

基于重力储能的风光储系统多目标容量优化规划

刘志刚^{1,2}, 伍也凡^{1,2}, 肖振锋^{1,2}, 姚颖^{1,2}, 何书耘^{1,2}, 刘顺成^{1,2}, 徐焘³, 侯慧^{3*}

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南省 长沙市 410004;

2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南省 长沙市 410004;

3. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070)

Multi-objective Optimal Capacity Planning of the Wind-photovoltaic-storage System Based on Gravity Energy Storage

LIU Zhigang^{1,2}, WU Yefan^{1,2}, XIAO Zhenfeng^{1,2}, YAO Ying^{1,2}, HE Shuyun^{1,2},
LIU Shuncheng^{1,2}, XU Tao³, HOU Hui^{3*}

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410004, Hunan Province, China;

2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, Hunan Province, China;

3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China)

Abstract: Capacity planning for wind farms, photovoltaic power stations, and energy storage systems is an effective measure to reduce costs and ensure the reliability of wind-photovoltaic-storage multi-energy hybrid power systems. Based on gravity energy storage relying on mountains, we herein consider the capacities of the wind farm, photovoltaic power station, and energy storage system as decision variables, and establish a multi-objective optimal capacity planning model with the minimum total costs of the system and the optimization of comprehensive indices including the complementary characteristics of wind and solar, the loss rate of power supply, and the contribution rate of the wind-photovoltaic-storage multi-energy hybrid power system. Simultaneously, multi-objective adaptive chaotic particle swarm optimization is used to solve the model. In this study, different planning preferences were considered. The Pareto front is sorted using the technique for order preference by similarity to an ideal solution, and the optimal planning schemes under different planning preferences are obtained. In addition, the rank sum ratio evaluation method of the entropy weight is used to evaluate the reliability indices of different planning schemes, and a typical day was selected to analyze the output state of the planning schemes. The simulation results show that the proposed model can have great economy

and reliability, thereby providing a reference for the planning of hybrid systems with different preferences.

Keywords: gravity energy storage; wind-photovoltaic-storage; multi-energy hybrid power system; optimal capacity planning; planning preferences

摘要: 风电场、光伏电站和储能系统的容量优化规划是降低风光储多能源混合系统成本、保证系统可靠性的有效措施之一。依托山体的重力储能, 可以风光储多能源混合系统中风电场容量、光伏电站容量和储能系统容量为决策变量, 建立以系统总成本最小和包括风光互补特性、供电自给损失率及风光储多能源混合系统贡献率等因素的综合指标最优为目标函数的多目标容量优化规划模型, 并利用多目标自适应混沌粒子群算法求解模型。基于此, 考虑不同规划偏好, 利用逼近理想解排序法对帕累托前沿进行排序, 得到不同规划偏好下的最优规划方案。另外, 利用熵权法定权的秩和比评价方法对不同规划方案的可靠性指标进行了评价, 并选取某典型日对规划方案的运行状态进行分析。仿真结果表明, 所提模型具有良好的经济性及可靠性, 为风光储多能源混合系统在不同偏好下的规划提供了参考。

关键词: 重力储能; 风光储; 多能源混合系统; 容量优化规划; 规划偏好

基金项目: 国网湖南省电力公司科技项目 (5216A220000D); 湖南省科技创新平台与人才计划 (2019TP1053)。

Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company (5216A220000D); Science-Technology Innovation Platform and Talents Program of Hunan Province (2019TP1053).

0 引言

近年来, 以风电、光伏为代表的可再生能源快速发展, 风电、光伏的装机规模持续扩大, 技术不断进

步^[1]。但由于其具有出力间歇性、消纳困难等特点,影响了进一步的发展^[2]。风光系统配置一定容量的储能,不仅可以充分利用风光的互补特性,还可以有效提高清洁能源消纳能力,是未来能源利用的重要方式^[3-4]。

针对风光储多能源混合系统容量优化规划问题,目前已有学者进行了研究,根据容量优化规划目标的不同,可分为单目标和多目标两类。对于单目标的风光储多能源混合系统容量优化规划,文献[5]以降低系统运行成本为目标,提出并网型多能源混合系统的容量优化规划模型,但该模型未能保证供电可靠性。文献[6]考虑峰值负荷要求,对风光储多能源混合系统的容量进行规划,使系统总成本最低,但没有讨论系统的供电可靠性。文献[7]在风光柴储多能源混合系统的容量优化规划模型中未考虑发电系统的可靠性,只对投资成本进行了优化。文献[8]针对独立型的风光柴蓄多能源混合系统,提出了考虑补贴的容量优化规划方法。该方法以总净现成本最低为优化目标,并以负荷缺额率为约束条件保证供电可靠性。文献[9]以最小化总成本为目标,提出供电损失率的指标,分析其对成本的影响。结果表明,供电损失率较小时,成本明显降低。单目标容量优化规划主要以系统总成本最小为目标,没有考虑多个目标间的相互制约,考虑因素不甚全面。由于目标单一使得规划结果存在一定的局限性,仅利用约束条件对系统可靠性进行约束,无法合理地保证系统的供电可靠性。

相比单目标容量优化规划仅将经济性最优作为优化目标的不足,多目标容量优化规划还考虑了提高可再生能源利用率、减少污染物排放等目标。文献[10]以系统总成本和电源损耗概率为优化目标,在4种气象条件下采用智能优化算法对系统进行容量优化规划。文献[11-12]考虑数据的不确定性,建立了以系统成本和可靠性为目标的容量优化规划模型。结果表明,所提模型保证了系统的经济性,但并没有体现环境效益。文献[13]采用遗传算法探讨了在系统成本和污染物排放等两个目标下的优化问题,并对蓄电池与氢储能的优劣进行了对比分析。文献[14]以投资效益、可靠性和风光利用率为目标,建立了风光储多能源混合系统容量优化规划模型。该模型延长了储能的使用寿命,提升了发电系统的孤岛能力。文献[15]提出了包含微网全生命周期内的总净现成本、负荷容量缺额率和污染排放的多目标优化设计模型,但未将污染排

放纳入经济成本。与单目标的容量优化规划相比,多目标的容量优化规划将系统可靠性纳入目标,既降低了系统总成本,又保证了可靠性。

在中国风能和太阳能资源丰富的西北地区,采用风光储多能源混合系统具有非常广阔的应用前景,而能否科学合理地规划风电场容量、光伏电站容量及储能系统容量,对于其运行的可靠性和经济性有着较大影响。在多山地的西北地区,受建设规模、场地环境等影响,多数储能技术应用有局限。依托山体的重力储能在山地较多地区有天然优势,可用于大规模储能^[16]。重力储能利用山体落差高度储存能量,它的建设可以适应地形的变化,储能载体可以循环利用,几乎不会对环境造成污染,具有良好的可靠性和经济性,在未来具有广阔的应用前景。

基于上述背景,本文的储能系统选择以依托山体的重力储能为研究对象,建立以系统总成本最小和包括风光互补特性、供电自给损失率及风光储多能源混合系统贡献率等因素的综合指标最优为目标函数的多目标容量优化规划模型,以提升系统的经济性,确保系统的可靠性。

1 风光储多能源混合系统模型

1.1 系统结构

并网型风光储多能源混合系统一般由风电场、光伏电站、储能系统、电网及负荷构成,系统结构如图1所示。

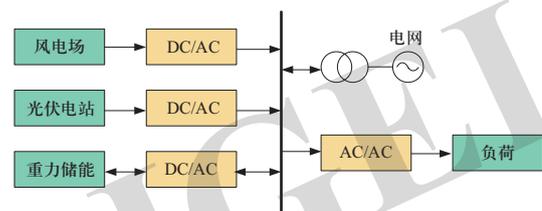


图1 并网型风光储多能源混合系统结构

Fig. 1 Structure of grid-connected wind-photovoltaic-storage multi-energy hybrid power system

其中,风机模型、光伏电池模型分别参考文献[17-18],本文主要对重力储能进行建模。

1.2 重力储能模型

依托山体的重力储能的原理就是在山体一定高度建立电动机和发电机装置,利用山体的落差高度来储存和释放能量。

1.2.1 存储能量过程

本文假设在建模过程中只有一条轨道,即只研究一套重力储能装置,只考虑山体高度、坡度、重物质量等对重力储能存储和释放能量多少的影响。其中,在存储能量时,电动机工作,消耗电能,利用滑轮组将重物从山底轨道处拉至山顶,过程中重力势能增加,最终在山顶存储起来。电动机将重物从山底拉上山过程中保持匀速,此时重物受力包括摩擦力、电动机牵引力、自身重力等,具体的重物受力平衡可用式(1)~(2)表示。

$$F_{m_up} = mg \cdot \sin \theta + F_{\mu} \quad (1)$$

$$F_{\mu} = \mu \cdot mg \cdot \cos \theta \quad (2)$$

式中: F_{m_up} 为重物上升过程中的电动机牵引力; F_{μ} 为轨道摩擦力; m 为重物质量; g 为重力加速度; θ 为山坡角度; μ 为轨道的摩擦系数。

相应地,电动机功率为

$$P_{m_up} = F_{m_up} \cdot v_{up} = (mg \cdot \sin \theta + F_{\mu}) \cdot v_{up} \quad (3)$$

式中: P_{m_up} 为重物上升过程中的电动机功率; v_{up} 为重物匀速进行过程中的速度。

理想状态下的储能为

$$W = mg \cdot h \quad (4)$$

式中: h 为山体高度。

1.2.2 释放能量过程

释放能量过程包括加速阶段、并网阶段和停运阶段,在释放能量过程中,重物受力包括轨道摩擦力、电动机牵引力、自身重力、发电机牵引力等。

加速阶段:在开始过程中,重物初始速度为零,重物处于加速阶段,重物下滑速度由零开始,逐渐加速,加速过程中发电机出力不稳定,为避免入网功率的波动过大,不进行并网发电。重物由初始高度下滑到一定高度时,达到某一速度,该速度即为并网阶段的恒定速度,利用式(5)~(6)表示。

$$mg(h - h_1) = \frac{1}{2} m v_{down}^2 \quad (5)$$

$$v_{down} = \sqrt{2g(h - h_1)} \quad (6)$$

式中: h_1 为重物达到某一速度的高度; v_{down} 为重物下滑过程中的速度。

并网阶段:重物加速到某一速度后,保持该恒定速度匀速下滑,可以使发电机发电功率稳定。为保证重物匀速下滑,避免重物下滑速度过快,同时保护装置的安全,需要电动机加以牵引。在此过程中,重物带动发电机工作,产生电能供给负荷或输送给电网,

其中,重物受力平衡可用式(7)~(8)表示。

$$mg \cdot \sin \theta = F_{\mu} + F_{m_down} + F_{g_down} \quad (7)$$

$$F_{m_down} = \frac{P_{m_down}}{v_{down}} \quad (8)$$

式中: F_{m_down} 为重物下滑过程中的电动机牵引力; F_{g_down} 为下滑过程中的发电机牵引力; P_{m_down} 为下滑过程中的电动机功率,与储能过程中保持一致。

相应地,发电机功率为

$$P_{g_down} = F_{g_down} \cdot v_{down} \quad (9)$$

式中: P_{g_down} 为下滑过程中的发电机功率。

停运阶段:重物到达山底后,并网阶段结束,发电机不再发电。装置停止运行,重物速度由恒定逐渐减小,最后变为零。在停运阶段,重物可以依靠摩擦力自行减速,若速度过大或对减速距离有要求时,可以增设减速带、隔离设备等外界辅助减速。停运阶段不存在能量损耗,故建模时暂不考虑该阶段的能量损耗。

2 多目标容量优化规划模型

本文以系统总成本最小和包括风光互补特性、供电自给损失率及风光储多能源混合系统贡献率等因素的综合指标最优为目标函数进行容量优化规划,对风光储多能源混合系统中的风电场容量、光伏电站容量、重力储能容量进行合理规划分配。

2.1 目标函数

1) 目标函数1:系统总成本(F_1)最小,包括系统初始成本、运行维护成本、购电成本、售电收益及环保收益等。

$$F_1 = \min(C_{IN} + C_{OM} + C_{BE} - C_{SE} - C_{EP}) \quad (10)$$

$$C_{IN} = f_{DR} \cdot (W_{wt} \cdot C_{wt} + W_{pv} \cdot C_{pv} + W_{gs} \cdot C_{gs}) \quad (11)$$

$$f_{DR} = \frac{d(1+d)^y}{(1+d)^y - 1} \quad (12)$$

$$C_{OM} = \Delta t_{wt} \cdot C_{wt}^{om} + \Delta t_{pv} \cdot C_{pv}^{om} + \Delta t_{gs} \cdot C_{gs}^{om} \quad (13)$$

$$C_{BE} = \sum_{t=1}^{8760} C_p(t) \cdot (E_{BE}(t) + E_{m_down}(t)) \quad (14)$$

$$C_{SE} = \sum_{t=1}^{8760} (C_s(t) \cdot E_{SE}(t) + C_s(t) \cdot E(t)) \quad (15)$$

$$C_{EP} = (w_{wt} + w_{pv}) \sum_{i=1}^N (C_{tp,i}^{ep} - C_{wt,i}^{ep} - C_{pv,i}^{ep}) \quad (16)$$

式中: C_{IN} 为系统初始成本; C_{OM} 为年运行维护成本; C_{BE} 为向电网的年购电成本; C_{SE} 为系统年售电收益; C_{EP} 为年环保收益, 该环保收益为电网向风光储系统支付; W_{wt} 为风电场容量; C_{wt} 为风电场单位容量的价格; W_{pv} 为光伏电站容量; C_{pv} 为光伏电站单位容量的价格; W_{gs} 为重力储能容量; C_{gs} 为重力储能单位容量的价格; f_{DR} 为折旧系数; d 为折旧率; y 为使用年限; Δt_{wt} 、 Δt_{pv} 、 Δt_{gs} 分别为风电场、光伏电站、重力储能的运行时间; C_{wt}^{om} 、 C_{pv}^{om} 、 C_{gs}^{om} 分别为单位时间内风电场、光伏电站、重力储能的运行维护成本; $C_p(t)$ 为 t 时刻系统购电的分时电价; $E_{BE}(t)$ 为 t 时刻系统向电网购买的电量; $E_{m_down}(t)$ 为 t 时刻重力储能放电过程中电动机运行时消耗的电量; $C_s(t)$ 为 t 时刻系统售电的分时电价; $E_{SE}(t)$ 为 t 时刻系统向电网出售的电量; $E(t)$ 为 t 时刻系统提供给负荷的电量; w_{wt} 、 w_{pv} 分别为风力及光伏的发电量; N 为污染物的种类数; $C_{tp,i}^{ep}$ 、 $C_{wt,i}^{ep}$ 、

$C_{pv,i}^{ep}$ 分别为火力发电、风力发电、光伏发电第 i 类污染物的环境价值成本。

2) 目标函数2: 综合指标(F_2)最优, 包括风光互补特性、供电自给损失率及风光储多能源混合系统贡献率等可靠性指标。

$$F_2 = \max(-c_1 \cdot D - c_2 \cdot f + c_3 \cdot R) \quad (17)$$

$$D = \frac{1}{P_L} \sqrt{\frac{1}{8760} \sum_{t=1}^{8760} (P_{wt}(t) + P_{pv}(t) - P_L(t))^2} \quad (18)$$

$$f = \frac{\sum_{t=1}^{8760} [P_L(t) - (P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t))]}{\sum_{t=1}^{8760} P_L(t)} \quad (19)$$

$$R = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_E(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_L(t)} \quad (20)$$

$$P_E(t) = \begin{cases} P_L(t), & P_{wt}(t) + P_{pv}(t) \geq P_L(t) \\ P_{wt}(t) + P_{pv}(t), & P_{wt}(t) + P_{pv}(t) < P_L(t), P_{gs}(t-1) = 0 \\ P_L(t), & P_{wt}(t) + P_{pv}(t) < P_L(t) < P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t-1) \\ P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t-1), & P_L(t) \geq P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t-1), P_{gs}(t-1) > 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: D 为风光互补特性, 表示风力发电和光伏发电的输出功率之和相对于负荷功率的波动^[19]; f 为供电自给损失率, 以系统供给过程中负荷的缺少电量表示系统供电可靠性; R 为风光储多能源混合系统贡献率, 以系统供给负荷的功率占负荷功率的比值表示; c_1 、 c_2 、 c_3 分别为3个指标的权重系数, 3个指标同等重要, 故均为1/3; \bar{P}_L 为负荷的平均功率; $P_{wt}(t)$ 为 t 时刻风力发电的功率; $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏发电的功率; $P_L(t)$ 为 t 时刻负荷的功率; $P_{gs}(t)$ 为 t 时刻重力储能功率; $P_E(t)$ 为 t 时刻系统提供给负荷的功率。

2.2 约束条件

2.2.1 风光储多能源混合系统容量约束

风光储多能源混合系统的容量下限为0, 上限为一年中最大负荷的10倍^[20], 即

$$0 \leq W_{wt} + W_{pv} + W_{gs} \leq 10P_L^{\max} \quad (22)$$

式中: P_L^{\max} 为一年中的最大负荷。

另外, 风机、光伏的数量应限制在合理的范围内, 其上限值可根据实际投资预算及安装的场地规划来确定, 将数量转换为用容量表示, 即

$$\begin{cases} 0 \leq W_{wt} \leq W_{wt,\max} \\ 0 \leq W_{pv} \leq W_{pv,\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $W_{wt,\max}$ 、 $W_{pv,\max}$ 分别为系统所在地区最大风电场容量和最大光伏电站容量。

同时, 重力储能的容量取决于山体的高度, 应满足

$$0 \leq W_{gs} \leq mg \cdot h_{gs,\max} \quad (24)$$

式中: $h_{gs,\max}$ 为山体的最大高度。

2.2.2 可靠性指标约束

为保证本文的规划模型是可行且有意义的, 使风光储多能源混合系统确保供电的可靠性, 应满足

$$f \leq f_r \quad (25)$$

式中: f_r 为供电时允许的最大损失率。

2.2.3 系统与电网功率交换约束

风光储多能源混合系统与电网交换的功率要满足

$$P_{g,\min} \leq P_g(t) \leq P_{g,\max} \quad (26)$$

式中: $P_g(t)$ 为交换功率; $P_{g,\min}$ 、 $P_{g,\max}$ 分别为系统与电网允许交换的最小功率和最大功率, 该值根据系统与电网所达成的供求协议来确定^[19]。

2.3 求解方法

对所建立的多目标容量优化规划模型利用自适应混沌粒子群算法^[21]进行仿真求解,得到一系列非劣解,并由一系列非劣解组成帕累托前沿。在帕累托前沿中,利用熵权法^[22]求解不同目标函数的权重,并利用逼近理想解排序法^[23]对求得的帕累托前沿进行排序评价,选择排序评价最优的解作为最优规划方案,具体计算流程如图2所示。基于求解得到的风光储多能源混合系统多目标容量优化规划结果,利用熵权法定权的秩和比评价方法^[24]对不同规划方案下的可靠性指标进行排序评价,具体评价流程如附录B图B1所示。

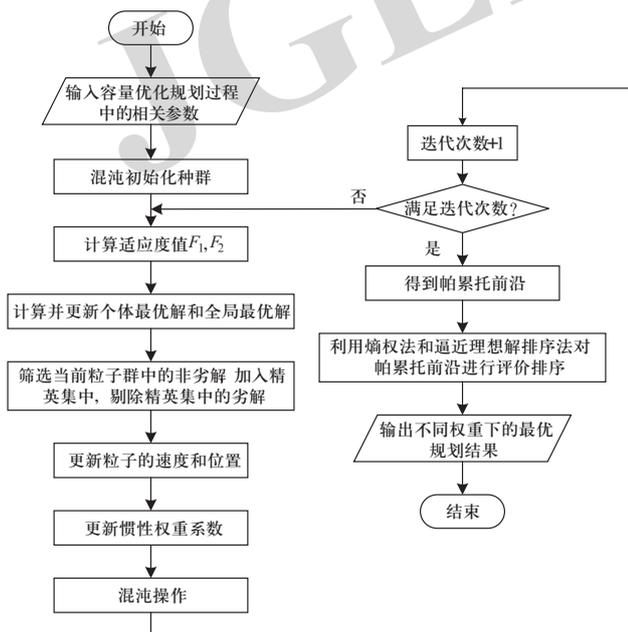


图2 多目标容量优化规划模型计算流程

Fig. 2 Calculation process of multi-objective capacity optimization planning model

3 仿真分析

3.1 参数设置

本文选取中国西部某地区(38°44'N, 106°0'E)作为参考,该地区多为山地,平均海拔2000 m以上,满足重力储能建设条件。由中国气象数据网可知,该地区每月平均风速如附录B图B2所示,利用Weibull分布模拟得到该地区一年的风速预测数据,如附录B图B3所示。该地区平均光照强度为4.32 kW/m²,在HOMER软件^[25]中,模拟得到该地区一年的太阳光照强度预测数据,如附录B图B4所示。另外,该地区负荷曲线如附录B图B5所示。

本文选择异步风力发电机,单台风机容量为2.5 MW,风机额定风速为11 m/s,切入风速为3 m/s,切出风速为20 m/s^[26]。电池板工作温度为25 °C,参考温度为25 °C,功率温度系数为1^[15]。重物质量为5万t,坡度为30°,重力加速度为9.8 m/s²,轨道摩擦系数为0.05,重物下滑过程中的速度为10 m/s,理想状态下充放电效率为90%左右,具体证明过程参见附录A。本文为贴合实际情况以充放电效率为80%进行保守估计。风光储多能源混合系统优化规划使用年限为20 a,折旧率为5%。

风光储多能源混合系统中风电场、光伏电站、重力储能的安装成本及运行维护成本如附录A表A1所示^[7,16,27],不同发电方式下各类污染物的环境价值成本如附录B表B2所示^[28]。另外,电网及系统售电的分时电价如附录B表B3所示^[29]。

3.2 规划方案选择及对比

本文借助MATLAB软件,利用多目标自适应混沌粒子群算法求解建立的多目标容量优化规划模型,得到多目标帕累托前沿,如图3所示。其中,横坐标 F_1 表示系统总成本,纵坐标 $-F_2$ 表示综合指标的相反数,帕累托前沿中的每个点都表示一个规划方案,共有11个可行的规划方案。由图3可知,系统总成本及综合指标均在比较小的范围内变化,满足系统总成本越小,综合指标的相反数越大,即系统总成本的降低,对综合指标有着负面的影响。类似的,如果综合指标更优,系统总成本将会增大,两个目标之间存在一定的制约关系。

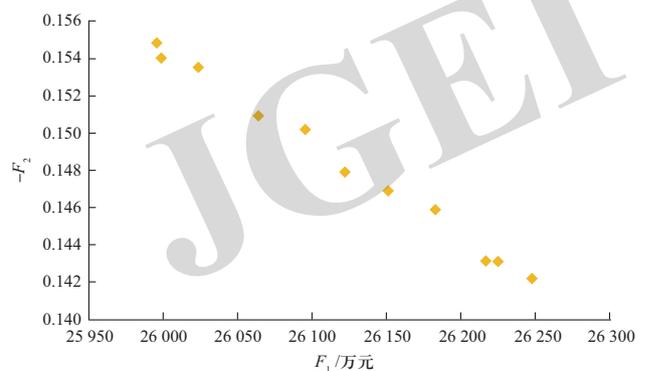


图3 考虑重力储能时的帕累托前沿

Fig. 3 Pareto front when considering gravity energy storage

在实际规划过程中,需要确定一种最终的最优规划方案,因此,需要根据不同规划偏好在帕累托前沿中选择最优规划方案。为表现不同的规划偏好,本文

提出4种规划方案, 具体的规划方案及目标函数权重值如表1所示。

表1 4种方案权重设置
Table 1 Weight setting of four schemes

方案	类型	系统总成本 (目标函数1)	综合指标 (目标函数2)
方案一	同等重要	0.5	0.5
方案二	目标1重要	1	0
方案三	目标2重要	0	1
方案四	熵权法定权	0.489 6	0.510 4

本文利用逼近理想解排序法对帕累托前沿中11种方案进行计算排序, 选择得出在4种不同规划偏好下各自对应的最优规划结果, 最优规划结果如表2所示。4种规划方案下的系统总成本及综合指标值如图4所示。

表2 4种规划方案的最优规划结果
Table 2 Optimal planning results of four planning schemes

规划方案	决策变量			目标函数	
	风电场/台	光伏电站/MW	重力储能/MW	系统总成本/万元	综合指标值
方案一	116	380	86	26 019.84	-0.148 6
方案二	99	418	18	25 645.38	-0.154 3
方案三	119	368	114	26 365.19	-0.141 5
方案四	105	389	96	26 194.36	-0.145 6

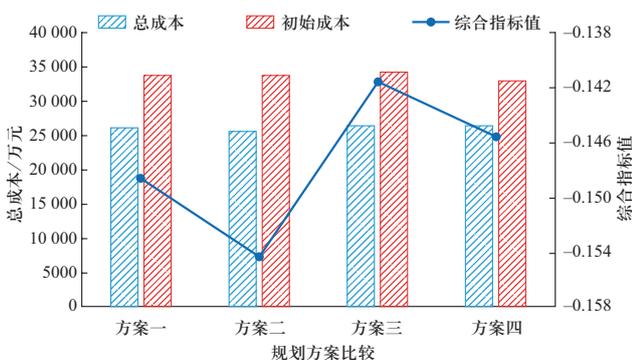


图4 4种规划方案的总成本及综合指标值

Fig. 4 Total cost and comprehensive index values of four planning schemes

由表2及图4可知, 由于不同规划方案下的偏好不同, 通过规划得到的风电场、光伏电站、重力储能的容量均不同, 从而导致了系统总成本和综合指标值的变化。对比4种规划方案来看, 方案二的系统总成本最小, 方案三的综合指标最优。另外, 规划方案一

的初始成本为33 716.37万元, 规划方案二的初始成本为33 582.87万元, 规划方案三的初始成本为34 052.28万元, 规划方案四的初始成本为33 017.28万元, 由于规划方案三配置的风电场容量、储能容量最大, 而风电场的安装成本又比较高, 所以导致规划方案三的初始成本较高。此外, 规划方案三配置了相比其他几种方案较大容量的储能, 主要是为了保证系统的供电可靠性及系统的贡献率, 而规划方案二为追求系统总成本最小, 配置的储能容量最小, 同时配置的风电场容量也最小。

规划方案一虽然在4种方案中的两目标均不属于最优, 但其兼顾了系统的成本及可靠性, 有效降低了系统总成本, 提高了系统的可靠性。相比而言, 规划方案二认为系统的总成本重要, 忽视了系统的可靠性, 得到的系统总成本是最小的, 但综合指标值却是几种规划方案中最小的。同样地, 规划方案三认为系统的可靠性重要, 忽视了系统的总成本, 得到的综合指标值是最优的, 但系统总成本却是最大的。规划方案四同样既考虑系统总成本, 又考虑了系统可靠性, 在损失一定成本的同时有效优化了综合指标。

综合指标中对应的3个具体指标值如图5所示, 对比来看, 规划方案二的风光互补特性最小, 故而风光的互补性最好, 系统的发电功率越能满足负荷需求, 但供电自给损失率偏大, 系统贡献率偏低; 规划方案三的系统贡献率最大, 说明需要从电网购买的电量最少, 能够节约购电的成本, 同时供电自给损失率最小, 说明系统供电最可靠, 但风光互补特性偏大。

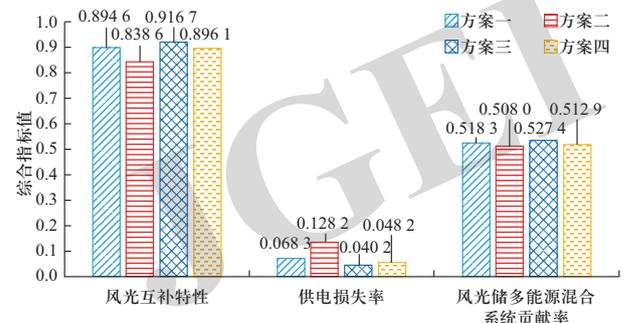


图5 综合指标中对应的3个具体指标值

Fig. 5 Three specific index values corresponding to comprehensive index

仅依照可靠性指标的数值, 只是简单对比不同规划方案对应每个可靠性指标值的大小, 无法确定哪种规划方案的可靠性指标更优, 因此, 本文利用熵权法定权的秩和比评价方法进行评价, 排序选出综合3种可

靠性指标最优的规划方案。从不同规划方案的具体可靠性指标值出发考虑,利用熵权法对3个可靠性指标的权重进行求取,其中,风光互补特性、供电自给损失率为负向指标,风光储多能源混合系统贡献率为正向指标。求解得到风光互补特性、供电自给损失率、风光储多能源混合系统贡献率的权重分别为0.435 3、0.251 4、0.313 3。

基于可靠性指标值及权重值,利用秩和比法及2.4节基本评价流程进行排序评价,首先得到的秩次值如表3所示。

表3 可靠性指标对应的秩次值
Table 3 Rank value of reliability index

规划方案	指标原始值			秩次		
	风光互补特性	供电自给损失率	系统贡献率	风光互补特性	供电自给损失率	系统贡献率
方案一	0.894 6	0.068 3	0.518 3	3	2	3
方案二	0.838 6	0.128 2	0.508 0	4	1	1
方案三	0.916 7	0.040 2	0.527 4	1	4	4
方案四	0.896 1	0.048 2	0.512 9	2	3	2

规划方案一、规划方案二、规划方案三、规划方案四的加权秩和比值分别为0.687 5、0.573 6、0.671 9、0.569 4,评分排序为1、3、2、4。因此,仅从3种可靠性指标来看,规划方案一最优,其次为规划方案三、规划方案二,最后为规划方案四。总体来看,规划方案一和规划方案三中均考虑了系统的可靠性,对综合指标进行了优化,排名在前两位,而规划方案二忽视了系统可靠性,没有对综合指标进行优化,排名靠后。另外,虽然规划方案四排名最后,但与规划方案二相比,两种规划方案的加权秩和比值相差不大,规划方案四的供电自给损失率及风光储多能源混合系统贡献率要优于规划方案二,同时规划方案四的综合指标较优,所以,规划方案四在一定程度上对具体的可靠性指标进行了优化,只是综合来看规划方案二较优一些。因此,综合考虑系统成本及可靠性指标排序评价,规划方案一为最优规划方案,即在规划过程中要合理考虑成本及可靠性,既要保证系统的经济性,也不影响系统的可靠性。

3.3 规划结果分析

针对3.2节得到的4种多目标容量优化规划方案,

选取某典型日,对典型日下24 h不同规划方案的部分出力进行分析。规划方案一、规划方案二、规划方案三和规划方案四中各部分在该典型日的出力曲线分别如图6—图9所示。

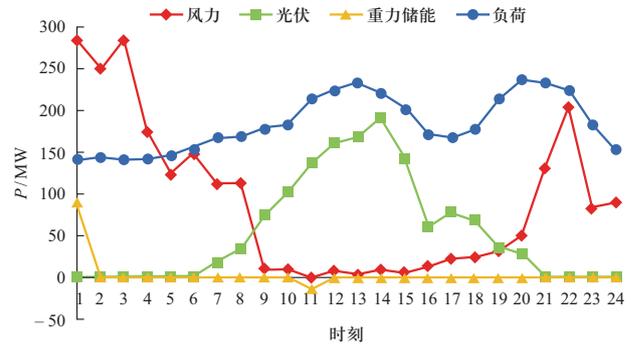


图6 典型日下规划方案一的出力曲线

Fig. 6 Output curve of planning scheme 1 in a typical day

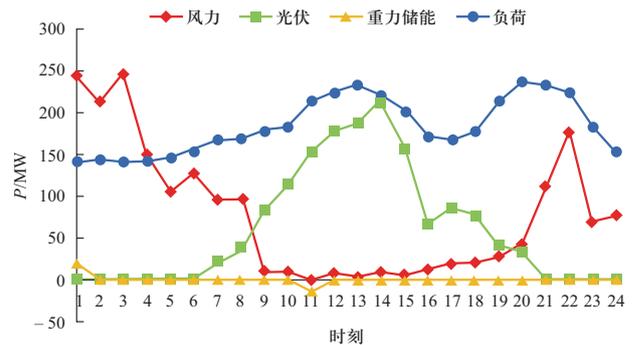


图7 典型日下规划方案二的出力曲线

Fig. 7 Output curve of planning scheme 2 in a typical day

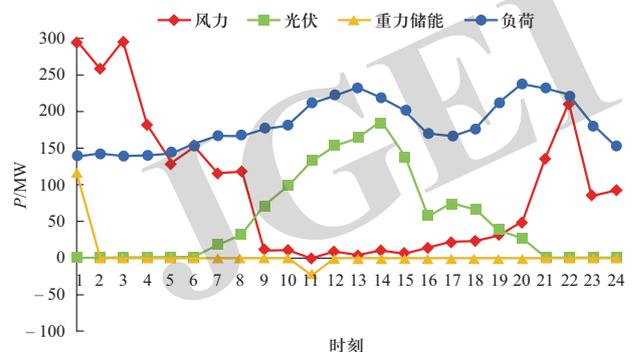


图8 典型日下规划方案三的出力曲线

Fig. 8 Output curve of planning scheme 3 in a typical day

由于不同规划方案中的风电场、光伏电站、重力储能的容量不同,导致每时刻风力、光伏出力不同,重力储能在配合时进行储能和放电的电量也不同。由

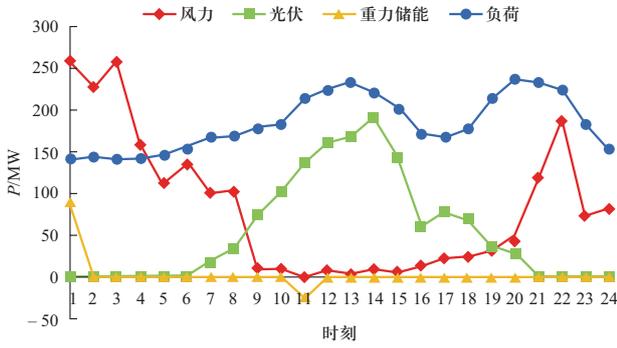


图9 典型日下规划方案四的出力曲线

Fig. 9 Output curve of planning scheme 4 in a typical day

图6—图9可以看出, 不同规划方案的出力曲线趋势一致, 这主要是因为不同规划方案规划的风电场、光伏电站的容量相差不大, 但仍能看出规划方案二中每时刻的光伏出力较大, 而规划方案三中每时刻的风力出力较大。

以图6为例对不同规划方案的出力曲线进行分析。对于负荷而言, 在23:00—7:00内负荷利用水平较低, 处于谷时段; 10:00开始, 负荷增加, 一直持续到15:00, 负荷在这个时间段内处于峰时段; 然后负荷逐渐降低, 到17:00时到达最低点, 之后又开始增加, 20:00到达另一负荷高峰。对于风力出力而言, 该日早晚的风力资源比较丰富, 使得风力出力较大, 而在中午, 风力资源较少, 几乎没有出力。在风力出力较大的时刻, 负荷利用水平较低, 首先对储能进行充电, 然后将多余的电能出售给了电网。光伏出力恰好相反, 该日中午的太阳能资源比较丰富, 使得光伏出力较大, 而在早晚没有出力。

对于储能而言, 本文利用分时电价来引导其充放电, 在风光出力不足以供给负荷时, 谷电价时选择从电网购电, 峰电价时再利用储能放电, 以此来提高系统的经济性。图中可以看出, 重力储能在1:00前充电, 在1:00已完成充电, 从5:00开始, 风光出力不足以供给负荷, 由于此时处于谷时段, 因此储能不进行放电, 而是选择直接从电网购电, 将电能存储下来, 作为下一时刻的备用电。在10:00时, 风光出力依然不足以供给负荷, 而此时处于峰时段, 储能放电, 到12:00时, 储存电能用尽, 之后也不能满足负荷需求, 从而选择从电网购电。可以看出, 在一天的时间中, 风光出力不足的时刻较多, 重力储能共充放电2次。

另外, 对比分析不同规划方案下风光储多能源混合系统的供电、购电及售电, 分别如图10—图13所示。

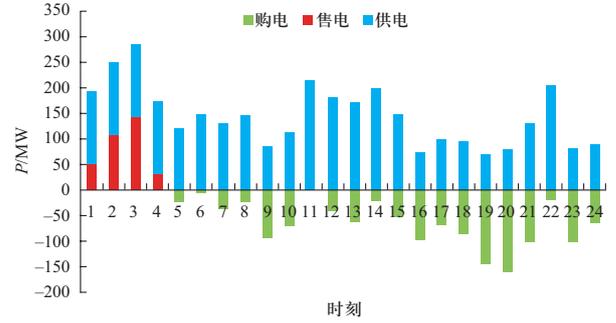


图10 典型日下规划方案一的供电、购电及售电

Fig. 10 Power supply, power purchase and power sale of planning scheme 1 in a typical day

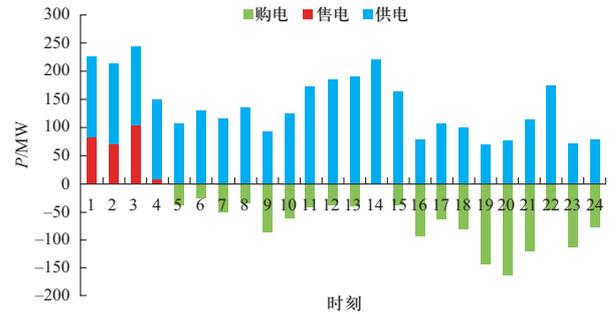


图11 典型日下规划方案二的供电、购电及售电

Fig. 11 Power supply, power purchase and power sale of planning scheme 2 in a typical day



图12 典型日下规划方案三的供电、购电及售电

Fig. 12 Power supply, power purchase and power sale of planning scheme 3 in a typical day



图13 典型日下规划方案四的供电、购电及售电

Fig. 13 Power supply, power purchase and power sale of planning scheme 4 in a typical day

从图中可以看出, 4种规划方案中向电网购电多于向电网售电, 向电网售电主要集中在晚间谷时段, 而其余时刻主要是向电网购电。对比来看, 规划方案三向电网出售的电能多于其他3种规划方案, 规划方案二向电网出售的电能最少, 主要是因为规划方案三中风电场容量最大, 且在谷时段主要是风力出力。规划方案三在6:00时风光出力大于负荷, 存在部分电能出售给电网情况, 而其他3种规划方案在6:00时风光出力小于负荷, 选择向电网购电。对于供电部分, 在4种规划方案中, 除晚间谷时段向电网售电外, 其余电能均供给负荷使用, 在11:00—14:00及22:00达到比较高的供电水平。对于4种规划方案的购电部分, 在5:00—8:00、14:00及22:00向电网购买的电能小于50 MW, 而在晚高峰19:00—21:00时段向电网购电处于比较高的水平。由于规划方案二中光伏电站容量较大, 在14:00时光伏出力充足, 完全供给负荷需求, 多余电量利用储能系统进行存储, 因此在该时刻既无购电也无售电。比较特殊的是, 规划方案一、规划方案三和规划方案四在11:00时风光出力正好完全供给负荷需求, 同样既无购电也无售电。

整体来看, 除个别时刻购电部分的水平较高外, 其他时刻供电部分均大于购电, 能够有效提高风光储多能源混合系统贡献率, 同时有效提高了风光互补特性。尽管风光储多能源混合系统对电网的依赖程度比较高, 但这样有效保证了系统的供电可靠性。

4 结论

本文基于依托山体的重力储能, 建立了以系统总成本最小和综合指标最优的风光储多能源混合系统容量优化规划模型, 利用多目标自适应混沌粒子群算法求解模型, 通过对比分析规划结果有如下结论。

1) 利用山体落差高度来储存能量, 具有良好的可靠性及经济性。

2) 在不同规划偏好下, 通过进行不同规划方案对比, 最终得出规划方案一为最优规划方案, 既考虑了系统总成本, 又考虑了系统的可靠性。

3) 在典型日场景下深入分析不同规划方案中的各部分出力曲线可知, 本文所提模型能够有效提高风光储多能源混合系统贡献率, 同时有效提高了风光互补特性, 保证了供电的可靠性。

本文所提模型主要是对重力储能容量配置的优化, 所构建的重力储能模型还不够完善, 在后续工作

中将重点从对重力储能的多个影响因素入手, 对其轨道数、山体坡度、重物质量等展开详细研究。

参考文献

- [1] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18(in Chinese).
- [2] REN G R, WAN J, LIU J F, et al. Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in China[J]. Energy, 2019, 177: 262-275.
- [3] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89(in Chinese).
- [4] BLOESS A, SCHILL W P, ZERRAHN A. Power-to-heat for renewable energy integration: a review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1611-1626.
- [5] AMROLLAHI M H, BATHAEE S M T. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response[J]. Applied Energy, 2017, 202: 66-77.
- [6] PRIYADHARSHINI B, GANAPATHY V, SUDHAKARA P. An optimal model to meet the hourly peak demands of a specific region with solar, wind, and grid supplies[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13179-13194.
- [7] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581(in Chinese).
- [8] 潘文霞, 李建成, 方坤豪. 考虑补贴的独立微网容量配置优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2206-2213.
PAN Wenxia, LI Jiancheng, FANG Kunhao. Optimization method of capacity configuration of standalone microgrid considering subsidy[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2206-2213(in Chinese).
- [9] JAVED M S, MA T. Techno-economic assessment of a hybrid solar-wind-battery system with genetic algorithm[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 6384-6392.
- [10] ZHANG D B, LIU J W, JIAO S F, et al. Research on the configuration and operation effect of the hybrid solar-wind-

- battery power generation system based on NSGA-II[J]. *Energy*, 2019, 189: 116121.
- [11] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 102-112(in Chinese).
- [12] SHADMAND M B, BALOG R S. Multi-objective optimization and design of photovoltaic-wind hybrid system for community smart DC microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(5): 2635-2643.
- [13] KATSIGIANNIS Y A, GEORGILAKIS P S, KARAPIDAKIS E S. Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2010, 4(5): 404.
- [14] 窦晓波, 袁筒, 吴在军, 等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(3): 26-32.
DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(3): 26-32(in Chinese).
- [15] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(4): 524-536.
GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 524-536(in Chinese).
- [16] 曾蓉. 山体储能技术及其与风电场联合出力的容量配置研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [17] 廖秋萍, 吕林, 刘友波, 等. 考虑重构的含可再生能源配电网电压控制模型与算法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(18): 32-39.
LIAO Qiuping, LYU Lin, LIU Youbo, et al. Reconfiguration based model and algorithm of voltage regulating for distribution network with renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(18): 32-39(in Chinese).
- [18] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 风光储微电网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(12): 26-31.
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(12): 26-31(in Chinese).
- [19] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 88-98.
XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 88-98(in Chinese).
- [20] 梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风—光—储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(20): 13-19.
MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(20): 13-19(in Chinese).
- [21] 负保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 123-130.
YUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 123-130(in Chinese).
- [22] 刘志谱, 李欣然, 刘小龙, 等. 考虑负荷重要性与源-荷互补性的负荷恢复策略[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(5): 449-456.
LIU Zhipu, LI Xinran, LIU Xiaolong, et al. Load recovery strategy considering importance and source-load complementarity[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(5): 449-456(in Chinese).
- [23] 赵腾, 邬炜, 李隽, 等. “两个替代”趋势下的欧洲跨国电力互联互通通道研究[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(6): 632-642.
ZHAO Teng, WU Wei, LI Jun, et al. Research on cross-border power interconnection channels in Europe under trend of two replacements[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(6): 632-642(in Chinese).
- [24] 吴鸣, 赵婷婷, 赵凤展, 等. 微电网运行效果评价指标体系及评价方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 690-697.
WU Ming, ZHAO Tingting, ZHAO Fengzhan, et al. Evaluation index system of microgrid operation effect and corresponding evaluation method[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 690-697(in Chinese).
- [25] AL-KARAGHOULI A, KAZMERSKI L L. Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(4): 710-714.
- [26] 郭琦. 风光储微电网多目标优化配置[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [27] GUO L, HOU R S, LIU Y X, et al. A novel typical day selection method for the robust planning of stand-alone wind-photovoltaic-diesel-battery microgrid[J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114606.
- [28] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(19): 32-40.
MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics

and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40(in Chinese).

[29] 缪妙, 李勇, 曹一家, 等. 考虑环境因素的多能源系统交流直混合供能优化策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 128-134.

MIAO Miao, LI Yong, CAO Yijia, et al. Optimization strategy of multi-energy hybrid AC/DC power system considering environmental factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 128-134(in Chinese).

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-08-11。



刘志刚

作者简介:

刘志刚 (1963), 男, 高级工程师, 研究方向为电网优化调度及安全运行, E-mail: liuzg@hn.sgcc.com.cn。

伍也凡 (1989), 男, 工程师, 研究方向为电力系统二次及智能化, E-mail: fan_cs@foxmail.com。

侯慧 (1981), 女, 博士, 副教授, 研究方向为能源互联网。通信作者, E-mail: houhui@whut.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)

附录A 重力储能能量转换

在整个释放能量的过程中, 主要的损耗包括

$$W_1 = mg(h - h_1) \quad (A1)$$

$$W_2 = \mu \cdot mg \cdot \cos\theta \cdot \frac{h - h_1}{\sin\theta} \quad (A2)$$

$$W_3 = P_{m_down} \cdot t \quad (A3)$$

式中: W_1 为重物在加速阶段时的能量损耗; W_2 为重物下滑过程中的摩擦损耗; W_3 为重物下滑过程中电动机工作所需的能量; t 为重物下滑过程中电动机工作时间。

因此, 整个过程中的能量转换效率为

$$\alpha = \frac{W_{re}}{W_{st}} = \frac{mg \cdot h - mg(h - h_1) - \mu \cdot mg \cdot \cos\theta \cdot \frac{h - h_1}{\sin\theta}}{mg \cdot h - \mu \cdot mg \cdot \cos\theta \cdot \frac{h}{\sin\theta}} \quad (A4)$$

式中: α 为重力储能的能量转换效率; W_{re} 为释放的能量; W_{st} 储存的能量。

经分析, 重力储能的能量转换效率大于90%。

附录B 图表

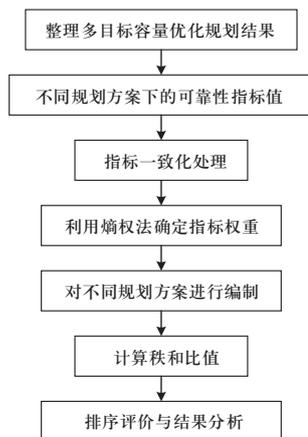


图 B1 不同规划方案的评价流程

Fig. B1 Evaluation process of different planning scheme

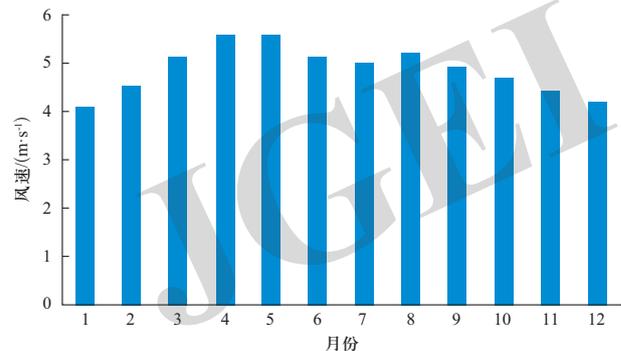


图 B2 西部某地区每月平均风速

Fig. B2 Monthly average wind speed for the region

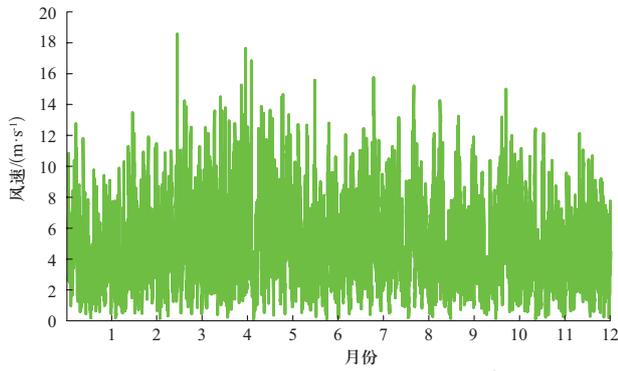


图 B3 西部某地区全年风速预测数据
Fig. B3 Annual wind speed forecast data for the region

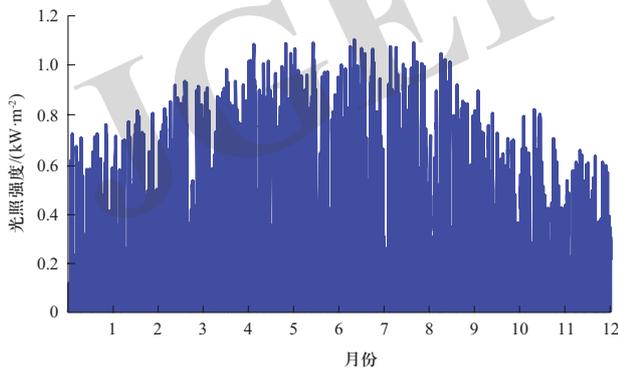


图 B4 西部某地区全年光照强度预测数据
Fig. B4 Annual illumination forecast data for the region

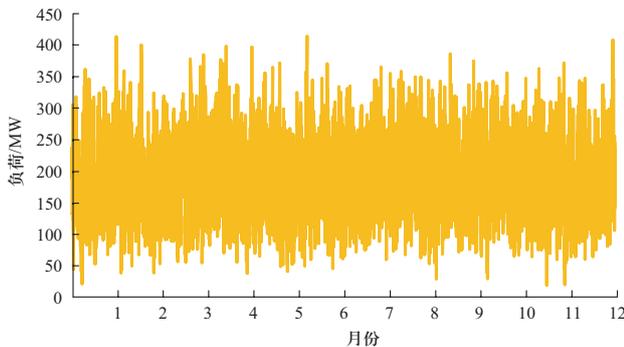


图 B5 西部某地区负荷曲线
Fig. B5 Load curve for the region

表 B1 系统各部分安装成本及运行维护成本

Table B1 Installation costs and operation and maintenance costs of each part of system

系统组成部分	安装成本 /(万元·MW ⁻¹)	运行维护成本 /(元·(MWh) ⁻¹)
风电场	680	29.6
光伏电站	600	9.6
重力储能	30	6.8

表 B2 不同发电方式下各类污染物的环境价值成本

Table B2 Costs of environmental values of various pollutants under different power generation modes

发电方式	元/MWh			
	SO ₂	NO _x	CO ₂	粉尘
燃煤发电	41.47	23.04	27.42	0.32
风电	0	0	0	0
光伏	0	0	0	0

表 B3 分时电价

Table B3 Time-of-use price

时段	价格/(元·(MWh) ⁻¹)	
	购电	售电
峰时段 (10:00—15:00, 18:00—21:00)	830	650
平时段 (07:00—10:00, 15:00—18:00, 21:00—23:00)	490	380
谷时段 (23:00—07:00)	170	130