展示了不同晚峰最低外送功率场景下系统供电缺口分布情况，结果显示随着外送功率需求的增加，所提的“综合缺口最小”目标仍保持了较好的优化结果，供电缺口分布都相对均匀。

表 6 不同晚峰最低外送功率下的供电缺口分布情况
Table 6 Distribution of power supply gaps under different minimum export powers during evening peak load

晚峰最低外送功率/MW	供电不足功率均值/MW	供电不足功率标准差/MW	供电不足功率最大值/MW	供电不足电量/(MW·h)
5000	230	141	460	82795
5500	515	275	960	339367
6000	821	410	1460	730253

4 结论

本文提出了一种基于多目标双层优化与时序生产模拟的新能源基地风光储容量优化配置方法，并基于我国西北某新能源基地场景开展了方法验证。所提出的多目标双层优化方法较单目标优化或

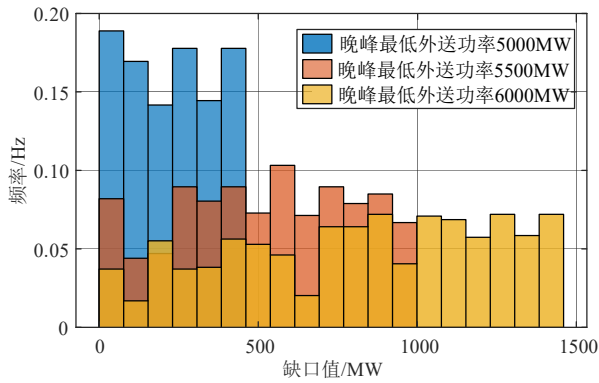


图6 不同晚峰最低外送功率敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of different minimum evening peak export powers

多目标加权优化能够更好地满足基地清洁低碳运行、投资经济性和受端电网保供的需求，通过下层8760h时序生产模拟优化，挖掘风光互补特性，降低全年供电缺口电量和最大缺口，实现基地风光储容量的协调优化配置。本文的研究成果可以为大型新能源基地风光储容量联合规划配置提供支撑。后续研究将会考虑更多新能源大基地优化配置场景，对光伏电站、制氢储氢、火电配套规划等开展进一步研究。

参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. 关于印发《“十四五”可再生能源发展规划》的通知[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局等, 2021.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2022.
- [3] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671. SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671(in Chinese).
- [4] 辛保安. 新型电力系统构建方法论研究[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 1-18. XIN Baoan. Research on the methodology of constructing new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 1-18(in Chinese).
- [5] WU Jiawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. A multi-criteria methodology for wind energy resource assessment and development at an intercontinental level: facing low-carbon energy transition[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(2): 480-494.
- [6] 丁曦, 张笑演, 王胜寒, 等. 双碳目标下考虑最优建设时序的区域综合能源系统低碳规划[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2584-2596. DING Xi, ZHANG Xiaoyan, WANG Shenghan, et al. Low-carbon planning of regional integrated energy system considering optimal construction timing under dual carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2584-2596(in Chinese).
- [7] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207. ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207(in Chinese).
- [8] LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, CHEN Simin, et al. Robust transmission expansion planning based on adaptive uncertainty set optimization under high-penetration wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 2798-2814.
- [9] HU Bo, PAN Congcong, SHAO Changzheng, et al. Decision-dependent uncertainty modeling in power system operational reliability evaluations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5708-5721.
- [10] DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. A high-efficiency network-constrained clustered unit commitment model for power system planning studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2498-2508.
- [11] KITTEL M, HOBBIE H, DIERSTEIN C. Temporal aggregation of time series to identify typical hourly electricity system states: a systematic assessment of relevant cluster algorithms[J]. Energy, 2022, 247: 123458.
- [12] 郭力, 杨书强, 刘一欣, 等. 风光储微电网容量规划中的典型日选取方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2468-2478. GUO Li, YANG Shuqiang, LIU Yixin, et al. Typical day selection method for capacity planning of microgrid with wind turbine-photovoltaic and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2468-2478(in Chinese).
- [13] 陈典, 陆润钊, 张松涛, 等. 新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 3952-3970. Chen Dian, Lu Runzhao, Zhang Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970(in Chinese).
- [14] 南斌, 董树锋, 唐坤杰, 等. 考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1340-1349. NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1340-1349(in Chinese).
- [15] 李湃, 黄越辉, 张金平, 等. 多能互补发电系统电/热/氢储能容量协调优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5158-5168. LI Pai, HUANG Yuehui, ZHANG Jinping, et al. Capacity coordinated optimization of battery, thermal and hydrogen storage system for multi-energy complementary power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5158-5168(in Chinese).
- [16] 姜海洋, 杜尔顺, 金晨, 等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101-2114. JIANG Haiyang, DU Ershun, JIN Chen, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national interconnected power system with high proportion of clean energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2101-2114(in Chinese).
- [17] 郭富民, 徐广强, 王小君, 等. 基于8760h生产模拟的离网风光储氢系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2227-2235. GUO Fumin, XU Guangqiang, WANG Xiaojun, et al. A planning method for stand-alone wind-solar hydrogen storage system based on 8760 hours production simulation[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2227-2235(in Chinese).
- [18] 李凯, 康世崴, 闫方, 等. 基于风光火储的多能互补新能源基地规划分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(10): 17-21, 35. LI Kai, KANG Shiwei, YAN Fang, et al. Planning analysis of new energy base based on wind-photovoltaic-thermal-energy storage multi-energy complementary[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(10): 17-21, 35(in Chinese).

- [19] 吴斌, 米增强, 张勋奎, 等. 系统友好型“无火电”能源大基地构建研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1706-1718.
WU Jian, MI Zengqiang, ZHANG Xunkui, et al. Research on the construction of a system-friendly “No Thermal Power” energy base [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1706-1718(in Chinese).
- [20] BHATTACHARJEE S, SIOSHANSI R, ZAREIPOUR H. Benefits of strategically sizing wind-integrated energy storage and transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1141-1151.
- [21] 史昭娣, 王伟胜, 黄越辉, 等. 多能互补发电系统储电和储热容量分层优化规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3263-3271.
SHI Zhaodi, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, et al. Hierarchical optimization planning for electrical energy and heat storage capacity in multi-energy complementary generation system[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3263-3271(in Chinese).
- [22] 安源, 郑申印, 苏瑞, 等. 风光水储多能互补发电系统双层优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 510-517.
AN Yuan, ZHENG Shen Yin, SU Rui, et al. Research on two-layer optimization of wind-solar-water-storage multi energy complementary power generation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(12): 510-517(in Chinese).
- [23] 刘泽洪, 周原冰, 金晨. 支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 101-112.
LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 101-112(in Chinese).
- [24] 卓振宇, 张宁, 康重庆, 等. 面向双碳目标的电力系统规划方案量化归因分析方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(2): 1-14.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Quantitative attribution analysis method of power system planning scheme for carbon emission peak and carbon neutrality goals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 1-14(in Chinese).
- [25] 王骞, 张学广, 徐殿国. 考虑内-外生双重不确定性的风储系统联合规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 169-180.
WANG Qian, ZHANG Xueguang, XU Dianguo. A joint planning method of wind-storage system considering endogenous and exogenous uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 169-180(in Chinese).
- [26] 李华, 梁毅, 赵琮皓, 等. 计及协同环境价值的新能源与多时间尺度储能联合规划方法[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 24-33.
LI Hua, LIANG Yi, ZHAO Conghao, et al. A joint planning method for renewable energy and multi-time scale energy storage considering the value of collaborative environment[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 24-33(in Chinese).
- [27] 李晖, 刘栋, 秦继朔, 等. 考虑风光出力不确定性的新能源基地直流外送随机规划方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2795-2803.
Li Hui, Liu Dong, Qin Jishuo, et al. Stochastic planning method for UHVDC transmission of renewable energy power base considering wind and photovoltaic output uncertainties[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2795-2803.
- [28] STARKE A R, CARDEMIL J M, ESCOBAR R, et al. Multi-objective optimization of hybrid CSP+PV system using genetic algorithm[J]. Energy, 2018, 147: 490-503.
- [29] 杨修宇, 郭琪, 刘雪媛, 等. 计及弃风事件耦合关系的源-储-网联合规划方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(2): 53-60.
YANG Xiuyu, GUO Qi, LIU Xueyuan, et al. Joint source-storage-grid planning method considering coupling relationship of wind power curtailment events[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 53-60(in Chinese).
- [30] 李军徽, 张嘉辉, 李翠萍, 等. 参与调峰的储能系统配置方案及经济性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4148-4160.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, LI Cuiping, et al. Configuration scheme and economic analysis of energy storage system participating in grid peak shaving[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4148-4160(in Chinese).
- [31] 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[J]. 太阳能学报, 2022, 43(12): 124-133.
MEI Hui, GAO Bingtuan, CAO Zeyu, et al. Optimal allocation of wind-photovoltaic-thermal-storage combined transmission system with CSP station[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(12): 124-133(in Chinese).
- [32] 刘福国, 蒋学霞, 李志. 燃煤发电机组负荷率影响供电煤耗的研究[J]. 电站系统工程, 2008, 24(4): 47-49.
LIU Fuguo, JIANG Xuexia, LI Zhi. Investigation on affects of generator load on coal consumption rate in fossil power plant[J]. Power System Engineering, 2008, 24(4): 47-49(in Chinese).



韩培东

在线出版日期: 2025-04-15。

收稿日期: 2024-12-26。

作者简介:

韩培东(1996), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源规划与调度运行技术;

王伟胜(1968), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电与并网技术、电力系统稳定分析和控制等;

李湃(1988), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源规划与调度运行技术, E-mail: lipai@epri.sgcc.com.cn;

张金平(1972), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电与并网技术。

(责任编辑 马晓华)