

基于 K-means 聚类算法的风电光伏光热互补 发电机组调度方法*

郑舒, 赵景涛, 刘明祥

(国网电力科学研究院有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: 针对光伏光热互补发电机组内部出力不均衡导致的运行不稳、效率低下问题, 提出一种基于 K-means 聚类算法的风电光伏光热互补发电机组调度方法。考虑到光伏光热发电机组具有间歇性、波动性和随机性等特点, 采用 K-means 聚类算法预先对需要调度的数据归类分析, 建立光能和风能可能出现的四种组合情况的目标函数, 求解函数值, 将该值作为下一步调度约束的初始条件值。调度方法结合了功率平衡、蓄能平衡、光伏光热上坡及下坡事件, 计算实时出力值及最佳调度出力值, 求解二者差值实现高效调度。试验结果证明, 所提方法有效完成了发电机组的电力负荷及功率调度, 运行波动和低效问题均得到明显改善, 对电站的稳定运行起到了重要作用。

关键词: K-means 聚类算法; 光伏光热; 发电机组; 目标函数; 蓄能平衡

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)02-0061-06

doi: 10.12177/emca.2022.159

Scheduling Method of Wind Power Photovoltaic Photothermal Complementary Generator Set Based on K-means Clustering Algorithm*

ZHENG Shu, ZHAO Jingtao, LIU Mingxiang

(State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the problems of unstable operation and low efficiency caused by the imbalance of internal output of photovoltaic photothermal complementary generator set, a scheduling method of wind power photovoltaic photothermal complementary generator set based on K-means clustering algorithm is proposed. Considering the intermittence, fluctuation and randomness of photovoltaic photothermal generation set, K-means clustering algorithm is used to classify and analyze the scheduled data in advance. The objective functions of four possible combinations of light and wind power are established, and the function value is calculated as the initial condition value of the next scheduling constraint. The scheduling method combines power balance, energy storage balance, photovoltaic photothermal uphill and downhill events, calculates the real-time output value and the optimal scheduling output value, and solves the difference between the two to achieve efficient scheduling. The experimental results show that the proposed method can effectively accomplish the load and power schedule of the generator set, and the problems of operation fluctuation and low efficiency are significantly improved, which plays an important role in the stable operation of power plants.

Key words: K-means clustering algorithm; photovoltaic photothermal; generator set; objective function; energy storage balance

收稿日期: 2022-08-02; 收到修改稿日期: 2022-11-07

* 基金项目: 国网总部科技项目——分布式资源主动支撑的新型配电网多状态智能管控技术研究及示范应用(5400-202219152A-1-1-ZN)

作者简介: 郑舒(1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化、交直流混合配电网与微电网运行控制等。

赵景涛(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化、交直流混合配电网与微电网运行控制等。

刘明祥(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

0 引言

现阶段,由于环境污染及能源危机等问题,电力资源的可持续发展备受关注,越来越多的电力工厂采用自然能源发电。其中,光能和风能是使用率最高的两种发电能源。为保证能源利用率最大化,需对光伏光热发电机组进行发电调度,优化内部电力配比,提高发电效率。

诸多学者对于含光伏并网的系统调度策略做了研究。文献[1]提出基于关键参数约束的发电调度优化算法,通过不同的发电数值来设置调度参数,在不断更新的过程中进行细致寻优。但因为寻优算法具有不同的搜索能力,参数更新过程缺乏参照对比,调度误差较大。文献[2]采集现场数据来模拟场景,利用区间方法对风光发电进行动态表示,并以此为基础,构建了二期最优调度模型,将模型中的随机变量转换为可约束的动态条件,进行调度。由于该方法没有设置调度参照函数,且将产生概率定为一个常量,很难进行有效地均衡,因此无法对算法进行有效搜索和使用。文献[3]提出将高载能负荷作为可调度资源参与新能源互补发电系统的二层优化调度模型,采用 NSGA-II 和二进位粒子群算法求解模型,上层优化模型以互补系统输出功率波动最小和并网效益最大为优化指标确定各机组的出力,下层优化模型根据上层优化模型造成的弃风、弃光量,选取能够有效消纳风、光的高载能负荷参与电网调度。该方法的实际应用效果较好。文献[4]为解决热电供需矛盾导致的弃风及环境污染问题,提出含光热电站及热泵的综合能源系统(IES)低碳调度优化模型,在能源侧利用热泵的供热灵活性,打破热电联产(CHP)机组"以热定电"的运行限制,考虑光热电站与 CHP 机组联合运行,对 IES 中各设备容量进行优化配置,提出风险规避鲁棒模型。但该方法复杂度较高,实际应用效果有待确定。

综上,本文提出一种基于 K-means 聚类算法的光伏光热互补发电机组调度方法。补偿调度是指当电力系统的发电量超过预定参与系统的机组的负载要求时,对各机组进行优化分配,使整个系统的燃料消耗或发电成本最小化,采用互补的调度方法进行电力调度为发电机组节省大量的发电

成本。在此基础上,考虑到光伏光热发电机组的发电特性,建立光能和风能可能出现的四种组合情况的目标函数,使发电调度算法可覆盖多种情况,提高适应能力。在多个目标函数的基础上,建立的调度约束条件能进一步贴合发电机组的实际情况进行优化。聚类算法会根据发电机组现有数据优化控制参数,通过不断地迭代计算查找最优的调度值。相比于传统的发电调度算法,K-means 聚类算法具有更强的优越性。

1 基于 K-means 聚类算法的目标函数

光伏光热互补发电机组具有间歇性、波动性和随机性等特点,给电网安全、稳定、可靠运行带来了许多问题,导致电网在大规模并网中出现了很大的调峰压力,对电网的调峰平衡^[5]造成了负面影响。光伏光热互补系统结构如图 1 所示。

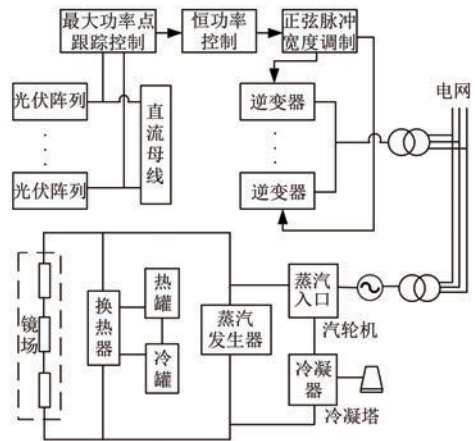


图 1 光伏光热互补系统结构

K-means 聚类算法是一种基于距离的能够提供一套点集和所需要的群集数目的方法。本文以保证光伏光热互补发电机组稳定运行为前提,采用 K-means 聚类算法建立有风有光、有风无光、无风有光以及无风无光四种情况的调度目标函数^[6]。然后利用一定的距离函数对数据进行迭代,使数据点在每个簇内被全部包含。将本文方法应用在发电调度上,可统一调度数据,提高统一处理能力,进而增强调度效率。具体实施过程如下。

(1) 有风有光。此时光伏光热互补发电机组的负荷方差值最小,负荷净值可以准确地反映出机组削峰后的净负载水平,且随着负荷净值方

差^[7]的减小,其风力差异减小,负载曲线呈现出更平滑的特性,从而极大地减少了由功率值调整而引起的不稳定现象,提高了机组的工作效率。表达式为

$$\min f_1 = \frac{1}{T} \sum_{a=1}^T [p_j(a) - p_{j,tav}] \quad (1)$$

$$p_j(a) = p_L(a) + p_{e,v2G}(a) + p_{EV1}(a) + p_{EV2}(a) - p_{WT}(a) - p_{pV}(a) - p_{TSC}(a) - p_{d,v2G}(a) \quad (2)$$

$$p_{j,tav} = \frac{1}{T} \sum_{a=1}^T p_j(a) \quad (3)$$

式中: T 为以天为单位的全部调度时间; f_1 为负荷净值方差; $p_{j,tav}$ 为净负荷平均值; $p_L(a)$ 、 $p_j(a)$ 分别为在第 a 测试时刻下发电机组的正常值和负荷净值; a 为测试时刻; $p_{WT}(a)$ 、 $p_{pV}(a)$ 、 $p_{TSC}(a)$ 分别为第 a 测试时刻下光伏光热发电机组有序、无序以及单纯有序^[8]的运行功率; $p_{e,v2G}(a)$ 、 $p_{d,v2G}(a)$ 分别为第 a 测试时刻下发电机组的充、放电功率; $p_{EV1}(a)$ 为光伏出力值; $p_{EV2}(a)$ 为光热出力值。

(2) 有风无光。光伏光热发电机组中仅风电能量出力,蓄热能量不出力,此时,需要计算风电的最小消耗量,表达式为

$$\max f_2 = \sum_{a=1}^T \sum_{a=1}^{M_W} p_{WT,a} \quad (4)$$

式中: f_2 为风力发电机组的消耗量; $p_{WT,a}$ 为第 a 测试时刻下的出力值; M_W 为参与总调度的发电量。

(3) 无风有光。光伏光热发电机组仅仅依靠蓄热能量出力,无额外发电值,光伏和光热的出力大致相同,表达式为

$$\max f_3 = \sum_{a=1}^T \left[\sum_{a=1}^{M_{pv}} p_{pv,i}(a) + \sum_{a=1}^{M_{TSC}} p_{TSC,j}(a) \right] \quad (5)$$

式中: f_3 为光伏、光热共同出力的消耗量之和; $p_{pv,i}$ 为第 i 台发电机的出力值; $p_{TSC,j}$ 为第 j 台发电机的出力值; M_{pv} 、 M_{TSC} 分别为参与调度的光伏、光热的发电机数量。

(4) 无风无光。此时仅依靠光伏和光热发电机组的储存能量进行出力,调度时需要尽可能地减少机组波动,降低额外的电力浪费,表达式为

$$\min f_4 = \sum_{a=1}^T \sum_{a=1}^{M_G} |p_{G,i}(a) - p_{G,j}(a)| \quad (6)$$

式中: f_4 为发电机组波动; $p_{G,i}$ 、 $p_{G,j}$ 分别为第 i 台

和第 j 台发电机的出力值; M_G 为参与总调度的发电机组数量。

2 光伏光热互补发电机组调度与约束条件

目标函数和约束条件之间为相辅相成的变量关系,在整个电力发电调度系统中,目标函数作为调度模型的参照,为自变量^[9],约束条件则以目标函数为基础进行适当的线性规划,为因变量。以上述过程给出的目标函数为基础,对电力系统的内部发电机组逐一进行约束,实现精准的发电调度。

(1) 功率平衡约束^[10]。考虑到光伏光热互补发电机组内部的出力平衡问题,对运行功率进行如下约束:

$$\sum_{i=1}^{M_G} p_{G,i}(a) + \sum_{i=1}^{M_W} p_{WT,a}(a) + \sum_{i=1}^{M_{pv}} p_{pv,i}(a) + \sum_{a=1}^{M_{TSC}} p_{TSC,i}(a) + p_{d,v2G}(a) = p_L(a) + p_{e,v2G}(a) + p_{EV1}(a) + p_{EV2}(a) + p_k(a) \quad (7)$$

式中: $p_k(a)$ 为在第 a 测试时刻发电机组的盈余功率。

(2) 机组运行平衡约束。调度公式如下:

$$\begin{cases} p_{G,i,\min} \leq p_{G,i}(a) \leq p_{G,i,\max} \\ p_{WT,j,\min} \leq p_{WT,j}(a) \leq p_{WT,j,\max} \\ p_{pv,k,\min} \leq p_{pv,k}(a) \leq p_{pv,k,\max} \\ p_{TSC,n,\min} \leq p_{TSC,n}(a) \leq p_{TSC,n,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $p_{G,i,\min}$ 、 $p_{WT,j,\min}$ 、 $p_{pv,k,\min}$ 、 $p_{TSC,n,\min}$ 分别为光伏光热互补发电机组中第 i 台、第 j 台、第 k 台、第 n 台发电机的最小出力值; $p_{G,i,\max}$ 、 $p_{WT,j,\max}$ 、 $p_{pv,k,\max}$ 、 $p_{TSC,n,\max}$ 分别为光伏光热互补发电机组中第 i 台、第 j 台、第 k 台、第 n 台发电机的最大出力值。

(3) 聚焦型太阳能热发电^[11](CSP)功率平衡约束。以此约束条件进行调度可有效改善光伏光热互补发电机组内部的太阳能储热出力平衡,调度公式如下:

$$p_s(a) + p_{out}(a) = p_{in}(a) + p_{H-E}(a) \quad (9)$$

式中: $p_s(a)$ 为在第 a 测试时刻下的光伏光热互补发电机组中热功率平衡的实时数值; $p_{in}(a)$ 、 $p_{out}(a)$ 分别为当太阳能储热开启、关闭状态下的热功率平衡实时数值; $p_{H-E}(a)$ 为太阳能储热电站传递给发电机组的热量。

(4) 蓄热机组平衡约束。调度公式如下：

$$\begin{cases} p_{in}(a) = [p_{th,H-T}(a) + p_{H-E}(a)] \times (1 - \xi) \times K_1 \\ p_{out}(a) = p_{th,T-H}(a) \times (1 - \xi) \times K_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $p_{th,H-T}(a)$ 、 $p_{th,T-H}(a)$ 分别为光伏光热发电机组储热能量和放热能量通道； ξ 为平均热损失系数^[12]； K_1 、 K_2 分别为蓄热系统和放热系统的工作参数，二者不能同时进行工作，即二者不能同时为1，也不能同时为0，据此得到调度公式为

$$\begin{cases} K_1 + K_2 = 1 \\ K_1 \times K_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

(5) 光伏光热发电机组功率上爬坡事件约束。光热发电机组因外部或人为原因，极易发生动力爬升。光伏发电机组功率爬坡^[13]是指短期内系统电能大量上升或下降，其会导致系统有功不平衡、失稳，甚至大规模停电，对电网的安全稳定运行构成极大的威胁。本文将此事件视为最优发电计划的随机事件^[14]，并对光伏光热发电机组功率爬坡事件过程中的电压、波动率等参数进行了分析，利用预报算法对下一阶段的电力进行了线性预测，依据这些变量的变化来进行合理地调度。光伏光热发电机组功率上爬坡事件模型如图2所示。

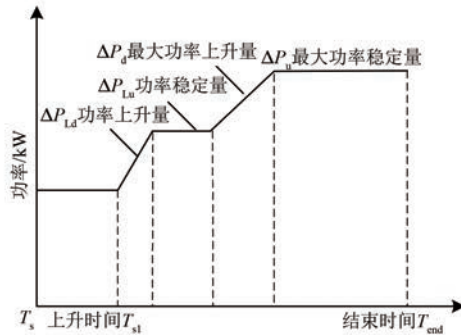


图2 光伏光热发电机组功率上爬坡事件模型

由图2可知，光伏光热发电机组功率上爬坡为阶段性上升趋势，在第 T_{s1} 时间点时出现骤增，此时采取甩负荷^[15]策略。发生上爬坡事故会破坏现有的发电计划，造成备用容量的短缺，从而影响电网调度计划的实施。因此，采用提高光伏光热发电机组功率爬坡限制的方法，使常规机组的后备能力始终高于峰值电压。采用相同的原则，使爬坡速度保持在最大幅度以下，即电力值和爬

坡值长期处于稳定的压制状态：

$$\sum_{i=1}^N U_{i,t} \geq \Delta P_d + \Delta P_{Ld} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N D_{i,t} \geq \Delta P_u + \Delta P_{Ld} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N U''_{i,t} \geq \Delta P_d + \Delta P_{Ld} \quad (14)$$

$$U''_{i,t} = r_{i,t} \times t \quad (15)$$

式中： ΔP_{Ld} 表示发电机组在整个爬坡过程中单位步长的功率上升量； ΔP_{Ld} 表示稳定量； ΔP_d 表示单位步长的最大功率上升幅值； ΔP_u 表示最大功率稳定幅值； $D_{i,t}$ 表示甩负荷抛弃量； $U''_{i,t}$ 表示电压上升量。

(6) 光伏光热发电机组功率下爬坡^[16]事件约束。不同于发电机组的上爬坡事件，当出现下爬坡情况时，若系统中储存的备用电力不能平衡光伏光热发电机组功率下降容量，就会出现甩负荷现象。产生这种情况的原因是电网的供电负荷减少，使得电网功率分配不平衡，从而造成大规模停电，系统需要的电能超出了向用户提供的电能。此时需要由系统的总发电量来控制。该过程也是系统供电稳定性的保护过程，要极力避免出现超负荷现象。根据该特点，在光伏光热发电机组功率^[17]下爬坡事件发生之前，预先对发电机组进行甩负荷条件约束，保证系统发电的稳定。但爬坡事件并非由单一现象引起，外界环境或人为影响都可导致事件发生，持续时间极短但影响幅值很大。光伏光热发电机组功率下爬坡事件模型如图3所示。

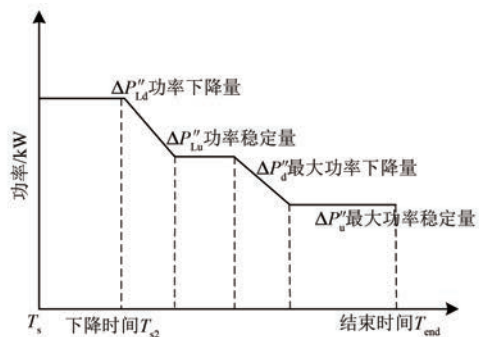


图3 光伏光热发电机组功率下爬坡事件模型

$\Delta P_{Ld}''$ 、 $\Delta P_{Ld}''$ 、 $\Delta P_d''$ 、 $\Delta P_u''$ 分别对应下爬坡事件的下降参数。由图3可知，光伏光热发电机组功率的下爬坡与上爬坡表现基本相同，均为阶段性

下降趋势,在第 T_{s2} 时间点时出现骤降。设以发电机组额定步长为单位的爬坡最大幅值为 ΔP 、光伏光热发电机组功率爬坡开始时间为 T_s 、结束时间为 T_{end} ,根据式(15)判定,当系统发生爬坡时,其额定发电值是否满足最低需求,若满足,采用上述过程进行约束。若不满足,则根据以下情况进行具体约束:当系统出现上爬坡时,在起始时间 T_s 之前,采用合理的甩负荷方法,缩短电力爬坡时间,增加系统电力修正时间;当系统出现下爬坡时,在起始时间 T_s 之后,根据上述的计划,在系统爬升或爬坡前,将会达到正常的满负荷状态,通过调节输出功率,使系统内其他设备的输出功率增大,实现平衡运行的同时可以提高系统整体的适应能力。

3 仿真试验

3.1 试验背景

发电量受降水量、温差以及空气湿度等因素的影响程度较大。为验证本文所提调度方法的有效性,分别设置夏季和冬季两种不同发电环境,二者反差较大,对比明显,更容易验证本文算法的优越性。

3.2 光伏光热发电机组储/放热功率调度结果对比分析

通过光伏光热发电机组储/放热功率来验证算法调度的有效性,试验结果如图4所示。

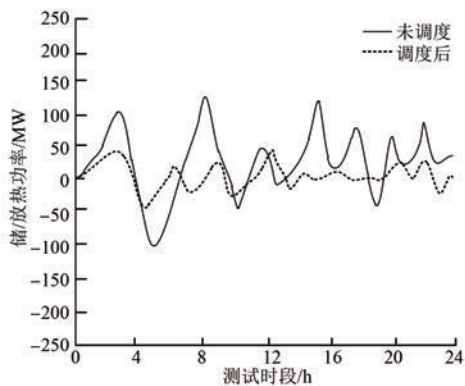


图4 光伏光热发电机组储/放热功率调度曲线

从图4中可以看出,经过本文方法调度后的储热和放热功率均得到了明显的改善,且改善效果较好。本文采用的调度方法对光伏光热发电机组的所有情况均进行了详细地分析,建立了具有针对性的目标函数,并在此基础上建立了更为精准的调度约束函数,适应能力更强,因此,对储

热和放热均能实现精准调度。

3.3 夏/冬季光伏光热发电机组调度后负荷出力结果

为进一步验证本文调度方法的有效性,分别在夏季和冬季环境下进行光伏光热互补发电机组调度,通过测试不同时间段内调度前后发电机组电力负荷的变化,判定算法的调度性能,并与基于深度强化学习算法的光伏智能调度方法、考虑随机性的多源发电系统优化调度方法进行对比分析,试验结果如图5和图6所示。

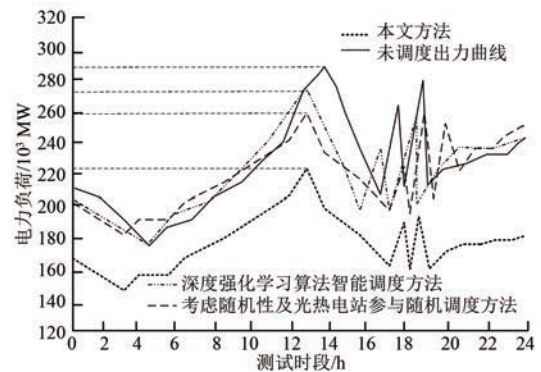


图5 夏季光伏光热发电机组电力负荷变化对比

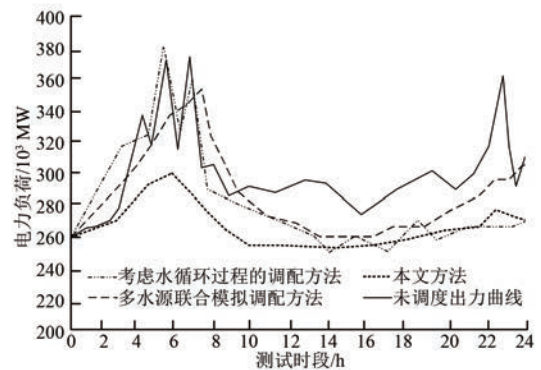


图6 冬季光伏光热发电机组电力负荷变化对比

从图5和图6中可以看出,采用本文提出的发电调度方法可充分利用电力系统发电机组内部的可调节性,有效减少负荷峰谷差,使剩余电力负荷更加平稳。经过发电调度后负荷均方差极大减小,峰谷差显著降低。其中,原夏季光伏光热发电负荷最高点方差为290 MW,经过有效调度后,剩余发电负荷方差减小至222 MW,发电负荷下降了13.06%,而另外两种方法分别只下降到272 MW、260 MW,说明其调度效果较差。对比受寒冷气流影响的冬季发电环境的负荷曲线,发现

本文方法调度后的电力负荷依旧是最低的,调度效果最佳。

本文从电网安全角度出发,为了满足最低发电负荷需求,通过限制约束条件加大系统的发电出力,并由系统内部其他机组来分担负荷调峰任务,有效避免了高负荷导致的故障现象,整体实用能力强,算法鲁棒性高。

4 结 语

为解决光伏光热互补发电机组受环境影响较大且内部出力不均的问题,本文提出一种基于 K-means 聚类算法的调度方法。考虑到光伏光热不属于一体化发电形式,进行调度时可能存在误差影响,预先采用 K-means 聚类算法对电力数据进行统一管理,给出光能、风能的四种目标组合情况。在此基础上,建立了具有一定适应能力的调度约束条件,调度方法精准度较高,鲁棒性强,目标函数和约束条件之间的对应能力较高,具有较高的实用价值。

【参 考 文 献】

- [1] 李涛,胡维昊,李坚,等. 基于深度强化学习算法的光伏-抽蓄互补系统智能调度[J]. 电工技术学报, 2020,35(13): 2757.
- [2] 负轲韵,董海鹰,陈钊,等. 考虑随机性及光热电站参与的多源发电系统两阶段随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(4): 30.
- [3] 熊伟,马志程,张晓英,等. 计及风、光消纳的风电-光伏-光热互补发电二层优化调度[J]. 太阳能学报,2022,43(7): 39.
- [4] 潘华,姚正,林顺富,等. 基于信息间隙决策理论的含光热电站及热泵的综合能源系统低碳调度优化[J]. 现代电力,2022,39(2): 169.
- [5] 马成龙,袁雪峰,李晓静. 基于 K-means 聚类算法的火电机组两个细则考核分析[J]. 电力学报, 2021,36(3):261.
- [6] 孙林,刘梦含,徐久成. 基于优化初始聚类中心和轮廓系数的 K-means 聚类算法[J]. 模糊系统与数学,2022,36(1): 47.
- [7] 杨恒岳,刘青荣,阮应君. 基于 k-means 聚类算法的分布式能源系统典型日冷热负荷选取[J]. 热力发电, 2021,50(3): 84.
- [8] 许璟琳,彭阳,余芳强. 基于 k-means 聚类和离群点检测算法的医院建筑节能诊断方法[J]. 计算机应用,2021, 41(S1): 288.
- [9] 白丽丽,宋初一,许丽艳,等. 基于改进量子旋转门人工鱼群算法的 K-means 聚类算法及其应用[J]. 计算机应用研究,2022,39(3): 797.
- [10] 江兵,李国荣,孙赵盟,等. 基于长短期记忆神经网络和改进型 K-means 聚类算法的居民峰谷时段划分模型[J]. 现代电力,2021,38(6): 620.
- [11] 廖纪勇,吴晟,刘爱莲. 基于相异性度量选取初始聚类中心改进的 K-means 聚类算法[J]. 控制与决策,2021,36(12): 3083.
- [12] 谭风雷,陈昊,何嘉弘. 基于 K-means 聚类方法和相似时段的特高压并联电抗器油温预测[J]. 电力自动化设备,2021,41(6): 213.
- [13] 张萌谔,刘春天,李希今,等. 基于 K-means 聚类算法的绩效考核模糊综合评价系统设计[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(5): 1851.
- [14] 何志瞧,童家麟. 太阳能光热发电现状及超临界 CO₂ 光热发电技术应用前景[J]. 华电技术,2020, 42(4): 77.
- [15] 张宏,董海鹰,陈钊,等. 基于分时电价的风电-光伏-光热联合发电基地并网优化调度策略[J]. 电源学报,2021,19(5): 91.
- [16] 汪致洵,林湘宁,刘畅,等. 基于光热电站水电联产的独立海岛综合供给系统容量优化配置[J]. 中国电机工程学报,2020,40(16): 5192.
- [17] 李楠,李芳,胡新民,等. 基于利润最大化的储能光热电站启停模型[J]. 南方电网技术,2022,16(4): 115.

(上接第 60 页)

- [12] 韩笑,孙杰,蒋剑涛,等. 考虑不可测负荷分支接入的配电网自适应差动保护[J]. 电子测量技术, 2021,44(16): 12.
- [13] 张雪松,马啸,章雷其,等. 有源配电网含不可测分支线路新型电流幅值差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2020,40(2): 76.
- [14] 王子璇,马啸,杨勇,等. 计及不可测分支负荷电源助增效应的有源配电网幅值差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报,2020,40(S1): 56.