

基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法

陈燕东^{1,2†}, 刘燕军¹, 张松¹, 谢志为^{1,2}, 王自力^{1,2}, 桑勇¹, 张龙¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学深圳研究院, 广东 深圳 518000)

摘要:混合储能具有良好的功率可控特性,在孤岛微网中常被用作功率缓冲器,补偿分布式电源和负荷多变的功率潮流.围绕储能的功率响应问题,本文设计了混合储能的功率控制方案,并提出了一种基于多目标协调的子单元功率自适应分配方法.首先基于对母线功率供求平衡关系的分析,设计了主从并联型储能功率控制方案.其次利用积分器的“时空调零”特性,实现了子单元的功率自主分配;基于此,考虑了不同荷电状态(SOC)下储能最大充放电功率的差异,设计了子单元的SOC分层管理和多目标功率协调策略.仿真结果表明,所提策略实现的功率分配效果满足子单元的功率响应特性;随着超级电容SOC_{scn}偏移加深,所提策略对SOC_{scn}的优化能力越强,初始SOC_{scn}为97%时能提高10.10%的优化性能,这保障了超级电容作为电压源的功率输出能力;所提策略降低了超级电容常态下的蓄电池的输出深度,蓄电池的最大功率深度降低了46.70%,这提高了蓄电池的使用寿命.

关键词:孤岛微电网;混合储能功率控制;SOC分层管理;多目标协调;功率自适应分配

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

Adaptive Power Allocation Strategy for Hybrid Energy Storage Based on Multi-objective Coordination

CHEN Yandong^{1,2†}, LIU Yanjun¹, ZHANG Song¹, XIE Zhiwei^{1,2}, WANG Zili^{1,2}, SANG Yong¹,
ZHANG Long¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Research Institute of Hunan University, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Hybrid energy storage has superior power controllability and is often used as a power buffer in island microgrids to compensate for the power output of distributed powers and loads. To address power response issues, a power control method for hybrid energy storage is proposed, and an adaptive power allocation strategy with multi-objective coordination for subunits is developed. Firstly, a master-slave parallel power control scheme is developed by analyzing the balance mechanism of bus power supply and demand. Secondly, the scheme achieved autonomous power distribution of subunits by utilizing the zeroing characteristic of the integrator. Based on this, a hierarchical management system for SOC and a power coordination method with multi-objective optimization of subunits are

* 收稿日期:2023-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077070), National Natural Science Foundation of China (5207707); 博士后创新人才支持计划(BX20220103), China National Postdoctor for Innivative Talents(BX20220103); 深圳市自然科学基金面上项目(JCYJ20220530160405012), Natural Science Foundation of Shenzhen (JCYJ20220530160405012)

作者简介:陈燕东(1979—),男,湖南澧县人,湖南大学教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail: yandong_chen@hnu.edu.cn

designed by analyzing the maximum power response of subunits under different SOC_{scn}. The simulation results indicate that the proposed method yields a power distribution effect that aligns with the power response characteristics of subunits. As the SOC_{scn} offset increases, the proposed strategy provides a stronger optimization ability for SOC_{scn}, as the performance can be improved by 10.1% when the initial SOC_{scn} is 97%, which ensures that the power output capacity of the supercapacitor as a voltage source is guaranteed. The proposed strategy reduces the output strength of the battery under the normal condition of the supercapacitor as the maximum power depth of the battery is reduced by 46.7%. This improvement prolongs the service life of the battery.

Key words: island microgrid; power control of hybrid energy storage; hierarchical management of SOC; multi-objective coordination; adaptive power allocation method

以风电和光伏为主的分布式微网在海岛电源、铁路供电、野外供电等场景应用广泛^[1-3]. 分布式电源受限于可再生资源的时空零散分布, 出力具有间歇性. 同时, 负荷的随机投切也会导致微网母线功率供需失衡^[4]. 将混合储能接入微网, 可以调控母线的功率潮流, 增强孤岛电力的运行稳定性^[5-7], 但储能的功率控制及子单元的功率分配问题带来了新的挑战. 通过电能的吸收释放, 储能向孤岛电力提供功率补偿^[8], 例如在发电功率突减时放电、突增时充电, 实现母线功率的“降余补缺”^[4]. 谢志佳等^[9]认为电池储能具有的动态吸收并释放能量的特性能补偿母线功率缺额, 是孤岛电力的必要功率补充. Liu等^[10]、叶小辉等^[11]、陶琼等^[12]详细叙述了分布式电力中储能的作用, 分析了各类储能的优缺点及应用性, 肯定了储能的响应速度快、稳定性高、可控性强等优点, 同时指出储能的最大出力受其SOC(荷电状态)影响.

混合储能对外的整体功率响应能增强微网对母线功率潮流的调控, 但对内的子单元功率响应决定混合储能的整体输出性能. 针对子单元功率分配, 文献[13-17]控制超级电容补偿失衡功率的高频分量与蓄电池响应低频分量, 减少了母线的功率扰动, 但未考虑子单元间的功率协调, 并没有解决蓄电池频繁充放电与功率抵消问题. 文献[18-19]通过SOC均衡控制有效平衡了各子单元出力. 文献[20]基于深度学习不断优化容量与功率的关联函数, 实现了功率的精确解算, 但其浩大的计算量不适合微嵌入式工程. 文献[21-23]通过约束超级电容电压来调节蓄电池的出力, 极大简化了功率分配的计算流程. 由上分析可知, 在设计功率分配算法时, 很容易忽略子单元的功率与能量特性对整体功率响应的影响, 同时应简化控制流程, 提高程序的容错率, 无论是分频还

是深度学习, 其执行的容错率都较低. 因此充分利用储能单元的固有特性, 提高子单元间的功率协调控制仍值得深入研究.

对此, 本文提出一种基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法, 从功率和能量特性视角调控混合储能的功率响应. 实现的功率分配效果符合子单元的功率响应特性; 通过SOC管理优化子单元的功率曲线, 保障了超级电容作为主电源的功率输出能力, 降低了蓄电池的充放电深度, 提高了混合储能的整体功率响应能力.

1 微网结构

图1给出了微电网的结构框架. 分布式发电源和消耗源并联接入母线; 超级电容和蓄电池经由变流器接入母线, 组成混合储能; F2为并网开关, 非必要工况下不闭合(例如, 仅在储能单元无法工作时闭合), 这使微网处于类孤岛状态. 图中箭头表示各单元的功率流动正方向.

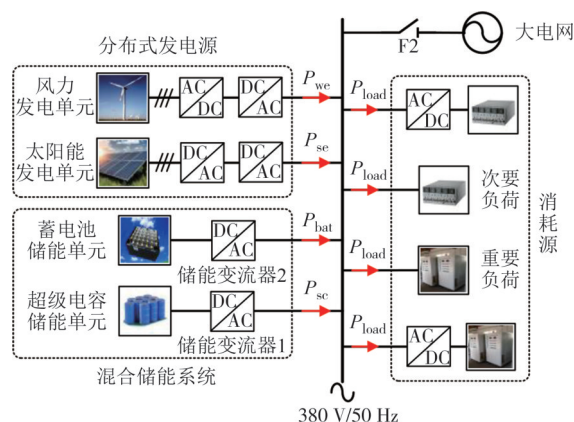


图1 微电网系统结构示意图

Fig.1 The structure diagram of microgrid system

忽略各级变流器损耗,如图1所示微网稳定运行时各功率源间的功率平衡方程见式(1)。

$$P_{sc}(t) + P_{bat}(t) + P_{we}(t) + P_{se}(t) = \sum P_{load}(t) \quad (1)$$

式中, P_{bat} 是蓄电池输出功率, P_{sc} 为超级电容功率; P_{se} 为光伏并网功率, P_{we} 为风电并网功率; $\sum P_{load}$ 表示总负荷能耗功率。

将储能作为主功率源,可将母线功率潮流分为储能与非储能性质功率流,式(1)可变换为式(2)。

$$\begin{cases} P_{sc}(t) + P_{bat}(t) = P_{net}(t) \\ P_{net}(t) = \sum P_{load}(t) - [P_{we}(t) + P_{se}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{net} 为母线净需求功率,表示储能补偿功率。由式(2)可知:混合储能的功率响应等于负荷能耗与分布式发电并网功率之差时,母线功率平衡。

2 混合储能功率控制系统设计

2.1 混合储能的功率控制方案设计

孤岛工况下,微网缺少大电网支撑,可将储能设为电压源,用于电压调节和功率支撑^[24]。

超级电容是功率型单元,能响应瞬时大功率需求,但其能量密度小,这限制了其持续输出性能。蓄电池是能量型单元,常在站点配置大容量组合,但其功率响应速度慢。针对储能的固有功率与能量特性,设计的功率控制方案如图2所示。

通过对不同储能特性的“优势整合,劣势互补”,上述功率控制方案的思路是发挥超级电容的瞬时大

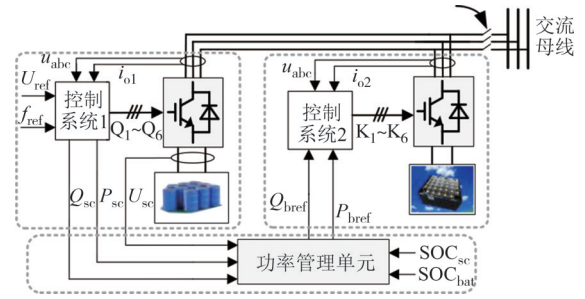


图2 混合储能系统功率控制模型

Fig.2 Power control model of hybrid energy storage system

功率响应特性,维持母线功率动态平衡,通过功率管理单元将超级电容的功率响应转移至蓄电池输出,实现补偿母线功率的同时完成子单元间的功率分配。

2.2 混合储能主从并联功率控制

基于图2描述的功率控制思路,设计了主从并联型混合储能功率控制方案,超级电容作为主控电压源,采用 V/f 策略;蓄电池作为从控制器,采用直接功率控制。通过控制整体储能系统的功率响应,能满足母线的电压调节和功率补偿需求。

图3给出了采用PI控制的简化控制系统电路,变流器的控制参数见表1。超级电容采用端电压为 U_{dc1} 的电容和电阻 R_{sc} 的串联模型等效; U_{dc2} 为蓄电池电压; Q_n 、 K_n ($n=1\sim6$) 为开关管及开关信号; e_{a-c} 为变流器桥臂中点电压; $i_{Lai-Lci}$ 、 $i_{oai-oci}$ ($i=1,2$) 分别表示 a、b、c 三相滤波电感电流和并网电流; u_{a-c} 为母线相电压; L_{fi} 、 R_{fi} 和 C_{fi} ($i=1,2$) 表示 LC 滤波器的结构参数。母线电压等级为 380 V/50 Hz。

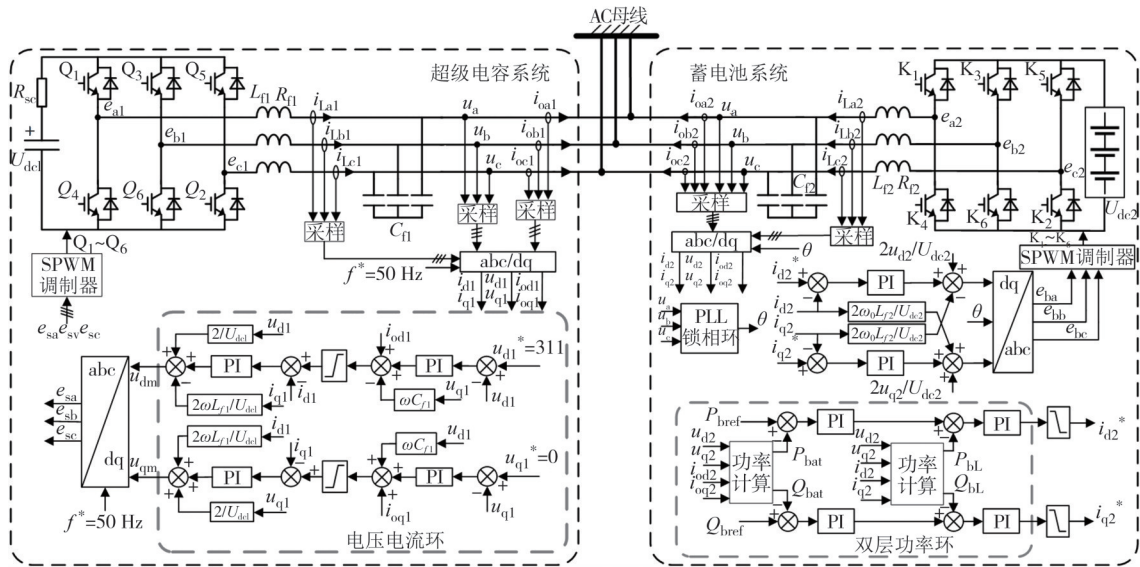


图3 混合储能控制系统简化电路

Fig.3 Simplified control circuit for hybrid energy storage system

因此将其SOC分为7大区间,增加了顶层区($>SOC_{sup}$)和底层区($<SOC_{sdown}$)为限制区间。

3.1.2 基于蓄电池SOC的最大功率协调系数设计

超级电容是物理型储能, SOC_{scn} 状态约束其功率响应强度, 对使用寿命的影响较小; 蓄电池是电化学储能, SOC_{bn} 越限会造成内部介质的化学活性降低, 严重缩短其使用寿命^[18,25]。因此, 需限制不同 SOC_{bn} 下蓄电池的最大充放电功率, 式(6)通过设置协调系数 λ 约束蓄电池的最大功率响应:

$$P_{batm} = \lambda \cdot P_{bm} \quad (6)$$

式中, P_{bm} 、 P_{batm} 分别表示蓄电池的额定最大功率与协调后的可用最大功率; λ 为最大功率协调系数, 表征最大功率响应的约束状态。

蓄电池的端电压与其 SOC_{bn} 表现为非线性关联^[25], 据此选用幂函数特性表征其最大功率与 SOC_{bn} 的关联, λ 的数学表达如下:

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1 & , SOC_{bn} \geq SOC_{bmid} \\ 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{SOC_{bmid} - SOC_{bn}}{SOC_{bmid} - SOC_{blow}} \right)^4 & , SOC_{bmid} > SOC_{bn} \geq SOC_{blow} \\ \frac{1}{4} \left(\frac{SOC_{bn} - SOC_{bmin}}{SOC_{blow} - SOC_{bmin}} \right)^4 & , SOC_{blow} > SOC_{bn} \geq SOC_{bmin} \\ 0 & , SOC_{bmin} > SOC_{bn} \end{cases}$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} 1 & , SOC_{bn} \leq SOC_{bmid} \\ 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{SOC_{bn} - SOC_{bmid}}{SOC_{bhigh} - SOC_{bmid}} \right)^4 & , SOC_{bmid} < SOC_{bn} \leq SOC_{bhigh} \\ \frac{1}{4} \left(\frac{SOC_{bmax} - SOC_{bn}}{SOC_{bmax} - SOC_{bhigh}} \right)^4 & , SOC_{bhigh} < SOC_{bn} \leq SOC_{bmax} \\ 0 & , SOC_{bmax} < SOC_{bn} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $SOC_{bmid} = (SOC_{bhigh} + SOC_{blow})/2$; SOC_{bn} 为蓄电池当前SOC状态; λ_1 、 λ_2 表示放电与充电功率协调系数。由式(7)可绘制 λ 曲线, 见图6, 其左纵坐标轴对应 λ_1 , 右坐标轴对应 λ_2 。

图6表征蓄电池在不同 SOC_{bn} 下对应的 λ 曲线, SOC_{bn} 与 λ_1 、 λ_2 表现为——对应。观察 λ_1 可知: 当

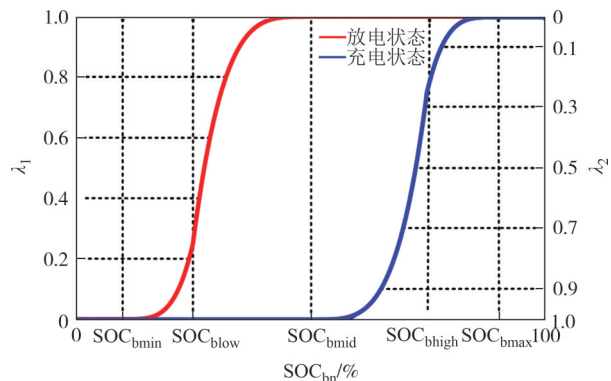


图6 基于 SOC_{bn} 的功率系数 λ 曲线

Fig.6 λ curve based on SOC_{bn} state

SOC_{bn} 减小至 SOC_{bmid} 时, λ_1 从1开始下降, λ_1 的变化表现为幂函数趋势(与蓄电池电压特性一致), 当 SOC_{bn} 减小至 SOC_{bmin} 时, λ_1 降为0, 此时蓄电池的可用放电功率为0。 λ_2 特性同理分析。

3.2 判断指令充放电状态的超级电容功率协调设计

3.2.1 超级电容SOC的二次计算

超级电容的SOC状态与其端电压近似为正相关性, 常采用开路电压法估算 SOC_{scn} ^[25]。

$$SOC_{scn} = \frac{U_{scn} - U_{sc_min}}{U_{sc_max} - U_{sc_min}} \quad (8)$$

式中: U_{scn} 为超级电容端电压, U_{sc_max} 、 U_{sc_min} 为超级电容额定的最大与最小电压。

作为主控电压源, 要求超级电容在极限 SOC_{scn} 状态下具有正常的充放电功率响应能力, 而式(8)通过剩余容量与额定容量的比值定义 SOC_{scn} , 显然在较低 SOC_{scn} 时超级电容的放电能力弱, 较高 SOC_{scn} 下的充电能力不合要求, 与设计要求相悖。

本小节优化了 SOC_{scn} 的计算过程, 式(9)重构了式(8)中的关键变量: 二次配置 U_{sc_max} 、 U_{sc_min} 参考值, 使超级电容满足设计要求。

$$\begin{cases} SOC_{scn} = \frac{U_{scn} - U_{sdown}}{U_{sup} - U_{sdown}} \\ U_{sup} = U_{sc_max} - \Delta_1 \\ U_{sdown} = U_{sc_min} + \Delta_2 \end{cases} \quad (9)$$

SOC_{scn} 二次计算是按需将 U_{sc_max} 、 U_{sc_min} 缩小和放大为 U_{sup} 和 U_{sdown} , 见图7, 通过重构相关的电压参考, 使之具备极限SOC下的充放电能力。

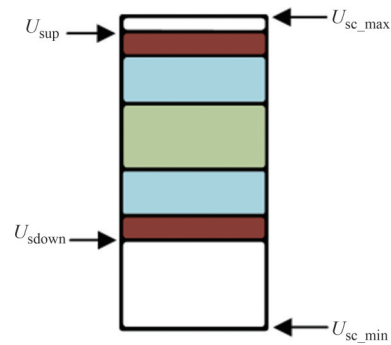


图7 超级电容的最值电压二次配置

Fig.7 Reconfiguration of voltage reference for SC

3.2.2 超级电容功率协调模式

蓄电池频繁切换充放电状态将严重缩短其使用寿命, 但超级电容几乎无此限制^[25], 因此通过判断蓄电池功率指令的充放电状态, 在满足 SOC_{scn} 约束下允许超级电容协调蓄电池的部分功率响应, 能有效降低蓄电池的功率响应深度。

图8描述了超级电容协调模式的 SOC_{scn} 约束： SOC_{coo} 表示功率协调模式下超级电容的SOC约束值， $SOC_{scn} \geq SOC_{coo}$ 时超级电容允许放电协调， $SOC_{scn} \leq SOC_{coo}$ 时允许充电协调。

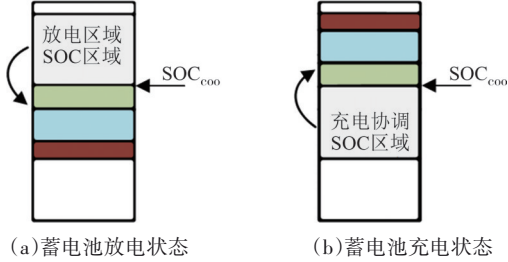


图8 超级电容功率协调示意图

Fig.8 The diagram of power coordination of SC

用式(10)表示图8,其中 P_{scb2} 、 P_{scb1} 为充电与放电协调功率, P_{gbbi} ($i=1,2$) 为协调功率计算值。

$$P_{scb1} = \begin{cases} P_{gbb1}, & SOC_{scn} \geq SOC_{coo} \\ 0, & SOC_{scn} < SOC_{coo} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{scb2} = \begin{cases} P_{gbb2}, & SOC_{scn} \leq SOC_{coo} \\ 0, & SOC_{scn} > SOC_{coo} \end{cases}$$

超级电容 SOC_{scn} 与其端电压近似为正相关特性^[25],可采用正比例特性描述协调功率 P_{gbbi} ($i=1,2$) 随 SOC_{scn} 的变化,设 P_b 为蓄电池的一次功率指令。

$$P_{gbb1} = \begin{cases} P_b, & SOC_{scn} \geq SOC_{shigh} \\ P_b \left(\frac{SOC_{scn} - SOC_{coo}}{SOC_{shigh} - SOC_{coo}} \right), & SOC_{shigh} > SOC_{scn} \geq SOC_{coo} \\ 0, & SOC_{coo} > SOC_{scn} \end{cases}$$

$$P_{gbb2} = \begin{cases} P_b, & SOC_{scn} \leq SOC_{slow} \\ P_b \left(\frac{SOC_{coo} - SOC_{scn}}{SOC_{coo} - SOC_{slow}} \right), & SOC_{shigh} < SOC_{scn} \leq SOC_{coo} \\ 0, & SOC_{coo} < SOC_{scn} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{gbb1} 表示放电协调时,超级电容的放电功率指令; P_{gbb2} 表示充电协调下的充电功率指令。

根据式(11)绘制 P_{gbb} 曲线,见图9。

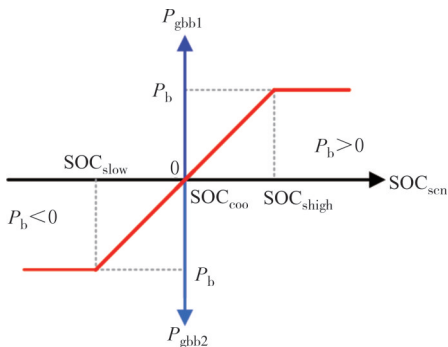


图9 P_{gbb} 随 SOC_{scn} 变化特性曲线

Fig.9 Characteristic curve of P_{gbb} changing with SOC_{scn}

超级电容的功率协调控制发挥不同 SOC_{scn} 下的超级电容的充放电的输出优势,以释放蓄电池的部分功率响应,同时调节自身 SOC_{scn} 状态。

3.3 考虑超级电容 SOC 优化的蓄电池功率协调设计

储能充放电能力随其SOC变化为反特性^[25],如过充时其放电能力增强而充电能力减弱;过放时其充电能力增强而放电能力减弱。超级电容作为电压源,其功率响应决定混合储能的瞬时功率输出,直接影响微网的运行,因此需要优化 SOC_{scn} 状态,保障其正常的充放电能力。

设 SOC_{scn} 处于正常区时,蓄电池进入常态模式,常态功率指令为 P_{btr} ,当 SOC_{scn} 偏离正常区时,蓄电池进入协调模式,协调功率指令为 P_{bs} 。令全状态 SOC_{scn} 下的蓄电池功率指令为 P_{bf} 。

$$P_{bf} = \begin{cases} P_{btr}, & SOC_{shigh} > SOC_{scn} > SOC_{slow} \\ P_{bs}, & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

选取正比例特性描述 P_{bs} ,见式(13)。

$$P_{bs} = \begin{cases} P_1, & SOC_{scn} \geq SOC_{smax} \\ P_1 \left(\frac{SOC_{scn} - SOC_{shigh}}{SOC_{smax} - SOC_{shigh}} \right), & SOC_{smax} > SOC_{scn} \geq SOC_{shigh} \\ P_2 \left(\frac{SOC_{slow} - SOC_{scn}}{SOC_{slow} - SOC_{smin}} \right), & SOC_{smin} < SOC_{scn} \leq SOC_{slow} \\ P_2, & SOC_{scn} \leq SOC_{smin} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_1 = P_{net} - P_{scmax}$; $P_2 = P_{net} - P_{scmin}$ 。 P_{scmax} 、 P_{scmin} 是超级电容的最大放电与充电功率。结合式(13),绘制了 P_{bs} 特性曲线,如图10所示。

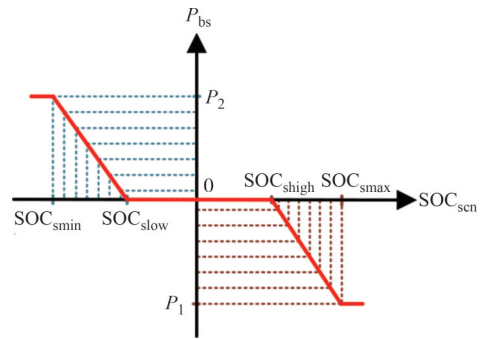


图10 P_{bs} 随 SOC_{scn} 变化特性曲线

Fig.10 Characteristic curve of P_{bs} changing with SOC_{scn}

当 SOC_{scn} 偏移正常区,蓄电池进入功率协调模式, P_{bs} 的强度取决于 SOC_{scn} 的偏移深度;当 SOC_{scn} 进入极限区,蓄电池以功率 P_1 (或 P_2) 作为协调功率指令,此时超级电容的响应功率为 P_{scmax} (或 P_{scmin}), SOC_{scn} 能以最快速度回到正常区。

3.4 混合储能子单元功率自主分配方法

图2描述的功率控制方案中,功率管理单元实现储能子单元功率分配.以积分器为控制单元,设计了如图11所示的功率自主分配方法.

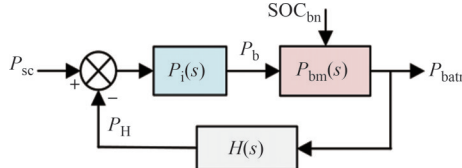


图11 储能子单元的功率自主分配方法

Fig.11 Adaptive power allocation method for energy subunits

图11中, P_{sc} 为超级电容的并网功率; P_{batr} 为蓄电池的一次功率指令; P_H 为超级电容余功率指令; P_b 为过程指令.现分析各函数具体内容.

$$P_b = (P_{sc} - P_H)P_i(s) = (P_{sc} - P_H) \frac{K_i}{s} \quad (14)$$

式中:功率分配函数 $P_i(s)$ 的本质为积分器.

$$P_{batr} = \begin{cases} P_{bmax} & , P_b > P_{bmax} \\ P_b & , P_{bmin} \leq P_b \leq P_{bmax} \\ P_{bmin} & , P_b < P_{bmin} \end{cases} \quad (15)$$

式中:对应 $P_{bm}(s)$ 函数, P_{bmax} 、 P_{bmin} 为蓄电池可用最大放电与充电功率,对应式(6)中 P_{batm} .

$$P_H = \begin{cases} 0 & , P_{bmin} \leq P_b \leq P_{bmax} \\ P_b - P_{batr} & , \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

式中:该式对应函数 $H(s)$,表示余功率函数,当蓄电池满功率输出也无法补偿母线净需求功率 P_{net} 时,超级电容承担余下的功率缺额 P_H .

建立图11对应的传递函数.

$$P_{batr}(s) = P_{sc}(s) \frac{P_i(s)P_{bm}(s)}{1 + P_i(s)P_{bm}(s)H(s)} \quad (17)$$

假设母线功率平衡且 P_b 未超调,可得 $H(s)=0$,此时图11处于开环状态,式(17)可简化为式(18).

$$P_{batr}(s) = P_{sc}(s) \frac{K_i}{s} \quad (18)$$

积分器对输入信号具有时间累加和空间调零作用,简称“时空调零”特性,频域上表现为高频滤除和时域上表现为延时,即:经式(18)若干周期调节后,稳态下 $P_{batr}(s)$ 以 $P_{sc}(s)$ 输入的满幅输出,且 $P_{sc}(s)=0$,调节周期由 K_i 控制.

结合式(2)可导出功率自主分配下的储能子单元的功率指令表达:

$$\begin{cases} P_{sc}(s) = P_{net}(s) \frac{s}{s + K_i} \\ P_{bat}(s) = P_{net}(s) \frac{K_i}{s + K_i} \end{cases} \quad (19)$$

t_1 时刻母线净需求功率 P_{net} 发生单位阶跃增大,子单元的功率响应如图12所示.

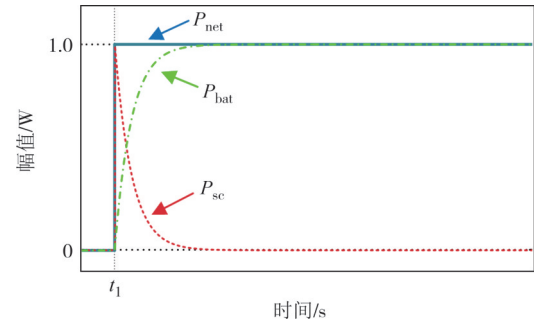


图12 P_{sc} 和 P_{bat} 的功率响应曲线

Fig.12 Power response of P_{sc} and P_{bat}

t_1 时刻 P_{net} 阶跃突变,超级电容迅速响应,提供峰值功率补偿,再渐减为0,蓄电池功率 P_{bat} 则从0渐增为1,承接了超级电容的功率转移.

综上可知,当母线功率失衡,超级电容补偿瞬时 P_{net} 缺额,等效为 P_{net} 的高频分量,经过 $P_i(s)$ 调节后高频响应 P_{sc} 以低频化信号 P_{batr} 转移至蓄电池输出,等效为 P_{net} 的低频分量.表明在该功率控制方案下,子单元的功率响应能自主分配.

4 仿真实验

基于Matlab/Simulink平台,搭建基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法仿真模型.

参数定义:设系统总需求功率为200 kVA,允许发生20%波动,可设母线功率波动为 ± 40 kW;选取A123-ANR26650M1型锂电池,单体参数为3.3 V/2.3 Ah,通过360节串联成列作为一组蓄电池;选取HCCap-48 V/200 F模组串并联,得到额定电压为1 248 V的超级电容单体,据此设置混合储能的仿真模型(小容量仿真有助于监测SOC动态变化).

储能单元的参数如表2所示.仿真对比如图13所示.设置三种功率分配策略仿真对比,1号策略仿真子单元功率自主分配模式,见图13(a);2号策略仿真子单元功率自主分配+超级电容功率协调模式,见图13(b);3号策略仿真基于多目标协调的功率自适应分配模式,见图13(c).

表2 储能单元设置参数

Tab.2 Parameters of the energy storage

超级电容参数	数值	蓄电池参数	数值
U_{sup}/V	1 350	$SOC_{lmax}/\%$	90
U_{sdown}/V	650	$SOC_{bhigh}/\%$	70
$SOC_{smax}/\%$	95	$SOC_{blow}/\%$	30
$SOC_{shigh}/\%$	80	$SOC_{lmin}/\%$	10
$SOC_{slow}/\%$	20	$SOC_{bn}/\%$	66
$SOC_{smin}/\%$	5		

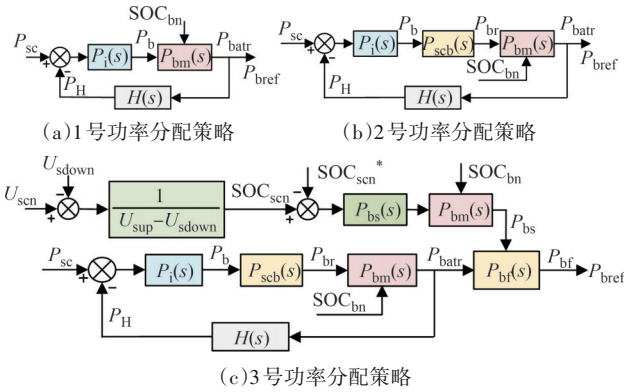


图13 仿真设置的三种功率分配策略

Fig.13 Three power allocation strategies for simulation

将 t_0 时刻定义为3号策略中超级电容的首动作时刻,仿真波形图中的小号蓝色圆圈及文字表示此刻功率分配模式发生切换。

工况1:当分布式发电单元新能源受实况条件影响而造成出力骤减,母线净需求功率 P_{net} 表现为突增变化.设 t_1 时刻 P_{net} 由平衡状态阶跃增为35 kW.设置超级电容 SOC_{scn} 在全状态下进行仿真,波形输出见图14~图18.

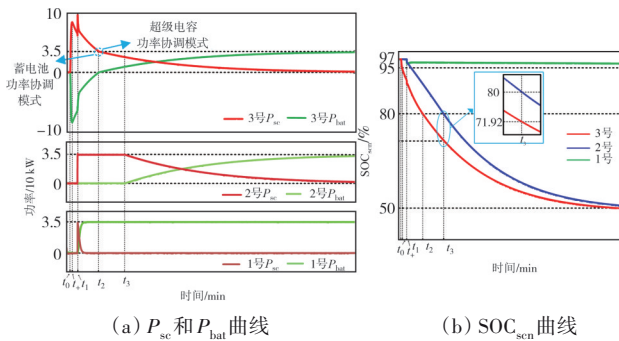
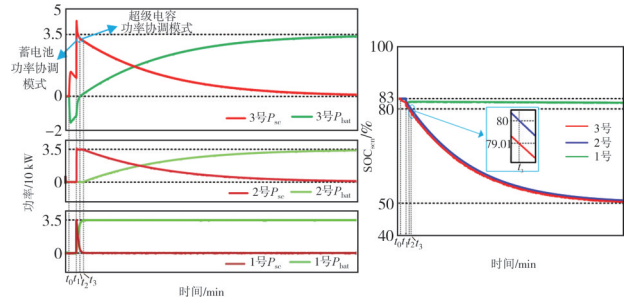
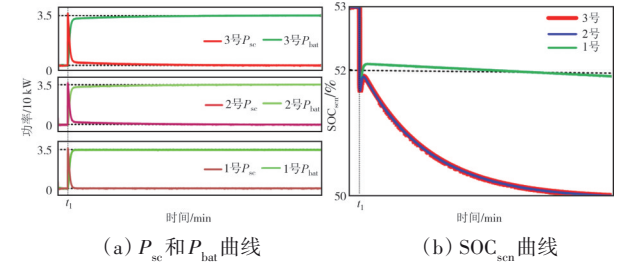
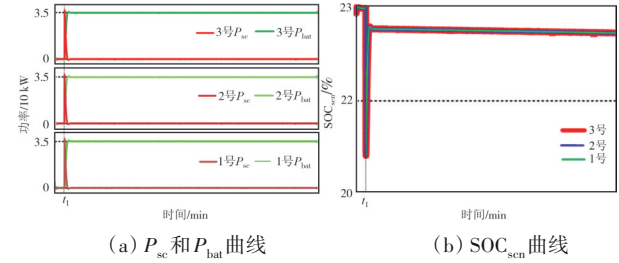
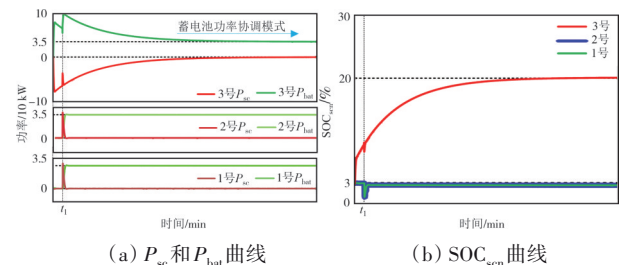
图14 初始 $SOC_{scn}=97\%$ 时输出波形Fig.14 System waveform when initial $SOC_{scn}=97\%$

图14中初始 $SOC_{scn}=97\%$, t_1 时刻净需求功率 P_{net} 由0突增为35 kW.在稳态下,图14(a)表明三种策略均能稳定补偿 P_{net} 缺额,由蓄电池承担全部功率缺额,超级电容不发生功率交互;从图14(b)中可知,

图15 初始 $SOC_{scn}=83\%$ 时输出波形Fig.15 System waveform when initial $SOC_{scn}=83\%$ 图16 初始 $SOC_{scn}=53\%$ 时输出波形Fig.16 System waveform when initial $SOC_{scn}=53\%$ 图17 初始 $SOC_{scn}=23\%$ 时输出波形Fig.17 System waveform when initial $SOC_{scn}=23\%$ 图18 初始 $SOC_{scn}=3\%$ 时输出波形Fig.18 System waveform when initial $SOC_{scn}=3\%$

2号与3号策略中 SOC_{scn} 最终维持在设定的安全区,而1号策略中超级电容始终处于过充状态。

在暂态调节中,1号策略输出的功率曲线符合自主分配设计原则:在 t_1 时刻,超级电容输出35 kW功率补偿母线功率的瞬时缺额,在自主分配控制下 P_{net} 平滑转移至蓄电池,稳态后超级电容进入待机状态,对应图14(b)中 SOC_{scn} 维持在过充极限区.2号策略

进入超级电容功率协调模式(协调蓄电池放电):在 $t_1 \sim t_3$ 时刻, $\text{SOC}_{\text{scn}} \geq \text{SOC}_{\text{shigh}}$, 超级电容承担全额 P_{net} 需求, SOC_{scn} 下降, 蓄电池处于待机状态; t_3 时刻后, $\text{SOC}_{\text{scn}} < \text{SOC}_{\text{shigh}}$, 蓄电池开始承担 P_{net} 需求, 此时 P_{sc} 随 SOC_{scn} 降低而减小, P_{bat} 随 SOC_{scn} 降低而增加, SOC_{scn} 的负变化率逐渐减小, 至 $P_{\text{sc}}=0$ 、 $P_{\text{bat}}=P_{\text{net}}$, 此时 $\text{SOC}_{\text{scn}}=\text{SOC}_{\text{smid}}$, 超级电容退出功率协调模式, 系统进入稳态. 3号策略中: 超级电容处于过充极限状态, 在 $t_0 \sim t_2$ 时刻, $\text{SOC}_{\text{scn}} > \text{SOC}_{\text{shigh}}$, 蓄电池进入充电协调模式, 该模式下蓄电池的充电功率由 SOC_{scn} 约束, 不受 P_{net} 强度影响, 此时超级电容以大功率放电, 使 SOC_{scn} 快速下降, t_1 时刻 P_{net} 阶跃突增后超级电容迅速动作, 在 P_{sc} 曲线上表现为功率尖峰; t_2 时 $\text{SOC}_{\text{scn}}=\text{SOC}_{\text{shigh}}$, 蓄电池退出功率协调模式; t_2 时刻后3号策略进入超级电容功率协调模式, 该过程与2号策略一致. 图14表明: 在功率自主分配策略基础上, 多目标协调策略与仅考虑超级电容协调策略都能调节超级电容 SOC_{scn} 状态, 但前者对 SOC_{scn} 优化的能力更强. 如在 t_3 时刻, 后者仅将 SOC_{scn} 优化至80%, 而前者将 SOC_{scn} 优化至71.92%, 其 SOC_{scn} 优化性能相较后者提高了10.10%.

图15中初始 $\text{SOC}_{\text{scn}}=83\%$, 在 $t_0 \sim t_2$ 时刻, 3号策略中蓄电池进行充电协调, t_2 时刻后超级电容进入放电协调. 2号策略中超级电容一直处于放电协调模式. t_3 时刻, 2号与3号策略中 $\text{SOC}_{\text{scn}}=\text{SOC}_{\text{shigh}}$, t_3 时刻后两种策略的运行过程一致. 由于 (t_1-t_0) 很小, 因此相比于2号策略, 3号策略对 SOC_{scn} 的差额优化有限, 仅为1.24%.

图14~图15表明: SOC_{scn} 偏移越深, 多目标协调策略的 SOC_{scn} 优化能力越强, 如图14~图15中的 SOC_{scn} 偏移深度加大, 在仅考虑超级电容协调策略将 SOC_{scn} 优化至 $\text{SOC}_{\text{shigh}}$ 时, 所提多目标协调策略对 SOC_{scn} 的差额优化效果从1.24%提高至10.10%.

图16中初始 $\text{SOC}_{\text{scn}}=53\%$, 2号与3号策略进入超级电容功率协调模式, 运行过程一致. 1号策略的暂态调节最快, 但超级电容 SOC_{scn} 状态最差.

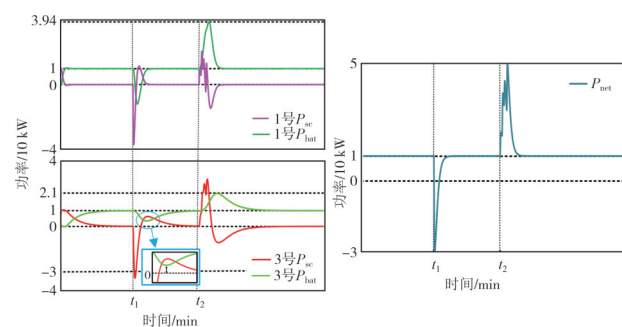
图17中初始 $\text{SOC}_{\text{scn}}=23\%$, 处于正常区, 系统进入功率自主分配模式, 3种策略输出一致.

图18中初始 $\text{SOC}_{\text{scn}}=3\%$, 处于过放极限状态. 在放电模式下, 2号与1号策略进入功率自主分配模式, 但无法调节 SOC_{scn} 状态; 3号策略进入蓄电池放电协调模式(协调优化 SOC_{scn} 状态), 将 SOC_{scn} 调节到正常区($\text{SOC}_{\text{scn}} \geq 20\%$). 图18表明: 设计的SOC管理和

多目标功率协调使超级电容具备了极限SOC状态下的功率输出与 SOC_{scn} 优化能力.

上述结果验证了基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法的可行性, 仿真输出的功率响应曲线中所表现出的功率特性符合超级电容和蓄电池的功率响应特性; 在功率自主分配策略的基础上, 多目标协调策略加强了对不同 SOC_{scn} 状态下的超级电容的功率响应性能的利用, 降低了蓄电池的总电能输出强度; 所设计的SOC特性分层管理, 加强了对超级电容 SOC_{scn} 状态的优化调节, 使超级电容在全 SOC_{scn} 状态下具备充放电能力. 这有效增强了混合储能的整体功率响应能力.

工况2: 模拟母线净需求功率 P_{net} 脉动式突变场景, 见图19(b), t_1 时刻 P_{net} 从+10 kW突变为-30 kW后快速恢复为+10 kW, t_2 时刻 P_{net} 从+10 kW突变为+50 kW后快速恢复为+10 kW. 设置超级电容 SOC_{scn} 处于正常状态. 仿真1号和3号策略如图19(a)所示.



(a) P_{sc} 和 P_{bat} 曲线 (b) P_{net} 曲线

图19 工况2下系统输出波形

Fig.19 System output waveform of simulation 2

图19中, P_{net} 发生正负极性变化的高频脉动突变. t_1 时刻 P_{net} 突变过程发生了两次极性切换, 3号策略中 P_{bat} 未发生充放电状态转换, 而1号策略发生了两次状态切换. t_2 时刻 P_{net} 突增中伴随高频变化的小扰动功率信号, 相比1号策略, 3号策略的 P_{bat} 曲线中, 功率调整时间从 t_3 增至 t_4 , 蓄电池的最大功率深度从39.4 kW降至21 kW, 降低了46.70%. 图19表明, 多目标协调策略有效减缓了蓄电池的功率变化, 降低了蓄电池的功率响应深度.

在功率协调模式下, 混合储能在响应高频过零变化的功率时, 有效减少子单元正负性功率抵消造成的功率浪费情况, 这降低了子单元的功率响应深度, 增强了混合储能的功率补偿性能. 对蓄电池而言, 实质上是加强其使用性能, 延长其使用寿命.

5 结论

本文对应用于孤岛微网中的混合储能的整体功率响应控制及子单元功率分配问题开展研究,提出一种基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法,实现了子单元功率在4个维度协调的自适应分配控制,总结如下:

1) 设计了一套可应用于孤岛电力系统中的混合储能整体功率控制方案,能调节母线的功率潮流和自适应分配子单元功率。

2) 所提自主分配策略下的功率输出符合子单元的功率响应特性,超级电容响应瞬时功率需求,蓄电池承担超级电容的转移功率,其功率曲线缓慢变化,等效于承担稳态的功率需求。

3) 在自主分配策略基础上,提出了多目标协调策略来加强子单元SOC管理与功率协调。实现了当 SOC_{scn} 处于极限区时,利用蓄电池优化 SOC_{scn} ,相比于仅考虑超级电容功率协调,多目标协调下的 SOC_{scn} 优化性能最大能提高10.10%;当 SOC_{scn} 处于正常区时,利用超级电容协调蓄电池的功率输出,减小了蓄电池的充放电状态转换次数与功率深度,以工况2为例,多目标协调下蓄电池的充放电转换次数减少2次和功率响应深度降低了46.70%。

参考文献

- [1] 伍文华,周乐明,陈燕东,等.序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J].中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411-1421.
WU W H, ZHOU L M, CHEN Y D, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1420. (in Chinese)
- [2] PENG Y. Industrial design and application of a railway electric special power supply[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 317-328.
- [3] GUO J, CHEN Y D, LIAO S H, et al. Low frequency oscillation analysis of VSM-based VSC-HVDC systems based on the five-dimensional impedance stability criterion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 4(69): 3752-3763.
- [4] 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 Y D, TAN W J, ZHOU X P, et al. An autonomous frequency split power control method for hybrid energy storage[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(4): 65-73. (in Chinese)
- [5] 陈泽西,孙玉树,张妍,等.考虑风电波动率的储能系统优化配置策略[J].湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(8): 60-68.
CHEN Z X, SUN Y S, ZHANG Y, et al. Optimal configuration strategy of energy storage system considering wind power fluctuation rate [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(8): 60-68. (in Chinese)
- [6] WANG G, KONSTANTINOU G, TOWNSEND C D, et al. A review of power electronics for grid connection of utility-scale battery energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1778-1790.
- [7] JIA L, ZHU Y, DU S, et al. Analysis of the transition between multiple operational modes for hybrid AC/DC microgrids [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(1): 49-57.
- [8] GU S, DU X, SHI Y, et al. Power control for grid-connected converter to comply with safety operation limits during grid faults [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 866-878.
- [9] 谢志佳,马会萌,靳文涛.大规模电池储能系统PCS拓扑结构分析[J].电力建设, 2012, 33(8): 22-26.
XIE Z J, MA H M, JIN W T. Analysis on PCS topological structure for large-scale battery energy storage system [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(8): 22-26. (in Chinese)
- [10] LIU J, M Y, I T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [11] 叶小晖,刘涛,吴国阳.电池储能系统的多时间尺度仿真建模研究及大规模并网特性分析[J].中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2635-2644.
YE X H, LIU T, WU G Y. Research on multi-time scale simulation modeling of battery energy storage system and analysis of large-scale grid-connected characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2635-2644. (in Chinese)
- [12] 陶琼,桑丙玉,叶季蕾,等.高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J].高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.
TAO Q, SANG B Y, YE J L, et al. Optimal configuration method of distributed energy storage systems in distribution network with high penetration of photovoltaic [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2158-2165. (in Chinese)
- [13] 王凯丰,谢丽蓉,乔颖,等.电池储能提高电力系统调频性能分析[J].电力系统自动化, 2022, 46(1): 174-181.
WANG K F, XIE L R, QIAO Y, et al. Analysis of battery energy storage to improve frequency regulation performance of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 174-181. (in Chinese)
- [14] 文波,秦文萍,韩肖清,等.基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J].电网技术, 2015, 39(4): 892-898.
WEN B, QIN W P, HAN X Q, et al. Control strategy of DC microgrid hybrid energy storage system based on voltage droop

- method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898. (in Chinese)
- [15] ALLEGRE A L, BOUSCAYROL A, TRIGUI R. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications [C]//2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, USA, IEEE, 2009.
- [16] 孟康, 解璞, 张乐, 等. 直流光储系统混合储能分频控制策略研究[J]. 电气应用, 2018, 37(11): 14-17+23.
- MENG K, XIE P, ZHANG L, et al. Research on frequency division control strategy of hybrid energy storage in DC optical storage system [J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(11): 14-17+23. (in Chinese)
- [17] XU Q W, XIAO J F, WANG P, et al. A decentralized control strategy for autonomous transient power sharing and state of charge recovery in hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1443-1452.
- [18] BI K, SUN L, AN Q, et al. Active SOC balancing control strategy for modular multilevel super capacitor energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 1-1.
- [19] 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, 2013, 29(3): 1469-1479.
- [20] FARASAT M, FORESTIERI J N. Energy flow control and sizing of a hybrid battery-supercapacitor storage in MVDC shipboard power systems [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2020, 10(3): 275-284.
- [21] ZHANG Q, LI G. Experimental study on a semi-active battery supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicle application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1014-1021.
- [22] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.
- LI B, BAO H L, GUO L. Energy storage control strategy for island system of optical-storage microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8-15. (in Chinese)
- [23] MANANDLHAR U, TUMMURU N R, KOLLIMALLA S K, et al. Validation of faster joint control strategy for battery and super capacitor based energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3286-3295.
- [24] 李保恩, 李献伟, 毋炳鑫. 基于储能SOC状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 108-114.
- LI B E, LI X X, WU B X. Research on energy optimal dispatching strategy of microgrid based on energy SOC [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 108-114. (in Chinese)
- [25] 李亚楠. 平抑风电功率波动的混合储能系统容量配置及控制的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- LI Y N. Research on capacity allocation and control of HESS for suppressing wind power fluctuations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)