

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200379

含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究

方保民¹, 李红志¹, 孔祥鹏¹, 杨永标²

(1. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810008; 2. 东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要: 由于光伏出力的不稳定性, 在包含高比例光伏出力的区域, 需要配置储能设备才能实现能源供需平衡。为实现长期经济效益最大化, 应分析含高比例光伏出力区域的分布式储能优化方法, 设计分布式储能的选址和容量分配方案。首先, 针对光伏出力的间歇性, 从电量出发, 利用改进的快速排序算法建立了特征光伏曲线的选择算法。其次, 利用 FCM 模糊聚类算法, 设计了用能曲线的选择算法。分析选择的曲线, 得到每个用户的特征电量。以特征电量和成本为依据, 得出了储能站的位置选择和容量关联方程。再次, 采用贪心算法的基本思路对方程进行求解, 得到了最优的储能配置方程。对方程进行优化, 可以将储能的容量分配至不同的用户。此外, 还考虑了未来因素对储能配置的影响。最后, 为了验证算法的有效性, 以某工业园区的数据为依据进行了实验分析, 取得了较好的效果。

关键词: 光伏; 储能; 快速排序; 模糊聚类; 贪心算法

Research on long-term distributed energy storage configuration with a high proportion of photovoltaic output

FANG Baomin¹, LI Hongzhi¹, KONG Xiangpeng¹, YANG Yongbiao²

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China; 2. Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Because of the instability of photovoltaic output, energy storage equipment is required in an area containing a high proportion of photovoltaic output to achieve the balance of energy supply and demand. In order to maximize long-term economic benefits, an optimization method of distributed energy storage with high proportion of photovoltaic output area should be analyzed, and the site selection and capacity allocation scheme of distributed energy storage should be designed. First, in view of the intermittence of photovoltaic output, an algorithm for selecting characteristic photovoltaic curves is established based on an improved rapid sorting algorithm. Secondly, the selection algorithm of the energy curve is designed using an FCM fuzzy clustering algorithm. The selected curve is analyzed to get the characteristic electric quantity of each user. Based on the characteristic power and cost, the position selection and capacity equation of the energy storage station are obtained. Thirdly, the basic idea of a greedy algorithm is adopted to solve the equation, and the optimal energy storage configuration equation is obtained. By optimizing the equation, the energy storage capacity can be allocated to different users. In addition, the influence of future factors on the energy storage configuration is also considered. Finally, in order to verify the effectiveness of the algorithm, the experimental analysis is carried out based on the data of an industrial park, and good results are obtained.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877044).

Key words: photovoltaic (PV); energy storage; quick sort; fuzzy clustering; greedy algorithm

0 引言

近年来, 光伏产业发展迅速, 光伏发电占总发电量的比重越来越高^[1]。特别是在西北地区, 光伏

产业已经成为西电东送的重要来源^[2]。《关于十三五光伏扶贫计划编制有关事项的通知》表明, 光伏也已成为扶贫的重要手段^[3]。国家能源局的统计数据 displays, 2019年, 光伏发电 2 243 亿 kWh, 同比增长 26.3%。发展的同时光伏产业却面临越来越多的问题。2019年, 全国弃光电量高达 46 亿 kWh, 弃光

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877044)

率为 2%。其中,以青海为例,由于大幅增加新能源装机容量、全省负荷下降等多重因素,弃光率上升到 7.2%,同比提高了 2.5 个百分点。因此,提升光伏能源消纳比例是发展光伏产业的一个重点^[4-5]。

实现光伏就地消纳是降低弃光率的一个重要手段^[6-7]。由于光伏发电的周期性,它不可能与用能的增减完全一致。因此,需要增加储能设备,以实现就地消纳^[8-9]。储能设备的选址、充电容量的选择、储能设备的数量,是储能设备设计的关键。

在已有的储能设计中,主要包括微网级别的储能研究^[10]以及大规模分布式范围的储能研究^[11]。

在微网级别的储能研究方面,文献[12]以连续稳定供电为目标,考察了蓄电池和氢能的电能转化效率和成本,将功率变换器与直流总线相连,设计了各元件的控制策略和微网协调控制策略。文献[13]针对包含光伏-储能的微网系统,提出了光伏电池阵列、并网逆变器、储能装置充放电系统、储能系统容量规划、微网电网结构等微网系统各方面的设计思路。文献[14]实现了物理信息模型的建模,利用该模型,考虑了光伏、储能电池等因素,通过仿真完成了光伏储能协调控制的信息建模。

在大规模分布式范围的储能研究方面,文献[15]提出了三类运行模式:整体运行模式、储能旁路模式、储能独立运行模式。文献[16]从虚拟电厂的思路出发,构建了经济、网供和电压子目标函数,从而设计了储能系统的优化配置模型。通过对函数和模型的求解,得出了最优储能系统配置模式。文献[17]分析了光伏接入的成本和收益,将一、二次调频控制与可靠性评估相结合,建立了动态可靠性指标,并以山西大同 100 MW 光伏为对象,研究了光伏电站的储能容量和充放电功率。

国外的研究更侧重算法层面。文献[18]采用模糊逻辑控制的方法,跟踪功率及其对应的电压,调整步长得到算法所需的最佳增量,从而获得最佳工作电压,并进一步得出了最大功率。文献[19]设计了一种基于电池储能系统的光伏并网电站,构建了相应的技术经济模型(PV-BES 系统),通过对约束条件的求解,实现了经济最优的储能方案设计。文献[20]提出了住宅光伏能源系统的最优规模和生命周期评价方法。该方法采用五参数解析 PV 电池模型,计算各模块的产能,在土耳其得到了应用。

以上工作从经济性、可靠性等多个层面分析了在光伏系统中设置储能设备的方法。但是,对于清洁能源基本能够自给的省份^[21],已有的研究普遍存在以下几点不足:(1)潮流计算的复杂性使得以长期的数据为依据设计配置方案的难度极大^[22];(2)多数

算法局限于单一的储能站设计^[23],没有把区域内的分布式储能站作为整体进行分析;(3)合理地选择储能电站的位置可以降低线损^[24],已有的多数研究并未涉及该问题;(4)过去的研究主要集中在系统级别^[25],对区域级别的研究较少,限制了光伏等可再生能源的使用范围;(5)没有考虑经济的发展状况,导致储能设备的配置算法在建设期是最优方案,而一段时间后,会显现出一定的滞后性。上述问题的解决需要大量的计算。而高性能计算机的发展,为上述问题的解决提供了契机。

本文首先对光伏和用能曲线进行了建模,对储能设备的选址进行了分析,然后设计了储能设备的容量选择算法,最后加入了对未来因素的考量。本文算法以某工业园区为对象进行了模拟,验证了算法的有效性。

1 用户特征建模

1.1 典型光伏出力曲线的选择

光伏出力在不同的季节有着不同的规律。如果对全年的数据,甚至此前多年的光伏数据进行全部的分析,将会造成维数灾难^[26]。因此,需要选取有代表性的曲线进行分析。

一种直观的思路是选择春分、夏至、秋分和冬至的曲线进行分析。但是,如果这几日恰好遇到阴雨天,则光伏数据不具备足够的代表性。因此,更为稳妥的方式是计算每一日的总发电量,以总发电量作为选择光伏曲线的依据。

为了使数据具备代表性,计划采用最高日发电量、最低日发电量、前 $\frac{1}{4}$ 位置、 $\frac{1}{2}$ 位置以及 $\frac{3}{4}$ 位置的发电量所对应的曲线,作为策略优化的数据依据。上述五个位置在本文中称为目标位置。

上述曲线的选取涉及到了发电量的排序。为了快速找出上述特殊位置的发电量,采用改进的快速排序算法(quick sort)^[27]。设 E_i 表示第 i 日的发电量。这样,样本的数据集是 $\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, 下面描述排序算法。

(1) 选择 E_1 , 依次比较 E_2, \dots, E_n 。大于 E_1 的数据放在左边,小于 E_1 的数据放在右边。

(2) 如果 E_1 恰好位于目标位置,则计入输出结果。

(3) 如果输出结果尚未包含五个目标位置,那么在包含目标位置的区间,选择第一个元素,重复步骤(1)、步骤(2)。

(4) 如果五个位置都包含,则结束计算,得出代表位置的曲线。

图1为算法流程图。算法复杂度为 $O(n \log n)$, 可以采用并行计算提高程序效率。

选择五个目标位置所对应的曲线, 以此作为特征曲线。

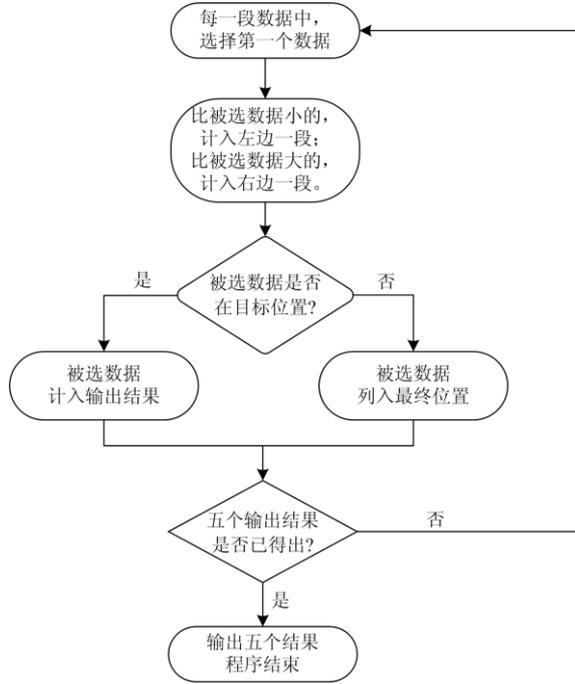


图1 典型光伏出力曲线选择算法流程图

Fig. 1 Flow chart of typical photovoltaic output curve selection algorithm

1.2 用能曲线的选择

对于光伏曲线而言, 每日的出力曲线都是白天高、夜晚低, 曲线具有极大的相似性。通过总发电量来选择出力曲线有很高的可靠性。

但是对于居民、工业、商业、公共机构等不同的部门而言, 用能曲线的形态有非常大的不同。即使是用电量相同的两个用户, 用能曲线也可能截然不同。因此, 应当采用不同于光伏用户的曲线选择算法。

在已有的算法中提取曲线特征——聚类的思想^[28], 给本文带来了启示。

首先, 对用户每一日的总负荷曲线作傅里叶变换。

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n) \cos \frac{2kn\pi}{N}, k \in \mathbf{Z} \\ b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n) \sin \frac{2kn\pi}{N}, k \in \mathbf{Z} \\ p(n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \frac{2kn\pi}{N} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \frac{2kn\pi}{N} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 表示当日采样次数的序号; $p(n)$ 表示第 n 次

采样的负荷; N 指当日总的采样次数; a_k 、 b_k 表示傅里叶系数。从公式可以看出, a_0 与平均负荷密切相关。 a_1 、 b_1 共同表示尖峰负荷出现的时间点以及负荷大小。 a_2 、 b_2 共同可以对次高峰进行修正。一般来说, 一个用户单日的用电高峰不会超过两次, 因此选择前 5 个傅里叶级数分量作为聚类的特征是足够的。特征可表示为

$$\mathbf{C} = (a_0, a_1, a_2, b_1, b_2) \quad (2)$$

将式(2)中的特征提取出来, 采用欧氏距离的方式计算曲线与曲线之间距离。利用 FCM 模糊聚类算法将曲线分为五类。每一类中距离聚类中心最近的那条曲线为该用户的特征曲线。

1.3 各用户特征电量的提取

在本文中, 用户泛指含光伏设备的用户以及只包含用能设备的用户。

对每个用户已经提取的 5 条曲线进行进一步的分析。由于默认光伏发电量与用户总用能基本是持平的, 因此假设当日的平均负荷为 \bar{P} 。只关注负荷曲线(出力曲线)中高于 \bar{P} 的部分。 $\tilde{p}(n)$ 表示用能曲线(出力曲线)中高于 \bar{P} 的部分。对 $\tilde{p}(n)$ 求和可以得到特征用电量(特征发电量) Q , 具体计算公式为

$$\begin{cases} \tilde{p}(n) = \begin{cases} 0, & \text{if } p(n) \leq \bar{P} \\ p(n) - \bar{P}, & \text{if } p(n) > \bar{P} \end{cases} \\ Q = \sum_{n=1}^N (\tilde{p}(n) \Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

按照式(3)计算每条曲线, 然后将该用户五条曲线的 Q 相加, 即该用户的特征用电量(特征发电量)。

2 储能设备选址分析

一般来说, 储能的约束条件主要包括电压约束、功率平衡约束、储能性能约束等几个方面^[29]。储能优化的目标包括有功费用最低、无功费用最低、无功补偿费用最低、有功网损最小、电压偏差最小等。其中网损最小是最为重要的优化目标。

过去计算网损是通过分析潮流得到的。但是区域内用户的负荷变化极大, 地点不确定, 给潮流分析带来了极大的困难。

通过前面的分析, 考虑有代表性的时刻, 可以把线损分析简化为线性的计算^[30]。假设有 s 个光伏设备的用户, t 个用能设备的用户。为了简化分析, 对于任意光伏设备用户和用能用户之间, 取过去一年内的最高的线损率。经过网架传输电能的线损率, 可以用式(4)的 $s \times t$ 阶矩阵表示。

$$M_{pts} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1s} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{t1} & p_{t2} & \cdots & p_{ts} \end{pmatrix} \quad (4)$$

假设区域内有 r 个候选的储能设备安置地点, 那么矩阵(4)可以进一步扩充为

$$M_{ptr} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1s} & \cdots & p_{1(s+r)} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2s} & \cdots & p_{2(s+r)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{t1} & p_{t2} & \cdots & p_{ts} & \cdots & p_{t(s+r)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{(t+r)1} & p_{(t+r)2} & \cdots & p_{(t+r)s} & \cdots & p_{(t+r)(s+r)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

考虑到储能不可能向储能送电, 因此矩阵(5)中右下角的 $r \times r$ 部分可以把其中的元素都置为 0。这样, 设有 l 个储能设备 ($l \leq r$), 那么储能设备的充电电量依次设为 $Q_{s1}, Q_{s2}, \dots, Q_{sl}$ 。

那么, 最优的储能部署方案变为对式(6)方程的求解^[31]。

$$\begin{cases} \min T = cl + \sum_{n=1}^s pQ_{pn} p_{rn} + \sum_{n=1}^l pQ_{cn} p_{nr} \\ \sum_{n=1}^l Q_{sn} \geq \sum_{n=1}^s Q_{pn} \\ \sum_{n=1}^l Q_{sn} \geq \sum_{n=1}^l Q_{cn} \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 是当前方案的总成本; c 是维护一个储能设备一天所需要的成本; p 是电价; Q_{pn} 是第 n 个光伏用户的特征发电量; Q_{cn} 是第 n 个用能设备用户的特征发电量; p_{rn} (或 p_{nr}) 指第 n 个光伏用户 (或用能用户) 与最近的储能设备之间电力传输的线损率。

从方程的形式看 p_{rn} 与 p_{nr} 相对独立。但在确认储能设备的位置后, 两者的具体数值就确认了。

上述方程组中, 第一个方程是对当前方案中成本的计算, 这包含了线损和企业的运维等因素。第二个方程是刻画光伏用户的供电平衡性。第三个方程是刻画用能用户的电力消费平衡性。

除了线损, 还需要考虑各节点的电压约束、有功潮流约束、无功约束。

电压约束条件为

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (7)$$

式中: V_i 表示节点 i 的电压; \underline{V}_i 、 \bar{V}_i 分别表示电压的下限和上限。一般电路只允许正常值 $\pm 7\%$ 的波动。

有功潮流约束条件为

$$P_{GK} = P_{LK} - P_{PVK} + \eta P_{BK} \quad (8)$$

式中: P_{GK} 是第 K 个节点的交互功率; P_{LK} 是第 K 个节点的负荷功率; P_{PVK} 是第 K 个节点的电源输出功率; η 是储能系统的充放电效率; P_{BK} 是第 K 个节点的储能系统充放电功率。

将式(7)、式(8)列入式(6)的约束条件组成新的方程组。下面对该方程组求解, 采用贪心算法寻找最优组合, 具体步骤如下。

- (1) 选择第 1 个候选地点, 将所有储能所需容量分配给该地点, 计算成本 T 。
 - (2) 选择第 2 个候选地点, 查找与其最近的用户。将该用户的 Q 分配给新的地点, 计算新的成本 T 。
 - (3) 如果 T 减少, 则继续增加第 2 个候选地点的容量。如果 T 增加或不变, 则维持步骤(1)的方案。
 - (4) 按照步骤(2)、步骤(3), 遍历所有候选地点。
 - (5) 遍历结束, 得到最优储能分配方案。
- 具体的流程如图 2 所示。

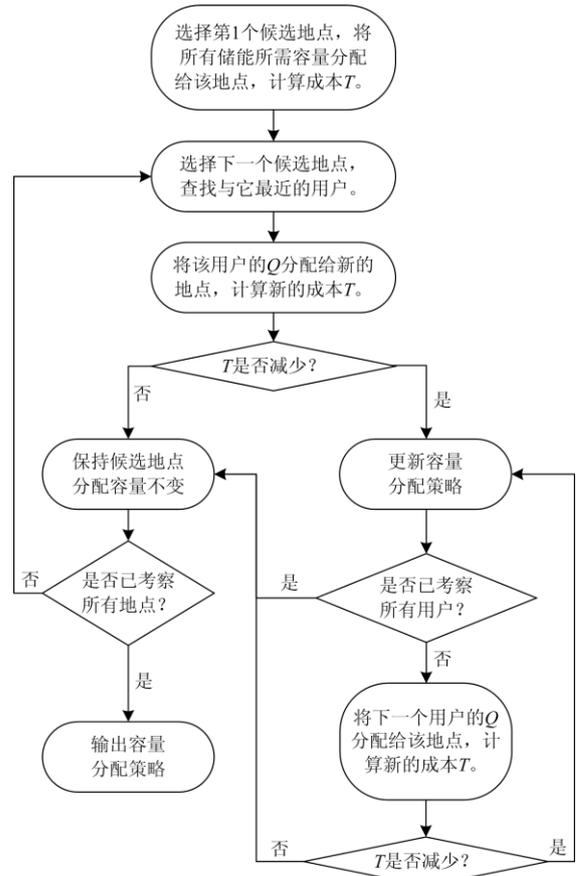


图 2 容量分配策略算法流程图

Fig. 2 Capacity allocation strategy algorithm flow chart

上述算法可以得出方程组(6)–(8)的解, 即最优的储能配置方案。步骤(4)会使计算量显著增加, 算法复杂度达到了 $O(2^n)$ 。但在实际应用场景中, 受产权、政策、经济等各方面的影响, 储能设备的候选建设地点不多, 通常不超过 5 个。而且本文算法仅在储能设计时使用, 不会长期运行。因此上述算法的实际计算时间在可接受的范围。

3 储能设备容量分析

式(6)的第 1 个方程中, 默认每个用户只给一个储能设备供给多余的电能, 或者只从一个储能设备获取能量。但在实际的场景中, 光伏设备的电量可能供给了多个储能, 同一个储能设备可能向不同的用能设备供给电量。因此, 需要考虑储能容量拆分的情况。

另外, 储能设备本身会导致能量的损失, 即输入的电能大于输出的电能。为了便于分析, 设储能的保持率为 L , 式(6)就转化为式(9)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min T = cl + \sum_{n=1}^s \sum_{\tau=t+1}^{t+l} pQ_{prn} p_{\tau n} + \sum_{n=1}^t \sum_{\tau=s+1}^{s+l} pQ_{cnr} p_{nr} \\ Q_{pm} = \sum_{\tau=t+1}^{t+l} Q_{prn} \\ Q_{cn} = \sum_{\tau=s+1}^{s+l} Q_{cnr} \\ \sum_{n=1}^l Q_{sn} \geq \sum_{n=1}^s Q_{pm} \\ \sum_{n=1}^l LQ_{sn} \geq \sum_{n=1}^t Q_{cn} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中: Q_{prn} 是第 n 个光伏设备用户所对应的第 τ 个储能设备的特征电量; Q_{cnr} 是第 n 个用能用户所对应的第 τ 个储能设备的特征电量。为了求解上述公式, 仍然采用贪心算法, 但对第 2 节步骤(2)略作调整。由管理员定义每次分配的步长 Δ , 每次循环按照 Δ 进行增减。

4 考虑未来因素的储能设计

储能策略的设计不能仅仅考虑当下, 还需要考虑未来的变化, 这主要包括几个方面。

(1) 储能设备的容量会随着使用时间的增加而逐渐减少。

(2) 我国经济处于上升期, 用能用户的用电量会逐年增加。

(3) 目前光伏产业发展迅速, 光伏发电量也将逐年增加。

为了解决上述问题, 首先预测未来若干年的电力数据, 以预测的电力数据作为储能设备的建设依据。在简易的情况下, 可以一次性完成储能设备的建设。在保守的情况下, 可以首先按照当前方案建设储能设备, 在用户发生新增后, 适当增加储能设备。

5 算法在某工业园区的实例分析

为了验证本文算法, 选择某工业园区及其附近居民用户作为对象进行计算。2019 年, 区域内用光伏用户 5 家, 年光伏发电量为 1.754 亿 kWh, 园区内有有用能用户 142 家。如图 3 所示, 居民用户 94 家, 商业用户 42 家, 工业用户 6 家。园区内仅有一个储能站, 容量为 352.2 MWh。

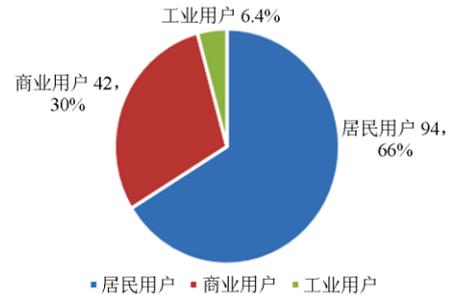


图 3 不同用户类型的分布情况

Fig. 3 Distribution of different user types

为了验证算法的有效性, 首先依据历史电力数据, 测算各个光伏设备与电力用户之间的线损率, 得出式(5)的矩阵图。备选的可建储能站的区域有 5 个, 具体可表示为

$$M_s = \begin{pmatrix} 5.64 & 4.78 & 5.12 & 5.87 & 6.41 \\ 5.14 & 4.98 & 6.01 & 4.87 & 5.34 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 5.11 & 4.88 & 6.88 & 5.55 & 5.34 \end{pmatrix} \quad (10)$$

如式(10)所示, 横向为 5 家光伏用户, 纵向为 142 家用能用户, 该公式是 5×142 阶的矩阵。

候选的储能设备安装地点有 5 处, 计算 5 处地点与其他各用户的线损率, 可以将式(10)扩展为 10×147 阶的矩阵, 具体如式(11)所示。

$$M_L = \begin{pmatrix} 5.64 & 4.78 & 5.12 & 5.87 & 6.41 & 5.15 & 6.89 & 4.33 & 5.88 & 5.13 \\ 5.14 & 4.98 & 6.01 & 4.87 & 5.34 & 5.12 & 5.33 & 5.64 & 6.22 & 5.11 \\ \vdots & \vdots \\ 5.11 & 4.88 & 6.88 & 5.55 & 5.34 & 4.66 & 5.33 & 5.10 & 5.99 & 6.10 \\ 4.30 & 6.52 & 5.44 & 6.20 & 5.33 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4.89 & 5.20 & 5.55 & 5.94 & 5.12 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (11)$$

2018年已经累积了一年的数据,对于光伏用户参考 1.1 节的方法进行计算。首先根据每日总发电量查找特殊位置的发电量值。以某光伏小区为例,发现最高发电量为 28.3 万 kWh, 最小发电量为 1.9 万 kWh, 另外三个目标位置的发电量是 11.5 万 kWh、18.6 万 kWh、24.6 万 kWh。

对于用能用户,参考 1.2 节的方法进行计算。本质上该算法是一种聚类算法。

如图 4 所示,以园区附近某加气站为例,选择特征的前两项作散点图(另外的三项仍然分析,但不在图中体现)。可以看出,以红点为聚类中心形成了五类,这五类就是该加气站的目标位置。

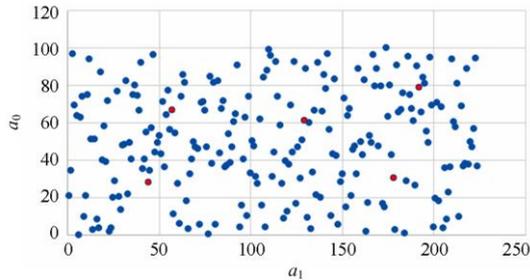


图 4 出力曲线特征表示
Fig. 4 Distribution of different user types

以目标位置的曲线为基础得到特征用电量。最后结合式(11)可以得到方程组(式(6))。不同的储能方式储能效率差别很大,这里取一般值,设 L 为 0.8^[32]。

按照第 3 节的算法分析,利用贪心算法,可以求解方程组,具体如下。

(1) 首先选定第 1 个候选储能站。第 1 个储能站按照满足所有供能和用能的需求建设,结合式(11)得到成本为

$$T = 3429 + 0.6 \times (0.0515 \times 232 + 0.0512 \times 184 + \dots + 0.0466 \times 424 + 0.043 \times 3342 + 0.0652 \times 4274 + 0.0544 \times 3492 + 0.062 \times 2583 + 0.0533 \times 2573) = 109853.42 \quad (12)$$

(2) 选择第 1、2 个候选储能站,根据式(11),第 2 个储能站的最低费率是第 4 个用能用户和第 3

个光伏用户。

$$T = 3429 \times 2 + 0.6 \times (0.0515 \times 232 + 0.0512 \times 184 + \dots + 0.0466 \times 424 + 0.043 \times 3342 + 0.0482 \times 4274 + 0.0544 \times 3492 + 0.062 \times 2583 + 0.0533 \times 2573) = 102463.87 \quad (13)$$

观察第(1)、第(2)步可以看出,第(2)步费用更低,因此选择第 1、2 个候选储能站。

利用贪心算法的原理继续重复上述过程。

最后得出应该在第 1、2、4 候选位置建立储能站。

由此建立方程(9)求解该方程,可以得到第 1、2、4 号储能站的容量分别为 232 MWh、321 MWh、128 MWh。

以秋季某日数据为例,3 个位置的充放电如图 5 所示。负数表示放电,正数是充电。白天时光伏发电量减去用户用电量,剩余的电量存储在储能设备中。中午时储能功率达到最高值。日落前夕开始放电,夜间 21:00—22:00 达到放电高峰。充放电基本维持平衡。

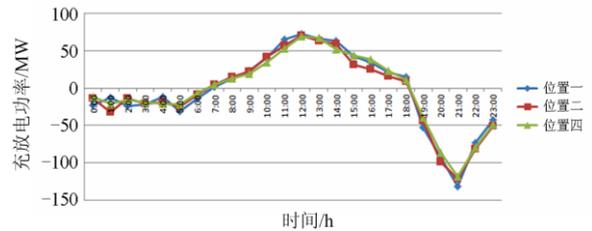


图 5 储能的充放电示意图
Fig. 5 Schematic diagram of charge and discharge of energy storage

为了进一步考察本文算法的效果,在上述场景中采用通常的优化算法作为对比。目前,比较常见的储能优化算法是针对单一的储能系统^[33],选择合适的储能类型配置方案,综合经济性和储能效率,实现储能的优化。

针对本文的场景,按照通常的算法,需要建设

一个储能电站, 具体如表 1 所示。

表 1 储能电站建设方案对比
Table 1 Comparison of energy storage power station construction plan

指标	已建方案	本文算法	已有算法
储能电站数量	1	3	1
储能电站总容量/MWh	352.2	681	712
是否能够消纳所有光伏	否	是	是
是否能够实现能源自给	否	是	是
经济成本/万元	243	543(估算)	623(估算)
年经济收益/万元	456	846(估算)	732(估算)

从表 1 可以看出, 在当前方案下只建设一个储能电站, 这种方案不能完全消纳光伏发出的电量。虽然造价较低, 但由于电量的损失, 每年的经济收益也很低。因此, 从长期看经济性上不如本文算法收益高。对于通常的储能优化算法, 一般只建设一个储能电站, 通过不同的储能类型配比实现优化。这种优化思路能够实现光伏的完全消纳。长期看, 也优于已建设的方案。但是, 经济成本高于本文算法, 年经济效益低于本文算法。

因此, 本文算法提出了较为理想的储能优化思路。

6 结论

本文分析了含高比例光伏出力区域的储能建设方法。针对光伏出力的间歇性, 首先利用改进的快速排序算法设计了特征光伏曲线的选择算法。以特征电量和成本为依据, 得出了储能电站的位置选择和容量关联方程。然后采用贪心算法的基本思路对方程进行求解, 可以得到最优的储能配置方程。结合优化后的方程可以将储能的容量分配至不同的用户。最后, 为了验证算法的有效性, 以某工业园区的数据为依据进行了实例分析。分析发现, 在经济成本上, 新方案比传统方案的投资减少 12.8%; 在年经济收益上, 新方案比传统方案增加 15.6%, 新方案明显优于传统方案。

未来, 可以从以下方面做进一步的研究。

- 1) 在面对大量候选区域时, 本文贪心算法的思路效率较低, 是否存在更高效的算法。
- 2) 在考虑未来因素时, 算法还不够精确。
- 3) 第 3 节中的步长 Δ 是否有较为科学的选择依据。

上述问题需要更优的解决方案。

参考文献

- [1] 刘德旭, 刘艳, 潘永旗, 等. 基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 64-71.
LIU Dexu, LIU Yan, PAN Yongqi, et al. Research on power balance model based on priority consumption of renewable energy power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 64-71.
- [2] 高晓帆, 田书, 常永强. 一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 26-32.
GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A novel stability analysis method for large-scale photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 26-32.
- [3] 薛振宇, 益西措姆, 李敬如, 等. 扶贫光伏发电典型接入方式及经济效益评估[J]. 供用电, 2019, 36(4): 79-85.
XUE Zhenyu, YIXI Cuomu, LI Jingru, et al. The typical access mode and economic benefit evaluation of photovoltaic generation for poverty alleviation[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 79-85.
- [4] 吴峰, 张涵. 用户光伏发电储能优化配置研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 1-6.
WU Feng, ZHANG Han. Study on optimization configuration of energy storage for photovoltaic power generation[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 1-6.
- [5] 李新航, 饶淑玲. 中国弃风弃光问题原因分析及对策与建议[J]. 上海节能, 2019(9): 719-723.
LI Xinhang, RAO Shuling. Cause analysis and countermeasures of wind and photovoltaic curtailment in China[J]. Shanghai Energy Conservation, 2019(9): 719-723.
- [6] 林亭君, 董拓, 戴立森, 等. 一种基于通道限制模型的风光互补算法及其应用[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 22-26.
LIN Tingjun, DONG Tuo, DAI Lisen, et al. Application of wind-PV hybrid algorithm based on channel restriction model[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 22-26.
- [7] 路亮, 丁坤, 周识远, 等. 集中式光伏弃光分析及应对措施[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 38-42.
LU Liang, DING Kun, ZHOU Shiyuan, et al. Solar curtailment of centralized PV station and its countermeasures[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 38-42.
- [8] 王冬, 杨永标, 颜盛军, 等. 智慧园区多能源系统间的管控指令协作机制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 21-26.
WANG Dong, YANG Yongbiao, YAN Shengjun, et al. Collaboration mechanism of management and control

- instructions among multiple energy systems of intelligent park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 21-26.
- [9] 王敏骁, 苏娟, 梁琛. 西北大规模新能源消纳问题成因分析及综合应对策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10): 124-128.
WANG Xiaomin, SU Juan, LIANG Chen. Research on cause analysis and coping strategies on consumption of large scale renewable in northwest China[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(10): 124-128.
- [10] MURTY V V S N, 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.
- [11] 王威, 李润秋, 张鹭, 等. 计及多类型电储能的综合能源系统优化运行对比分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 110-116, 123.
WANG Wei, LI Runqiu, ZHANG Lu, et al. Comparative analysis and research on optimal operation of the integrated energy system considering multi-type electrical storage[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 110-116, 123.
- [12] 李春华, 朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 39-46.
LI Chunhua, ZHU Xinjian. Dynamic modeling and simulation of hybrid energy storage-based photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 39-46.
- [13] 张洋, 李强, 李朝晖, 等. 光伏-储能联合微网系统工程方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 212-214.
ZHANG Yang, LI Qiang, LI Zhaohui, et al. Conceptual design for the project of microgrid system interconnected with photovoltaic generation & energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 212-214.
- [14] 曾俸颖, 刘东. 光伏储能协调控制的信息物理融合建模研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1506-1513.
ZENG Zhuoying, LIU Dong. Study on cyber-physical system modeling on coordinated control of photovoltaic generation and battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1506-1513.
- [15] 梁亮, 李建林, 惠东. 光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 20-23.
LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Operating modes of photovoltaic/energy-storage hybrid system and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 20-23.
- [16] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 66-74.
WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 66-74.
- [17] 梁琛, 王鹏, 韩肖清, 等. 计及系统动态可靠性评估的光伏电站储能经济配置[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2639-2646.
LIANG Chen, WANG Peng, HAN Xiaoqing, et al. Economic selection of energy storage system for PV station considering dynamic reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2639-2646.
- [18] LALOUNI S, REKIOUA D, REKIOUA T, et al. Fuzzy logic control of stand-alone photovoltaic system with battery storage[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(2): 899-907.
- [19] BORTOLINI M, GAMBERI M, GRAZIANI A. Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system[J]. Energy Conversion & Management, 2014(86): 81-92.
- [20] CELIK A N, MUNEER T, CLARKE P. Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage[J]. The Prostate, 2008, 16(1): 69-85.
- [21] 田旭, 张祥成, 白左霞, 等. 青海省水电与光伏互补特性分析与效果评价[J]. 电力建设, 2015, 36(10): 67-72.
TIAN Xu, ZHANG Xiangcheng, BAI Zuoxia, et al. Characteristic analysis and effect evaluation of synergy between hydropower and photovoltaic power in Qinghai province[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10): 67-72.
- [22] 刘小寨, 徐天, 葛立坤, 等. 含风电场的电网储能系统选址和优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 119-125.
LIU Xiaozhai, XU Tian, GE Likun, et al. Location selection and optimal allocation for energy storage system of power system with wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 119-125.
- [23] 刘婷, 李勇, 姜利, 等. 考虑充电时间和容量的锂离子电池充电优化策略[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(3): 5-10.
LIU Ting, LI Yong, JIANG Li, et al. Charging optimization of Li-ion batteries based on charging time and capacity[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(3): 5-10.

- [24] 张伏生, 李燕雷, 汪鸿. 电网线损理论计算与分析系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 21-25.
ZHANG Fusheng, LI Yanlei, WANG Hong. The theoretical energy loss calculation & analysis system for electric network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2002, 14(4): 19-23.
- [25] 刘练, 李林, 丁明, 等. 面向园区的光储型微电网设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 171-179.
LIU Lian, LI Lin, DING Ming, et al. Design and application of photovoltaic and energy storage microgrid for the park[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 171-179.
- [26] 薄树奎, 李盛阳, 朱重光, 等. 基于统计学的最近邻查询中维数灾难的研究[J]. 计算机工程, 2006, 32(21): 6-8.
BO Shukui, LI Shengyang, ZHU Chongguang, et al. Study on dimensionality curse in the nearest neighbor queries based on statistics[J]. Computer Engineering, 2006, 32(21): 6-8.
- [27] 刘海涛, 孙元章, 程林, 等. 计及多状态元件模型的系统状态快速排序技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 16-21.
LIU Haitao, SUN Yuanzhang, CHENG Lin, et al. Fast sorting technique considering multi-state component models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 16-21.
- [28] 王冬, 王拓, 王旗, 等. 一种面向需求响应资源的模糊聚类算法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4056-4063.
WANG Dong, WANG Tuo, WANG Qi, et al. A fuzzy C-means clustering algorithm for demand-side response resource[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4056-4063.
- [29] 吴峰, 黄绮彦, 史林军, 等. 考虑优化充放电策略的分布式储能容量配置方法[J]. 供用电, 2019, 36(5): 91-98.
WU Feng, HUANG Qiyang, SHI Linjun, et al. Distributed energy storage system capacity configuration considering optimized charging and disturbing strategy[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 91-98.
- [30] 牛焕娜, 杨明皓, 井天军, 等. 农村主动型配电网优化调度线性模型与算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 198-205.
NIU Huanna, YANG Minghao, JING Tianjun, et al. Linear optimal operation model and algorithm for active distribution network in rural area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 198-205.
- [31] 周楠. 计及需求响应的用户侧光伏微电网储能配置方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
ZHOU Nan. Optimal method for battery storage configuration in PV-based microgrid considering demand response[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [32] 丁逸行, 徐青山, 吕亚娟, 等. 考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1179-1186.
DING Yixing, XU Qingshan, LÜ Yajuan, et al. Optimal configuration of user-side energy storage considering power demand management[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1179-1186.
- [33] DVORKIN Y, FERNANDEZ-BLANCO R, KIRSCHEN D S, et al. Ensuring profitability of energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(1): 611-623.

收稿日期: 2020-04-10; 修回日期: 2020-07-13

作者简介:

方保民(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行与控制; E-mail: fangbaomin@163.com

李红志(1980—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与控制、电力系统运行技术; E-mail: jz1526@163.com

孔祥鹏(1981—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与控制。E-mail: woonter@126.com

(编辑 许威)