

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.07.009

基于 RSOC 的风光氢能源系统功率分配策略研究

Research on power distribution strategy of an RSOC-based wind-photovoltaic-hydrogen energy system

李菁¹, 窦真兰^{2*}, 王加祥¹, 张春雁², 鲁涛¹, 倪耀兵¹

LI Jing¹, DOU Zhenlan^{2*}, WANG Jiaxiang¹, ZHANG Chunyan², LU Tao¹, NI Yaobing¹

(1. 国网上海长兴供电公司, 上海 201913; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

(1.State Grid Shanghai Changxing Power Supply Company, Shanghai 201913, China; 2.State Grid Shanghai Power Supply Company, Shanghai 200122, China)

摘要:可逆固体氧化物电池(RSOC)作为新型氢能储技术在可再生综合能源系统中具有广泛的应用前景。然而,与低温氢储能技术以堆功率代表系统功率进行功率分配策略研究相比,RSOC 电堆外围需配置高功耗辅助系统(BOP)来维持其高温运行,且系统功率调控速率受温度安全限制。因此,RSOC 氢电转化系统的 BOP 功耗和功率调控速率约束对系统功率分配有着显著的影响。为此,建立了基于 RSOC 的风光氢综合能源系统模型,着重开发了考虑 BOP 功耗的 RSOC 氢电转化系统功率模型。同时,提出一种基于 RSOC 的风光氢综合能源系统功率分配优化方法,考虑 RSOC 功率调控速率、各系统容量等约束条件,建立以系统日运行成本最小化、风光消纳最大化为目标的功率分配优化策略,并通过多目标粒子群优化算法求解该问题。优化结果显示,该算法能够获得优越的功率分配策略,与一般的功率分配策略相比,优化后的功率分配策略能够获得更高的系统收益。此外,电网和蓄电池的参与增加了系统的功率调节的灵活性,降低了系统整体运行功率。

关键词:氢储能技术;可逆固体氧化物电池;可再生综合能源;功率分配优化;多目标粒子群优化

中图分类号:TK 01

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)07-0078-09

Abstract: As a new hydrogen storage technology, a reversible solid oxide cell (RSOC) has a promising application prospects in renewable integrated energy systems. Low-temperature hydrogen storage technologies take stack power as system power in power allocation strategy making. A RSOC system is equipped with a large power consumption auxiliary system, Balance of Plant (BOP), to maintain its high-temperature operation, and the power control rate is limited by the safety temperature. Therefore, the power allocation strategy for the RSOC is decided by the power consumption of the BOP and power control rate of the RSOC hydrogen-water energy conversion system. The modelling of an RSOC-based wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system should make developing the power model for the RSOC hydrogen-water energy conversion system with BOP the priority. To optimize the power distribution in the RSOC-based wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system, a power distribution strategy considering the constraints of the RSOC power control rate and the capacities of subsystems is established, with the goals of minimizing the system daily operating cost and maximizing the consumption of the wind and photovoltaic power. The optimization is solved by multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm. Compared with the general operation strategies, the optimization strategy proposed provides the system with more benefits. Moreover, the participation of the power grid and the storage battery increases the flexibility of the power regulation and reduces the overall operating power of the system.

Keywords: hydrogen storage technology; reversible solid oxide cell; renewable integrated energy system; power distribution optimization; multi-objective particle swarm optimization

0 引言

太阳能、风能具有易获得、零排放、数量巨大等

特性,是目前可再生能源应用的研究热点。然而,由于光伏、风电机组发电具有间歇性、随机性等特性,造成弃风弃光、资源利用率低等现象^[1]。接入储能能够有效地平抑风光发电的间歇性和随机性,提高资源利用率。近年来,燃料电池与电解水装置结合的氢储能技术受到广泛的关注,与其他储能技术

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5209KZ21N003)
Science and Technology of SGCC (5209KZ21N003)

相比,氢储能技术具有安静、清洁无污染、寿命长、可实现大规模储能等优点,能够有效地解决新能源发展的瓶颈问题,因此成为一个很有前景的储能方式^[2]。

目前,主要的氢储能技术包括碱性电解水(Alkaline Electrolytic Cell, AEC)技术^[3]、质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)技术^[4]和可逆固体氧化物电池(Reversible Solid Oxide Cell, RSOC)技术^[5]。相比于RSOC技术, AEC和PEM技术较为成熟,已经成功在商业领域进行推广和应用,成为风光氢综合能源系统中氢电转化的主要应用技术,因此相关研究也主要以AEC和PEM技术为主,重点在风光氢综合能源系统配置优化和运行调控两方面。在系统配置优化研究方向,文献[6-7]基于AEC电解技术搭建了风光氢储综合能源系统模型,并从系统整体效益出发对系统开展了配置优化研究。文献[8-9]构建了基于AEC电解和PEM发电技术的风光氢综合能源系统,以年综合成本和年碳排放量最小、效益最大化为目标,对系统进行了容量配置优化。文献[10]基于PEM电解和发电技术,建立了考虑海上负荷功能和输电成本的风电氢能综合能源系统配置优化模型。在系统运行调控方向,文献[11]研究了包含电制氢装置的不同控制方式,提出了含电制氢装置的综合能源系统运行优化模型。文献[12]基于AEC电解和PEM发电技术构建了风光氢综合能源系统拓扑结构,提出了系统在线能量调控策略,并搭建实验平台进行验证。文献[13]以日运行成本为目标,构建了考虑光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略。文献[14]基于电热氢混合储能的综合能源系统,以运行经济性 & 环境成本最小为目标开展系统能量管理优化研究。文献[15]构建风光氢综合能源系统设计及运行集成优化模型,对典型的优化策略进行了优选。

RSOC是基于固体氧化物电池的电解与制氢技术,与低温技术AEC和PEM相比,高温运行环境导致其具有更高的电解和发电效率。

其次,在风光氢综合能源系统中,基于AEC和PEM技术实现氢电可逆转化必须配备制氢与发电两套系统,而RSOC单个装置可以实现制氢与发电的可逆转化,因此能够有效减小风光氢综合能源系统装置规模,降低成本^[16]。目前,基于RSOC的综合能源系统配置优化已经受到一些学者的研究。文献[17]以最小化系统的投资成本为目标,提出了包含光热、RSOC和热回收装置的系统容量配置优化策略。文献[18]提出了包含光伏阵列、风力发电机组、蓄电池、RSOC的综合能源系统,以系统成本、系

统缺额和冗余电力为目标,开展系统容量规划研究。文献[19]提出基于RSOC的电氢一体化能源站设想,并对能源站内的RSOC系统和储氢库进行容量规划。

目前,基于RSOC的风光氢综合能源系统运行优化方向的相关研究内容较少。为此,本文建立了基于RSOC的风光氢综合能源系统运行调控模型,考虑系统运行成本以及电网价格波动,以系统运行成本最小化、风光电力消纳最大化为目标,对基于RSOC的风光氢综合能源系统开展运行优化研究。

1 风光氢综合能源系统

1.1 风光氢综合能源系统拓扑结构

基于RSOC的风光氢综合能源系统结构如图1所示,系统主要包括光伏阵列、风力发电机组、RSOC氢电转化系统、储氢系统和蓄电池。

光伏阵列和风力发电机组作为系统电力来源,为负载提供电力。RSOC与储氢系统作为系统氢电转化装置,用于稳定风光发电功率波动。蓄电池作为备用储能设备,用于快速响应负载需求变化。

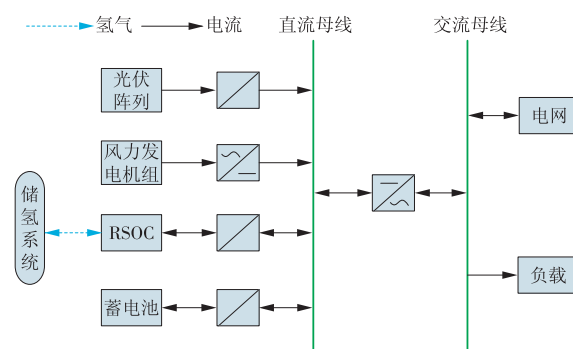


图1 风光氢综合能源系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of a wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system

1.2 基于RSOC技术的电氢转换系统

RSOC氢电转化系统的核心是固体氧化物电池(Solid Oxide Cell, SOC),其可以在制氢与发电可逆模式下运行。在固体氧化物电解制氢(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)模式下,RSOC通过电解将水蒸气分解为氢气和氧气。在固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)模式下,RSOC能够通过将氢气氧化进行发电。

RSOC氢电转化系统在SOEC模式和SOFC模式下的系统工艺流程如图2所示。由图2a可知,系统在SOEC模式下,纯水通过蒸汽发生器产生蒸汽,经过与电堆阴极出口的高温气体换热后,进入电加热器进一步加热至750℃,最后进入电堆阴极电解。阴极电解出来的氢气和蒸汽混合气经过与入口空气

体换热、水冷后,进入汽水分离器除去气体中水分,最后进入压缩系统。在阳极侧,空气经过压缩并与阳极出口气体换热后,进入电加热器进一步加热至 750 ℃,最后进入电堆阳极。阳极出口的富氧空气经过换热、水冷后直接排空。

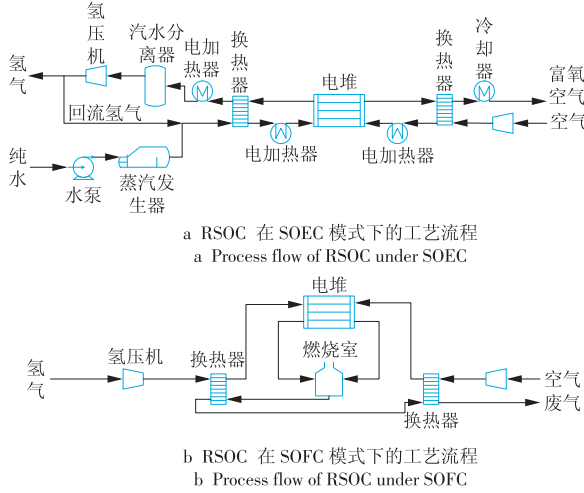


图 2 RSOC 氢电转换系统工艺流程

Fig. 2 Process flow of the RSOC hydrogen-electric conversion system

由图 2b 可知,系统在 SOFC 模式下,氢气经过氢压机与燃烧室烟气进行换热后进入电堆阳极。在阴极侧,空气经过空压机与燃烧室烟气换热后进入电堆阴极。电堆两侧出口气体直接进入燃烧进行燃烧,产生的烟气与阴阳两极入口气体换热后排空。

2 风光氢综合能源系统模型

2.1 光伏阵列出力模型

光伏将光能转化成电能,本文主要研究光伏输出波动性对系统的影响,并不考虑光伏自身的动态调控,因此采用经验模型^[20],具体公式如下

$$P_{pv}(t) = P_{STC} \frac{I_{ING}}{I_{STC}} [1 - k(T_{out} - T_s)], \quad (1)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为光伏阵列的实时出力; P_{STC} 为光伏阵列的额定出力; I_{ING} 为实时辐照强度; I_{STC} 为光伏阵列的额定辐照强度; k 为光伏阵列的发电系数; T_{out} 为光伏阵列的外界温度; T_s 为光伏阵列的参考温度。

2.2 风力发电机组出力模型

风机主要将风能转化为电能,采用经验模型对风力出力进行预测^[21],具体公式如下

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{in} \text{ or } v \geq v_{out} \\ P_{0,WT} \left(\frac{v^3 - v_{in}^3}{v_N^3 - v_{in}^3} \right) & v_{in} < v < v_N \\ P_{0,WT} & v_N \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为当前风电机组的实时出力; $P_{0,WT}$ 为风

机额定出力; v 为当前风速; v_{in} 为切入风速,数值为 3; v_N 为额定风速,数值为 11.3; v_{out} 为切出风速,数值为 25。

2.3 氢气系统模型

氢气主要通过储氢罐进行存储,储氢罐的体积大小会影响 RSOC 的工作模式,目前对于储氢罐的存储水平主要通过储罐压力进行评判,因此本文所建立的储氢罐模型如下

$$p_{\text{tank}}(t) = p_{\text{tank}}(t-1) + \frac{\Delta m_{H_2} RT_{\text{tank}}}{V_{\text{tank}}}, \quad (3)$$

式中: $p_{\text{tank}}(t)$ 和 $p_{\text{tank}}(t-1)$ 分别是 t 时刻和 $t-1$ 时刻的储氢罐压力; Δm_{H_2} 为 $t-1$ 时刻到 t 时刻储氢罐氢气的变化量; T_{tank} 为储氢罐温度; V_{tank} 为储氢罐体积; R 为摩尔气体常数,8.314 51 J/(mol·K)。

2.4 蓄电池系统模型

荷电状态(State Of Charge, SOC)用于表示蓄电池剩余容量,蓄电池的充放电模型如下

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) + \frac{P_{ch} \eta_{ch}}{C_{max}} \Delta t, \quad (4)$$

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) - \frac{P_{dis}}{C_{max} \eta_{dis}} \Delta t, \quad (5)$$

式中: P_{ch} 和 P_{dis} 分别为蓄电池的充电和放电功率; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为蓄电池充电和放电效率,值为 95%; C_{max} 为蓄电池的容量; Δt 为充放电时间,1 h。

2.5 RSOC 氢电转换系统模型

RSOC 氢电转换系统是在高温环境下运行的,因此需要在外围配备(Balance Of Plant, BOP)系统来维持电堆的高温运行环境。如图 2a 所示,RSOC 在 SOEC 模式下,电堆外围配备了蒸汽发生器、电加热器以及氢气压缩机等高功耗设备,其能耗占比接近系统能耗的 40%^[22],这对系统运行调控具有显著的影响。因此,RSOC 氢电转换系统在 SOEC 模式下其系统功耗计算如下

$$P_{SOEC}(t) = P_{stack} + P_{pump} + P_{vap} + P_{ch} + P_{cp}, \quad (6)$$

式中: $P_{SOEC}(t)$ 为 RSOC 氢电转换系统在 SOEC 模式下的实时功耗; P_{stack} 为电解堆电解所消耗的功耗; P_{pump} 为给水泵的功耗; P_{vap} 为蒸汽发生器的功耗; P_{ch} 为阴阳两极侧的电加热器功耗; P_{cp} 为氢气压缩机和空气压缩机的功耗。

SOEC 电解功耗模型为

$$P_{stack} = U_{el} I_{el}, \quad (7)$$

式中: I_{el} 为电解电流; U_{el} 为电解电压,其值是由 I_{el} 决定的,详细计算方法参考文献[5]。

给水泵功耗模型为

$$P_{pump} = \frac{q_{m, H_2O} (p_{pump, out} - p_{pump, in})}{\eta_{pump, e} \eta_{pump, m}}, \quad (8)$$

式中: q_{m, H_2O} 为水的流量; $p_{pump, in}$ 和 $p_{pump, out}$ 为给水泵的进出口压力; $\eta_{pump, e}$ 和 $\eta_{pump, m}$ 为给水泵的等熵效率和轴效率。

蒸汽发生器功耗模型为

$$P_{vap} = \frac{q_{m, H_2O}(h_v - h_l)}{\eta_{vap}}, \quad (9)$$

式中: h_v 和 h_l 分别为蒸汽发生器进出口的比焓; η_{vap} 为蒸汽发生器的热效率。

电加热器功耗模型为

$$P_{eh} = \sum_i P_{eh, i} = \sum_i q_{m, in, i} c_{p, i} \Delta T_i / \eta_{eh, i}, \quad (10)$$

式中: i 表示阴阳两极的水蒸气和空气; $q_{m, in, i}$ 为进入电加热器的介质流量; $c_{p, i}$ 为介质的平均比热容; ΔT_i 为电加热器进出口温差; $\eta_{eh, i}$ 为电加热器的热效率。

压缩机功耗模型为

$$P_{cp} = \sum_i P_{cp, i} = \sum_i \frac{K}{K-1} P_{cp, in, i} q_{V, cp, in, i} \left[\left(\frac{p_{cp, out, i}}{p_{cp, in, i}} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right], \quad (11)$$

式中: i 表示空气和氢气; K 为压缩介质的等熵指数; $p_{cp, in, i}$ 和 $p_{cp, out, i}$ 分别为压缩机的进出口压力; $q_{V, cp, in, i}$ 为压缩机的进口气体体积流量。

如图2b所示,RSOC氢电转换系统在SOFC模式下所需的外围BOP较少,几乎没有大功耗部件,因此RSOC氢电转换系统在SOFC模式下其系统供给功率只考虑电堆发电功率,计算如下

$$P_{SOFC}(t) = U_{fu} I_{fu}, \quad (12)$$

式中: $P_{SOFC}(t)$ 为RSOC氢电转换系统在SOFC模式下的系统实时发电功率; I_{fu} 为发电电流; U_{fu} 为发电电压。

3 风光氢综合能源系统运行优化策略

在基于RSOC的风光氢综合能源系统运行优化方面,本文考虑了系统负荷需求供给平衡约束、各类设备容量约束和设备运行约束,采用时间尺度($\Delta t=1$ h)进行系统功率调节,来实现风光电力消纳和系统运行效益最大化。

3.1 目标函数

(1)目标1:系统在运行过程中尽可能通过系统自身来消纳光伏阵列和风电机组发出的电力,提高系统的风光消纳率。

$$\max P_{re, sys}(t) = P_{pv, sys}(t) + P_{wind, sys}(t), \quad (13)$$

式中: $P_{re, sys}(t)$ 为 t 时刻综合能源系统消纳的可再生能源发电总功率; $P_{pv, sys}(t)$ 为 t 时刻综合能源系统消纳的光伏发电功率; $P_{wind, sys}(t)$ 为 t 时刻综合能源系统消纳的风电机组发电功率。

(2)目标2:以系统总运行成本最小为目标。

$$\min C = \sum_{i=1}^{24} C_{grid}(t) + C_{H_2, SOFC}(t) - R_{H_2, SOEC}(t) - R_{pv}(t) - R_{wind}(t), \quad (14)$$

式中: $C_{grid}(t)$ 为系统与电网的购电费用; $C_{H_2, SOFC}(t)$ 为RSOC氢电转换系统在SOFC模式下运行时所需外购的氢气费用; $R_{H_2, SOEC}(t)$ 为RSOC氢电转换系统在SOEC模式下运行时系统外输氢气的收益; $R_{pv}(t)$ 为光伏上网的收益; $R_{wind}(t)$ 为风电上网的收益。

其中,系统网购电费、购气费用、卖气收益、风光上网收益具体表示如下

$$\begin{cases} C_{grid}(t) = P_{grid}(t) \times \Delta t \times f_{grid}(t) \\ C_{H_2, SOFC}(t) = m_{H_2, SOFC}(t) \times \Delta t \times f_{H_2}(t) \\ R_{H_2, SOEC}(t) = m_{H_2, SOEC}(t) \times \Delta t \times f_{H_2}(t), \\ R_{pv}(t) = P_{pv, grid}(t) \times \Delta t \times f_{pv}(t) \\ R_{wind}(t) = P_{wind, grid}(t) \times \Delta t \times f_{wind}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{grid}(t)$ 为系统从电网的购电功率; $f_{grid}(t)$ 为电网的实时电价; $m_{H_2, SOFC}(t)$ 为RSOC氢电转换系统在SOFC模式下运行时所需外购的氢气量; $m_{H_2, SOEC}(t)$ 为RSOC氢电转换系统在SOEC模式下运行时外输的氢气量; $f_{H_2}(t)$ 为氢气的价格; $P_{pv, grid}(t)$ 为光伏上网功率; $f_{pv}(t)$ 为光伏上网价格; $P_{wind, grid}(t)$ 为风电上网功率; $f_{wind}(t)$ 为风电上网价格。

3.2 约束条件

3.2.1 系统功率平衡

$$P_{pv, sys}(t) + P_{wind, sys}(t) + P_{RSOC}(t) + P_{ba}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t), \quad (16)$$

式中: $P_{RSOC}(t)$ 为RSOC在 t 时刻的运行功率,在SOEC模式下 $P_{RSOC}(t)=P_{SOEC}(t)$,在SOFC模式下 $P_{RSOC}(t)=P_{SOFC}(t)$; $P_{ba}(t)$ 为蓄电池在 t 时刻的充放电功率,正值表示放电,负值表示为充电; $P_{load}(t)$ 为负载 t 时刻所需功率。

3.2.2 光伏阵列出力约束

上网电力与供给负载电力满足功率平衡:

$$P_{pv}(t) = P_{pv, grid}(t) + P_{pv, sys}(t). \quad (17)$$

上网电力约束:

$$0 \leq P_{pv, grid} \leq P_{pv}(t). \quad (18)$$

3.2.3 风电机组出力约束

上网电力与供给负载电力满足功率平衡

$$P_{wind}(t) = P_{wind, grid}(t) + P_{wind, sys}(t). \quad (19)$$

上网电力约束:

$$0 \leq P_{wind, grid} \leq P_{wind}(t). \quad (20)$$

3.2.4 RSOC系统运行功率约束

RSOC氢电转换系统的运行功率约束

$$-P_{SOEC, max} \leq P_{RSOC}(t) \leq P_{SOFC, max}, \quad (21)$$

式中: $P_{\text{SOEC}, \max}$ 为 RSOC 氢电转换系统在 SOEC 模式下最大运行功率; $P_{\text{SOFC}, \max}$ 为 RSOC 氢电转换系统在 SOFC 模式下的最大运行功率。

RSOC 氢电转化系统在运行过程, 为了保证系统的安全运行, 对其调控幅度需进行约束

$$|P_{\text{RSOC}}(t) - P_{\text{RSOC}}(t-1)| \leq \Delta P_{\text{RSOC}, \max}, \quad (22)$$

式中: $\Delta P_{\text{RSOC}, \max}$ 为 RSOC 氢电转换系统最大调控功率。

3.2.5 氢气储罐压力约束

$$p_{\text{tank}, \min} \leq p_{\text{tank}}(t) \leq p_{\text{tank}, \max}, \quad (23)$$

式中: $p_{\text{tank}, \min}$ 和 $p_{\text{tank}, \max}$ 分别为储氢罐的压力下限和上限值。

3.2.6 蓄电池的约束

$$S_{\text{OC}, \min} \leq S_{\text{OC}}(t) \leq S_{\text{OC}, \max}, \quad (24)$$

式中: $S_{\text{OC}, \min}$ 和 $S_{\text{OC}, \max}$ 分别为蓄电池荷电状态的下限值和上限值。

3.3 求解算法

上述多时间尺度优化调度模型包含两个目标以及大量的约束条件, 因此是一个带约束的多目标优化问题。

粒子群优化算法广泛应用于综合能源系统的容量规划和调控优化研究^[18, 23], 本文采用多目标粒子群优化算法 (Multiple Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 对所建立的优化问题进行求解, 获取帕累托最优解集。

同时, 针对约束问题, 通过对目标增加罚函数的方法将带约束的优化问题转化为无约束优化问题进行求解。

本文对每个时刻的决策变量 $P_{\text{pv}, \text{sys}}, P_{\text{wind}, \text{sys}}, P_{\text{RSOC}}, P_{\text{ba}}$ 和 P_{grid} 开展多目标优化研究, 根据上个时刻优化结果来更新蓄电池荷电状态和储氢罐压力状态, 并作为下个时刻种群初始化及约束条件的参数, 详细计算步骤如图 3 所示。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文所设置的案例其风光氢综合能源系统各设备容量见表 1, 模型中光照强度、风速、负载负荷分布等波动数据参考文献[18], 其日分布曲线如图 4 所示。优化模型参数和分时电价见表 2 和表 3。

4.2 优化结果比较

本文基于以上案例, 参考文献[18]所采用的风光氢综合能源系统运行策略进行了仿真, 并与本文优化后的运行策略进行了比较。文献[18]所采取的运行策略如下:

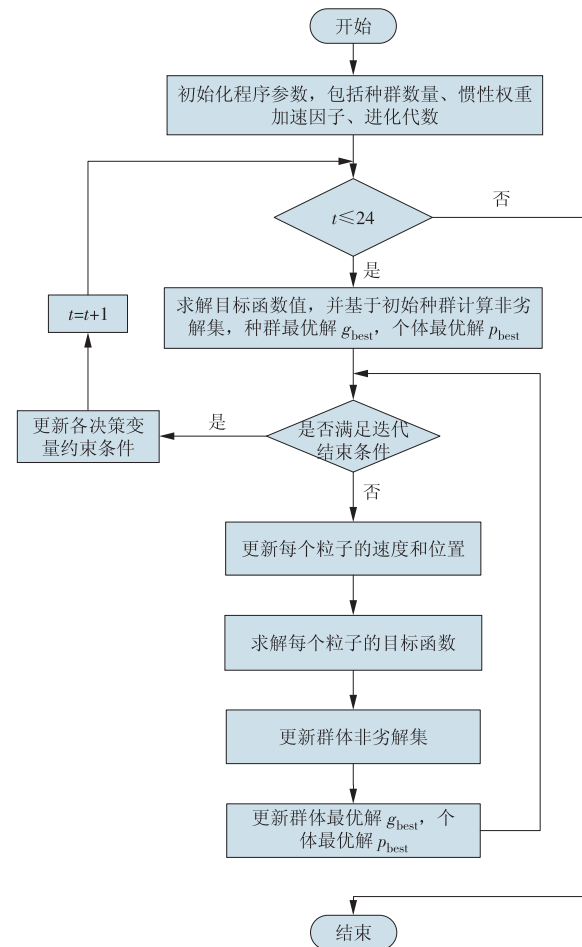


图 3 程序计算框

Fig. 3 Block of the programming computation

表 1 风光氢综合能源系统容量规模

Table 1 Capacities of subsystems in the wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system

设备	配置规模
光伏阵列/kW	1 231
风力发电机组/kW	727
RSOC 氢电转化系统/kW	792
蓄电池/kW	600
储氢罐/m ³	17

(1) 当风光发电不满足负载需求时, 通过 SOFC 发电和蓄电池供电, 缺额电力从电网购买。

(2) 当风光发电大于负载需求时, 通过 SOEC 电解和蓄电池进行消纳, 多余电力并入电网。

优化前后运行策略下的系统电量分布如图 5 和图 6 所示, 从图中可以看出系统电量供需达到平衡。

比较图 5 和图 6 可以发现, 优化前后系统运行方式主要差别是在下午时段, 即光伏、风电机组高出力时段, 相比于优化前运行策略, 优化后系统的光伏、风机发电功率部分功率并网, 并没有类似于未优化方案那样尽可能由 RSOC 或者蓄电池进行消纳。因此, 导致了优化后运行策略下系统的整体功

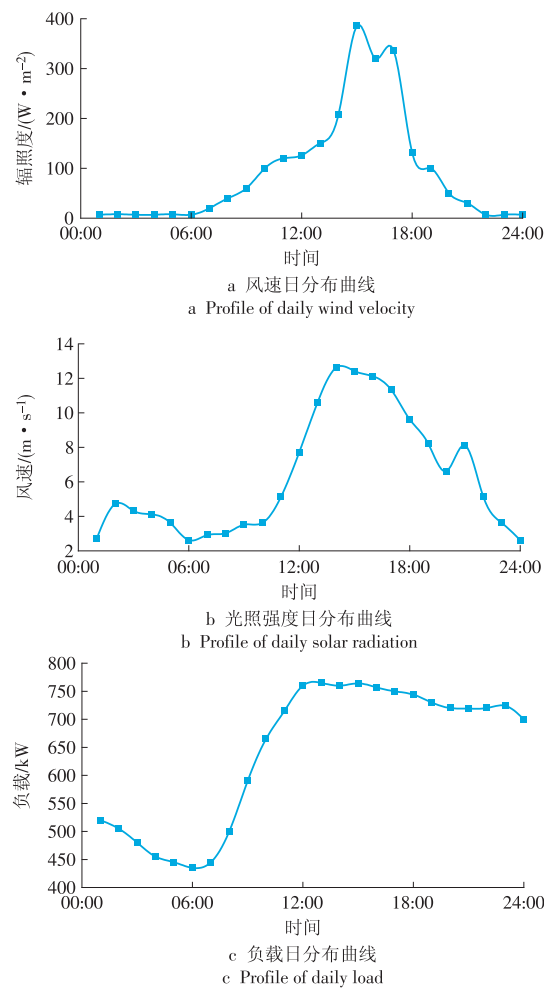


图4 风速、光照强度、负载负荷日分布曲线

Fig. 4 Profiles of daily wind velocity, solar radiation and load

表2 调控模型输入参数

Table 2 Model input parameters

模型参数	数值	模型参数	数值
$P_{\text{SOEC,max}}/\text{kW}$	2 376	$S_{\text{OC,min}}/\%$	20
$P_{\text{SOFC,max}}/\text{kW}$	792	$S_{\text{OC,max}}/\%$	100
$\Delta P_{\text{RSOC,max}}/\text{kW}$	300	$f_{\text{H}_2}(t)/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$	34
$p_{\text{tank,min}}/\text{MPa}$	20	$f_{\text{pv}}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.85
$p_{\text{tank,max}}/\text{MPa}$	45	$f_{\text{wind}}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.47

表3 分时电价

Table 3 Time-of-use price

项目	时段	$f_{\text{grid}}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$
峰时	07:00—09:00, 18:00—24:00	0.76
平时	02:00—04:00, 11:00—18:00	0.51
谷时	24:00—02:00, 04:00—07:00, 09:00—11:00	0.26

率峰值低于优化前,即在较低的系统运行功率下满足负载的功率需求。

此外,相较于未优化的运行策略,优化后的运行策略中蓄电池参与系统功率调节的频率更高。因此,优化后运行策略下系统功率调节具有更高的

灵活性,并且从电网购买的电量也大幅度减少。

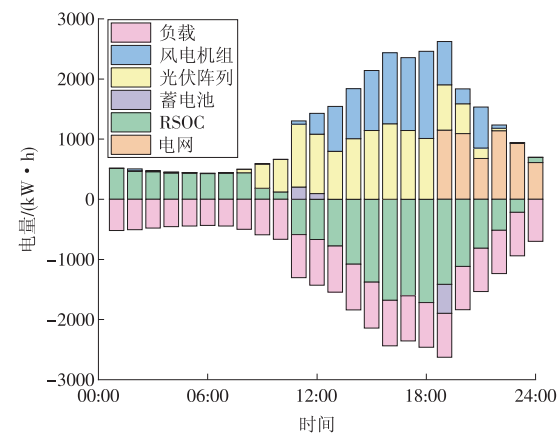


图5 优化前系统电量平衡

Fig. 5 Electricity balance before the optimization

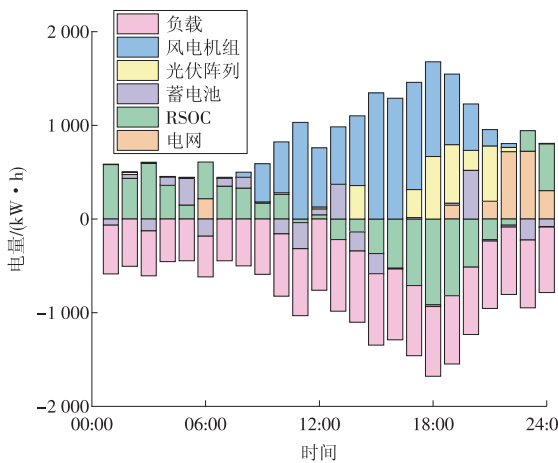


图6 优化后系统电量平衡

Fig. 6 Electricity balance after the optimization

风光氢综合能源系统优化前后运行策略下的运行成本如图7所示,图中负值表示系统存在盈利。由图7可知,相比于未优化的运行策略,优化后的运行策略创造了更高的日收益。

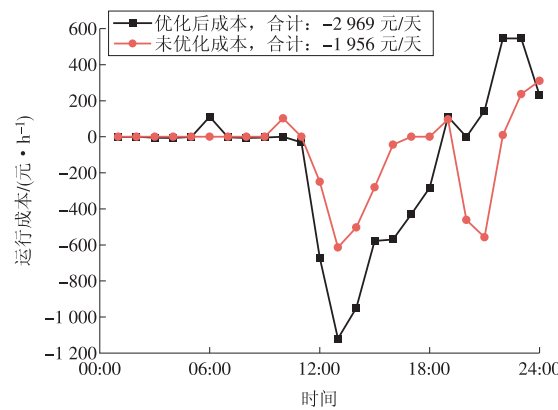


图7 系统优化前后的运行成本比较

Fig. 7 Operation costs before and after the system optimization

对图7曲线进行具体分析可以发现,优化后运行策略下的系统收益高于优化前的主要原因是因为在下午时段,优化后的运行策略具有更多的光伏

和风力发电并网获取收益。

此外,在夜晚时段优化后系统运行收益开始低于未优化的运行策略,这是因为在未优化的运行策略下,下午时段以及夜晚时段 RSOC 都在较高功率的电解模式下运行,从而产生大量的外输氢气,获得较高的收益所致。

风光氢综合能源系统优化前后运行策略下的系统所消纳的风光电量如图 8 所示。从图中可以看出,尽管以系统消纳风光电量最大化为目标,但相比于未优化的运行策略,优化后的运行策略系统所消纳的风光电量更少。首先,这是因为未优化的方案以 SOEC 和蓄电池对多余的风光电量进行消纳为主,并入电网为辅。

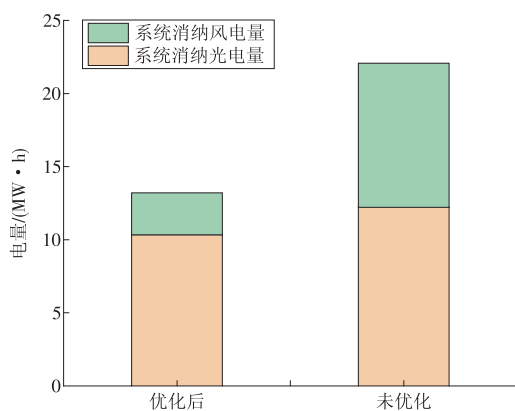


图 8 优化前后系统风光电量消纳

Fig. 8 Photovoltaic and wind power consumptions before and after the system optimization

其次,在优化目标中,风光电并网是一个主要的收益来源,因此系统风光电消纳最大化与系统运行成本最小两者相互矛盾,为了获取较高的收益,牺牲了部分系统风光电消纳量。

此外,从优化后风光电消纳比例可以看出,由于光伏上网电价较高,因此更多的光伏发电并网以获取较高的收益。

4.3 案例分析

RSOC 氢电转化系统的运行功率分布如图 9 所示。上午时段由于光伏阵列和风电机组出力几乎为 0,因此 RSOC 氢电转化系统主要在 SOFC 模式下运行。

随着进入中午和下午时段,光伏阵列和风电机组出力增大,RSOC 氢电转化系统由 SOFC 模式逐渐逆转成 SOEC 模式,在 18:00 处电解功率达到峰值。夜晚时段,由于光伏阵列和风电机组出力减小,SOEC 电解功率逐渐减小,且由于调控速度限制,系统在缺电的状态下 RSOC 氢电转化系统仍然处于 SOEC 模式。

储氢罐压力分布如图 10 所示,其分布趋势与

RSOC 氢电转换系统的运行功率相对应。在 SOFC 模式下,储氢罐压力逐渐下降。在 SOEC 模式下,储氢罐压力逐渐上升。蓄电池充放电功率分布如图 11 所示。

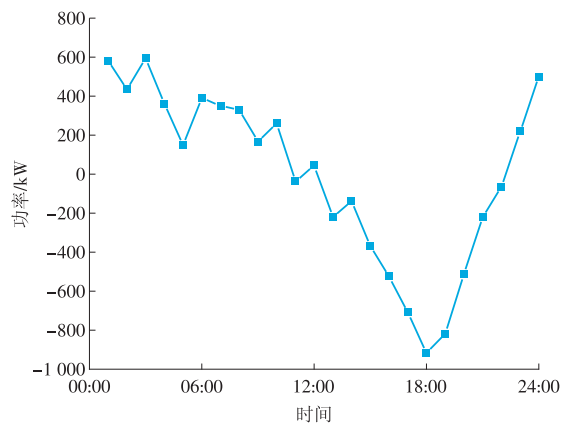


图 9 RSOC 氢电转化系统功率分布

Fig. 9 Power distribution of the hydrogen-electric conversion system based on RSOC

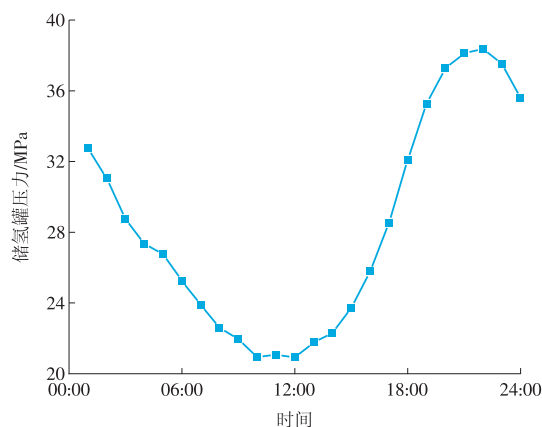


图 10 储氢罐压力分布

Fig. 10 Press distribution of the hydrogen storage tank

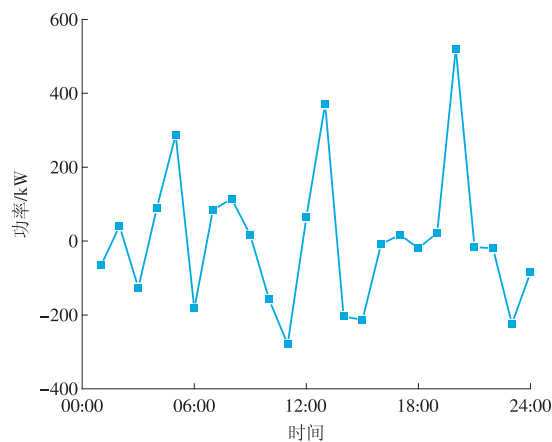


图 11 蓄电池充放电功率分布

Fig. 11 Power distribution of the battery

蓄电池主要作为系统功率调节的备用存储设备,因此不同于 RSOC 运行功率具有明显的分布趋势,蓄电池的功率分布较为波动,尤其在下午时段,

光伏和风电机组出力的高峰时段,此时的蓄电池功率波动较大。蓄电池荷电状态分布如图12所示,其分布趋势与蓄电池的运行功率相对应。

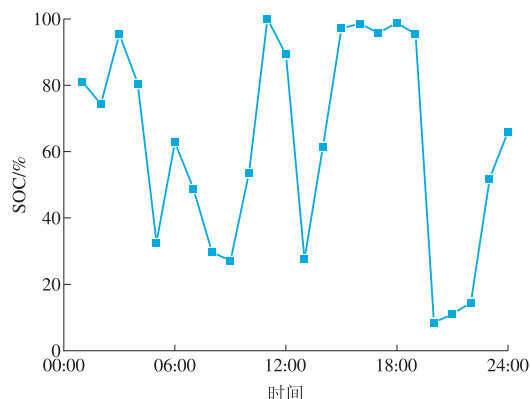


图12 蓄电池荷电状态分布

Fig. 12 SOC distribution of the battery

5 结束语

本文提出了基于RSOC的风光氢综合能源系统运行优化策略,以系统运行成本最小化、风光消纳最大化为目标,通过多目标粒子群优化算法对各设备运行功率进行求解,并通过算例证明了优化后运行策略的优越性,主要结论如下。

(1)考虑了RSOC自身特性和运行约束,提出了基于RSOC的风光氢综合能源系统运行优化策略。

(2)优化后的运行策略具有更优的系统日运行效益,相较于常规运行策略,优化后系统日效益提高近50%。

(3)光伏阵列和风电机组高出力时段发电并网是系统产生高收益的主要原因,蓄电池的参与增加了系统功率调节的灵活性。

参考文献:

- [1]王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报, 2012, 32(16):1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (16): 1-8.
- [2]刘坚,钟财富.我国氢能发展现状与前景展望[J].中国能源, 2019, 41(2):32-36.
LIU Jian, ZHONG Caifu. Development status and prospect of the hydrogen energy development in China [J]. Energy of China, 2019, 41(2):32-36.
- [3]李洋洋,邓欣涛,古俊杰,等.碱性水电解制氢系统建模综述及展望[J].汽车工程, 2022, 44(4): 567-582.
LI Yangyang, DENG Xintao, GU Junjie, et al. Comprehensive review and prospect of the modeling of alkaline water electrolysis system for hydrogen production [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 567-582.
- [4]何泽兴,史成香,陈志超,等.质子交换膜电解水制氢技术的发展现状及展望[J].化工进展, 2021, 40(9): 4762-4773.
HE Zexing, SHI Chengxiang, CHEN Zhichao, et al. Development status and prospects of proton exchange membrane water electrolysis [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9):4762-4773.
- [5]NI M, LEUNG M K H, LEUNG D Y C. Parametric study of solid oxide steam electrolyzer for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2305-2313.
- [6]吴锋棒.风光氢储综合能源系统优化配置[J].山东化工, 2020, 49(16):135-138.
WU Fengbang. Optimized configuration of wind-solar hydrogen storage integrated energy system [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(16):135-138.
- [7]YANG Z, ZHANG G, LIN B. Performance evaluation and optimum analysis of a photovoltaic - driven electrolyzer system for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(8):3170-3179.
- [8]周建力,乌云娜,董昊鑫,等.计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J].电力系统自动化, 2021, 45(24):30-40.
ZHOU Jianli, WU Yunna, DONG Haoxin, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (24) : 30-40.
- [9]熊宇峰,司杨,郑天文,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J].电工技术学报, 2021, 36(3):507-516.
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on Stackelberg game [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (3):507-516.
- [10]李梓丘,乔颖,鲁宗相.海上风电-氢能系统运行模式分析及配置优化[J].电力系统自动化, 2022, 46(8): 104-112.
LI Ziqiu, QIAO Ying, LU Zongxiang. Operation mode analysis and configuraton optimization of offshore wind-hydrogen system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8):104-112.
- [11]郭梦婕,严正,周云,等.含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J].中国电力, 2020, 53(1):115-123.
GUO Mengjie, YAN Zheng, ZHOU Yun, et al. Optimized

- operation design of integrated energy system with with power hydrogen production[J]. Electric Power, 2020, 53(1):115-123.
- [12]孔令国,蔡国伟,李龙飞,等.风光氢综合能源系统在线能量调控策略与实验平台搭建[J].电工技术学报, 2018,33(14):3371-3384.
- KONG Lingguo, CAI Guowei, LI Longfei, et al. Online energy control strategy and experimental platform of integrated energy system of wind, photovoltaic and hydrogen [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3371-3384.
- [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 Ziqiao, LI Zhengwen, ZHANG Wenda, et al. Economic operation strategy of hydrogen integrated energy system considering uncertainty of photovoltaic output power [J]. Automation of Electric power Systems, 2021, 41(10): 99-106.
- [14]黄健,候健生,季克,等.基于电热氢混合储能的综合能源系统的能量管理优化研究[J].电工电能新技术, 2022, 41(12): 9-19.
- HUANG Jian, HOU Jiansheng, JI Ke, et al. Research on energy management optimization of integrated energy system based on electric-thermal-hydrogen energy storage [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(12): 9-19.
- [15]沈主浮,窦真兰,张春雁,等.风光氢综合能源系统设计及运行集成优化[J].能源技术, 2022,43(1): 47-53.
- SHEN Zhufu, DOU Zhenlan, ZHANG Chunyan, et al. Design and operation integrated optimization of wind-solar-hydrogen integrated energy system [J]. Energy Technology, 2022, 43(1):47-53.
- [16]FRANK M, DEJA R, PETERS R, et al. Bypassing renewable variability with a reversible solid oxide cell plant [J]. Applied Energy, 2018, 217: 101-112.
- [17]FEI X, XUEJUN R, RAZMJOOY N. Optimal configuration and energy management for combined solar chimney, solid oxide electrolysis, and fuel cell: A case study in Iran[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019, 1-21.
- [18]LI G, YUAN B, GE M, et al. Capacity configuration optimization of a hybrid renewable energy system with hydrogen storage [J]. International Journal of Green Energy, 2022, 1-17.
- [19]高赐威,王崴,陈涛.基于可逆固体氧化物电池的电氢一体化能源站容量规划[J].中国电机工程学报, 2022, 17(1): 6155-6169.
- GAO Ciwei, WANG Wai, CHEN Tao. Capacity planning of electric-hydrogen integrated energy station based on reversible solid oxide battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 17(1): 6155-6169.
- [20]欧阳斌,袁志昌,陆超,等.考虑源-荷-储多能互补的冷-热-电综合能源系统优化运行研究[J].发电技术, 2020, 41(1): 19-29.
- OYANG Bin, YUAN Zhichang, LU Chao, et al. Research on optimal operation of cold-thermal-electric integrated energy system considering source-load-storage multi-energy complementarity [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1):19-29.
- [21]HASSANZADEHFARD H, TOORYAN F, COLLINS E R, et al. Design and optimum energy management of a hybrid renewable energy system based on efficient various hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(55):30113-30128.
- [22]LI G, XIAO G, GUAN C, et al. Assessment of thermodynamic performance of a 20 kW high-temperature electrolysis system using advanced exergy analysis [J]. Fuel Cell, 2021, 21(6):550-565.
- [23]姚芳,杨晓娜,葛磊蛟,等.风-光-氢能源系统容量优化配置研究[J].综合智慧能源, 2022, 44(5):56-63.
- YAO Fang, YANG Xiaona, GE Leijiao, et al. Optimization of capacity allocation scheme for wind-solar-hydrogen energy system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 21(6):56-63.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2023-04-02;修回日期:2023-06-12
 上网日期:2023-07-25;附录网址:www.iienenergy.cn

作者简介:

李菁(1989),女,工程师,硕士,从事新能源发电方面的工作,1292203978@qq.com;

窦真兰*(1980),女,高级工程师,博士,从事综合能源系统、能源互联网、风力发电、氢能、储能、微网方面的工作, douzhl@126.com;

王加祥(1991),男,工程师,硕士,从事电气工程及其自动化方面的工作,13381878176@189.cn;

张春雁(1967),男,高级工程师,硕士,从事综合能源系统、能源互联网、电制氢及综合利用技术方面的工作, zhcytongji@126.com;

鲁涛(1991),男,工程师,从事电气工程及其自动化方面的工作,724907481@qq.com;

倪耀兵(1986),男,工程师,从事电气工程及其自动化方面的工作,407661478@qq.com。

*为通信作者。