

# 基于模糊二阶高通滤波的光伏混合储能直流微网的功率分配控制

周 珊<sup>1</sup>, 张伟杰<sup>2\*</sup>, 许丹宁<sup>1</sup>, 吴怡轩<sup>2</sup>, 屠淑敏<sup>1</sup>, 张有兵<sup>2</sup>

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310011;

2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

## Power Allocation Control of Photovoltaic Hybrid Energy Storage DC Microgrid Based on Fuzzy Second-Order High-Pass Filtering

ZHOU Shan<sup>1</sup>, ZHANG Weijie<sup>2\*</sup>, XU Danning<sup>1</sup>, WU Yixuan<sup>2</sup>, TU Shumin<sup>1</sup>, ZHANG Youbing<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design & Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310011, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** [Objective] The output of renewable energy is characterized by randomness and volatility, which can negatively impact the stable operation of power grids when directly integrated. To improve the grid connection characteristics of renewable energy generation systems, a hybrid energy storage system (HESS) has been introduced. To fully utilize the energy density and power density advantages of the HESS in DC microgrids, this paper proposes a fuzzy logic-based second-order high-pass filter control strategy with variable time constants. [Methods] Firstly, a photovoltaic hybrid energy storage DC microgrid model was constructed. Secondly, the power allocation strategy for the microgrid was designed based on power balance relationships, along with corresponding control strategies for each unit. The photovoltaic generation unit used fuzzy control to rapidly track the maximum power point, improving the energy utilization efficiency of the photovoltaic system. The grid-connected inverter adopted a double closed-loop control method, with an outer voltage loop and an inner current loop, to ensure stable power delivery to the distribution grid. A fuzzy logic-based second-order high-pass filter with variable time constants was designed to allocate power by frequency within the HESS, thereby improving the accuracy of unbalanced power distribution in the DC microgrid. Finally, a photovoltaic hybrid storage DC microgrid simulation model was built based on Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed control

strategy. [Results] The simulations analyzed the HESS power, DC bus voltage, and state of charge of the supercapacitor. The results showed that the fuzzy variable time constant second-order high-pass filtering control not only facilitated the frequency-based allocation of unbalanced power in HESS, but also alleviated issues such as over-charging and over-discharging of the supercapacitor during long-term operation, thereby ensuring its stable performance and extending its lifespan. Moreover, the proposed method significantly reduced the total harmonic distortion of the grid-connected current. [Conclusion] The proposed control strategy improves the operational reliability and stability of the photovoltaic hybrid energy storage DC microgrid, providing a robust guarantee for the high quality operation of the grid.

**Key words:** DC microgrid; hybrid energy storage; state of charge; filtering control; fuzzy logic

**摘要:** [目的] 可再生能源出力具有随机性和波动性, 直接并入电网会对其稳定运行产生影响。为了改善可再生能源发电系统的并网特性, 引入了混合储能系统 (HESS)。为了充分发挥直流微网中 HESS 的能量密度和功率密度优势, 本文提出了一种基于模糊逻辑的变时间常数二阶高通滤波控制策略。【方法】首先, 构建了光伏混合储能直流微网模型。然后, 根据功率平衡关系设计了微网的功率分配策略, 并根据各单元的特性设计了对应的控制策略。光伏发电单元采用模糊控制以实现最大功率点的快速跟踪, 提高光伏发电单元的能源利用率。并网逆变器采用电压外环、电流内环的双闭环控制方式, 以保证直流微网向配电网输送稳定的电力。设计了基于模糊逻辑的变时间常数二阶高通滤波方法, 对 HESS 的功

基金项目: 国家自然科学基金 (U22B20116)

National Natural Science Foundation of China (U22B20116)

率进行分频分配,以提高直流微网中不平衡功率的分配精度。最后,基于 Matlab/Simulink 搭建了光伏混合储能直流微网仿真模型来验证所提控制策略的有效性。【结果】从 HESS 功率、直流母线电压以及超级电容荷电状态等方面对所提模糊变时间常数二阶高通滤波控制策略进行了仿真分析。仿真结果表明,模糊变时间常数二阶高通滤波控制不仅能够实现直流微网不平衡功率在 HESS 中的分频分配,改善系统长时间运行导致的超级电容过充过放的状态,保障超级电容的性能稳定,延长其使用寿命,还能显著降低并网电流的总谐波失真。【结论】本文所提控制策略提高了光伏混合储能直流微网的运行可靠性和稳定性,为电网的高质量运行提供了有力保障。

**关键词:** 直流微网; 混合储能; 荷电状态; 滤波控制; 模糊逻辑

## 0 引言

在双碳目标的驱动下,新能源已逐步成为我国电力系统的常用电源,但新能源发电受一次能源供给影响,难以满足电网调峰、调频需求<sup>[1]</sup>。目前,我国新能源发电中弃风弃光现象严重,为了提高风力发电和光伏发电的并网利用效率,利用储能技术平抑新能源出力波动是主要解决手段<sup>[2]</sup>。现阶段,储能装置主要分为能量型储能装置和功率型储能装置两大类<sup>[3]</sup>。常用的储能装置包括锂离子电池、铅酸蓄电池和超级电容等<sup>[4]</sup>。蓄电池的能量密度较高,但功率密度较小;超级电容的功率密度较高,但能量密度较小。结合蓄电池和超级电容的优势,可提高储能系统的功率响应速度<sup>[5]</sup>。混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)可以存储直流微网的多余电量,在可再生能源出力不足时,为用电负荷提供电能支撑,且响应迅速,与新能源形成互补,被广泛应用于平抑微电网功率波动<sup>[6-8]</sup>。

HESS 的功率分配控制策略是实现两类储能介质优势互补的关键<sup>[9-10]</sup>。现有的混合储能功率分配方法包含基于滤波器的分配和基于智能算法的分配。文献[11]在滤波器分配过程中引入转移电流来校正超级电容的荷电值,使其荷电状态(State of Charge, SOC)保持在 40%~60%,从而提高超级电容的剩余可用容量,维持系统稳定运行。文献[12]对一阶低通滤波器进行改进,根据混合储能 SOC 实时改变一阶低通滤波器的时间常数,

在保证混合储能 SOC 在合理范围的条件下实现了功率的合理分配。在传统低通滤波器进行初次功率分配的基础上,文献[13]根据超级电容 SOC 划分了正常、临界和极限三种工作状态,以此为依据进行功率的二次分配。文献[14]根据超级电容和蓄电池 SOC 划分了 9 个工作区域,根据不同工作区域给出了对应的二次功率分配值。上述分配方法只是将微电网的冗余功率分解成固定的高低频分量,然后由 HESS 中的超级电容和蓄电池分别响应,未能考虑到各自储能装置的容量特性,因此功率分配精度不高。

智能算法分配是采用智能控制算法提升 HESS 功率分配精度的方法,可使蓄电池和超级电容更好地依据自身元件特性进行功率响应。文献[15]提出了一种自适应时间常数的分频控制策略,分析储能 SOC 与虚拟惯性的关系,并考虑储能充放电极限问题,兼顾 SOC、电压变化率以及电压幅值,提高系统惯性。文献[16]提出一种应用于 HESS 的功率模型预测控制方法,实现了输出功率的灵活分配。文献[17]在双闭环控制的基础上加入了动态功率优化控制,考虑了 HESS 最佳工作区间,实时求解 HESS 的功率分配比。文献[18]设计了基于交错并联式双向 DC/DC 变换器的 HESS 功率分配策略,通过动态方法调节蓄电池和超级电容间的功率分配比,并根据负载能量估计超级电容和蓄电池的电流参考值。文献[19]设计了六种运行模式,提出一种基于超级电容 SOC 的动态功率修正策略,使超级电容出力后 SOC 向安全状态恢复,同时为避免蓄电池频繁切换充放电状态,在其响应环节加入了延时控制。文献[20]基于小波分解法将信号分解为低频段和高频段,提出了一种基于频率的电源管理策略,以抑制电流的波动,延长储能系统的使用寿命。上述分配方法在一定程度上提升了微电网冗余功率的高低频分配精度,但未考虑到系统长时间运行下超级电容的过充过放,降低了微电网的经济性。

综上所述,针对传统滤波分配算法中时间常数固定导致的 HESS 功率分配效果较差的问题,以及系统长时间运行导致的超级电容过充过放的问题,本文提出了一种基于模糊逻辑的二阶高通滤波算法,并将该算法应用于 HESS 的运行控制

中。通过建立超级电容 SOC 和滤波时间常数间的模糊逻辑关系,设计模糊控制器来自适应调节高通滤波器 (High-Pass Filter, HPF) 的滤波时间常数,使超级电容 SOC 值维持在合理区间内,进而实现直流微网的安全稳定运行。

## 1 微网架构与能量管理

### 1.1 微网架构

光伏混合储能直流微网拓扑结构如图 1 所示。其中,光伏阵列是直流微网的主要供能单元,通过单向 DC/DC 变换器连接至直流母线;HESS 由蓄电池和超级电容组成,蓄电池和超级电容均通过双向 DC/DC 变换器连接至直流母线,主要用于吸收或释放冗余功率进而保证微网的稳定运行;阻性负载直接连接至直流母线处消耗电能。此外,直流微网通过 DC/AC 逆变器向配电网输送稳定电能。

图 1 中,滤波电感  $L_{pv}$ 、开关管  $S_5$  和二极管  $D_5$  构成光伏发电单元的单向 DC/DC 变换器;滤波电感  $L_b$ 、滤波电容  $C_b$ 、开关管  $S_3$  和  $S_4$  以及二极管  $D_3$  和  $D_4$  构成蓄电池单元的双向 DC/DC 变换器;滤波电感  $L_{sc}$ 、滤波电容  $C_{sc}$ 、开关管  $S_1$  和  $S_2$  以及二极管  $D_1$  和  $D_2$  构成超级电容单元的双向 DC/DC 变换器; $C_{dc}$  为直流母线侧稳压电容; $T_1 \sim T_6$  构成并网逆变器 (Grid Connected Converter, GCC);  $L_1$ 、 $L_2$  和  $C_f$  构成 LCL 滤波电路。

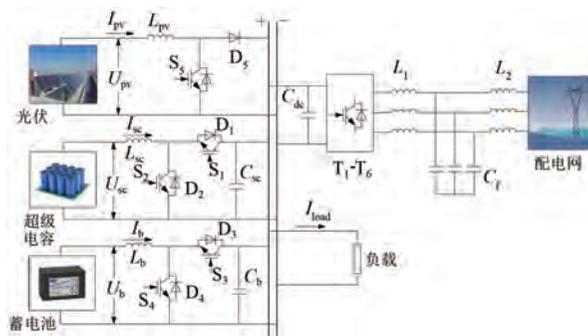


图 1 光伏混合储能直流微网拓扑结构

Fig. 1 Photovoltaic hybrid energy storage DC microgrid topology

光伏阵列由多组光伏电池串并联组成,光伏电池的输出电流为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s - I_{sh} \quad (1)$$

式中: $I_{pv}$  为光伏电池的输出电流; $I_{ph}$  为光生电流;

$I_s$  为流过并联二极管的电流; $I_{sh}$  为流过并联旁漏电阻的电流, $I_s$  和  $I_{sh}$  的表达式为

$$I_s = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv} + R_s I_{pv})}{AkT_{abs}} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

式中: $R_{sh}$  和  $R_s$  分别为光伏电池并联旁漏电阻和串联内阻; $U_{pv}$  为光伏电池的输出电压; $I_0$  为二极管的反向饱和电流; $q$  为电子电荷常量; $A$  为二极管因子, $A \in [1, 5]$ ;  $k$  为玻尔兹曼常数; $T_{abs}$  为绝对温度。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv} + R_s I_{pv})}{AkT_{abs}} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

可得光伏电池的输出电压为

$$U_{pv} = \frac{AkT_{abs}}{q} \ln \left( \frac{I_{sh}}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

蓄电池通用等效模型主要由一个受控电压源与一个电阻串联组成,其数学表达式为

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + U \exp(-B \int idt) \quad (6)$$

式中: $E$  为蓄电池的输出电压; $E_0$  为蓄电池的内电势; $K$  为蓄电池的极化电压; $Q$  为蓄电池的额定容量; $U$  为指数区的电压暂降; $B$  为指数区容量的倒数; $i$  为蓄电池的端电流。

超级电容属于双电层电容器,常见的电气特性等效模型有一阶 RC 模型、三支路模型和二阶非线性 RC 模型等。目前在实际工程和仿真试验中主要采用经典 RC 串联等效模型,其数学表达式为

$$V_{sc} = R_{sceq} I_{sc} + \frac{1}{C_{sceq}} \int I_{sc} dt \quad (7)$$

式中: $V_{sc}$  为超级电容的输出电压; $R_{sceq}$  为超级电容的等效电阻; $C_{sceq}$  为超级电容的等效电容; $I_{sc}$  为超级电容的输出电流。

### 1.2 微网的能量管理

光伏发电单元通过 DC/DC 变换器向直流微网输送电能,然而光伏输出功率受到光照强度与温度变化的影响,导致光伏输出功率具有一定的随机性和波动性。因此需在直流微网中配置一定

容量的储能设备提供能量支撑,在直流微网冗余功率不足时进行放电,在直流微网冗余功率过剩时进行充电。同时,为了保证储能设备能快速响应暂态变化与稳定稳态过程,采用由蓄电池和超级电容组成的 HESS 作为直流微网的储能单元。直流微网通过 DC/AC 逆变器连接至配电网,配电网为交流侧的电压和频率提供支撑,当光伏发电单元的输出功率大于阻性负载的功率,且储能单元达到容量限制而不能吸收冗余功率时,多余能量则通过 GCC 汇入配电网。

根据图 1 可以得到直流微网的功率平衡关系为

$$P_{\text{load}} = P_{\text{pv}} + P_{\text{HESS}} \quad (8)$$

$$P_{\text{HESS}} = P_{\text{b}} + P_{\text{sc}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{load}}$  为负载功率; $P_{\text{pv}}$  为光伏发电单元的输出功率; $P_{\text{HESS}}$  为 HESS 响应的功率,吸收电能时为负值,释放电能时为正值; $P_{\text{b}}$  为蓄电池的输出功率; $P_{\text{sc}}$  为超级电容器的输出功率。

## 2 微网的综合运行控制策略

### 2.1 光伏发电单元的控制

光伏发电单元采用最大功率点跟踪 (Max Power Point Track, MPPT) 控制,主要通过测量光伏阵列的输出电压和输出电流,通过对所连接的 DC/DC 变换器的控制,使光伏阵列在当前环境下达到并保持最大功率输出。现有的光伏 MPPT 控制方法有很多,主要包括:扰动观察法、电导增量法和模糊控制法等。模糊控制作为一种智能控制方法,具有较强的抗干扰性和鲁棒性,适用于光伏发电等很难用精确的数学模型来描述的系统。因此本文采用模糊控制法,动态调整步长实现光伏最大功率点的快速跟踪。

光伏发电单元的控制策略如图 2 所示。其中, $dV$  为电压变化量; $dP$  为功率变化量; $dD$  为占空比调整量。 $dV$  和  $dP$  的表达式如式 (10) 和式 (11) 所示。将  $dV$ 、 $dP$  输入模糊控制器,根据模糊规则得到输出变量,即  $dD$ ,并送入到脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号发生器,最终输出相应的脉冲对单向 DC/DC 变换器进行控制。

$$dV = V(k) - V(k-1) \quad (10)$$

$$dP = P(k) - P(k-1) \quad (11)$$

根据如图 3 所示的光伏阵列的电压-功率曲

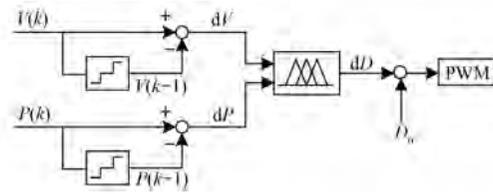


图 2 光伏单元控制框图

Fig. 2 Photovoltaic unit control block diagram

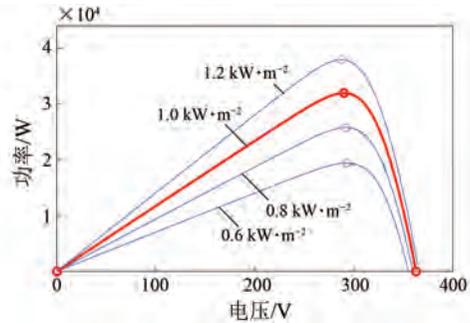


图 3 电压-功率曲线

Fig. 3 Voltage-power curves

线设计了对应的模糊 MPPT 算法。

定义输入变量、输出变量的模糊语言变量分别为

$$\begin{cases} dV = \{NB, NS, ZE, PS, PB\} \\ dP = \{NB, NS, ZE, PS, PB\} \\ dD = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \end{cases}$$

式中:NB、NM、NS、ZE、PS、PM 和 PB 分别为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大;输入、输出变量采用均匀分布的三角隶属函数,对应的论域范围分别为  $dV \in [-1, +1]$ 、 $dP \in [-1, +1]$  和  $dD \in [-0.5, +0.5]$ 。

根据光伏阵列的电压-功率曲线,可以得到相应的模糊先验知识:当  $dV < 0$ 、 $dP < 0$  时,工作点位于最大功率点左侧,应该增大电压,因此  $dD > 0$ ;当  $dV < 0$ 、 $dP > 0$  时,工作点位于最大功率点右侧,应该减小电压,因此  $dD < 0$ ;当  $dV > 0$ 、 $dP < 0$  时,工作点位于最大功率点右侧,应该减小电压,因此  $dD < 0$ ;当  $dV > 0$ 、 $dP > 0$  时,工作点位于最大功率点左侧,应该增大电压,因此  $dD > 0$ 。 $dD$  的数值大小遵循以下规则:在靠近最大功率点时步长较小,在远离最大功率点时步长较大。

通过定义的输入、输出变量的模糊语言集,共形成 25 条规则,由此确定的光伏模糊 MPPT 控制的模糊规则,如表 1 所示。对应的模糊曲面如图 4 所示。

表 1 模糊控制光伏 MPPT 规则表

Tab. 1 Fuzzy control MPPT rules for photovoltaic systems

dV	dP				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PM	NS	NM	NB
NS	PB	PS	ZE	NS	NB
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NB	NS	ZE	PS	PB
PB	NB	NM	PS	PM	PB

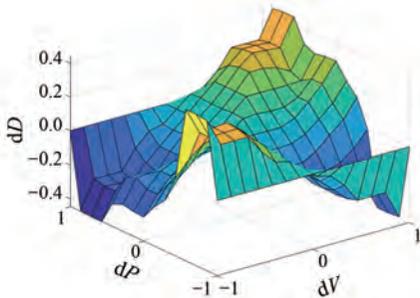


图 4 模糊曲面图

Fig. 4 Fuzzy surface diagram

## 2.2 并网逆变器的控制

GCC 的作用是将直流电转换为交流电,以便送入交流配电网中。GCC 采用基于  $d$  轴电网电压定向矢量控制方法,主要有以下控制目标:1)通过对输出电流有功分量的控制来保证直流母线电压的稳定;2)实现输出有功、无功的解耦控制,使微网的有功功率平稳地传输至配电网,能在必要时提供一定的无功支持。GCC 控制框图如图 5 所示。

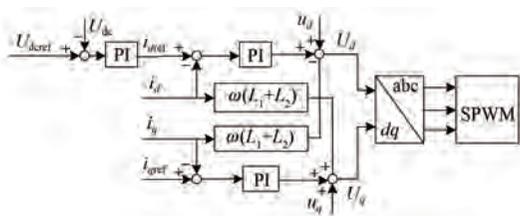


图 5 GCC 控制框图

Fig. 5 GCC control block diagram

图 5 中,  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  和  $i_d$ 、 $i_q$  分别为网侧电流  $d$ 、 $q$  轴分量的参考值和实际值;  $u_d$ 、 $u_q$  分别为电网电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\omega$  为电网角频率;  $L_1+L_2$  为网侧滤波电感;  $U_d$ 、 $U_q$  分别为 GCC 控制电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $U_{dref}$ 、 $U_{dc}$  分别为直流母线电压的参考值、实际值。

对 GCC 的控制采用电压外环、电流内环的双

闭环控制方式。通过对直流侧电压的控制可保证直流母线电压的恒定,同时使 GCC 稳定地向配电网传输电能。具体而言,将直流侧电压参考值与实际值作差后经比例积分(Proportional Integral, PI)调节得到  $i_{dref}$ ,同时根据无功需求将  $i_{qref}$  设定为 0,以便实现单位功率因数并网。再将得到的参考值  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  与实际值  $i_d$ 、 $i_q$  作差后经 PI 调节,并引入前馈补偿得到  $U_d$ 、 $U_q$ 。最终经  $dq/abc$  变换得到调制信号驱动 PWM 产生触发脉冲,进而控制 GCC 的通断。

## 2.3 混合储能系统的控制

基于 HPF 的 HESS 传统控制框图如图 6 所示。将  $U_{dref}$  与  $U_{dc}$  作差后经 PI 调节得到当前的直流母线电流参考值  $i_{dref}$ 。再将  $i_{dref}$  通过 HPF 得到高频分量  $i_{HF}$ ,  $i_{dref}$  与  $i_{HF}$  的差值为低频分量  $i_{LF}$ 。  $i_{HF}$ 、 $i_{LF}$  即为超级电容、蓄电池的电流参考值  $i_{scref}$ 、 $i_{bref}$ ,两者与对应的电流实际值  $i_{sc}$ 、 $i_b$  作差后经 PI 调节得到各自的占空比  $D_{sc}$ 、 $D_b$ 。最终输入 PWM 发生器产生调制脉冲,进而对蓄电池和超级电容单元的双向 DC/DC 变换器进行控制。

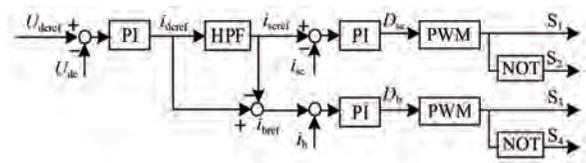


图 6 HESS 传统控制框图

Fig. 6 Traditional HESS control block diagram

基于 HPF 的 HESS 控制方法虽然可以实现不平衡功率的分频分配,却未能考虑储能元件的 SOC,极易造成储能元件的过充过放,进而危及直流微网的安全运行。由于蓄电池属于能量型储能,可长时间进行充放电,其 SOC 在短时间内的变化不明显;而超级电容的容量较小,其 SOC 在短时间内变化较为明显。因此,对超级电容 SOC 的控制显得尤为重要。本文采用模糊二阶滤波算法对 HESS 进行控制,在实现 HESS 分频分配效果的同时,可保证超级电容 SOC 在合理范围内。

HESS 模糊控制框图如图 7 所示。该控制方法在二阶高通滤波算法的基础上加入了模糊控制器,根据超级电容 SOC 的变化自适应调整滤波时间常数,达到依据超级电容剩余容量自动承担不平衡功率占比的目的,即 SOC 较高时承担功率较多, SOC 较低时承担功率较少。



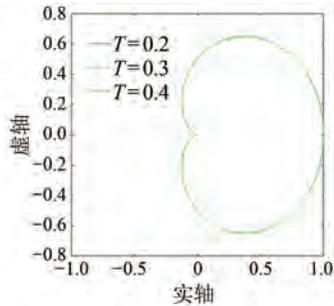


图 9 二阶 HPF 的 Nyquist 曲线

Fig. 9 Nyquist curve of second-order HPF

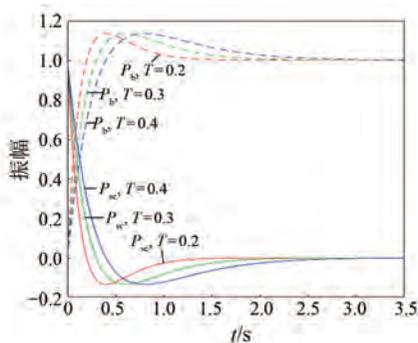


图 10 蓄电池和超级电容功率的阶跃响应

Fig. 10 Step response of battery and supercapacitor power

辑的二阶高通滤波时间常数的混合储能功率分配方法。将超级电容 SOC 作为控制指标,自适应调整滤波时间常数。

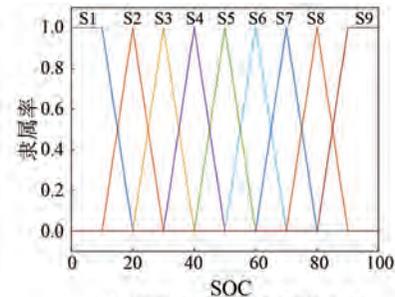
设计模糊控制器的输入变量为超级电容 SOC,其取值范围为 $[0, 100]$ ;模糊控制器的输出变量为滤波时间常数  $T_c$ ,其取值范围为 $[0.2, 0.4]$ 。定义输入变量、输出变量的模糊语言变量分别为

$$\text{SOC} = \{S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9\} \quad (17)$$

$$T_c = \{T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9\} \quad (18)$$

式中:S1~S9 表示超级电容 SOC 由小到大;T1~T9 表示  $T_c$  由小到大。

模糊子集隶属函数的选用没有固定的规则和模式,考虑到运算方便、性能熟悉等因素,通常选用三角形、梯形和高斯型几种隶属函数<sup>[23]</sup>。由于三角隶属函数简单直观、易于理解且计算效率高,因此模糊控制器的输入、输出变量的隶属函数选用均匀分布的三角形隶属函数,对应的隶属函数分布如图 11 所示。



(a) 超级电容 SOC 隶属度函数

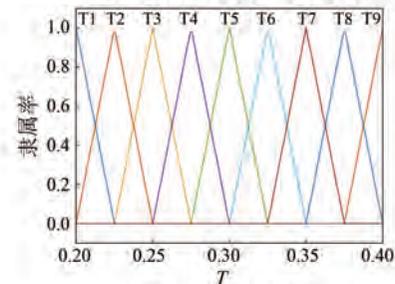
(b)  $T_c$  隶属度函数

图 11 模糊控制器隶属度函数

Fig. 11 Fuzzy controller membership functions

由对超级电容输出功率的分析可知: $T_c$  越大,超级电容可平抑的功率频率越低,平抑的功率也越多; $T_c$  越小,超级电容可平抑的功率频率越高,平抑的功率也越少。SOC 较高时,超级电容承担功率较多;SOC 较低时,超级电容承担功率较少。由此得到模糊控制的模糊规则如表 2 所示,对应的超级电容 SOC 和  $T_c$  之间的关系曲线如图 12 所示。由图 12 可知,放电时  $T_c$  随着超级电容 SOC 的增加而增加,总体呈正比关系;充电时  $T_c$  随着 SOC 的减小而减小,总体呈反比关系。

表 2 模糊控制二阶滤波规则表

Tab. 2 Fuzzy control second-order filtering rules

超级电容 SOC	放电时 $T_c$	充电时 $T_c$
S1	T1	T9
S2	T2	T8
S3	T3	T7
S4	T4	T6
S5	T5	T5
S6	T6	T4
S7	T7	T3
S8	T8	T2
S9	T9	T1

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真参数

为验证本文提出的基于模糊逻辑的变时间常

数二阶高通滤波控制的有效性,在 Matlab/Simulink 上搭建了如图 1 所示的直流微网仿真模型,系统参数参考文献 [19, 24, 25] 来设计,具体如表 3 所示。

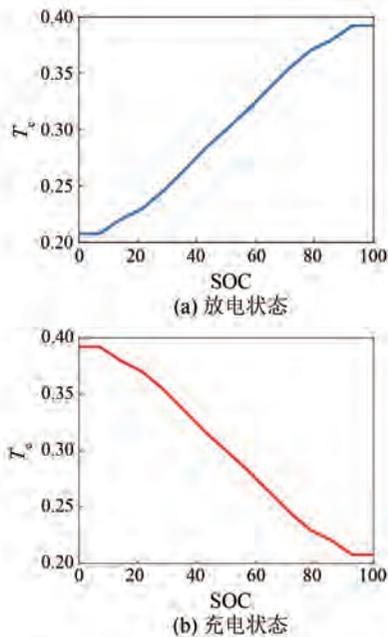


图 12 超级电容 SOC 和滤波时间常数的关系曲线  
Fig. 12 Relationship curves between supercapacitor SOC and filtering time constant

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

参数名称	参数值
超级电容容量/F	80
超级电容额定电压/V	600
蓄电池容量/Ah	200
蓄电池额定电压/V	360
直流电压 $U_{dc}$ /V	700
交流电压 $U_g$ /V	380
交流滤波电感/mH	2
负载/kW	5
直流滤波电容 $C_{dc}$ / $\mu$ F	500
超级电容滤波电容 $C_{sc}$ / $\mu$ F	800
蓄电池滤波电容 $C_b$ / $\mu$ F	800
电压环系数	2、20
超级电容电流环系数	0.7、10

## 4.2 仿真结果

设置直流微网的运行工况:仿真时长为 4 s;初始光照强度为  $800 \text{ W/m}^2$ ,  $t=2 \text{ s}$  时光照强度增加至  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $t=3 \text{ s}$  时光照强度减少至  $600 \text{ W/m}^2$ ;初始负载为  $5000 \text{ W}$ ,  $t=1 \text{ s}$  时负载减少至  $2000 \text{ W}$ ,后面维持  $2000 \text{ W}$  不变。光伏输

出功率随光照强度的变化而变化,光照越强,光伏输出功率越大。光伏和负载功率如图 13 所示。

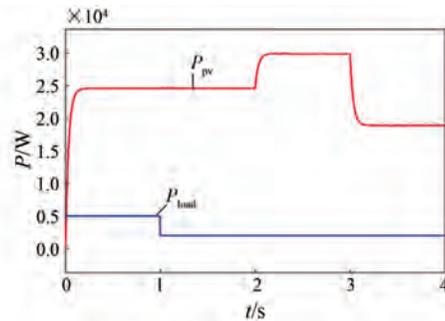


图 13 光伏与负载功率

Fig. 13 Photovoltaic and load power

对基于定时间常数二阶高通滤波控制和基于模糊变时间常数二阶高通滤波控制的直流微网运行状态进行仿真,主要从 HESS 功率、直流母线电压以及超级电容 SOC 等方面进行对比分析,仿真结果如图 14 所示。其中,下标 1 代表定时间常数;下标 2 代表模糊变时间常数。

由图 14(a)和图 14(b)可知, $t$  在  $1 \text{ s}$ 、 $2 \text{ s}$  时 HESS 放电释放功率, $3 \text{ s}$  时充电吸收功率,其中超级电容响应高频功率,蓄电池响应低频功率。在光照强度和负载发生变化时,两种控制方法均能对系统不平衡功率进行分频分配。相较于定时间常数二阶高通滤波算法,本文所提模糊变时间常数二阶高通滤波算法在光照强度和负载突变的情况下能够自适应调整滤波时间常数,使得二阶 HPF 对功率的分频分配效果更加显著。

由图 14(c)可知,在光照强度变化时,两种控制方法下的直流母线电压基本稳定在  $700 \text{ V}$ 。在定时间常数二阶高通滤波控制下, $0.028 \text{ s}$  时直流母线电压出现  $18.41\%$  的超调, $0.124 \text{ s}$  时稳定在  $700 \text{ V}$ ;  $1 \text{ s}$  负载突变时出现  $0.36\%$  的超调, $1.10 \text{ s}$  时恢复稳定; $2 \text{ s}$  光照强度变化时出现  $0.71\%$  的超调, $2.12 \text{ s}$  时恢复至  $700 \text{ V}$ ;  $3 \text{ s}$  光伏波动时出现  $1.42\%$  的超调, $3.15 \text{ s}$  时稳定在  $700 \text{ V}$ 。在变时间常数模糊二阶高通滤波控制下, $0.025 \text{ s}$  时直流母线电压出现  $17.23\%$  的超调, $0.118 \text{ s}$  时稳定至  $700 \text{ V}$ ;  $1 \text{ s}$  时出现  $0.22\%$  的超调, $1.05 \text{ s}$  时恢复稳定; $2 \text{ s}$  时出现  $0.43\%$  的超调, $2.07 \text{ s}$  时恢复至  $700 \text{ V}$ ;  $3 \text{ s}$  时出现  $-1.07\%$  的超调, $3.09 \text{ s}$  时稳定在  $700 \text{ V}$ 。仿真结果表明,本文所提控制方法比定时间常数二阶滤波控制的超调量小、抗干扰性

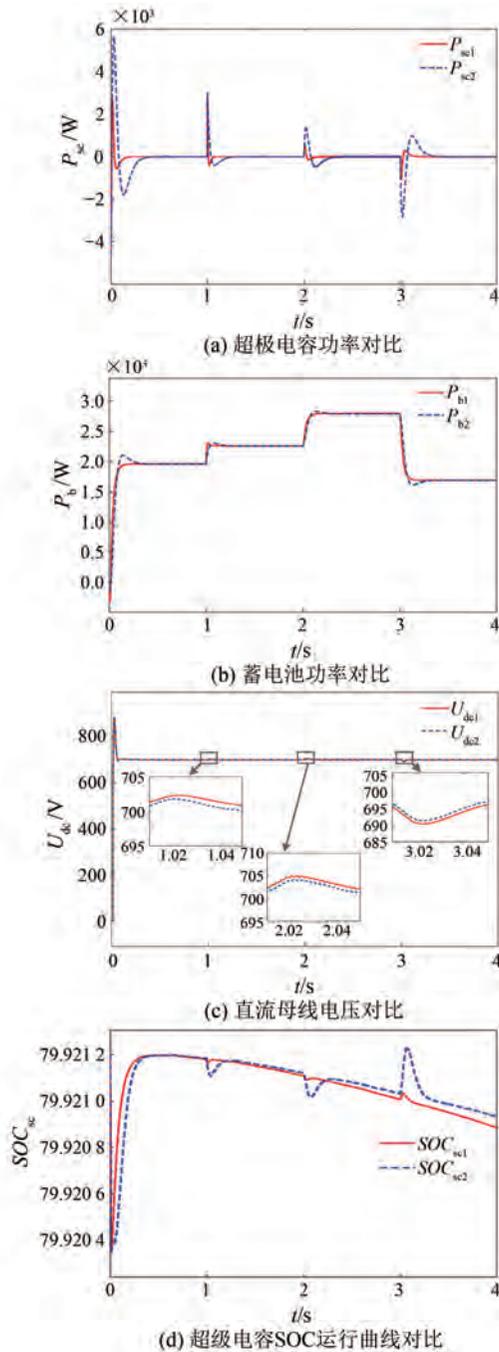


图 14 两种控制方法下的直流微网运行特性对比  
Fig. 14 Comparison of DC microgrid operating characteristics under two control methods

强并且响应速度快。

由图 14(d)可知,在模糊变时间常数二阶高通滤波控制下,超级电容响应高频功率的效果更好,且超级电容 SOC 的变化较小。为了进一步探究模糊变时间常数二阶高通滤波控制对超级电容 SOC 的影响,保持运行工况不变,只改变超级电容

的初始 SOC,设置初始 SOC 分别为 20 和 90,对两种控制方法下的仿真结果进行对比分析。超级电容的 SOC 变化曲线如图 15 所示。

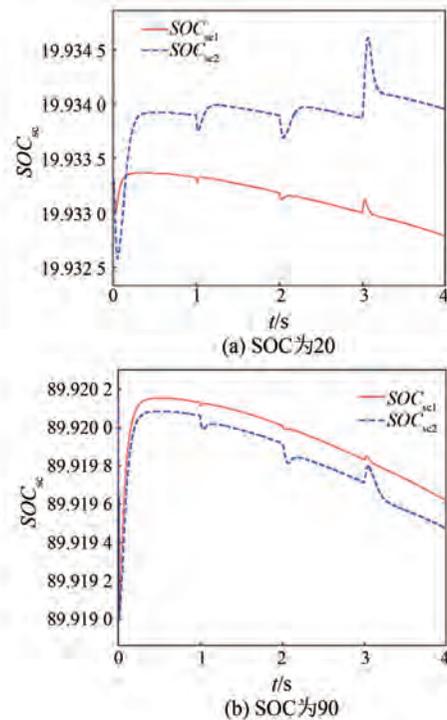


图 15 超级电容 SOC 运行曲线对比  
Fig. 15 Comparison of supercapacitor SOC operating curves

当超级电容的 SOC 为 20 时其处于过放状态,由图 15(a)可知,采用定时间常数二阶高通滤波算法时,超级电容响应高频功率的效果较差,并且长时间工作在过放状态;而采用模糊变时间常数二阶高通滤波算法时,模糊控制可以自适应调整滤波时间常数来控制超级电容所平抑的功率,保证超级电容工作在合理区间内,同时提升了超级电容响应高频功率的能力。当超级电容的 SOC 为 90 时其处于过充状态,由图 15(b)可知,与定时间常数二阶高通滤波相比,采用模糊变时间常数二阶高通滤波算法能在保证响应高频功率能力的同时,使超级电容 SOC 逐渐在合理区间内,防止其长时间工作于过充状态,有效延长了超级电容的使用寿命。

为了进一步从交流方面对比模糊二阶滤波的效果,分析了两种控制策略下的三相电流与电流总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD),如图 16 所示。由图 16(a)和图 16(c)可知,在  $t=1$  s 负荷

突变后,两种控制策略下,系统在并网状态均能够稳定运行。定时间常数二阶滤波控制的并网电流 THD 值为 4.10%,模糊变时间常数二阶滤波控制的并网电流 THD 值为 3.62%,两者都符合并网要求。相较于定时间常数二阶滤波控制,模糊变时间常数二阶滤波控制由于可以自适应调整滤波时间常数,更好地抑制了电流谐波,使得交流电流 THD 值更低,并网效果更好。

## 5 结语

为了保证光伏混合储能直流微网的稳定高效运行,根据能量平衡原理设计了微网的功率分配策略,同时根据各单元的特性设计了对应的控制策略以响应功率指令。为提高光伏发电单元的能源利用率,采用模糊控制实现最大功率点的快速跟踪。为保证 HESS 分频分配的效果,提出基于模糊逻辑的变时间常数二阶高通滤波控制策略。

仿真结果表明:基于本文所提方法,光伏发电系统的效率得到了提升,且通过自适应调整滤波时间常数使得超级电容 SOC 在合理范围内,有效延长了其使用寿命;在模糊变时间常数二阶高通滤波控制策略下,光伏混合储能微网可在并网模式下稳定运行且并网电流谐波失真有效减小。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

周珊进行了方案设计、初稿撰写,张伟杰进行了内容总结与论文修订,许丹宁进行了试验数据整理与分析,吴怡轩进行了试验仿真验证,屠淑敏、张有兵参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and first draft writing were carried out by Zhou Shan. The content summary and paper revision were carried out by Zhang Weijie. The experimental data organization and analysis was carried out by Xu Danning. The experimental simulation validation was conducted by Wu Yixuan. The manuscript was reviewed and revised by Tu

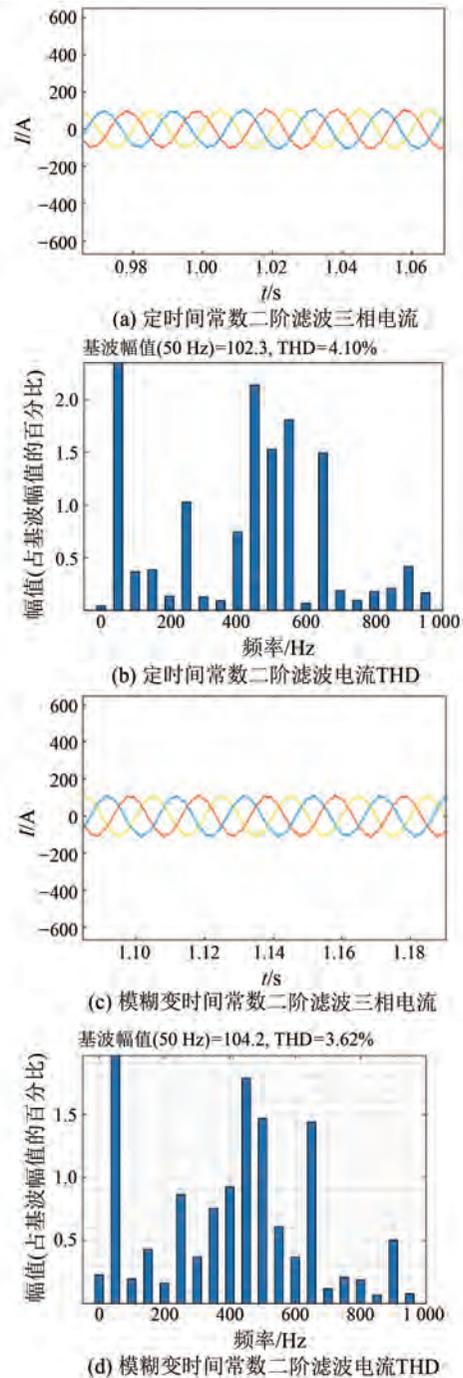


图 16 两种控制方法下的三相电流对比

Fig. 16 Comparison of three-phase currents under two control methods

Shumin, Zhang Youbing. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] 谢善益, 仲卫, 杨强, 等. 台风条件下含混合电氢储能的海上风电场并网运行智能控制方法[J].

- 电机与控制应用, 2024, 51(3): 49-59.
- XIE S Y, ZHONG W, YANG Q, et al. Intelligent control method for grid-connected operation of offshore wind farm with hybrid electric hydrogen storage under typhoon conditions [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(3): 49-59.
- [ 2 ] 吴志程, 朱俊杰, 许金, 等. 电磁发射用“锂电池-超级电容”混合储能技术研究综述[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(3): 1-6.
- WU Z C, ZHU J J, XU J, et al. Review of “lithium battery-supercapacitor” hybrid energy storage technology for electromagnetic launch [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(3): 1-6.
- [ 3 ] 龙海军. 大规模新能源并网中储能技术的应用[J]. *电工技术*, 2024, (4): 32-35.
- LONG H J. Application of energy storage technology in large-scale new energy grid integration [J]. *Electric Engineering*, 2024, (4): 32-35.
- [ 4 ] 张保明, 陈洁, 付菊霞, 等. 基于小波包混合储能系统的功率波动控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(3): 75-80+94.
- ZHANG B M, CHEN J, FU J X, et al. Control strategy of wind power fluctuation based on wavelet packet hybrid energy storage system [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(3): 75-80+94.
- [ 5 ] 丁权, 王鲁杨, 陈宇宁, 等. 基于 VSG 的直流侧混合储能自适应协调控制策略[J]. *电气传动*, 2021, 51(21): 29-34.
- DING Q, WANG L Y, CHEN Y N, et al. Coordinated control strategy of DC-side hybrid energy storage system based on VSG [J]. *Electric Drive*, 2021, 51(21): 29-34.
- [ 6 ] 董建政. 光伏混合储能微电网滤波优化控制[J]. *电工技术*, 2021, (22): 28-29.
- DONG J Z. Optimal control of photovoltaic-hybrid energy storage microgrid based on filtering [J]. *Electric Engineering*, 2021, (22): 28-29.
- [ 7 ] 王伟, 赵晔, 宋光明, 等. 基于模糊控制的混合储能功率优化分配研究[J]. *机电信息*, 2023, (23): 7-10.
- WANG W, ZHAO Y, SONG G M, et al. Research on optimal allocation of hybrid energy storage power based on fuzzy control [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2023, (23): 7-10.
- [ 8 ] 王丽群. 光伏-混合储能微电网多目标优化调度方法[J]. *自动化应用*, 2023, 64(24): 188-189+192.
- WANG L Q. Multi-target optimization scheduling method of photovoltaic-hybrid energy storage microgrid [J]. *Automation Application*, 2023, 64(24): 188-189+192.
- [ 9 ] WU T Z, YU W S, GUO L X. A study on use of hybrid energy storage system along with variable filter time constant to smooth DC power fluctuation in microgrid [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 175377-175385.
- [ 10 ] 郭东泽, 张继红, 王庆宇, 等. 平抑风电出力波动的混合储能功率分配策略[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(5): 1564-1573.
- GUO D Z, ZHANG J H, WANG Q Y, et al. Hybrid energy storage power allocation strategy for smoothing wind power output fluctuations [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(5): 1564-1573.
- [ 11 ] WU T Z, YU W S, WANG L J, et al. Power distribution strategy of microgrid hybrid energy storage system based on improved hierarchical control [J]. *Energies*, 2019, 12(18): 3498-3411.
- [ 12 ] 李占军, 王帅, 赵亮, 等. 考虑混合储能荷电状态的微网功率控制研究[J]. *控制工程*, 2023, 30(6): 1081-1089.
- LI Z J, WANG S, ZHAO L, et al. Research on microgrid power control considering hybrid energy storage state of charge [J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(6): 1081-1089.
- [ 13 ] 李泓青, 周建萍, 茅大钧, 等. 混合储能系统二次功率分配及交互控制策略在直流微网中的应用[J]. *电力建设*, 2019, 40(5): 13-19.
- LI H Q, ZHOU J P, MAO D J, et al. Secondary assignment and interactive control strategy of hybrid energy storage applied in DC microgrid [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(5): 13-19.
- [ 14 ] 叶钰, 祝龙记. 光伏发电系统混合储能功率分配控制策略[J]. *电工技术*, 2023, (20): 45-48+52.
- YE Y, ZHU L J. Strategy of controlling power allocation of hybrid energy storage for photovoltaic power generation system [J]. *Electric Engineering*, 2023, (20): 45-48+52.
- [ 15 ] 马文忠, 王立博, 王玉生, 等. 考虑 SOC 的混合储能功率分配与自适应虚拟惯性控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(5): 83-93.

- MA W Z, WANG L B, WANG Y S, et al. Hybrid energy storage power distribution and adaptive virtual inertia control considering SOC [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(5): 83-93.
- [16] 曹冰玉, 蔡新红, 周鹏. 基于功率预测的混合储能系统控制策略研究[J]. *新疆农机化*, 2020, (2): 25-27+31.
- CAO B Y, CAI X H, ZHOU P. Research of control strategy of hybrid energy storage system based on power prediction [J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2020, (2): 25-27+31.
- [17] 王晓姬, 张红娟, 孙世镇. 混合储能系统动态功率控制策略[J]. *电源技术*, 2022, 46(9): 1062-1065.
- WANG X J, ZHANG H J, SUN S Z. Dynamic power control strategy for hybrid energy storage system [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2022, 46(9): 1062-1065.
- [18] 张芳, 张红娟, 高妍, 等. 混合储能系统的动态比例功率分配控制策略[J]. *电气传动*, 2021, 51(13): 52-56+63.
- ZHANG F, ZHANG H J, GAO Y, et al. Dynamic proportional power allocation control strategy for hybrid energy storage system [J]. *Electric Drive*, 2021, 51(13): 52-56+63.
- [19] 胡治国, 李永杰, 张磊冲. 基于混合储能荷电状态的光伏直流微网系统能量分配策略[J]. *电源技术*, 2024, 48(2): 337-344.
- HU Z G, LI Y J, ZHANG L C. Energy allocation strategy for photovoltaic DC microgrid system based on hybrid energy storage state of charge [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2024, 48(2): 337-344.
- [20] MASIH-TEHRANI M, HA'IRI YAZDI M R, ESFAHANIAN V, et al. Wavelet-based power management for hybrid energy storage system [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(4): 779-790.
- [21] 汤旻安, 刘锡麟. 基于二阶变滤波时间常数的微网混合储能功率分配策略[J]. *可再生能源*, 2022, 40(4): 550-557.
- TANG M A, LIU X L. Hybrid energy storage power allocation strategy for microgrid based on second-order variable filter time constant [J]. *Energy Resources*, 2022, 40(4): 550-557.
- [22] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(16): 36-41.
- ZHANG Y, GUO L, JIA H J, et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(16): 36-41.
- [23] 石辛民. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- SHI X M. *Fuzzy Control and Its MATLAB Simulation* [M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [24] 杨萍, 陈卓, 罗婷, 等. 基于 VSG 的光伏发电与混合储能的控制方法[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(2): 83-91+113.
- YANG P, CHEN Z, LUO T, et al. A control method of photovoltaic power generation and hybrid energy storage based on VSG [J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(2): 83-91+113.
- [25] 陈景文, 周婧, 张文倩. 基于小波包-模糊算法的混合储能功率分配策略[J]. *智慧电力*, 2023, 51(1): 61-68.
- CHEN J W, ZHOU J, ZHANG W Q. Hybrid energy storage power allocation strategy based on wavelet packet-fuzzy algorithm [J]. *Smart Power*, 2023, 51(1): 61-68.

---

收稿日期:2024-07-15

收到修改稿日期:2024-10-14

作者简介:

周珊(1987-),女,学士,工程师,研究方向为配网技改及检修运维、智能电网,809002632@qq.com;

\* 通信作者:张伟杰(1997-),女,博士研究生,研究方向为分布式能源发电及控制、复杂系统建模与控制,1072428190@qq.com。