

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.021

并网型风光氢储微电网容量优化配置研究

王若谷¹, 常小强^{1,2}, 高欣¹, 赵海英³, 任静⁴, 郭丽⁵

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;
3. 国网西安市南供电公司, 西安 710000; 4. 国网西安市东供电公司, 西安 710005;
5. 国网安康供电公司, 陕西 安康 725000)

摘要: 本文以并网型风光氢储微电网为研究对象, 在满足年制氢量任务的前提下建立了以系统年收益最大为目标的经济优化模型, 对不同储能容量方案采用含罚函数的粒子群算法进行优化调度求解。最后对液态金属电池、液态金属电池-铅酸电池、锂电池、锂电池-铅酸电池四种储能配置方案进行对比研究, 发现液态金属电池现阶段因价格高单独使用时优势不明显, 而在混合储能系统中可以与铅酸电池优势互补。

关键词: 风光氢储微电网; 容量配置; 液态金属电池

Research on Capacity Optimization Configuration of Grid-connected Wind/PV/Hydrogen/Storage Micro grid

WANG Ruogu¹, CHANG Xiaoqiang^{1,2}, GAO Xin¹, ZHAO Haiying³, REN Jing⁴, GUO Li⁵

(1. Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710100, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Grid Xi'an South Power Supply Company, Xi'an 710000, China; 4. State Grid Xi'an East Power Supply Company, Xi'an 710005, China; 5. State Grid Ankang Power Supply Company, Shaanxi Ankang 725000, China)

Abstract: In this paper, the grid-connected wind/PV/hydrogen/storage micro grid is taken as the research object, on the premise of meeting the annual hydrogen production task, an economic optimization model aiming at the maximum annual income of the micro grid is set up, and the particle swarm algorithm with penalty function is used to solve the optimal scheduling problem of different energy storage capacity schemes. Finally, such four energy storage configuration schemes as liquid metal battery (LMB), liquid metal battery-lead-acid battery (LMB-LCB), lithium battery (LIB) and lithium battery-lead-acid battery (LIB-LCB) are compared, finding that liquid metal battery has no obvious advantages in the independent use at present stage due to high price, but can complement the advantages of lead-acid battery in hybrid energy storage system.

Keywords: wind/PV/hydrogen/storage micro grid; capacity configuration; liquid metal battery

0 引言

氢气作为一种清洁能源, 具有能量密度高、运行维护成本低、可长时间存储、储存过程无污染等优点, 在现代工业中具有广泛的应用前景^[1-5]。直接利用电网电能制氢会间接带来燃煤排放产生的污染问题, 可以考虑利用风光清洁能源制氢^[6-9]。但由

于风光电力具有间歇性和波动性, 其电能无法直接用于制氢, 需要借助储能系统平滑制氢功率, 以避免电解槽频繁启停和制氢功率波动过大^[10]。

传统储能技术多采用锂电池和铅酸电池等, 其技术较为成熟, 但寿命、成本和容量等方面还无法完全满足微电网的要求^[11]。而液态金属电池作为一种新型电池, 其工作电流大、寿命长、响应速度快^[12],

收稿日期: 2023-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0905605); 陕西省电力有限公司电力科学研究院项目(5226KY17001J)。

有望在微电网中作为储能元件使用。但目前关于液态金属电池在微电网中应用的研究较少,文献[13]在为光储氢微电网设置多能调度策略的基础上对液态金属电池的全寿命周期成本进行了预估。文献[14]也是基于光氢耦合系统建立了对液态金属电池评价模型,对不同液态金属电池容量配置时的微电网进行评分从而选择出最优配置结果。文献[13-14]共同点是均在自己提出储能调度策略的基础上进行容量配置的,但配置结果严重依赖所设计的调度策略。调度策略除人为事先规定外,还可以利用优化算法进行优化调度计算,如文献[15-16]都是针对不同微电网利用粒子群算法或者遗传算法进行优化调度配置的,但未涉及风光氢储微电网,也未研究不同储能类型对配置结果的影响。

风光氢储微电网中,氢储能主要包括制取氢气存储和氢燃料电池放电两种方式。文献[17]提出了一种基于模型预测控制算法的离网型光/风/氢/储混合系统能量调度方法,以满足负荷功率需求和储能装置的充电水平为优化目标,其中氢气的主要角色为在电量富裕时将其储备起来,并在不足时通过燃料电池的方式补充储能电池的能量供给。文献[18]的研究对象为塞浦路斯的住宅用小型微电网,其中氢气也是参与到从电能到化学能再到电能的能量循环体系中,通过一个详细的成本模型,对不同系统容量下的性能和容量配置的经济性进行了评估。文献[19]所研究的风光氢储微电网中氢储能也是以燃料电池的形式向外供电,并对微电网的容量优化配置进行了详细研究。文献[20]介绍了使用光伏发电厂的电源结合储能电池和氢气电解槽制氢的概念,通过混合整数线性规划的方法实现了总成本最小化的容量配置优化研究,论证了以制取氢气为目标光氢储微电网的可行性。

本文基于陕西某微网改造要求,研究以制氢售氢为目的的并网型风光氢储微电网容量优化配置问题,主要探讨风光氢储微电网中含液态金属电池的不同储能系统容量配置对微电网经济性的影响,为风光氢储微电网建设提供理论帮助。

1 风光氢储微电网模型

风光氢储微电网的主要目的在于利用风光资源制氢,实现不同能源的相互转化。本文设计如图1所示的并网型风光氢储微电网系统结构,可以利用风光电力进行制氢。

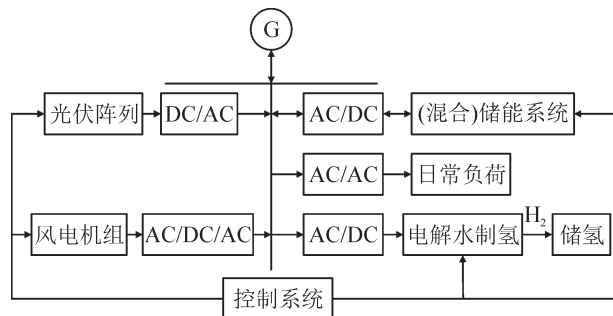


图1 风光氢储微电网拓扑结构图
Fig. 1 Topological diagram of wind/PV/hydrogen/storage micro grid

1.1 光伏阵列数学模型

光伏阵列理论输出功率公式为

$$P_{pv,k} = P_{STC} \frac{G_k}{G_{STC}} [1 + \alpha(T_k - T_{ref})] \quad (1)$$

式中: $P_{pv,k}$ 为 k 时刻光伏阵列的输出; G_{STC} 为标准测试条件下的光照强度,取 1000 W/m^2 ; T_{ref} 为参考温度,取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$; P_{STC} 为环境温度为 T_{ref} ,太阳光入射强度为 G_{STC} 时的最大输出功率; G_k 和 T_k 分别为 k 时刻的光照强度和电池板工作温度; α 为功率温度系数,取 $-0.47\%/^\circ\text{C}$ 。

1.2 风力发电机数学模型

风力发电机输出功率公式为

$$P_{w,k}(V_{w,k}) = \begin{cases} 0, & V_{w,k} > V_{out}, V_{w,k} < V_{in} \\ NP_r \frac{V_{w,k}^3 - V_{in}^3}{V_r^3 - V_{in}^3}, & V_{in} < V_{w,k} < V_r \\ NP_r, & V_r < V_{w,k} < V_{in} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{w,k}$ 为 k 时刻风电机组的输出; N 为风电机组中并网的风力发电机总数; P_r 为风力发电机的额定功率; $V_{w,k}$ 为 k 时刻风力发电机组的运行风速, $V_{w,k} = V_0(h_w/h_0)^\alpha$, V_0 为高度为 h_0 处的风速, h_w 为风机塔高, α 为常数,常取 0.13 ; V_{out} 、 V_{in} 和 V_r 分别为风力发电机组的切出风速、切入风速和额定风速。

1.3 电解水制氢数学模型

碱式电解槽随温度变化的电流-电压方程为^[21]。

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + s \log\left(\frac{t_1 + t_2 T + t_3 T^3}{A} I + 1\right) \quad (3)$$

式中: U 为电解槽的电压; U_{rev} 为可逆电化学过程的电动势, $U_{rev} = \Delta G/zF$, z 为可逆反应中转移的电子数, F 为法拉第常数,取 96485.31 C/mol ; r_1 和 r_2 为欧姆内阻随温度变化的参数,取 $8.05 \times 10^{-5} \text{ } \Omega\text{m}^2$ 和 $-2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/^\circ\text{C}$; s 和 t_1 、 t_2 、 t_3 为过电压系数,取 0.185 V 、 $-1.002 \text{ m}^2/\text{A}$ 、 $8.424 \text{ m}^2/^\circ\text{C}/\text{A}$ 、 $247.3 \text{ m}^2/^\circ\text{C}^3/\text{A}$; I 为电流;

A 为电解模块的面积。

电解槽的电压值 U_{AE} 公式为

$$U_{AE} = N_{AE} U \quad (4)$$

式中, N_{AE} 为串联电解槽的总数。

根据法拉第定律可知,氢气的产生速率和电解槽中的电子转移速率成正比,也就是说,产生的气体量与直流电流成正比,因此, k 时刻电解槽中的氢气产生量 Q_k 公式为

$$Q_k = \eta_{AE} \frac{N_{AE} P_{AE,k}}{U_{AE,k} z F} \quad (5)$$

式中: η_{AE} 为电解槽的氢气产生效率,通常取 80%^[22]; $P_{AE,k}$ 为 k 时刻的电解槽的功率。则电解槽额定功率与额定氢气产量之间的关系公式为

$$P_{rAE} = N_{AE} \frac{2Q_r NA}{3600 C_0 V_M} \times \frac{V_N}{\eta_{AE}} \quad (6)$$

则产生 Q 体积氢气的等效功率公式为

$$P_{\tan k} = \frac{Q}{Q_r} P_{rAE} \quad (7)$$

式中: P_{rAE} 为电解槽的额定功率; Q_r 为电解槽的额定氢气产率; NA 为阿伏伽德罗常数, 6.23×10^{23} ; V_M 为常温常压下的气体摩尔体积, 24.5 L/mol ; C_0 为单位库伦电子常数, 6.25×10^{18} ; $P_{\tan k}$ 为产生 Q 体积氢气的等效功率。

1.4 (混合)储能装置数学模型

本文所研究的(混合)储能装置为单一或多种电化学电池组成,因此,在混合储能方式时认为组合中两种电池的数学模型一致,只是其输出功率和电流的上下限有区别,电压模型公式为

$$U_{BT} = U_{ocv,BT} - I_{BT} R_{BT} \quad (8)$$

式中: U_{BT} 、 $U_{ocv,BT}$ 、 I_{BT} 、 R_{BT} 分别为对应电池种类的电池组输出电压、电池开路电压、电池组工作电流与电池组中电池内阻与串联导线电阻之和,放电时工作电流为正,充电时为负。

电池组电流的计算公式为

$$I_{BT} = \lambda(P_z - P_L / \eta_{inv}) / U_{BT} \quad (9)$$

式中: λ 为常数,电池组放电时为 -1 ,充电时为 1 ; P_z 为系统总发出功率,为风机、光伏和储能电池输出功率之和; P_L 为负载功率; η_{inv} 为逆变器的转换效率。

电池组荷电状态计算公式为

$$SOC_k = (1 - \alpha_{BT}) SOC_{k-1} - \Delta t I_{BT} \eta_{BT} / Q_{BT} \quad (10)$$

式中: SOC_k 和 SOC_{k-1} 分别为 k 和 $k-1$ 时刻的电池荷电状态; Δt 为充放电时长; η_{BT} 为电池的充放电效率;

Q_{BT} 为电池的可用容量; α_{BT} 为电池的自放电率。

2 经济优化配置模型

本文所建立的风光氢储微电网模型为并网型微电网,对应的经济模型主要考虑从系统购电成本、风电和光伏的发电成本(包括设备的折旧和维护成本)、储能装置的使用成本(包括设备的折旧、维护和回收成本)、储能电池更换成本、向系统售电的收益、氢气售出收益和环境保护收益。

2.1 目标函数

经济优化配置目标为在光伏与风机装机容量一定时,在确保微电网年制氢量任务的前提下,对配置不同储能系统和制氢系统容量的配置方案通过优化调度计算,并通过不同储能容量配置方案效益对比,得出系统效益最优配置方案。因此,建立如下目标函数:

$$\max \text{PRO} = \sum_{k=1}^n \left(Y_{\text{Sell}}^k + Y_{H_2}^k + Y_{HB}^k - C_{\text{Buy}}^k - C_{\text{DP}}^k - C_{\text{YW}}^k - C_{\text{HDP}}^k - \left(C_{\text{HYW}}^k - \sum \eta_{s,nk} C_{\text{RE},Nr}^{k,nk} - \sum \eta_{p,nk} C_{\text{HS},nk}^k \right) \right) \quad (11)$$

式中: PRO 为系统净利润; n 为计算周期,取 8760; Y_{Sell}^k 为 k 时刻向大电网售电收益; $Y_{H_2}^k$ 为 k 时刻生产的氢气售出收益; Y_{HB}^k 为 k 时刻的环境保护收益,主要为利用风光能源制氢代替传统燃煤发电制氢所带来的煤炭消耗减少和因燃煤发电而造成的环境成本减少的收益; C_{Buy}^k 为从大电网购电成本; C_{DP}^k 和 C_{YW}^k 分别为微网中的风电机组、光伏阵列和储能装置 k 时刻的折旧成本之和与运维成本之和; C_{HDP}^k 和 C_{HYW}^k 分别为微网中的制氢和储氢装置 k 时刻的折旧成本之和与运维成本之和; $C_{\text{RE},Nr}^{k,nk}$ 为 k 时刻储能电池更换总成本折算, Nr 为重置的次数, nk 为系统运行的第 nk 年; $\eta_{s,nk}$ 表示在进行更换时的成本降低比例; $C_{\text{HS},nk}^k$ 为 k 时刻的储能系统回收成本,主要为替换下来的储能电池的回收和系统寿命结束后的统一回收的总成本折算; $\eta_{p,nk}$ 表示在进行回收时的回收成本降低比例。

各项收益与成本可表示为

$$Y_{\text{Sell}}^k = Y_{\text{sell}}^k P_{\text{sell}}^k \quad (12)$$

$$C_{\text{Buy}}^k = C_{\text{buy}}^k P_{\text{buy}}^k \quad (13)$$

$$Y_{H_2}^k = P_{1,H_2} Q_{1,H_2}^k \quad (14)$$

$$Y_{HB}^k = P_z C_m^k + \sum_i^{N_s} (\Delta m_{i,k} \alpha_i + \Delta m_{i,k} \beta_i) \quad (15)$$

$$C_{DP}^k = \sum_{i=1}^N \frac{P_{i,k} C_{AZ,i}}{8760 P_{r,i} f_{c,i}} \times \frac{d_1(1+d_1)^n}{(1+d_1)^n - 1} \quad (16)$$

$$C_{YW}^k = \sum_{i=1}^N P_{r,i} C_{yw,i} \times \frac{d_2}{(1+d_2)^{n_k} - 1} \quad (17)$$

$$C_{HS}^k = \sum_{m=1}^{n_3} \frac{C_{hs,m}}{8760} \times \frac{d_2}{(1+d_1)^{n_k} - 1} \quad (18)$$

$$C_{HDP}^k = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{r,H_2,i} C_{HAZ,i}}{8760 Q_{r,H_2,i}} \times \frac{d_1(1+d_1)^n}{(1+d_1)^n - 1} \quad (19)$$

$$C_{HYW}^k = \sum_{i=1}^{N_H} Q_{H_2}^k C_{Hyw,i} \times \frac{d_2}{(1+d_1)^{n_k} - 1} \quad (20)$$

$$C_{RE,Nr}^k = \sum_{i=1}^{n_3} N r_i C_{re,i} P_{r,i} \times \frac{d_3}{8760[(1+d_3)^{n_k} - 1]} \quad (21)$$

式中: C_{Buy}^k 和 Y_{sell}^k 分别为 k 时刻的购电电价和售电电价; P_{buy}^k 和 P_{sell}^k 分别为 k 时刻的购电电量和售电电量; Q_{1,H_2}^k 为 k 时刻产生的氢气产量; P_{1,H_2} 为单位体积氢气售价; C_m 为单位发电功率所消耗的燃煤的价值; P_z^k 为系统 k 时刻光伏、风机和储能系统总的输出功率; $\Delta m_{i,k}$ 为 k 时刻引起的第 i 种排放污染物的减少量; N_w 为污染物总数; α_i 为第 i 种排放物的单位环境价值; β_i 为第 i 种排放物的单位处罚款; N 为系统中的微源总数; $C_{AZ,i}$ 为第 i 个微源的安装费用; $P_{r,i}$ 和 $f_{c,i}$ 分别为第 i 个微源的装机容量和容量因子; $P_{i,k}$ 为 k 时刻第 i 个微源的输出功率; d_1 和 n 分别为现值成本向年值成本转换的参数, 年利率和折旧年限; $C_{yw,i}$ 为第 i 个电源的单位装机容量在单位工作时间的运维费用; n_k 为运行的第 n_k 年, $1 \leq n_k \leq n$; d_2 为将终值成本折算成年值成本的年利率; $C_{hs,m}$ 为第 m 个储能电池组的回收费用; N_H 为制氢装置和储氢装置的总数; $C_{HAZ,i}$ 为第 i 个制氢设备或储氢设备的安装费用; $Q_{r,H_2,i}$ 为第 i 个制氢设备的额定氢气产出量或储氢设备的额定存储氢气量; $C_{Hyw,i}$ 为第 i 个制氢装置和储氢装置单位氢气产生或存储量在单位工作时间的运维费用; $Q_{H_2}^k$ 为 k 时刻的氢气产出量; $N r_i$ 为第 i 个储能装置的重置次数, $N r_i = [N_{sys}/N_{BT}], [\]$ 为取整函数; $C_{re,i}$ 和 $P_{r,i}$ 分别为第 i 个储能装置的单位容量重置成本和额定容量; $n_{r,i}$ 为储能装置的替换年限, 与 d_3 一样为进行年值折算的参数。

P_{buy}^k 、 P_{sell}^k 和 P_z^k 具体公式为

$$P_{buy}^k = \max(P_L^k - P_z^k, 0) \quad (22)$$

$$P_{sell}^k = \max(P_z^k - P_L^k, 0) \quad (23)$$

$$P_L^k = P_{Lr}^k + P_{LH2}^k \quad (24)$$

$$P_z^k = \sum_{i=1}^{n_1} r_i^k P_{WF,i}^k + \sum_{j=1}^{n_2} r_j^k P_{PV,j}^k + \sum_{m=1}^{n_3} r_m^k P_{BT,m}^k \quad (25)$$

式中: P_L^k 和 P_{LH2}^k 分别为 k 时刻的日常负荷值和制氢负荷; n_1 、 n_2 和 n_3 分别风力发电机、光伏电池板和储能电池组个数; $P_{WF,i}^k$ 、 $P_{PV,j}^k$ 和 $P_{BT,m}^k$ 分别为 k 时刻第 i 台风力发电机、第 j 个光伏电池板和第 m 个储能电池组的输出功率, 当电池放电时 $P_{BT,m}^k$ 取正, 充电时取负, 静置时为 0; 对应的 r_i^k 、 r_j^k 和 r_m^k 分别为对应设备的运行状态, 当停运时为 0, 正常运行时为 1。

2.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$P_L^k = P_z^k + P_{buy}^k - P_{sell}^k \quad (26)$$

2) 与大电网之间的功率交换范围

$$P_{EX,min} \leq P_{buy}^k, P_{sell}^k \leq P_{EX,max} \quad (27)$$

式中, $P_{EX,min}$ 和 $P_{EX,max}$ 分别为微电网与大电网之间交换功率的最小值和最大值。

3) 风电机组和光伏阵列的输出功率存在上下限

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (28)$$

式中, $P_{i,min}$ 和 $P_{i,max}$ 分别为第 i 个电源的最小和最大输出功率; P_i 为第 i 个电源的输出功率。

4) 电池容量约束

为了不损害电池性能, 电池的工作功率、存储的容量、单位时间内的功率变化、电池的 SOC 都存在变化范围。

$$\begin{cases} P_{i,min}^{Btype} \leq P_i^{Btype} \leq P_{i,max}^{Btype} \\ E_{i,min}^{Btype} \leq E_i^{Btype} \leq E_{i,max}^{Btype} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} P_i^{Btype,Ch} \leq \eta_i^{Btype,Ch} E_{r,i}^{Btype} / k \\ P_i^{Btype,Ds} \leq \eta_i^{Btype,Ds} E_{r,i}^{Btype} / k \end{cases} \quad (30)$$

$$E_i^{Btype,k} = E_i^{Btype,k-1} + \eta_{i,ch}^{Btype,k} P_{i,ch}^{Btype,k} - P_{i,ds}^{Btype,k} k_{ds} / \eta_{i,ds}^{Btype,k} \quad (31)$$

$$\begin{cases} SOC_i^{Btype,k} = E_i^{Btype,k} / E_{r,i}^{Btype,k} \\ SOC_{i,min}^{Btype} \leq SOC_i^{Btype} \leq SOC_{i,max}^{Btype} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $P_{i,min}^{Btype}$ 和 $P_{i,max}^{Btype}$ 分别为第 i 个储能装置的最小和最大输出功率; P_i^{Btype} 和 E_i^{Btype} 分别为第 i 个储能装置功率和容量; $E_{i,min}^{Btype}$ 和 $E_{i,max}^{Btype}$ 分别为第 i 个储能装置的最小和最大输出容量; $P_i^{Btype,Ch}$ 和 $P_i^{Btype,Ds}$ 分别为第 i 个储能装置的充电功率和放电功率; $\eta_i^{Btype,Ch}$ 和 $\eta_i^{Btype,Ds}$ 分别为第 i 个储能装置的充电和放电在

单位时间内能变化的最大容量值与额定容量的比值; $E_{r,i}^{\text{Btype}}$ 为第 i 个储能装置的额定容量; $E_i^{\text{Btype},k}$ 为第 i 个储能装置在 k 时刻的容量值, $\eta_{i,\text{Ch}}$ 和 $\eta_{i,\text{Ds}}$ 分别为第 i 个储能装置的充电和放电效率; $P_{i,\text{ch}}$ 和 $P_{i,\text{ds}}^{\text{Btype},k}$ 分别为第 i 个储能装置在 k 时刻与 $k-1$ 时刻之间的充电和放电功率; k_{ch} 和 k_{ds} 分别为第 i 个储能装置在 k 时刻与 $k-1$ 时刻之间的充电和放电时间; $\text{SOC}_i^{\text{Btype}}$ 为第 i 个储能装置的 SOC; $\text{SOC}_{i,\text{min}}^{\text{Btype}}$ 和 $\text{SOC}_{i,\text{max}}^{\text{Btype}}$ 分别为第 i 个储能装置的 SOC 的最小和最大值。

5) 制氢设备约束

$$P_{\text{H}_2,\text{min}} \leq P_{\text{LH}_2} \leq P_{\text{rAE}} \quad (33)$$

$$\sum_{qq=1}^{8760} Q_{qq} \geq 2\,000\,000 \text{ m}^3 \quad (34)$$

$$\Delta P_{(k-1,k)} \leq 0.8 P_{\text{rAE}} \quad (35)$$

式中: $P_{\text{H}_2,\text{min}}$ 为电解槽最小开启功率,取额定容量的 20%; Q_{qq} 为一年中第 qq 时刻的氢气产量,其总量超过 200 万 m^3 ; $\Delta P_{(k-1,k)}$ 为电解槽输入功率波动率,本文取每小时变化率不超过 80% 额定功率。

2.3 模型求解

2.1 和 2.2 节所建模型中,光伏、风机的安装数量固定,其输出功率在已知相关气象数据的前提下可以计算得出,微电网日常负荷可视为固定负荷。因此,模型中变化的量为储能额定容量及储能每时刻功率大小、电解槽安装容量及每时刻制氢功率。储能每时刻功率和电解槽每时刻制氢功率的优化属于调度优化过程,储能额定容量和电解槽安装容量属于容量优化配置。为简化计算采用外层容量内层调度的双层计算方法,外层容量采用固定步长枚举设置,内层采用含罚函数的粒子群优化算法(PSO)进行求解。含罚函数的粒子群优化算法通过对不满足约束的粒子进行惩罚,以实现剔除不满足条件粒子的目的,计算效率高。含罚函数的粒子群算法表达式为^[23]

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) = 0 \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \min F(x, \sigma) = f(x) + \sigma P(x) \\ P(x) = g^T g, g = g_i(x) - 0 \end{cases} \quad (37)$$

式中, σ 为惩罚因子,为很大的正数。

含罚函数的粒子群算法求解本文优化模型的计算流程如图 2 所示,相关参数见表 1。

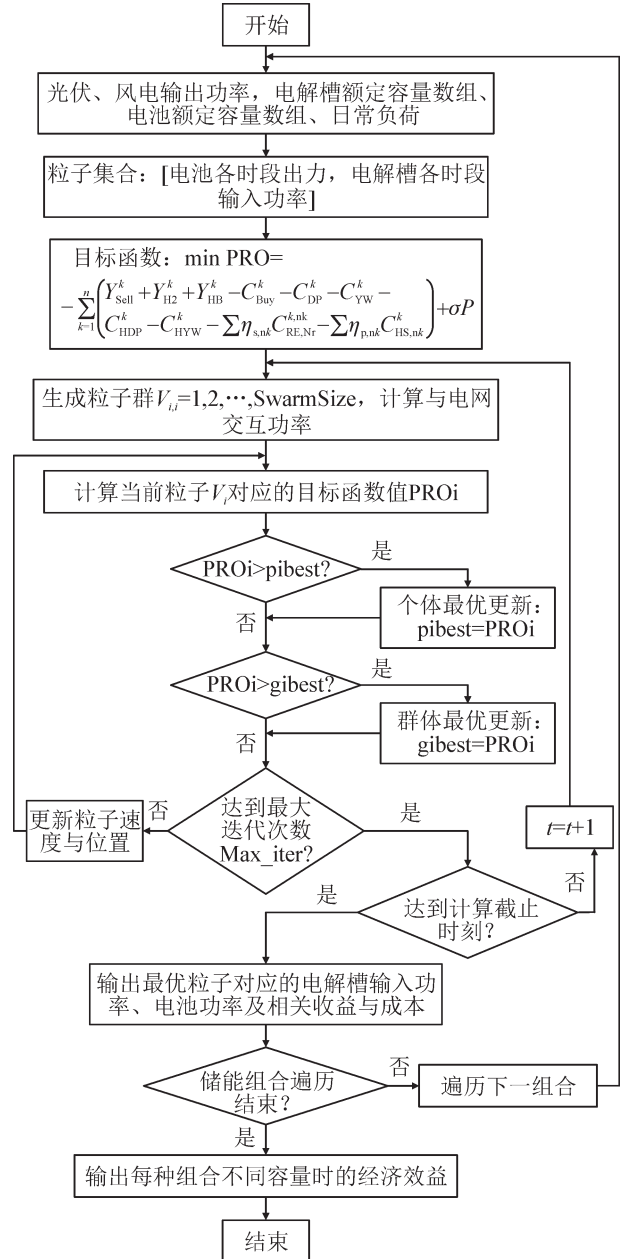


图2 含罚函数的粒子群算法求解流程图
Fig. 2 Flow chart of PSO with penalty function

表1 含罚函数粒子群算法计算参数
Table 1 Calculation parameters of PSO with penalty function

名称	变量	数值
惯性系数	w_{max}	0.90
惯性系数	w_{min}	0.40
学习因子	w_1, w_2	2.00
粒子群规模	SwarmSize	100.00
最大迭代次数	Max_iter	100.00
最大速度	V_{max}	1.05
最小速度	V_{min}	-1.05
惩罚因子	σ	10^5

3 算例分析

3.1 基础数据

本算例基于陕西某微电网改造项目, 主要实现利用风光资源制氢。基础数据包括风光功率计算参

数, 包括光照和风速, 数据来源为 Meteonorm 软件, 光伏装机容量 20 MW, 风机装机容量 500 kW, 见图 3-5 及表 2-4。对于环境收益, 本文只考虑因新能源代替燃煤而减少的污染物, 主要考虑 CO₂、SO₂ 和 NO_x 3 种, 其对应的经济因子数据见文献[24]。

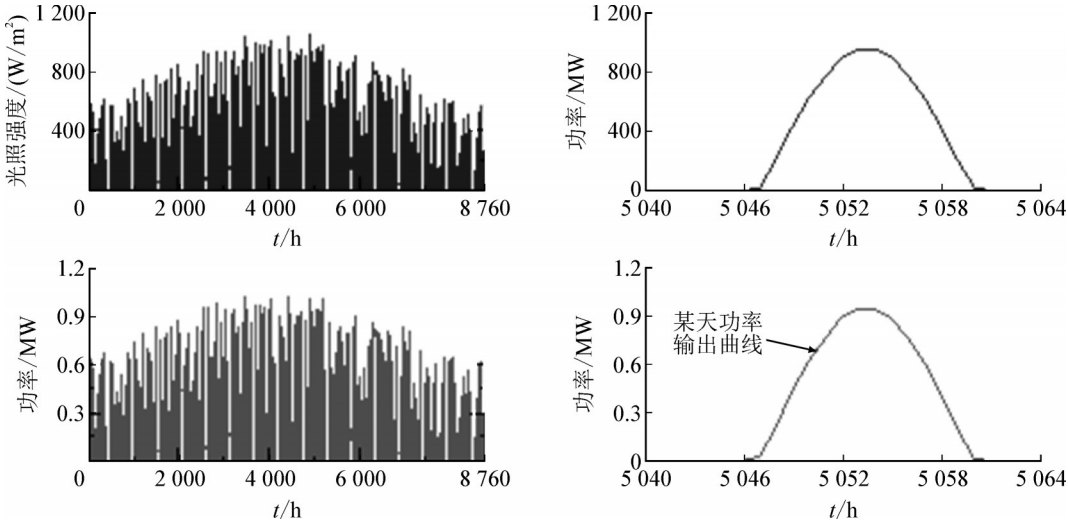


图3 光伏阵列的单位输出功率和光照条件
Fig. 3 Unit output power and illumination conditions of photovoltaic array

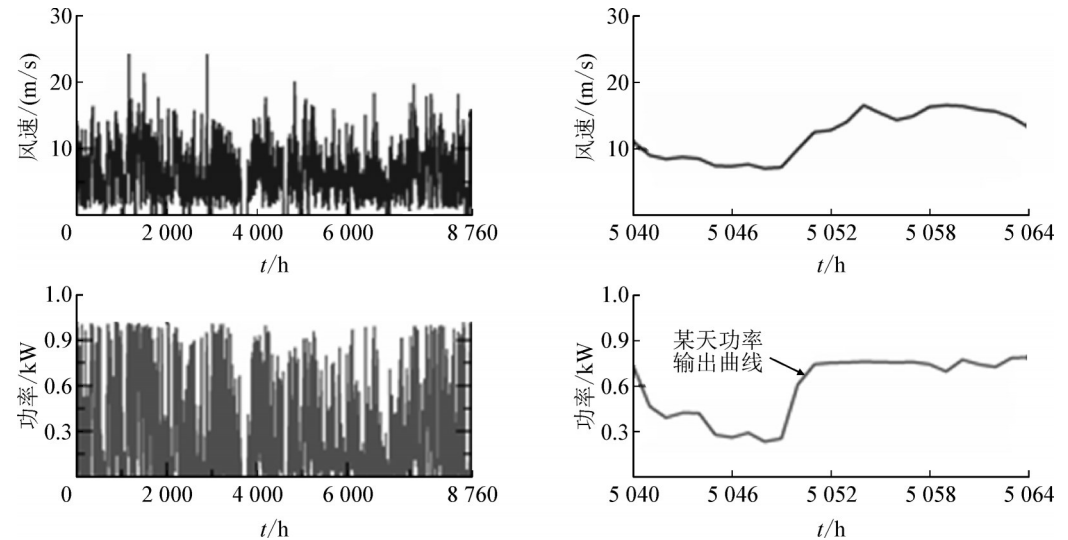


图4 风机的单位输出功率和风速条件
Fig. 4 Unit output power and wind speed conditions of wind turbine

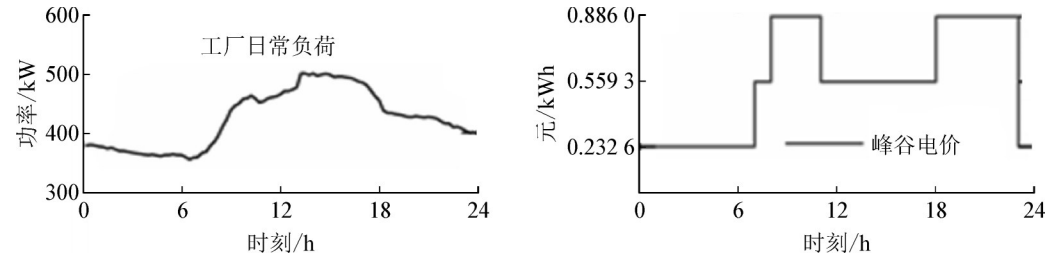


图5 算例微电网日常负荷及峰谷电价
Fig. 5 Daily load and peak valley electricity price of calculation micro grid

表2 系统各装置各项费用市场价格与使用寿命					
Table 2 Market price and service life of various costs of each device of the system					
装置	安装费用	运维费用/(元/kW/年)	重置费用/(元/kWh)	使用寿命/年	回收费用/(元/kWh)
风力机组 ^[25]	6 000 元/kW	101	—	15	—
光伏阵列	5 500 元/kW	21	—	15	—
锂电池	1 250 元/kWh	100	1 250	5	310
铅酸电池	350 元/kWh	10	350	2	100
液态金属电池	4 000 元/kWh	100	4 000	15	300
电解水制氢与储氢装置 ^[26]	1 700 元/kW	550	—	20	—

表3 风光氢储微电网的成本效益参数	
Table 3 Cost benefit parameters of wind/PV/hydrogen/storage micro grid	
名称	数值
系统评估周期/h	8 760
系统寿命年限/年	15
资金利率/%	6.55
氢气售价/(元/m ³)	5.00
上网电价(元/kWh)	0.49

表4 碱式电解槽参数 ^[27]		
Table 4 Parameters of alkaline electrolytic cell		
产氢能力/(m ³ /h)	直流电能消耗/(kWh/Nm ³)	工作温度/℃
800	4.5	80

3.2 计算分析

1)液态金属电池储能系统优化配置

利用上述模型,以液态金属电池(LMB)作为单独储能系统,进行容量优化配置。考虑到算例微电网占地问题,液态金属电池容量最大可安装容量为10 MWh,因此在容量配置时以1 MWh为步长,依次从1 MWh到10 MWh分别进行优化计算。电解槽的功率变化范围上限分别定为3.6 MW、4.5 MW、5.4 MW、6.3 MW和7.2 MW。其他数据见3.1节,计算结果见图6。

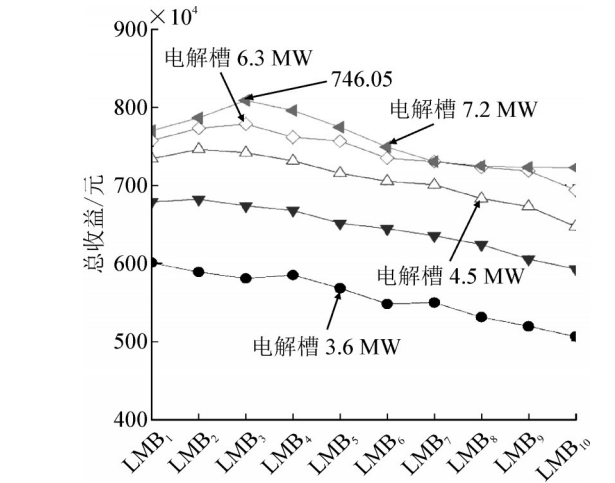


图6 液态金属电池方案配置结果

Fig. 6 Configuration results of LMB scheme

从图6中可以看出,单独液态金属电池作为储能系统时,系统效益最优方案为LMB配置3 MWh,电解槽配置7.2 MW,最优收益为746.05万元。最

优方案时单日功率优化调度曲线见图7。可以看出,在凌晨电价低谷时段,利用电网和风机的电力为储能系统进行充电。电解槽在日出后开启,开启后制氢功率随着光伏输出逐渐至额定功率,最后以额定功率稳定制氢,多余光伏优先存储在储能系统中,剩余的上网。日落后光伏功率低于电解槽最小开启功率,开始转为由储能系统释放所存储的电能继续维持制氢,直至储能电量最低时停止制氢。

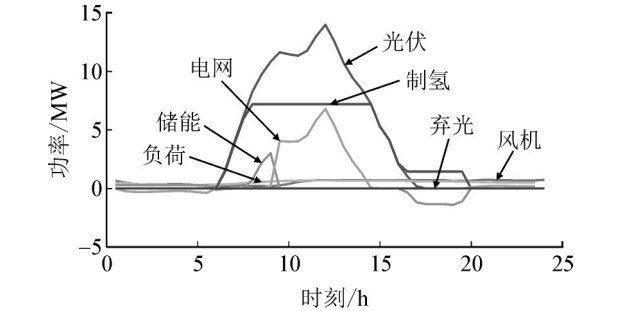


图7 单日功率优化调度曲线

Fig. 7 Single-day power optimization dispatch curve

2)不同储能组合配置方案对比

设置的储能组合为液态金属电池+铅酸电池(LMB+LCB)、锂电池+铅酸电池(LIB+LCB)、液态金属电池(LMB)和锂电池(LIB)共4种。在优化配置时,电解槽的功率变化范围上限依然分别定为3.6 MW、4.5 MW、5.4 MW、6.3 MW和7.2 MW;因为可安装的储能总容量为10 MWh,所以两种混合储能方式单个电池的容量变化上限分别定为1 MWh、2 MWh、3 MWh、4 MWh、5 MWh,单独储能系统中电池的容量变化上限定为0~10 MWh,变化步长为1 MWh。各组合最优配置结果见表5。

表5 不同储能方案的最优结果				
Table 5 Optimal results for different energy storage schemes				
混合储能类型	LMB+LCB	LIB+LCB	LMB	LIB
LIB最优容量/MWh	—	4	—	5
LCB最优容量/MWh	1	1	—	—
LMB最优容量/MWh	3	—	3	—
电解槽容量/MW	7.2	7.2	7.2	7.2
系统年收益/万元	807.08	759.02	746.05	788.03

从表5可以看出,在算例风光氢储微电网中,配置LMB+LCB的混合储能方案的系统收益最大,其次是LIB方案,单独的LMB方案效益最低。主要原因在于LMB的使用寿命比LIB的长,但LMB目前由于制造工艺问题,成本依然很高,在微电网中单独使用时不及LIB具备优势。但是LMB+LCB混合储能系统由于加入了铅酸电池,铅酸电池与液态金属电池两者价格相差悬殊,铅酸电池的适量引入可以在基本不影响微电网功率波动变化情况的条件下有效降低成本支出。而LIB+LCB混合方案的最优结果却小于LIB方案的最优结果,主要原因在于锂电池与铅酸电池的价格差距没有液态金属电池与铅酸电池价格差距大,LIB+LCB在引入铅酸电池降低的储能安装成本不及铅酸电池频繁更换带来的储能置换成本,使得LIB+LCB混合储能整体效益下降。

4 结语

本文以风光氢储微电网为研究对象,在考虑满足年制氢任务的前提下,建立了经济优化模型,并采用含罚函数的粒子群算法进行求解,可得到风光氢储微电网最优调度对应的最佳储能容量,实现储能容量优化配置目的。最后在算例中以4种不同储能配置方案,对比分析了液态金属电池目前在风光氢储微电网中的应用情况,得出在风光氢储微电网中配置液态金属电池和铅酸电池的混合储能方案经济效益更优的结果。

参考文献

- [1] 王侃宏,赵政通,罗景辉,等.风光互补发电制氢储能系统模拟仿真研究及性能分析[J].节能,2019,38(11):79-84.
- [2] 曹梓泉,李雅欣,马凌怡,等.基于锂电池的电氢混合储能系统研究[J].电器与能效管理技术,2022(5):29-34.
CAO Ziquan, LI Yaxin, MA Lingyi, et al. Research on electric-hydrogen hybrid energy storage system based on lithium battery[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(5):29-34.
- [3] 吴景霞,索金琳.基于改进DEC算法的风光氢系统容量配置[J].电网与清洁能源,2022,38(11):98-106.
WU Jingxia, SUO Jinlin. Capacity configuration of wind-solar combined power generation system coupled with hydrogen energy storage based on improved DEC algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11):98-106.
- [4] 李渝,张红,崔晓波,等.短时-中长期协调的电-氢混合储能容量优化规划[J].电器与能效管理技术,2022(5):35-40.
- LI Yu, ZHANG Hong, CUI Xiaobo, et al. Short-long term coordinated electric-Hydrogen hybrid energy storage capacity optimization planning[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(5):35-40.
- [5] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等.基于储能型APF的微电网电能质量综合治理[J].高压电器,2022,58(8):238-244.
YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on APF with energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):238-244.
- [6] 司杨,陈来军,麻林瑞,等.考虑氢储能热平衡的风-氢混合系统优化调度方法[J].电器与能效管理技术,2021(11):15-21.
SI Yang, CHEN Laijun, MA Linrui, et al. Optimal dispatching method of wind-Hydrogen hybrid system considering heat balance of Hydrogen energy storage[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(11):15-21.
- [7] 林翔,方健,王红斌,等.计及风光荷相关性的变压器运行风险的概率评估方法[J].变压器,2022,59(1):28-33.
LIN Xiang, FANG Jian, WANG Hongbin, et al. Probabilistic assessment of transformer operating risk considering correlation among wind power, photovoltaic and load[J]. Transformer, 2022, 59(1):28-33.
- [8] 张科杰,张国彦,徐宝昌,等.计及高比例新能源配电网电压风险的储能容量优化配置方法[J].电瓷避雷器,2023(6):85-93.
ZHANG Kejie, ZHANG Guoyan, XU Baochang, et al. Optimal allocation method for energy storage capacity considering voltage risks with high proportion of new energy distribution network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6):85-93.
- [9] 吴启亮,章雷其,赵波.可再生能源制氢建模技术研究[J].浙江电力,2023,42(5):18-33.
WU Qiliang, ZHANG Leiqi, ZHAO Bo. A study of the modeling technology of Hydrogen production from renewable energy sources[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5):18-33.
- [10] 江悦,沈小军,吕洪,等.碱性电解槽运行特性数字孪生模型构建及仿真[J].电工技术学报,2022,37(11):2897-2908.
JIANG Yue, SHEN Xiaojun, LYU Hong, et al. Construction and simulation of operation digital twin model for alkaline water electrolyzer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11):2897-2908.
- [11] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices[J]. Science (New York, N. Y.), 2011, 334(6058):928-935.
- [12] XU Cheng, CHENG Shijie, WANG Kangli, et al. A fractional-order model for liquid metal batteries[J]. Energy Proce-

- dia, 2019, 158:4690-4695.
- [13] 王若谷,戴立森,梁芷睿,等. 基于不同种类储能电池的微电网综合储能系统性能对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1):166-171.
- WANG Ruogu, DAI Lisen, LIANG Zhirui, et al. Performance comparison of microgrid integrated energy storage system based on different kinds of batteries[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1):166-171.
- [14] LIANG Z, ZHENGXIANG S, WANG J, et al. Optimal configuration of liquid metal battery energy storage system in photovoltaic and Hydrogen coupled microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):26-35.
- [15] 李兴莘,张靖,何宇,等. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3):1-7.
- LI Xingshen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Multi-objective optimization dispatching of microgrid based on improved particle swarm algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(3):1-7.
- [16] 禹威威,刘世林,陈其工,等. 考虑电动汽车充电和需求侧响应的光伏微电网多目标优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1):88-97.
- YU Weiwei, LIU Shilin, CHEN Qigong, et al. Multi-objective optimization scheduling for PV microgrid considering electric vehicle charging and demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(1):88-97.
- [17] TORREGLOSA J P, GARCÍA P, FERNÁNDEZ L M, et al. Energy dispatching based on predictive controller of an off-grid wind turbine/photovoltaic/Hydrogen/battery hybrid system[J]. Renewable Energy, 2015, 74:326-336.
- [18] ARSALIS A, ALEXANDROU A N, GEORGHIOU G E. Thermo-economic modeling of a completely autonomous, zero-emission photovoltaic system with Hydrogen storage for residential applications[J]. Renewable Energy, 2018, 126:354-369.
- [19] 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-EPSC, 2020, 32(6):123-128.
- [20] GILLESSEN B, HEINRICHS H U, STENZEL P, et al. Hybridization strategies of power-to-gas systems and battery storage using renewable energy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(19):13554-13567.
- [21] ULLEBERG O. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(1):21-33.
- [22] WANG Caisheng, NEHRIR M H. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3):957-967.
- [23] 胡启国,杜春超,吴明钦,等. 角接触球轴承的罚函数粒子群算法优化设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(9):145-150.
- HU Qiguo, DU Chunchao, WU Mingqin, et al. Optimization design of penalty function particle swarm optimization algorithm for angular contact ball bearings[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 40(9):145-150.
- [24] 孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- [25] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6):70-76.
- XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6):70-76.
- [26] 吴景霞,索金琳. 基于改进DEC算法的风光氢系统容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11):98-106.
- WU Jingxia, SUO Jinlin. Capacity configuration of wind-solar combined power generation system coupled with hydrogen energy storage based on improved DEC algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11):98-106.
- [27] 刘鹏飞. 风光氢储综合供电系统优化配置与能量管理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- 作者简介:**
- 王若谷(1984—),男,高级工程师,主要从事电网中新能源与储能的研究工作。E-mail:zzzx_wangyonghui@126.com。
- 常小强(1995—),男,研究生,主要从事于微电网及其控制的研究工作。
- 高欣(1993—),女,工程师,主要从事电网中新能源与储能的研究工作。
- 赵海英(1979—),男,工程师,主要从事电力工程技术输电及用电工程技术工作。
- 任静(1981—),女,工程师,主要从事电力工程技术输电及用电工程技术工作。
- 郭丽(1974—),女,工程师,主要从事电力工程技术工作。