

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201449

基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价

侯慧¹, 徐焘², 肖振锋^{3,4}, 伍也凡^{3,4}, 刘浩田^{3,4}, 陈仲伟^{3,4}

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430070; 3. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004; 4. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 合理规划风电场、光伏电站和储能的容量是保证风光储联合发电系统经济性及可靠性的前提。提出一种依托山体的重力储能形式, 联合风电场、光伏电站, 建立以系统成本最小为优化目标的并网型风光储联合发电系统容量优化规划模型。然后, 提出风光互补特性、供电损失率、系统贡献率等评价指标, 用以衡量容量优化规划结果。在算例中, 基于分时电价场景, 对考虑重力储能、蓄电池储能、压缩空气储能等不同储能形式的规划模型进行仿真对比。通过利用熵权法定权的秩和比评价方法对考虑不同储能形式的容量规划结果排序评价, 验证了所提模型的科学性及其有效性。

关键词: 重力储能; 风光储联合发电系统; 容量优化规划; 评价指标; 评价方法

Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage

HOU Hui¹, XU Tao², XIAO Zhenfeng^{3,4}, WU Yefan^{3,4}, LIU Haotian^{3,4}, CHEN Zhongwei^{3,4}

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Central Southern Electric Power Design Institute, Wuhan 430070, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Economic & Technical Research Institute, Changsha 410004, China; 4. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China)

Abstract: Reasonable capacity planning of wind farms, photovoltaic power stations and energy storage is a prerequisite to ensure the economy and reliability of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system. In this paper, a form of gravity energy storage relying on mountains is proposed. Combined with a wind farm and photovoltaic power station, an optimal capacity planning model of a grid-connected system is established with the minimum costs of the system as the optimization goal. Then, evaluation indices such as the complementary characteristics of wind and solar, the loss rate of power supply and the contribution rate of the system are put forward to evaluate the planning results. In the example, based on the time-of-use electricity price, the capacity planning models considering different energy storage forms, such as gravity energy, battery energy and compressed air energy storage, are simulated and compared. The rank-sum ratio evaluation method with an entropy weight method is used to rank and evaluate the results, and the validity and scientific nature of the proposed model is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177110), the Hunan Science and Technology Innovation Platform and Talents Program (No. 2019TP1053), and the Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company (No. 5216A220000F).

Key words: gravity energy storage; wind-photovoltaic-storage hybrid power system; optimal capacity planning; evaluation index; evaluation method

0 引言

我国西北地区风能和太阳能等可再生能源丰富,

使得可再生能源装机容量不断增加, 但消纳比较困难, 电网的调峰能力不足, 西北地区弃风弃光现象时有发生^[1-3]。

基于可再生能源的风光联合发电系统配置一定容量的储能是满足可再生能源大规模接入的重要手段之一, 既可以提高风光发电消纳能力, 又可以提高发电系统的可靠性和经济性^[4]。而风光储联合发

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177110); 湖南省科技创新平台与人才计划项目资助(2019TP1053); 国网湖南省电力公司科技项目资助(5216A220000F)

电系统的容量大小对其运行的可靠性和经济性有较大影响。当系统的容量配置过小时, 某一时间段内的负荷需求可能得不到满足; 配置过大时, 可以提高可靠性, 但其初始建设成本则会大大增加。因此, 科学合理地规划风电场、光伏电站及储能的容量是风光储联合发电系统规划的关键问题之一。

针对并网型风光储联合发电系统容量优化规划问题, 国内外学者进行了一些研究。文献[5]以降低运行成本为目标, 提出了并网型联合发电系统的容量优化规划模型。文献[6]通过预测风速和光照强度, 并根据峰值负荷要求, 对风光储联合发电系统容量进行规划, 使系统总成本最小。类似地, 文献[7]在风光柴储联合发电系统的容量优化规划模型中对投资成本进行了优化。上述文献以风光储联合发电系统总成本最小为研究目标, 均未讨论系统的供电可靠性。

另有学者为提高系统的供电可靠性, 对负荷缺失率、供电损失率等指标进行约束。其中, 文献[8]建立了以总成本最小为目标的容量优化规划模型, 并以能量损失率、缺失率等为约束条件, 保证了系统的供电可靠性。文献[9]以总净现成本最小为目标, 并以负荷缺失率为约束条件, 保证供电的可靠性。文献[10]以最小化总成本为目标对风光储联合发电系统容量进行优化规划, 同时提出供电损失率的指标, 分析了其对成本的影响。结果表明, 供电损失率较小时, 成本明显降低。文献[11-12]建立了风光储联合发电系统的容量优化规划模型, 旨在降低总投资成本, 虽然模型保证了较高的供电可靠性, 但在一定程度上增加了成本。上述文献均以约束条件来表征系统的供电可靠性, 未将其作为评价指标来对规划模型进行评价分析。同时, 针对容量优化规划问题, 以往的研究多集中于考虑蓄电池储能等储能形式的联合发电系统, 未考虑储能应用场景的局限性。

西北地区地势海拔高, 多为山地, 因场地选择、建设规模等因素, 蓄电池储能等现有储能技术应用在西北地区可能有所局限。而依托山体的重力储能, 在西北地区有海拔山体的天然优势, 可用于大规模储能^[13-14]。文献[13]中对重力储能进行了初步探索, 分析了重力储能的可行性, 表明重力储能具有广阔的应用前景。文献[14]描述了重力储能的特性与运行原理, 分析了其在储能技术中的优势, 并结合风电系统进行了容量优化。文献[15]对重力储能进行了经济分析, 并与其他储能技术的经济性进行对比, 结果表明, 重力储能具有良好的操作性和可行性。

目前, 现有文献大多针对重力储能的概念进行分析研究, 对于重力储能容量优化规划的研究还比较少。

基于上述背景, 本文结合西北地区的地形特点, 提出一种依托山体的重力储能模型。并以并网型风光储联合发电系统为研究对象, 建立容量优化规划模型, 提出衡量风光储联合发电系统的风光互补特性、供电损失率、系统贡献率等评价指标, 利用猫群算法求解, 以西北地区某地的风光资源数据为例验证了所提模型的有效性。另外, 在分时电价场景下, 对比考虑重力储能、蓄电池储能、压缩空气储能等不同储能形式时的容量优化规划结果, 同时, 利用熵权法定权的秩和比评价方法对考虑不同储能形式时的容量优化规划结果进行排序评价。

1 依托山体的重力储能模型

重力储能利用山体的落差高度储存能量, 它的建设几乎可以适应地形的变化, 储能载体都是重物, 可以循环使用, 几乎不会对环境造成污染, 建设条件不会像抽水蓄能电站那样受地理环境所限。

其原理是: 在电力负荷低谷时, 电动机带动重物在轨道上运动到一定高度, 完成电能到动能再到重力势能的能量转换, 将电能以重力势能的形式储存起来; 在电力负荷高峰时, 将处在轨道一定高度的重物释放, 带动发电机工作, 完成重力势能到动能再到电能的能量转换。重力储能的能量转换如图 1 所示。其中, 重物可以是石头、沙子或其他密度较大且容易就地取材的物体。

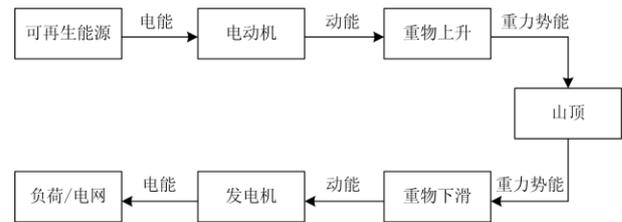


图 1 重力储能的能量转换图

Fig. 1 Energy conversion diagram of gravity energy storage

1.1 存储能量过程

重力储能存储和释放能量的多少, 与山体的高度、坡度、重物质量等有关。其中, 存储能量时, 电动机作用, 消耗电能, 将重物利用滑轮组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顶过程中保持匀速, 此时重物受力平衡可用式(1)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} 为上升过程中的电动机牵引力； F_{μ} 为摩擦力； m 为重物质量； g 为重力加速度； θ 为山坡的角度； μ 为摩擦系数。

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

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

1.2 释放能量过程

释放能量过程相对存储能量过程较复杂，重力储能将重物利用滑轮组从山顶轨道处释放至山底，分为加速阶段和并网阶段，过程中重力势能减少，带动发电机工作，产生电能供给负荷或输送给电网。

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。并网阶段：重物加速到某一恒定速度，重物保持该恒定速度匀速下滑，使发电机发电功率均衡，为保持重物匀速下滑且保护装置安全，电动机加以牵引，此时重物受力平衡可用式(4)表示。

$$mg \cdot \sin \theta = F_{\mu} + F_{m_down} + F_{g_down} \quad (4)$$

式中： F_{m_down} 为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。

$$P_{g_down} = F_{g_down} \cdot v_{down} \quad (5)$$

式中： P_{g_down} 为下滑过程中的发电机功率； v_{down} 为重物匀速下滑过程中的速度。

重力储能在能量转换过程中考虑摩擦损耗时的充放电效率为 90%^[4]，重物下滑过程中电动机牵引消耗的电能由电网提供。本文假设坡度、重物质量等已知，山体的高度作为影响重力储能容量的唯一因素来研究重力储能的最佳容量。在理想情况下，重力储能存储的能量可用式(6)表示。

$$W = mg \cdot h \quad (6)$$

式中： W 为重力储能存储的能量； h 为山体的高度。

2 风光储联合发电系统容量优化规划模型

2.1 风光储联合发电系统结构

风光储联合发电系统是利用太阳能和风能在时间分布上及地域上的互补性，形成联合发电系统，利用储能存储发电系统发出的电量，当有负荷需求时，通过输电线路进行供给。并网型的风光储联合发电系统是将电网作为联合发电系统的备用电源。当联合发电系统中有多余的电量时，馈入电网；当电量不足时，向电网购买。本文即研究由风电场、光伏电站、重力储能组成的并网型联合发电系统，系统结构如图 2 所示。

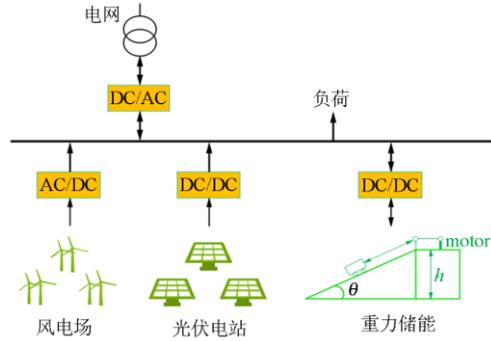


图 2 并网型风光储联合发电系统的系统结构

Fig. 2 System structure of grid-connected wind-photovoltaic-storage hybrid power system

其中，风光储联合发电系统中的风电场参见文献[16]的数学模型，光伏电站参见文献[17]的数学模型。

2.2 目标函数

本文建立含有风电场、光伏电站及重力储能的容量优化规划模型，模型以风光储联合发电系统的总成本最小为目标函数，考虑系统初始成本、运行维护成本、购电成本、售电收益及环保收益。数学表达式为

$$\min C_{total} = \min(C_{IN} + C_{OM} + C_{BE} - C_{SE} - C_{EP}) \quad (7)$$

式中： C_{total} 为系统总成本； C_{IN} 为系统初始成本； C_{OM} 为运行维护成本； C_{BE} 为向电网的购电成本； C_{SE} 为向电网的售电收益； C_{EP} 为环保收益。

将系统的初始成本折算至日初始成本，日初始成本为

$$C_{IN} = \frac{1}{365} \cdot f_{DR} \cdot (W_{wt} \cdot C_{wt} + W_{pv} \cdot C_{pv} + W_{gs} \cdot C_{gs}) \quad (8)$$

$$f_{DR} = \frac{d(1+d)^y}{(1+d)^y - 1} \quad (9)$$

式中： 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。

系统的运行维护成本为

$$C_{OM} = \Delta t_{wt} \cdot C_{wt}^{om} + \Delta t_{pv} \cdot C_{pv}^{om} + \Delta t_{gs} \cdot C_{gs}^{om} \quad (10)$$

式中： Δt_{wt} 、 Δt_{pv} 、 Δt_{gs} 分别为风电场、光伏电站、重力储能一天内的运行时间； 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。

系统向电网的购电成本为

$$C_{BE} = C_p(t) \cdot (E_{BE}(t) + E_{m_down}(t)) \quad (11)$$

式中: $C_p(t)$ 为 t 时刻电网电价; $E_{BE}(t)$ 为 t 时刻系统向电网购买的电量; $E_{m_down}(t)$ 为重力储能放电过程中电动机牵引时消耗的电量。

系统向电网的售电收益为

$$C_{SE} = C_p(t) \cdot E_{SE}(t) + C_s(t) \cdot E(t) \quad (12)$$

式中: $C_s(t)$ 为 t 时刻系统售电电价; $E_{SE}(t)$ 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。

一般来说, 传统火力发电系统的污染物主要有 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、粉尘等, 而风力及光伏发电可以有效地减少这些污染物的排放, 在一定程度上保护了环境, 故系统的环保收益为

$$C_{EP} = (w_{wt} + w_{pv}) \sum_{i=1}^N (C_{tpi}^{ep} - C_{wti}^{ep} - C_{pvi}^{ep}) \quad (13)$$

式中: w_{wt} 、 w_{pv} 分别为风力及光伏的日发电量; N 为污染物的种类数; C_{tpi}^{ep} 、 C_{wti}^{ep} 、 C_{pvi}^{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, 具体参数见文献[18]。

2.3 评价指标

本文提出了风光互补特性、供电损失率及风光储联合发电系统贡献率等 3 个指标来衡量风光储联合发电系统的性能。

1) 风光互补特性

风光互补特性为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, 其表达式为^[19]

$$D = \frac{1}{\bar{P}_L} \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} (P_{wt}(t) + P_{pv}(t) - P_L(t))^2} \quad (14)$$

式中: D 为风光互补特性; \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。当 D 越小时, 系统的发电功率越能满足负荷需求, 说明风光互补性越好, 需要配置的重力储能容量也越小, 成本越低。

2) 供电损失率

以供电损失率来反映风光储联合发电系统供电的可靠性, 其表达式为

$$f = \frac{\sum_{t=1}^{24} [P_L(t) - (P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t))]}{\sum_{t=1}^{24} P_L(t)} \quad (15)$$

式中: f 为供电损失率; $P_{gs}(t)$ 为 t 时刻重力储能功

率。由式(15)可知, f 越小, 系统供电越可靠。

3) 风光储联合发电系统贡献率

以风光储联合发电系统提供给负荷的功率占负荷功率的比值来反映其贡献率, 其表达式为

$$R = \frac{\sum_{t=1}^{24} E(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_L(t)} \quad (16)$$

(1) 当 $P_{wt}(t) + P_{pv}(t) \geq P_L(t)$ 时

$$E(t) = P_L(t) \quad (17)$$

(2) 当 $P_{wt}(t) + P_{pv}(t) < P_L(t)$ 且 $P_{gs}(t-1) = 0$ 时

$$E(t) = P_{wt}(t) + P_{pv}(t) \quad (18)$$

(3) 当 $P_L(t) < P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t-1)$ 、 $P_{wt}(t) + P_{pv}(t) < P_L(t)$ 且 $P_{gs}(t-1) > 0$ 时

$$E(t) = P_L(t) \quad (19)$$

(4) 当 $P_L(t) \geq P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t-1)$ 且 $P_{gs}(t-1) > 0$ 时

$$E(t) = P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t-1) \quad (20)$$

式中: R 为风光储联合发电系统贡献率; $E(t)$ 为 t 时刻系统提供给负荷的功率。 R 越大, 从电网购买的电量就越小。

2.4 约束条件

1) 风光储联合发电系统容量约束

风光储联合发电系统的容量下限为 0, 上限为一天中最大负荷的 10 倍^[20], 即

$$0 \leq W_{wt} + W_{pv} + W_{gs} \leq 10P_L^{\max} \quad (21)$$

式中, P_L^{\max} 为一天中的最大负荷。

另外, 重力储能的容量取决于山体的高度, 应满足式(22)。

$$0 \leq W_{gs} \leq mg \cdot h_{gs_max} \quad (22)$$

式中, h_{gs_max} 为山体的最大高度。

2) 系统与电网功率交换约束

风光储联合发电系统与电网交换的功率要满足式(23)。

$$P_{g_min} \leq P_g(t) \leq P_{g_max} \quad (23)$$

式中: $P_g(t)$ 为交换功率; P_{g_min} 和 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]。

3) 评价指标约束

$$D \leq D_r \quad (24)$$

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

$$R \geq R_r \quad (26)$$

式中, D_r 、 f_r 、 R_r 分别为额定的最大风光互补特性、最大供电损失率、最小风光储联合发电系统贡献率。

另外, 由于重力储能的载体是重物, 依靠山体完成充放电过程, 对其寿命不造成影响, 所以对重力储能的荷电状态不进行约束。

2.5 系统容量优化规划策略

并网型的风光储联合发电系统运行时, 当风力和光伏发电充足时, 供给负荷需求, 并利用重力储能, 直至额定容量, 若有剩余, 再馈入电网, 即有

$$P_{SE}(t) = P_{wt}(t) + P_{pv}(t) - P_{gs}(t) - P_L(t) \quad (27)$$

式中, $P_{SE}(t)$ 为馈入电网的功率。

当风力和光伏发电不足时, 重力储能放电, 若还不满足负荷需求, 则向电网购电, 即有

$$P_{BE}(t) = P_L(t) - (P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{gs}(t)) \quad (28)$$

式中, $P_{BE}(t)$ 为电网提供的功率。

本文以风光储联合发电系统的总成本最小为目标函数, 在约束条件下, 利用容量优化规划策略对风电场容量、光伏电站容量、重力储能容量进行优化规划。在规划过程中电价不同时, 其容量优化规划结果会有所差异, 经济性和可靠性也会随之变化, 因此, 本文选择在恒定电价和分时电价两个场景下进行优化规划。利用猫群算法^[21]对建立的容量优化规划模型求解, 与其他智能算法相比(如粒子群算法^[22]), 猫群算法具有更强的计算能力, 同时可以找到更好的全局解决方案, 不易陷入局部最优解^[23-24]。具体的计算流程如图 3 所示。

3 评价方法

本文在算例部分对不同储能形式的容量规划结果进行排序评价时, 利用熵权法定权的秩和比评价方法。其中, 熵权法是一种常用的通过评价指标的数值来确定权值的客观赋权法^[25]。其原理是评价的对象在某项指标的信息熵越大, 该指标在评价中的作用越大, 权重也越大。该方法的客观性较强, 能够反映出指标的隐含信息。设容量规划方案个数为 m , 评价指标个数为 n , 熵权的计算方法为

$$r_{ij}^1 = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (29)$$

$$r_{ij}^2 = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (30)$$

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (31)$$

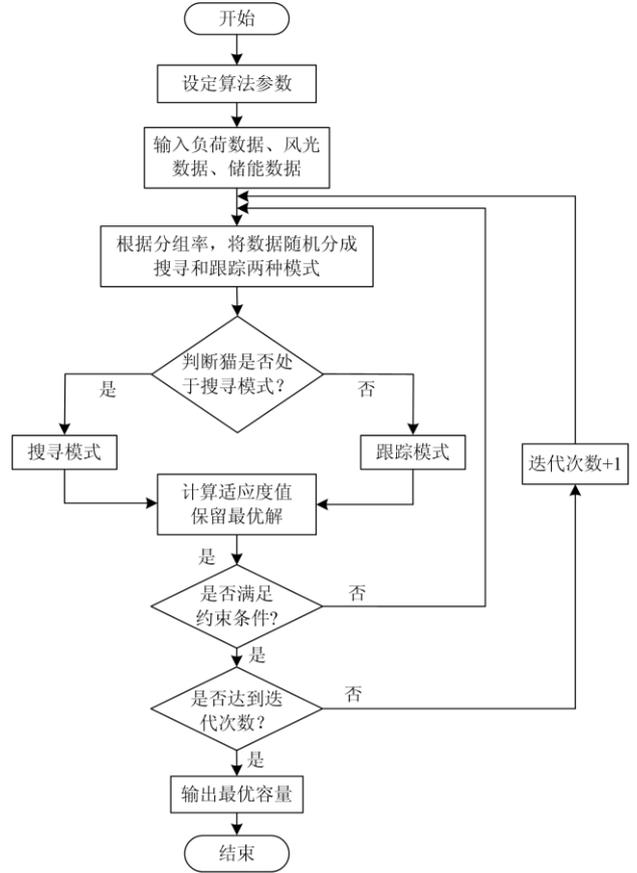


图 3 风光储联合发电系统容量优化配置计算流程图

Fig. 3 Calculation process of optimal capacity planning of the wind-photovoltaic-storage hybrid power system

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (32)$$

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (33)$$

式中: x_{ij} 表示容量规划 i 在指标 j 上的指标值; r_{ij}^1 和 r_{ij}^2 为规范化处理后的指标值, r_{ij}^1 为正向指标, 值越大越好, r_{ij}^2 为负向指标, 值越小越好; H_j 为指标 j 的熵; f_{ij} 是对 r_{ij} 按归一化处理后的值; w_j 为熵权。

秩和比法是一种有效的指标评价方法^[26]。该方法通过秩代换得到评价对象的无量纲统计量秩和比, 再结合指标权重得到加权秩和比, 然后通过秩和比值对评价对象的优劣进行排序, 得到评价结果。该方法的步骤如下所述。

1) 编制

由 m 个容量规划方案的 n 个评价指标构成矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times n}$, 然后对指标进行一致化处理, 并根

据指标的正负向对指标编秩, 得到秩矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 计算秩和比值

$$R_{SRi} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n w_j R_{ij} \quad (34)$$

式中: R_{SRi} 为第 i 个规划方案的加权秩和比; w_j 为第 j 个评价指标的权重。

3) 排序评价

根据秩和比值的大小对容量规划方案进行排序并评价。

本文基于容量优化规划模型求解得到的容量规划结果, 利用熵权法定权的秩和比评价方法, 先对指标进行一致化处理, 再由熵权法确定各评价指标的权重, 然后代入秩和比法中, 得到秩和比值进行排序, 从而得到各容量规划方案的评价结果, 评价基本过程如图 4 所示。该评价方法反映客观因素, 同时是对容量规划方案的秩次进行评价, 可消除异常值对评价结果的影响。

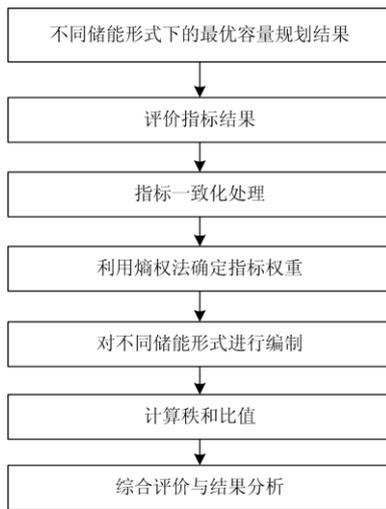


图 4 评价基本过程

Fig. 4 Basic process of evaluation

4 仿真分析

4.1 场景选择

本文选取北纬 $38^{\circ}44'$, 东经 $106^{\circ}0'$ 的地区为参考, 该地区多为山地, 海拔较高, 平均海拔 2 000 m 以上, 满足重力储能建设的条件。由中国气象数据网可知, 该地区平均光照强度为 4.32 kW/m^2 , 每月平均风速如图 5 所示, 在 HOMER 软件^[27]中, 模拟得到该地区风速预测数据和太阳光照强度预测数据, 如图 6 和图 7 所示。本文参照文献^[28]选取典

型日的方法, 选择该地区具有代表性的一天风速及光照强度, 从而得到风力和光伏出力。该地区一日负荷如图 8 所示。

选择风机额定风速为 11 ms , 切入风速为 3 m/s , 切出风速为 20 m/s ^[29], 风机单台容量为 2.5 MW 。选择电池板工作温度为 25°C , 参考温度为 25°C , 功率温度系数为 1, 标准测试条件下(太阳光入射强度 1 kW/m^2 , 环境温度 25°C , 无风)的光照强度为 1 kW/m^2 ^[30]。重力储能中的重物重量为 5 万吨, 坡度为 30° , 重力加速度为 9.8 m/s^2 , 重物下滑过程中的速度为 10 m/s^2 。假设风光储联合发电系统优化规划使用年限为 20 年, 折旧率为 5%。参与对比的

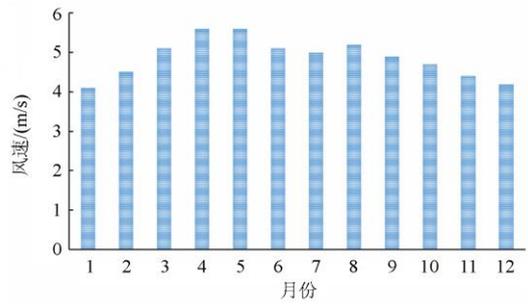


图 5 每月平均风速

Fig. 5 Monthly average wind speed

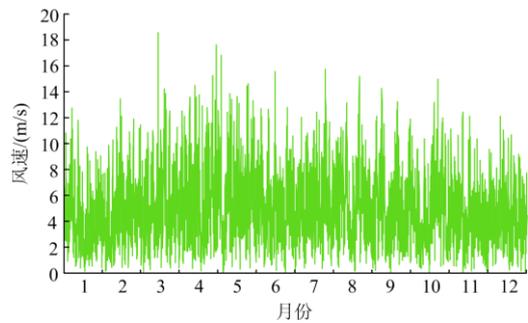


图 6 该地区全年风速预测数据

Fig. 6 Annual wind speed forecast data in the region

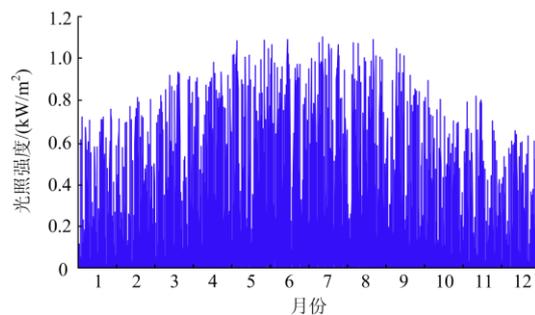


图 7 该地区全年光照强度预测数据

Fig. 7 Annual illumination forecast data in the region

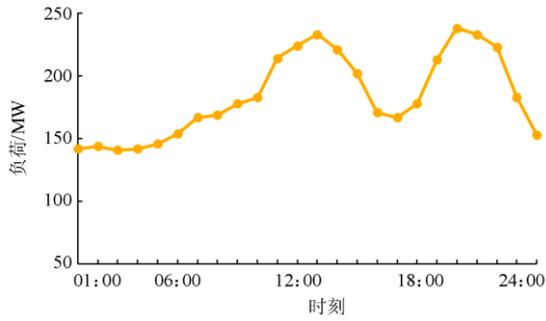


图 8 该地区一日负荷

Fig. 8 Load in one day in the region

蓄电池储能和压缩空气储能分别参见文献[31-32]的数学模型, 风电场、光伏电站、重力储能、蓄电池储能及压缩空气储能的安装成本及运行维护成本如表 1 所示^[33-34], 不同发电方式下各类污染物的环境价值成本如表 2 所示。另外, 电网及系统售电的分时电价^[35]如表 3 所示, 本文选择其中的平时段电价为恒定电价^[36]。

表 1 系统安装成本及运行维护成本

Table 1 System installation costs and operation and maintenance costs

	安装成本/(万元/MW)	运行维护成本/(元/h)
风电场	350.0	3 000
光伏电站	619.5	2 300
重力储能	300.0	1 500
蓄电池储能	300.0	2 000
压缩空气储能	505.0	1 200

表 2 不同发电方式下各类污染物的环境价值成本

Table 2 Costs of environmental values of various pollutants under different power generation modes

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

表 3 电网及风光储联合发电系统售电的分时电价

Table 3 Time-of-use electricity price of power grid and the wind-photovoltaic-storage hybrid power system

时段	价格/(元/MWh)	
	电网	系统售电
峰时段(10:00—15:00, 18:00—21:00)	1 110	1 210
平时段(07:00—10:00, 15:00—18:00, 21:00—23:00)	680	730
谷时段(23:00—07:00)	350	370

4. 2 考虑重力储能时的容量优化规划结果

算例中, 边界条件设置为 $10P_L^{\max} = 2\ 380\ \text{MW}$,

$h_{gs_max} = 1\ 000\ \text{m}$, $D_r = 1$, $f_r = 0.2$ 、 $R_r = 0.5$ 。在分时电价和恒定电价两种场景下, 利用猫群算法对考虑重力储能时的风光储联合发电系统容量优化规划模型进行求解, 得到容量规划结果, 如表 4 所示。不同场景下的风光储联合发电系统的成本如图 9 所示。

表 4 不同场景下考虑重力储能时的容量规划结果

Table 4 Results of capacity planning when considering gravity energy storage at the different scenarios

	风电场/台	光伏电站/MW	储能/MW
分时电价	109	338	95
恒定电价	111	348	91

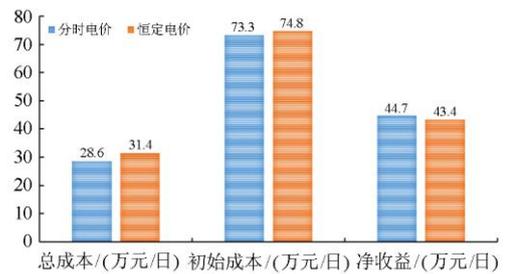


图 9 不同场景下考虑重力储能时的成本

Fig. 9 Cost when considering gravity energy storage at the different scenarios

对比分时电价和恒定电价两个场景下的规划结果, 由表 4 和图 9 可知, 恒定电价场景下的总成本高于分时电价场景下的总成本, 这主要是因为恒定电价场景下的光伏电站容量较大, 而光伏电站的单位容量安装成本高, 导致初始成本、总成本较高。同时, 分时电价场景下的净收益高于恒定电价场景下的净收益, 这主要是因为分时电价场景下, 当电量不足以供给负荷时, 风光储联合发电系统在低电价时选择购电, 即选择储能在低电价时不放电, 而是在高电价时放电, 有效提高了系统的经济性, 体现了电能不同时间下的经济价值。分析可知, 在分时电价场景下, 风光储联合发电系统能在运行年限内最快收回成本。

另外, 不同场景下的风光储联合发电系统的评价指标如图 10 所示。

由图 10 可知, 对于每个指标而言, 在不同场景下, 由于规划容量不同, 导致每时刻风力、光伏出力不同, 从而影响每个指标值的大小。另外, 分时电价场景下的风光互补特性、供电损失率相比恒定电价场景都有所降低, 同时, 分时电价场景下的系统贡献率相比恒定电价场景有所提高。由此可知, 在分时电价场景下, 对储能能量进行合理分配, 优

化了各个指标, 有效提高了风光储联合发电系统的可靠性。

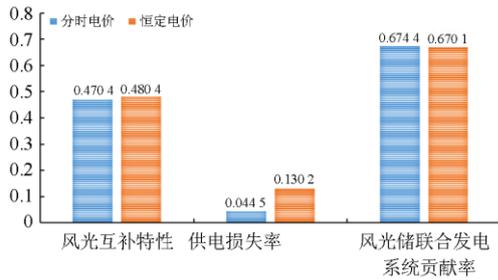
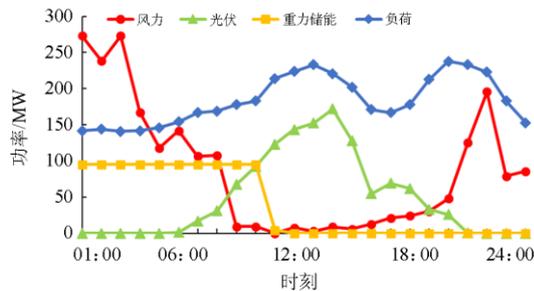


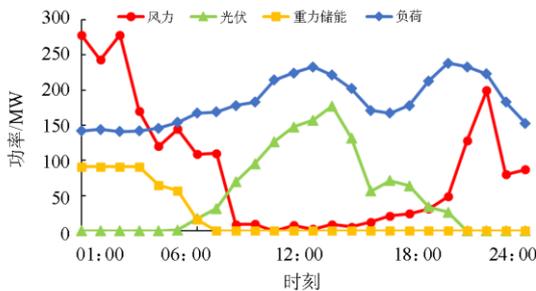
图 10 不同场景下考虑重力储能时的评价指标值

Fig. 10 Evaluation index values when considering gravity energy storage at the different scenarios

不同场景下考虑重力储能时风光储联合发电系统各部分的出力曲线如图 11 所示。由于不同场景下配置的风电场、光伏电站、储能的容量不同, 导致每时刻风力、光伏出力不同, 储能系统在配合时进行储能和放电的电量也不同。由图 11 可知, 恒定电价下的储能系统在风光发电不足时立即放电, 因每时刻的需求不同, 所以每时刻的放电量也均不相同。而在分时电价下, 对于不足的电量系统选择在低电价时向电网购电, 高电价时再利用储能系统放电, 储能放电之后, 由于风光出力不足, 全部用于负荷, 在分时电价下, 一定程度上有效提高了系统的经济性。



(a) 分时电价下的出力曲线



(b) 恒定电价下的出力曲线

图 11 不同场景下考虑重力储能时的出力曲线

Fig. 11 Output power curves when considering gravity energy storage at the different scenarios

总之, 对风光储联合发电系统进行容量优化规划时, 在分时电价场景下, 有效提高了系统的经济性和可靠性, 分时电价场景下的规划结果优于恒定电价场景。

4.3 评价排序及对比

在分时电价场景下, 本文选择与考虑蓄电池储能、压缩空气储能时的规划结果比较, 不同储能形式下的容量规划结果如表 5 所示, 成本如图 12 所示。

表 5 分时电价下考虑不同储能时的容量规划结果

Table 5 Results of capacity planning when considering different energy storage at the time-of-use electricity price

	风电场/台	光伏电站/MW	储能/MW
重力储能	109	338	95
蓄电池储能	118	377	55.44
压缩空气储能	133	418	148

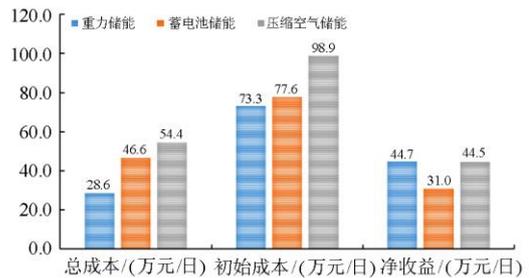


图 12 分时电价下考虑不同储能时的成本

Fig. 12 Cost when considering different energy storage at the time-of-use electricity price

由表 5 的容量规划结果可知, 考虑压缩空气储能时的风电场、光伏电站和储能容量最大, 考虑重力储能时的风电场和光伏电站容量最小, 考虑蓄电池储能时的储能容量最小。考虑不同储能时的规划结果不同, 这主要是因为不同储能形式的荷电状态不同, 在配合风光联合发电系统进行储能和放电时对风电场容量和光伏电站容量的大小有一定的影响。同时, 不同储能形式的安装成本及运行维护成本不同, 会对系统总成本有影响, 从而导致了考虑不同储能形式的规划结果的不同。

另外, 对比图 12 中考虑不同储能时的成本可知, 考虑重力储能时的总成本最小, 考虑压缩空气储能时的总成本最大。由日初始成本及日净收益可知, 考虑重力储能时的系统能在运行年限内最快收回成本, 其次是压缩空气储能, 最后是蓄电池储能。另外, 考虑重力储能时的日净收益最大, 从长远看, 考虑重力储能时的容量规划最优。

分时电价场景下, 不同储能形式的评价指标值如图 13 所示。考虑重力储能时的风光互补特性最

小, 供电损失率最小, 考虑压缩空气储能时的风光储联合发电系统贡献率最大。

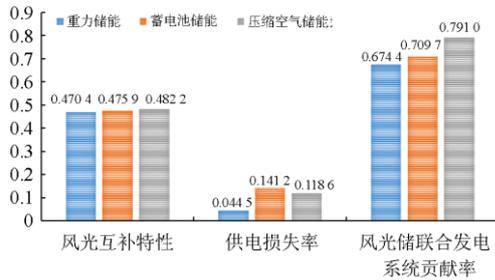


图 13 分时电价下不同储能形式的评价指标值

Fig. 13 Evaluation index values under different energy storage system at the time-of-use electricity price

基于不同储能形式下的评价指标值, 根据第 3 节所述熵权法对 3 个指标的权重进行求取, 其中, 风光储联合发电系统贡献率为正向指标, 风光互补特性、供电损失率为负向指标。得到风光互补特性、供电损失率、风光储联合发电系统贡献率的权重分别为 0.278 9、0.378 1、0.343 0。

基于指标值和权重值, 利用秩和比法进行排序, 首先得到的秩次值如表 6 所示。

表 6 评价指标对应的秩次值

Table 6 Rank values corresponding to the evaluation index

	指标原始值			秩次		
	风光互 补特性	供电 损失率	系统 贡献率	风光互 补特性	供电 损失率	系统 贡献率
重力储能	0.470 4	0.044 5	0.674 4	3	3	1
蓄电池储能	0.475 9	0.141 2	0.709 7	2	1	2
压缩空气储能	0.482 2	0.118 6	0.791 0	1	2	3

从而得到重力储能、蓄电池储能、压缩空气储能的加权秩和比值为 0.771 3、0.540 6、0.688 0, 评分排序为 1、3、2。

因此, 综合考虑分时电价下的成本及评价排序, 考虑重力储能时的容量规划结果最优, 其次是压缩空气储能, 最后是蓄电池储能。综上所述, 基于分时电价场景, 本文所提考虑重力储能的风光储联合发电系统容量优化规划模型具有一定的经济性及其可靠性。

5 结论

本文基于依托山体的重力储能, 建立了以总成本最小为目标的并网型风光储联合发电系统容量优化规划模型, 在分时电价和恒定电价的不同场景下利用猫群算法对模型进行优化。另外, 对考虑不同储能形式时的容量优化规划结果评价排序, 通过分

析结果, 可得如下结论。

1) 对比分时电价和恒定电价场景, 分时电价下考虑重力储能时的总成本最小, 评价指标最优, 有效提高了系统的经济性和可靠性, 体现了电能在不同时间下的经济价值。

2) 对比考虑不同储能形式时的规划结果, 考虑重力储能时的总成本最小, 评价指标最优, 其次是压缩空气储能, 最后是蓄电池储能。因此, 考虑重力储能时的容量优化规划具有一定的经济性及其可靠性。

3) 依托山体的重力储能在西北地区有海拔山体的优势, 在可再生能源发电中进行推广, 可以有效地提高能源利用密度, 提高风电和光伏发电的消纳能力, 推广应用前景广阔。

参考文献

- [1] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shi'en, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] 吴迪, 王佳明, 李晖, 等. 以促进可再生能源消纳为目标的我国西北-西南联网容量与送电时序研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2103-2110.
WU Di, WANG Jiaming, LI Hui, et al. Research on capacity and delivery sequence of interconnected Northwestern-Southwestern power grid towards renewable energy accommodation[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2103-2110.
- [3] INDEO F. ASEAN-EU energy cooperation: sharing best practices to implement renewable energy sources in regional energy grids[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 394-402.
- [4] BLOESS A, SCHILL W, 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, BATHAEE S. 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: 66-71.
- [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.
- [8] 杨珺, 张建成, 桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1209-1216.
YANG Jun, ZHANG Jiancheng, GUI Xun. Capacity optimization of hybrid energy storage system in grid-connected wind and PV power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1209-1216.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] DUFOLOPEZ R, CRISTOBALMONREAL I R, YUSTA J M, et al. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 280-293.
- [12] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved Bacterial Foraging Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [13] BERRADA A, LOUDIYI K. Modeling and material selection for gravity storage using FEA method[C] // International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), November 14-17, 2016, Marrakech, Morocco: 1159-1164.
- [14] 曾蓉. 山体储能技术及其与风电场联合输出的容量配置研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
ZENG Rong. Research on mountain in energy technology and its capacity configuration with wind farm[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [15] HOU H, XU T, WU X, et al. Optimal capacity configuration of the wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage system[J]. Applied Energy, 2020, 271.
- [16] 石玉东, 刘晋源, 徐松, 等. 考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 23-32.
SHI Yudong, LIU Jinyuan, XU Song, et al. Integrated wind-photovoltaic-storage stochastic planning model considering time-varying characteristics in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 23-32.
- [17] MURTY Y, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [18] 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.
- [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.
- [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.
- [21] OROUSKHANI M, OROUSKHANI Y, MANSOURI M, et al. A novel cat swarm optimization algorithm for unconstrained optimization problems[J]. International Journal of Information Technology and Computer Science, 2013, 5(11): 32-41.
- [22] HOU H, XUE M, XU Y, et al. Multiobjective joint economic dispatching of a microgrid with multiple distributed generation[J]. Energies, 2018, 11(12).
- [23] 杨磊, 杨晓辉, 吴越, 等. 基于改进猫群算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 95-100.
YANG Lei, YANG Xiaohui, WU Yue, et al. Research on

- optimized distributed generations locating based on modified cat swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 95-100.
- [24] KUMAR Y, SINGH P. Improved cat swarm optimization algorithm for solving global optimization problems and its application to clustering[J]. Applied Intelligence, 2018, 48(9): 2681-2697.
- [25] 南钰, 宋瑞卿, 陈鹏, 等. 基于改进熵权-灰色关联法的配电网可靠性影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 101-107.
NAN Yu, SONG Ruiqing, CHEN Peng, et al. Study on the factors influencing the reliability analysis in distribution network based on improved entropy weight gray correlation analysis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 101-107.
- [26] 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.
- [27] 赵长龙. 微网运行经济型及 HOMER 软件应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHAO Changlong. Research on economic operation of microgrid and its application using HOMER software[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [28] 丁明, 解蛟龙, 刘新宇, 等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4064-4072.
DING Ming, XIE Jiaolong, LIU Xinyu, et al. The generation method and application of wind resources/load typical scenario set for evaluation of wind power grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4064-4072.
- [29] 孙辉, 徐箭, 孙元章, 等. 考虑风速时空分布及风机运行状态的风电场功率计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 30-38.
SUN Hui, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. A method for wind power calculation considering wind speed spatial and temporal distribution and wind turbine operation status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 30-38.
- [30] 章坚民, 章谦之, 王娜, 等. 光伏电站电能采集系统的发电模型及参数率定[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 22-26.
ZHANG Jianmin, ZHANG Qianzhi, WANG Na, et al. Power generation model and its parameter calibration for grid-connected photovoltaic power plant energy data acquisition and supervisory system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 22-26.
- [31] 雷勇, 林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在不抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 983-992.
LEI Yong, LIN Xiaodong. Application of hybrid energy storage system based on SMES and BESS in smoothing the power fluctuation of wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 983-992.
- [32] 吴晨曦, 陈泽昊, 张杰, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能的风力发电系统成本/供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 62-71.
WU Chenxi, CHEN Zehao, ZHANG Jie, et al. Cost/power supply reliability assessment of wind power generation system considering advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 62-71.
- [33] 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.
- [34] ZHANG J, LI K, WANG M, et al. A bi-level program for the planning of an islanded microgrid including CAES[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 2768-2777.
- [35] LI J, NIU D, WU M, et al. Research on battery energy storage as backup power in the operation optimization of a regional integrated energy system[J]. Energies, 2018, 11(11).
- [36] 刘继东, 韩学山, 韩伟吉, 等. 分时电价下用户响应行为的模型与算法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2973-2978.
LIU Jidong, HAN Xueshan, HAN Weiji, et al. Model and algorithm of customers' responsive behavior under time-of-use price[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2973-2978.

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-19

作者简介:

侯慧(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为能源互联网; E-mail: husthou@126.com

徐焘(1995—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为能源互联网; E-mail: 1768871679@qq.com

肖振锋(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网智能化及电力通信网络规划。E-mail: zf_xiao@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)