

屋顶光伏光热系统的容量优化配置

王茹,王海云,范添圆,张胜楠

(新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:高校建筑是用能重要用户,主要存在电、热两种用能形式,充分利用高校建筑屋顶资源开发太阳能项目并合理配置储能,能够有效提升用能经济性。以提高经济性为目标,设计了一种包含光伏、太阳能集热器、热泵和蓄电装置的屋顶光伏光热系统,考虑设备的购置和运维费用,利用差分进化算法求解出光伏光热系统中设备的最优容量配置结果,实现用户侧的单位电量成本最低。最后,以我国西北地区某一高校宿舍楼为实际算例,得到了该光伏光热系统的最小单位电量成本以及最优目标下的配置方案,为绿色低碳型校园建设提供借鉴。

关键词:高校建筑;屋顶光伏光热系统;经济性;差分进化算法;容量配置

中图分类号:TM615 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24210

Optimal Configuration of the Capacity of Rooftop Photovoltaic Thermal System

WANG Ru, WANG Haiyun, FAN Tianyuan, ZHANG Shengnan

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

Abstract: University buildings are major energy users, and there are two main forms of energy use: electricity and heat. Making full use of the roof resources of university buildings to develop solar energy projects and rationally allocate energy storage can effectively improve the energy economy. In order to improve the economy, considered the equipment purchase and operation and maintenance costs, a rooftop photovoltaic photovoltaic system including photovoltaic, solar collectors, heat pumps and power storage devices was designed. The differential evolution algorithm was used to solve the problem, and the optimal capacity configuration result of the equipment in the photovoltaic thermal system was obtained, so as to achieve the lowest cost per unit of electricity on the user side. Finally, taked a university dormitory building in Northwest my country as an actual example, the minimum unit electricity cost of the photovoltaic solar thermal system and the configuration scheme under the optimal target were obtained. It provides a reference for the construction of green and low-carbon campuses.

Key words: university buildings; rooftop photovoltaic thermal system; economy; differential evolution algorithm; capacity allocation

光伏和风电等新能源的大力发展,大大缓解了全球能源和环境问题^[1]。随着太阳能技术的不断成熟和人们对绿色能源需求的不断提升,太阳能集热系统受到了大众青睐,但单一的集热技术不足以支撑高校电负荷和热水供给需求,为此,本文建立了光伏光热系统,就近提供电能与热水。高校作为用电重要用户,具备良好的光伏发电条件,积极开发太阳能资源可有效降低其用电成本^[2]。储能装置能有效平抑发、用电不确定性,改善电能质量^[3],但投资成本会增多,应合理选择

储能容量。文献[4]以用户的综合成本最小为目标搭建储能评估模型,验证得出负荷峰谷差较大且在白天有尖峰负荷时适合加储能,但未考虑储能的运维成本。文献[5]分析办公、酒店和住宅安装光伏和储能的经济性,得出储能容量与系统经济性成反比。但文中仅考虑居民和工商业,未对农业、高校等用户的储能配置展开研究。文献[6]在考虑储能系统全寿命周期成本、联络线利用率的基础上建立优化模型,得出合理配置储能可提高联络线利用率,但文中目标函数的权重主观性

基金项目:国家自然科学基金(51667020);新疆维吾尔自治区重点研发计划(2020B02001)

作者简介:王茹(1996—),女,硕士,Email:1575455595@qq.com

强。文献[7]以总净现值成本为目标函数,分析得出混合储能较单一储能寿命优势明显,但混合储能对于小微网系统,经济性不高。

以上文献仅对储能系统进行优化配置,本文将光伏与光热结合,建立含光伏、光热、热泵、蓄电装置的屋顶光伏光热系统。在确保供电可靠性的前提下,为促进系统中光伏、光热出力的有效利用,建立了系统容量优化配置模型,以度电成本最低为目标,对光伏板、集热器的面积以及热泵和蓄电池的容量进行配置,采用差分进化算法进行求解,得出单位度电成本最低情况下系统内各设备的配置方案,实现系统的最大效益化。最后以我国西北地区某一高校宿舍楼为算例,得到了该系统的最小发电成本及其配置方案,为绿色低碳型高校的建设提供参考。

1 屋顶光伏光热系统模型

屋顶光伏光热系统的设备包括光伏发电机组、储电装置、集热器和热泵几个部分。

1.1 光伏系统模型

光伏出力主要受组件面积、光照强度、温度、光电转换效率等因素影响,光伏发电系统的发电功率可表示为^[8]

$$P_{pv} = \eta_{pv} I_{pv} S_{pv} \quad (1)$$

$$\eta_{pv} = 0.15 [1 - 0.0045 (T_{pv} - 25)] \quad (2)$$

$$T_{pv} = T_a + (T_{NOCT} - 20) \frac{I_T}{800} \quad (3)$$

式中: S_{pv} 为光伏组件有效采光面积; η_{pv} 为发电效率; I_{pv} 为光伏组件获得的太阳辐照量; T_a 为环境温度; T_{NOCT} , T_{pv} 分别为电池标称工作温度和工作温度; I_T 为太阳辐照强度。

1.2 太阳能集热器模型

集热系统的集热量^[9]可表示为

$$Q_{th} = \eta_{th} I_{th} S_{th} \quad (4)$$

$$\eta_{th} = [A - B(T_w - T_a)] / I_T \quad (5)$$

式中: S_{th} 为集热器有效采光面积; η_{th} 为集热器效率; I_{th} 为集热器获得的太阳能辐照量;对于给定型号的集热器, A , B 为常量; T_w 为集热器进口水温。

1.3 热泵模型

制热性能系数 (coefficient of performance, COP) 作为热泵装置的性能评价^[10]指标,其模型可表示如下:

1) 热泵电热转换方程为

$$Q_a(t) = P_a(t) COP_a \quad (6)$$

式中: $Q_a(t)$, $P_a(t)$ 为 t 时刻热泵的发热功率和热泵的用电功率; COP_a 为热泵的电热转换效率。

2) 热泵功率约束为

$$P_{a,min} \leq P_a(t) \leq P_{a,max} \quad (7)$$

式中: $P_{a,min}$, $P_{a,max}$ 分别为热泵在最小和最大运行状态时的保持功率。

本系统中热泵工作在停止工作状态时,热泵为最小运行保持功率,即 $P_{a,min} = 0$;而额定功率即设定为最大运行功率。

1.4 储能模型

1) 储能设备容量^[11]方程为

$$S(t) = S(t-1) + [P_{ch}(t)\eta_{ch} - P_{dis}(t)/\eta_{dis}]\Delta T \quad (8)$$

式中: $S(t)$ 为蓄电池在 t 时刻的电池容量; $P_{ch}(t)$, η_{ch} 分别为蓄电池在 t 时刻的充电平均功率和效率; $P_{dis}(t)$, η_{dis} 为蓄电池在 t 时刻的放电平均功率和放电效率。

储能蓄电池的容量与上一刻充、放电有关。

2) 功率约束为

$$P_{ch,min} \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch,max} \quad (9)$$

$$P_{dis,min} \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis,max} \quad (10)$$

式中: $P_{ch,min}$, $P_{dis,min}$, $P_{ch,max}$, $P_{dis,max}$ 分别为蓄电池在 t 时刻最小充、放电功率和最大充、放电功率。

3) 为了防止储能过度充电和储能容量过低的情况,需要对储能蓄电池提出储能容量约束:

$$\gamma_{min} S \leq S(t) \leq \gamma_{max} S \quad (11)$$

式中: γ_{min} , γ_{max} 为蓄电池的最小和最大允许储存容量系数。

2 能量管理策略

屋顶光伏光热系统主要由光伏发电模块、真空管集热模块、热泵模块、储电模块、电网模块和用户模块组成,其结构图如图1所示。系统内用户的电负荷和热泵电负荷由光伏发电量、蓄电池电量和电网补充电量共同供给,用户热负荷由真空管集热系统的热量和热泵提供的热量共同供给。

为充分利用太阳能,将太阳能集热器和光伏发电机组作为系统首要产热、发电装置,设定用户的电负荷和热负荷先由光伏发电系统和真空管集热系统提供。集热器提供热能,以热水的形式输出给系统,若产生的热量无法满足系统需求,则启动空气源热泵作为补充供给。太阳能光伏发电为系统提供电能,当光伏发电功率与用户

需求功率相等时,储能系统不工作;当光伏出力满足用户需求后有剩余时,蓄电池进行充电,吸收多余能量储存,避免弃光损失;当遇上光照强度不够或者天气原因,光伏出力无法满足用户需求时,可选择通过储能进行放电,从而减少购电成本;当光伏出力无法满足时,由蓄电池接替供量,若仍无法满足负荷需求,则向电网购电来补足供应差。

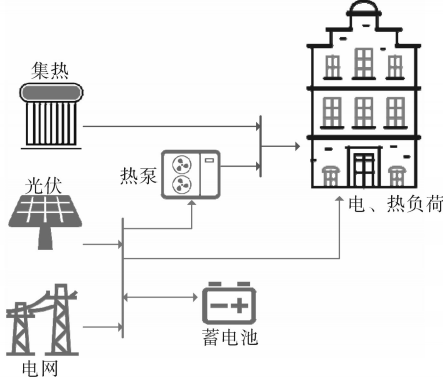


图1 光伏光热系统结构图

Fig.1 Photovoltaic thermal system structure diagram

3 容量优化配置模型

3.1 目标函数

经济效益是作为评价系统效益的一个重要指标,对于光伏光热系统而言,其单位电量成本 f 可表示^[12]为系统成本与负荷用电总量的比值,本文用单位电量成本作为目标函数,表达式如下:

$$f = (C + C_{\text{grid}}) / E_{\text{year}} \quad (12)$$

$$C_{\text{grid}} = E_{\text{year}} c_{\text{grid}} \quad (13)$$

式中: C 为设备的年投资费用; C_{grid} 为系统从大电网年购电总费用; E_{year} 为年负荷消耗量; c_{grid} 为电网购电的单价。

设备的年投资费用可表示为

$$C = \sum_{i=1}^4 [N_i c_i P_i r (1+r)^{n_i} - 1 + N_i P_i Q_i] \quad (14)$$

式中: i 为设备类型, $i=1,2,3,4$,分别表示光伏组件、集热设备、热泵以及储能设备; N_i 为 i 设备的安装台数; c_i 为 i 设备单位容量的成本; r 为折现率,取5%; n_i 为 i 设备的使用年限; P_i 为 i 设备的容量; Q_i 为 i 设备的运维单价。

3.2 优化变量

本文以光伏光热系统内光伏组件的面积 S_{pv} 、集热器面积 S_{th} 、热泵容量 P_{a} 和蓄电池容量 P_{ES} 为优化变量。

太阳能光伏光热系统优先考虑利用太阳能,

而照射在屋顶的太阳能分别被光伏板和集热器利用,由于屋顶面积有限,且用户对于用电及热水的需求不同,所以光伏板和集热器的安装面积或容量需要合理设计,若容量设计过大,会造成大量的光浪费且不经济,设计过小则会造成系统的运行成本升高且环保性降低。太阳能属于间歇性能源,所以在系统中合理考虑热泵和蓄电池的配置,热泵和蓄电池的容量配置都需要考虑用户需求、太阳能组件的容量以及设备自身的经济性。所以在光伏光热系统中各设备的容量配置对于系统的经济性和稳定性是非常重要的。

3.3 约束条件

1)功率平衡约束如下:

$$P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{ES}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{a}}(t) \quad (15)$$

$$Q_{\text{th}}(t) + Q_{\text{a}}(t) = Q_{\text{load}}(t) \quad (16)$$

式中: $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{ES}}(t)$ 分别为 t 时刻光伏和蓄电池的出力大小; $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻电网购电量; $Q_{\text{th}}(t)$ 为 t 时刻集热器的出力; $P_{\text{load}}(t)$ 、 $Q_{\text{load}}(t)$ 分别为 t 时刻的电负荷与热负荷。

2)电网交互功率约束如下:

$$P_{\text{grid,min}} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid,max}} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{grid,min}}$ 、 $P_{\text{grid,max}}$ 分别为与电网交换的最小、最大功率。

3)组件面积约束如下:

$$S_{\text{pv,min}} \leq S_{\text{pv}} \leq S_{\text{pv,max}} \quad (18)$$

$$S_{\text{th,min}} \leq S_{\text{th}} \leq S_{\text{th,max}} \quad (19)$$

$$S_{\text{e,min}} \leq S_{\text{pv}} + S_{\text{th}} \leq S_{\text{e,max}} \quad (20)$$

式中: $S_{\text{pv,min}}$ 、 $S_{\text{pv,max}}$ 为光伏组件最小、最大安装面积; $S_{\text{th,min}}$ 、 $S_{\text{th,max}}$ 为集热器最小、最大安装面积; $S_{\text{e,min}}$ 、 $S_{\text{e,max}}$ 为屋顶最小、最大可安装有效面积。

3.4 求解方法

差分进化算法^[13]收敛速度较快、结构更加简单、鲁棒性强且容易实现,在求解多变量的函数优化问题上有优势,因此本文所提光伏光热系统优化配置模型采用差分进化算法结合滤子技术求解,以惩罚的形式将不满足等式约束的个体快速滤除,加快收敛速度,算法流程图如图2所示。

3.4.1 初始化

差分进化算法的种群由 NP 个 D 维向量组成,其中, $\mathbf{x}_{i,G}$ 、 $\mathbf{v}_{i,G}$ 、 $\mathbf{u}_{i,G}$ 分别为目标向量、变异向量、试验向量, G 为代数,且有:

$$x_{j,i}^L \leq x_{j,i,0} \leq x_{j,i}^U \quad (21)$$

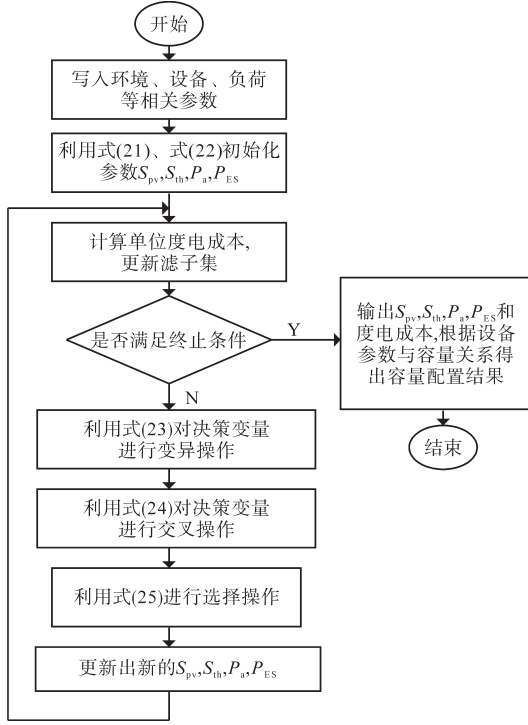


图2 求解流程图

Fig.2 Flow chart of the solving

$$x_{j,i,0} = x_{j,i}^L + \text{rand}(0,1) \cdot (x_{j,i}^U - x_{j,i}^L) \quad (22)$$

其中

$$i=1,2,\dots, NP$$

$$j=1,2,\dots, D$$

式中: $x_{j,i,0}$ 为种群中第0代第 i 个体上的第 j 个数; $x_{j,i}^U, x_{j,i}^L$ 为第 i 个体第 j 维的上、下边界; $\text{rand}(0,1)$ 为一个区间在 $(0,1)$ 上均匀分布的随机数。

3.4.2 变异

初始化后出现 N 组解, 对于一组给定的解 $\mathbf{x}_{i,G}$, 随机地从这 N 组解中选择三组解 $\mathbf{x}_{r1,G}, \mathbf{x}_{r2,G}, \mathbf{x}_{r3,G}$, 且 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$, 用下面变异策略进行变异:

$$\mathbf{v}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{r1,G} + F(\mathbf{x}_{r2,G} - \mathbf{x}_{r3,G}) \quad (23)$$

式中: F 为变异因子, 位于 $[0,2]$ 之间。

3.4.3 交叉

对第 G 代种群 $\mathbf{x}_{i,G}$ 及其变异的中间体 $\mathbf{v}_{i,G+1}$ 进行交叉操作如下:

$$\mathbf{v}_{j,i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{v}_{j,i,G+1} & \text{rand}(0,1) \leq CR \\ \mathbf{x}_{j,i,G+1} & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

式中: CR 为交叉概率, 处于 $[0,1]$ 之间。

3.4.4 选择

通过交叉策略后得到一组进化之后的解, 将这组新解跟原来那组解的适应度值进行比较, 如果优于原来那组解则将它们替换掉, 否则保留原来解, 即

$$\mathbf{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,G+1} & f(\mathbf{u}_{i,G+1}) \leq f(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G} & \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

3.4.5 滤子技术

滤子^[14]是由目标函数和约束违反度组成的一组数对 (F, K) , 针对优化模型中的等式和不等式约束, 利用滤子技术对其进行处理:

$$K = \sum_{i \in m} \max[0, g_i(Y)] + \sum_{j \in n} |h_n(Y)| \quad (26)$$

式中: $g_i(Y), h_n(Y)$ 分别为不等式约束与等式约束; m, n 为对应个数。

4 算例分析

4.1 算例条件

为验证所提模型的正确性, 选取西北地区某高校的一栋宿舍楼为研究对象, 设置光伏发电机组和太阳能集热器安装在楼顶, 考虑到遮挡问题, 组件实际可用的有效面积为 960 m^2 。宿舍内包括了120个房间(共住480人)、多个公用房间、走廊和楼梯间等。宿舍内部有6台公用饮水机、14个公用洗衣机、24个公用吹风机, 每间宿舍包括2个荧光灯、1个卫生间灯、1个电风扇和若干插座, 公用房间用灯的功率约为 2 kW 。系统中各供、储能设备相关参数如表1所示。

表1 光伏光热系统关键参数

Tab.1 Key parameters of photovoltaic thermal system

设备类型	投资成本/ (元·kW ⁻¹)	运维成本/ (元·kW ⁻¹)	寿命/a
光伏组件	5 500	0.025 0	20
集热器	6 200	0.025 5	15
热泵	1 840	0.026 0	15
蓄电池	2 000	0.001 8	13

4.2 结果分析

结合算例数据, 将算法运用光伏光热系统优化配置模型中求解, 其迭代曲线如图3所示, 优化后的电、热负荷曲线如图4所示。

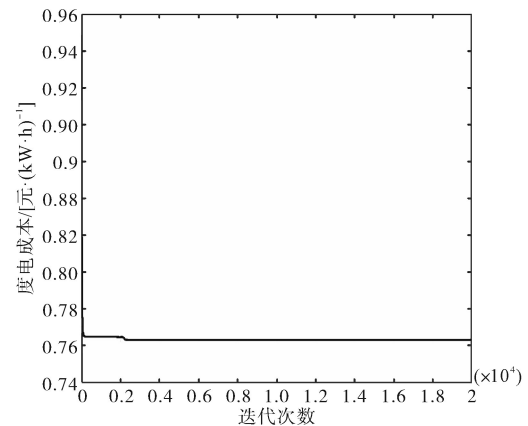


图3 迭代曲线

Fig.3 Iterative curve

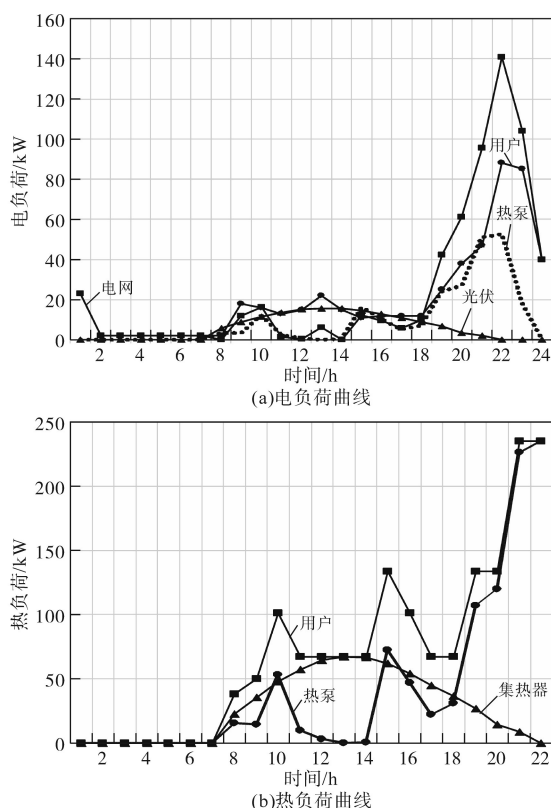


图4 电、热负荷曲线

Fig.4 Electricity and heat load curves

配置一定容量的储能的目的是提高光伏消纳水平,降低购电成本,提高系统的经济效益。优化求得的配置结果如下:光伏组件的组件面积 242 m^2 ,集热器组件面积 252 m^2 ,热泵容量 56 kW ,蓄电池容量 $0\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

由图4和上述配置结果可知,系统白天峰谷差不大且尖峰负荷出现在晚上,负荷较小,优化结果显示用户在不配置储电装置的情况下经济性更高,且几乎无弃光现象发生。屋顶光伏光热系统的发电成本为 $0.7634\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,基本等同于电网价格。化石燃料存储运输成本高、不可再生且燃烧时会对环境造成污染,但光伏光热系统能同时满足电、热水需求,且太阳能清洁可再生,环境效益更高。由图3可以看出,迭代次数约在2200次时,度电成本于 $0.7634\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 处收敛,验证了差分进化算法的有效性。

5 结论

本文建立了含光伏阵列、集热器、热泵、蓄电池的屋顶光伏光热系统模型,以单位电量成本最低为目标,利用差分进化算法对系统进行了优化配置。并以西北地区一宿舍楼为算例,得到了系统的最优配置方案和单位电量成本。结

果显示:

1)本文建立的系统架构和配置模型实现了系统的低发电成本,结合差分进化算法求解得到各设备的配置容量;

2)屋顶光伏光热系统降低了电网在午高峰的供电压力,具有更高的环境效益;

3)当用户负荷较小、白天峰谷差不大且尖峰负荷出现在晚上时,系统不配置储能经济性更好。

本文仅考虑对电能的储能配置,考虑到实际情况,如何综合配置电、热储能将作为下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 曹炜,董浩洋,李芸,等. 分布式光伏高比例接入的国外经验及实践启示[J]. 电气传动,2022,52(4):3-11.
CAO Wei, DONG Haoyang, LI Yun, et al. Foreign experience and practical enlightenment of the high proportion access of distributed photovoltaic high-proportion[J]. Electric Drive, 2022, 52(4):3-11.
- [2] 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.
- [3] 王开科,南东亮,李勇,等. 虚拟电厂参与大规模新能源系统的储能侧双层优化运行策略[J]. 电气工程学报,2020,15(2):24-33.
WANG Kaike, NAN Dongliang, LI Yong, et al. Bi-level optimal operation strategy of energy storage with large-scale new energy system under the participation of virtual power plant[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(2):24-33.
- [4] 陈丽娟,吴甜恬,柳惠波,等. 基于需量管理的两阶段大用户储能优化模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):194-200.
CHEN Lijuan, WU Tiantian, LIU Huiibo, et al. Demand management based two-stage optimal storage model for large users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1):194-200.
- [5] 王典,李义强,王惠,等. 并网型光伏-储能微电网优化配置研究[J]. 太阳能,2019(4):41-46,29.
WANG Dian, LI Yiqiang, WANG Hui, et al. Research on grid-connected PV-energy storage micro-grid optimization configuration[J]. Solar Energy, 2019(4):41-46,29.
- [6] 李玲玲,王鑫,郎永波,等. 基于改进鲸鱼算法的微网复合储能系统容量优化配置[J]. 电测与仪表,2019,56(16):104-110.
LI Lingling, WANG Xin, LANG Yongbo, et al. Capacity configuration of micro-grid composite energy storage system based on improved whale optimization algorithm[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 56(16):104-110.