

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.008

## 考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置 寻优方法研究

林泽源<sup>1</sup>, 王宗尧<sup>2</sup>, 张凡<sup>1</sup>, 王蕊超<sup>2</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013; 2. 特变电工新疆新能源股份有限公司, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 针对光伏出力的间歇性与不稳定性,使得单纯依赖蓄电池进行能量平抑和调节,难以满足微电网持续稳定运行的需求,提出考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法。考虑氢能应用的光伏直流微电网中的应用,对光伏电池、蓄电池以及电解槽—储氢罐—燃料电池建模分析。根据建模分析结果,设计功率平抑控制策略与混合储能充放电管理策略。将最大化年净利润与光伏自消纳率作为优化目标,建立储能容量配置优化模型,获得储能容量最优配置结果。实验结果表明,应用所提方法后,光伏直流微电网的功率偏移率实现了显著的降低,调峰能力得到了有效优化,并且调度后微电网的自平衡率大幅提升,表明该方法具有良好的容量配置效果。

**关键词:** 氢能应用; 光伏直流微电网; 储能容量配置; 充放电管理

### Research on Optimization Method for Energy Storage Capacity Configuration in Photovoltaic DC Micro Grid Considering Hydrogen Energy Application

LIN Zeyuan<sup>1</sup>, WANG Zongyao<sup>2</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, WANG Ruichao<sup>2</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan 250013, China; 2. TBEA Xinjiang Sunoasis Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** In view of the situation that the sustaining and stable operation of the micro grid only by batteries for energy leveling and adjustment can not be met due to the intermittency and instability of PV output, the optimization method of energy storage capacity allocation in photovoltaic DC micro grid considering Hydrogen energy application is proposed. Considering the application of Hydrogen energy in photovoltaic DC micro grid, the photovoltaic cell, battery, electrolyzer - Hydrogen storage tank - fuel cell are modeled and analyzed. The power leveling control strategy and hybrid energy storage charge and discharge management strategy are designed in accordance with the modeling analysis results. The maximizing annual net profit and PV self-absorption rate are taken as the optimization objectives, an optimization model of energy storage capacity configuration is set up to obtain the optimal configuration result of energy storage capacity. The experimental results show that with application of the proposed method, the power deviation rate of photovoltaic DC micro grid is significantly reduced, the peak load balancing capacity is effectively optimized, and the self-balance rate of the micro grid is greatly improved, indicating that the method has a good capacity allocation effect.

**Key words:** Hydrogen energy application; photovoltaic DC micro grid; energy storage capacity configuration; charge and discharge management

## 0 引言

光伏直流微电网作为分布式能源系统的重要组成部分,其稳定运行和高效利用对于推动可再生能源的普及和减少对传统能源的依赖具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。在光伏直流微电网中,储能系统发挥着平衡能量供需、提高系统供电可靠性的关键作用。然而,储能容量的合理配置一直是微电网设计中的难点问题。过大的储能容量会增加系统成本,而过小的储能容量则可能导致供电不足或频繁的能量波动<sup>[5-7]</sup>。因此,对光伏直流微电网中储能容量配置进行寻优研究,具有重要的理论价值和实践意义。

王鹏<sup>[8]</sup>等人将成本最小化作为目标,建立储能容量配置的双层规划模型,同时计算并离系数与引入系数,根据计算结果选择并组合并离网域不同类型的微元,以此实现容量优化配置。双层规划模型中涉及了多个互相关函数与决策层次,提高了模型的复杂度,进而降低了求解精度,导致配置效果不理想。李争<sup>[9]</sup>等人建立了微电网数学模型,采用改进BAS-GA算法在Homer Pro软件中建立储能容量优化配置模型,BAS算法与GA算法均属于优化算法,适用的场景与特点也存在差异,结合两个算法虽然可以提高整体性能,但同时也增加了算法的复杂性,导致在求解容量优化配置模型过程中陷入局部最优。张继红<sup>[10]</sup>等人将最小化运行成本与投资成本作为目标,结合微电网热负荷率设计微电网储能容量配置策略,通过粒子群算法实现配置优化,储能容量配置在执行过程中会受到安全性能、运行维护要求以及安装空间等条件的约束,该方法优化过程中没有考虑到上述约束条件,导致优化结果无法满足实际需求。Aryanezhad, Majid<sup>[11]</sup>对微电网中电池储能系统的需求响应展开了分析,在博弈论的基础上建立配置优化模型,求解过程中引入粒子群优化算法,以此实现优化配置。采用博弈论展开分析会增加模型的复杂度,降低了配置效果。

为了解决上述方法中存在的问题,提出考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法。

## 1 考虑氢能应用的光伏直流微电网建模分析

在光伏直流微电网中,储能容量的优化配置始终是一个挑战性的难题,传统方法受限于单一储能技术的局限,难以实现高效与经济并重的能量存储与转换。尤其是光伏能源的间歇性与不稳定性,使得单纯依赖蓄电池来调节和平衡能量变得越发困

难<sup>[12-13]</sup>。针对这一难题,将氢能引入光伏直流微电网中,通过构建光伏电池、蓄电池以及电解槽—储氢罐—燃料电池的详细模型,深入分析其在微电网中的应用,从而优化储能容量的配置。

首先,针对光伏阵列,建立了精确的模型,充分考虑了光照强度、温度等环境因素对光伏输出功率的影响<sup>[14]</sup>。通过此模型,能够准确描述光伏能源的间歇性与不稳定性,为后续的储能配置提供重要依据。光伏阵列的输出功率 $P_{pv}$ 计算公式为

$$P_{pv} = \frac{V_{pv} D(t) \epsilon_{loss}(t) \epsilon_{pv-DC}}{D_{ST}} \quad (1)$$

式(1)中: $V_{pv}$ 表示光伏阵列在微电网中的输出功率额定值; $D(t)$ 表示光照强度; $\epsilon_{pv-DC}$ 表示光伏阵列对应的DC-DC变换器效率,将其值设定为90%; $D_{ST}$ 表示光照强度的标准值; $\epsilon_{loss}(t)$ 表示光伏阵列随着温度的升高导致的功率损耗,可通过式(2)计算得到<sup>[15-16]</sup>

$$\begin{cases} \epsilon_{loss}(t) = 1 + \mu[T(t) - 25] \\ T(t) = T_a(t) + \frac{D(t)(T_N - 20)}{800} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $T(t)$ 表示实际工作温度; $\mu$ 表示温度系数; $T_N$ 表示工作温度的标准值,将其设定为25℃; $T_a(t)$ 表示环境温度的实测值。

然而,单纯依靠光伏阵列并不能满足微电网的稳定运行需求。因此,蓄电池作为传统的储能方式,在平衡负载波动、提供稳定电力输出方面发挥着关键作用。因此,建立了蓄电池模型,深入研究了蓄电池在微电网中的作用。蓄电池通过充放电过程平衡负载需求引起的波动,对微电网的稳定运行至关重要<sup>[17-18]</sup>。其存储能量的计算公式如下。

设 $\epsilon$ 代表的是蓄电池对应的自放电率,将时间步长设置为 $\Delta t$ ,用 $R_c(t)$ 表示 $t$ 时刻蓄电池在光伏直流微电网中的存储能量,通过式(3)计算充电时期内蓄电池的存储能量 $R_c(t)$

$$R_{bat}(t) = R_c(t-1)(1-\epsilon) + (P_{b-c} + P_{pv})(t-1)\epsilon_c \epsilon_{b-DC} \Delta t \quad (3)$$

式(3)中: $P_{b-c}$ 表示蓄电池在充电过程中的实际功率; $\epsilon_c$ 表示蓄电池充电时的效率; $\epsilon_{b-DC}$ 表示蓄电池对应的DC-DC变换器效率。

通过式(4)计算放电期间蓄电池对应的存储能量 $R_b(t)$

$$R_b(t) = R_b(t-1)(1-\epsilon) - \frac{\Delta t(P_{b-d} + P_{pv})(t-1)}{\epsilon_d \epsilon_{b-DC}} \quad (4)$$

式(4)中: $\epsilon_d$ 表示蓄电池的放电效率; $P_{b-d}$ 表示放电状态下蓄电池对应的功率。

蓄电池的充放电在光伏直流微电网运行状态下会受到荷电状态  $SOC$  的影响,设  $P_{cmax}(t)$ 、 $P_{dmax}(t)$  分别代表的是微电网中蓄电池的最大充电功率与最大放电功率,其表达式为

$$\begin{cases} P_{cmax}(t) = \max\{0, SOC_{max} V_{bat} - R_c(t)\} \iota_c \iota_{b-DC} \\ P_{dmax}(t) = \max\{0, R_b(t) - SOC_{min} V_{bat}\} \iota_d \iota_{b-DC} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:  $SOC_{max}$  表示  $SOC$  的最大值;  $V_{bat}$  表示蓄电池对应的容量;  $SOC_{min}$  表示  $SOC$  的最小值。

然而,蓄电池的储能能力有限,且受到自身物理特性的限制,难以应对光伏能源的大规模、长时间存储需求<sup>[19-20]</sup>。为此,引入了氢能作为新型的储能方式。通过电解槽将多余的电能转化为氢气进行存储,再在需要时通过燃料电池将氢气转化为电能供给微电网使用。这种方式不仅提高了能量的存储效率,还实现了能量的高效转换与利用。

光伏能源作为可再生能源的一种,其输出具有显著的间歇性和波动性,这给微电网的稳定运行带来了挑战。而氢能能够有效地解决这一问题。通过电解槽将多余的电能转化为氢气进行存储,微电网可以在光伏能源不足时通过燃料电池将氢气转化为电能,从而保持电力供应的连续性和稳定性。为了深入分析氢能在微电网中的应用,建立电解槽—储氢罐—燃料电池模型,该模型通过引入氢能作为新的储能方式,实现了对光伏能源的有效存储与转换。用  $P_{el-t}$  表示电解槽的输出功率,可通过式(6)计算得到

$$P_{el-t} = \iota_{el} \times [P_{el} + P_{pv} + P_{cmax}(t) - P_{dmax}(t)] \quad (6)$$

式(6)中:  $\iota_{el}$  表示电解槽在电池模型中对应的效率,将其设定为 60%;  $P_{el}$  代表的是电解槽对应的输入功率。

设  $P_{fc}$  代表的是燃料电池对应的输出功率,可通过式(7)计算得到

$$P_{fc} = \iota_{fc} \times (P_{t-fc} + P_{el-t}) \quad (7)$$

式(7)中:  $\iota_{fc}$  表示燃料电池在光伏直流微电网中对应的工作效率;  $P_{t-fc}$  表示储氢罐中的氢气转移到燃料电池的过程中对应的转移功率。

光伏能源的间歇性和波动性要求微电网具备高效的储能和能量转换能力。储氢罐作为氢能储能系统的核心组成部分,其性能直接影响到整个系统的运行效率和稳定性。通过建立储氢罐的数学模型,可以精确模拟氢气在罐内的动态存储和释放过程,为后续的储能容量优化配置提供科学依据。氢气罐的主要作用是将存储的氢气提供给燃料电池<sup>[21-22]</sup>,储氢罐的数学模型为

$$R_t(t) = R_t(t-1) + [\iota_{el} \iota_{el-DC} P_{el}(t-1) - P_{fc}(t-1)] / \iota_{fc} \iota_t \iota_{fc-DC} \Delta t \quad (8)$$

式(8)中:  $R_t(t)$  和  $R_t(t-1)$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻储氢罐中的氢气的量;  $\iota_{el-DC}$  表示电解槽在电池模型中对应的工作效率;  $\iota_t$  表示储氢罐在光伏直流微电网中对应的工作效率;  $\iota_{fc-DC}$  表示燃料电池在电池模型中对应的工作效率。

设  $P_{elmax}(t)$  代表的是电解槽输入功率的最大值,  $P_{fcmax}(t)$  代表的是燃料电池输出功率的最大值,其计算公式为

$$\begin{cases} P_{elmax}(t) = \min\{V_{el}/\Delta t, [R_{tmax} - R_t(t)]/\Delta t \iota_{el}\} \iota_{el-DC} \\ P_{fcmax}(t) = \min\{V_{fc}/\Delta t, \iota_{fc}[R_t(t) - R_{tmin}]/\Delta t\} \iota_{fc-DC} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中:  $V_{el}$  表示电解槽对应的实际容量;  $R_{tmax}$ 、 $R_{tmin}$  分别表示储氢罐的最大容量和最小容量;  $V_{fc}$  表示燃料电池对应的实际容量。

通过上述模型,不仅能够深入了解氢能在光伏直流微电网中的应用情况,还能够根据实际需求优化电解槽、储氢罐和燃料电池的容量配置,从而提高微电网的能量利用效率和经济效益,有效应对光伏出力的不稳定性,增强微电网的自平衡能力。

## 2 储能容量配置寻优方法

### 2.1 优化策略

在建模分析阶段,已经考虑了氢能在光伏直流微电网中的应用,对光伏电池、蓄电池以及电解槽—储氢罐—燃料电池等关键组件进行了详细的建模分析。这些模型不仅考虑了各组件的物理特性,还考虑了其经济性和环境影响,为后续的优化策略设计提供了坚实的理论基础。

由于微电网的电源具有随机波动性和间歇性,储能系统需要能够在短时间内平衡负载与电源,确保直流母线电压的稳定性<sup>[23-24]</sup>。基于之前建立的模型,设计了功率波动平抑控制策略。该策略的核心思想是根据光伏出力的波动情况,动态调整储能系统的充放电功率。考虑到氢能储能在微电网中的作用,在策略中特别引入了氢能储能系统的充放电管理。

采用了分层控制的方法<sup>[25-26]</sup>,将储能系统分为蓄电池、超级电容和氢能储能3个层级。

1) 蓄电池作为储能系统的重要组成部分,具有较大的能量密度和较低的功率密度。因此,更适合用于吸收低频段的功率波动。在光伏直流微电网中,当光照强度变化缓慢或系统负荷变化不大时,蓄电池可以承担主要的储能和释能任务,从而稳定

电网的电压和频率。

2) 超级电容具有更高的功率密度和更快的充放电速度, 适合用于补偿高频段的功率波动。在光伏直流微电网中, 当光照强度突然变化或系统负荷发生快速波动时, 超级电容可以迅速响应, 提供或吸收所需的功率, 从而维持电网的稳定运行。

3) 氢能储能系统根据系统的整体能量需求和蓄电池、超级电容的荷电状态展开工作。当电网能量过剩时, 可以利用电解水制氢将多余的电能转化为氢能储存起来; 当电网能量不足时, 则可以通过燃料电池发电将氢能转化为电能, 为电网提供稳定的能量支持<sup>[27-28]</sup>。

根据以上分工合作, 能够充分发挥各种储能技术的优势, 实现更高效的能量管理。在功率波动平抑控制策略中, 使用了以下计算公式来确定各储能组件的充放电功率。

蓄电池充放电功率  $P_B$

$$P_B = P_{\text{low\_freq}} - P_{B\_current} + P_{\text{cmax}}(t) - P_{\text{dmax}}(t) \quad (10)$$

超级电容充放电功率  $P_C$

$$P_C = P_{\text{high\_freq}} - P_{C\_current} \quad (11)$$

氢能储能系统充放电功率  $P_{\text{hydrogen}}$

$$P_{\text{hydrogen}} = P_{\text{demand}} - P_B - P_C + P_{\text{elmax}}(t) - P_{\text{fmax}}(t) \quad (12)$$

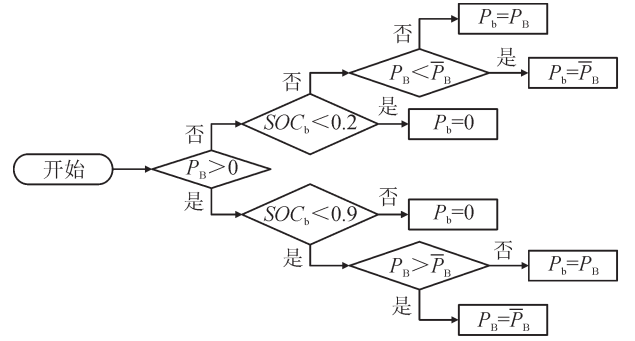
式(10)-(12)中:  $P_{\text{low\_freq}}$  和  $P_{\text{high\_freq}}$  分别表示低频和高频功率需求;  $P_{B\_current}$  和  $P_{C\_current}$  分别表示蓄电池和超级电容的当前功率;  $P_{\text{demand}}$  表示微电网的实时功率需求。

此外, 设计了混合储能充放电管理策略, 以实现蓄电池、超级电容以及氢能储能系统的协同工作。设计的混合储能充放电管理策略见图1。

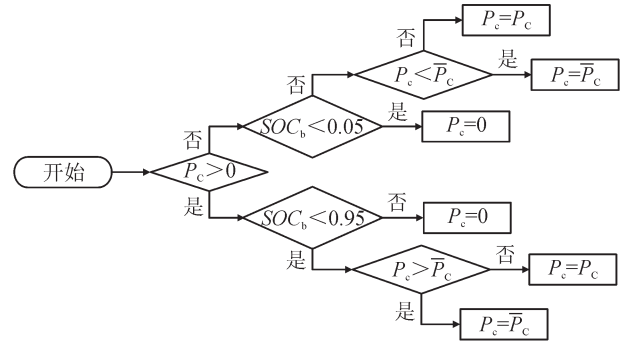
图1中:  $P_B$ 、 $P_b$ 、 $\bar{P}_B$  分别表示电池的需要补偿功率、实际补偿功率以及额定补偿功率;  $P_C$ 、 $P_c$ 、 $\bar{P}_C$  分别表示超级电容的需要补偿功率、实际功率以及额定补偿功率;  $SOC_b$ 、 $SOC_c$  分别表示电池与超级电容对应的荷电状态;  $SOCH$  表示氢能储能系统当前的电荷状态。通过实施功率平抑控制策略和混合储能充放电管理策略, 能够实现对光伏出力波动的有效平抑, 提高微电网的自平衡能力, 同时确保能量的高效存储与转换。

## 2.2 优化模型

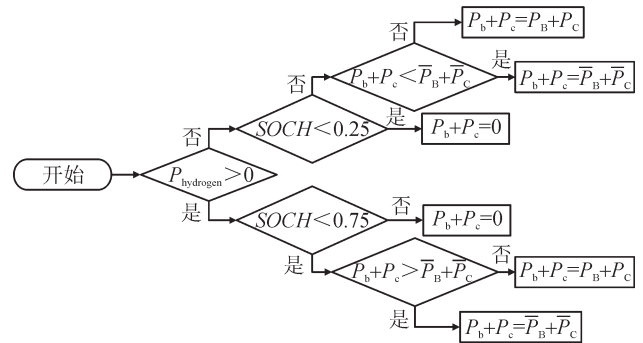
设计功率平抑控制策略与混合储能充放电管理策略是优化光伏直流微电网储能容量配置的关键前置步骤。这些策略不仅有助于平抑光伏出力波动、提高系统稳定性, 还能根据实时需求合理分



(a) 蓄电池充放电管理策略



(b) 超级电容器充放电管理策略



(c) 氢能储能系统管理策略

图1 充放电管理策略

Fig. 1 Charge and discharge management strategy

配储能资源, 提升经济效益。随后, 以最大化年净利润和光伏自消纳率为目标, 结合这些策略所揭示的约束条件, 建立储能容量配置优化模型。通过求解该模型, 能够获得在满足系统稳定运行和可靠性需求前提下的储能容量最优配置结果。这两个步骤相辅相成, 共同实现了光伏直流微电网中储能容量的科学配置, 有效提升了微电网的经济性和稳定性。

首先, 定义优化目标为最大化光伏消纳率  $R_{\text{pv}}$ <sup>[29]</sup>、年净利润  $S$ , 光伏消纳率反映了微电网对光伏发电的利用程度, 而年净利润则是评估储能配置经济效益的重要指标。通过优化储能容量配置, 旨在提高光伏消纳率, 减少弃光现象, 同时降低系统成本, 增加年净利润。因此, 建立的光伏直流微电网中储能容量配置优化模型为

$$\begin{cases} \max S = B - C \\ \max R_{PV} = \frac{100\% \times W_B \cdot DOD(E_{SC} + E_{FC})}{E_{PV}(P_B + P_C + P_{hydrogen})} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中:  $E_{FC}$  表示储能消纳的电能;  $B$  表示光伏直流微电网的年收益;  $C$  表示光伏直流微电网的年成本;  $E_{PV}$  表示光伏系统一天的发电量;  $E_{SC}$  表示负荷每天消纳的光伏发电电能。

为了确保微电网系统的稳定运行和可靠性,储能系统需要满足一定的能量和功率约束<sup>[30]</sup>。可靠性能量约束确保储能系统具有足够的容量来支持微电网在设定时间内的稳定运行,其计算公式为

$$\begin{cases} W_B = W_{FC} + W_{RC} \\ W_{RC} \geq W_{RC,min} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中:  $W_B$  代表的是储能电池的实际容量;  $W_{FC}$  表示柔性储能容量;  $W_{RC}$  表示刚性储能容量;  $W_{RC,min}$  表示  $W_{RC}$  的最小值。

光伏组件在微电网中的消纳率需要符合式(15)条件

$$W_{FC} \geq E_{PV} \times R_{EPV} - E_{SC} \quad (15)$$

式(15)中,  $R_{EPV}$  表示光伏消纳率的期望值。

此外,还要考虑储能电池的性能约束。电池的放电深度是影响其寿命的重要因素,因此需要合理控制电池的放电深度。设  $DOD$  代表的是电池的放电深度,分析电池寿命受电池放电倍率的影响,设计储能电池性能约束条件

$$DOD = \frac{C_A}{C_T} \quad (16)$$

式(16)中:  $C_A$  表示实际放电电量;  $C_T$  表示电池总容量。通过优化储能容量配置,可以在满足系统稳定运行和可靠性需求的前提下,尽可能降低电池的放电深度,延长其使用寿命。

综上所述,通过建立以最大化光伏消纳率和年净利润为目标的优化模型,并综合考虑储能系统的性能约束和氢能的应用,能够实现光伏直流微电网中储能容量配置寻优。光伏直流微电网中储能容量优化配置的流程见图2。

### 3 实验与分析

为了验证考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法的整体有效性,需要对其展开测试。选取某光伏直流微电网作为测试对象,光伏直流微电网拓扑结构见图3。

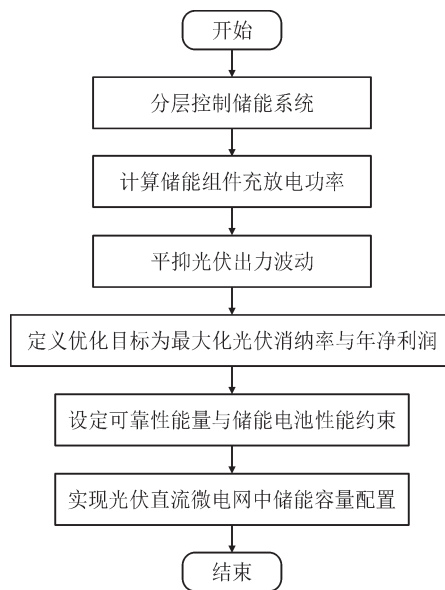


图2 光伏直流微电网中储能容量优化配置

Fig. 2 Optimal allocation of energy storage capacity in photovoltaic DC microgrid

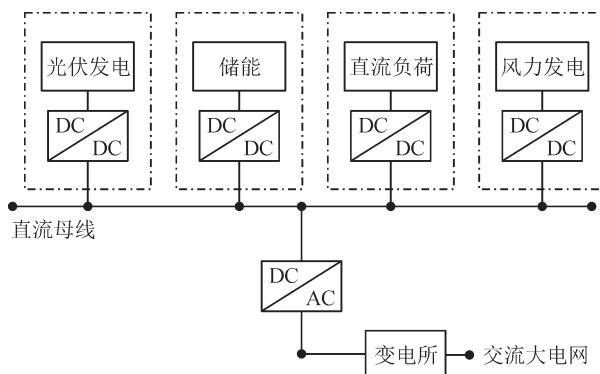


图3 光伏直流微电网拓扑结构

Fig. 3 PV DC microgrid topology

该电网中蓄电池与氢储能的相关参数见表1。

表1 相关参数

Table 1 Related parameters

| 设备  | 参数         | 数值   |
|-----|------------|------|
| 氢储能 | 电解槽效率      | 0.65 |
|     | 燃料电池寿命周期/a | 10   |
|     | 燃料电池效率     | 0.50 |
|     | 电解槽寿命周期/a  | 10   |
|     | 储氢罐效率      | 0.98 |
| 蓄电池 | 荷电状态下限     | 0.20 |
|     | 放电效率       | 0.90 |
|     | 荷电状态上限     | 0.90 |
|     | 充电效率       | 0.90 |
|     | 寿命周期/a     | 5    |
|     | 自放电率       | 0.01 |

在微电网系统中,蓄电池是重要的储能设备之

一,负责储存和释放电能,以平衡系统的负荷和供给。蓄电池的充放电曲线反映了其在不同充放电状态下的电性能特征。为了评估所提出的储能容量配置寻优方法在实际应用中的效果,对蓄电池充放电实验验证,从而了解蓄电池在微电网系统中的行为。

观察蓄电池进行充放电时峰值电压变化情况见图4,图4(a)中,电池未充电时,电压幅值保持恒定为54 V;电池充电时,电压幅值降至53 V。图4(b)中,电池未放电时,电压幅值保持恒定为54 V,电池放电时,电压幅值升至55 V。由此说明,蓄电池在不同充放电状态下展现出了稳定的电性能特征,能够有效地平衡系统的负荷和供给,提高了微电网系统的运行效率和稳定性。

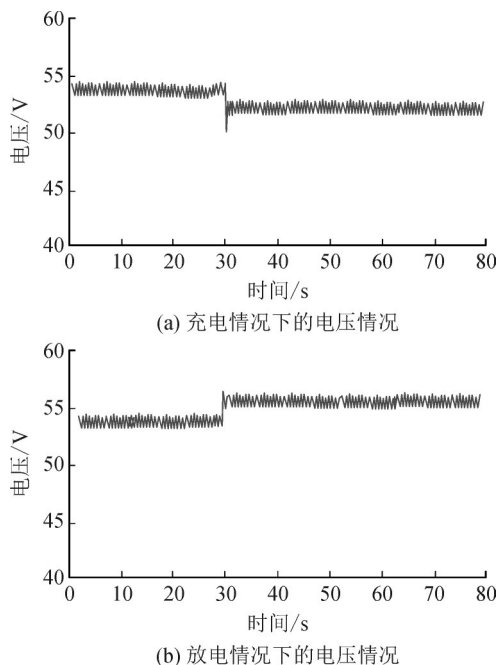


图4 蓄电池充放电电压情况

Fig. 4 Charging and discharging voltage of the battery

开路电压是指在没有外部负载的情况下,电池两端之间的电压,反映了电池的电化学状态。通过测量开路电压可以了解电池的荷电状态,即SOC。蓄电池开路电压与SOC的关系见图5。

由图5可知,当电池的SOC值增加时,其开路电压也会相应增加,反之亦然。在SOC低于20%或高于80%时,开路电压的变化相对较为显著,而在SOC处于20%到80%之间时,开路电压的变化则相对平缓。在微电网系统中,通过合理控制蓄电池的SOC值维持在20%到80%之间的范围内,可以实现蓄电池的稳定运行,并减少极端SOC值对电池性能和寿命的影响。基于这一理解,考虑到蓄电池SOC对开路电压的影响,有助于提高储能系统的效率和稳定

性,进而实现光伏直流微电网系统的持续稳定运行。

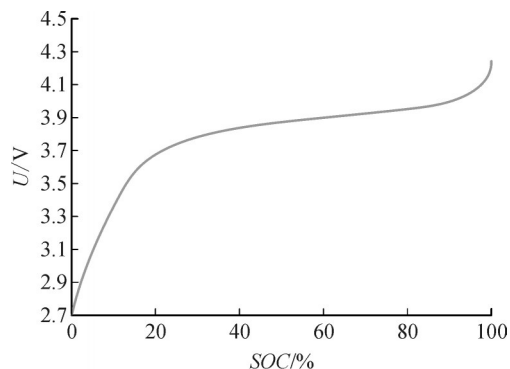


图5 蓄电池开路电压与SOC的关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the relationship between battery open circuit voltage and SOC

蓄电池的充放电效率和氢能储备系统中电解槽、储氢罐和燃料电池的能量转化效率会直接影响整个光伏直流微电网系统的能源利用效率。因此,验证蓄电池与制氢体积分数有助于评估不同储能形式的能量转化效率,并在此基础上进行储能容量配置的优化。实验结果见图6。

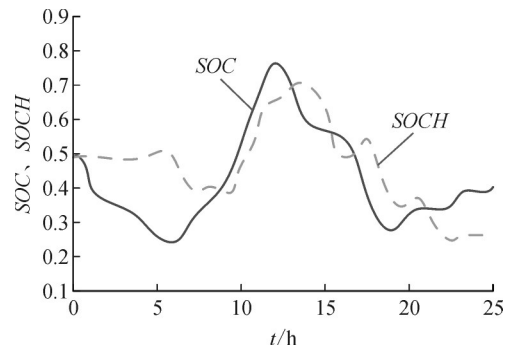


图6 蓄电池与制氢体积分数

Fig. 6 Battery and Hydrogen production content

当光伏系统产生的电力不足以满足负荷需求时,蓄电池会首先启动放电模式,光伏系统产生的电力不足时,蓄电池放电以保证负荷供应;多余电力充电蓄电池或通过电解水制氢储能,从而将多余的电能转化为氢能储存起来。

采用考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法对上述光伏直流微电网展开配置优化,优化前后微电网的功率偏移率见图7。

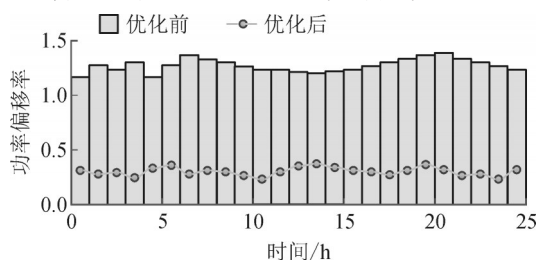


图7 功率偏移率

Fig. 7 Power offset rate

由图7可知,经过考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法优化后,微电网的功率偏移率显著下降,均衡处于0.5之下,因为所提方法设计了功率波动平抑控制策略,可有效改善微电网中的功率波动情况,通过精确计算和合理配置储能容量,使得微电网在光照条件变化、负荷需求波动以及氢能系统运行时,都能保持较为稳定的功率输出。同时,结合氢能应用,进一步提高了微电网的能量利用效率和可再生能源的消纳率,为微电网的可持续发展奠定了坚实基础。

采用考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法、文[8]方法和文[9]方法对微电网展开储能容量配置,测试3种方法配置后微电网的峰谷差  $\Delta P_{Jpeak}$

$$\Delta P_{Jpeak} = \max(P_J) - \min(P_J) \quad (17)$$

式(17)中:  $P_J$  表示联络线功率;  $\max(\cdot)$  表示取最大值;  $\min(\cdot)$  表示取最小值。

不同方法的峰谷差见图8,分析图8可知,3种方法在夏季和冬季的峰谷差相对较高,主要是因为夏季高温或冬季寒冷时,由于空调等设备的广泛使用,电力负荷可能会达到高峰,而夜间或清晨时负荷可能会相对较低,这时峰谷差可能会比较大。而在其他季节或天气条件下,峰谷差可能会相对较小。对比3种方法的测试结果发现,所提方法的峰谷差最小,表明所提方法具有良好的配置效果。

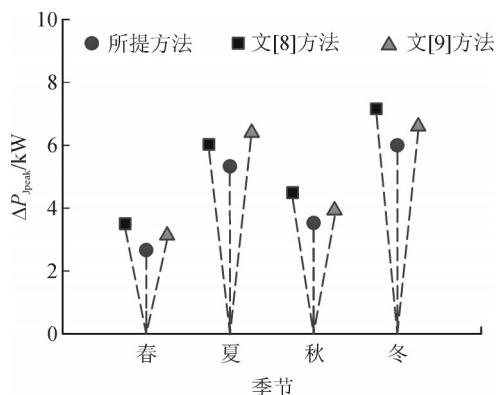


图8 不同方法的峰谷差

Fig. 8 Peak-to-valley difference of different methods

微电网对大电网的依赖程度可通过自平衡率衡量,自平衡率越低,两者之间成反比,高自平衡率意味着微电网在运行时能够更大程度地实现能量自给自足,减少了对大电网的依赖,从而提高了微电网的独立运行能力和稳定性。3种方法优化后的微电网自平衡率见图9。

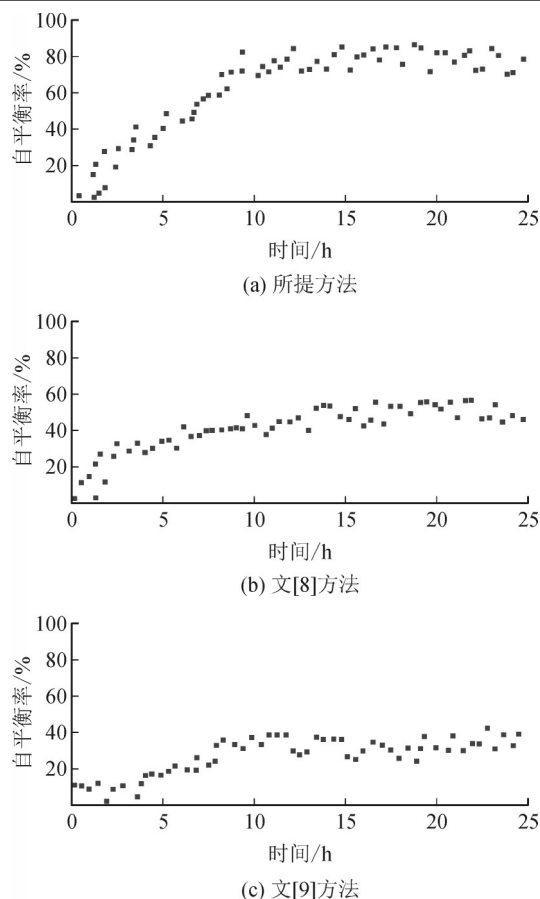


图9 不同方法的自平衡率

Fig. 9 Self-balancing rates of different methods

实验结果分析显示,通过应用提出的方法,微电网的自平衡率得到了显著提升。相较于文[8]和文[9]中的方法,所提方法表现出更高的优化效果。这一结果不仅验证了所提方法的有效性,还展示了其在降低系统运行成本、提高可再生能源消纳率方面的潜在优势。通过优化储能容量配置和调度策略,成功降低了微电网对大电网的依赖,为微电网技术的进一步发展和应用奠定了坚实基础。

## 4 结论

文中考虑了氢能在光伏直流微电网中的应用,充分利用氢能作为一种清洁的储能形式,配合光伏电池以及蓄电池进行能量存储和调度。提出了设计功率平抑控制策略与混合储能充放电管理策略,进一步提升电力系统的性能和稳定性。将年净利润和光伏自消纳率最大化作为优化目标,建立储能容量配置优化模型,并通过优化方法得到储能容量最优配置结果。实验所得具体结果如下:

1) 充电和放电过程中蓄电池表现出稳定的电性能特征,有效平衡系统供给和负荷。合理控制蓄电池的SOC在20%到80%之间有助于维持稳定运行,

提高系统效率和稳定性。

2)通过优化储能容量配置,光伏直流微电网的功率波动得到显著降低,使得系统能够在光照和负荷波动情况下保持稳定的功率输出。

3)所提方法具有良好的配置效果,其峰谷差最小。而夏季和冬季的峰谷差相对较高,主要是由于空调等设备的广泛使用导致电力负荷达到高峰。

4)微电网的自平衡率显著提升,验证了提出方法的有效性,减少了微电网对大电网的依赖,为微电网技术的进一步发展和应用打下了坚实基础。

### 参考文献:

- [1] 张 玉,罗浩文,王瑜琳. 基于模糊一下垂控制的光伏直流微电网混合储能功率分配及母线稳压研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 51-58.  
ZHANG Yu, LUO Haowen, WANG Yulin. Research on hybrid energy storage power distribution and bus voltage stabilization of photovoltaic DC micro-grid based on fuzzy-droop control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 51-58.
- [2] 魏梅芳,黎跃龙,胡国峰,等. 考虑多主体互动的光储充微电网运行模式分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 133-140.  
WEI Meifang, LI Yuelong, HU Guofeng, et al. Analysis of operating mode of photovoltaic - energy storage - charging station microgrid considering multi - agent interaction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 133-140.
- [3] 刘 浩,张晓滨,黄晨曦,等. 高渗透率光伏微电网能量优化管理策略的研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 129-135.  
LIU Hao, ZHANG Xiaobin, HUANG Chenxi, et al. Research on energy optimization management strategies for high permeability photovoltaic microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 129-135.
- [4] 马牧原,赵妍辉,李国庆. 含多光储微电网直流型主动配电系统动态协同控制[J]. 电器与能效管理技术, 2022(5): 71-77.  
MA Muyuan, ZHAO Yanhui, LI Guoqing. Dynamic coordination control strategy for DC active distribution systems with multi PV-storage microgrids[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(5): 71-77.
- [5] 徐田磊,曾成碧. 微电网储能容量优化配置算法仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 115-119.  
XU Tianlei, ZENG Chengbi. Simulation of optimization configuration algorithm for energy storage capacity in microgrid[J]. Computer Simulation, 2024, 41(2): 115-119.
- [6] 汪凯琳,许仪勋,潘瑞媛,等. 考虑风光可靠性的微电网混合储能优化配置[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 39-44.  
WANG Kailin, XU Yixun, PAN Ruiyuan, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage systems in micro-grid considering wind-solar reliability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 39-44.
- [7] 汪宇航,李 琰,应飞祥,等. 计及可靠性成本的风光储微电网储能容量协同优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 59-65.  
WANG Yuhang, LI Yan, YING Feixiang, et al. Collaborative optimization for energy storage capacity of wind-solar-battery micro-grid considering reliability cost[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 59-65.
- [8] 王 鹏,邓祥力,汪凯琳. 考虑风机及光伏机组三状态的微电网混合储能双层容量配置模型[J]. 现代电力, 2023, 40(3): 323-331.  
WANG Peng, DENG Xiangli, WANG Kailin. Double-layer capacity configuration method of hybrid energy storage in microgrid considering three states of wind turbines and photovoltaic units[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3): 323-331.
- [9] 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 Xiaorui, XU Ruosi, 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.
- [10] 张继红,阚圣钧,化玉伟,等. 基于氢气储能的热电联供微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 428-434.  
ZHANG Jihong, KAN Shengjun, HUA Yuwei, et al. Capacity optimization of chp microgrid based on Hydrogen energy storage[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(6): 428-434.
- [11] ARYANEZHAD M.A robust game-theoretic optimization model for battery energy storage in multi-microgrids by considering of renewable based DGs uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2022(204): 107591.
- [12] 刘 忠,张 乐,寇攀高,等. 并网型风电—光伏—抽水蓄能—蓄电池系统容量优化配置[J]. 动力工程学报, 2023, 43(9): 1151-1159.  
LIU Zhong, ZHANG Le, KOU Pangao, et al. Capacity allocation optimization on grid connected system consisting of wind power, photovoltaic power, pumped storage and

- battery[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(9): 1151-1159.
- [13] 马永翔, 钱 锴, 闫群民, 等. 孤岛直流微电网光储荷协调分层控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(1): 129-135.
- MA Yongxiang, QIAN Kai, YAN Qunmin, et al. Research on coordination and hierarchical control of photovoltaic, storage and load in island DC microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(1): 129-135.
- [14] 赵欣雨, 张云晓, 万 乐, 等. 平抑百兆瓦级风电场功率波动的混合储能充放电协同控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 23-29.
- ZHAO Xinyu, ZHANG Yunxiao, WAN Le, et al. Charge-discharge cooperative control strategy for hybrid energy storage system for suppressing power fluctuation of hundred megawatt level wind farm[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 23-29.
- [15] 谈 玲, 康瑞星, 夏景明, 等. 融合多源异构气象数据的光伏功率预测模型[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(2): 503-517.
- TAN Ling, KANG Ruixing, XIA Jingming, et al. A photovoltaic power prediction model integrating multi-source heterogeneous meteorological data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(2): 503-517.
- [16] 陶 鹏, 吴义鹏, 裴万鹏, 等. 机械振荡条件下微功率光伏电池板的输出特性研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6937-6944.
- TAO Peng, WU Yipeng, PEI Wanpeng, et al. Output characteristics of micro photovoltaic panels under mechanical oscillation conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6937-6944.
- [17] 宁焱戡, 高 妍, 张红娟, 等. 蓄电池组充放电温度与应变光纤光栅监测系统研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(11): 1585-1590.
- NING Yaojian, GAO Yan, ZHANG Hongjuan, et al. Research on fiber bragg grating temperature and strain monitoring system for battery charging and discharging[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(11): 1585-1590.
- [18] 傅军栋, 刘深深, 孙 翔, 等. 基于VFFRLS参数辨识的蓄电池三维电热耦合模型[J]. 电源技术, 2023, 47(4): 453-457.
- FU Jundong, LIU Shenshen, SUN Xiang, et al. Three-dimensional electro-thermal coupling model for batteries based on VFFRLS parameter identification[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(4): 453-457.
- [19] 王 超, 胡 浩, 郑 炼, 等. 基于智慧蓄电池的光伏储能系统及其控制策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(4): 506-512.
- WANG Chao, HU Hao, ZHENG Lian, et al. Photovoltaic energy storage system based on smart battery and its control strategy[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(4): 506-512.
- [20] 李蕊睿, 李 奇, 蒲雨辰, 等. 计及功率交互约束的含电-氢混合储能的多微电网系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 53-64.
- LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 53-64.
- [21] 王洪宇, 袁裕鹏, 童 亮, 等. 船用储氢罐充注过程数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(3): 25-31.
- WANG Hongyu, YUAN Yupeng, TONG Liang, et al. Numerical simulation of filling process of marine Hydrogen storage tank[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(3): 25-31.
- [22] 陆文丽, 黄 伟, 许恩永, 等. 基于响应面法的燃料电池商用车储氢系统多目标优化设计[J]. 现代制造工程, 2023(5): 58-64.
- LU Wenli, HUANG Wei, XU Enyong, et al. Multi-objective optimization design of Hydrogen storage system for fuel cell commercial vehicle based on response surface methodology [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(5): 58-64.
- [23] 陈 康, 王 泽, 郭永吉. 基于grcForest模型的风电并网系统暂态电压稳定评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 31-37.
- CHEN Kang, WANG Ze, GUO Yongji. Transient voltage stability assessment of wind power grid-connected system based on grcForest model[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 31-37.
- [24] 韩 璐, 尹纯亚, 戴 晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.
- HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [25] 杨春来, 殷 喆, 柴秀慧, 等. 广域分布式储能系统分层控制和SOC均衡控制研究[J]. 燕山大学学报, 2023, 47(5): 420-427.
- YANG Chunlai, YIN Zhe, CHAI Xiuhui, et al. Hierarchical control and SOC optimal balance strategy in wide-area distributed energy storage system[J]. Journal of Yanshan University, 2023, 47(5): 420-427.

- [26] 郭 慧,汪 飞,顾永文,等. 基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略[J]. 电工技术学报,2022,37(12):3117-3131.  
GUO Hui, WANG Fei, GU Yongwen, et al. Coordinated power control strategy for DC microgrid and storage expansion unit based on voltage hierarchical control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12):3117-3131.
- [27] 杨洪明,王颖杰,陈博文,等. 局部阴影条件下太阳能电池—超级电容串联阵列电流补偿方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(4):22-31.  
YANG Hongming, WANG Yingjie, CHEN Bowen, et al. Current compensation method for solar cell-supercapacitor device series array under local shadow conditions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4):22-31.
- [28] 胡 林,田庆韬,黄 晶,等. 电动汽车锂离子电池—超级电容混合储能系统能量分配与参数匹配研究综述[J]. 机械工程学报,2022,58(16):224-237.  
HU Lin, TIAN Qingtao, HUANG Jing, et al. Review on energy distribution and parameter matching of lithium-ion battery - super capacitor hybrid energy storage system for electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16):224-237.
- [29] 付 宇,白 浩,李 跃,等. 面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时空协调优化方法[J]. 南方电网技术,2023,17(1):84-93.  
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1):84-93.
- [30] 陈晓雯,李 奇,蒲雨辰,等. 基于等效氢耗特征的孤岛电—氢混合储能多微电网功率自适应分配控制方法研究[J]. 电网技术,2023,47(3):896-908.  
CHEN Xiaowen, LI Qi, PU Yuchen, et al. Power adaptive distribution control of isolated multi-microgrids containing electric - Hydrogen hybrid energy storage based on equivalent Hydrogen consumption characteristics[J]. Power System Technology, 2023, 47(3):896-908.
- 林泽源(1981—),男,学士,高级工程师,主要从事电力系统设计研究(E-mail:linzeyuan@sdepci.com)。
- 王宗尧(1986—),男,硕士,工程师,主要从事综合能源规划仿真研究。
- 张 凡(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统设计研究。
- 王蕊超(1993—),男,硕士,工程师,主要从事综合能源规划仿真及数字化研究。