

# 基于风-光-抽-柴离网型微网的优化运行研究

李志伟<sup>1</sup>, 陈仕彬<sup>2</sup>, 肖玉玲<sup>1</sup>

(1. 河南应用技术职业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450042; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为有效解决偏远地区用电问题, 建立以风力、光伏、柴油发电及抽水蓄能电站组成的离网型微型电网。风电光伏作为微电网的主要出力对象, 柴油发电作为紧急备用供电措施, 抽水蓄能电站作为电能储转设备完成对可再生能源的存储与转换。分析微电网组成部分的出力特性及用户负荷, 以运行效益最高及系统缺电率最低为优化目标, 建立联合运行的孤岛型风-光-抽-柴微电网多目标寻优模型。设置实际算例参数, 通过改良的多目标克隆选择寻优算法求解微电网系统运行模型, 得到不同偏好设置下各个发电机组在每个优化时段出力值, 验证了优化方法的可行性, 优化方法能够解决电网孤岛区域用电问题, 减少环境污染, 提高经济性。

**关键词:** 风电; 光伏; 抽水蓄能; 孤岛; 微网; 优化运行

中图分类号: TP18; TM61

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0006-06

## Research on optimal operation of off-grid microgrid based on wind power-photovoltaic-pumped storage-diesel power generation

LI Zhiwei<sup>1</sup>, CHEN Shibin<sup>2</sup>, XIAO Yuling<sup>1</sup>

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Henan Vocational College of Applied Technology, Zhengzhou 450042, Henan, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the electricity problem in remote areas, an off grid microgrid composed of wind, photovoltaic, diesel power generation, and pumped storage power stations is established. Wind and photovoltaic power are the main output objects of microgrids, diesel power generation is used as an emergency backup power supply measure, and pumped storage power stations are used as electrical energy storage and conversion equipment to store and convert renewable energy. Analyze the output characteristics and user loads of the components of the microgrid, and establish a multi-objective optimization model for the joint operation of the islanded wind solar pumping diesel microgrid with the optimization objectives of maximizing operational efficiency and minimizing system power shortage rate. By combining actual calculation parameters and using an improved multi-objective clone selection optimization algorithm, the joint operation model was solved to obtain the output values of each generator unit at each optimization period under different weight settings. The feasibility of the optimization method was verified, which can solve the problem of electricity consumption in isolated areas of the power grid, reduce environmental pollution, and improve economy.

**Keywords:** wind power; photovoltaic; pumped storage; isolated island; microgrid; optimized operation

人口持续增长、经济高速发展、对全球能源资源提出了前所未有的挑战;同时化石能源的不可再生性与对环境的破坏性突现出来的问题日益严重,全球各个国家的经济发展不同程度受到能源短缺环保政策的制约。寻求清洁可再生能源的大规模利用是解决问题的关键所在。太阳是地球上所有能量的动力源泉,太阳时刻照射的地球表面,同时可以引起地球表面不同位置的温度差,使空气流动,产生风能。在清洁新能源中,风力发电、光伏发电得到较早、广泛、大规模与成熟的开发利用。风电、光电、水电等绿色能源受到全球各国科研工程专家的高度关注与环保政策的大力支

持,发展迅猛,在电力产业中占有很高的比重,逐步替代常规能源发电<sup>[1-4]</sup>。我国也正在加快构建新型电力系统,2024年底,我国光伏、风电新增装机容量突破2亿千瓦,我国可再生能源发电装机容量将要达到16.53亿千瓦。

把风电、光伏、柴油发电、抽水蓄能电站等分布式发电组成孤岛型离网微型电网,可以有效提高分布式能源的利用率,减少弃能浪费,并且在平滑风电、光伏发电波动性方面有着天然优势<sup>[5]</sup>。国家电网公司发布的“碳达峰、碳中和”行动方案中提到,将支持分布式能源和微电网发展,发挥微电网就地消纳分布式电源、集成优化供需资源作用,推

收稿日期:2024-10-16;录用日期:2025-02-15

基金项目:河南应用技术职业学院校级科研项目(2024-KJ-A81);河南省高等学校重点科研项目(24B480008);河南应用技术职业学院2020年度青年骨干教师资助(2020-GGJS-J001);河南应用技术职业学院校级科研项目(2020-KJ-23)

作者简介:李志伟(1985—),男,硕士研究生,副教授。研究方向:工业自动化检测与控制技术、风力发电控制技术研究。

引用本文:李志伟,陈仕彬,肖玉玲. 基于风-光-抽-柴离网型微网的优化运行研究[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(4):6-10, 28. (LI Zhiwei, CHEN Shibin, XIAO Yuling. Research on optimal operation of off-grid microgrid based on wind power-photovoltaic-pumped storage-diesel power generation [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(4):6-10, 28.)

动电网向能源互联网升级。欧盟、美国对微电网的研究与发展较早,技术也较为成熟,制定了不同的政策和目标,以刺激可再生能源在能源结构中的渗透,并克服关键的财政和经济障碍。

要根据用户所处的区位环境、气候气象、接入电网情况、风-光-柴-抽发电单元工作特性、电能供求情况与系统设计等相关参数来对微电网进行优化配置,保证微电网的最佳工作状态,发挥在经济性、可靠性、环保性等方面的优势<sup>[6]</sup>。微电网电源优化配置具体内容:首先对可再生资源自然特性和负荷需求进行充分的分析,根据分布式电源的输出特性建立其出力模型和微电网优化配置模型,然后根据系统约束条件及其评价指标,制定合适的运行控制策略,基于微网全生命周期内的运行信息对分布式电源设备类型、容量和位置等进行综合优化与设计,以实现微网中各分布式电源、储能装置和负荷的最佳匹配<sup>[7]</sup>。

与传统发电机发电相比,风电、光伏等可再生分布式发电的输出功率取决于自然资源状况,且随着气候条件的变化而变化。在具体优化配置过程中,一般会在系统创建模型、指标评价、策略运行、约束条件、决策方法、求解方法、分析评估等方面进行具体分析。国外国内专家学者对微电网优化配置技术的核心问题进行了大量研究,优化配置技术体系得以逐步趋于完善<sup>[8]</sup>。

微电网是一个运行灵活、配置完整的局部型微电力系统,可以离网孤岛运行,解决大电网接入不到的孤立地区用电问题。如果没有对组成微电网系统的各分布式发电机组进行合理的容量匹配与出力调度,微电网电能供应的环保性、可靠性与安全性就不能得到保障<sup>[9-11]</sup>。世界各国科研专家对分布式微电网不同发电单元装机容量及系统模型建立求解领域做了大量调查研究。文献[12]构建了

计及分布式储能的微电网优化运行调度模型,通过遗传算法求解调度模型,得到微电网群经济优化调度方案,最终算出优化后的运行成本。文献[13]搭建了基于风-光-沼-储的微电网交-直流混合系统模型,以可再生能源入网占比最高,微网系统运行成本最低,碳排放最少为目标进行优化求解,得出不同机组的容量配置。文献[14]为解决微电网群在规划调度中不同子网间的利益冲突问题,提出一种计及电能交易与需求响应的微网群分布式日前运行效益优化调度方法,通过虚拟算例求解对所提方案验证分析,计算结果显示所提方案可以有效降低微网群整体经济调度运行成本。文献[15]提出一种考虑微网优先自治的分布式智能配电系统优化调度方法,在该系统的运行调度中考虑了微网优先自治的决策偏好。鲜有文献对运行日效益和缺电率进行同时分析。

针对若干分布式发电单元联合优化运行规划问题,考虑不同发电单元的出力特性、技术特点,创建风-光-抽-柴离网孤岛型微电网运行模型。创新提出以微电网系统的运行日收益最高、系统缺电率最低为目标创建多微分布式发电单元协调出力的多约束、非线性的多目标优化运行模型,结合实际算例,采用改进的多目标克隆选择算法求解模型,得出 Pareto 解集,从而得到不同权重偏好下的各个发电单元的出力值。

## 1 分布式发电离网型微网模型

### 1.1 离网型微电网的结构组成

根据景区实际电力负荷情况、抽水蓄能电站配建容量及运行特性、柴油发电机组容量情况,为最大限度利用景区风、光清洁可再生能源,减少弃能,构建风-光-抽-柴分布式发电离网型微网模型,如图1所示。

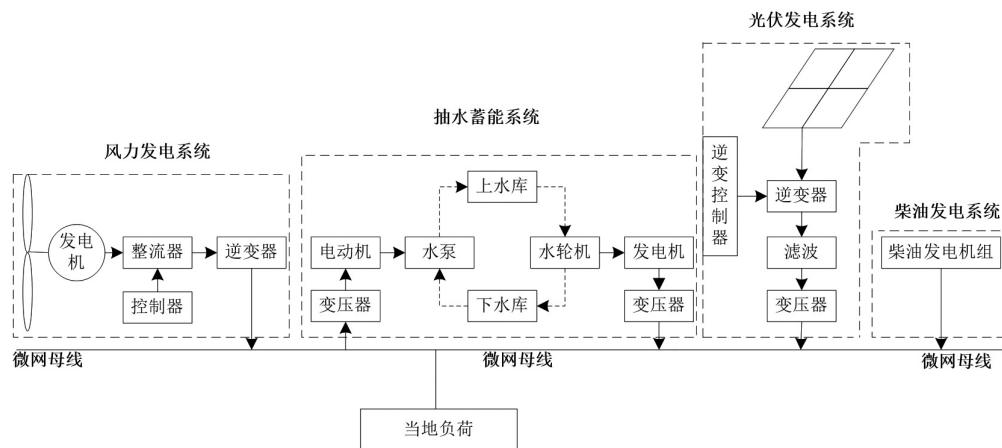


图1 离网型微电网的系统结构

Fig. 1 System structure of off-grid microgrid

离网型微电网系统主要构成部分包括风电系统、抽水蓄能发电系统<sup>[16-19]</sup>、光伏系统、柴油机组发电系统、当地负荷系统。在优化运行日各个时段内,风能、光伏首先输送电力给景区负荷,多余电能驱动蓄能电站水泵进行抽水蓄能操作,以重力势能储存在上水库。当风力、光伏出力

小于景区负荷时,上水库的水推动水轮机,发电机进行发电操作,重力势能转化为电能输送给景区电网。当风-光-水力发电都不能满足景区负荷时,柴油发电机启动,满足景区负荷。整个分布式发电微电网运行模型以提高运行收益及减少缺电率(碳排放)为优化目标来确定各个

分布机组的运行及能量流向。

### 1.2 风力发电单元模型

风力发电的功率输出<sup>[20]</sup>表示为

$$P_w = \begin{cases} \frac{\pi}{8} \rho D^3 v_j^3 C_w = P_e \frac{v_i - v_0}{v_e - v_0}, & v_0 \leq v_i < v_e \\ P_e, & v_e \leq v_i \leq v_o \\ 0, & v_0 < v_i < v_i \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C_w$ 、 $\rho$  分别为风电利用系数、空气密度数值;  $v_i$  为风力切入速度;  $v_o$  为风力切出速度;  $v_j$ 、 $v_e$  分别为优化时段平均风速、当前额定风速;  $P_w$ 、 $P_e$  分别为风机发电功率、风机额定功率;  $D$  为风机叶轮直径。

### 1.3 光伏发电单元模型

光伏发电单元的功率输出<sup>[21-22]</sup>为

$$P_{gv} = P_{stc} G_{ac} [1 + k(T_c - T_{stc})] / G_{stc} \quad (2)$$

式中,  $P_{gv}$  为光伏发电功率;  $P_{stc}$  为光伏发电最大输出功率;  $T_c$  为光伏电池板当前温度;  $T_{stc}$  为光伏发电最大输出功率时的测试温度;  $G_{stc}$  为光伏发电最大输出功率光照强度;  $G_{ac}$  为当前光照强度;  $k$  为温度系数, 通常  $k = -0.47$ 。

### 1.4 水泵水轮机运行模型

抽水蓄能电站主要进行抽水操作与发电操作。

1) 发电工况

$$E_h = \frac{H_h V_s \eta_h}{367.2} \quad (3)$$

式中,  $E_h$ 、 $H_h$  分别为发电量、发电平均水头;  $\eta_h$ 、 $V_s$  分别为发电运行效率、调节水量; 通常, 367.2 为换算系数。

抽水蓄能电站抽水发电转换效率为

$$\eta = \frac{E_h}{E_c} = \frac{H_h}{H_c} \eta_h \eta_c \quad (4)$$

式中,  $\eta$  取 0.65~0.75。

2) 抽水工况

$$E_c = \frac{H_c V_s}{367.2 \eta_c} \quad (5)$$

式中,  $E_c$  为抽水消耗电量;  $H_c$  为抽水平均扬程;  $V_s$  为调节水量;  $\eta_c$  为抽水运行效率。

### 1.5 柴油发电机模型

微电网模型实际运行过程中, 分布式发电单元风电、光伏、水电联合出力小于景区负荷, 柴油发电机发电供给景区负荷, 柴油发电机组输出功率和燃料消耗关系为

$$C_f = aP_{dg}^2 + bP_{dg} + c \quad (6)$$

式中,  $P_{dg}$ 、 $C_f$  分别为柴油发电机输出功率、柴油发电机燃料消耗费用。

## 2 微电网运行模型与求解

在保障微电网系统正常运行前提下, 分布式发电离网型孤岛微电网系统各个发电单元机组进行出力调度配合, 以微电网系统优化日运行效益最大及微电网系统缺电率(碳排放)最低为目标, 计及时段电价政策, 根据不同偏好设置约束条件, 建立系统运行模型。

### 2.1 优化目标函数

#### 2.1.1 系统运行日效益 ( $F_1$ )

微电网系统的实际收益  $F_1$  包含以下几个部分组成。

1) 微电网净收益

$$f_1 = \sum_{j=1}^n (C_j P_{wj} + C_j P_{gvj} + C_j P_{bj} + C_j P_{fj} - C_{fj} P_{fj}) \quad (7)$$

式中,  $C_j$  为第  $j$  时段的人网电价;  $C_{fj}$  为柴油发电柴油消耗费用; 其中  $n$  为运行日优化时段;  $P_{wj}$  为第  $j$  时段的风电入网功率;  $P_{gvj}$  为第  $j$  时段光伏入网功率;  $P_{bj}$  为第  $j$  时段水电机组发电功率;  $P_{fj}$  为  $j$  时段第柴油发电功率。

2) 运行日系统维护成本 ( $f_2$ )

微电网系统优化日维护成本主要和各机组容量有关, 主要为人工费与设备维修耗材费。

$$f_2 = \sum_{i=1}^m C_{dom,i} = \sum_{i=1}^m C_{wi} \cdot c_{dom,i} \quad (8)$$

式中,  $c_{dom,i}$ 、 $C_{wi}$ 、 $C_{dom,i}$  分别为单位容量的日维护成本、第  $i$  个设备的日容量、第  $i$  个设备的日维护成本。

综上所述得出, 风电场的实际收益为

$$F_1 = f_1 - f_2 \quad (9)$$

#### 2.1.2 系统负荷缺电率 ( $F_2$ )

$$F_2 = \frac{\sum_{j=1}^{24} P_{lossj}}{\sum_{j=1}^{24} P_{loaj}} \quad (10)$$

式中,  $P_{lossj}$  为微网系统运行日  $j$  时刻的缺电量,  $P_{loaj}$  为微网系统运行日  $j$  时刻的负荷电量,  $F_2$  越大表示微网缺电现象就越严重, 从而柴油发电机利用率就越高, 从而导致碳排放量就越大。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 不等式约束

1) 联合系统入网出力约束

$$P_{wj} + P_{gvj} + P_{bj} + P_{fj} \leq P_{loaj} \quad (11)$$

2) 水电机组发电功率约束

$$P_{hmin} \leq P_{bj} \leq \min\left(P_{hmax}, \frac{Q_j - Q_{min}}{\Delta t} \eta_h\right) \quad (12)$$

其中,  $P_{hmax}$  为水电机组发电出力最大值;  $P_{hmin}$  为水电机组发电出力最小值;  $\eta_h$  为蓄能电站水轮机发电运行效率;  $Q_{min}$ 、 $Q_j$  分别为蓄能电站上水库储能最小值、第  $j$  时段蓄能电站上水库总储能值。

3) 抽水功率约束

$$P_{cmin} \leq P_{cj} \leq \left(P_{cmax}, \frac{Q_{max} - Q_j}{\eta_c \Delta t}\right) \quad (13)$$

其中,  $P_{cj}$  为第  $j$  时段水泵抽水功率;  $P_{cmin}$  为蓄能电站水泵机组抽水最小功率;  $P_{cmax}$  为蓄能电站水泵机组抽水最大功率;  $Q_{max}$  为抽水蓄能电站上水库最大储能值;  $\eta_c$  为水泵抽水效率。

#### 2.2.2 等式约束

$$P_{(wy+gy)j} = P_{wj} + P_{gvj} + P_{bj} + P_{fj} \quad (14)$$

$$Q_{j+1} = Q_j + t \left( \eta_g P_{gj} - \frac{P_{lj}}{\eta_h} \right) \quad (15)$$

$$P_{lj} = P_{wj} + P_{gvj} + P_{cj} + P_{fj} \quad (16)$$

$$P_{cj} \times P_{lj} = 0 \quad (17)$$

$P_{(wy+gvj)j}$  为第  $j$  时段风力光伏发电联合输出功率,  $P_{lj}$  为第  $j$  时段联合系统满足负荷功率。

### 2.3 多目标克隆选择算法

求解微电网优化运行模型关键在于分析多约束、多变量、动态非线性问题。在优化调度领域广泛存在着多约束非线性优化问题,是众多专家学者研究的热点与难点,

遗传算法、牛顿迭代法、多目标克隆选择算法等优化算法是解决此类问题的主要方法。

这些优化算法在求解复杂的多目标优化问题时仍有很多不足,如难以得到均匀分布的 Pareto 最优解,算法停止准则不确定等<sup>[23]</sup>。

本文通过改良的多目标克隆选择算法对所建模型进行求解分析,改良的算法可以有效保持种群多样性,具有良好的收敛精度与准确度。多目标克隆选择算法主体包括抗体初始化、选择操作、克隆扩增和变异、选择最优保留。算法流程图如图 2 所示<sup>[24]</sup>。

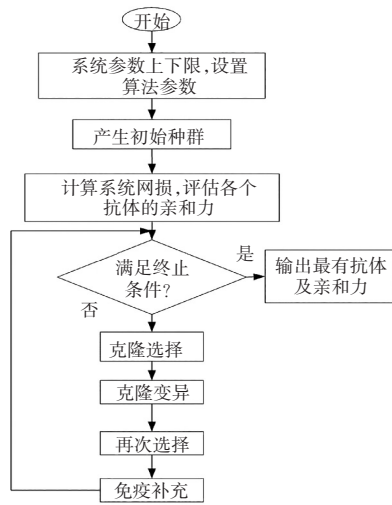


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

1) 依据给定的  $P_{(wy+gvj)j}$  数值, (如表 1), 电网的负荷功率限制约束如式 (11) 和水泵机组自身功率约束条件如式 (14), 式 (15) 确定水泵机组每个时段  $P_{cj}$  的取值范围, 并产生  $P_{cj}$  的初始种群。

2) 依据上步确定的每个时段水泵机组功率  $P_{cj}$  以及式 (11)、式 (14)、式 (15) 和式 (16) 确定相应的各时段风电、光伏机组入网功率  $P_{wj} + P_{gvj}$  的取值范围, 并产生  $P_{wj} + P_{gvj}$  的初始种群。

3) 依据前两步确定的  $P_{cj}$ 、 $P_{wj} + P_{gvj}$  及式 (11)、式 (14) 和式 (15) 确定各个时段水电机组上网功率  $P_{lj}$  的取值范围, 并产生  $P_{lj}$  的初始种群。

4) 依据前 3 步确定的  $P_{cj}$ 、 $P_{wj} + P_{gvj}$ 、 $P_{lj}$  及式 (11)、式 (14) 和式 (15) 确定各个时段水电机组上网功率  $P_{fi}$  的取

值范围, 并产生  $P_{fi}$  的初始种群。

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置与算例构成

本文以河南省某山区夏季运行日实际风速、光照条件进行预测, 并根据式 (1)、(2) 计算各变量每个时段基础数据基础数据如表 1 所示, 表中涉及的各项出力单位为 MW · h, 电价单位为元/MW · h。表中  $P_{loaj}$  为各运行时段电网负荷,  $P_{wj}$  为各时段风电出力值,  $P_{gvj}$  为各时段光伏出力值,  $P_{(wy+gvj)j}$  为各时段风电光伏联合出力值,  $C_j$  为不同时段入网电价。

表 1 各变量每个时段基础数据

Tab. 1 Basic data of each variable for each time period

时段	$P_{loaj} /$ (MW · h)	$P_{wj} /$ (MW · h)	$P_{gvj} /$ (MW · h)	$P_{(wy+gvj)j} /$ (MW · h)	$C_j /$ (元 · (MW · h) <sup>-1</sup> )
0:00—1:00	25	45	0	45	540
1:00—2:00	24	48	0	48	540
2:00—3:00	23	33.7	0	33.7	540
3:00—4:00	21	43	0	43	540
4:00—5:00	20.5	20	0	20	540
5:00—6:00	21.5	41.2	2.5	43.7	540
6:00—7:00	30	34.7	7.8	42.5	540
7:00—8:00	43.7	37.9	12.1	50	1 040
8:00—9:00	64.7	29.9	13.1	43	1 040
9:00—10:00	68.5	31.3	26.7	58	1 040
10:00—11:00	68.7	33.5	28	61.5	1 040
11:00—12:00	69.4	36	29.2	65.2	1 040
12:00—13:00	63.7	40	27	67	1 040
13:00—14:00	75.5	25	28.2	53.2	1 040
14:00—15:00	74.7	32.8	19.2	52	1 040
15:00—16:00	62.5	51	15.2	66.2	1 040
16:00—17:00	48.8	57.7	9.8	67.5	1 040
17:00—18:00	40	33.4	5.6	39	1 040
18:00—19:00	53.7	40	0	40	1 040
19:00—20:00	64.4	50	0	50	1 040
20:00—21:00	62.5	49	0	49	1 040
21:00—22:00	41	55	0	55	540
22:00—23:00	20	20.5	0	20.5	540
23:00—24:00	26	25	0	25	540

设置各参数: 优化时长  $n = 24$ ; 各时段抽水电价  $C_{cj} = 0.25C_j$ ;  $\eta_c = 0.8$ ;  $\eta_h = 0.9$ ; 上水库初始储能  $Q_0 = 0$ ;  $Q_{max} = 100$  MW; 风电场装机容量 60 MW; 光伏装机容量 30 MW; 抽水蓄能电站装机容量为 15 MW (5 × 3 MW 机组); 柴油机组装机容量 9 MW, 根据式 (6) 并结合参数结算, 柴油发电费用  $C_{fj} = 1 600$  元/MW · h; 光伏设备维护费用 60 元/MW · h, 风电设备维护费用 30 元/MW · h, 抽水蓄能电站抽水发电维护费用 100 元/MW · h, 柴油发电机维护费用 180 元/MW · h;  $P_{cmin} = P_{hmin} = 0$ ;  $P_{cmax} = P_{hmax} = 15$  MWh。

### 3.2 算例解析

根据图 2 所示的算法流程, 编写程序, 通过 MATLAB 仿真软件求对模型进行求解。得到微网系统运行日缺电率、净收益 Pareto 解集如图 3 所示, 解集中选择缺电率为 3%, 运行效益 704 207 元的解进行分析, 此解对应预测负荷与微网系统出力各时段比较如图 4 所示, 微网系统各机

组各个时段出力如图5所示。

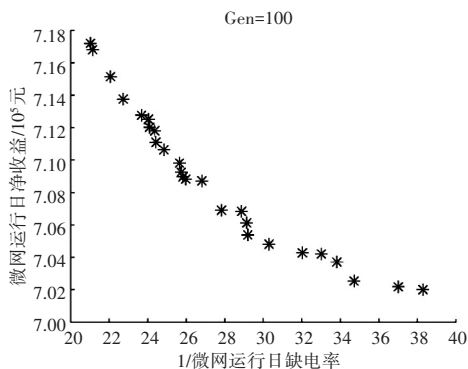


图3 微网系统优化运行 Pareto 解集

Fig. 3 Pareto solution set for optimal operation of microgrid system

从图3可以看出微网系统净收益和缺电率倒数呈反向趋势,也就是说运行效益最大和缺电率最小是一对矛盾的目标,解集给我们在运行效益和缺电率之间权衡提供了确切数据参考。从图4可以看出微网系统出力和系统负荷走向基本一致,由于两个目标函数的矛盾性存在,运行效益最大和缺电率最小不可兼顾,在风光及水力发电出力不足时两者略有出入。从图5可以看出,微网系统以运行效益最大和缺电率最小为目标优化运行可以决定着各个机组的运行状况及出力。

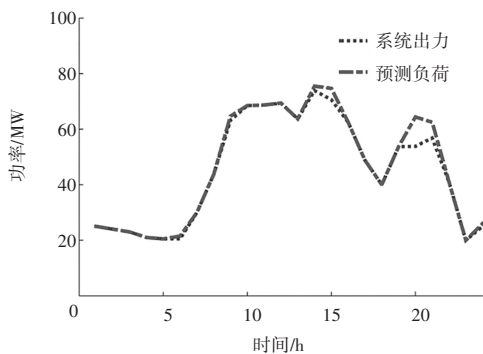


图4 微网系统优化出力与系统预测负荷

Fig. 4 Optimized output of microgrid system and system forecast load

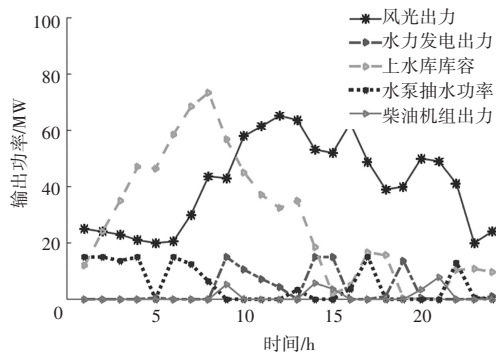


图5 微网系统优化运行各机组输出功率

Fig. 5 Optimized operation of microgrid system with output power of each unit

## 4 结论

针对偏远地区用电困难的问题现状,本文建立以风力、光伏、柴油发电及抽水蓄能电站组成的孤岛型微型电网模型,并分析各个机组模型,以微网系统运行效益最大及缺电率最小为目标函数建立数学模型,对模型仿真分析表明,微网优化系统能够提供 Pareto 解集,可为能源孤岛区域电网建设提供理论依据和工程参考。

离网微电网的建立改变了能源的利用方式,充分利用风电、光伏清洁能源,降低发电成本,提高微网系统的运行效益及运行质量,能够为风景区或山村建立微网供电系统,解决这些地区的最大问题——供电问题,为建立智能化、网络化绿色景区或山村提供基础保障,预计可以提高景区收入 15%,同时提高山区居民生活水平,促进国家“脱贫攻坚”战略。微电网可以向全国推广,能够推动风机、光伏、抽水蓄能机组生产安装行业的发展。

为偏远地区特别是景区建立微电网,不再使用柴油发电满足景区负荷,加入了碳排放惩罚约束,能够减少煤炭、石油不可再生资源的消耗,同时推动风电光伏的发展,提高在电力系统的利用占比,对环境保护有很大的推动作用。

## 参考文献

- [1] 孙彩, 李奇, 邱宜彬, 等. 余电上网/制氢方式下微电网系统全生命周期经济性评估[J]. 电网技术, 2021, 45(12):4650-4660.
- [2] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17):5493-5506.
- [3] 范刘洋, 汪可友, 李国杰, 等. 含有海水抽水蓄能的海岛微网优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2):382-386.
- [4] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8):22-27.
- [5] 张丹, 王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2):1-12.
- [6] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2):564-567.
- [7] 郑伟民, 但扬清, 王晨轩, 等. 计及风-光-水-火多能协同的电网可再生能源消纳能力评估[J]. 中国电力, 2023, 56(12):248-254.
- [8] 陈泽雄, 高军伟, 林亚培, 等. 园区综合能源微网动态优化调度算法[J]. 广东电力, 2020, 33(10):64-74.
- [9] 刘文军, 赵琰, 张东. 抽蓄联合全可再生能源孤岛微网配置优化模型[J]. 可再生能源, 2020, 38(9):1266-1271.
- [10] 赵熙临, 周红玉, 付波, 等. 一种用于微网调频的风电与抽水蓄能综合控制方法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(4):121-129.
- [11] 朱祖祥, 朱革兰, 秦飞翔. 基于博弈的多综合能源微网系统优化运行策略[J]. 广东电力, 2023, 36(2):52-65.
- [12] 何玉灵, 王博, 孙凯, 等. 计及分布式储能的微电网群经济调度[J]. 电力科学与工程, 2024, 40(2):1-8.
- [13] 谭虎, 王小亮, 徐亭亭, 等. 风光沼储交直流混合农村微电网经济技术优化[J]. 中国电力, 2024, 57(3):27-33.
- [14] 张家祥, 潘秋萍. 考虑需求响应的微电网分布式日前经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(3):19-26.
- [15] 张俊潇, 高崇, 许志恒, 等. 考虑微网优先自治的分布式智能配电系统优化调度方法[J]. 电力建设, 2024, 45(9):39-48.

(下转第 28 页)