

风光-氢储微电网系统多目标容量优化配置

李争, 罗晓瑞, 徐若思, 曹士靖

(河北科技大学电气工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为实现“双碳目标”,减少“限电”带来的不利影响,提出了风光-氢储能的微电网方案,介绍了系统容量配置原理,并建立数学模型。采用 Homer Pro 软件和改进 BAS-GA 算法创建多目标风光-氢储能容量优化配置模型。在离网运行状态下,对风光-氢储能系统容量优化配置模型进行实例验证。结果表明:相较于风储、光储、风光储、风光柴储系统,风光-氢储能系统的净现值及度电成本分别降低为 1 425.036 8 万元和 1.529 元/(kW·h);可再生能源利用率提升至 98.7%,负荷缺失率降低至 5.50%。

关键词:双碳目标;风光-氢储能系统;改进 BAS-GA 算法;多目标;容量优化配置

中图分类号:TM614 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.017

[引用本文格式]李争,罗晓瑞,徐若思,等.风光-氢储微电网系统多目标容量优化配置[J].热能动力工程,2023,38(4):131-138. LI Zheng, LUO Xiao-rui, XU Ruo-si, et al. Multi-objective capacity optimization of wind-PV-hydrogen energy storage micro-grid system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 131-138.

Multi-objective Capacity Optimization of Wind-PV-Hydrogen Energy Storage Micro-grid System

LI Zheng, LUO Xiao-rui, XU Ruo-si, CAO Shi-jing

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, China, Post Code: 050018)

Abstract: In order to achieve the "carbon peak and neutrality goals" and reduce the negative impact of "power limitation", a micro-grid scheme of wind-PV-hydrogen energy storage system is proposed. The principle of system capacity allocation is introduced, and the mathematical model is established. Homer Pro software and improved BAS-GA algorithm are used to create a multi-objective optimization configuration model of the wind-PV-hydrogen energy storage system. In the off-grid operation state, the capacity optimization configuration model of the wind-PV-hydrogen energy storage system is verified by an example. The results show that compared with wind storage, PV storage, wind-PV-storage and wind-PV-diesel storage systems, the net present value and kilowatt-hour cost of the solar energy storage system have decreased to 14.250 368 million yuan and 1.529 yuan/(kW·h), respectively. The utilization rate of renewable energy is improved to 98.7%, and the load deficit rate is reduced to 5.50%.

Key words: carbon peak and neutrality goals, wind-PV-hydrogen energy storage system, improved BAS-GA algorithm, multi-objective, capacity optimization configuration

收稿日期:2022-03-10; 修订日期:2022-06-01

基金项目:国家自然科学基金(51877070, U20A20198, 51577048);河北省重点研发计划项目(19214501D, 20314501D);河北省自然科学基金(E2021208008);河北省高层次人才资助项目(A201905008)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51877070, U20A20198, 51577048); Key Research and Development Program of Hebei Province (19214501D, 20314501D); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2021208008); High-level Talents of Hebei Province (A201905008)

作者简介:李争(1980-),男,河北科技大学教授。

引 言

风光-氢储能是目前多能互补系统重点研究和建设的电力系统,但在满足日常负荷及电网调度需求的过程中存在一系列问题,其中系统容量配比是其研究的重点难点之一。不同的容量配比不仅会影响发电系统的调度便利化和安全性,还存在弃能隐患^[1]。传统的多能互补系统设计缺乏一定的理论依据和合理性,因此寻求科学有效的容量配置方法具有重大的实际意义^[2-3]。

多能互补系统的配置问题可以归结为基于目标函数,即在约束条件下从诸多可能性中寻找最优解的问题。近年来,越来越多的群体优化算法及其改进算法被应用到容量配置求解过程中。王侃宏等人^[4]采用 HOMER 软件和 SA-PSO 算法对风光-氢储系统进行容量优化配置;潘华等人^[5]采用布谷鸟搜索算法,基于分时电价,对于含风-光-气-储虚拟电厂经济调度模型求解;于凯旋等人^[6]采用改进 BASDE 算法,针对孤立微电网容量配置模型进行多目标优化仿真。

以上研究主要是依据耗电负荷的电能需求,根据设计人员的经验进行系统容量配置,缺乏一定的理论依据和合理性。并且以上算法均存在性能低下、容易陷入局部最优的风险。本文针对选择算子、交叉算子和变异算子进行改进,得到改进的遗传算法。

本文引入风光-氢储能仿真模型。从系统容量配置原理出发,建立风光-氢储能耦合系统的数学模型和设备选型,并创建风光-氢储能系统的多目标、多约束条件下的容量配置模型,最后在离网运行方式下,进行实例验证。

1 系统结构及出力模型介绍

1.1 系统结构

风光-氢储能系统主要由风电机组、光伏电站、储能系统、交流负载、直流负载、控制单元等子系统组成。其中,储能系统有两种实现方式:一是由液流电池和超级电容组成快速响应储能子系统;二是由电解槽、储氢装置和燃料电池组成氢储能子系统,用

以实现能量储存、减少弃能现象,并起到“削峰填谷”的作用^[7-9]。风光-氢储能系统如图 1 所示。

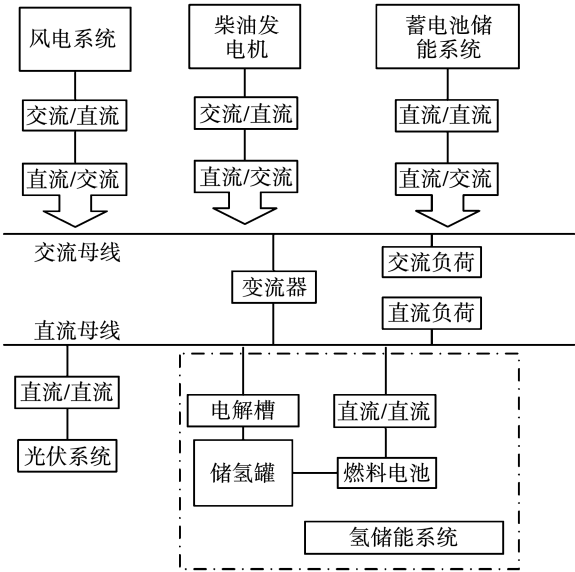


图 1 风光-氢储能系统

Fig. 1 Wind-PV-hydrogen energy storage system

1.2 风电机组出力模型

选取永磁同步发电机作为研究对象,风力发电机组的出力情况主要与风速有关^[10],其对应输出功率函数为:

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_r —风电机组的额定功率,kW; v_{ci} —切入风速,m/s; v —实际风速,m/s; v_{co} —切出风速,m/s; v_r —额定风速,m/s。

1.3 光伏电站出力模型

选取晶硅电池作为研究对象,光伏电池基本的数学模型表达式为^[11-13]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中: I_{ph} —光生电流,A; V —光伏电池两端电压,V; I_0 —反向饱和电流,A; n —二极管影响因子; R_s —串联电阻, Ω ; R_{sh} —并联电阻, Ω ; q —电子电荷常数,C; T —温度,K; k —玻尔兹曼常数。

1.4 柴油发电机出力模型

柴油发电机(DG)具有启动速度快、维护运营简单、经济性好等特点,但是因其燃料对环境不友好,通常用作备用电源,起支撑系统的作用^[14]。

柴油发电机的实际输出功率与燃料之间的关系为:

$$F = F_0 P_{\text{Gen},r} + F_1 + P_{\text{Gen}} \quad (3)$$

式中: F —柴油发电机的燃料消耗量,L; F_0 —燃料曲线的截距系数,L/(kW·h); F_1 —燃料曲线的斜率,L/(kW·h); P_{Gen} —柴油发电机实际输出功率,kW; $P_{\text{Gen},r}$ —柴油发电机额定输出功率,kW。

2 容量配置优化模型

2.1 优化目标

风光-氢储能系统容量配置优化模型的优化目标是在满足多重约束条件的基础上,将发电单元供电可靠性作为首要目标,系统成本作为次要目标,即:

$$\max \beta(t) = \max \{ \eta_{\text{REU}} - \beta_{\text{LLR}} \} \quad (4)$$

$$\min C(t) = \min \{ C_{\text{LCOE}} \} \quad (5)$$

式中: η_{REU} —可再生能源利用率,%; β_{LLR} —负荷缺失率,%; C_{LCOE} —平准化度电成本,元/kW·h; $\beta(t)$ —供电可靠性; $C(t)$ —系统成本。

因此,系统最终的优化结果为在满足上述两个目标的前提下,实现风电机组数目 N_{WT} 、光伏电站组数目 N_{PV} 、柴油发电机组数目 N_{DG} 、蓄电池数目 N_{Bat} 和氢储能数目 N_{HESS} 的最优组合。

2.2 约束条件

风光-氢储能系统在优化容量配置时需要基于目标函数设置一定的约束条件,在约束条件下使用一定的求解方法得到模型的最优值。

2.2.1 系统功率平衡约束条件

系统运行时,系统总功率保持平衡:

$$P_{\text{load}} + P_{\text{exe}} = \sum_i^N P_{\text{DG}i} + \sum_j^M P_{\text{STOR}j} + P_{\text{un}} + P_{\text{Gen}} \quad (6)$$

式中: P_{load} —负荷需求功率,kW; P_{exe} —多余功率,kW; $P_{\text{DG}i}$ —系统中各个发电单元输出功率,kW; $P_{\text{STOR}j}$ —系统储能单元输出功率,kW; P_{un} —系统未满足的负荷功率,kW; P_{Gen} —柴油发电输出功率,kW。

2.2.2 各子系统运行约束条件

风电机组出力约束条件:

$$0 \leq P_{\text{WT}} \leq P_{\text{WT},\max} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{WT},\max}$ —风电机组最大功率,kW。

光伏电站出力约束条件:

$$0 \leq P_{\text{PV}} \leq P_{\text{PV},\max} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{PV},\max}$ —光伏电站最大功率,kW。

蓄电池储能约束条件:

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (9)$$

$$-P_{\text{Bat},\max} \leq P_{\text{Bat}} \leq P_{\text{Bat},\text{dmax}} \quad (10)$$

$$\text{SOC}(t + \Delta t) = \text{SOC}(t) - \frac{\eta_{\text{Bat}} P_{\text{Bat}}(t) \Delta t}{E_{\text{Bat}}} \quad (11)$$

式中: $\text{SOC}_{\min}$ —蓄电池荷电状态下限,%; $\text{SOC}_{\max}$ —蓄电池荷电状态上限,%; $P_{\text{Bat},\max}$ —蓄电池单元最大充电功率,kW; $P_{\text{Bat},\text{dmax}}$ —蓄电池单元最大放电功率,kW; η_{Bat} —蓄电池单元转换效率; E_{Bat} —蓄电池单元的容量,kW; Δt —系统时间步长,s。

氢储能子系统约束条件:

氢储能子系统(HESS)主要由电解槽(ELE)、储氢罐(HT)和燃料电池(FC)组成。HESS的3个组成单元之间在一定约束:电解槽与燃料电池的最大功率受到储氢罐的储氢量和自身安装容量的限制,即:

$$P_{\text{ELE},\max}(t) = \min \left\{ P_{\text{ELE},\max}, \frac{(E_{\text{HT},\max} - E_{\text{HT}}(t))}{\eta_{\text{ELE}} \cdot \Delta t} \right\} \quad (12)$$

$$P_{\text{FC},\max}(t) = \min \left\{ P_{\text{FC},\max}, \frac{(E_{\text{HT}}(t) - E_{\text{HT},\min})}{\Delta t} \right\} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{ELE},\max}$ — t 时刻电解槽最大耗电功率,kW; $P_{\text{FC},\max}(t)$ — t 时刻燃料电池的最大输出功率,kW; $P_{\text{ELE},\max}$ —电解槽的装机容量,kW; $P_{\text{FC},\max}$ —燃料电池的装机容量,kW; $E_{\text{HT},\max}$ —储氢罐的最大储氢量,kg; $E_{\text{HT},\min}$ —储氢罐的最小储氢量,kg; $E_{\text{HT}}(t)$ —储氢罐 t 时刻的储氢量,kg; η_{ELE} —电解槽的电解效率。

3 风光-氢储能控制策略及模型求解

3.1 运行策略

风光-氢储能系统的运行策略主要分为离网和并网两种运行方式。其中,在离网运行的状态下,在满足系统供电稳定和可靠的基础上,尽可能利用风

力发电机组和光伏电站的出力,减少储能单元的使用,从而减少弃风率和弃光率,提高系统的经济性。

风光-氢储能系统中有重要负荷和可延迟负荷,系统的运行策略是首先满足重要负荷的供电需求,其次在一定时间内满足可延迟负荷的需求。具体的流程如图 2 所示。其中, $P_{Gen, total}$ 为系统总发电

功率, P_{load} 为系统内部负荷总需求功率, P_{Bat} 为蓄电池出力功率, P_{HT} 为氢储能系统出力功率; ΔP_1 为系统总发电功率与系统内部负荷总需求功率间的差值, ΔP_2 为 ΔP_1 蓄电池子系统发电功率 ΔP_{Bat} 的差值, ΔP_3 为 ΔP_{Bat} 与 ΔP_1 绝对值的差值。

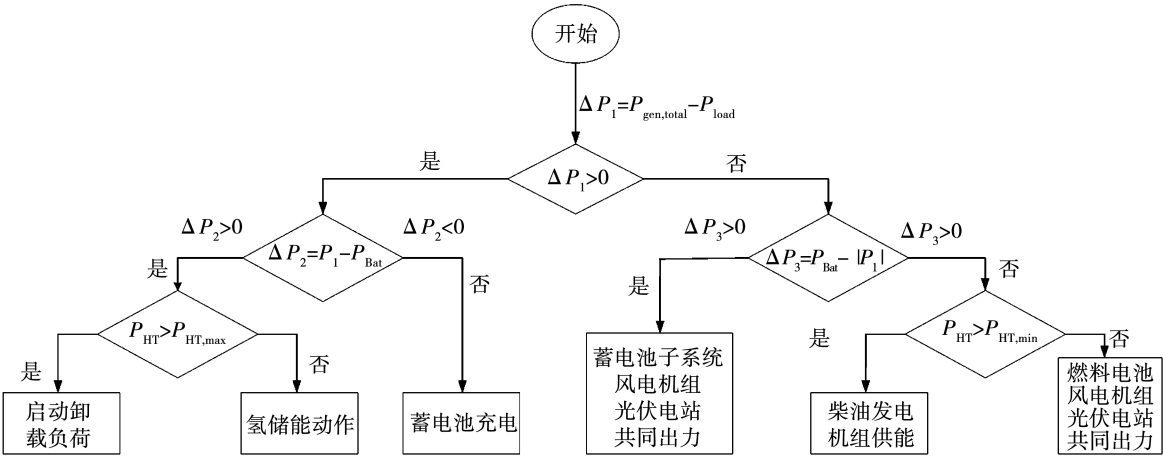


图 2 风光-氢储能系统发电运行策略

Fig. 2 Power generation operation strategy of wind-PV-hydrogen energy storage system

3.2 模型求解方法

由于遗传算法 (GA) 容易陷入局部最优,天牛须算法 (BAS) 具有寻优速度快的特点,因此提出了改进的 BAS-GA 算法。具体实现步骤如下:

(1) 初始化:初始化种群数量 N_{pop} 、迭代次数 T 、交叉概率 p_m 、变异概率 p_c ;

(2) 染色体编码:将风电机组、光伏电站、储能电池、电解槽、燃料电池的安装数目由十进制转换成二进制数,以便后续进行染色体编码,编码长度为 6,因此染色体的长度为:

$$L = N_{WT} + N_{PV} + N_{Bat} + N_{ELE} + N_{FC} + N_{Gen} \quad (14)$$

式中: N_{FC} —燃料电池数目; N_{ELE} —电解槽数目; N_{Gen} —柴油发电机数目。

(3) 适应度函数:将目标函数作为适应度函数,对应的函数值为适应度值;

(4) 遗传算子:进行选择、遗传、变异操作;

(5) 新种群:选取 $N_{pop}/3$ 的个体,随机令某种电源的数量增加或减少 1,其余数值保持不变,变化的电源数量作为新个体重新计算,若新的适应度值比变化之前的适应度值小,则利用新个体代替旧个体;

(6) 重复步骤 (3) ~ (5) 操作,直至满足条件,迭代结束。

详细的改进 BAS-GA 流程如图 3 所示。

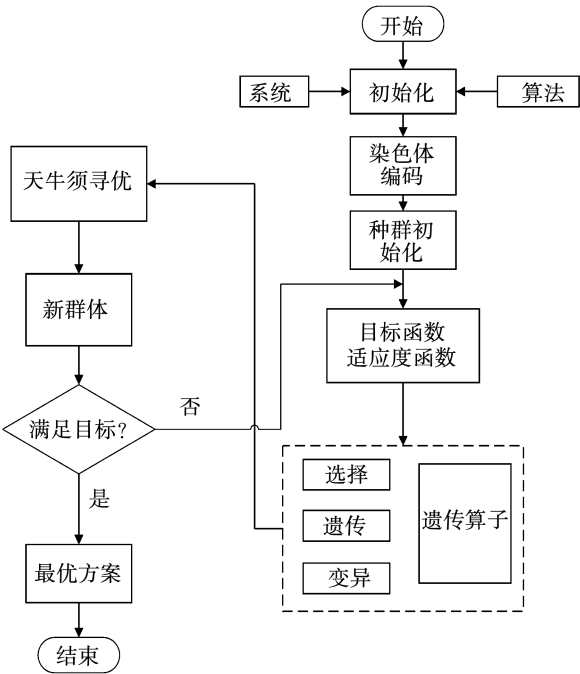


图 3 改进 BAS-GA 流程图

Fig. 3 Improved BAS-GA flow chart

4 案例分析

以某区域典型日的风速、光照强度、温度和负荷曲线为基础数据,验证模型的合理性和求解方法的有效性。

4.1 系统简述

该地区已建有风电机组、光伏电站,结合 RET-Screen Expert 软件和当地已有的气候数据获取当地的月平均风速、辐照强度和环境温度,详细数据如表1 所示。利用 HOMER Pro 软件对风光 – 氢储能系统进行仿真,相关参数设置为:交流负荷和直流负荷的功率分别为 1 173. 0 和 995. 50 (kW·h)/d,峰值功率分别为 84. 09 和 68. 17 kW;可延迟的负荷功率为 50. 02 (kW·h)/d,峰值功率为 30. 00 kW;负荷日扰动因子和时扰动因子分别为 5% 和 10%;氢储能系统初始存储状态为 80%,蓄电池储能系统初始荷电状态为 90%,最低荷电状态为 20%;系统备用容量为 30%;柴油发电机燃料的单位成本为 5. 665 元/L;风电机组、光伏电站的运维成为安装成本的 0. 1%;柴油发电机和燃料电池的运维成本为 0. 88 元/h;电解槽、储氢罐、蓄电池单元以及控制器等的运维成本占安装成本的 1%。

表 1 某地区月平均风速、辐照强度、环境温度数据和可延迟负荷数据

Tab. 1 Data of monthly average wind speed, irradiation intensity, ambient temperature and delayable load in a certain area

月份	月平均风速/ m·s ⁻¹	辐照强度/ (kW·h)·m ⁻² ·d ⁻¹	环境温 度/℃	可延迟负 荷/kW
1	2. 7	3. 16	-11. 8	51. 0
2	3. 5	4. 12	-7. 8	50. 5
3	4. 2	5. 21	-2. 1	49. 0
4	4. 4	6. 27	4. 3	51. 0
5	4. 4	6. 76	10. 3	49. 6
6	4. 5	6. 67	15. 0	48. 9
7	4. 4	6. 34	17. 7	50. 2
8	4. 3	5. 87	16. 4	50. 6
9	4. 0	5. 16	11. 1	49. 3
10	3. 5	4. 47	2. 9	49. 6
11	2. 7	3. 34	-5. 1	50. 2
12	2. 4	2. 72	-10. 8	50. 3

风光 – 氢储能系统的各设备部分参数如表 2 所示。由表 2 可知,该地区的风、光资源较好,对于建立包含风电机组、光伏电站作为发电单元的风光 – 氢储能系统的方案具有可行性。图 4 为风光 – 氢储能系统典型日负荷曲线。

表 2 系统设备参数

Tab. 2 System equipment parameters

设备	安装成本/ 元·kW ⁻¹	替换成本/ 元·kW ⁻¹	使用寿 命/a
风电机组	17 600	—	20
光伏电站(含 MPPT)	13 915	—	20
柴油发电机	880	746	1. 71
电解槽	9 900	—	20
储氢罐	3 300	—	20
燃料电池	17 600	16 830	5. 71
蓄电池单元	1 320	11 122	2. 5
控制器、换流器	27 500	—	20

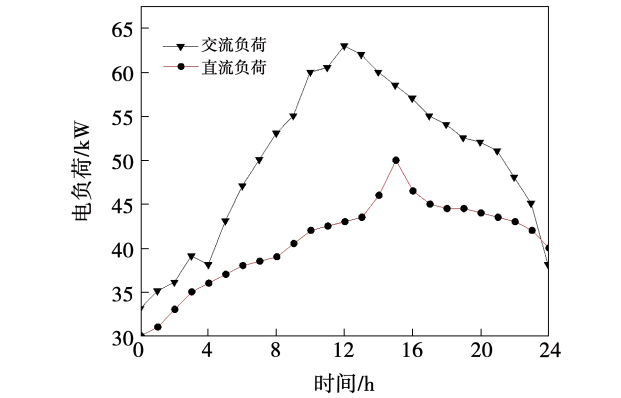


图 4 风光 – 氢储能系统典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curve of wind-PV-hydrogen energy storage system

基于表 1 提供的数据,利用 HOMER Pro 软件仿真得到风光气候资源以及各种负荷的离散数值。其中,风光资源离散后的数值作为容量优化模型的仿真输入数据。在 HOMER Pro 软件输入板块,设置风光资源数据和负荷数据得到全年 8 760 h 的发电量,以 1 h 为步长进行仿真,离散后的数据如图 5 所示。

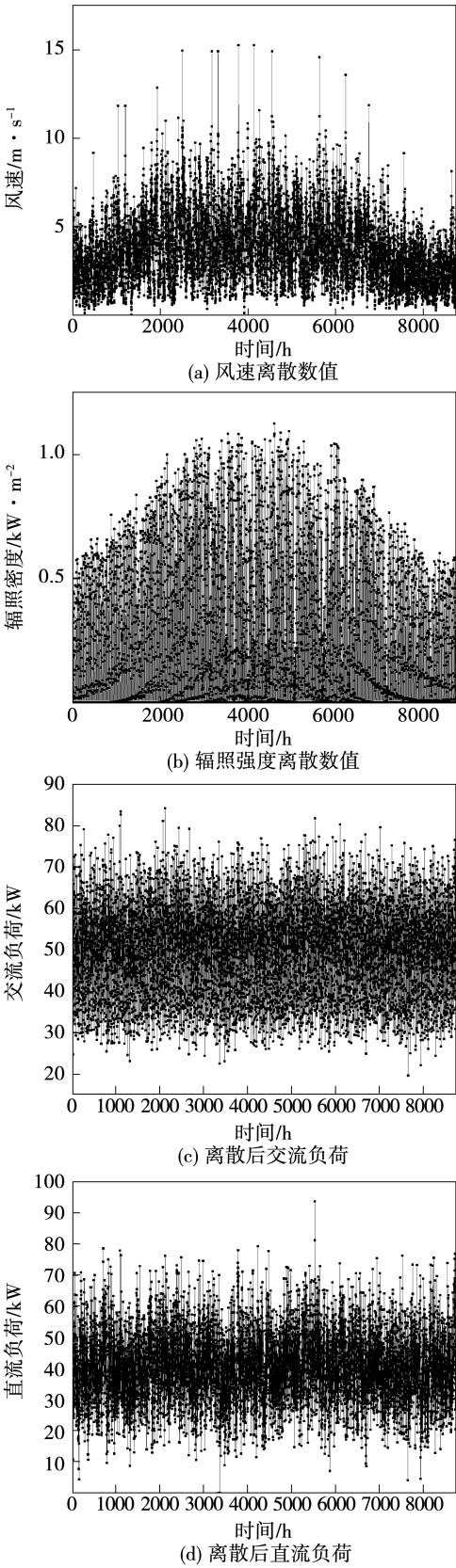


图5 风光资源和负荷离散后小时数据
Fig. 5 Hourly data after wind and light resource
and load dispersion

4.2 离网型风光-氢储能系统的容量优化

风光-氢储能系统系统容量优化参数有风电机
组装机容量 S_{WT} 、光伏电站装机容量 S_{PV} 、蓄电池储
能系统装机容量 S_{Bat} 、氢储能子系统装机容量 S_{HESS}
和柴油发电机组容量 S_{Gen} 。即：

$$S = [S_{WT}, S_{PV}, S_{Gen}, S_{Bat}, S_{HESS}] \tag{15}$$

4.3 容量配置方案分析

基于4.1节数据,采用改进BAS-GA算法,针对
典型的子系统类型进行组合,得到风光-氢储能系
统容量优化配置结果,如表3所示。

表3 风光-氢储能系统容量配置方案
Tab.3 Capacity allocation schemes of wind-PV-
hydrogen energy storage system

方案	WT/台	PV/kW	Bat/块	Gen/kW	ELE/kW	HT/kg	FC/kW
1	60	-	2 600	-	-	-	-
2	-	490	3 000	-	-	-	-
3	16	300	2 200	-	-	-	-
4	13	270	400	50	-	-	-
5	13	270	600	-	15	15	50

方案1(风/储系统):储能单元只有蓄电池储能
子系统,风力发电机组直接耦合在交流母线上,仅依
靠蓄电池储能子系统来平抑风/储系统因风电波动
引起的系统输出功率波动和因负荷变动引起的需求
波动。

方案2(光/储系统):系统中光伏电站作为发电
单元,配置蓄电池储能子系统,光伏电站耦合在直流
母线上,利用蓄电池储能子系统来平抑因光伏电站
出力不稳定引起的功率波动。

方案3(风/光/储系统):由风力发电机组和光
伏电站作为发电单元,蓄电池储能子系统作为储能
单元,蓄电池储能子系统主要用于削峰填谷、平移功
率波动以及维持系统稳定。

方案4(风/光/柴/储系统):风力发电机组和光
伏电站作为发电单元,蓄电池储能系统和柴油发电
机组平抑因风电、光伏电站发电间歇性造成的功率
波动和因负荷引起的需求波动。

方案5(风/光/燃料电池/氢储能系统):系统中
分布式电源包括风电机组、光伏电站和燃料电池组,

储能系统包括蓄电池子系统和氢储能子系统;其中,风电机组连接在交流母线上,光伏电站和燃料电池连接在直流母线上;风、光的互补性以及蓄电池储能系统和氢储能系统的混合储能系统特性使得风/光/燃料电池/氢储能系统更具竞争力。

容量配置优化组合方案的总净现值成本和平均化能源成本对比结果如图 6 所示。由图 6 可知,在自然资源一定的情况下,离网型方案中风/储系统的净现值和度电成本最高,风/光/燃料电池/混合能源系统的净现值和度电成本最低。

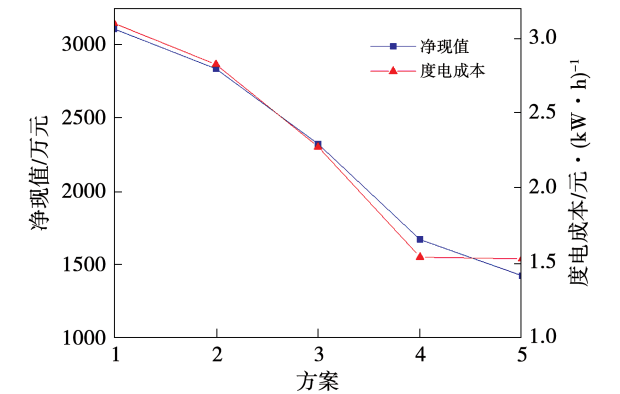


图 6 各方案对比结果

Fig. 6 Comparison result of each scheme

不同方案组合下离网型系统的评价指标如表 4 所示。由表 4 可知,不同的方案平准化度电成本(LCOE)、负荷缺失率(LLR)和可再生能源利用率(REU)的值不同。

表 4 不同类组合下离网型系统的评价指标

Tab. 4 Evaluation indexes of off-grid type systems under different class combinations

方案	LCOE	REU/%	LLR/%
1	3. 10	94. 4	10. 9
2	2. 83	94. 4	9. 73
3	2. 28	95. 3	8. 99
4	1. 54	73. 5	3. 92
5	1. 53	98. 7	5. 50

综上所述,结合当前自然资源条件,风/光/燃料电池/氢储能系统是容量优化配置的最优方案。其中,REU 值接近 100%,LCOE 值偏低,LLR 值有所

降低,能够满足系统稳定性要求和负荷需求,可以减少限电情况的发生,避免因限电带来的不利影响。总体而言,风/光/燃料电池/氢储能系统的净现值成本最小,各评价指标最优。

基于上述方案,某天 24 h 各子系统的输出功率如图 7 所示。

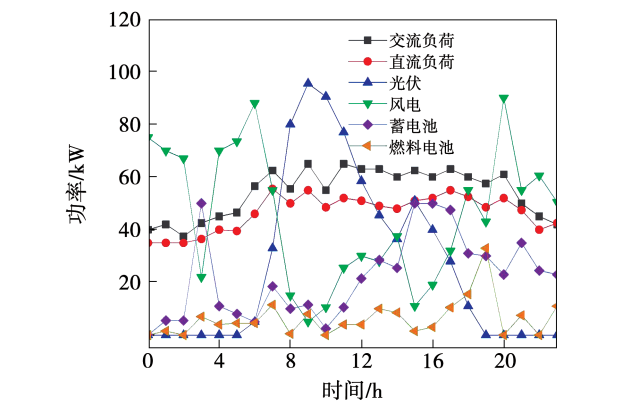


图 7 某天 24 h 各子系统的输出功率

Fig. 7 Output power of each subsystem for a 24 h day

由图 7 可知,风电机组出力波动性较大,风电、光伏发电互补性较好;光伏发电白天波动较大,风电具有全天候波动的现象;系统配置的混合储能系统,对风电、光伏发电出力功率波动性具有很好的平抑作用,能够满足负荷需求。

5 结 论

为减少“弃风、弃光”现象,提出了风光 – 氢储能方案,基于微电网容量配置原理,建立数学模型,以系统可靠性和成本最低为目标,基于 HOMER Pro 软件和改进 BAS-GA 算法,求解最优方案。基于当前风光资源,在满足负荷需求的基础上,相较于其他储能系统,风光 – 氢储能系统净现值和度电成本均有所降低,分别为 1 425. 036 8 万元与 1. 529 元/(kW·h);可再生能源利用率提升至 98. 7%,负荷缺失率降低为 5. 50%,其中氢储能子系统在平抑风电、光伏发电功率输出和负荷的需求波动方面发挥了重要的作用。该方案可有效解决由于风、光资源的随机性、间歇性导致的风、光发电电能品质差的问题,并且满足了未来纯绿色能源发展的需求,具有良好的实用性与适用性。

参考文献:

[1] 李益民,王关平,马建立,等. 基于天牛须搜索遗传算法的风光柴储互补发电系统容量优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2020,9(3):918.

LI Yi-min, WANG Guan-ping, MA Jian-li, et al. Study on optimal capacity in the construction of wind-solar-diesel-battery hybrid power system based on beetle antennae search algorithm improved genetic algorithm [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020,9(3):918.

[2] 李 湃,黄越辉,王跃峰,等. 含抽蓄电站的多端柔性直流电网风光接入容量配比优化方法[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 32-40.

LI Pai, HUANG Yue-hui, WANG Yue-feng, et al. Optimization method of wind and solar access capacity ratio of multi terminal flexible DC power grid with pumping and storage power station [J]. Electric Power, 2019, 52(4): 32-40.

[3] 谢 姿,张惠娟,刘 琪,等. 考虑蓄电池寿命的分布式电源容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 424-430.

XIE Zi, ZHANG Hui-juan, LIU Qi, et al. Optimal capacity allocation of distributed generation considering battery life[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 424-430.

[4] 王侃宏,赵政通,刘 欢,等. 基于 HOMER 和 SA-PSO 算法的风光氢储系统的优化匹配[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 207-210.

WANG Kan-hong, ZHAO Zheng-tong, LIU Huan, et al. Optimal matching of wind-solar-hydrogen storage system based on HOMER and SA-PSO algorithm [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(5): 207-210.

[5] 潘 华,梁作放,薛强中,等. 基于分时电价的含风-光-气-储虚拟电厂经济调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 115-122.

PAN Hua, LIANG Zuo-fang, XUE Qiang-zhong, et al. Economic dispatch of virtual power plant with wind-light-gas storage based on time of use price [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(8): 115-122.

[6] 于凯旋,李凤霞,李双拾. 基于改进 BASDE 算法的孤立微电网多目标容量优化配置仿真[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 109-117.

YU Kai-xuan, LI Feng-xia, LI Shuang-shi. Simulation of multi-objective capacity optimization configuration of isolated micro-grid based on improved BASDE algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 109-117.

[7] 于家敏. 基于模型预测控制的风光氢耦合系统功率调控策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.

YU Jia-min. Study on power regulation strategy of wind photovoltaic and hydrogen coupling system based on model predictive control

[D]. Jilin: Northeastern Electric Power University, 2021.

[8] 姚海涛. 含氢储的混合储能风光互补发电系统中容量优化研究[J]. 电气开关, 2020, 58(6): 18-22.

YAO Hai-tao. Research on capacity optimization of hybrid energy storage with hydrogen storage in a wind-solar hybrid power system [J]. Electrical Switchgear, 2020, 58(6): 18-22.

[9] 肖佳璇. 风光互补发电下制氢储能系统控制研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.

XIAO Jia-xuan. Research on the control of hydrogen production and energy storage system under wind-solar complementary power generation [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.

[10] 娄建楼,单 凯,胥 佳. 基于阈值筛选器的风机出力结构模型研究[J]. 科技创新与应用, 2016(7): 63.

LOU Jian-lou, SHAN Kai, XU Jia. Research on wind turbine output force structure model based on threshold filter [J]. Technology Innovation and Application, 2016(7): 63.

[11] 朱 祺,杨 鹏. 基于 GBDT 回归的光伏电站出力人工智能预测算法研究[J]. 电力大数据, 2021, 24(11): 16-22.

ZHU Qi, YANG Peng. Research on artificial intelligence prediction algorithm of photovoltaic power station output based on GBDT regression [J]. Power Systems and Big Data, 2021, 24(11): 16-22.

[12] 程昭龙,李鸿奎,李福建,等. 考虑风电光伏出力不确定性的多目标最优潮流[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(10): 11-16.

CHENG Zhao-long, LI Hong-kui, LI Fu-jian, et al. Multi-objective optimal power flow based on wind power photovoltage output uncertainty [J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(10): 11-16.

[13] 韩子娇,李正文,张文达,等. 计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 99-106.

HAN Zi-jiao, LI Zheng-wen, ZHANG Wen-da, et al. Economic operation strategy of hydrogen energy integrated energy system taking into account uncertainty of photovoltaic power output [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 99-106.

[14] 陈荣柱,林世溪,孙景钊,等. 孤立海岛微电网供电模式下的柴油发电系统改造方案研究[J]. 浙江电力, 2014, 33(6): 1-5.

CHEN Rong-zhu, LIN Shi-xi, SUN Jing-liao, et al. Study on modification scheme for diesel power generation system under isolated island microgrid power supply mode [J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(6): 1-5.