

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200461

直流微网混合储能系统控制策略现状及展望

张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 郑昊

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 在直流微电网中, 混合储能系统被用于改善可再生能源发电系统的性能, 维持网内的整体功率平衡。合理的控制策略是充分发挥不同储能器件特性、保证系统安全稳定运行的关键。综述了直流微网混合储能系统控制策略的最新进展, 从基本控制思想、动态响应能力提升方法和考虑荷电状态的控制策略三个方面进行了总结研究, 并以表格形式直观地展示其优点和不足。针对现有控制策略的局限性, 并结合相关领域技术进展, 对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 混合储能系统; 直流微电网; 控制策略; 动态响应; 荷电状态

Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system

ZHANG Yuhuan, DU Guiping, LEI Yanxiong, ZHENG Hao

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In DC microgrids, hybrid energy storage systems are used to improve the performance of renewable energy power generation systems and maintain the overall power balance within the grid. Reasonable control strategies are the key for giving full play to the characteristics of different energy storage devices and ensure the safe and stable operation of the system. This paper reviews the latest developments in the control strategy of hybrid energy storage system DC microgrids and summarizes the research from three aspects: basic control ideas, dynamic response capability improvement methods, and control strategies considering the state of charge, and visually demonstrates advantages and disadvantages in the form of a table. Aiming at the limitations of the existing control strategies, combined with technological progress in related fields, the future development direction is prospected.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2017B030312001) and the Advanced Scientific and Technological Research and Development Special Fund of Guangdong Province (No. 2015B020238012).

Key words: hybrid energy storage system; DC microgrid; control methods; dynamic response; state of charge

0 引言

近年来, 可再生能源如光伏、风电等在分布式微电网中渗透率不断增加, 但绝大部分可再生能源都易受天气、温度和湿度等环境因素影响, 导致其能量供应具有波动性、随机性和不可预测性的特点^[1-2]。因此, 可再生能源在接入微电网时, 会出现其发电功率与负荷需求不匹配的现象, 造成微电网无法安全稳定运行^[3]。

目前, 解决上述问题最常用的方法是在微电网

内加装储能系统。在微网中, 储能系统可平滑可再生能源输出, 使其更友好地接入微电网^[4-5]; 实现削峰填谷, 避免弃风、弃光等现象造成的能源浪费, 改善微电网的供电可靠性^[6]; 结合分时电价政策, 储能系统还能改善微电网的经济性^[7]。

常见的储能器件按照功能来划分可分为功率型和能量型器件: 前者功率密度大, 响应速度快, 但能量密度小, 只适用于平抑瞬时功率波动, 代表性器件有超级电容、飞轮储能和超导储能等; 后者能量密度大, 但动态响应能力差, 循环次数有限, 适用于平滑长时间的平均功率波动, 常见的有电池储能、压缩空气储能和氢储能等^[8]。图 1 是反映不同储能器件功率密度和能量密度的 Ragone 图^[9]。

基金项目: 广东省自然科学基金项目资助 (2017B030312001); 广东省应用型科技研发专项资金项目资助 (2015B020238012)

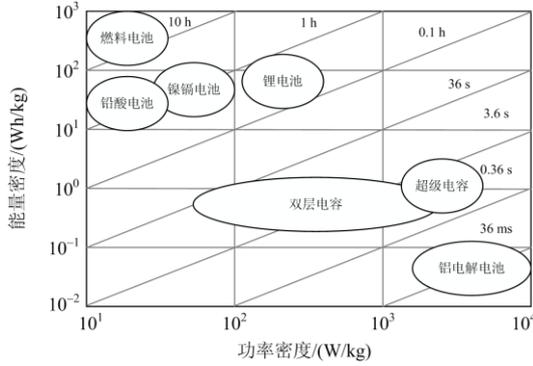


图 1 反映不同储能功率/能量密度的 Ragone 图

Fig. 1 Ragone chart describing power/energy densities of different energy storages

由图 1 可知，当前没有单一储能器件能同时满足高功率密度、高能量密度、动态响应快和循环寿命长等要求，因此将具有不同特性的储能器件组合起来形成混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)，以提升储能系统的整体性能，降低系统建设成本^[10]。目前最常用的混合储能系统是由超级电容和电池构成的：超级电容用来平抑瞬时功率波动，电池用来平滑长时间尺度的平均功率需求^[11]。通过这种方式，可以充分发挥超级电容和电池各自的优势，平滑电池的充放电电流，减少充放电次数，从而延长电池的使用寿命；同时，系统的动态响应能力也能得到显著提升^[12]。

由于混合储能系统集成了多种具有不同特性的储能器件，因此控制方法成为了能否充分发挥各类储能器件优势、维持其安全稳定运行的关键。本文将从混合储能系统的基本控制思想、动态响应能力提升方法及考虑荷电状态的控制策略三个方面梳理当前应用于直流微网混合储能系统的控制方法；并针对现有混合储能控制策略的局限性，结合相关领域技术进展，对其未来发展方向进行展望。

1 混合储能系统控制策略

1.1 基本控制思想

混合储能系统的基本控制思想是将储能系统需补偿的直流微网内不平衡功率按照频率高低进行分解。其中，低频段的平均功率波动幅值小，但持续时间长，需补偿的能量大，因此适合电池这类能量型储能器件补偿；高频段的瞬时功率波动幅值大，但持续时间短，往往是毫秒级，因而需要超级电容这类功率型器件进行平抑。由此可知，合理的功率分解策略是混合储能系统控制的关键，现有的功率分解策略可以分为集中式和分布式两种。

1) 集中式控制：该方法主要是基于滤波器分解，包括低通滤波器和高通滤波器^[3,13-14]、小波分解^[15-16]、小波包分解^[17-20]等。

本文以基于低通滤波器的混合储能控制策略为例，对集中式控制过程进行详细说明。在直流微网中，通过维持直流母线电压稳定便可保持微网内功率平衡，因此采用电压电流双环控制^[13-14]。如图 2 所示，电压外环调节直流母线电压，电流内环控制混合储能系统的充放电电流。首先，直流母线电压 v_{dc} 与其参考值 V_{ref} 做差得到电压偏差量 v^* ， v^* 经过比例积分(Proportion-Integration, PI)环节得到混合储能系统需平抑的不平衡电流 i_{tot} ，如式(1)所示。

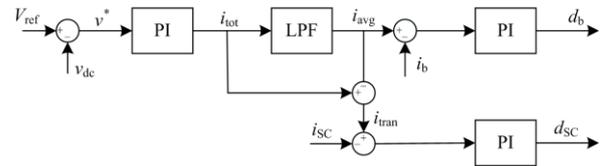


图 2 基于低通滤波器的混合储能控制策略

Fig. 2 Control strategy for hybrid energy storage system based on LPF

$$i_{tot} = K_{v,p} v^* + \frac{K_{v,i}}{s} v^* \quad (1)$$

式中， $K_{v,p}$ 和 $K_{v,i}$ 分别表示 PI 控制器的比例系数和积分系数。 i_{tot} 经过一阶低通滤波器分解，得到低频段平均电流分量 i_{avg} 和高频段瞬时电流分量 i_{tran} ，分别作为电池和超级电容输出电流的参考值 i_{b_ref} 、 i_{sc_ref} ，如式(2)和式(3)所示。

$$i_{b_ref} = i_{avg} = \frac{1}{1+sT} i_{tot} \quad (2)$$

$$i_{sc_ref} = i_{tran} = \frac{sT}{1+sT} i_{tot} \quad (3)$$

式中， T 表示低通滤波器的滤波时间常数。 i_{b_ref} 、 i_{sc_ref} 分别与电池和超级电容的实际电流做差，得到的偏差量再分别经过 PI 控制器得到占空比信号 d_b 、 d_{sc} ，以此控制功率开关器件的工作状态，进而控制储能的充放电电流。

对于其他集中式控制方式，只需将图 2 中的低通滤波器换成包括小波分解、小波包分解、变分模态分解^[21]和分段函数分配^[22]等其他平滑滤波算法，其余控制过程类似，本文在此便不再赘述。可以看出，集中式控制方法控制简单，便于实现，能有效调节不同储能期间的充放电电流，充分发挥其各自优势，但是，集中式控制仍存在一系列问题^[23]：

(1) 高度依赖通信设备，存在控制信号的通信延迟。

(2) 单点故障问题: 如果通信设备或中央控制器故障, 将造成整个储能系统失效, 由此造成系统的可靠性下降。

(3) 对于大规模微电网, 集中式控制会引起计算量过大的问题。

(4) 不利于微电网的扩建。

2) 分布式控制: 针对集中式控制存在的问题, 有学者提出了分布式控制。分布式控制是指每个分布式终端根据其局部信息做出独立决策的控制, 且不需要通信线, 实现即插即用功能^[24-25]。

在直流微网中, 最常用的分布式控制是电压电流 I-V 下垂控制, 如图 3 所示^[26], 可得

$$V_{dc} = V_n - (R_i + R_{li})i_{oi} \quad (4)$$

式中: V_n 表示储能单元的等效输出电压; i_{oi} 表示第 i 个储能单元输出电流; R_i 和 R_{li} 分别表示第 i 个储能单元的虚拟电阻和线路电阻, 由于 $R_i \gg R_{li}$, 所以在分析时, R_{li} 可忽略不计。图 3 i_o 表示储能系统总输出电流。由式(4)可知, 通过调节虚拟电阻可实现不同储能器件在稳态条件下的出力分配, 但该方法未考虑不同储能的动态性能、功率密度和能量密度的差异, 无法根据频率特性分解不平衡功率。

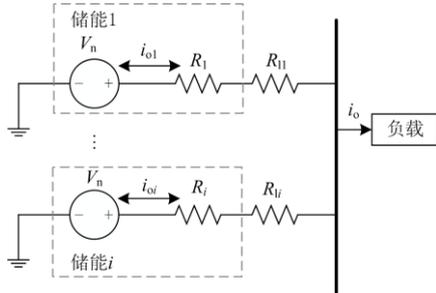


图 3 传统电流电压 I-V 下垂控制

Fig. 3 Conventional I-V droop control

文献[27]在传统虚拟电阻下垂控制基础上提出了虚拟电容下垂控制, 如图 4 所示, 超级电容控制环路的虚拟阻抗采用虚拟电容。根据图 4 的等效电路, 可得到 i_{o1} 和 i_{o2} 的表达式为

$$\begin{cases} i_{o1} = G_1(s)i_o = \frac{1}{sR_1C_2 + 1}i_o \\ i_{o2} = G_2(s)i_o = \frac{sR_1C_2}{sR_1C_2 + 1}i_o \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_2 为虚拟电容。由式(5)可知, $G_1(s)$ 等效于低通滤波器, $G_2(s)$ 等效于高通滤波器, 从而实现了不平衡功率在频域内的分解, 因此, 电池响应低频段功率变化, 超级电容响应高频段功率波动, 充分发挥了电池和超级电容各自的优势。但是该方法只适

用于由电池和超级电容两种储能器件构成的混合储能系统, 为了应对更大规模、更多储能类型的储能系统, 文献[28]提出了更具普适性的虚拟电阻电容混合下垂控制, 如图 5 所示。该方法通过合理配置各个储能单元控制回路的虚拟电阻和虚拟电容的大小, 便可将不平衡功率进行多频段分解, 并由电池、超级电容和飞轮储能等具有不同动态响应能力的储能器件分别响应。

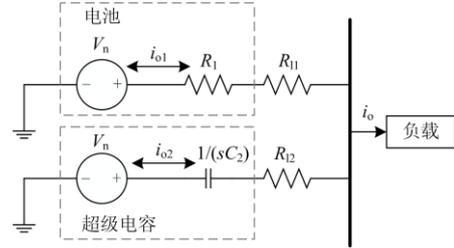


图 4 改进型虚拟电容下垂控制

Fig. 4 Improved virtual capacitor droop control

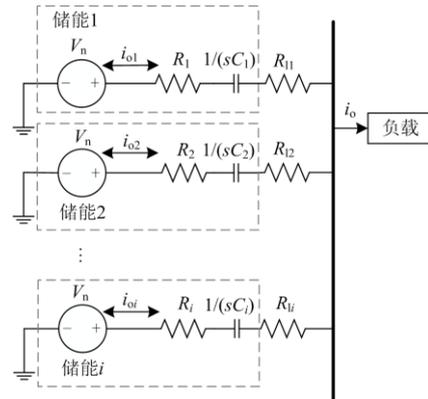


图 5 虚拟电阻电容混合下垂控制

Fig. 5 Virtual resistor and capacitor droop control

1.2 混合储能系统动态响应提升方法

由前文所述, 混合储能系统控制方法的基本思想是将不平衡功率进行高低频分解, 由电池平抑低频段功率分量, 超级电容平滑高频段功率波动。但是, 该基本控制方法未考虑因电池、电池控制器以及双向 DC/DC 变换器较慢的动态响应而引起的电池储能系统电流跟踪误差, 从而导致混合储能系统整体响应偏慢, 微电网运行稳定性下降的问题^[29]。因此, 如何提高混合储能系统的动态响应速度, 成为了混合储能系统控制方法研究中的一个重点。

1) 参考电流优化法

文献[14, 29]提出了一种混合储能系统快速联合控制策略。该方法在传统一阶分频控制的基础上, 在超级电容控制回路增加了电流补偿项, 即将电池储能系统未完全跟踪的电流误差转移至超级电容进

行补偿。通过实验验证,所提控制在可再生能源输出功率和负载突变情况下,直流母线电压恢复速度是传统分频控制的两倍,且过冲电压减小了1%,有效地提升了系统的动态响应能力和稳定性。文献[30]将经低通滤波器得到的低频电流分量作为电池的输出参考电流,而将总不平衡电流减去电池实际输出电流的差值作为超级电容的参考电流,从而消除电池储能存在未跟踪电流误差的影响。

文献[31-32]提出了两级速率限制控制,通过数学方法建立电池剩余能量与其充放电速率的关系,找到最佳平衡点即最佳参考电流,进而自适应调节电池的充放电速率,提升混合储能系统的动态响应能力并延长电池的循环寿命。

文献[33]提出了考虑负载变化率的混合储能分频控制。文中,负载功率波动在按频率分解的基础上,增加了一次按变化率的分解。因此,电池只需响应低频低变化率部分的功率波动,超级电容响应低频高变化率和高频部分的功率波动,由此减小电池的电流跟踪误差,提升系统的响应速度。

2) 预测控制法

前馈控制是在扰动发生之后被控变量未改变之前,根据其作用的大小进行控制用以补偿扰动作用对被控量的影响。文献[34-36]将功率前馈控制引入混合储能系统,基于传统一阶分频控制,在超级电容控制回路增加功率前馈补偿项,充分利用超级电容快速充放电的特性,以补偿直流母线的电压扰动量。文献[37-38]提出了基于动态演化控制的混合储能系统控制方法。该方法在保留文献[29]电流补偿回路的基础上增加了母线电压预测环节,并由动态演化控制进行调节。该方法不仅提升了直流母线电压的恢复速度,还减小了电压纹波。

上述参考电流优化法和前馈控制仍直接或间接使用到PI控制,而PI控制存在调节速度偏慢、控制范围窄、参数难以整定等固有问题,限制了混合储能系统的性能^[14]。因此,有学者将基于电路模型的数字预测控制引入混合储能系统。文献[39]利用无差拍控制在一个控制周期内基于当前时刻的电压电流值计算得到下一时刻的最佳占空比以控制储能系统工作状态,从而提升储能系统的动态性能。实验结果表示,所提控制下的直流母线电压恢复时间为25~28 ms,电压过冲为1.2%~4%,均小于传统PI控制下的250 ms、5.3%。文献[40]在利用模型预测控制提升储能系统动态性能的同时,通过添加约束条件、优化目标函数,避免储能系统过充过放,保证了其安全稳定运行。文献[41]还进一步提出了用于混合储能系统改进型的自适应模型预测控制。

1.3 考虑荷电状态的混合储能系统控制策略

根据前文所述的混合储能系统基本控制思想,当可再生能源发电与负载不匹配时,混合储能通过响应直流母线上的不平衡功率维持微网的稳定运行。但若严格执行该控制策略,需增大储能系统容量以避免过充过放,大大增加其建设成本^[42]。因此,在实际运行过程中,需引入基于荷电状态(State of charge, SOC)反馈的控制策略,以保证混合储能系统始终运行在安全的范围。

1) 基于SOC反馈的混合储能系统优化控制:常用的控制策略有基于规则的控制、模糊控制(Fuzzy control)和模型预测控制(Model predictive control, MPC)等。

基于规则的控制是通过划定储能系统不同的工作区域,并制定储能在每个工作区域内的运行方式,达到控制其安全稳定运行的目的,如表1所示^[17]。其中, SOC_{x_high} 、 SOC_{x_low} 分别表示储能正常工作区的上下限, SOC_{x_max} 、 SOC_{x_min} 分别表示储能SOC上下限警戒值。

表1 考虑SOC的混合储能系统典型工作区域划分

Table 1 HESS typical work ranges considering SOC

SOC 范围	工作区域
$SOC_{x_max} \leq SOC < 1$	过充区
$SOC_{x_high} \leq SOC < SOC_{x_max}$	过充警戒区
$SOC_{x_low} \leq SOC < SOC_{x_high}$	正常区
$SOC_{x_min} \leq SOC < SOC_{x_low}$	过放警戒区
$0 < SOC < SOC_{x_min}$	过放区

文献[44]根据表1中的区域划分制定了锂电池在不同区域内的工作模式,如在过充区,只允许锂电池恒功率放电;在过充警戒区,锂电池可恒功率放电,低倍率充电;反之亦然。文献[44]使用类似方法对超级电容工作范围进行了划分:在过放区,超级电容恒流充电至DC/DC变换器最小工作电压;在正常工作区,超级电容采用功率参考控制正常充放电;在过充警戒区,超级电容功率参考值 P_{sc} 受到其电压 v_{sc} 的线性约束,如式(6)所示。

$$P_{sc} = P_{ref} \cdot k_{ramp} \quad (6)$$

式中: P_{ref} 表示未调节前超级电容参考功率; k_{ramp} 为线性限制因子,其表达式如式(7)所示。

$$k_{ramp} = \frac{v_{sc} - V_{SC,high,limit}}{V_{SC,voltage\ mode} - V_{SC,high,limit}} \quad (7)$$

式中, $V_{SC,high,limit}$ 和 $V_{SC,voltage\ mode}$ 分别为超级电容过充警戒区初始、最终电压。由于超级电容电压与其SOC是线性关系,因此可以用电压来近似反映其SOC大小。

文献[45-46]提出了基于变时间常数的新型滤波储能限制管理策略, 可根据电池和超级电容的 SOC 水平改变低通滤波器的时间常数, 从而调节电池和超级电容的充放电电流大小。此外, 文献[45]增加了超级电容 SOC 恢复控制, 使超级电容 SOC 保持在安全工作范围内。

模糊控制同样被广泛运用在该领域, 文献[18,21,47]以超级电容和电池当前 SOC 值作为模糊控制器输入, 通过设计恰当的模糊控制规则, 对储能的充放电功率进行修正, 使储能系统始终运行在安全范围内。但是, 模糊控制规则很大程度上依赖设计者的主观经验, 因此其准确性受到限制。

文献[40-41,48]运用 MPC 实现对混合储能系统的有效控制。在文献[40]中, 首先需建立电池和超级电容电路的精确的离散数学模型, 通过设定电压电流约束、SOC 约束等约束条件和恰当的目标函数, 在每个控制周期内遍历寻优输出最佳占空比信号, 进而控制混合储能系统的充放电。实验表明, 通过 MPC, 混合储能系统能够运行在预先设定的条件内; 此外通过设定目标函数中的权重值, 还能有效控制电池响应低频段电流, 超级电容响应高频段电流, 实现合理的功率分配。但是, MPC 需要电路精确的数学模型, 因此在实际应用中, 如果电路参数发生偏移, 控制效果将受影响; 且寻优过程不可避免地给控制器带来了很大的计算负担。

2) 储能内部单元 SOC 均衡控制: 在大功率应用场合, 储能系统往往是通过单体经串并联方式构成, 以提高电压等级和容量。但是, 不同单体采用的材料、工艺和老化程度等方面的不同, 造成充放电效率的差异, 且单体初始 SOC 可能不同, 因而简单的功率平均算法不能保证单体间 SOC 的一致性, 从而影响储能的寿命和使用效率^[49-50]。

文献[52]中单体电池的充放电功率 P_{BESS_i} 由其 SOC 占总体 SOC 之和的比例确定, 如式(8)所示。

$$P_{\text{BESS}_i} = \begin{cases} P_{\text{BESS}} \cdot \frac{\mu_i(t) \cdot \text{SOC}_i(t-1)}{\sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cdot \text{SOC}_i(t-1)}, & \text{放电} \\ P_{\text{BESS}} \cdot \frac{\mu_i(t) \cdot \text{SOD}_i(t-1)}{\sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cdot \text{SOD}_i(t-1)}, & \text{充电} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{BESS} 是电池储能系统总体参考功率; μ_i 表示第 i 个单体电池运行条件; $\text{SOC}_i(t-1)$ 和 $\text{SOD}_i(t-1)$ 分别表示第 i 个单体电池在 $(t-1)$ 时刻的电荷量和放电深度。以放电为例, 单体 SOC 值越大, 分配的参考功率越大, 释放功率越多; 反之, 越小, 从而达到均衡不同单体间 SOC 的目标。

对于分布式控制, 文献[53]通过修改传统下垂控制中的下垂系数达到均衡 SOC 的目的, 其修正后的下垂系数 m_i 表达式为

$$m_i = \frac{m_0 \cdot \text{SOC}_0}{\text{SOC}_i^n} \quad (9)$$

式中: m_0 为 $\text{SOC}_0=1$ 时的下垂系数; n 为影响 SOC 收敛速度的系数; SOC_i 为储能单体当前时刻 SOC 值。文献[53]在传统 $P-f$ 下垂控制基础上加入 SOC 平衡因子来控制变换器输出的有功功率, 从而实现储能单体在充放电过程中的 SOC 自均衡。

3) 直流微网内协同控制策略: 在并网条件下, 微电网通常采用可再生能源优先发电模式以提升可再生能源利用率。当发电量多余负荷需求时, 微电网可选择混合储能系统储能或者向公用电网售电; 当发电量不足时, 可选择混合储能系统释放能量或者从公用电网购电以补偿缺额^[54]。文献[55]提出了并网情况下混合储能能量管理策略, 该策略通过引入基于电池 SOC 值的四阶多项式功率分配系数, 保证了电池和公用电网间合理的功率分配; 超级电容吸收负载和发电侧功率突变时的高频电流, 从而减小了电池的电流应力, 提升混合储能动态响应, 并且实现了混合储能系统在多种模式间的无缝切换和稳定运行。文献[56]提出了基于分布式下垂控制的公用电网/混合储能/可再生能源协同控制策略。改进型下垂控制实现了混合储能系统合理的功率分配, 提出的公用电网主导、储能主导及可再生能源主导的三种运行模式实现了微电网的稳定运行和不同运行模式间的平滑切换。

在离网情况下, 由于混合储能系统的容量和 SOC 状态的限制, 单纯依靠调节混合储能系统的工作方式, 难以维持孤网内部的功率平衡。因此在某些极端条件下, 需要引入发电侧和负荷侧的协同控制, 共同维持微网的安全稳定运行^[57]。在文献[58]提出的能量管理策略中, 当光伏发电系统输出功率大于负荷需求且混合储能系统 SOC 超过上限无法吸收多余功率时, 系统通过增加转储负载存储多余不平衡功率, 以维持系统内功率平衡; 当光伏输出功率小于负载所需功率, 且混合储能系统 SOC 低于下限值时, 光伏系统仍保持最大功率点跟踪模式运行, 此时通过切除非重要负荷的方式维持网内功率平衡。文献[1]根据风力发电情况和负载需求将微电网划分成 8 个不同的工作模式, 在保证储能系统安全运行和网内重要负荷供电的同时, 最大程度地利用了风能。

表 2 总结了用于混合储能系统的控制策略及其特性。

表 2 用于混合储能系统的控制方法及其特性

Table 2 Control methods and characteristics for hybrid energy storage systems

	分类	具体方法	参考文献	特性(+/-)
基本控制思想	集中式控制	基于滤波器分解	[3, 13-14]	+控制简单、易于实现、充分发挥不同类型储能的优势 +后文中动态响应提升方法和考虑荷电状态优化控制的基础
		小波(包)分解	[15-20]	-高度依赖通信设备 -单点故障问题
		其他平滑滤波算法	[21-22]	-对于大规模系统, 造成计算量过大 -不利于微电网的扩建
	分布式控制	传统电压电流下垂控制	[24-26]	+每个分布式终端根据其局部信息作出独立的决策控制, 不需要通信线, 实现即插即用功能 +实现不平衡功率在稳态情况的分解和在暂态时刻的多频段分解
		改进虚拟电阻电容下垂控制	[27-28]	-缺少信息交互, 难以实现不同储能间的协同控制
储能系统动态响应能力提升方法	参考电流优化	—	[14, 29-33]	+通过误差补偿、建立电池最佳充放电速率与剩余容量平衡点、增加速率限制器等方式克服电池存在的电流跟踪误差, 提升系统整体动态响应
	预测控制	前馈控制	[34-38]	+前馈控制可克服直流母线扰动量, 减小纹波, 充分利用超级电容高功率密度特性
		数字预测控制	[39-41]	+数字预测控制在提升系统动态响应的同时, 还能克服传统 PI 控制的固有缺陷; -数字预测控制大多基于精确的电路模型, 在实际应用中, 鲁棒性较差
考虑荷电状态(SOC)的控制策略	基于 SOC 反馈的优化控制	基于规则	[17, 43-46]	+基于规则控制逻辑简单, 实现方便 +模糊控制不需要被控对象模型和输入输出关系, 并易于和其他控制方法结合使用
		模糊控制	[18, 21, 47]	+模型预测控制通过设定约束条件和目标函数, 实现恰当的功率分配, 使储能系统运行在预先设定的范围内 -基于规则控制好坏取决于规则设定, 且需根据应用对象不同进行调整
		模型预测控制	[41-41, 48]	-模糊控制依赖专家经验, 控制准确性受到限制 -模型预测控制依赖精确电路模型, 鲁棒性易受影响, 同时寻优过程计算量大
	储能内部单元 SOC 均衡	—	[51-53]	+在大规模储能系统中, 保证储能单体间 SOC 的一致性, 延长储能的寿命、提升使用效率
	直流微网协同控制	并网状态	[54-56]	+并网状态下, 提升可再生能源利用率, 实现削峰填谷、高储低发等功能; 通过储能系统与公用电网的能量交互, 保证储能系统安全稳定运行
		离网状态	[1, 57-58]	+离网状态下, 引入发电侧和负荷侧的协同控制, 保证储能系统安全和重要负荷的供电 -一定程度上降低了可再生能源效率和负荷的供电可靠性

2 混合储能系统控制策略发展趋势展望

根据前文讨论的混合储能系统及其相关控制策略, 可以看出, 现有混合储能系统控制策略已经针对其动态性能、考虑 SOC 的优化控制等方面开展了卓有成效的研究, 但是其控制技术仍然有巨大的优化空间。混合储能系统控制策略未来发展优化的趋势展望如下。

1) 分布式控制策略的优化: 随着储能系统建设速度加快、规模不断扩大, 可实现即插即用功能的分布式控制的重要性日益凸显。但现有的分布式控制如上文提到的各类下垂控制主要围绕如何实现不同类型储能器件间的功率分配开展。因此, 在未来可从提升储能系统动态性能、补偿系统谐波^[59]、降低储能系统接入微网时的暂态功率冲击和储能间 SOC 均衡等方面不断优化分布式控制, 增强储能系统的可扩展性和运行灵活性。

2) 多种控制策略集成及新型人工智能算法的研究: 由上文可知, 从传统的 PI 控制到新兴的数字预测控制, 每种控制都存在一定局限。因此, 未来可将不同的控制方法进行集成使用, 充分发挥各自的优势^[60]。另外, 随着大数据、云计算、电网中台等技术的推广应用, 让深度学习、卷积神经网络等新兴的人工智能算法应用在储能系统实时控制中成为可能^[61-62]; 通过对储能系统在不同运行场景及不同条件下的历史数据的挖掘和学习, 不断优化如边界条件、目标函数等控制策略中的规则设置, 提高储能系统的运行效率和可靠性^[60,63]。

3) 储能运行状态监测的研究: 由前文可知, SOC 是设计混合储能系统优化控制、维持储能系统安全稳定运行的重要指标。因此, 其准确性直接影响相关控制策略的效果。所以设计更为精确的 SOC 在线估算算法是储能系统状态监测研究的一个重点方向^[64]。此外, 反映储能预期寿命的电池健康度 (State of Health, SOH) 是影响储能系统功率容量配置的另一个重要指标^[42]。但现有 SOH 判断更多是在实验室环境下完成的, 且测试所需时间长, 与实际工程情况有较大差别, 因此无法用于储能系统的实时控制之中^[65]。虽然现在有研究人员将神经网络控制引入 SOH 的估计中, 但精度仍有待提升^[66]。所以, 未来需研究设计更精确的 SOH 在线估算算法, 并以此为依据优化储能系统充放电功率、充放电深度等规则, 进一步延长储能系统的使用寿命。

4) 储能控制技术与新器件新拓扑的结合: 随着碳化硅、氮化镓等新型宽禁带器件的推广, 电力电子功率开关可以达到更高的工作频率, 更有利于降

低系统功耗、提升系统动态性能^[67-68]。同时, 随着储能系统和微电网规模的不断扩大, 对变换器的电压等级和能量密度要求越来越高。因此, 在未来可从模块化/多级/并联等方向研究设计具有低电压应力、滤波效果好、鲁棒性强等特点的新型拓扑及其配套的控制策略, 提升储能系统的能量转换效率。

3 结论

随着可再生能源在直流微电网中的渗透率不断提高, 储能系统的时序能量调节作用成为克服可再生能源随机性、波动性等缺陷, 维持微电网稳定可靠运行的关键。本文梳理了混合储能系统基本控制思想、动态响应能力提升方法和考虑荷电状态的控制策略; 最后, 结合现有混合储能系统控制技术的局限性和当前其他领域的发展情况, 对混合储能系统控制策略的未来发展方向进行了展望。

相信随着新型材料的研发与应用, 将综合性能更好的储能设备推入市场; 同时新兴智能算法的完善和成熟, 都将从本质上降低储能控制方法的设计难度和成本, 使储能技术应用于更多更复杂的场景, 带来更大的经济和环境效益。

参考文献

- [1] HARUNI A M O, NEGNEVITSKY M, HAQUE M E, et al. A novel operation and control strategy for a standalone hybrid renewable power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 402-413.
- [2] 田鑫, 张健, 李雪亮, 等. 基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 34-43.
TIAN Xin, ZHANG Jian, LI Xueliang, et al. Evaluating photovoltaic accommodation ability for the Shandong power system based on sequential operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 34-43.
- [3] 雷鸣宇, 杨子龙, 王一波, 等. 光/储混合系统中的储能控制技术研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 86-92.
LEI Mingyu, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. Study on control technology of energy storage station in photovoltaic/storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 86-92.
- [4] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 233-243.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System

- Technology, 2017, 41(10): 233-243.
- [5] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [6] 艾欣, 董春发. 储能技术在新能源电力系统中的研究综述[J]. 现代电力, 2015, 32(5): 1-9.
AI Xin, DONG Chunfa. Review on the application of energy storage technology in power system with renewable energy sources[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(5): 1-9.
- [7] WU J, XING X, LIU X, et al. Energy management strategy for grid-tied microgrids considering the energy storage efficiency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9539-9549.
- [8] NEHRIR M H, WANG C, STRUNZ K, et al. A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: configurations, control, and applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 392-403.
- [9] ZHOU H, BHATTACHARYA T, TRAN D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930.
- [10] 禹红斌. 分布式混合储能变换及其控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YU Hongbin. Distributed hybrid energy storage power conversion and control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [11] KOTRA S, MAHESH K M. Design and stability analysis of DC microgrid with hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1603-1612.
- [12] WICKRAMASINGHE A D, HREDZAK B, AGELIDIS V, et al. Supercapacitor sizing method for energy controlled filter based hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(2): 1626-1637.
- [13] YANG F, XUE H, WANG Y F. Research on control strategy of supercapacitors energy storage system[J]. Advanced Materials Research, 2011, 347-353: 3881-3885.
- [14] KOLLIMALLA S K, MISHRA M K, NARASAMMA N L. Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1137-1144.
- [15] JIA H, QI Z, LI Z. Compound energy storage control of wind power base on wavelet decomposition[C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), November 26-29, 2015, Changsha, China: 2126-2129.
- [16] JIANG Q, HONG H. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [17] 李培强, 李文英, 唐捷, 等. 基于 SOC 优化的混合储能平抑风电波动方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 20-27.
LI Peiqiang, LI Wenyong, TANG Jie, et al. Method of hybrid energy storage to smooth the fluctuations for wind power based on state of charge optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 20-27.
- [18] 熊雄, 王江波, 杨仁刚, 等. 微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 677-681.
XIONG Xiong, WANG Jiangbo, YANG Rengang, et al. A fuzzy adaptive control strategy for composite energy storage system to cope with output power fluctuation of intermittent energy source in microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 677-681.
- [19] LU Y, XU J, ZHAO Y, et al. Optimal control of wind power hybrid energy storage system[C] // 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), June 3-5, 2017, Harbin, China: 1-5.
- [20] 罗桐, 陈峦, 黄琦, 等. 基于储能系统的光伏功率预测误差补偿控制[J]. 电源技术, 2017, 41(10): 1433-1436.
LUO Tong, CHEN Luan, HUANG Qi, et al. Compensation control of photovoltaic power prediction deviation based on energy storage system[J]. Power Technology, 2017, 41(10): 1433-1436.
- [21] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 65-72.
LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 65-72.
- [22] ZHANG Y, JIANG Z. Dynamic power sharing strategy for active hybrid energy storage systems[C] // 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7-10, 2009, Dearborn, MI, USA: 558-563.
- [23] SONG Q, CHEN J. A decentralized energy management strategy for a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid[C] // 2018

- IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), June 13-15, 2018, Cairns, QLD, Australia: 19-24.
- [24] GU Y, XIANG X, LI W, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [25] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. A decentralized control method for a low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 793-801.
- [26] 陈燕东, 谭文娟, 周小平, 等. 混合储能系统功率自主分频控制方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2019, 46(4): 65-73.
CHEN Yandong, TAN Wenjuan, ZHOU Xiaoping, et al. An autonomous-frequency-split power control method for hybrid energy storage system[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2019, 46(4): 65-73.
- [27] XU Q, HU X, WANG P, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(7): 5930-5941.
- [28] CHEN X, ZHOU J, SHI M, et al. A novel virtual resistor and capacitor droop control for HESS in medium voltage DC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2518-2527.
- [29] MANANDHAR U, TUMMURU N R, KOLLIMALLA S K, et al. Validation of faster joint control strategy for battery and supercapacitor based energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3286-3295.
- [30] JOSHI M C, SAMANTA S, SRUNGAVARAPU G. Frequency sharing based control of battery/ultracapacitor hybrid energy system in the presence of delay[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10571-10584.
- [31] KOLLIMALLA S K, UKIL A, GOOI H B, et al. Optimization of charge/discharge rates of battery using two stage rate-limit control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(2): 516-529.
- [32] KOLLIMALLA S K, UKIL A, GOOI H B, et al. Variable two stage rate-limit control for battery energy storage system[C] // 7th IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference-ISGT Asia, November 3-6, 2015, Bangkok, Thailand: 1-5.
- [33] 王艾萌, 黄浦东. 考虑负载变化率的混合储能分频控制优化策略[J]. 现代电力, 2018, 35(4): 80-86.
WANG Aimeng, HUANG Pudong. An optimal frequency division control for hybrid energy storage considering the change rate of the load[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(4): 80-86.
- [34] PAVKOVIĆ D, CIPEK M, HRGETIĆ M, et al. DC bus feed-forward/feedback control for EVs with battery/ultracapacitor energy storage system[C] // IEEE Eurocon-international Conference on Smart Technologies, July 6-8, 2017, Ohrid, Macedonia: 318-323.
- [35] 吕智林, 唐文强, 曾宪金. 基于功率前馈的孤立直流微网母线稳压控制[J]. 电力电子技术, 2015, 49(8): 32-36.
LÜ Zhilin, TANG Wenqiang, ZENG Xianjin. Voltage stability control of isolated DC micro grid based on power feed forward[J]. Power Electronics, 2015, 49(8): 32-36.
- [36] 韦雪菲, 卢泉, 胡立坤, 等. 基于混合储能的功率前馈稳压控制策略研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2017, 42(6): 2050-2058.
WEI Xuefei, LU Quan, HU Likun, et al. Research on power feed-forward voltage control strategy based on hybrid energy storage[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2017, 42(6): 2050-2058.
- [37] MANANDHAR U, WANG B, UKIL A, et al. Dynamic evolution control based power sharing method for hybrid energy storage system[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(2): 276-283.
- [38] SAMOSIR A S, YATIM A H M. Implementation of dynamic evolution control of bidirectional DC-DC converter for interfacing ultracapacitor energy storage to fuel-cell system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3468-3473.
- [39] WANG B, MANANDHAR U, ZHANG X, et al. Deadbeat control for hybrid energy storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 10(4): 1867-1877.
- [40] HREDZAK B, AGELIDIS V G, JANG M. A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1469-1479.
- [41] WANG L, WANG Y, LIU C, et al. A power distribution strategy for hybrid energy storage system using adaptive model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 5897-5906.
- [42] 徐国栋, 程浩忠, 马紫峰, 等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 72-81.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. An overview of operation and configuration of energy storage

- systems for smoothing wind power outputs[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 72-81.
- [43] 杨帆, 任永峰, 云平平, 等. 双级锂电池-超级电容混合储能的协调控制及功率分配[J]. *可再生能源*, 2019, 37(3): 361-366.
YANG Fan, REN Yongfeng, YUN Pingping, et al. Coordinated control and power distribution of double stage lithium battery-super capacitor hybrid energy storage system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(3): 361-366.
- [44] ROCABERT J, CAPO-MISUT R, MUNOZ-AGUILAR R S, et al. Control of energy storage system integrating electrochemical batteries and SC for grid-connected applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 55(2): 1853-1862.
- [45] 陈小锋. 含混合储能的光伏直流微网功率控制策略研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
CHEN Xiaofeng. Research on power control strategy of photovoltaic DC microgrid with hybrid energy storage system[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018.
- [46] GAO X, FU L. SOC optimization based energy management strategy for hybrid energy storage system in vessel integrated power system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 54611-54619.
- [47] 张酌伟, 樊艳芳, 姚波, 等. 基于 SOC 实时反馈的 HESS 平抑光伏功率波动策略[J]. *电气传动*, 2019, 49(4): 74-79.
ZHANG Zhuowei, FAN Yanfang, YAO Bo, et al. Photovoltaic power fluctuation smoothing strategy based on SOC real time feedback hybrid energy storage system[J]. *Electric Drive*, 2019, 49(4): 74-79.
- [48] TAN S M, WANG B, MANANDHAR U, et al. Model predictive control for hybrid energy storage system using single-inductor dual-input single-output converter[C] // 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 22-25, 2018, Singapore, Singapore: 97-102.
- [49] LI X, HUI D, LAI X. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 464-473.
- [50] JIANG Q, GONG Y, WANG H. A battery energy storage system dual-layer control strategy for mitigating wind farm fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3263-3273.
- [51] LI X, ZHANG D. Coordinated control and energy management strategies for hundred megawatt-level battery energy storage stations based on multi-agent theory[C] // International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS), August 30-September 2, 2018, Zhengzhou, China: 1-5.
- [52] 张继元, 舒杰, 宁佳, 等. 考虑 SOC 自均衡的光储独立微电网协调控制[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(增刊2): 277-287.
ZHANG Jiyuan, SHU Jie, NING Jia, et al. Coordinated control for PV/storage hybrid islanded microgrid considering SOC balancing[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(S2): 277-287.
- [53] 吴青峰, 孙孝峰, 王雅楠, 等. 基于分布式下垂控制的微电网分布式储能系统 SOC 平衡策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(6): 1247-1256.
WU Qingfeng, SUN Xiaofeng, WANG Yanan, et al. A distributed control strategy for SOC balancing of distributed energy storage systems in microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(6): 1247-1256.
- [54] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 1-18.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 1-18.
- [55] MANANDHAR U, UKIL A, BENG G H, et al. Energy management and control for grid connected hybrid energy storage system under different operating modes[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 10(2): 1626-1636.
- [56] GU Y, LI W, HE X. Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4): 2328-2337.
- [57] KOTRA S, MISHRA M K. Energy management of hybrid microgrid with hybrid energy storage system[C] // 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), November 22-25, 2015, Palermo, Italy: 856-860.
- [58] KRISHAN O, SUHAG S. Power management control strategy for hybrid energy storage system in a grid-independent hybrid renewable energy system: a hardware-in-loop real-time verification[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(3): 454-465.
- [59] 杨晓梅, 刘欢, 闻枫, 等. 光伏微电网孤岛运行模式下冲击负荷跟踪补偿控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(4): 115-122.

- YANG Xiaomei, LIU Huan, WEN Feng, et al. Tracking and compensation control of impulse load for PV microgrid in the islanding operation mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 115-122.
- [60] 李民策, 王丽, 刘畅, 等. 电动汽车用电池-超级电容混合储能系统拓扑结构与功率分配策略研究综述[C] // 第二届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集, 2019: 514-519.
- LI Mince, WANG Li, LIU Chang, et al. A review of the topologies and power split strategies for hybrid energy storage systems based on battery and supercapacitor for EV application[C] // The 20th China System Simulation Technology and Application Annual Conference (20th CCSSTA), 2019: 514-519.
- [61] 李晓东, 陈亚鹏, 王保营, 等. 机器学习在电站设备状态分析中的应用[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 129-133.
- LI Xiaodong, CHEN Yapeng, WANG Baoying, et al. Application of machine learning in state analysis of power plant equipment[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 129-133.
- [62] 张旻, 李天喆, 张容进, 等. 基于信息融合的动态神经网络光伏功率预测[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 68-73.
- ZHANG Min, LI Tianzhe, ZHANG Rongjin, et al. Photovoltaic power forecasting based on information fusion theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 68-73.
- [63] 赵增涛, 罗勇, 梁成辉. 电力企业中台云化构建及大数据分析研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(3): 50-55.
- ZHAO Zengtao, LUO Yong, LIANG Chenghui. Research on middle platform construction and large data analysis of power enterprises based on Aliyun[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(3): 50-55.
- [64] 李军徽, 张晓驰, 李翠萍, 等. 基于修正卡尔曼滤波 SOC 估算的锂电池变参数模型[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 55-63.
- LI Junhui, ZHANG Xiaochi, LI Cuiping, et al. Variable parameter model of lithium battery based on SOC estimation of modified Kalman filter[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 55-63.
- [65] 孙冬, 许爽. 梯次利用锂电池健康状态预测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2121-2129.
- SUN Dong, XU Shuang. State of health prediction of second-use lithium-ion battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2121-2129.
- [66] 王洪, 卢志涛, 王少博, 等. 基于人工智能的电网用蓄电池健康度评估[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 79-84.
- WANG Hong, LU Zhitao, WANG Shaobo, et al. Evaluation on state of health of storage battery for power grid based on artificial intelligence[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4): 79-84.
- [67] 刘源俊. 基于 GaN 器件的双向 CLLC 谐振变换器研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIU Yuanjun. Research on bidirectional CLLC resonant converter based on GaN device[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [68] 李志君, 黄波, 黄小羽, 等. 全碳化硅大功率直流电源关键技术研究[J/OL]. 电源学报: 1-13[2020-07-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20200706.0918.002.html>.
-
- 收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-09-11
- 作者简介:
- 张宇涵(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合储能系统控制技术; E-mail: zhang_yh96@foxmail.com
- 杜贵平(1968—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为大功率高效电能变换技术及系统研制。E-mail: gpdu@scut.edu.cn
- (编辑 周金梅)