

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240142

# 基于级联式模糊控制的电氢耦合直流微网能量管理策略研究

李建林<sup>1</sup>, 梁策<sup>1</sup>, 曾飞<sup>2</sup>, 袁晓冬<sup>2</sup>

(1. 国家能源用户侧储能创新研发中心(北方工业大学), 北京 100144;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 针对电氢混合储能系统在不平直流微网中功率波动时面临的功率分配问题, 提出了一种基于级联式模糊控制的电氢耦合直流微网能量管理策略。该策略中一次模糊控制器依据储氢罐储氢状态(state of hydrogen storage, SOH)与锂电池荷电状态(state of charge, SOC)求解出一次功率分配因子, 对直流微网净功率进行一次分配; 二次模糊控制器结合一次功率分配参考值与SOH对一次功率分配因子作出校正。此外, 为使氢储能系统中具有非线性工作特性的电流控制型装置(电解槽、燃料电池)能够对能量管理系统作出高效响应, 采用插值法将功率分配参考值转换为电流参考值。通过Matlab/Simulink仿真结果证明, 所提能量管理策略有效缩小了氢储能系统在非合理区间的功率波动范围并提高了氢储能系统中装置的响应精度与速度。

**关键词:** 直流微网; 电氢耦合; 混合储能系统; 能量管理; 级联式模糊控制; 插值法

## An energy management strategy for an electricity-hydrogen coupled DC microgrid based on cascade fuzzy control

LI Jianlin<sup>1</sup>, LIANG Ce<sup>1</sup>, ZENG Fei<sup>2</sup>, YUAN Xiaodong<sup>2</sup>

(1. National User-side Energy Storage Innovation Research and Development Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** An energy management strategy for an electricity-hydrogen coupled DC microgrid based on cascade fuzzy control is proposed to address the power allocation problem faced by an electricity-hydrogen hybrid energy storage system when smoothing out power fluctuations in a DC microgrid. In this strategy, the primary fuzzy controller works out the primary power allocation factor based on the state of hydrogen storage (SOH) of the hydrogen storage tank and the state of charge (SOC) of the lithium-ion battery and performs primary allocation of the DC microgrid net power. The secondary fuzzy controller combines the reference value of primary power allocation and the SOH to correct the primary power allocation factor. In addition, to enable current-controlled devices (electrolysers and fuel cells) with nonlinear operating characteristics to respond efficiently to the energy management system, an interpolation method is used to convert the power distribution reference value to a current reference value. Matlab/Simulink simulation results prove that the strategy effectively narrows the power fluctuation range in the unreasonable range and improves the accuracy and speed of the device response in the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277211).

**Key words:** DC microgrid; electricity-hydrogen coupling; hybrid energy storage system; energy management; cascade fuzzy control; interpolation method

## 0 引言

直流微网作为一种新兴电力能源管理形式, 可

以有效降低传统交流微网中输/变电的能量损耗, 提升能量转换效率, 且直流微网拓扑结构灵活多变, 适配于风、光等分布式能源及偏远地区供电。此外, 合理地配置储能系统可使直流微网在脱离大电网支撑时, 仍能实现独立稳定运行及安全可靠供电。当前储能装置类别众多、特性迥异, 将不同种类储能

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52277211); 国家电网有限公司科技项目资助(J2023166)

装置的优势相结合,构成混合储能系统,可充分发挥储能系统对于直流微网运行的支撑作用。由氢储能与电化学储能组合而成的混合储能系统,能够实现短时、中长期的能量存储以及低频段、中高频段的波动平抑<sup>[1-4]</sup>,是一种具有互补特性的储能配置方式,是减小新能源出力不确定性影响,保障直流微网安全、稳定运行的重要手段。

相比于仅配置单类储能系统的直流微网,电氢混合储能系统虽通过多能互补的方式,改善了直流微网的功率波动,提升了新能源的消纳能力,但也为直流微网带来了更复杂的能量管理与功率分配问题。文献[5]结合偏远地区资源状况,对微网运行工况进行了细致划分,验证了在合理的混合储能系统出力规划下,构建离网型零碳微网具有一定的可实践性,但该文献未明确给出混合储能系统的具体协调运行控制方法。文献[6]针对含氢储能-锂电池-超级电容器混合储能系统的直流微网,以锂电池荷电状态(state of charge, SOC)与储氢罐储氢状态(state of hydrogen storage, SOH)为功率分配依据,提出一种通过改变以固定功率运行的电解槽的台数,调整微网内余电消纳情况的协调控制策略。但该策略易造成运行在临界功率点的电解槽频繁启停,影响设备的性能;此外,在电解槽的整机投切下,SOH难以实现连续性的自适应调整。文献[7]在仅配置电化学储能的风电场中加入了氢储能系统,结合氢储能的容量优势以及电化学储能的转换效率,合理设置目标函数,减小了电力损失以及功率波动。以上研究方法大多是通过系统的工况划分,以及对装置的简单启停控制或优化控制来实现混合储能系统的功率分配。但由于此类方法未全面考虑电氢混合储能系统中SOC、SOH的约束以及装置运行特性,在实际应用中,容易造成设备易损或寿命缩短等问题。为此,文献[8]提出一种兼顾SOC和SOH的模糊控制方法,降低了系统协调控制的复杂度,并通过将混合储能设备约束于合理运行状态区内以提升设备使用寿命。但基于主观经验的规则型控制难以使设备面临临界或极端情况时,实现快速的自适应调整,因此该方法仍有待优化。

除功率分配外,采用与装置运行特性相对应的装置级控制方法也是微网能量管理的重要环节。相比于较为成熟的电化学储能控制技术,在对氢储能系统进行功率控制时,应充分考虑氢储能系统中装置(包括电解槽、燃料电池)的功率-电流非线性特性。文献[9-10]研究表明燃料电池输出特性受工作温度、湿度、氢/氧分压等环境因素影响,且电压-电流与功率-电流曲线均呈非线性特性。文献[11]对微

网进行能量管理时,通过研究功率与SOH的关系,得到了与氢气存储量相关联的微网能量管理模型,提高了微网模型预测精度及环境干扰下微网的鲁棒性。但氢储能装置的功率与SOH的函数关系较为复杂,研究过程中涉及的变量较多,需借助代数求解或在线辨识等方法来实现,因此可考虑先求解氢储能装置中功率与电流的关系,再利用电流对SOH的控制,间接实现功率对SOH的控制。

为更好地融合电、氢两种储能系统,提升直流微网面临多工况的自适应能力,本文在上述研究基础上提出一种能量管理策略,在进行直流微网能量管理时,通过级联式模糊控制(fuzzy logic control, FLC)实现混合储能系统的初次功率分配,并根据初次功率分配结果和SOH进行功率分配二次校正,由此抑制因单级模糊控制的经验化求解而引起的SOH向不合理区间波动的趋势,并加快已处于不合理运行区间的SOH向合理区间过渡的速度。此外,考虑到氢储能系统中的电解槽、燃料电池为电流控制型装置,忽略环境因素的影响下,本文通过插值法(interpolation method, IM)对电解槽、燃料电池的功率-电流曲线进行拟合,在降低功率-电流函数求解难度的同时,提升了电流控制型装置的控制精度与响应速度,完成了直流微网能量管理中装置功率分配与装置控制的耦合及过渡。最终使用Matlab/Simulink仿真平台对本文所提电氢耦合直流微网能量管理策略进行验证。

## 1 直流微网模型

### 1.1 直流微网结构

直流微网结构如图1所示,按功能定位可将装置分为:分布式电源、直流负载、混合储能系统。混合储能系统由电池储能系统(battery energy storage system, BESS)和氢储能系统(hydrogen energy storage system, HESS)构成,是一种能量缓冲单元,对微网的直流母线电压及源荷差额功率具有调节作用。当混合储能系统释放电能时,锂电池(battery, BAT)及燃料电池(fuel cell, FC)可与光伏(photovoltaic panel, PV)一起组成分布式电源;当混合储能系统吸纳电能时,锂电池及电解槽(electrolyzer, EL)可与微网中其他电阻性负载一同视为直流负载。微网整体利用分层控制对源-荷-储各装置进行协同控制,保障微网稳定运行。微网通过DC/DC变换器连接直流母线与各设备装置,实现下层控制;通过能量管理系统(energy management system, EMS)监测各装置运行状态并给定各DC/DC变换器功率参考值,实现上层控制<sup>[12]</sup>。

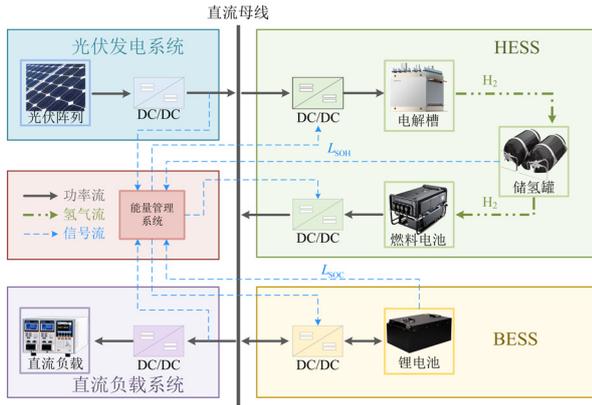


图 1 直流微网结构图

Fig. 1 DC microgrid structure diagram

## 1.2 光伏发电系统模型

光伏发电系统由一系列光伏组件以串、并联的形式组成, 模型可近似为一个非线性二极管、一个光生电流源及损耗阻抗, 其  $U-I$  特性表达式如式(1)和式(2)所示<sup>[13-14]</sup>。

$$I_{pv} = N_p I_{sc,pv} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{U_{pv}}{C_2 N_s U_{oc,pv}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_1 = \left( 1 - \frac{I_{m,pv}}{I_{sc,pv}} \right) \exp\left(-\frac{U_{m,pv}}{C_2 U_{oc,pv}}\right) \\ C_2 = \left( \frac{U_{m,pv}}{U_{oc,pv}} - 1 \right) \left[ \ln\left( 1 - \frac{I_{m,pv}}{I_{sc,pv}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_{pv}$ 、 $U_{pv}$  分别为光伏电池的输出电流、输出电压;  $N_p$ 、 $N_s$  分别为光伏电池的并联、串联个数;  $C_1$ 、 $C_2$  为修正系数;  $I_{sc,pv}$ 、 $U_{oc,pv}$  分别为光伏电池的短路电流、开路电压;  $I_{m,pv}$ 、 $U_{m,pv}$  分别为光伏电池工作在最大功率点对应的电流、电压。

## 1.3 BESS 模型

BESS 主体为锂电池, 通过内部电能与化学能的转化, 进行能量存储与释放。锂电池模型可等效为电源、欧姆内阻和两个 RC 环路的串联电路。BESS 的能量存储水平和充/放工作状态由 SOC 直接决定。锂电池的数学模型选择 DP 模型, SOC 估算方法选择库伦计数法, 具体如式(3)所示<sup>[15-16]</sup>。

$$\begin{cases} U_{bat} = U_{oc,bat} - I_{bat} R_0 - U_{p,bat} - U_{s,bat} \\ I_{bat} = \frac{U_{p,bat}}{R_p} + C_p \frac{dU_{p,bat}}{dt} \\ L_{SOC} = L_{SOC,0} - \frac{1}{CU_{bat,t}} \int P_{bat,t} dt \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $U_{bat}$ 、 $I_{bat}$  分别为锂电池的输出电压、输出电流;  $U_{oc,bat}$ 、 $U_{p,bat}$ 、 $U_{s,bat}$  分别为锂电池的开路电压、电化学极化电压和浓差极化电压;  $R_0$ 、 $R_p$  分别为锂电池的欧姆内阻、电化学极化电阻;  $C_p$  为锂电池的电化学极化电容;  $L_{SOC}$  为锂电池的 SOC;  $L_{SOC,0}$  为锂电池的 SOC 初值;  $C$  为锂电池的额定容量;  $U_{bat,t}$ 、 $P_{bat,t}$  分别为  $t$  时刻锂电池的电压及功率。

## 1.4 HESS 模型

与 BESS 直接在内部进行能量转化不同, HESS 的能量吞吐依托于电解槽、燃料电池两个装置分别执行, 并借助储氢罐对两个装置进行工作隔离。

### 1.4.1 电解槽数学模型

电解槽由若干电解槽单体串联而成, 可近似于直流负载元件。常见的电解槽按隔膜类型可分为<sup>[17]</sup>: 碱性电解槽(alkaline electrolyzer, ALK)、质子交换膜电解槽(proton exchange membrane electrolyzer, PEM)<sup>[18-19]</sup>、阴离子交换膜电解槽(anion exchange membrane electrolyzer, AEM)、固体氧化物电解槽(solid oxide electrolysis cell, SOEC), 其中碱性电解制氢技术设备成本低、技术成熟, 已实现产业化生产及应用。碱性电解槽数学模型如式(4)所示<sup>[20]</sup>。

$$\begin{cases} U_{el} = n_{sel} (E_{rev,el} + U_{ohm,el} + U_{act,el}) \\ E_{rev,el} = 1.253 - 2.4516e^{-5} T_{el} \\ U_{ohm,el} = \frac{r_1 + r_2 T_{el}}{A_{el}} I_{el} \\ U_{act,el} = (s_1 + s_2 T_{el} + s_3 T_{el}^2) \times \\ \lg\left(\frac{t_1 + t_2 / T_{el} + t_3 / T_{el}^2}{A_{el}} I_{el} + 1\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U_{el}$ 、 $I_{el}$  分别为电解槽的输出电压、输出电流;  $E_{rev,el}$ 、 $U_{ohm,el}$ 、 $U_{act,el}$  分别为电解槽的可逆电压、欧姆过电压、活化过电压;  $n_{sel}$  为电解槽单体的串联个数;  $T_{el}$  为电解槽开氏温度;  $r_1$ 、 $r_2$  为电解槽的欧姆电阻参数;  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  为电解槽的活化过电压参数;  $A_{el}$  为电解槽有效电解面积。

### 1.4.2 燃料电池数学模型

燃料电池的工作方式与电解槽相似, 是电解槽的逆反应装置。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有效能高、启动速度快、适应性强、能量密度高的优势, 在平衡能源和提供电力备用等场景中被广泛应用, 质子交换膜燃料电池数学表达式如式(5)所示<sup>[21]</sup>。

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{fc} = n_{sfc} (E_{rev\_fc} - U_{act\_fc} - U_{ohm\_fc} - U_{conc\_fc}) \\ E_{rev\_fc} = -\frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T_{fc} - T_{ref}) + \\ \quad \frac{RT_{fc}}{2F} \left[ \ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \\ U_{act\_fc} = \zeta_1 + \zeta_2 T_{fc} + \zeta_3 T_{fc} \ln(I_{fc}) + \\ \quad \zeta_4 T_{fc} \ln(C_{O_2}) \\ C_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T_{fc}}\right)} \\ U_{ohm\_fc} = I_{fc} \left( \frac{\rho_M l}{A} + R_c \right) \\ U_{conc\_fc} = -B \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \end{array} \right. \quad (5)$$

式中： $U_{fc}$ 、 $I_{fc}$  分别为燃料电池的输出电压、输出电流； $E_{rev\_fc}$ 、 $U_{act\_fc}$ 、 $U_{ohm\_fc}$ 、 $U_{conc\_fc}$  分别为燃料电池的可逆电压、活化过电压、欧姆过电压、浓差过电压； $n_{sfc}$  为燃料电池单体的串联个数； $\Delta G$  为吉布斯自由能； $F$  为法拉第常数； $\Delta S$  为熵变； $T_{fc}$  为燃料电池开氏温度； $T_{ref}$  为燃料电池参考温度； $R$  为摩尔气体常数； $p_{H_2}$ 、 $p_{O_2}$  分别为阳极氢气分压、阴极氧气分压； $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$ 、 $\zeta_4$  为经验参数； $C_{O_2}$  为气液界面的氧溶解度； $\rho_M$ 、 $l$ 、 $A$  分别为质子交换膜的电阻率、厚度、有效活化面积； $R_c$  为阻碍质子通过质子交换膜的阻抗； $B$  为常量； $J$ 、 $J_{max}$  分别为燃料电池的电流密度与最大电流密度。

#### 1.4.3 储氢罐数学模型

储氢罐中氢气储量由电解槽的产氢速率和燃料电池的耗氢速率共同决定。当储氢罐满足以下 3 个条件时，其数学模型可用式(6)表示<sup>[22]</sup>：(1) 氢气存储过程中无泄漏；(2) 储氢罐中温度恒定；(3) 储氢罐容积不变。

$$\left\{ \begin{array}{l} M = M_0 + \int \frac{\eta_{el} I_{el}}{2F} dt - \int \frac{\eta_{fc} I_{fc}}{2F} dt \\ p_{tank} = \frac{RT_{tank}}{V_{tank}} M \\ L_{SOH} = \frac{p_{tank}}{p_{tank\_max}} \times 100\% \end{array} \right. \quad (6)$$

式中： $M$  为  $t$  时刻储氢罐中的氢气储量； $M_0$  为储氢罐中的初始氢气储量； $\eta_{el}$  为电解槽的电解效率、电解电流； $\eta_{fc}$  为燃料电池的转换效率； $T_{tank}$  为储氢

罐内温度； $V_{tank}$  为储氢罐的容积； $L_{SOH}$  为储氢罐的 SOH； $p_{tank}$  为储氢罐内部压强； $p_{tank\_max}$  为储氢罐可承受的内部最大压强。

## 2 直流微网协同控制策略

直流微网通过 EMS 对光伏、混合储能系统、负荷进行协同调控，形成可控集合，在大幅提升系统运行稳定性的同时，充分实现了能源的综合梯次利用，减轻由分布式能源发电不可控、随机性等给微网运行带来的影响。为实现上述对直流微网的协同调控，本文提出一种分层控制方法，上层为基于级联式模糊控制-插值法(fuzzy logic controller-interpolation method, FLC-IM)的系统级控制，可实时监测、采集微网中各装置信息，进行数据分析、优化以及对下层各装置的功率分配；下层为装置级控制，可根据各装置的不同工作特性，采用与之匹配的变流器控制策略<sup>[23]</sup>，直流微网协同控制原理如图 2 所示。

### 2.1 装置级控制策略

#### 2.1.1 光伏控制策略

光伏阵列输出的  $P-V$  曲线随光照强度、环境温度变化，为充分利用光伏，需对其进行最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)。本文选用基于扰动观察法(perturb observe, P&O)的 MPPT 控制<sup>[24]</sup>，MPPT 在不断检测  $I_{pv}$ 、 $U_{pv}$  变化的同时，计算出最大功率点对应的电压参考值  $U_{mppt\_ref}$ ，该值与  $U_{pv}$  的差值经过 PI 控制器后，产生 PWM 的占空比信号  $D_{pv}$  作用于升压变换器上。

#### 2.1.2 电解槽控制策略

电解槽工作时输出的功率  $P_{el}$  与  $I_{el}$  呈非线性正相关。由 EMS 产生的电解槽参考功率  $P_{el\_ref}$  经过 IM 控制器后，产生电流参考值  $I_{el\_ref}$ ，该值与  $I_{el}$  的差值经过 PI 控制器后，产生 PWM 的占空比信号  $D_{el}$  作用于降压变换器上。

#### 2.1.3 燃料电池控制策略

燃料电池工作时输出功率  $P_{fc}$  与  $I_{fc}$  呈非线性正相关。由 EMS 产生的燃料电池参考功率  $P_{fc\_ref}$  经过 IM 控制器后，产生电流参考值  $I_{fc\_ref}$ ，该值与  $I_{fc}$  的差值经过 PI 控制器后，产生 PWM 的占空比信号  $D_{fc}$  作用于升压变换器上。

#### 2.1.4 锂电池控制策略

由 EMS 产生的锂电池参考电压  $U_{bat\_ref}$  经过 PI 控制器后，产生电流参考值  $I_{bat\_ref}$ ，该值与  $I_{bat}$  的差

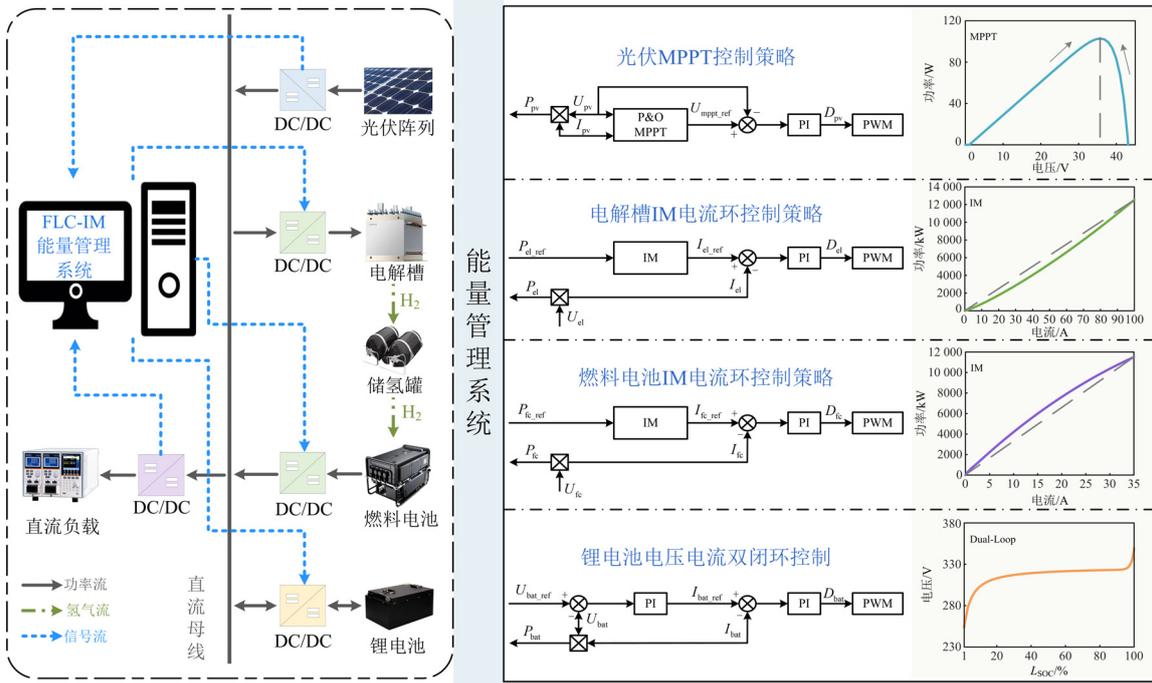


图2 直流微网协同控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of DC microgrid cooperative control principle

值经过 PI 控制器后, 产生 PWM 的占空比信号  $D_{bat}$  作用于升降压变换器上。

## 2.2 FLC-IM 能量管理系统

母线电容可平滑由分布式电源或负荷的小幅功率波动引起的微网母线电压波动, 但当分布式电源或负荷发生较大波动时, 需依靠混合储能系统来补偿微网中的功率缺额, 抑制母线电压波动。直流母线电压动态方程和微网功率平衡方程如式(7)所示。

$$\begin{cases} C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{pv} \pm I_{bat} - I_{el} + I_{fc} - I_{load} \\ \frac{1}{2} C_{dc} \frac{dU_{dc}^2}{dt} = P_{pv} \pm P_{bat} - P_{el} + P_{fc} - P_{load} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C_{dc}$  为直流母线电容值;  $U_{dc}$  为直流母线电压值;  $I_{load}$  为负荷电流;  $P_{pv}$ 、 $P_{bat}$ 、 $P_{load}$  分别为光伏功率、锂电池功率和负荷功率。

直流微网中净功率  $P_{net}$  和混合储能系统可控功率  $P_{hyb}$  如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_{net} = P_{pv} - P_{load} \\ P_{hyb} = \pm P_{bat} + P_{el} - P_{fc} \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可知, 直流微网 EMS 的核心在于各装置间的功率分配。当微网中分布式电源、直流负荷、混合储能系统达到功率平衡时, 直流母线电压可实现稳定。当光伏出力大于负荷需求, 即  $P_{net}$

大于 0 时, 为减少弃光, 启动混合储能系统对光伏余量进行能量吸纳; 当光伏出力恰好等于负荷需求, 即  $P_{net}$  等于 0 时, 混合储能系统停止工作; 当光伏出力不足以满足负荷需求, 即  $P_{net}$  小于 0 时, 启动混合储能系统弥补源荷功率缺额<sup>[25]</sup>。

HESS 能量密度高、充/放电过程可分离优化且运行过程中无碳排放, 但其能量转换效率低、动态响应速度慢。BESS 暂态性能良好, 能快速补偿  $P_{net}$  与 HESS 响应时存在的差额并平抑母线电压波动<sup>[26]</sup>。因此本文中混合储能系统以 HESS 为主, 优先对微网  $P_{net}$  响应; 以 BESS 为辅, 进一步改善混合储能系统的整体性能。此外, 当  $L_{SOH}$  过低或过高时, 易导致 HESS 出现爆炸、泄漏等安全问题; 当  $L_{SOC}$  过低或过高时, 易影响锂电池的健康及寿命。因此, 本文提出一种基于 FLC-IM 策略的能量管理方法, 以直流微网中分布式电源、直流负荷、混合储能系统三者功率平衡为前提, 考虑 HESS 的  $L_{SOH}$  与 BESS 的  $L_{SOC}$ , 进行混合储能系统的功率分配。FLC-IM 能量管理系统功率分配流程如图 3 所示。

由图 3 可知, EMS 首先根据直流微网中的  $P_{net}$  判断混合储能系统的充/放电工作状态, 充电状态对应功率分配执行 1; 放电状态对应功率分配执行 2。

对于执行 1, 燃料电池退出工作, 混合储能系统在进行充电功率分配时, 先后判断 HESS 的  $L_{SOH}$

与 BESS 的  $L_{SOC}$ ，当  $L_{SOH}$  与  $L_{SOC}$  均达到上限时，考虑到混合储能系统安全，进行弃光，即工况一；当  $L_{SOH}$  与  $L_{SOC}$  中有一项未达上限时，由该装置对应的储能系统进行余电吸纳，即工况二、三；当  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  均未达上限时，通过一级模糊控制器(FLC-I)进行混合储能系统初次功率分配，得到电解槽、锂电池的一次充电功率参考值，再通过二级模糊控制器(FLC-II)对一次参考值进行校正，得到电解槽、锂电池的最终充电功率参考值，即工况四。

对于执行 2，电解槽退出工作，混合储能系统在进行放电功率分配时，先后判断 HESS 的  $L_{SOH}$  与 BESS 的  $L_{SOC}$ ，当  $L_{SOH}$  与  $L_{SOC}$  均降至下限时，考虑

到混合储能系统的安全，将混合储能系统停机，即工况五；当  $L_{SOH}$  与  $L_{SOC}$  中有一项未降至下限时，由该装置对应的储能系统进行缺额补充，即工况六、七；当  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  均未降至下限时，通过 FLC-I 进行混合储能系统初次功率分配，得到燃料电池、锂电池的一次放电功率参考值，再通过 FLC-II 对一次参考值进行校正，得到燃料电池、锂电池的最终放电功率参考值，即工况八。此外，对于工况四、八，为提升 HESS 控制精度，利用 IM 求解器将电解槽、燃料电池的最终功率参考值转换为电流参考值后进行变流器控制。

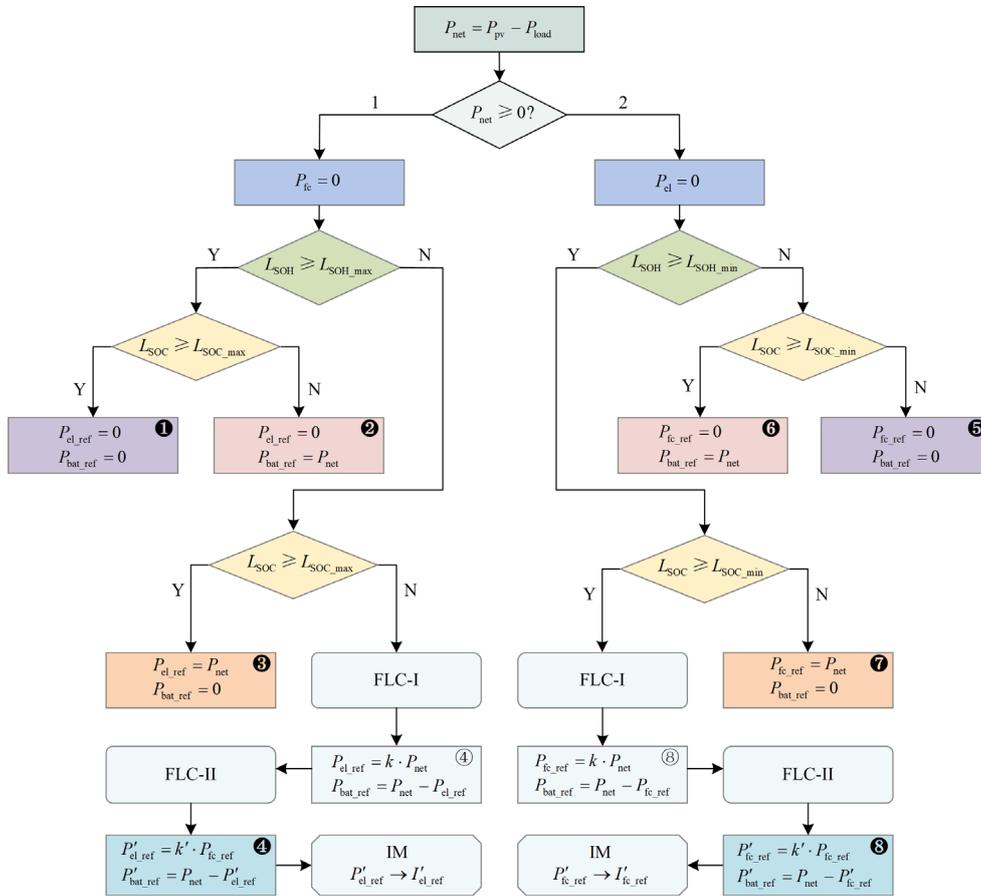


图 3 FLC-IM 能量管理系统功率分配流程图

Fig. 3 Flow chart of FLC-IM energy management system

### 2.3 基于级联式模糊控制的功率分配策略

为实现 HESS 与 BESS 间的功率分配，本文提出一种基于级联式模糊控制的功率分配策略，如图 4 所示。

级联式模糊控制器由两级模糊控制器组成，系统中  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  是 FLC-I 的两个输入变量，通过一

级模糊逻辑规则的计算，得到 HESS 一次功率分配因子  $k$ ，随后与  $P_{net}$  相乘得到 HESS 的一次充/放电功率参考值  $P_{HESS\_ref}$ ； $P_{net}$  与  $P_{HESS\_ref}$  的差值即 BESS 的一次功率参考值  $P_{bat\_ref}$ 。FLC-I 的计算表达式如式 (9)、式(10)所示。

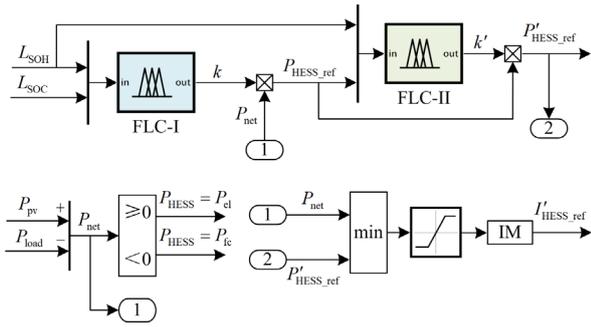


图4 基于级联式模糊控制的功率分配策略

Fig. 4 Power allocation strategy based on cascaded fuzzy control

$$\begin{cases} P_{el\_ref} = k \cdot P_{net} \\ P_{bat\_ref} = P_{net} - P_{el\_ref} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{fc\_ref} = k \cdot P_{net} \\ P_{bat\_ref} = P_{net} - P_{fc\_ref} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P_{el\_ref}$ 、 $P_{fc\_ref}$ 、 $P_{bat\_ref}$  为混合储能系统的一次功率分配参考值。

经过一级模糊控制策略得到的混合储能系统一次功率分配结果, 可初步实现不同区间状态的  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  向合理区间的快速过渡<sup>[27]</sup>, 但该策略未充分利用 BESS 灵活动态响应的优势, 在一定程度上增加了 HESS 的功率波动, 且未考虑 HESS 在临近上/下限时仍进行同向功率吞吐而造成的后期  $L_{SOH}$  越限情况<sup>[28]</sup>。因此, 本文使用 FLC-I 与 FLC-II 进行级联式控制, 其目的在于通过校正  $k$ , 减小 HESS 承担波动性功率的比例, 减缓  $L_{SOH}$  向上/下限波动的趋势, 并利用 BESS 补偿 HESS 在一、二级功率分配前后的差值。FLC-II 以  $P_{HESS\_ref}$  和  $L_{SOH}$  为两个输入变量, 通过二级模糊逻辑规则的计算, 得到 HESS 二次功率分配因子  $k'$ , 随后与  $P_{HESS\_ref}$  相乘得到二次充/放电功率参考值  $P'_{HESS\_ref}$ ;  $P_{net}$  与  $P'_{HESS\_ref}$  的差值即 BESS 的二次功率参考值  $P'_{bat\_ref}$ 。FLC-II 的计算表达式如式(11)、式(12)所示。

$$\begin{cases} P'_{el\_ref} = k' \cdot P_{el\_ref} \\ P'_{bat\_ref} = P_{net} - P'_{el\_ref} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P'_{fc\_ref} = k' \cdot P_{fc\_ref} \\ P'_{bat\_ref} = P_{net} - P'_{fc\_ref} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P'_{el\_ref}$ 、 $P'_{fc\_ref}$ 、 $P'_{bat\_ref}$  为混合储能系统的二次功率分配参考值;  $k'$  为二次功率分配因子。

### 2.3.1 一级模糊逻辑规则

FLC-I 输入端将  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  模糊化为 5 段状态

量, 经过一级模糊逻辑规则及去模糊化后, 得到 HESS 一次功率分配因子  $k$ 。由于高斯隶属度函数具有光滑连续性及较强适应性, 因此 FLC-I 的输入及输出变量均使用高斯隶属度函数。

当混合储能系统进行充电运行时, 电解槽及锂电池对应的一级模糊逻辑规则表如表 1 所示。当混合储能系统进行放电运行时, 燃料电池及锂电池对应的一级模糊逻辑规则表如表 2 所示。在表 1 和表 2 中, 输入、输出端状态量 {VS、S、M、B、VB} 分别代表 {极小、小、中、大、极大}。

表 1 EL-BAT 一级模糊逻辑规则表

Table 1 EL-BAT first-level fuzzy logic rule sheet

$k$	$L_{soc}$					
	VS	S	M	B	VB	
$L_{SOH}$	VS	M	B	B	VB	VB
	S	S	M	B	VB	VB
	M	S	S	M	B	VB
	B	VS	S	S	M	VB
	VB	VS	VS	S	S	M

表 2 FC-BAT 一级模糊逻辑规则表

Table 2 FC-BAT first-level fuzzy logic rule sheet

$k$	$L_{soc}$					
	VS	S	M	B	VB	
$L_{SOH}$	VS	M	S	S	VS	VS
	S	B	M	S	S	S
	M	B	B	M	S	VS
	B	VB	B	M	M	M
	VB	VB	VB	B	M	M

由于燃料电池与电解槽工作时的运行逻辑相反, 但基本原理及特性一致, 因此本文仅以混合储能系统充电为例, 详细介绍电解槽和锂电池的充电功率分配逻辑规则。

1) 当  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  状态量一致时, 电解槽与锂电池均分需要消纳的净功率。

2) 当  $L_{SOH}$  状态量高于  $L_{SOC}$  状态量时, 表明锂电池有更充足的裕量来消纳净功率, 因此一次功率分配因子  $k$  取 S 或 VS, 使电解槽仅消纳小部分功率。

3) 当  $L_{SOH}$  状态量低于  $L_{SOC}$  状态量时, 表明电解槽可消纳大部分净功率, 因此一次功率分配因子  $k$  取 B 或 VB。

### 2.3.2 二级模糊逻辑规则

FLC-II 的被控主体为 HESS, 当  $L_{SOH}$  偏离合理充/放电区间, 向上/下限趋近时, 对一次功率分配因子  $k$  进行校正, 缩小  $L_{SOH}$  的波动范围。因此, 统一使用  $P_{HESS\_ref}$  表示 HESS 一次充/放电功率参考值

$P_{cl\_ref}$  及  $P_{fc\_ref}$ 。当 HESS 充电时,  $P_{HESS\_ref}$  与  $P_{cl\_ref}$  绝对值相等, 符号为负; 当 HESS 放电时,  $P_{HESS\_ref}$  与  $P_{fc\_ref}$  绝对值相等, 符号为正。

FLC-II 的输入端将  $L_{SOH}$ 、 $P_{HESS\_ref}$  模糊化为 5 段状态量, 经过二级模糊逻辑规则及去模糊化后, 得到 HESS 二次功率分配因子  $k'$ 。FLC-II 的输入及输出变量均使用高斯隶属度函数。

HESS 二级模糊逻辑规则表如表 3 所示。表 3 中输入端  $L_{SOH}$  的状态量 {VS、S、M、B、VB} 分别表示 {极小、小、中、大、极大};  $P_{HESS\_ref}$  的状态量 {NB、NS、Z、PS、PB} 分别表示 {负大、负小、零、正小、正大}; 输出端  $k'$  的状态量 {VS、S、MS、MB、B、VB} 分别表示 {极小、小、偏小、偏大、大、极大}。

表 3 HESS 二级模糊逻辑规则表

Table 3 HESS second-level fuzzy logic rule sheet

$k'$	$P_{HESS\_ref}$				
	NB	NS	Z	PS	PB
VS	VB	VB	M	VS	VS
S	B	B	M	S	VS
$L_{SOH}$	M	M	M	M	M
B	VS	S	M	B	B
VB	VS	VS	M	VB	VB

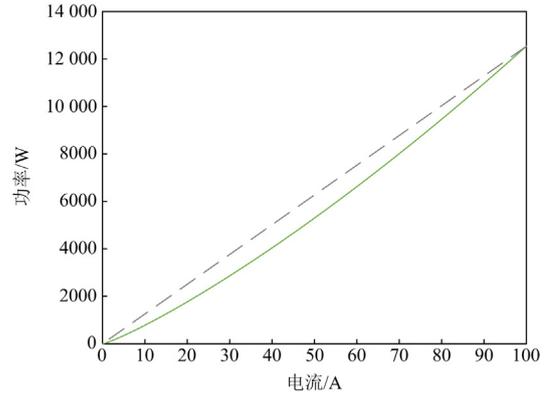
FLC-II 对 HESS 一次充/放电功率参考值的校正逻辑规则如下。

- 1) 当  $L_{SOH}$  处于合理区间范围时, 无需校正功率。
- 2) 当  $L_{SOH}$  处于较低区间范围时, 进行功率校正:  $P_{HESS\_ref}$  为负时, 则使一次充电功率波动小幅降低;  $P_{HESS\_ref}$  为正时, 则使一次放电功率波动大幅降低。HESS 校正前后的出力差值由 BESS 补偿。
- 3) 当  $L_{SOH}$  处于较高区间范围时, 进行功率校正:  $P_{HESS\_ref}$  为负时, 则使一次充电功率波动大幅降低;  $P_{HESS\_ref}$  为正时, 则使一次放电功率波动小幅降低。HESS 校正前后的出力差值由 BESS 补偿。

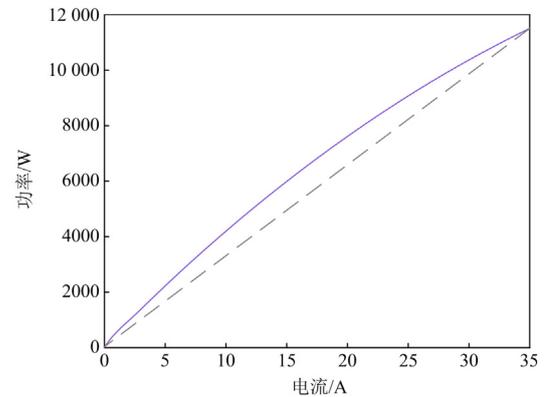
#### 2.4 基于 IM 求解的 HESS 控制策略

HESS 利用级联式模糊控制策略得到维持直流微网稳定运行的功率分配参考值后, 需经过下层变流器控制策略实现最终的装置级控制。根据式(4)—式(6)搭建 HESS 数学模型, 可得到如图 5 所示的电解槽、燃料电池  $P-I$  特性曲线。

由图 5 可知, HESS 中电解槽及燃料电池为电流控制型装置且呈现非线性  $P-I$  特性。常规方法对 HESS 的功率调控, 一是通过直接使用电解槽/燃料



(a) 电解槽  $P-I$  特性曲线



(b) 燃料电池  $P-I$  特性曲线

图 5 HESS  $P-I$  特性曲线

Fig. 5 HESS  $P-I$  characteristic curve

电池的功率参考值除以额定电压, 得到电流参考值; 二是将测得的电解槽/燃料电池的功率参考值除以实时端电压, 得到电流参考值。两种常规的功率-电流转换方法中, 前者虽简单易行, 但忽略了 HESS 的  $P-I$  曲线的非线性特征, 使用额定电压代替随装置运行不断变化的电压实际值, 会导致计算得到的近似电流参考值与实际电流参考值间存在误差, 影响不同装置的协同运行; 后者虽保证了功率-电流转换后电流参考值的精度, 但由于测量值具有反馈滞后性, 使得 HESS 对功率参考值的实际响应速度较慢<sup>[29-30]</sup>。

为避免常规方法中依靠电压完成功率-电流转换的不足, 本文考虑直接求解 HESS 的  $P-I$  函数表达式, 得到二者间的对应关系。由于通过式(4)—式(6)中  $U-I$  表达式进行  $P-I$  转换的解析过程及结果较为复杂, 本文使用 IM 对  $P-I$  曲线进行拟合, 得到可反映 HESS 的  $P-I$  特性的数学表达式, 在保证功率-电流转换结果精度的同时, 实现了计算过程的简化、下层装置参数参考值的快速给定与装置响应速度的

提升。在进行 IM 求解时, 首先对 HESS 的  $P$ - $I$  特性曲线进行数据采样, 并将采样结果存储于记忆单元中; 其次将得到的功率参考值与已有的采样数据点进行比较, 确定功率参考值的相邻数据点; 最后采用极小区间内非线性曲线近似线性化的原理对功率参考值所对应的电流参考值进行快速 IM 求解(如图 6 及式(13)所示)。

$$I = I_{t-1} + \frac{P - P_{t-1}}{P_t - P_{t-1}} (I_t - I_{t-1}) \quad (13)$$

图 6 中, 点  $A(P_{t-1}, I_{t-1})$  与点  $B(P_t, I_t)$  为未知点  $C$  的相邻数据点, 且点  $A$  与点  $B$  的坐标值均为采样所得的已知数值。因此, 利用式(13)以及点  $C$  的横坐标数值  $P$  即可求解出未知的纵坐标值  $I$ 。

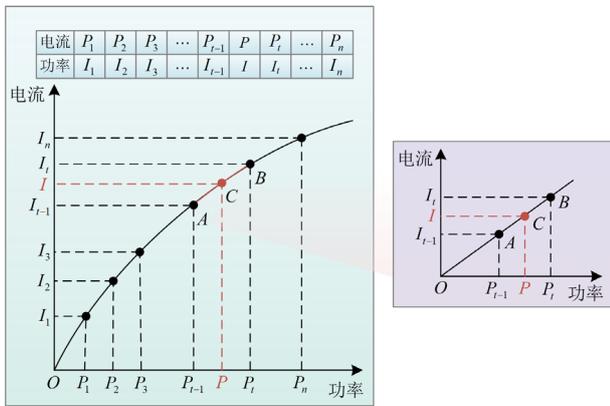


图 6 IM 求解示意图

Fig. 6 Schematic diagram of interpolation method

### 3 Matlab/Simulink 仿真验证

为验证本文前述部分直流微网功率分配策略的可行性与有效性, 本节选择 Matlab/Simulink 对该策略进行仿真验证。为在仿真验证中模拟混合储能系统在实际运行时面临的多类型场景, 本文依据 HESS 的  $L_{SOH}$  将仿真验证场景划分为 3 种: 场景一, HESS 合理充耗区( $L_{SOH}$  处于 0.4~0.6 的范围内); 场景二, HESS 深度氢耗区( $L_{SOH}$  处于 0~0.4 的范围内); 场景三, HESS 深度加注区( $L_{SOH}$  处于 0.6~1 的范围内)。

场景一主要验证 HESS 处于合理充耗区, 即 BESS 的  $L_{SOC}$  分别处于高、中、低不同充耗区时, 所提级联式模糊控制策略应用于混合储能系统功率分配的可行性与有效性; 场景二、场景三主要验证  $L_{SOH}$  处于深度氢耗区以及深度加注区时, 所提级联式模糊控制策略与常规单级模糊控制策略相比的优势。

此外, 为证明所提 IM 求解策略相比于两种常

规功率-电流转换策略的优势, 本节对 3 种策略下 HESS 对功率分配参考值的响应情况进行对比分析。

#### 3.1 HESS 合理充耗区仿真验证

设置 HESS 处于合理充耗区时, 直流微网的源荷变化情况及  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  的初始状态量如表 4 所示, 其对应仿真结果如图 7 所示。

根据表 4 及混合储能系统功率分配原则可知, 在 0~3 s, HESS 与 BESS 都处于合理充耗区间, 因此两者功率的吸纳与释放量基本相等。从图 7 可以看出, 由于  $L_{SOH}$  初值略低于  $L_{SOC}$  初值, 在 0~2 s 混合储能系统进行功率吸纳时, HESS 吸纳量略多, 在 2~3 s 混合储能系统进行功率释放时, HESS 释放量略低。在 3~6 s HESS 处于合理充耗区间, BESS

表 4 HESS 处于合理充耗区时仿真参数

Table 4 Simulation parameters of reasonable inflation and deflation range of HESS

$L_{SOH}$	$L_{SOC}$	时间/s	光照强度/ ( $W \cdot m^{-2}$ )	直流负载/ kW		
0.45	0.55	0~1	1000	10		
		1~2	700	10		
		2~3	500	15		
	0.75	0.75	3~4	1000	10	
			4~5	700	10	
		0.25	0.25	5~6	500	15
				6~7	1000	10
			0.25	7~8	700	10
				8~9	500	15

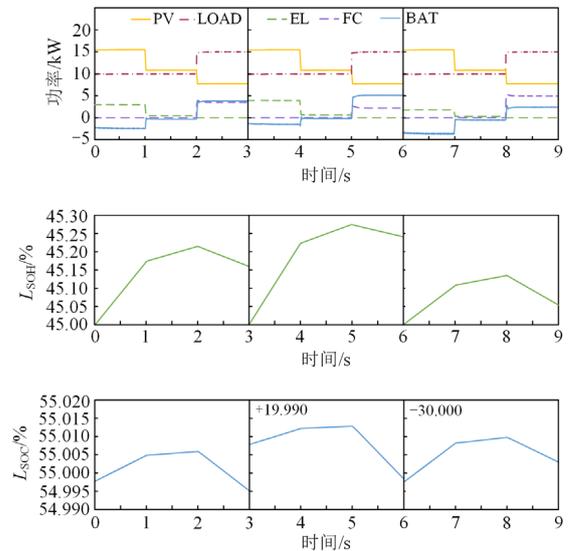


图 7 HESS 合理充耗区仿真结果

Fig. 7 Simulation results of reasonable inflation and deflation range of HESS

处于深度充电区，因此两者在 3~5 s 进行功率吸纳时，HESS 吸纳量偏多，减缓 BESS 的  $L_{SOC}$  向上限趋近的速度；在 5~6 s 进行功率释放时，BESS 释放量偏多，促使  $L_{SOC}$  下降至合理充耗区间。在 6~9 s，HESS 处于合理充耗区间，BESS 处于深度耗电区，因此两者在 6~8 s 进行功率吸纳时，BESS 吸纳量偏多，促使  $L_{SOC}$  快速回升至合理充耗区间；在 8~9 s 进行功率释放时，HESS 释放量偏多，避免 BESS 的  $L_{SOC}$  回落至深度耗电区。

综上所述，本文所提级联式模糊控制策略在 HESS 处于合理充耗区，BESS 处于不同状态区时，均可实现混合储能系统中功率的有效分配，避免储能系统向非合理区间趋近。

### 3.2 HESS 深度氢耗区仿真验证

当设置 HESS 处于深度氢耗区时，直流微网的源荷变化情况及  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  的初始状态量如表 5 所示，其对应仿真结果如图 8 所示。

根据表 5 及设定的混合储能系统功率分配原则可知，当  $L_{SOH}$  初值低于  $L_{SOC}$  初值时，在 0~3 s 混合储能系统应进行功率释放，且 HESS 的功率释放量

表 5 HESS 处于深度氢耗区时仿真参数

Table 5 Simulation parameters of deep hydrogen deflation range of HESS

$L_{SOH}$	$L_{SOC}$	时间/s	光照强度/ ( $W \cdot m^{-2}$ )	直流负载/ kW
0.25	0.55	0~1	600	15
		1~2	600	20
		2~3	800	20
		3~4	700	10
		4~5	1000	10
		5~6	1000	15

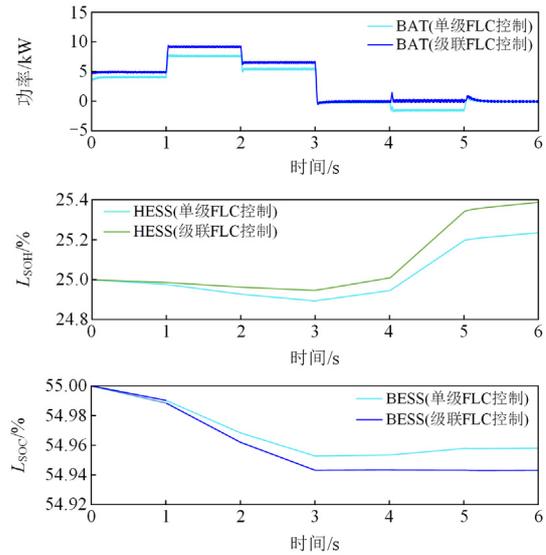
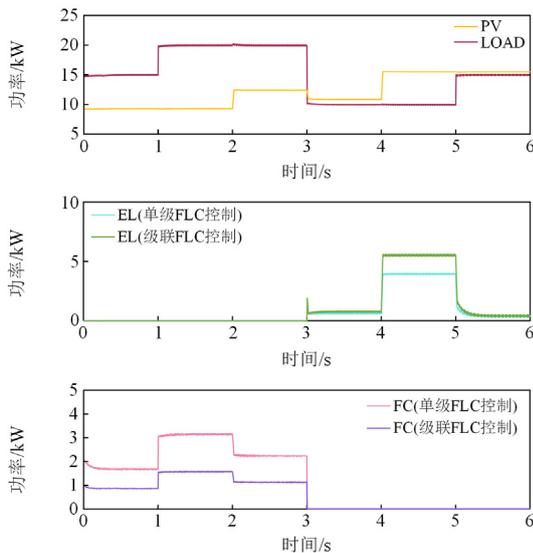


图 8 HESS 深度氢耗区仿真结果

Fig. 8 Simulation results of deep hydrogen deflation range of the HESS

应低于 BESS；在 3~6 s 混合储能系统应进行功率吸纳，且 HESS 的功率吸纳量应高于 BESS。由图 8 中 HESS 及 BESS 的运行情况可以看出，无论是仅采用单级模糊控制策略，还是采用本文所提级联式模糊控制策略，混合储能系统的实际功率分配情况均符合其基本功率分配原则，证明了本文所提功率分配策略的有效性。在此基础上，通过 FLC-II 对一次放电功率参考值进行校正，燃料电池的放电功率参考值相比 FLC-I 输出的放电功率参考值显著下降， $L_{SOH}$  下降率也随之减小；电解槽的用电功率相比于 FLC-I 输出的充电功率参考值明显上升， $L_{SOH}$  上升率也随之增大。

综上所述，相较于常规单级模糊控制策略，本文所提级联式模糊控制策略可在 HESS 已进入深度氢耗区时，通过减少功率释放来抑制  $L_{SOH}$  进一步向下限趋近；通过增加功率吸纳来促使  $L_{SOH}$  回升至合理充耗区间，有效缩小了  $L_{SOH}$  的波动范围。

### 3.3 HESS 深度加注区仿真验证

设置 HESS 处于深度加注区时，直流微网的源荷变化情况及  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  的初始状态量如表 6 所示，其对应仿真结果如图 9 所示。

根据表 6 及设定的混合储能系统功率分配原则可知，当  $L_{SOH}$  初值高于  $L_{SOC}$  初值时，在 0~3 s 及 5~6 s 混合储能系统应进行功率释放，且 HESS 的功率释放量应高于 BESS；在 3~5 s 混合储能系统应进行功率吸纳，且 HESS 的功率吸纳量应低于 BESS。由图 9 中 HESS 及 BESS 的运行情况可以看出，无论

表 6 HESS 处于深度加注区时仿真参数

Table 6 Simulation parameters of deep hydrogen inflation range of HESS

$L_{SOH}$	$L_{SOC}$	时间/s	光照强度/ ( $W \cdot m^{-2}$ )	直流负载/ kW
0.75	0.55	0~1	500	20
		1~2	700	20
		2~3	800	15
		3~4	1000	10
		4~5	1000	15
		5~6	600	20

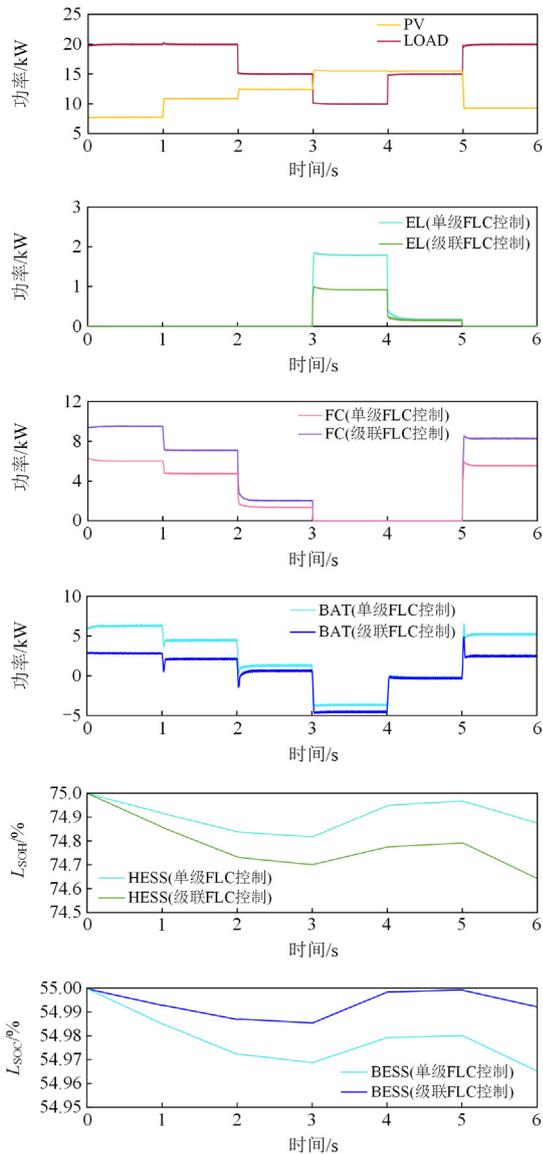


图 9 HESS 深度加注区仿真结果

Fig. 9 Simulation results of deep hydrogen inflation range of the HESS

是仅采用单级模糊控制策略, 还是采用本文所提的级联式模糊控制策略, 混合储能系统的实际功率分配情况均符合其基本功率分配原则, 证明了本文所提功率分配策略的有效性。在此基础上, 通过 FLC-II 对一次放电功率参考值进行校正, 燃料电池的放电功率参考值相比 FLC-I 输出的放电功率参考值显著提升,  $L_{SOH}$  下降率也随之增大; 电解槽的用电功率相比于 FLC-I 输出的充电功率参考值明显下降,  $L_{SOH}$  上升率也随之减小。

综上所述, 本文所提级联式模糊控制策略较于常规单级模糊控制策略可在 HESS 已进入深度加注区时, 通过增大功率释放来促使  $L_{SOH}$  下降至合理充耗区间; 通过减少功率吸纳来抑制  $L_{SOH}$  进一步向上限趋近, 有效缩小了  $L_{SOH}$  的波动范围。

### 3.4 IM 求解仿真验证

为验证 IM 求解法参与装置控制中功率-电流转换的可行性与有效性, 设置  $L_{SOH}$ 、 $L_{SOC}$  的初始状态量为 0.5, 其余 IM 求解法仿真参数如表 7 所示, 其对应仿真结果如图 10 所示。

表 7 IM 求解法仿真参数

Table 7 Simulation parameters of interpolation method

时间/s	光照强度/( $W \cdot m^{-2}$ )	直流负载/kW
0~1	800	5
1~2	1000	10
2~3	900	10
3~4	800	15
4~5	700	20
5~6	800	20

从 2.4 节图 5 所示的电解槽、燃料电池  $P-I$  特性曲线分析可得, 电解槽、燃料电池  $P-I$  特性曲线分别为下凹型、上凸型函数, 且曲线上每点所对应切线斜率即该点电压值。在电解槽运行功率低值至额定值的过程中, 若使用额定电压近似代替每一功率点的实际电压, 则会导致该功率值对应的电流值偏小; 同理, 在燃料电池运行功率低值至额定值的过程中, 若使用额定电压近似代替每一功率点的实际电压, 则会导致该功率值对应的电流值偏大。

从图 10 的仿真结果可以看出, 0~3 s 电解槽进入工作状态, 以 1 s 时微网工况切换后 3 种方法的功率-电流转换情况为例, 常规方法一(额定电压替代法)在 1.11 s 进入稳态, 稳态电流为 28.3 A; 常规方法二(实时电压反馈法)在 1.29 s 进入稳态, 稳态电流为 31.1 A; 本文所提 IM 求解法在 1.18 s 进入稳态, 稳态电流为 31.1 A。3~6 s 燃料电池进入工作状态, 以 4 s 时微网工况切换后 3 种方法的功率-电

流转换情况为例, 常规方法一在 4.27 s 进入稳态, 稳态电流为 11.9 A; 常规方法二在 4.49 s 进入稳态, 稳态电流为 10.6 A; 本文所提 IM 求解法在 4.29 s 进入稳态, 稳态电流为 10.6 A。

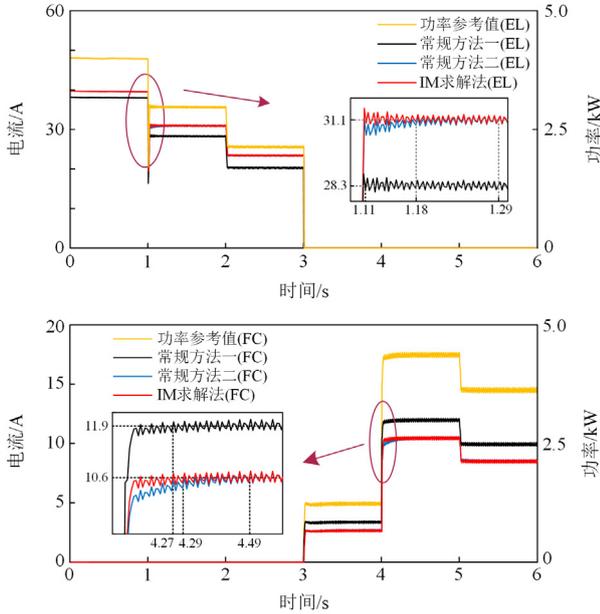


图 10 3 种功率-电流转换仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results of three kinds of power-current conversion

由此分析可得, 在 1 s 和 4 s 的功率-电流转换响应中, 常规方法一与 IM 求解法相比, 响应时间缩短了 0.07 s 和 0.02 s; 但该方法得到的稳态电流与实际稳态电流相比, 幅值偏差较大, 分别为 9% 和 12.3%。因此常规方法一存在功率-电流转换精度不高的问题。

在 1 s 和 4 s 的功率-电流转换响应中, 使用常规方法二和 IM 求解法均可获得实际稳态电流。但在响应时间上, 常规方法二与 IM 求解法相比具有 0.11 s 和 0.2 s 的时间延迟, 且这种响应时间延迟的现象在给定参考功率值发生较大波动后更为明显, 其原因在于常规方法二在进行功率-电流转换时, 实时电压的反馈存在滞后性, 无法快速调整至新功率参考值对应的电压值附近。

综上所述, 当 HESS 参考功率发生变动时, 本文所提 IM 求解法与基于额定电压替代法的常规方法一相比, 可提升其功率-电流转换精度; 与基于实时电压反馈法的常规方法二相比, 可缩短其向不同功率状态间过渡的响应时间。

## 4 结论

本文构建了含混合储能系统的直流微网模型,

并提出一种基于 FLC-IM 的电氢耦合直流微网能量管理策略。通过 Matlab/Simulink 仿真平台验证后, 主要得到以下结论。

1) 在直流微网面临源荷功率波动时, 可通过所提能量管理策略对混合储能系统进行控制, 使不同工况下直流微网均可稳定运行。

2) 级联式模糊控制策略通过改变 HESS 的功率分配因子, 提升了处于深度氢耗区和深度加注区的  $L_{SOH}$  向合理充耗区过渡的速度, 并对其向非合理区间波动的趋势进行减缓及抑制, 有效缩小了  $L_{SOH}$  的波动范围, 使 HESS 基本工作在合理充耗区及附近区域, 延长了 HESS 作为混合储能系统主动力源的寿命并提升其安全性。

3) 考虑到 HESS 中的电解槽与燃料电池为电流控制型装置, 使用 IM 求解法完成功率-电流转换, 可有效提升参数转换精度与装置响应速度, 有利于直流微网的进一步装置级控制。

## 参考文献

- [1] QIU Yibin, LI Qi, AI Yuxuan, et al. Two-stage distributionally robust optimization-based coordinated scheduling of integrated energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 542-555.
- [2] 袁铁江, 张昱, 栗磊, 等. 计及功率密度约束含氢储能的预装式多元储能电站容量优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 496-506.  
YUAN Tiejia, ZHANG Yu, LI Lei, et al. Optimized capacity allocation of pre-assembled multi-storage power plants accounting for power density constraints containing hydrogen energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 496-506.
- [3] HOSSAM S, GABER M, ABUALKASIM B, et al. Adaptive coordination control strategy of renewable energy sources, hydrogen production unit, and fuel cell for frequency regulation of a hybrid distributed power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 472-489.
- [4] 李建林, 梁策, 张则栋, 等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 104-116.  
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models under new power systems[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 104-116.
- [5] 李星仪, 沈小军, 金钰. 基于氢储能的偏远地区零碳微电网构建及运行策略研究[J]. 可再生能源, 2024,

- 42(2): 223-232.  
LI Xingyi, SHEN Xiaojun, JIN Yu. Research on construction and operation strategy of zero-carbon micro-energy network based on hydrogen storage in remote areas[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(2): 223-232.
- [6] 王宇轩, 江路毅, 范雪飞. 基于氢储能的直流微电网系统功率分配策略研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(11): 105-114.  
WANG Yuxuan, JIANG Luyi, FAN Xuefei, et al. Study on power allocation strategy of DC microgrid system based on hydrogen energy storage[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(11): 105-114.
- [7] WEN Ting, ZHANG Zheyuan, LIN Xiangning, et al. Research on modeling and the operation strategy of a hydrogen-battery hybrid energy storage system for flexible wind farm grid-connection[J]. *IEEE Access*, 2020, 879347-79356.
- [8] 张学, 裴玮, 梅春晓, 等. 含电/氢复合储能系统的孤岛直流微电网模糊功率分配策略与协调控制方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(3): 958-968.  
ZHANG Xue, PEI Wei, MEI Chunxiao, et al. Fuzzy power allocation strategy and coordination control method for islanded DC microgrid with electric/hydrogen composite energy storage system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(3): 958-968.
- [9] 王振, 苏焯, 张江丰, 等. 基于氢储能的光伏发电系统[J]. *电源技术*, 2021, 45(10): 1333-1336.  
WANG Zhen, SU Ye, ZHANG Jiangfeng, et al. Hydrogen energy storage based photovoltaic power generation system[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(10): 1333-1336.
- [10] 蔡国伟, 孔令国, 彭龙, 等. 基于氢储能的主动型光伏发电系统建模与控制[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(10): 2451-2459.  
CAI Guowei, KONG Lingguo, PENG Long, et al. Modeling and control of active photovoltaic power generation system based on hydrogen energy storage[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2016, 37(10): 2451-2459.
- [11] YAMASHITA D Y, VECHIU I, GAUBERT J P, et al. Autonomous observer of hydrogen storage to enhance a model predictive control structure for building microgrids[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 53.
- [12] 张纯江, 暴云飞, 孟宪慧, 等. 直流微网储能 DC/DC 变换器的自适应虚拟直流电机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 12-20.  
ZHANG Chunjiang, BAO Yunfei, MENG Xianhui, et al. Adaptive virtual DC machine control for a DC microgrid energy storage DC/DC converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 12-20.
- [13] 陈梦萍, 任建兴, 李芳芹. 风光互补与电解水制氢系统负荷的协调稳定运行[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(3): 344-350.  
CHEN Mengping, REN Jianxing, LI Fangqin. Coordinated and stable operation of wind-solar complementary and electrolytic water to hydrogen system loads[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(3): 344-350.
- [14] 李建林, 赵文鼎, 梁忠豪, 等. 光储一体化耦合制氢系统控制策略及仿真分析[J]. *热力发电*, 2022, 51(11): 148-155.  
LI Jianlin, ZHAO Wending, LIANG Zhonghao, et al. Control strategy and simulation analysis of coupled optical storage systems for hydrogen production[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(11): 148-155.
- [15] 郭向伟, 邢程, 司阳, 等. RLS 锂电池全工况自适应等效电路模型[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(16): 4029-4037.  
GUO Xiangwei, XING Cheng, SI Yang, et al. RLS adaptive equivalent circuit model of lithium battery under full working condition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(16): 4029-4037.
- [16] 胡言庆, 杨斌, 王宇作, 等. 不同工况下功率型锂离子电池的热特性与仿真研究[J]. *电工电能新技术*, 2023, 42(1): 21-28.  
HU Yanqing, YANG Bin, WANG Yuzuo, et al. Thermal characterization and simulation of power lithium-ion batteries under different operating conditions[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2023, 42(1): 21-28.
- [17] 李建林, 张则栋, 李光辉, 等. 基于模型层级分析的质子交换膜电解槽建模研究进展[J]. *高电压技术*, 2023, 49(3): 1105-1117.  
LI Jianlin, ZHANG Zedong, LI Guanghui, et al. Research on modeling of proton exchange membrane electrolyzer based on model hierarchical analysis[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3): 1105-1117.
- [18] 施正荣, 翁楚, 蔡靖雍, 等. 基于 PV/T 的质子交换膜电解制氢系统动态性能研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(8): 164-170.  
SHI Zhengrong, WENG Chu, CAI Jingyong, et al. Dynamic performance study of PV/T-based proton exchange membrane electrolysis system for hydrogen production[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(8): 164-170.
- [19] LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. Modeling and

- simulation of hydrogen energy storage system for power-to-gas and gas-to-power systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2023, 11(3): 885-895.
- [20] MD R, VIDAR A, JOHANNES J. Design considerations for industrial water electrolyzer plants[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46: 37120-37136.
- [21] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 165-172.  
XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 165-172.
- [22] 蔡国伟, 彭龙, 孔令国, 等. 光氢混合发电系统功率协调控制[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(1): 109-116.  
CAI Guowei, PENG Long, KONG Lingguo, et al. Power coordinated control of hybrid photovoltaic-hydrogen power generation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(1): 109-116.
- [23] HAN Ying, CHEN Weirong, LI Qi. Energy management strategy based on multiple operating states for a photovoltaic/fuel cell/energy storage DC micro-grid[J]. *Energies*, 2017, 136(10): 1-15.
- [24] LI Xingshuo, WEN Huiqing, HU Yihua, et al. A comparative study on photovoltaic MPPT algorithms under EN50530 dynamic test procedure[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(4): 4153-4168.
- [25] JIN Benchang, ZHANG Liyan, CHEN Qihong, et al. Energy management strategy of fuzzy logic control for fuel cell truck[J]. *Energy Reports*, 2023, 9(S1): 247-255.
- [26] 陈维荣, 于瑾, 李奇, 等. 电-氢多能互补型微电网的VSG平衡电流控制方法[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(6): 1323-1331.  
CHEN Weirong, YU Jin, LI Qi, et al. VSG balancing current control method for electricity-hydrogen multi-energy complementary microgrids[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(6): 1323-1331.
- [27] 岳大为, 赵文体, 袁行行, 等. 计及电-氢混合储能的孤岛直流微电网可靠性评估[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 27-35.  
YUE Dawei, ZHAO Wenti, YUAN Hanghang, et al. Reliability assessment of islanded DC microgrids taking into account hybrid electric-hydrogen energy storage[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 27-35.
- [28] 闫立, 孙俊, 王星. 基于小波包-模糊控制的燃料电池混合动力船舶能量控制策略[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(19): 130-136.  
YAN Li, SUN Jun, WANG Xing. Energy control strategy for fuel cell hybrid ships based on wavelet packet-fuzzy control[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(19): 130-136.
- [29] 陈鸿琳. 一种考虑储能荷电状态的综合下垂控制策略[J]. *机电工程技术*, 2019, 48(11): 112-114.  
CHEN Honglin. An integrated sag control strategy considering energy storage charge states[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(11): 112-114.
- [30] 陈勃旭, 崔炜, 陈宇, 等. 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 111-120.  
CHEN Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, et al. Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 111-120.

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-05-24

作者简介:

李建林(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为大规模储能技术、氢储能技术; E-mail: dkyjl@163.com

梁策(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为氢储能技术。E-mail: lc1051574441@163.com

(编辑 许威)