

# 基于老化成本实时次梯度的异构储能系统 功率分配策略

刁锐<sup>1</sup>, 胡泽春<sup>1\*</sup>, 钱伟杰<sup>2</sup>, 刘维亮<sup>2</sup>, 宋永华<sup>3</sup>

(1. 清华大学电机系, 北京市海淀区 100084; 2. 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司, 浙江省嘉兴市 314033; 3. 智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学), 中国澳门特别行政区 氹仔 999078)

## Power Allocation Strategy for Heterogeneous Energy Storage System Based on Real-time Subgradients of Aging Cost Function

DIAO Rui<sup>1</sup>, HU Zechun<sup>1\*</sup>, QIAN Weijie<sup>2</sup>, LIU Weiliang<sup>2</sup>, SONG Yonghua<sup>3</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314033, Zhejiang Province, China;

3. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau), Taipa 999078, Macau SAR, China)

**ABSTRACT:** With the promotion of lithium-ion batteries and the development of hybrid energy storage technologies, the difference of energy storage units in the energy storage system becomes more and more significant, which puts forward challenges for power allocation. In order to reduce the aging cost of energy storage systems during operation, this paper proposes a power allocation strategy based on the cycle-based aging feature of each energy storage unit to reduce aging costs. An online rainflow counting method is proposed for real-time updating of power-cycle mapping relationships, then the real-time subgradients of the aging cost with respect to charging and discharging power are obtained by using the chain rule of differentiation. The reciprocal of real-time subgradients is used as power allocation weight to achieve equalizing aging costs of energy storage units. A transferrable power allocation algorithm is further developed, which allocates power according to weights while considering power limits and the state of charge (SOC) boundary of energy storage units. In an energy storage system participating in secondary frequency regulation, the proposed strategy can reduce the aging cost by 8.08% and 10.34%, respectively, compared with two commonly used power allocation methods (based on maximum power and residual energy).

**KEY WORDS:** battery energy storage system; power allocation; aging cost; rainflow counting; real-time subgradient

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFB2403000); 国家电网有限公司科技项目(5419-202199514A-0-5-ZN)。

National Key R&D Program of China(2022YFB2403000); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5419-202199514A-0-5-ZN).

**摘要:** 随着锂离子电池的商业化推广和混合储能技术的发展, 规模化储能系统可能存在异构特性。组成异构储能系统的储能单元之间存在差异, 对储能系统内部功率分配提出更高的要求。为降低异构储能系统运行过程中的老化成本, 首先, 给出基于循环的老化模型用于计算不同储能单元老化成本; 然后, 提出一种无差在线雨流计数法实现功率与循环映射关系的实时更新, 并使用链式法则得到储能系统老化成本关于充放电功率的实时次梯度, 基于次梯度计算功率分配权重; 最后, 提出一种基于分配权重的功率迭代分配算法, 考虑储能单元的功率边界和荷电状态边界。对分期建设的储能系统参与二次调频的场景进行仿真, 结果表明, 所提策略相比常用的两种功率分配方法(基于最大功率和基于剩余能量的分配策略)能够分别降低 8.08%和 10.34%的老化成本。

**关键词:** 电池储能系统; 功率分配; 老化成本; 雨流计数法; 实时次梯度

## 0 引言

随着我国能源转型的不断推进, 以风力发电和光伏发电为代表的可再生能源发电在电网中的装机容量和发电占比不断提高<sup>[1]</sup>。可再生能源发电具有间歇性和随机性, 对电力系统发电和用电的实时平衡控制带来了前所未有的挑战<sup>[2]</sup>。在电力系统发、输、配、用侧建设储能系统, 是解决发电能力与用电需求时空矛盾的重要方案<sup>[3]</sup>。近几年, 除了抽水蓄能电站迎来新一波建设外, 各类新型储能技术也得到了快速的发展。目前, 电化学储能是应用最为广泛的新型储能技术。

历史运行情况、原材料、制作工艺、材料体系、充放电反应机理等因素都会影响电化学储能单元的性能和成本<sup>[4]</sup>。由多个性能和成本不同的储能单元组成的储能系统被称为异构储能系统。异构现象是普遍存在且无法避免的。在目前实际项目建设过程中，通过购买同一个厂家同批生产的同一型号储能单元组成储能系统来减小不同储能单元之间差异，此时可以近似认为储能系统为同构系统。但随着大规模储能电站分期建设、退役电池梯次利用<sup>[5]</sup>、混合储能<sup>[6-7]</sup>等应用场景的出现，储能系统的异构性更为显著，针对同构储能系统设计的储能能量管理与运行控制策略存在实际的局限性。

目前，相关研究主要从两方面着手解决储能系统异构问题，一方面，通过更为准确的电池评估、分选和重组提高储能单元的一致性<sup>[8-9]</sup>，使其可以近似按照同构储能系统运行；另一方面，提出适用于异构储能的运行控制策略，如更高效的电池单元均衡控制<sup>[10]</sup>、更智能的储能系统能量管理<sup>[11]</sup>等。其中，储能系统的内部功率分配环节直接影响储能系统的性能、经济性和安全性，因此得到了研究人员的广泛关注。

文献[12]为分布式混合储能提出一种考虑储能单元功率模式的参数评估方法和分层控制策略。控制策略下层基于动态下垂对输出功率进行分配，上层以荷电状态(state of charge, SOC)一致为目标，对输出功率进行二次调整。文献[13]以储能电池的老化成本增量作为一致性变量，为含有不同老化特性电池组的分布式储能系统提出一种基于一致性算法的功率分配策略，以降低电池寿命损耗。文献[14]提出一种考虑电池组健康状态的储能系统能量管理方法，先根据指令大小确定工作的电池组数量，并将电池健康状态融入到电池组充放电优先级排序规则中，再建立以最小化 SOC 偏差和放电深度为目标的最优功率分配问题。实现“新电池深充深放、旧电池浅充浅放”的效果。文献[15]提出一种梯次利用电池储能系统分段控制策略，首先进行时间分段并对每个时间分段的储能能量需求进行建模，得到所需电池数目和能量容量，随后在每个时间分段考虑循环过程选择合适的电池组进行响应。

目前的功率分配研究已经开始关注各组储能单元的健康状态和老化成本，但多为定性优化，对于储能系统老化建模较为粗糙，且功率分配策略大多仅能应用在特定异构场景。缺少应用场景广泛、

规则公平严谨的功率分配定量优化方案。

鉴于以上不足，本文给出一种储能系统老化成本本次梯度的计算方法，并基于此提出一种功率分配策略降低异构储能系统的运行成本。首先，介绍基于循环信息计算储能系统老化成本的储能老化模型；其次，提出一种在线雨流计数法，解决传统雨流计数法只能在评价周期结束后才能统计该周期内循环信息的问题。所提方法实时更新循环信息，并在评价周期结束时得到与传统雨流计数法相同的结果；再次，分析在线雨流计数法得到的循环与充放电功率之间的映射关系，并使用链式法则得到储能系统老化成本关于充放电功率的实时次梯度；最后，提出一种实用的基于分配权重的功率分配算法，分配权重根据次梯度实时更新。在储能系统参与二次调频的应用模式下验证所提功率分配策略的优越性，在所设仿真场景中，采用所提功率分配方法的异构储能系统老化成本相比于使用传统功率分配方案可降低 10%左右。

## 1 异构储能系统

### 1.1 异构储能系统架构

储能系统独立参与电力市场提供服务有功率和容量的门槛，安装在发电侧联合运行的储能系统也需要和发电设备的额定功率在同一数量级，这对电力储能系统功率和容量提出一定的要求。单体功率和容量较小的新型储能技术需要使用系统集成技术组成满足需求的储能系统。

异构储能系统的异构性具体表现为不同储能单元的参数差异。异构储能系统中储能单元的参数差异可以是功率、容量、老化特性、响应特性、成本等一个或多个指标的不同，因此异构储能系统的概念包含由不同储能介质组成的混合储能系统，并且不限定为集中式储能或分布式储能。

当系统集成损耗可以忽略、储能单元的动态响应过程足够快，则有储能系统总输出功率  $P_{\text{all},t}$  与各储能单元输出功率  $P_{b,t}$ ,  $b=1, \dots, B$  之间的平衡关系：

$$P_{\text{all},t} = \sum_{b=1}^B P_{b,t} \quad (1)$$

式中  $B$  为储能系统中的储能单元个数。

### 1.2 异构储能系统功率分配

异构储能系统为了实现对外一体化响应、对内智能化自治管理，通常采用分层控制。在储能分层控制系统中，能量管理系统(energy management

system, EMS)负责接收上层控制中心下发的功率指令或自行计算储能系统的目标功率,并根据不同储能单元的运行状态将目标功率分配给多个储能变流器(power conversion system, PCS)执行。

## 2 基于循环的储能单元老化模型

### 2.1 基于循环信息计算的储能老化

多种类型储能设备的老化受循环次数和循环深度的影响,通常一次深度充放电循环导致的储能系统老化高于累积充放电能量相同的多次浅充浅放循环导致的老化<sup>[16-17]</sup>。不同储能介质对循环深度的敏感程度显著不同。例如电化学储能技术中,镍锰钴(NMC)三元锂电池、镍钴铝(NCA)三元锂电池、铅酸电池的老化程度受循环深度的影响较为显著,而全钒液流电池、磷酸铁锂电池的老化程度受循环深度的影响较小<sup>[16]</sup>。以磷酸铁锂电池和镍锰钴三元锂电池为例,其全生命周期循环次数和循环深度之间的关系如图1<sup>[17]</sup>所示。不同厂家、不同型号、不同批次的电池对循环深度的敏感程度也有差异。

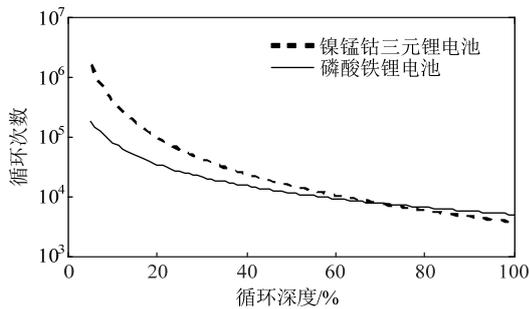


图1 磷酸铁锂电池(LIP)和镍锰钴三元锂电池(NCM)循环次数与循环深度的相关关系

Fig. 1 Correlation between cycle times and cycle depth of Lithium-Iron-Phosphate(LIP) battery and Nickel-Cobalt-Manganese(NCM) ternary battery

目前一些研究中使用多项式函数描述储能单元的循环寿命(次数)与循环深度之间的关系,如文献[18]采用3阶多项式、文献[19]采用5阶多项式。也有研究人员使用幂函数建模储能单元循环次数与循环深度之间的关系,如文献[20-24]。相关参数一般由储能设备厂家提供,也可以通过拟合循环实验结果得到。本文参考文献[20-24],使用幂函数描述储能单元完成单次循环的老化程度 $\Omega$ 和循环深度 $u$ 之间的关系:

$$\Omega(u) = k_1 u^{k_2} \quad (2)$$

式中: $k_1$ 、 $k_2$ 为老化系数, $k_1$ 越大,相同循环深度下的单次循环造成的老化程度越大; $k_2 \geq 1$ ,当 $k_2=1$

时,老化程度与循环深度呈线性关系,此时累积放电能量相同的行为具有相同的老化, $k_2$ 越大,老化程度对循环深度越敏感。

实际上,只要函数 $\Omega(u)$ 为过零单增凸函数,函数的具体形式就不影响后续所述方法的使用。

### 2.2 雨流计数法

运行一段时间的储能设备老化程度可以根据在这段时间内的充放电循环次数和循环深度计算,但是,如何统计储能的充放电循环深度和次数是一个有挑战性的问题。最常见的方式是将相邻两个极值点的差值作为循环深度,但这种方法在充放电状态频繁切换的场景下将导致深度充放电循环被切割成一系列浅充浅放循环。

近几年,一些研究将雨流计数法应用于储能老化评估<sup>[19,25]</sup>。雨流计数法是一种循环计数方法,在材料疲劳寿命计算中运用非常广泛。

为了得到长度为 $T$ 的储能单元荷电状态序列 $\mathbf{x}=\{x_1, x_2, \dots, x_T\}$ 所包含的循环信息,首先需要提取出该荷电状态序列的全部 $K$ 个极值点,按照出现的先后顺序排列组成极值点序列 $\mathbf{s}=\{s_1, s_2, \dots, s_K\}$ 。然后将极值点序列和极值点时间序列 $\mathbf{t}=\{t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sK}\}$ 输入雨流计数算法中,得到这段时间的循环个数 $Y$ 和每个循环的信息,通常包含循环深度 $u$ 、循环类型 $\kappa$ 、循环起始时间 $t^{\text{start}}$ 、半循环结束时间 $t^{\text{half}}$ 等。循环类型 $\kappa=1$ 表示全循环, $\kappa=1/2$ 表示半循环。循环起始时间 $t^{\text{start}}$ 为循环开始极值点的时间。半循环结束时间 $t^{\text{half}}$ 为半循环结束极值点的时间,为全循环转折极值点的时间。

储能单元的荷电状态向量 $\mathbf{x}_{T \times 1}$ 可以根据初始荷电状态 $x_0$ 、充电功率向量 $\mathbf{c}_{T \times 1}=(c_1, c_2, \dots, c_T)^T$ 和放电功率向量 $\mathbf{d}_{T \times 1}=(d_1, d_2, \dots, d_T)^T$ 计算得到,且雨流计数法的结果不受初始荷电状态数值的影响。因此雨流计数法可以表示为

$$Y, \mathbf{u}_{Y \times 1}, \mathbf{\kappa}_{Y \times 1} = \text{Rainflow}(\mathbf{c}_{T \times 1}, \mathbf{d}_{T \times 1}) \quad (3)$$

式中: $Y$ 为循环次数; $\mathbf{u}_{Y \times 1}$ 、 $\mathbf{\kappa}_{Y \times 1}$ 分别为 $Y$ 个循环的循环深度和循环类型组成的列向量。

雨流计数算法不唯一,常见算法有“塔顶法”、“三点法”和“四点法”<sup>[26]</sup>。塔顶法更加直观,而三点法、四点法更容易编程实现。本文所使用的雨流计数算法为三点法,是目前应用较为广泛的雨流计数算法,已被收录为MATLAB软件的内置函数,具体算法见附录A。图2展示了一个雨流计数法的

结果示例。其中：极值点  $s_1s_2$ 、 $s_9s_{10}$  分别组成放电半循环  $\psi_1$ 、 $\psi_4$ ；极值点  $s_2s_9$  组成充电半循环  $\phi_1$ ；极值点  $s_3s_6$ 、 $s_7s_8$  分别组成放电全循环  $\psi_2$ 、 $\psi_3$ ；极值点  $s_4$  与  $s_5$  组成充电全循环  $\phi_2$ 。可见，深度充电半循环  $\phi_1$  的辨识不受截断它的放电全循环  $\psi_2$  影响，而放电全循环  $\psi_2$  的辨识又不受截断它的  $\phi_2$  和  $\psi_3$  影响。

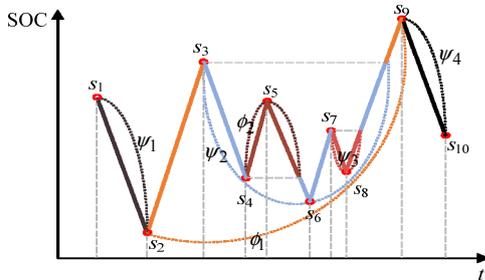


图 2 雨流计数法结果示例  
Fig. 2 A demonstration of rainflow counting method results

上述为雨流计数法简要介绍，省略了与后文内容无关部分，详细雨流计数法的介绍参见文献[27]。

### 2.3 基于循环的储能单元老化模型

根据 2.1 和 2.2 节的介绍，基于循环的储能单元老化模型可建模为式(2)–(5)。其中，式(4)和(5)分别如下：

$$F(\mathbf{c}_{T \times 1}, \mathbf{d}_{T \times 1}) = D(\mathbf{u}_{Y \times 1}, \mathbf{\kappa}_{Y \times 1}) E_r A \quad (4)$$

$$D(\mathbf{u}_{Y \times 1}, \mathbf{\kappa}_{Y \times 1}) = \sum_{y=1}^Y \kappa_y \Omega(u_y) \quad (5)$$

式中： $F(\mathbf{c}_{T \times 1}, \mathbf{d}_{T \times 1})$  为由充放电功率向量决定的储能单元老化成本； $E_r$  为储能单元容量，kW·h； $A$  为储能单元单位容量成本，元/(kW·h)； $D(\mathbf{u}_{Y \times 1}, \mathbf{\kappa}_{Y \times 1})$  为由该时段  $Y$  个循环的循环深度和循环类型决定的储能系统老化程度，取值为 0~1， $D=1$  表示储能单元在该时段内由全新变为报废， $D=0$  表示储能单元在该时段没有老化。

上述基于循环的储能单元老化模型可以直接应用在一些场景。

场景 1：储能单元离线老化成本评估。如果已知一段时间的储能单元充放电功率向量  $\mathbf{c}_{T \times 1}$ 、 $\mathbf{d}_{T \times 1}$ ，则可以通过该模型离线评估储能单元的老化成本。相比于传统的基于单位放电能量的储能老化模型，基于循环的老化模型考虑了充放电循环深度对于储能单元老化的影响。但离线评估结果难以用于实时功率分配策略的制定。

场景 2：功率分配滚动时序优化。如果储能单元未来一段时间的目标功率曲线已知，则可以建立

以最小化储能单元老化成本为目标的最优功率分配问题<sup>[23]</sup>。但在实际的应用场景中，储能单元目标功率曲线难以准确预测，且求解使用的次梯度算法收敛较慢，难以满足功率分配的实时性要求。

## 3 在线雨流计数法及实时次梯度

传统雨流计数法需要在运行完全确定后，才能得到循环信息，这是基于循环的老化模型用于在线运行的关键障碍。为了解决这个问题，本节提出一种在线雨流计数法，实时统计循环信息，并在运行过程中不断更新结果。当获得完整的运行信息后，所提的在线雨流计数法将得到与“三点法”相同的结果，因此它是无差的。基于在线雨流计数法的结果和功率-循环映射关系，可以进一步计算储能单元老化成本关于充放电功率的实时次梯度，并将实时次梯度的倒数作为储能单元功率分配的权重以实现不同储能单元增量老化成本近似相同的目标。

### 3.1 无差在线雨流计数法

本文所提的在线雨流计数法通过不断更新和维护极值点序列，实现循环信息的更新和统计。相比于文献[18,28]中提出的在线雨流类算法，所提方法使用变长的极值点序列动态存储历史关键极值点，避免传统在线雨流类算法运行过程中极值点的过早配对而导致一些全循环被拆分为半循环的问题。

无差在线雨流计数法需要为每个储能单元维护一个极值点序列  $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_j\}$ ，记录还未稳定配对的极值点(稳定配对是指两个极值点共同确定一个循环，并且这种配对关系不会再因后续的充放电过程而发生改变)。详细的极值点序列的更新、增加、判断、删除的规则如下。

更新：在运行过程中，储能单元的实时荷电状态始终为极值点序列中的最后一个极值点，需不断更新此数值。图 3(a)表示一种持续充电的情况，极值点序列中最后一个极值点  $a_j$  的数值不断增大。

增加：在运行过程中，当出现储能单元由充电转为放电或由放电转为充电时，新产生的极值点将会插入极值点序列中。如图 3(b)所示， $a_j$  为新插入极值点序列的极值点，最后一个极值点变为  $a_{j+1}$ 。

判断和剔除：每次极值点序列更新和增加极值点时，需要判断序列内的极值点是否都是不稳定配对的极值点，稳定配对的极值点将被剔除。

1) 当极值点序列中的数据小于 3 个，不对极

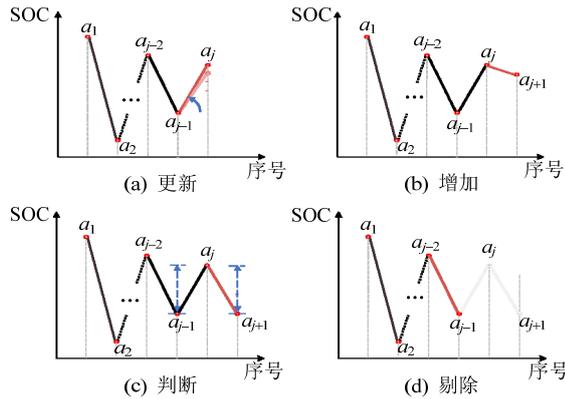


图3 极值点序列更新、增加、判断和删除示例

Fig. 3 A demonstration of updating, adding, comparing, and deleting extreme point vectors

值点序列做任何处理;

2) 当极值点序列中的数据等于3个,若3个极值点的大小关系满足 $|a_2 - a_1| \leq |a_3 - a_2|$ ,则记录循环深度为 $|a_2 - a_1|$ 的半循环,并从序列中剔除极值点 $a_1$ ,后续极值点 $a_2$ 和 $a_3$ 的序号减1,即 $a_2 \rightarrow a_1, a_3 \rightarrow a_2$ 。

3) 当极值点序列中的数据大于3个(假设为 $j$ 个),若最后3个极值点的大小关系满足 $|a_{j-1} - a_{j-2}| \leq |a_j - a_{j-1}|$ ,则记录循环深度为 $|a_{j-1} - a_{j-2}|$ 的全循环,并从极值点序列中剔除极值点 $a_{j-1}$ 、 $a_{j-2}$ ,后续极值点 $a_j$ 的序号减2,即 $a_j \rightarrow a_{j-2}$ 。随后继续判断序列中最后3个极值点的大小关系,直至没有极值点被剔除。图3(c)和(d)分别展示了极值点序列数据长度为 $j+1$ 时的一次判断和剔除过程。

### 3.2 传统雨流计数法功率与循环的关系

为了更好地理解在线雨流计数法中实时功率与循环的关系,首先说明传统雨流计数法结果中功率与循环的关系。

从“峰”开始,在“谷”结束半循环的循环被称为放电循环 $\psi$ ;从“谷”开始,在“峰”结束半循环的循环被称为充电循环 $\phi$ 。当时段 $t$ 迟于循环的起始时间 $t^{\text{start}}$ ,早于循环的半循环结束时间 $t^{\text{half}}$ ,称为时段 $t$ 属于该循环,表示为 $t \in \psi/\phi$ 。

一个循环的循环深度是属于该循环的全部时段的充放电功率累积的结果。对于采用以 $\tau$ 作为离散控制周期的储能单元来说,每个充电循环 $\phi$ 的循环深度和每个放电循环 $\psi$ 的循环深度可以分别用式(6)和(7)计算。

$$u_\phi = \sum_{t \in \phi} \left( \frac{\tau \eta_c}{E_r} c_t - \frac{\tau}{\eta_d E_r} d_t \right) \quad (6)$$

$$u_\psi = \sum_{t \in \psi} \left( \frac{\tau}{\eta_d E_r} d_t - \frac{\tau \eta_c}{E_r} c_t \right) \quad (7)$$

式中 $\eta_c$ 和 $\eta_d$ 分别为储能单元的充电和放电效率。

时段的属于关系是分析充放电循环与功率映射关系的关键。时段 $t$ 所属于的全部充电循环组成集合 $\Phi_t$ ,所属于的全部放电循环组成集合 $\Psi_t$ 。时段 $t$ 的充放电功率变化将会影响 $\Phi_t$ 和 $\Psi_t$ 包含的全部循环的循环深度。根据式(4)~(7),使用链式法则,得到储能单元的老化成本 $F(\mathbf{c}, \mathbf{d})$ 对于时段 $t$ 充电功率 $c_t$ 和放电功率 $d_t$ 的次梯度:

$$\frac{\partial F(\mathbf{c}, \mathbf{d})}{\partial c_t} = \tau \eta_c A \left[ \sum_{\phi \in \Phi_t} \kappa_\phi \Omega'(u_\phi) - \sum_{\psi \in \Psi_t} \kappa_\psi \Omega'(u_\psi) \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{c}, \mathbf{d})}{\partial d_t} = \frac{\tau A}{\eta_d} \left[ -\sum_{\phi \in \Phi_t} \kappa_\phi \Omega'(u_\phi) + \sum_{\psi \in \Psi_t} \kappa_\psi \Omega'(u_\psi) \right] \quad (9)$$

关于功率-循环映射关系及老化成本函数次梯度更详细的介绍参见文献[29]。

### 3.3 在线雨流计数法实时功率与循环的关系

在实时功率分配问题中,仅关注当前时段的充放电功率和受其影响的循环。

在前一时段储能单元为充电状态的情况下,若当前时段的指令依然为充电指令,足够小的充电功率和控制时间间隔可以认为当前时段 $t$ 依然属于上一时段 $t-1$ 所属的循环,当前时段 $t$ 的充电功率将进一步增加充电循环深度。根据在线雨流计数法的结果,当前时段 $t$ 仅属于极值点序列中最后两个元素构成的不稳定半循环,因此长度为 $j$ 的极值点序列的最后两个极值点的差值的绝对值 $|a_j - a_{j-1}|$ 就是当前充电功率所属唯一循环的循环深度。实时充电功率 $c_t$ 与当前充电循环深度 $u_\phi$ 的关系可表示为

$$u_\phi = |a_j - a_{j-1}| + \frac{\tau \eta_c}{E_r} c_t \quad (10)$$

根据式(4)、(5)和(10),得到储能单元老化成本对于当前时段 $t$ 充电功率的次梯度:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(c_t, d_t)}{\partial c_t} &= \tau \eta_c A \frac{1}{2} \Omega'(|a_j - a_{j-1}| + \frac{\tau \eta_c}{E_r} c_t) \approx \\ &\tau \eta_c A \frac{1}{2} \Omega'(|a_j - a_{j-1}|) \end{aligned} \quad (11)$$

若当前时段的指令由充电变为放电,将产生一个新的极值点并开始形成一个不稳定的放电半循环。当储能能在单个控制时间间隔内能够充放的电量明显小于储能额定容量时,不稳定放电半循环的循环深度可近似认为是零。

$$\frac{\partial F(c_t, d_t)}{\partial d_t} = \frac{\tau A}{\eta_d} \frac{1}{2} \Omega'(\frac{\tau}{\eta_d E_r} d_t) \approx \frac{\tau A}{\eta_d} \frac{1}{2} \Omega'(0) \quad (12)$$

同理，若前一时段储能单元为放电状态，实时放电功率  $d_t$  与当前放电循环深度  $u_\psi$  的关系可表示为

$$u_\psi = |a_j - a_{j-1}| + \frac{\tau}{\eta_d E_r} d_t \quad (13)$$

老化成本对充放电指令的次梯度可表示为：

$$\frac{\partial F(c_t, d_t)}{\partial c_t} = \tau \eta_c A \frac{1}{2} \Omega' \left( \frac{\tau \eta_c}{E_r} c_t \right) \approx \tau \eta_c A \frac{1}{2} \Omega'(0) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(c_t, d_t)}{\partial d_t} &= \frac{\tau A}{\eta_d} \frac{1}{2} \Omega' \left( |a_j - a_{j-1}| + \frac{\tau}{\eta_d E_r} d_t \right) \approx \\ &\frac{\tau A}{\eta_d} \frac{1}{2} \Omega' \left( |a_j - a_{j-1}| \right) \end{aligned} \quad (15)$$

函数  $\Omega(u)$  为过零单增凸函数，因此  $\Omega'(u)$  为值域为正数的单调增函数，由此，根据式(11)和(15)可知，充电(放电)功率的次梯度会随着储能持续充电(放电)而逐渐增加。根据式(12)和(14)可知，紧接着放电(充电)后的充电(放电)功率的次梯度数值为取值范围内的最小值。

### 3.4 功率分配权重及简单功率分配

在包含  $B$  个储能单元的储能系统中，储能单元  $b$  的充放电功率分配权重  $w_{c,t,b}$  和  $w_{d,t,b}$  为充放电次梯度的倒数。

$$\begin{cases} w_{c,t,b} = \frac{1}{[\partial F_b(c_{t,b}, d_{t,b})]/(\partial c_{t,b})} \\ w_{d,t,b} = \frac{1}{[\partial F_b(c_{t,b}, d_{t,b})]/(\partial d_{t,b})} \end{cases} \quad (16)$$

按功率分配权重占总权重的比例为每个储能单元分配功率，将使得在每个控制时段储能单元都近似拥有相同的老化成本。

$$P_{b,t} = \begin{cases} P_{\text{all},t} \frac{w_{c,t,b}}{\sum_{k=1}^B w_{c,t,k}}, P_{\text{all},t} < 0 \\ P_{\text{all},t} \frac{w_{d,t,b}}{\sum_{k=1}^B w_{d,t,k}}, P_{\text{all},t} \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

## 4 基于权重的功率迭代分配

功率分配策略应考虑每个储能单元的充放电功率上下限和荷电状态，否则可能出现部分储能单元被分配的功率超出其能够响应的上限、储能系统实际响应功率与目标功率有偏差、储能单元过充过放等问题。本节提出一种基于权重的功率

迭代分配方案，通过有限次基于权重的功率分配，实现在储能系统最大充放电能力范围内目标功率的准确响应。该分配策略不局限于前文提出的用老化成本次梯度的倒数作为权重的场景，可以根据运行目标自定义分配权重，以实现多种运行指标的综合考量。

### 4.1 数据预处理

#### 4.1.1 数据采集

对于含  $B$  个储能单元的储能系统，需要预先确定每个储能单元的额定容量  $E_{r,b}$ 、额定功率  $P_{r,b}$ 、初始荷电状态  $x_{0,b}$ 。在每次需要分配功率的时刻  $t$  读取每个储能单元的荷电状态  $x_{t,b}$ 、可放电功率  $P_{d,t,b}$ 、可充电功率  $P_{c,t,b}$ 、可放电能量  $E_{d,t,b}$  和可充电能量  $E_{c,t,b}$ 。

#### 4.1.2 储能单元可放电和可充电功率修正

预先设定荷电状态区间参数  $l_{\text{SOC},1}$ 、 $l_{\text{SOC},2}$  和  $h_{\text{SOC},1}$ 、 $h_{\text{SOC},2}$  用于修正每个储能单元的可充电功率和可放电功率，当储能系统 SOC 过高时，将限制充电功率的大小；当储能系统 SOC 过低时，将限制放电功率的大小。SOC 区间参数需要保证满足如下关系： $l_{\text{SOC},1} < l_{\text{SOC},2}$ ， $h_{\text{SOC},1} < h_{\text{SOC},2}$ 。

以  $t$  时刻储能单元  $b$  的可充电功率和可放电功率修正为例。修正后的储能单元可充电功率  $\underline{P}_{c,t,b}$  和可放电功率  $\underline{P}_{d,t,b}$  计算方法如下：

$$\begin{cases} \underline{P}_{c,t,b} = \begin{cases} 0, & x_{t,b} > h_{\text{SOC},2} \\ P_{c,t,b} k_{\text{high},t,b}, & h_{\text{SOC},1} < x_{t,b} \leq h_{\text{SOC},2} \\ P_{c,t,b}, & x_{t,b} \leq h_{\text{SOC},1} \end{cases} \\ k_{\text{high},t,b} = \frac{h_{\text{SOC},2} - x_{t,b}}{h_{\text{SOC},2} - h_{\text{SOC},1}} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \underline{P}_{d,t,b} = \begin{cases} P_{d,t,b}, & x_{t,b} > l_{\text{SOC},2} \\ P_{d,t,b} k_{\text{low},t,b}, & l_{\text{SOC},1} < x_{t,b} \leq l_{\text{SOC},2} \\ 0, & x_{t,b} \leq l_{\text{SOC},1} \end{cases} \\ k_{\text{low},t,b} = \frac{x_{t,b} - l_{\text{SOC},1}}{l_{\text{SOC},2} - l_{\text{SOC},1}} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $k_{\text{high},t,b}$  为充电降功率系数，当储能单元  $b$  的 SOC 介于  $h_{\text{SOC},1}$  和  $h_{\text{SOC},2}$  之间时，随着 SOC 的增加将逐步降低储能单元的可充电功率； $k_{\text{low},t,b}$  为放电降功率系数，当储能单元  $b$  的 SOC 介于  $l_{\text{SOC},1}$  和  $l_{\text{SOC},2}$  之间时，随着 SOC 的减小将逐步降低储能单元的可放电功率。

#### 4.1.3 储能系统最大可充放电功率计算

对所有储能单元修正后的可充功率和可放功

率分别求和,得到大规模储能系统总可充电功率上限  $P_{\max,c,t}$  和总可放电功率上限  $P_{\max,d,t}$ 。它们决定了储能系统可以响应的最大充放电功率指令。

$$P_{\max,c,t} = \sum_{b=1}^B P_{c,t,b}, \quad P_{\max,d,t} = \sum_{b=1}^B P_{d,t,b} \quad (20)$$

在分配功率前,需要将目标功率  $P_{\text{all},t}$  限制在储能系统总可充电功率和总可放电功率范围之内。

$$P_{\text{all},t} = \begin{cases} P_{\max,d,t}, & P_{\text{all},t} > P_{\max,d,t} \\ -P_{\max,c,t}, & P_{\text{all},t} < -P_{\max,c,t} \\ P_{\text{all},t}, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

#### 4.2 功率迭代分配策略

1) 输入待分配功率  $P_{\text{all},t}$ 、每个储能单元的充放电功率分配权重  $w_{c,t,b}$  和  $w_{d,t,b}$ , 以及可充和可放电功率  $P_{c,t,b}$ 、 $P_{d,t,b}$ , 令首次待分配总功率  $P_{\text{wait},0} = P_{\text{all},t}$ 、每个储能单元的初始功率分配权重  $w_{c,t,b,0}$  和  $w_{d,t,b,0}$  等于输入的权重、储能单元的初始功率  $P_{\text{limited},b,0} = 0$ 。

2) 根据功率分配权重计算第  $n$  次分配后每个储能单元预分配的功率。以储能单元  $b$  为例:

$$P_{\text{temp},b,n} = \begin{cases} P_{\text{limited},b,n-1} + P_{\text{wait},n} \frac{w_{d,t,b,n-1}}{\sum_{k=1}^B w_{d,t,k,n-1}}, & P_{\text{wait},n} \geq 0 \\ P_{\text{limited},b,n-1} + P_{\text{wait},n} \frac{w_{c,t,b,n-1}}{\sum_{k=1}^B w_{c,t,k,n-1}}, & P_{\text{wait},n} < 0 \end{cases} \quad (22)$$

3) 检验第  $n$  次分配中每个储能单元预分配的功率是否超过该储能单元的最大功率,若高于最大功率,则将功率限制为最大功率,且将功率分配权重重置为零,即达到功率上限的储能单元在后续分配时不再被分配功率。以储能单元  $b$  的预分配功率检验为例:

$$P_{\text{limited},b,n} = \begin{cases} P_{d,t,b}, & P_{\text{temp},b,n} \geq P_{d,t,b} \\ P_{\text{temp},b,n}, & P_{d,t,b} > P_{\text{temp},b,n} > -P_{c,t,b} \\ -P_{c,t,b}, & P_{\text{temp},b,n} \leq -P_{c,t,b} \end{cases} \quad (23)$$

4) 计算在第  $n$  次分配中,预分配的功率未满足的部分,记为第  $n$  次分配的剩余功率  $P_{\text{remain},n}$ :

$$P_{\text{remain},n} = \sum_{b=1}^B (P_{\text{temp},b,n} - P_{\text{limited},b,n}) \quad (24)$$

5) 若第  $n$  次分配的剩余功率  $P_{\text{remain},n}$  等于零,或者分配次数  $n$  大于等于储能单元总数,则结束分配,将  $P_{\text{limited},b,n}$  作为功率分配结果发送给每个储能单元执行。否则将第  $n$  次分配的剩余功率  $P_{\text{remain},n}$  赋值为第  $n+1$  次分配的待分配功率  $P_{\text{wait},n+1}$ ,分配次

数  $n$  增加 1 并回到 2) 继续依次执行。

功率迭代分配策略的详细流程如图 4 所示。

### 5 算例设置与结果对比

为了验证所提基于老化成本实时次梯度的储能系统功率分配策略的有效性,基于 MATLAB 仿真平台,选取美国 PJM 辅助服务市场 2020 年 Reg-D 信号,对包含 4 个储能单元的异构储能系统参与电力系统二次调频场景进行仿真分析。

国内外有多个大规模储能系统采取分期、分批建设的方案,这为储能系统的功率分配带来挑战。目前在实际工程中大多依然采用根据功率分配或根据容量分配的方式,无法体现不同时期的储能技术和成本的变化。因此,本文设计的仿真算例模拟一种大规模储能分期建设的情景。4 个储能单元的参数设置如表 1 所示。在首次建设时,储能电站建设了一定规模的储能单元#1(循环深度为 100%的条件下循环次数为 3 200 次)以满足系统提供储能服务的准入门槛。随着储能技术的发展和进步,储能系统的成本下降,循环寿命也有所提升。在二期、三期项目中,储能电站又分别建设了储能单元#2 和 #3。储能单元#4 采用与储能单元#1—#3 不同的储能技术(如液流储能技术),该储能单元初装成本较高,老化与能量吞吐成正比,循环深度为 100%的条件下,循环次数为 20 000 次,以模拟混合储能的应用场景。

储能单元荷电状态区间参数  $l_{\text{soc},1}$ 、 $l_{\text{soc},2}$  和  $h_{\text{soc},1}$ 、 $h_{\text{soc},2}$  分别为 0.02、0.05、0.95、0.98,限制储能单元 SOC 最大值为 0.98,最小值为 0.02。

#### 5.1 对比策略

对比策略为工程中常用的基于最大功率的分配策略、基于剩余能量的分配策略,并以工程上常用的平均度电成本作为评估不同储能单元老化成本的指标,设计一个最小化老化成本为目标的功率分配方案。

所有策略都具有储能单元可放电、可充电功率修正功能,当荷电状态过高时限制充电功率最大值,当荷电状态过低时限制放电功率最大值。

1) 基于功率的分配:按照储能单元提供的最大充放电功率的比例进行功率的分配。充电指令按照最大充电功率的比例分配,放电指令按照最大放电功率的比例分配。

2) 基于能量的分配:按照储能单元上传的剩

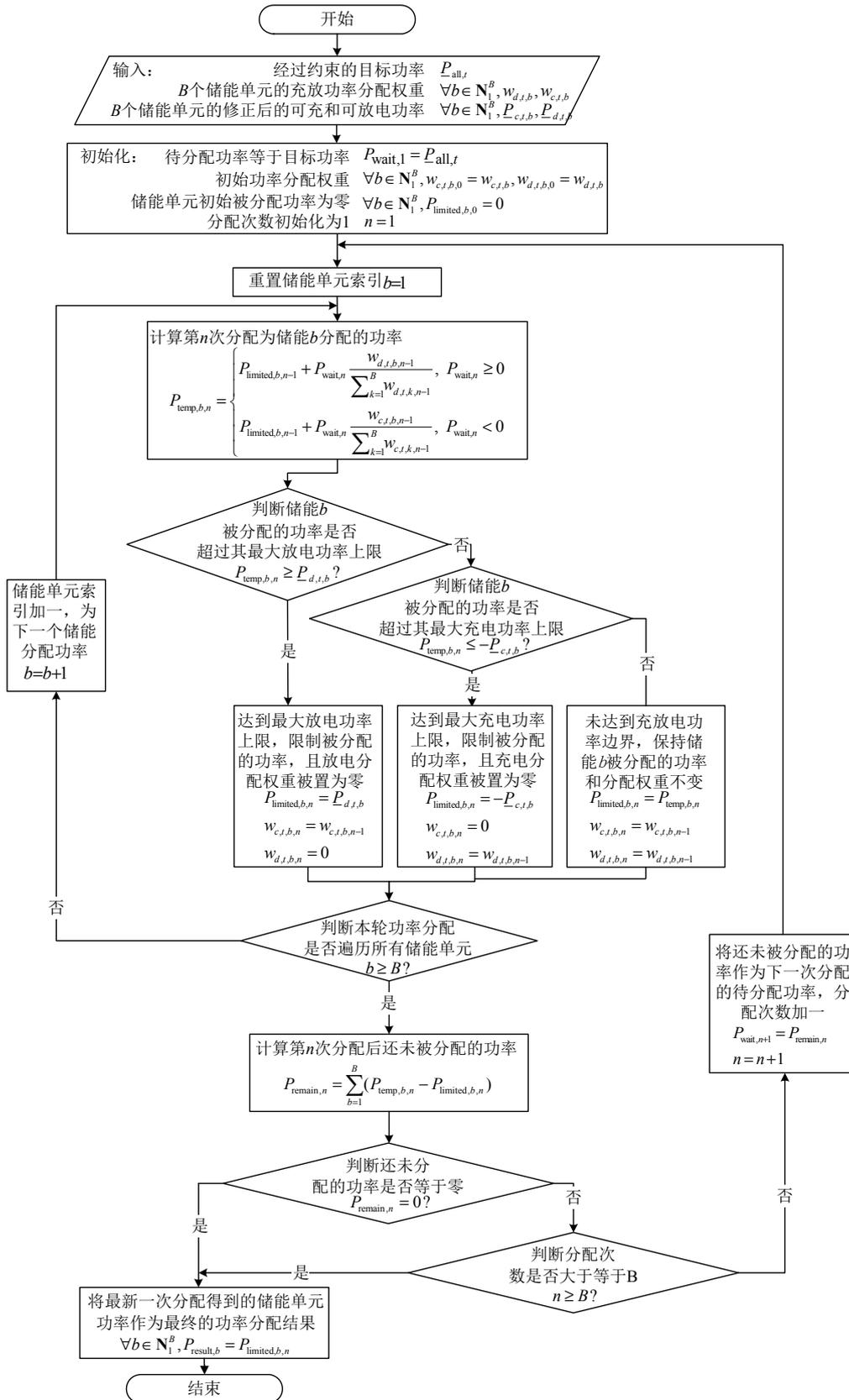


图4 所提基于权重的功率迭代分配流程图

Fig. 4 Flow chart of the proposed power allocation method based on weights

余可充放电能量的比例进行功率分配。若某个储能单元被分配的功率大于其最大可充放电功率，则按照最大功率执行。

3) 基于平均度电成本的分配：平均度电成本低的储能单元优先被调用，直到其被分配的功率达到它的最大功率边界时，再按照平均度电成本由低

表1 异构储能系统储能单元参数设置

Table 1 Parameter settings for energy storage units in heterogeneous energy storage system

参数	#1	#2	#3	#4
额定功率 $P_r$ /MW	2	1	1.35	1.25
额定容量 $E_r$ /(MW·h)	4	2	1.35	2.2
充电效率 $\eta_c$	0.95	0.95	0.98	0.98
放电效率 $\eta_d$	0.95	0.95	0.98	0.98
老化系数 $k_1$ /( $\times 10^{-4}$ )	3.125	2.50	2.85	0.5
老化系数 $k_2$	1.1	1.1	1.2	1
单位容量价格 $A$ /(元/(W·h))	2.0	1.5	1.7	6.0
初始荷电状态 $x_0$	0.58	0.60	0.62	0.64

到高的排序依次调用其他储能单元。根据 100%循环深度下的循环次数及单位容量价格,得到平均度电成本的大小关系为:储能单元#4[0.3元/(kW·h)]<储能单元#2[0.375元/(kW·h)]<储能单元#3[0.485元/(kW·h)]<储能单元#1[0.625元/(kW·h)]。

5.2 仿真结果与分析

在仿真时,连续模拟储能系统一天响应 Reg-D 信号的运行情况。

5.2.1 功率分配

图5截取了1h的仿真运行结果展示和分析不同功率分配策略的特点。可以看出,在储能单元荷电状态都远离上界和下界时,所提方法、基于功率的分配、基于平均度电成本的分配可以保证储能系统准确跟踪目标功率,而基于能量的分配会因为给部分剩余充放电能量较大的储能单元分配的充放电功率超出其功率上限,导致实际储能系统响应功率小于目标功率。

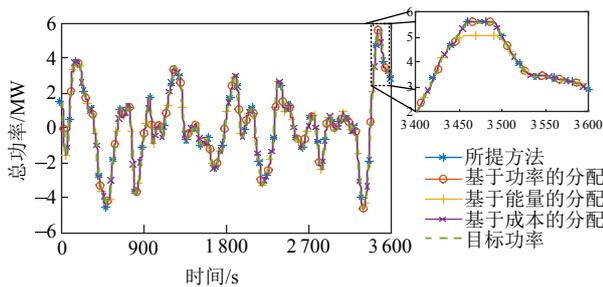


图5 使用不同功率分配方案的异构储能系统充放电总功率与目标功率

Fig. 5 Total power and target power of heterogeneous energy storage systems using different power allocation strategy for charging and discharging

图6展示了在荷电状态不接近上界和下界的情况下,储能系统使用4种不同的功率分配策略各个储能单元被分配的功率。使用基于功率的分配策略,储能单元被分配的功率占比始终等于其额定功

率在储能系统中的占比。使用基于能量的分配策略,#1储能单元因为有最大的可充放电容量而在运行过程中承担了更多的充放电任务,#3储能单元则承担了最少的充放电任务。基于平均度电成本的分配则优先调用平均度电成本低的储能单元,直至其达到功率边界,因此#3储能单元和#4储能单元经常满功率运行,而#1储能单元很少被调用。

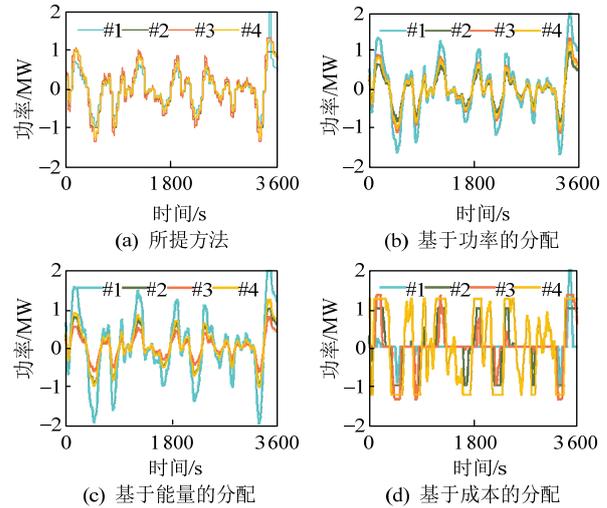


图6 使用不同功率分配方案的异构储能系统充放电功率指令分配结果

Fig. 6 Allocation results of charging and discharging power instructions for heterogeneous energy storage systems using different power allocation strategy

对于所提分配方法,其功率分配结果与充放电实时次梯度的数值紧密相关。图7展示了该小时的储能单元充放电次梯度和被分配的功率。储能单元#4的老化对于充放电循环深度不敏感,它的实时次梯度为固定值,而其他储能单元的实时次梯度随着循环深度的增加而逐渐增大。在浅充浅放的情况下,#4储能实时老化成本次梯度最大,此时#4储

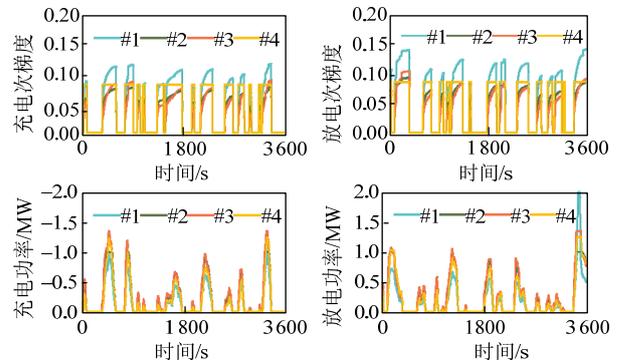


图7 使用基于老化成本实时次梯度功率分配方案的异构储能系统充放电实时次梯度及充放电功率

Fig. 7 Real-time subgradient and charging and discharging power of heterogeneous energy storage system when using the proposed power allocation strategy

能被分配的功率最少。但随着循环深度的增加，#1 储能单元的实时次梯度超过#4 储能，这时功率分配的大小关系发生变化。#2 和#3 储能单元之间也有实时次梯度随着循环深度的变化而出现大小关系变换的现象。当目标指令较小，还没有储能单元被分配的功率超出其最大充放电功率时，储能单元被分配的功率大小关系与实时次梯度大小关系一致；当目标指令较大时，部分储能单元将达到其最大充放电功率，未能被其响应的功率将转移给其他储能单元执行。

总体来说，使用所提分配方法，储能之间功率分配的比例大小是随着运行过程中储能单元循环深度和指令大小的变化而变化的。

还有一个重要现象值得关注：在某些时刻储能单元的实时次梯度突增。这是因为在计算次梯度的过程中，这些时刻极值点序列中部分极值点被剔除，使得与当前极值点配对的历史极值点发生了改变。说明储能单元的老化成本具有阶段性。运行过程中，当充放电循环深度超过特定值(与历史运行曲线相关)时，后续增大循环深度的充放电行为的老化成本将会显著增加。老化成本次梯度的增大和突变反映出了基于循环老化模型和雨流计数算法具有记忆性的特点。

5.2.2 荷电状态(SOC)

使用不同功率分配方案的异构储能系统 24 h 的荷电状态变化曲线如图 8 所示。

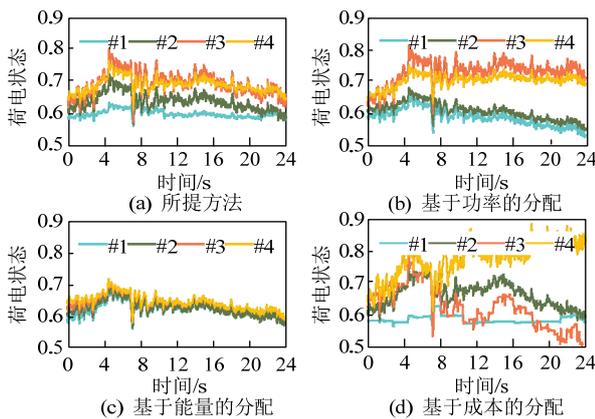


图 8 使用不同功率分配方案的异构储能系统各储能单元荷电状态变化情况

Fig. 8 SOC curve of energy storage units in heterogeneous energy storage system using different power allocation strategy

使用所提分配算法时，在该运行场景下老化成本最高的#1 储能单元的被尽可能少地调用，因此它的荷电状态波动很小，而老化成本相对更低的#2 和

#3 储能被更多地调用。所提分配算法没有强制要求储能单元的荷电状态保持一致，而通过随着循环深度增大而不断增加的实时次梯度减小储能单元的荷电状态波动，允许老化成本更低的储能单元的荷电状态具有更大的变化范围。

使用基于功率的分配算法时，因为#3 储能单元额定功率与额定容量的比例大于其他储能单元，#3 储能单元的荷电状态波动显著大于其他储能单元。并且因为#1 和#2 储能单元的充放电效率小于#3 和#4 储能，在长时间运行后出现了荷电状态发散的现象。

使用基于能量的分配算法时，储能单元荷电状态变化曲线趋于一致。

使用基于平均度电成本的分配算法时，#2、#3 和#4 储能单元的荷电状态频繁变化且快速偏离初始值，而#1 储能单元仅在接收到大指令时有荷电状态的变化。

5.2.3 运行成本

根据不同实时功率分配方案，得到每个储能单元充放电功率曲线，使用 2 节中介绍的基于循环的储能单元老化模型计算得到储能系统的老化成本，结果如表 2 所示。

表 2 异构储能系统及储能单元全天老化成本

Table 2 Aging cost of heterogeneous energy storage system using different power allocation strategy 单位：元

方法	总老化	#1	#2	#3	#4
所提方法	5 149.28	1 381.7	1 219.1	1 287.5	1 261.1
基于功率的分配	5 602.14	2 600.5	780.1	1 054.6	1 166.9
基于能量的分配	5 743.14	3 076.9	921.2	552.0	1 193.0
基于成本的分配	5 150.97	284.0	1 035.6	588.1	3 243.2

传统功率分配算法无法考虑储能单元老化成本的不同，因此在使用时为#1 储能单元分配了过多的充放电任务，导致储能系统整体老化成本较高。而本文所提的基于老化成本实时次梯度的功率分配算法根据充放电单位能量的实时成本为储能单元分配功率，减少了昂贵的#1 储能单元的使用，而更多调用老化成本较小的#2 和#3 储能单元，最终相比于基于功率的分配算法降低了 8.08%的老化成本，相比基于能量的分配算法降低了 10.34%的老化成本。

在使用平均度电成本评估储能单元老化成本时，优先调用平均度电成本低的储能单元可以获得最小的老化成本。但实际上，平均度电成本较低的

储能单元频繁地满功率运行导致每次循环的循环深度较大,反而可能使得其实际度电成本高于其他的储能单元。在本文设置的参数下,储能单元的老化对于循环深度的敏感程度较低,因此采用基于平均度电成本进行功率分配的储能系统老化成本与所提方法接近,但所提方法在维持荷电状态稳定方面相较于基于平均度电成本的方法具有优势。如图8所示,24h运行结束后,基于平均度电成本的分配策略使得成本低的储能单元荷电状态接近边界,需要手动恢复荷电状态,否则在后续的运行中,储能系统将不得不调用度电成本更高的储能单元响应指令而导致系统运行成本增加。

#### 5.2.4 荷电状态处于边界的情况

选取1h运行曲线,更改储能单元#1—#4的起始SOC分别为0.02、0.04、0.06、0.08,模拟储能单元接近人为设定的荷电状态边界 $I_{SOC,1}=0.02$ 和 $I_{SOC,2}=0.05$ 时的运行状况。仿真结果见图9,在响应充电指令时,储能系统准确跟踪目标指令,而在响应放电指令时,如果放电指令超过修正后的储能系统可放功率,将出现不能满足的功率差额。

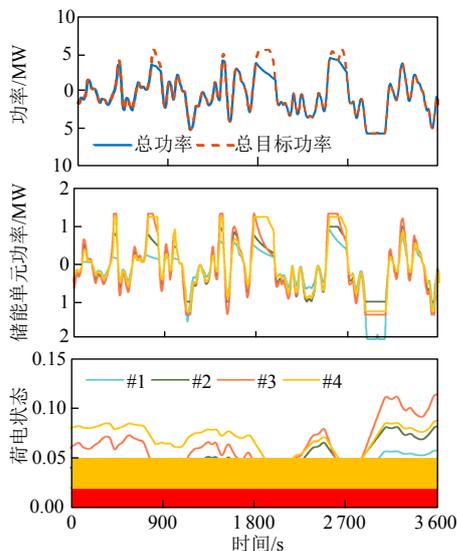


图9 储能单元起始SOC接近下界时

使用所提功率分配方案的异构储能系统运行情况

Fig. 9 Operation of heterogeneous energy storage systems using the proposed power allocation strategy when the initial SOC of energy storage units approach the lower bound

所提的基于权重的功率迭代分配算法可以保证储能单元荷电状态不低于 $I_{SOC,1}$ ,且接近荷电状态边界时,缓慢降功率,不会出现因为荷电状态处于边界而导致输出功率突变。

## 6 结论

本文从基于循环信息评估储能老化的模型出发,首先,提出在线雨流计数法,实现循环信息的实时更新;随后,根据实时循环信息计算储能单元老化成本梯度,并使用老化成本梯度的倒数作为储能单元的功率分配权重,以实现储能单元增量成本一致的目标;最后,提出一种基于功率分配权重的功率迭代分配算法,在实现功率分配的同时,考虑储能单元的充放电功率边界和荷电状态约束。

所提功率分配方法能够使得在每个控制周期内不同储能单元具有相近的老化成本。对于异构储能系统,要求不同储能单元荷电状态保持一致通常是不经济的,可以通过使用基于循环的老化成本来间接抑制储能单元荷电状态的波动,允许老化成本更低的储能单元的荷电状态有更大的变化范围。另外,当使用基于循环的老化模型评估储能单元的老化时,储能单元的老化成本受历史运行情况影响,在运行过程中应该实时更新储能单元的老化成本梯度,及时调整储能单元被分配的功率比例。

## 参考文献

- [1] 刘映尚, 马骞, 王子强, 等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1694-1706.  
LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1706 (in Chinese).
- [2] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7809.  
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809 (in Chinese).
- [3] 李中浩, 余娟, 杨知方, 等. 精准计及大规模储能电池寿命的电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7371-7383.  
LI Zhonghao, YU Juan, YANG Zhifang, et al. Economic dispatch of power system accurately considering the life of large-scale energy storage battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7371-7383 (in Chinese).
- [4] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.  
JIANG Kai, LI Haomiao, LI Wei, et al. On several battery technologies for power grids[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2013, 37(1): 47-53(in Chinese).
- [5] 李建林, 李雅欣, 吕超, 等. 退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 172-183.  
LI Jianlin, LI Yaxin, LYU Chao, et al. Key technology and research status of cascaded utilization in decommissioned power battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 172-183(in Chinese).
- [6] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.  
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97(in Chinese).
- [7] 朱锦清. 宁德时代发布第一代钠离子电池[EB/OL]. (2021-07-30). [https://www.ningde.gov.cn/zwgk/gzdt/jryw/202107/t20210730\\_1504720.htm](https://www.ningde.gov.cn/zwgk/gzdt/jryw/202107/t20210730_1504720.htm).  
ZHU Jinqing. CATL reveals its first generation sodium-ion battery[EB/OL]. (2021-07-30). [https://www.ningde.gov.cn/zwgk/gzdt/jryw/202107/t20210730\\_1504720.htm](https://www.ningde.gov.cn/zwgk/gzdt/jryw/202107/t20210730_1504720.htm)(in Chinese).
- [8] 颜宁, 李相俊, 钟瑶, 等. 基于静动态一致性的退役动力电池模组阶梯式筛选方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 2060-2069.  
YAN Ning, LI Xiangjun, ZHONG Yao, et al. Stepwise screening method for retired power battery modules based on static-dynamic consistency[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 2060-2069(in Chinese).
- [9] 马速良, 李建林, 李雅欣, 等. 面向电池梯次利用筛选需求的定制化聚类优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6208-6219.  
MA Suliang, LI Jianlin, LI Yaxin, et al. Customized clustering optimization method for battery reutilization screening requirements[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6208-6219(in Chinese).
- [10] 马泽宇, 姜久春, 文锋, 等. 用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 106-111.  
MA Zeyu, JIANG Jiuchun, WEN Feng, et al. Design of equilibrium strategy of echelon use Li-ion battery pack for energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 106-111(in Chinese).
- [11] 苏浩, 张建成, 王宁, 等. 基于分层优化的大容量混合储能系统能量管理策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1177-1186.  
SU Hao, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, et al. Energy management strategy of large-scale hybrid energy storage system based on layered optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1177-1186(in Chinese).
- [12] 刘忠, 杨陈, 蒋玮, 等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 61-69.  
LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69(in Chinese).
- [13] 陈刚, 包宇庆, 张金龙, 等. 计及寿命损耗成本的储能单元分布式协同控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1495-1501.  
CHEN Gang, BAO Yuqing, ZHANG Jinlong, et al. Distributed cooperative control strategy for energy storage units considering life loss cost[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1495-1501(in Chinese).
- [14] 李相俊, 马锐. 考虑电池组健康状态的储能系统能量管理方法[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4210-4217.  
LI Xiangjun, MA Rui. Energy management method of energy storage system considering the SOH of battery pack[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4210-4217(in Chinese).
- [15] 王育飞, 叶俊斌, 薛花, 等. 基于改进雨流计数法的梯次利用电池储能系统优化控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 39-49.  
WANG Yufei, YE Junbin, XUE Hua, et al. Optimal control for energy storage system with echelon utilization batteries based on improved rain-flow counting method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 39-49(in Chinese).
- [16] XU Bolun. The role of modeling battery degradation in bulk power system optimizations[J]. MRS Energy & Sustainability, 2022, 9(2): 198-211.
- [17] SCHNEIDER S F, NOVÁK P, KOBER T. Rechargeable batteries for simultaneous demand peak shaving and price arbitrage business[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 148-157.
- [18] 宾洋, 于静美, 朱英凯, 等. 实时雨流计数法及其在钴酸锂电池健康状态建模中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3627-3635.  
BIN Yang, YU Jingmei, ZHU Yingkai, et al. A Real-time rain flow algorithm and its application to state of health modeling for LiCoO<sub>2</sub> lithium-ion batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3627-3635(in Chinese).
- [19] 李相俊, 马锐, 王上行, 等. 考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 62-70.  
LI Xiangjun, MA Rui, WANG Shangxing, et al. Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 62-70(in Chinese).
- [20] LARESGOITTI I, KÄBITZ S, ECKER M, et al. Modeling

- mechanical degradation in lithium ion batteries during cycling: solid electrolyte interphase fracture[J]. Journal of Power Sources, 2015, 300: 112-122.
- [21] XU Bolun, ZHAO Jinye, ZHENG Tongxin, et al. Factoring the cycle aging cost of batteries participating in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2248-2259.
- [22] CHEN Minwu, LIANG Zongyou, CHENG Zhe, et al. Optimal scheduling of FTPSS with PV and HESS considering the online degradation of battery capacity[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 936-947.
- [23] SHI Yuanyuan, XU Bolun, TAN Yushi, et al. Optimal battery control under cycle aging mechanisms in pay for performance settings[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(6): 2324-2339.
- [24] KWON K B, ZHU Hao. Reinforcement learning-based optimal battery control under cycle-based degradation cost[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4909-4917.
- [25] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
- GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129(in Chinese).
- [26] Fatigue Life LLC. Rainflow counting[EB/OL]. [2023-05-13]. <https://fatigue-life.com/rainflow-counting/>.
- [27] ASTM International. ASTM E1049-85—2017 Standard practices for cycle counting in fatigue analysis[S]. USA: ASTM International, 2017.
- [28] SANDELIC M, SANGWONGWANICH A, BLAABJERG F. Incremental degradation estimation method for online assessment of battery operation cost[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11497-11501.
- [29] DIAO Rui, HU Zechun, SONG Yonghua. Subgradient of cycle-based aging cost function and its application in optimal operation of battery energy storage system with multiple subsystems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(1): 625-643.

#### 附录A 雨流计数算法——“三点法”

雨流计数算法——“三点法”伪代码

输入: 极值点序列  $s=\{s_1, s_2, \dots, s_K\}$ , 极值点时间序列  $t=\{t_{s1},$

$t_{s2}, \dots, t_{sK}\}$

输出:  $N$  个循环的信息  $\{I_1, \dots, I_y, \dots, I_N\}$ , 其中  $I_y=\{u_y, \kappa_y,$

$t_y^{\text{start}}, t_y^{\text{half}}\}$

1. 初始化  $i=1, j=0, y=0$ ;

2. 初始化  $A=\{\}, T=\{\}, I=\{\}$ ;
3. While  $i \leq K$  do
4.  $j \leftarrow j+1$ ;
5. 增加极值点  $s_i$  到序列  $A$  的末尾记为  $a_j$ , 并增加极值时间  $t_{si}$  到序列  $T$  的末尾记为  $t_j$ ;
6.  $i \leftarrow i+1$ ;
7. While  $j>3$  且  $|a_{j-1}-a_{j-2}| \leq |a_j-a_{j-1}|$  do
8. If  $j=3$  then
9.  $y \leftarrow y+1$ ;
10. 向循环信息序列中存储一个半循环  $I_y$ ,  
有  $u_y \leftarrow |a_2-a_1|$ ,  $\kappa_y \leftarrow 0.5$ ,  $t_y^{\text{start}} \leftarrow t_1$ ,  
 $t_y^{\text{half}} \leftarrow t_2$ ;
11. 令  $a_1 \leftarrow a_2$ ,  $a_2 \leftarrow a_3$ ;
12. 令  $t_1 \leftarrow t_2$ ,  $t_2 \leftarrow t_3$ ;
13.  $j \leftarrow j-2$ ;
14. else
15.  $y \leftarrow y+1$ ;
16. 向循环信息序列中存储一个全循环  $I_y$ ,  
有  $u_y \leftarrow |a_{j-1}-a_{j-2}|$ ,  $\kappa_y \leftarrow 1$ ,  $t_y^{\text{start}} \leftarrow t_{j-2}$ ,  
 $t_y^{\text{half}} \leftarrow t_{j-1}$ ;
17. 令  $a_{j-2} \leftarrow a_j$ ;
18. 令  $t_{j-2} \leftarrow t_j$ ;
19.  $j \leftarrow j-2$ ;
20. end
21. end
22. end
23.  $l=1$ ;
24. while  $l < j$  do
25.  $y \leftarrow y+1$ ;
26. 向循环信息序列中存储一个半循环的信息  $I_y$ ,  
有  $u_y \leftarrow |a_l-a_{l+1}|$ ,  $\kappa_y \leftarrow 0.5$ ,  $t_y^{\text{start}} \leftarrow t_l$ ,  $t_y^{\text{half}} \leftarrow$   
 $t_{l+1}$ ;
27.  $l \leftarrow l+1$ ;
28. end



刁锐

在线出版日期: 2024-02-29.

收稿日期: 2023-06-06.

作者简介:

刁锐(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为储能系统能量管理、储能老化建模等, dr15tsinghua@163.com;

\*通信作者: 胡泽春(1979), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与优化规划、智能电网、电动汽车等, zechhu@tsinghua.edu.cn.

(编辑 陈娟)