DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 06. 006

基于粒子群优化算法的智慧微电网风光储容量优化配置

Optimal allocation of a wind-PV-battery hybrid system in smart microgrid based on particle swarm optimization algorithm

王鑫[1],陈祖翠[2],卞在平[1],王业耀[1],吴育苗[2]
WANG Xin[1],CHEN Zucui[2],BIAN Zaiping[1],WANG Yeyao[1],WU Yumiao[2]

(1.中国电建集团海南电力设计研究院有限公司,海口 571100;2.海南海电联电力工程有限公司,海口 571100)
(1.Hainan Zhonghongxin Engineering Consulting Company Limited,Haikou 571100,China;
2.Hainan Electric Power Design & Research Institute,Haikou 571100,China)

摘 要:随着“双碳”目标的提出,国内多地鼓励建筑屋顶建设清洁能源发电系统,由风光储组成微电网,通过新能源发电有效降低区域生产活动的碳排放,并提高生活办公区的供电可靠性。针对微电网投资的经济性,其风光储容量配比一直属于研究热点。依托海南省特有的地理环境,根据当地的光照、风速条件,利用粒子群优化算法,以最大经济效益为寻优目标,选取最优风光储装机容量配比,并利用节能办公住宅区智能微电网建设示范项目所采集的数据进行经济性分析,可以为智能微电网节能改造提供理论和数据基础。

关键词:智慧微电网;粒子群优化算法;碳中和;容量配比;多目标优化;风电;光伏发电;储能;节能减排;电能替代
中图分类号:TK 01:TM 731 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-0706(2022)06 - 0052 - 07

Abstract: With the proposal of the goals of carbon peaking and carbon neutrality, constructing clean energy generators on roof tops is widely recommended in different regions of China.The microgrid consisting of wind power, photovoltaic power and energy storage devices, can reduce carbon emissions from regional production activities through new energy generation, and improve the power supply reliability of living and office areas.To optimize the return of the investment on microgrid, the ratio of wind power, photovoltaic power and energy storage capacity of a hybrid system has been the focus of researches. According to the light condition, wind speed and other unique geographical features in Hainan Province, the optimal allocation of a wind-PV-battery hybrid system in smart microgrid is calculated by particle swarm optimization algorithm. Data collected from the living and office areas of the smart microgrid demonstrative project are used in an economic analysis, which provide theoretical basis and data resources for the further energy efficiency retrofit of smart microgrids.

Keywords: smart microgrid; particle swarm optimization algorithm; carbon neutrality; capacity ratio; multi-objective optimization; wind power; photovoltaic power generation; energy storage; energy conservation and emission reduction; electric energy substitution

0 引言

我国环保问题严峻,在“双碳”目标下落实“电能替代”具有重大意义。同时,城镇化建设迅速,用电量负荷逐年提升。充分分析办公住宅区配电网络负荷特点,对其进行节能改造,增加小型风光储智慧微电网系统,可在一定程度降低办公住宅区对外购电力的依赖,降低居民用电开支,提高人民生活质量[1-2]。

微电网中分布式能源及储能系统的装机容量受当地天气情况、负荷大小、经济效益等多方面影响[3-4]。文献[5]提出了一种微电网安全运行方案,利用控制储能运行模式实现微电网离网转并网无缝切换,缩短双向储能换流器(Power Conversion System,PCS)并网后电压频率工作模式时间,从而避免储能出现大电流运行和系统限功率运行的现象。文献[6]分析了风光不平衡出力对微电网系统造成的影响,并以平滑效果最优与投资成本最低为目标函数,利用遗传算法求解风光储容量最优配比方

收稿日期:2022-03-11;**修回日期**:2022-05-13
基金项目:中国电力建设集团科技项目(DJ-ZDXM-2019-48);
海口市重大科技计划项目(2020-025)

案。文献[7]针对含可调节负荷的大型微电网系统，分析清洁电力在进行市场交易时存在的风险，利用综合评价法实现对风光发电在市场交易的合理管控，为绿电参与市场交易提供参考。文献[8]提出了一种含氢储能的微电网结构，结合清洁能源利用率及负荷缺失率为指标，分析以最小总净现值成本为目标下的风光储容量配比方法。文献[9]构建了风、光电源的出力模型，基于非样板机的采集数据真实反应新能源出力场景，结合实测数据改进样板机出力算法，进而更加准确地测算风光容量配比。文献[10]首先研究了不同类型储能电源的容量配比，利用遗传算法确定不同类型储能系统的分界频率，从而求取储能最优容量。文献[11]从能量最优管理角度出发，增加储能充放电限制条件，通过粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法对分布式电源日调度方式进行优化，以最小运行成本为目标函数，解出分布式电源最佳出力方案。文献[12]针对综合型园区微电网建设，结合园区冷、热、电需求情况进行电能替代，以微电网项目总投资成本和电能替代收益为目标条件，分析了在电源类型、接入位置与容量不同出力组合下的综合经济成本最低方案。文献[13]提出了2种微电网能源调度方案，并分别对微电网系统在不同调度方式下的节能减排效益进行分析，在不同区域环境和气候下，得出2种调度策略下最合理的网内分布式电源容量配比。

由于微电网项目需要用到很多一次设备，包括分布式电源、储能装置及各种逆变器，设计结构复杂[14-16]。从微电网系统整体设计、施工、维护的角度出发，分层次地从不同方面对微电网技术的经济性和可靠性进行研究。依据某实际微电网改造示范项目的安装环境、各电源容量配比、经济效益情况，从办公住宅小区智能微电网改造入手，分析其建筑环境与负荷类型，简化约束条件和容量配比选取原则，利用PSO算法提取经济效益最优目标。

1　微电网模型

在海南省大力建设国际自贸岛的背景下，对当地某办公住宅小区进行智慧微电网改造，将分布式电源安装于住宅楼顶，其附近没有遮蔽物，即节约了地面空间，又可以充分利用小区楼顶区域风力和光伏（Photovoltaic，PV）资源，同时防止外界因素导致的偶然性破坏。由于其建在楼顶，故需要将三相电缆与通信线缆引至配电房。

在原有配电设计的基础上，增加风力发电机和PV分布式电源、双向换流装置、储能系统及能量管理控制系统，在保证最大程度利用新能源的前提下，减少工程投资。PCS负责控制储能电池对微电网电母线的充放电[17]。微电网结构如图1所示，由图1可见，系统中分布式电源与负荷均通过断路器接入0.4 kV微电网母线，并通过PT1与PT2采集微电网公共联接点两侧的电压与频率数据，配电柜每一回路均配有三相电流互感器（Current Transformer，CT）用于采集各回路电流数据。此类数据利用IEC104通信报文汇总接入微电网中央控制器，中央控制器根据负荷的功率需求向电源控制器发出功率分配信号[18]。

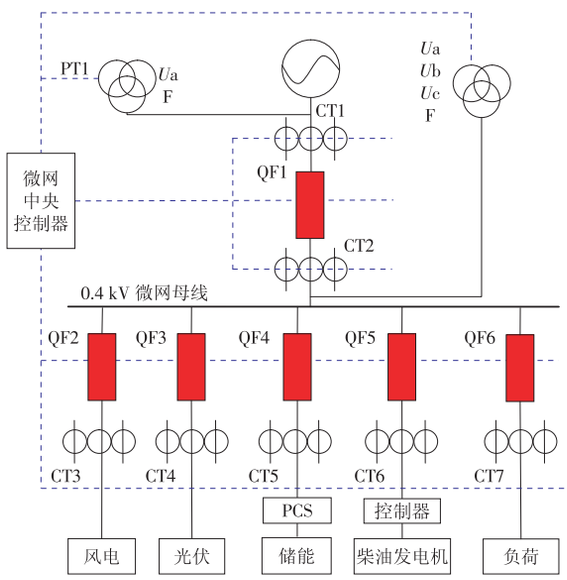

图1　微电网系统结构

Fig. 1　Structure of a microgrid system

2　分布式与储能系统建模

2.1　风力发电机数学模型

对于住宅小区的节能改造，主要投资包括PV板、风力发电机、储能系统和能量管理控制系统的投入。当前主流风力发电机有垂直轴风力发电机和水平轴风力发电机，本项目选取Darrieus式H型风轮的垂直轴风力发电机，其具有运行噪声低、启动风速低、风能利用率高、空间占用小、气动性能稳定等优点[19-20]。垂直轴风力发电机造价相对较高，为7 000~9 000 元/kW。风力发电机发电功率P_{Wt}受风速v_t影响，可用公式(1)表示[21]。

$$P_{Wt}=\begin{cases}0, & 0\leqslant v_t\leqslant v_{ci}\\ P_r\left(A+Bv_t+Cv_t^2\right), & v_{ci}\leqslant v_t\leqslant v_r\\ P_r, & v_r\leqslant v_t\leqslant v_{co}\\ 0, & v_t>v_{co}\end{cases},\quad(1)$$

式中：v_{ci}为切入风速，3 m/s；v_r为额定风速，12 m/s；v_{co}为切出风速，20 m/s；P_r为额定输出功率，kW。

2.2 PV组件数学模型

PV组件实际发电功率P_{PV}可用式(2)描述[22]。

$$P_{PV} = P_{STC} + \beta_G\left[1 + k\left(t_C - t_{STC}\right)\right], \tag{2}$$

式中：P_{STC}为PV组件在标准环境下(温度为25 ℃，辐照强度为1 MW/m²，大气质量为1.5)的额定功率，kW；β_G为当前辐照强度参考比；k为辐照比例增益，取0.004 5；t_C为工作点电池的表面温度，℃；t_{STC}为参考温度，25 ℃。

2.3 储能元件数学模型

选用铅碳电池作为主要储能元件，其具有响应快速、寿命长、充放电时间快等优点，其电荷储存模型为[23]

$$E_{B,t} = \begin{cases} E_{B,\min}, & E_{B,t-1} + \Delta E_t \leqslant E_{B,\min} \\ E_{B,t-1} + \left|\Delta E_t\right| \Delta E_t, & E_{B,\min} < E_{B,t-1} + \Delta E_t \leqslant E_{B,\max} \\ E_{B,\max}, & E_{B,t-1} + \Delta E_t > E_{B,\max} \end{cases}, \tag{3}$$

$$\Delta E_t = \left(E_{WP,t}\eta_{inv} - E_{L,t}\right)\eta_B, \tag{4}$$

式中：$E_{B,\min}$为最小储能电能量，10 kW·h；$E_{B,\max}$为最大储能电能量，60 kW·h；储能电池随时间t而吸收或释放的电荷可用$\left|\Delta E_t\right|$表示；η_{inv}为PCS的转换效率；η_B为铅碳电池与PCS之间的双向换能效率；$E_{WP,t}$为分布式电源随时间t而发出的电能，kW·h；$E_{L,t}$为供电负荷随时间t而消耗的电能，kW·h。

2.4 约束条件

蓄电池的寿命及充放电深度与充放电频率有关，其除作为紧急和检修用供电电源外，同时负责对微电网进行功率补充，为提升经济效益服务。蓄电池位于办公小区内部，便于对其进行定期维护，以延长投产使用年限。

该系统采用铅碳蓄电池作为化学储能装置，建议其充放电功率不超过额定容量的20%，在t时间风力发电机和PV发电功率大于负荷功率时蓄电池进行充电，蓄电池充电约束条件为

$$\begin{cases} E_{WP,t}\eta_{inv} - E_{L,t} > 0 \\ \Delta E_t^+ \leqslant 0.2E_{B,t-1} \end{cases}, \tag{5}$$

蓄电池放电约束条件为

$$\begin{cases} E_{WP,t}\eta_{inv} - E_{L,t} < 0 \\ \Delta E_t^- \leqslant 0.2E_{B,t-1} \end{cases}, \tag{6}$$

式中：ΔE_t^+，ΔE_t^-分别为储能电池组随时间t而吸收和释放的电能，kW·h。

荷电状态约束用于描述蓄电池的充放电深度，即其充放电荷控制在充放电阈值内，其约束形式为

$$E_{B,\min} \leqslant E_{B,t} \leqslant E_{B,\max}。 \tag{7}$$

由于该系统中设有柴油发电机，在其发电过程中产生的碳排放成为一个不可忽视的问题，故将发电阶段的CO_2排放做为约束条件考虑，其碳排放约束形式为

$$E_3 x_3 \delta_3 \leqslant e_{max}, \tag{8}$$

式中：E_3为柴油发电机的年发电量，kW·h；x_3为柴油发电机数量；δ_3为采用柴发发电的碳排放因子；e_{max}为系统产生CO_2所能承受的峰值。

3 微电网经济效益建模

微电网经济性体现在多个方面，在项目初步设计阶段对其进行估算，综合考虑系统的经济价值和环保价值。

在确定智能微电网改造结构和各电源模型后，需要确定微电网中的风力发电机、PV、储能的容量配比。由于我国南方海岛地区多受副热带高压和热带气旋影响，其风能和光能资源因季节而不同，本文对本地区风速和辐照强度情况建立数据库，结合负荷用电情况，引入分时电价机制，以年平均创造利润最大为目标函数，应用PSO算法计算风光储配比方案最优。

3.1 目标函数

风光资源及负荷变化在不同月变化较大，本文以月为单位求取年最大经济效益，其受不同类型电源装机容量、并网点交换功率影响较大。

应用PSO算法求解最大经济效益模型，以风力发电机装机容量P_{Wt}，PV发电装机容量P_{PVt}，储能装机容量E_{Bt}，并网交换功率P_{gt}为自变量，以年最大经济效益F为应变量，则

$$\max F = \sum_{t=1}^{12}\left[c_1\left(P_{Wi}(t) + P_{PVi}(t)\right) + c_t E_{Bi}(t) + c_2 P_{gi}(t)\right], \tag{9}$$

式中：$P_{gi}(t)$在孤岛运行时为0；c_1为分布式电源受天气影响的利用效率；c_t为储能利用效率；c_2为市电交换功率转换系数，取决于即时发电量和负荷情况，此处取10%。

将式(9)中分布式电源与储能的装机容量、并网交换功率作为算法寻优量，则

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} P_{Wi} + P_{PVi} \\ E_{Bi,j} \\ P_{gi,j} \end{Bmatrix}, \begin{matrix} i = 1, 2, \cdots, N_g(N) \\ j = N_g(N) + 1, \cdots, N + N_{st} \end{matrix}, \tag{10}$$

式中：$\{x\}$为寻取不同类型电源的N个不同优化解，优化类型包括所有分布式电源、储能系统和交换功率，其中储能系统在PCS控制下可以调节充放容量。

3.2 寻优过程

以月平均负荷、系统建设投资成本、运行维护成本为输入依据，在拟选取装机容量范围、化学储能电池充放电约束条件、荷电量约束条件、碳排放

约束条件下,利用PSO算法对最佳风光储容量配比进行寻优,具体参数设置见表1。

表1　电力经济优化参数

Table 1　Economic parameter of power optimization

分布式电源	参数
分布式装机容量范围/kW	0~60
电网功率范围/kW	1~50
储能双向换流器功率范围/kW	-30~30
最大迭代次数	300
搜索空间维数	72
粒子个数	600

首先进行参数初始化,将电力经济优化参数进行变量赋初值,风力发电机、PV装机容量作为种群个体,利用600个无规律的粒子求出初始风力发电机、PV装机容量,并更新各个电源容量和交换功率的权重系数c_1,c_2,c_t,经过约束条件进行边界处理后,进入下次迭代寻优,如图2所示。

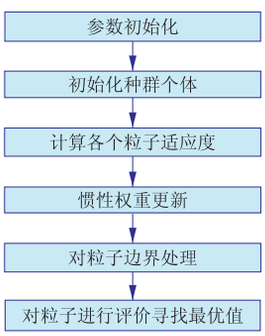

图2　PSO算法简化寻优流程

Fig. 2　Simplified optimization process of PSO algorithm

3.3　风光储容量选取原则

除微电网并网运行经济性指标外,办公住宅小区的容量配比选取方法还需要综合考虑以下几个方面。

(1)将风力发电机与PV设备设于楼顶,考虑到减少噪声、减少占地面积、防雷防台风及风资源在不同月份波动较大,风力发电机的装机容量不宜太大。

(2)办公住宅小区用电高峰在08:00—23:00,故夜间以储能为主,白天以PV发电为主,风力发电机作为补充。

(3)本项目可以孤岛运行,储能可以在PV和风能条件极差时独立为负荷供电,故储能最大输出功率应略大于负载基本功率。

(4)本项目以自发自用为主,并网时避免出现余电上送和弃风弃光现象,故PV要根据平均辐照强度确定装机容量。

4　算例分析

4.1　改造项发电量统计

微电网系统要综合考虑负荷和当地环境影响。首先对办公住宅小区负荷进行统计,具体数据见表2。由表2可见,负荷峰值功率为36.55 kW,预计常开负荷为20.00 kW,根据3.3节所述原则,考虑到孤岛运行时,保证微电网有能力为负荷供电,储能装机容量采用60.00 kW,PCS选用30.00 kW,以保证PCS以满功率输出时,储能系统可以连续运行2 h,起应急电源作用。

表2　办公住宅区负荷统计

Table 2　Load statistics of the living and office area

设备类型	功率/kW	数量/台	合计/kW
电脑	0.25	16	4.00
空调	2.00	5	10.00
照明	0.04	50	2.00
复印机	1.50	2	3.00
打印机	0.50	10	5.00
电热水器	2.00	1	2.00
电冰箱	0.05	1	0.05
机房设备	4.00	1	4.00
音控设备	1.00	1	1.00
会议设备	5.50	1	5.50
总计			36.55

风力发电机和PV发电量受天气影响,本项目在楼顶设置小型气象监测仪采集数据,表3为当地每月辐照值和距地面24 m高处的风速数据。

表3　太阳辐照与风速数据

Table 3　Solar radiation and wind speed

月份	多年月平均总辐照值/(MJ·m^{-2})	风速/(m·s^{-1})
1	522.36	3.78
2	558.36	3.78
3	702.00	3.00
4	747.36	3.33
5	738.72	4.78
6	678.24	4.66
7	688.68	5.78
8	649.44	2.50
9	585.36	4.55
10	543.60	5.55
11	465.48	4.22
12	436.32	4.33

由表3可见,全年7—10月多出现强风天气,风资源较丰富,但阴天较多,辐照较差;4—10月光照资源丰富,但风资源匮乏。通过表3调整式(9)中分布式电源天气影响利用效率c_1。

设备因装机容量和后期维护而产生相应费用，在考虑经济性时，需将装机成本和维护成本考虑在内。表 4 为 2021 年度风光储平均装机成本，由表 4 可见，PV 的装机成本和维护成本较高，风力发电机次之，储能投入成本最低。但是从环保角度来讲，办公住宅区常采用化学储能，且其需要外部电源进行充电，其全周期使用寿命与充放电次数也有关系。

表 4　不同电源类型装机成本

Table 4　Installation cost of different power generator

电源	装机成本/(万元·kW^{-1})	运行维护成本/[元·(kW·a)$^{-1}$]
PV	0.45	100
风电	1.00	130
储能	0.15	20

4.2　微电网电源优化配置的经济性分析

依据表 3 和表 4 的负荷、风速、光照数据作为基本参数，以储能充放电、荷电状态、碳排放为约束条件，以年发电收益为寻优目标解，建立风力发电机与 PV 装机容量配比数据库，采用 PSO 算法寻优，得到优化结果如图 3 所示。

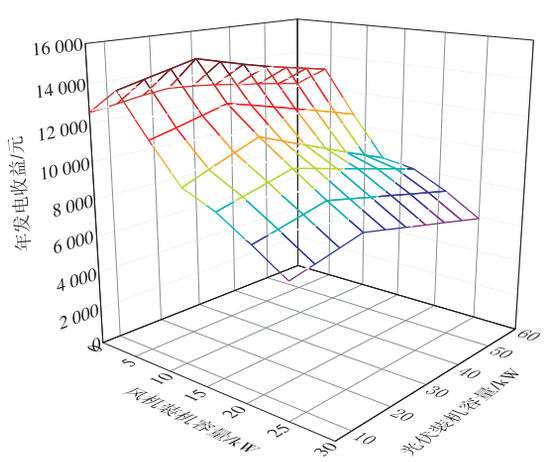

图 3　风电与 PV 装机容量比例对年发电收益的影响

Fig. 3　Influence of installed capacity of wind power and photovoltaic power generators on annual power generation income

4.3　经济性分析

本项目以保障办公住宅小区基本负荷连续供电为首要目标，经 4.2 节分析可知，储能装机容量所占比重较大，PV 发电次之，风力发电机最小，风光储容量配比为 3 kW∶20 kW∶60 kW 较为合适，年发电收益约为 1.5 万元，微电网运行模式如下。

(1)在并网条件下，办公住宅小区白天及傍晚用电量大，PCS 与分布式电源互补，减少消耗来自市电的交换功率，此时分布式电源所发全部电量为自发自用状态；在午夜时小区负荷耗电量很小，风力发电机和市电通过 PCS 向储能电池充电。

(2)当市电断电时，白天光照充足，储能系统充放电量保持平衡，为系统提供恒压恒频电源点，分布式电源跟随其发电；在傍晚时，小区耗电量较大，由于此时 PV 发电量为 0，风力发电机波动性较大，储能作为主要电源继续向用户供电。

图 4 为分布式电源月均发电量。由图 4 可见，住宅小区在此装机容量配比模式下，符合 3.3 节所述风光储容量选取原则，其充分利用海南充足的光照资源，交换功率达到最低，风力发电机仅对负荷进行适当补充。在保证可靠性和经济性的指标下，符合兼顾充分利用再生资源而取得最大经济效益，见表 5。

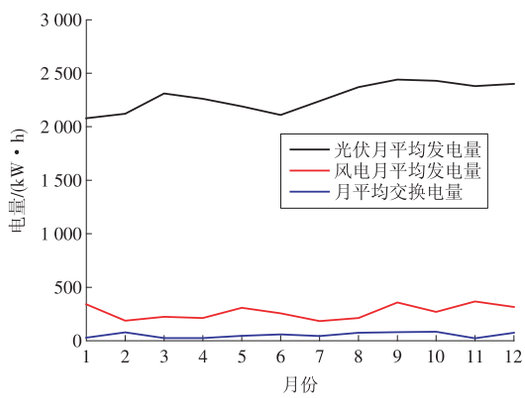

图 4　分布式电源月均发电量

Fig. 4　Monthly average power generation of a distributed generator

表 5　项目经济效益

Table 5　Economic benefits of the project

指标	数据
平均年发电量/(MW·h)	23.3
平均年节约标准煤/t	7.048
平均年减少 CO_2 排放/t	19.385

根据国家能源局数据，2021 年全国供电标准煤耗 302.5 g/(kW·h)；根据中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告》，2020 年全国单位火电发电量 CO_2 排放量约为 832.0 g/(kW·h)。

5　结论

在小型风光储微电网项目中，风力发电机、PV 在发电过程中碳排放较小，风力发电机在退役后大多数材质可进行回收循环利用，电化学储能的综合效益受其使用年限影响。本文充分评估办公住宅小区负荷情况，设计微电网网架改造结构，利用 PSO 算法对风光储容量进行配比寻优，通过算例分析可以得出以下结论。

(1)提出 PSO 寻优算法，以地区风速、光照量和负荷功率作为参考数据，可实现以最大经济利润为目标函数得出全局最优位置，从而得出微电网中风

光储的实际装机容量配比。

（2）结合办公住宅区风、光资源条件，可看出在建筑物较多的办公住宅区域，风资源有限，而屋顶光资源不受地理位置限制，考虑海南台风较多的气候特点，建议优先利用屋顶进行PV发电建设，符合国家鼓励建设分布式屋顶PV的政策。

（3）与类似的寻求微电网最大综合经济效益模型相比，本文所采用的PSO算法应用简单，经过海南某办公住宅小区实际项目验证，数据贴合实际，为中国南方沿海办公住宅区的智能微电网节能改造项目提供了理论和实践参考。

参考文献：

[1]詹天津，谢玉荣．国内分布式光伏发展形势分析及思考[J]．华电技术，2021，43(12)：60-65.
ZHAN Tianjin，XIE Yurong. Development status analysis and consideration on domestic distributed PV energy [J]. Huadian Technology，2021，43(12)：60-65.

[2]卞在平，王鑫，王小明．区域微电网离网转并网改造方案设计[J]．华电技术，2018，40(10)：19-21，76-77.
BIAN Zaiping，WANG Xin，WANG Xiaoming.The design of reginal microgrid switched from island to grid-connected [J]. Huadian Technology，2018，40(10)：19-21，76-77.

[3]朱燕梅，陈仕军，黄炜斌，等．一定弃风光率下的水光风互补发电系统容量优化配置研究[J]．水电能源科学，2018，36(7)：215-218.
ZHU Yanmei，CHEN Shijun，HUANG Weibin，et al.Optimal capacity configuration of hydro-photovoltaic-wind complementary power generation system under wind and photovoltaic curtailment [J]. Water Resources and Power，2018，36(7)：215-218.

[4]周磊，董学育，朱建忠，等．基于改进蜂群算法的微电网优化调度[J]．电气自动化，2020，42(5)：45-47.
ZHOU Lei，DONG Xueyu，ZHU Jianzhong，et al. Optimal micro-grid scheduling based on the improved bee colony algorithm [J].Electrical Automation，2020，42(5)：45-47.

[5]张程翔，汪科，陆莹，等．微电网中储能运行模式自发切换的对策研究[J]．电气传动，2021，51(23)：70-75.
ZHANG Chengxiang，WANG Ke，LU Ying，et al. Research on countermeasures for spontaneously mode switching of energy storage system in microgrid [J].Electric Drive，2021，51(23)：70-75.

[6]吴倩，王洋，王琳媛，等．计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J]．电测与仪表，2020，59(4)：112-119.
WU Qian，WANG Yang，WANG Linyuan，et al. Optimal capacity allocation of hybrid energy storage system in wind-solar-battery system considering fluctuation smoothing and economy [J].Electrical Measurement & Instrumentation，2020，59(4)：112-119.

[7]文旭，陈鑫，张爱枫，等．含可调节负荷的风光互补微电网随机调度市场风险管控方法[J]．电网技术，2021，45(11)：4308-4318.
WEN Xu，CHEN Xin，ZHANG Aifeng，et al. Stochastic dispatching market risk control for wind and photovoltaic microgrid integrated with adjustable load [J].Power System Technology，2021，45(11)：4308-4318.

[8]李彦哲，郭小嘉，董海鹰，等．风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]．电力系统及其自动化学报，2020，32(6)：123-128.
LI Yanzhe，GUO Xiaojia，DONG Haiying，et al. Optimal capacity configuration of wind/PV/storage hybrid energy storage system in microgrid [J].Proceedings of the CSU-EPSA，2020，32(6)：123-128.

[9]李延和，杨立滨，郝丽丽，等．基于改进样板机法的风光互补新能源电站容量配比优化[J]．电力工程技术，2022，41(2)：224-233.
LI Yanhe，YANG Libin，HAO Lili，et al. Capacity ratio optimization of wind-solar hybrid new energy power station based on improved model-generator method [J]. Electric Power Engineering Technology，2022，41(2)：224-233.

[10]李湃，方保民，祁太元，等．基于源-荷匹配的区域电网风/光/储容量配比优化方法[J]．中国电力，2022，55(1)：46-54.
LI Pai，FANG Baomin，QI Taiyuan，et al.Capacity proportion optimization of wind，solar power and battery energy storage system for regional power grid based on source-load matching [J].Electric Power，2022，55(1)：46-54.

[11]胡林静，刘彤，侯梦梦．基于免疫粒子群算法的风/光/柴/储容量优化配置[J]．科学技术与工程，2020，20(36)：14967-14973.
HU Linjing，LIU Tong，HOU Mengmeng.Optimal allocation of wind/photovoltaic/diesel/storage capacity based on immune particle swarm optimization [J]. Science Technology and Engineering，2020，20(36)：14967-14973.

[12]杨颖，刘友波，黄媛，等．电能替代下考虑需求响应的综合园区风光储配置方法[J]．电力建设，2021，42(10)：9-18.
YANG Ying，LIU Youbo，HUANG Yuan，et al.Allocation of wind-solar-battery under electric energy substitution in integrated park considering demand response [J]. Electric Power Construction，2021，42(10)：9-18.

[13]罗星岩，马少华．考虑经济性的大规模风光储系统容量优化配置[J]．东北电力技术，2021，42(9)：13-17，25.
LUO Xingyan，MA Shaohua. Optimal configuration of large-scale wind and solar storage system capacity considering economy [J].Northeast Electric Power Technology，2021，42(9)：13-17，25.

[14]陈志峰，梁海锋，张紫凡，等．楼宇光储直流微电网结构及控制[J]．电气自动化，2022，44(2)：41-44.

CHEN Zhifeng, LIANG Haifeng, ZHANG Zifan, et al. Structure and control of DC microgrid for building optical storage [J].Electrical Automation,2022,44(2):41-44.

[15]吴小涛,谭超,王国博.基于自适应PI控制器的直流微电网电压控制策略研究[J].华电技术,2021,43(9):14-22.
WU Xiaotao, TAN Chao, WANG Guobo. Voltage control strategy for DC microgrid based on adaptive PI controller [J].Huadian Technology,2021,43(9):14-22.

[16]ZHANG S S, YANG W J, LI X D, et al. Economic evaluation of wind-PV-pumped storage hybrid system considering carbon emissions [J].Energy Reports, 2022,8(S5):1249-1258.

[17]郝晓弘,王锐,裴婷婷,等.基于改进鲸鱼算法的微电网系统容量优化研究[J].自动化与仪表,2022,37(3):11-16.
HAO Xiaohong,WANG Rui,PEI Tingting,et al.Research on microgrid system capacity optimization based on improved whale algorithm [J].Automation & Instrumentation,2022,37(3):11-16.

[18]李彬,杜亚彬,曹望璋,等.考虑风光储互补与工作负载分配的数据中心优化调度[J].现代电力,2022,39(3):356-363.
LI Bin, DU Yabin, CAO Wangzhang, et al. Optimal scheduling of data center considering wind-solar-storage complementary and workload distribution [J]. Modern Electric Power,2022,39(3):356-363.

[19]程韧俐,梁顺,傅强,等.基于虚拟储能的微电网风光储容量优化配置方法研究[J].可再生能源,2021,39(3):372-379.
CHENG Renli,LIANG Shun,FU Qiang,et al.Research on optimal configuration method of microgrid storage capacity based on virtual energy storage [J]. Renewable Energy Resources,2021,39(3):372-379.

[20]汪希玥,徐箭,廖思阳,等.考虑虚拟储能特性的柔性负荷调控裕度评估方法[J].华电技术,2021,43(9):37-45.
WANG Xiyue,XU Jian,LIAO Siyang,et al.DFlexible load regulation margin evaluation method considering virtual energy storage characteristics [J]. Huadian Technology, 2021,43(9):37-45.

[21]郝晓弘,郝雪君,周强,等.风光气储联合发电最优容量配比问题研究[J].自动化与仪表,2020,35(2):90-94.
HAO Xiaohong, HAO Xuejun, ZHOU Qiang, et al. Research on optimal capacity ratio of wind, solar and natural gas storage combined generation [J].Automation & Instrumentation,2020,35(2):90-94.

[22]肖白,刘健康,张博,等.考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能的并网型微电网优化配置[J/OL].电力自动化设备,2022.(2022-04-25)[2022-05-11].https://doi.org/10.16081/j.epae.202204074.
XIAO Bai, LIU Jiankang, ZHANG Bo, et al. Optimal configuration ofgrid-connected microgrid with hydrogen energy storage considering ladder-type carbon trading and demand response [J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2022. (2022-04-25) [2022-05-11]. DOI: 10.16081/j.epae.202204074.

[23]王少林,王刚,王晓磊,等.基于改进蜂群算法的电动汽车微电网优化调度[J].电气应用,2022,41(4):63-70,13-14.
WANG Shaolin, WANG Gang, WANG Xiaolei, et al. Optimal scheduling of electric vehicle microgrid based on improved bee colony algorithm [J]. Electrotechnical Application,2022,41(4):63-70,13-14.

（本文责编：惠忻）

作者简介：

王鑫(1988)，男，工程师，硕士，从事微电网方面设计工作，584137368@qq.com；

陈祖翠(1989)，女，工程师，从事电力工程造价方面的工作，864819069@qq.com；

卞在平(1982)，男，高级工程师，从事智能配网设计工作，291520238@qq.com；

王业耀(1985)，男，工程师，从事供配电设计工作，546923640@qq.com；

吴育苗(1983)，男，工程师，从事输电线路结构的设计工作，493979690@qq.com。