

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230308

考虑多维性能衰减的储能电池系统运行可靠性评估方法

王辉东¹, 王博石², 张盛¹, 余娟², 姚海燕³, 邢海青¹, 郭强³

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311121; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 杭州电力设备制造有限公司余杭群力成套电气制造分公司, 浙江 杭州 310016)

摘要: 储能电池系统的发展是推进“双碳”目标的关键所在, 伴随而来的却是储能电站的安全隐患, 亟需对储能电池系统的可靠性进行准确评估。为此, 提出考虑多维性能衰减的储能电池运行可靠性评估方法。首先, 提出了基于高斯过程的储能电池性能衰减过程电压特征量分布计算方法, 计算充放电循环过程中电压特征量的概率分布, 为刻画电池性能衰减提供了重要维度。然后, 提出了基于多维通用生成函数的储能电池系统运行可靠性评估方法, 通过电压特征量和容量的概率分布计算储能电池单体的可靠性。进而定义可考虑储能电池拓扑连接情况的串并联关系函数, 计算储能电池系统整体的可靠性。最后, 基于 NASA 储能电池数据的算例仿真表明所提方法能够实现储能电池系统可靠性的精准评估。

关键词: 储能电池; 性能衰减; 可靠性评估; 通用生成函数; 高斯过程

Operational reliability evaluation method for an energy storage battery system considering multi-dimensional performance degradation

WANG Huidong¹, WANG Boshi², ZHANG Sheng¹, YU Juan², YAO Haiyan³, XING Haiqing¹, GUO Qiang³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Hangzhou Yuhang District Power Supply Company, Hangzhou 311121, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 3. Hangzhou Electric Power Equipment Manufacturing Co., Ltd. Yuhang Qunli Complete Electric Manufacturing Branch, Hangzhou 310016, China)

Abstract: The development of energy storage battery systems is key to advancing the "dual carbon" goal, but with it come the potential safety hazards of energy storage power stations. Therefore, it is urgent to accurately evaluate the reliability of energy storage battery systems. This paper proposes a method for evaluating the operational reliability of energy storage batteries considering multidimensional performance degradation. First, a Gaussian process-based method for calculating the distribution of voltage characteristics during the performance degradation process of energy storage batteries is proposed. This calculates the probability distribution of voltage characteristics during the charging and discharging cycle, providing an important dimension for characterizing performance degradation. Then, a multidimensional general generation function-based operational reliability evaluation method for energy storage battery systems is proposed. The reliability of individual batteries is calculated through the probability distribution of voltage characteristics and capacity. Then a series parallel relationship function that can consider the topological connection of energy storage batteries is defined to calculate the overall reliability of the battery system. Finally, a numerical simulation based on NASA energy storage battery data shows that the proposed method can achieve accurate reliability evaluation of such battery systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFE0191000).

Key words: energy storage battery; performance degradation; reliability evaluation; general generating function; Gaussian process

0 引言

储能系统是实现电力用能变革的关键, 主要体

现在快速调频、平滑新能源出力波动、提高系统稳定性和可靠性等方面^[1]。至 2022 年底, 中国已投运电力储能项目累计装机规模 59.8 GW, 其中新型储能累计装机规模突破 10 GW, 达到 13.1 GW。新型储能中, 储能电池占据绝对主导地位, 比重达

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFE0191000)

97%^[2]。到 2025 年, 预计新型储能装机容量规模将在 50 GW 以上^[3]。然而, 近 10 年间, 全球共发生 32 起大型储能电站安全事故^[4], 储能电池安全问题也日益受到人们的重视。新型储能技术的创新能力需显著提高, 核心技术装备在高安全、高可靠、长寿命等方面取得长足的进步^[5]。为此, 储能电池可靠性成为当下研究热点, 主要包括针对储能电池单体、系统整体可靠性的研究。

针对储能电池单体可靠性的研究包括电池寿命的测算^[6-7]、电池性能衰减的影响因素分析^[8]、电池故障的预警与防护等^[9]。上述研究的可靠性评估方法多为设置单个因素的衰减阈值, 未考虑多个衰减因素之间的耦合性, 难以保障电池单体可靠性评估的精准性。描述储能电池老化过程中最重要的两个因素为电池容量和电池电压^[10]。针对电池容量, 现有研究通常聚焦于挖掘储能电池容量的多种影响因素, 主要分为机理模型和数据驱动模型。机理模型通常研究副反应的发生、SEI 膜增长等过程来描述电池容量的衰退过程^[11-12]。数据驱动模型则通过储能电池充放电循环中的外特性变化构建电池容量衰减模型^[13-14]。针对电池电压, 现有研究集中于微分电压曲线在电池老化过程中的变化^[15]。文献[16]从微分电压曲线中定义了电压特征量, 并研究了电压特征量在电池老化过程中的变化规律。上述研究中, 储能电池单体可靠性评估考虑性能衰减因素维度单一, 未综合考虑容量和电压, 难以保障其可靠性评估的精准性。

针对储能电池系统可靠性的研究主要包括: 电池系统均衡管理策略^[17]、储能电池安全管理^[18]、储能电池系统及其接入电力系统的可靠性评估^[19]等。现有可靠性评估理论通常利用电池单体故障率计算储能电池系统的可靠性^[20]。然而, 即使由同一工厂生产的电池组中的电池单体也并非完全相同, 电池单体性能的差异可能会影响电池组的性能^[21-22], 因此, 不能仅通过考虑某一标准电池单体可靠性来估计储能电池系统的可靠性, 还应该考虑各个电池单体自身多因素变化以及单体之间的拓扑连接关系。如何在精确刻画储能电池单体性能衰减过程中多因素变化对电池单体可靠性影响的同时, 考虑电池单体串并联关系对于储能电池系统整体可靠性的影响, 建立储能电池系统运行可靠性评估模型仍是有待深入研究的问题。

综上所述, 现有储能电池可靠性研究存在两方面问题: (1) 研究储能电池性能退化时, 考虑维度单一, 未能全面体现容量和电压等的性能退化过程; (2) 缺少合适的可靠性计算方法以表征多个维度对

储能电池可靠性的综合影响。对此, 本文提出一种考虑多维性能衰减的储能电池运行可靠性评估方法。本文主要贡献如下:

1) 提出基于高斯过程的储能电池性能衰减过程电压特征量分布计算方法。首先, 分析储能电池单体性能衰减过程中微分电压曲线变化趋势。然后, 通过高斯过程建立微分电压采样数据与电压特征量分布的映射关系, 计算充放电循环过程中的逐步衰减电压特征量的概率分布, 为刻画电池性能衰减提供重要依据。

2) 提出基于多维通用生成函数的储能电池系统运行可靠性评估方法。首先, 结合电压特征量分布计算方法和电池容量衰减模型, 提出基于多维通用生成函数的储能电池单体多状态可靠性评估模型, 以描述储能电池单体的可靠性。然后, 进一步定义串并联连接关系函数, 建立考虑多维性能衰减的储能电池系统多状态运行可靠性评估模型, 实现对储能电池系统可靠性的准确评估。

1 基于高斯过程的储能电池性能衰减过程电压特征量分布计算方法

1.1 储能电池性能衰减过程电压特征量变化分析

微分电压(differential voltage, DV)分析是研究电池老化机理的常用方法, DV 曲线的峰值可以表征电池内部不同的电化学反应过程^[22]。如图 1 所示, 其横坐标表示放电容量, 纵坐标表示电压对放电容量的微分, 选取放电 DV 曲线上的两个特征点: 第一个特征点为放电初期 DV 曲线从陡峭变为平缓的驻点, 第二个特征点为放电末期 DV 曲线从平缓转为陡峭的驻点, 两个特征点之间的距离定义为电压特征量^[16]。随着充放电循环的进行, 电压特征量不断变小, 因而通过电压特征量可以较好地描述电池性能衰减特性^[23]。不同电池单体的电压特征量随充放电循环的进行有一定差异, 对于储能电池系统而

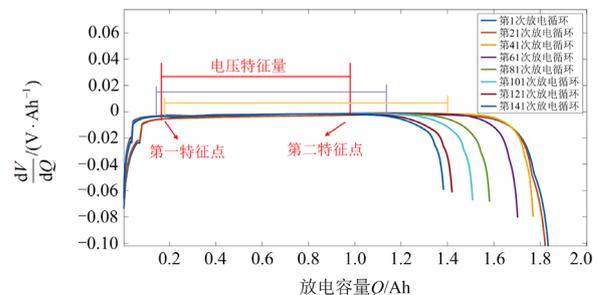


图 1 电池 DV 随放电循环次数增加的变化情况

Fig. 1 Changes of battery DV curve with the increase of cycle times

言,其内部电池单体的电压特征量表现出不确定性。为此,本文提出基于高斯过程的储能电池电压特征量分布计算方法,计算充放电循环过程中电压特征量的概率分布,为刻画电池性能衰减提供重要依据。

1.2 基于高斯过程的储能电池电压特征量分布计算方法

目前,对于1.1节中电池单体电压特征量的计算仍存在两方面问题:(1)电压特征量的计算涉及到非线性的微分电压曲线的求解,微分电压曲线实际采样存在波动,给电压特征量的计算带来困难^[24],如何更准确地得到微分电压曲线的回归函数是亟待解决的问题;(2)电池单体在某个充放电循环的性能状态存在不确定性,同一电池组各电池单体的微分电压曲线存在差异^[25],现有研究未能准确描述其回归函数的置信区间。而高斯过程被广泛运用于回归分析,如锂电池状态估计^[26],其优点是能够有效应对非线性数据的回归问题,并且给出预测点值的概率分布,进而得到回归函数的置信区间。因此,针对电压特征量计算存在的问题,本文提出基于高斯过程储能电池电压特征量分布计算方法,具体阐述如下。

首先基于电池单体某次放电过程容量与微分电压数据,建立微分电压曲线的高斯回归模型。记 $\mathbf{D} = \{\mathbf{X}_Q, \mathbf{Y}_{DV}\}$ 为一个电池单体某次放电过程中容量 Q 与微分电压 dV/dQ 的采样集,如图2红色采样点。其中, \mathbf{X}_Q 为电池单体放电过程电量向量,可写作 $[x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qi}, \dots, x_{qn}]^T$,如图2红色采样点对应的横坐标, \mathbf{Y}_{DV} 为对应的微分电压向量,可写作 $[y_{dv1}, y_{dv2}, \dots, y_{dvi}, \dots, y_{dvn}]^T$,如图2红色采样点对应的纵坐标。

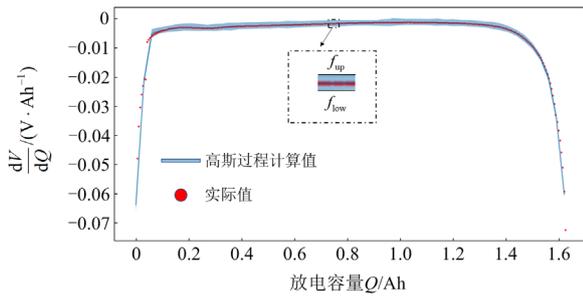


图2 基于高斯过程的电池微分电压回归

Fig. 2 Regression of battery differential voltage based on Gaussian process

按照高斯过程的定义,微分电压采样值 \mathbf{Y}_{DV} 和微分电压预测分布 f_{DV^*} 满足如式(1)的联合先验分布。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{DV} \\ f_{DV^*} \end{bmatrix} \sim N\left(0, \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}^T \\ \mathbf{K}_* & k_{**} \end{bmatrix}\right) \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k(x_{q1}, x_{q1}) & \dots & k(x_{q1}, x_{qn}) \\ \vdots & & \vdots \\ k(x_{qn}, x_{q1}) & \dots & k(x_{qn}, x_{qn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_* = [k(x_{q1}, x_{q^*}) \quad \dots \quad k(x_{qn}, x_{q^*})] \quad (3)$$

$$k_{**} = k(x_{q^*}, x_{q^*}) \quad (4)$$

$$k(x_i, x_j) = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{(x_i - x_j)^2}{2l^2}\right) \quad (5)$$

式中: $k(\cdot)$ 为协方差函数,本文使用平方指数协方差函数^[27]; x_{q^*} 为高斯回归函数预测的输入放电容量; σ_f 、 l 为超参数,超参数优化的过程即为更准确地得到微分电压曲线回归函数与其置信区间的过程,超参数优化具体过程同文献^[28]。微分电压预测的后验分布可以表示为

$$f_{DV^*} | \mathbf{X}_Q, \mathbf{Y}_{DV}, x_{q^*} \sim N(\bar{f}_{DV^*}, \sigma^2(f_{DV^*})) \quad (6)$$

由贝叶斯定理^[29]可以得到与 x_{q^*} 对应的微分电压分布 f_{DV^*} 的均值与方差,如式(7)、式(8)所示。由式(2)—式(8)可知, \bar{f}_{DV^*} 、 $\sigma^2(f_{DV^*})$ 均为 x_{q^*} 的显式函数。

$$\bar{f}_{DV^*} = \mathbf{K}_* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{Y}_{DV} \quad (7)$$

$$\sigma^2(f_{DV^*}) = k_{**} - \mathbf{K}_* \mathbf{K}^{-1} \mathbf{K}_*^T \quad (8)$$

高斯过程能够有效应对非线性数据的回归问题,并能给出回归函数的置信区间。因此,式(9)、式(10)中的 f_{up} 、 f_{low} 可分别表示以 \bar{f}_{DV^*} 为均值、置信区间为 $\pm M$ 个标准差的上下边界函数。为了更清楚地展示上下边界函数,绘制电池单体某次放电循环微分电压曲线的高斯回归区域,如图2所示,浅蓝色区域边界表示 $\pm M$ 个标准差的上下边界函数。

$$f_{up} = \bar{f}_{DV^*} + M \sqrt{\sigma^2(f_{DV^*})} \quad (9)$$

$$f_{low} = \bar{f}_{DV^*} - M \sqrt{\sigma^2(f_{DV^*})} \quad (10)$$

式(9)、式(10)均为非线性显式解析函数,因此可用牛顿算法计算 f_{up} 、 f_{low} 的第一个驻点和最后一个驻点,即: x_{up1} 、 x_{up2} 、 x_{low1} 和 x_{low2} 。电池单体电压特征量通常符合高斯分布^[30],根据电压特征量的定义, $\pm M$ 个标准差处的电压特征值可由 $d_{up} = x_{up2} - x_{up1}$ 、 $d_{low} = x_{low2} - x_{low1}$ 计算。进一步得到某次放电循环电压特征量的均值 \bar{d} 和方差 σ_d ,如式(11)、式(12)所示。

$$\bar{d} = \frac{1}{2}(d_{low} + d_{up}) \quad (11)$$

$$\sigma_d = \frac{1}{2M} |d_{\text{up}} - d_{\text{low}}| \quad (12)$$

通过式(11)、式(12)的均值和方差, 可构建电池单体电压特征量的分布 d^* , 如式(13)所示。

$$d^* \sim N(\bar{d}, \sigma_d) \quad (13)$$

至此, 基于式(13)可以得到每个电池单体各自的放电循环中电压特征量分布。通过对每个电池单体电压特征量分布进行性能水平划分以及性能水平概率计算(该计算方法将在第2节中详细介绍), 可有效表征不同电池单体的健康水平差异, 并为刻画电池性能衰减提供新的维度。

2 基于多维通用生成函数的储能电池系统运行可靠性评估模型

第1节所构建的电池单体电压特征量正态分布 d^* 为刻画电池性能衰减提供了新维度。本节综合考虑电池电压特征量、容量两个维度, 提出了基于多维通用生成函数的储能电池系统运行可靠性评估模型。首先, 本节分析储能电池系统可靠性传统评估方法存在的问题; 然后, 建立基于多维通用生成函数的储能电池单体多状态可靠性评估模型, 以精准描述储能电池单体可靠性; 最后, 考虑电池单体串并联关系, 提出考虑多维性能衰减的储能电池系统运行可靠性评估模型, 为精准的储能电池系统可靠性评估方法打下模型基础。

2.1 储能电池系统可靠性传统评估方法问题分析

传统储能电池单体可靠性通常定义为: 电池单体各维度性能值同时不低于其对应的安全阈值的概率。对于含有 N 个单体的电池系统, 其储能电池单体可靠性可表示为

$$R = \Pr\left\{Q \geq \frac{Q_{\text{req}}}{N}, d \geq d_{\text{req}}\right\} \quad (14)$$

式中: R 为储能电池单体的可靠性; Q_{req} 、 d_{req} 分别为系统要求的最低总容量和电池单体最低电压特征量; Q 、 d 分别为电池单体的容量和电压特征量。

传统储能电池系统可靠性评估通常假定所有电池单体的健康状态均相同, 则含 N 个电池单体的储能电池系统可靠性 R_s 可表示为

$$R_s = R^N \quad (15)$$

由式(15)可知: 储能电池单体可靠性 R 与储能电池系统可靠性 R_s 呈指数型关系, 因此, 电池单体可靠性评估结果对储能电池系统可靠性评估结果影响巨大。当 N 个电池单体中选择偏小的 R 时, 所评估的储能电池系统可靠性 R_s 将低于真实的可靠性水平; 当 N 个电池单体中选择偏大的 R 时, 所评估

的储能电池系统可靠性 R_s 又将高于真实的可靠性水平。综上, 传统储能电池系统可靠性评估准确性不足, 式(15)未能体现所有电池单体可靠性对储能电池系统可靠性的影响, 且未考虑电池单体可靠性建模的不确定性和电池单体之间的串并联关系, 难以保障 R_s 的准确性^[31]。

针对上述电池单体和系统可靠性建模不够精准的问题, 本文将在2.2节中提出相应方法。

2.2 基于多维通用生成函数的储能电池单体多状态可靠性评估模型

本节利用多维通用生成函数^[32]描述储能电池单体的多维性能衰减, 主要考虑电压特征量衰减和电池容量衰减两个维度。首先, 分别将电池单体电压特征量和容量的性能水平进行等级划分, 进一步计算各性能水平等级概率, 构建电压特征量与容量的通用生成函数。然后, 将上述两类通用生成函数按照各性能水平等级概率相乘、性能水平等级取大的原则进行融合计算, 进一步构建基于多维通用生成函数的储能电池单体多状态可靠性评估模型。

由式(13)可得, 电池单体 i 在第 n 次放电循环中电压特征量的分布 d^* , 将该分布划分成不同区间, 每个区间对应一个性能状态等级。按照从高到低进行排列, 构建性能状态等级集合 l_i 以及电压特征量性能状态等级 j 所对应的区间 D_{ij} 为

$$l_i = \{1, 2, \dots, j, \dots, L_{iv}\} \quad (16)$$

$$D_{ij} = [d_{ij_lower}, d_{ij_up}] \quad (17)$$

式中: 1 表示最佳工作状态等级; L_{iv} 表示无效工作状态等级; j 则介于最佳工作状态与无效工作状态之间, 其值越大, 所表示的性能水平越低; d_{ij_up} 与 d_{ij_lower} 分别表示电压特征量性能状态等级 j 对应性能水平区间的上下边界。

基于上述性能水平区间 D_{ij} 以及电压特征量分布 d^* 的均值 \bar{d}_i 和方差 σ_d , 计算储能电池单体 i 第 j 个电压特征量性能状态等级对应的概率 $p_{i,j}$, 如式(18)所示。

$$p_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d}} \int_{d_{ij_lower}}^{d_{ij_up}} e^{-\frac{(x-\bar{d}_i)^2}{2\sigma_d^2}} dx \quad (18)$$

按照通用生成函数的定义, 可构建储能电池单体 i 电压特征量通用生成函数 $u_d(z)$, 其形式为 L_{iv} 个多项式相加, 如式(19)所示。式(19)通过电压特征量性能状态等级以及对应概率, 可准确描述储能电池单体的不确定性, 为储能电池单体可靠性的精准计算提供理论基础。

$$u_d(z) = \sum_{j=1}^{L_{in}} p_{i,j} z^j \quad (19)$$

式中, z 为通用生产函数中的多项式变量。

为了得到储能电池容量衰减的通用生成函数, 应先构建储能电池容量衰减模型。本文选取文献[31]所提的电池容量衰减模型来构建储能电池单体容量在第 n 次充放电循环中的正态分布 Q^* , 如式(20)所示。

$$Q^* \sim N(\bar{Q}, \sigma_Q) \quad (20)$$

类似于电压特征量, 将 Q^* 划分成不同区间, 每个区间对应一个性能状态等级。按照从高到低进行排列, 构建性能状态等级集合 m_i 以及性能状态等级 k 所对应的区间 I_{ik} , 如式(21)、式(22)所示。

$$m_i = \{1, 2, \dots, k, \dots, M_{iQ}\} \quad (21)$$

$$I_{ik} = [Q_{ik_lower}, Q_{ik_up}] \quad (22)$$

式中: 1 表示最佳工作状态等级; M_{iQ} 表示无效工作状态等级; k 则介于最佳工作状态与无效工作状态之间, 其值越大, 其表示的性能水平越低; Q_{ik_up} 与 Q_{ik_lower} 分别表示第 k 个电池容量性能状态等级对应性能水平区间的上下边界。

基于上述性能水平区间 I_{ik} 以及电池容量分布 Q^* 的均值 \bar{Q} 和方差 σ_Q , 计算储能电池单体 i 第 k 个电池容量性能状态等级对应的概率 $p_{i,k}$, 如式(23)所示。

$$p_{i,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Q}} \int_{Q_{ik_lower}}^{Q_{ik_up}} e^{-\frac{(x-\bar{Q})^2}{2\sigma_Q^2}} dx \quad (23)$$

类似式(19), 可构建储能电池单体 i 电池容量通用生成函数 $u_Q(z)$, 其形式为 M_{iQ} 个多项式相加, 如式(24)所示。

$$u_Q(z) = \sum_{k=1}^{M_{iQ}} p_{i,k} z^k \quad (24)$$

最后, 按照多维通用生成函数的计算法则, 将式(19)、式(24)所得通用生成函数按照性能状态等级对应概率相乘、性能状态等级取大的法则进行融合计算, 得到储能电池单体 i 的多维通用生成函数 $u_i(z)$, 如式(25)所示。

$$u_i(z) = \sum_{j=1}^{L_{in}} \sum_{k=1}^{M_{iQ}} p_{i,j} p_{i,k} z^{\max(j,k)} = \sum_{e=1}^{\max(L_{in}, M_{iQ})} p_{ie} z^e \quad (25)$$

式中, p_{ie} 表示经多维通用生成函数计算后, 电池单体 i 性能水平状态等级 e 对应的概率。

按照电池通用生成函数与可靠性的关系, 设定储能电池单体 i 的最低需求性能状态等级 γ , 当电

池单体 i 的通用生成函数多项式指数 e 低于 γ 时, 对上述项对应的系数 p_{ie} 求和, 即为电池单体 i 的可靠性水平 R_i , 如式(26)所示。

$$R_i = \Pr(e \leq \gamma) = \sum_{e \leq \gamma} p_{ie} \quad (26)$$

2.3 考虑串并联关系的储能电池系统多状态运行可靠性评估模型

为满足容量与电压的需求, 储能电池系统通常由多个电池单体通过串联与并联而成。本节提出考虑串并联关系的储能电池系统多状态运行可靠性评估模型, 能更准确地构建 R_s 。

设储能电池系统具有 N 个电池单体, 不同电池单体的通用生成函数 ($u_1(z), u_2(z), \dots, u_N(z)$) 可由式(25)计算得到。若两个电池单体为并联关系, 则按照通用生成函数系数相乘、指数取小的原则进行融合计算; 若两个电池单体为串联关系, 则按照通用生成函数系数相乘、指数取大的原则进行融合计算。按上述原则得到储能电池系统通用生成函数 $U_{sys}(z)$, 如式(27)所示。

$$U_{sys}(z) = \Omega(u_1(z), u_2(z), \dots, u_N(z)) = \sum_{h=1}^H p_{sys,h} z^h \quad (27)$$

式中: Ω 表示考虑串并联关系的多个电池单体通用生成函数融合计算; $p_{sys,h}$ 表示储能电池系统的性能水平状态等级 h 对应的概率; H 表示储能电池系统性能水平等级总数。

类似式(26), 设定储能电池系统最低需求性能状态等级 β , 当储能电池系统的通用生成函数多项式指数 h 低于 β 时, 对上述所对应的系数 $p_{sys,h}$ 求和, 即为储能电池系统的可靠性水平 R_s , 如式(28)所示。

$$R_s = \Pr(h \leq \beta) = \sum_{h \leq \beta} p_{sys,h} \quad (28)$$

至此, 本文通过式(16)—式(26)建立基于多维通用生成函数的储能电池单体多状态可靠性评估模型, 该模型考虑了电池单体可靠性的不确定性。此外, 进一步通过式(27)、式(28)建立了考虑串并联关系的储能电池系统多状态运行可靠性评估模型, 所提技术有效提高储能电池系统可靠性评估的精度。

3 基于多维通用生成函数的储能电池系统运行可靠性评估模型

基于以上考虑多维性能衰减的储能电池系统可靠性评估模型, 本文进一步提出了其评估方法及流程, 其流程图如图3所示。

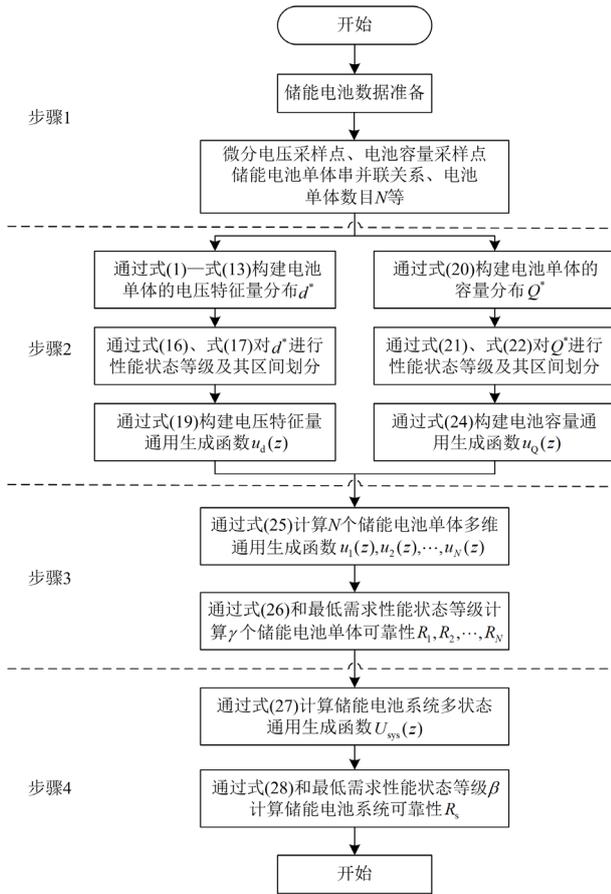


图3 储能电池系统可靠性评估流程

Fig. 3 Reliability evaluation process of energy storage battery system

步骤 1: 储能电池系统数据准备。输入储能电池系统中各电池单体当前循环放电过程中微分电压采样点、电池容量采样点, 储能电池单体串并联关系以及电池单体数目 N 等。

步骤 2: 储能电池各维度通用生成函数计算。首先, 基于微分电压采样点、电池容量采样点, 利用式(1)~式(13)以及式(20), 分别构建电池单体电压特征量的正态分布 d^* 与电池容量分布 Q^* ; 然后, 利用式(16)、式(17)以及式(21)、式(22)对上述分布分别进行性能状态等级及其区间划分; 最后, 利用式(19)、式(24)构建电压特征量通用生成函数 $u_d(z)$ 与电池容量通用生成函数 $u_Q(z)$ 。

步骤 3: 基于多维通用生成函数的储能电池单体多状态可靠性评估。首先, 将 $u_d(z)$ 与 $u_Q(z)$ 按照性能状态等级对应概率相乘、性能状态等级取大的法则, 通过式(25)计算 N 个储能电池单体通用生成函数 $u_1(z), u_2(z), \dots, u_N(z)$; 然后, 通过式(26)和最低需求性能状态等级 γ 计算 N 个储能电池单体对应可

靠性水平 R_1, R_2, \dots, R_N 。

步骤 4: 考虑串并联关系的储能电池系统多状态运行可靠性评估。首先, 将 $u_1(z), u_2(z), \dots, u_N(z)$ 按照 2.3 节所提储能电池单体串并联法则进行融合计算, 通过式(27)计算储能电池系统通用生成函数 $U_{sys}(z)$; 然后, 通过式(28)和最低需求性能状态等级 β 计算储能电池系统可靠性水平 R_s 。

4 算例仿真

4.1 参数设置

本文选择储能电池单体的数据为 NASA18650 型号锂电池, 储能电池系统最低需求性能状态等级 β 设置为 9, 电池单体数目 N 设置为 144, 并联的电池组数为 12, 每组电池串联个数为 12, 储能电池系统可靠性 R_s 下限设置为 0.7, 储能电池单体的电压特征量和电池容量性能水平集合均设置为 $\{1, 2, \dots, 13\}$, 储能电池单体的微分电压采样点集和容量采样点集均在 1000 个充放电循环中进行采样。其中, 1 表示最佳工作状态等级, 13 表示无效工作状态等级。本文所有算例仿真均在 Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @2.60 GHz、24 GB RAM 的硬件环境下测试。

3 种方法如下所述(M1—M3)。

M1: 传统可靠性评估方法不考虑电池单体之间的串并联关系;

M2: 单维性能衰减的储能电池系统多状态可靠性评估方法(仅考虑电池容量衰减)考虑电池单体之间的串并联关系;

M3: 考虑多维性能衰减的储能电池系统多状态运行可靠性评估方法(同时考虑电压特征量和容量衰减), 其考虑电池单体之间的串并联关系, 即本文所提方法。

4.2 可靠性评估方法对比

本文将对比 M1—M3 对储能电池系统可靠性评估的精确性。基于 1000 次充放电循环, 本文分别利用 M1—M3 计算储能电池系统可靠性, 并绘制其随充放电循环次数变化趋势, 如图 4 所示。

由 M1 评估结果可知: 储能电池系统可靠性在第 410 次充放电循环时明显下降。由 M3 评估结果可知: 储能电池系统可靠性在第 782 次充放电循环时明显下降。产生上述差异的原因是传统可靠性评估方法未考虑每个电池单体的不确定性, 也未考虑电池单体之间串并联关系对储能电池系统整体可靠性的影响。实际上, NASA18650 型号锂电池通常能安全使用 1000 个充放电循环, 相较于 M1, 本文所提 M3

能更加科学地反映储能电池系统的可靠性水平。

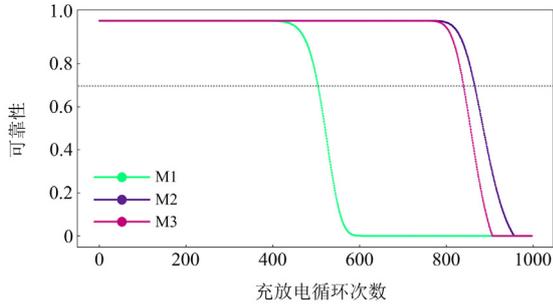


图 4 电池可靠性随循环次数变化的趋势

Fig. 4 Variation trend of battery reliability with cycle times

对比 M2 与 M3 可知，储能电池系统可靠性开始显著下降的循环次数几乎一致，其原因是电压特征量和电池容量具有较高的相关性。而 M3 所计算

的储能电池系统可靠性达到 0 时，比 M2 提前了 48 次循环，其原因是式(25)计算过程中储能电池单体的性能水平等级使用取大函数进行计算，即只要一个维度达不到安全标准，则 M3 评估储能电池单体达不到安全标准，储能电池系统可靠性提前达到 0。

M3 因为考虑了储能电池多维性能衰减，比仅考虑容量衰减的评估方法更为全面地评估了储能电池系统的可靠性。储能电池系统充放电循环次数与 M3 计算的对应性能状态等级、概率如表 1 所示。由表 1 可知，当充放电循环次数较小时，储能电池系统处于最高安全等级，随充放电循环次数的增加，一方面，储能电池系统的安全等级开始分散，另一方面，其整体安全等级逐渐降低。上述结果表明：本文所提的 M3 能够科学地刻画储能电池系统的可靠性，可为其检修和更换提供更全面的参考。

表 1 储能电池系统性能状态等级和对应概率随充放电循环次数变化

Table 1 Health status grade and corresponding probability of the energy storage battery system change with the number of charging and discharging cycles

循环次数	系统性能状态等级												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	0.9999	1.9950e-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1.1943e-61	0.9995	0.0004	8.7559e-118	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	4.162e-14	0.0002	0.0004	0.9993	7.2361e-12	1.4321e-94	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	6.570e-84	4.1701e-17	0.9601	0.0039	6.0388e-36	1.9590e-122	0	0	0	0	0
400	0	0	0	3.7540e-73	7.9866e-17	0.5379	0.4621	4.7634e-22	1.8708e-85	0	0	0	0
500	0	0	0	2.0685e-119	4.5467e-49	5.6744e-14	0.4841	0.5107	1.4868e-17	1.7670e-70	0	0	0
600	0	0	0	2.3022e-96	9.0627e-38	1.8847e-10	0.2923	0.7068	9.6878e-17	5.0597e-52	1.7031e-118	0	0
700	0	0	0	0	5.6821e-115	2.0135e-77	5.3295e-28	3.8571e-07	0.9407	0.0587	7.4813e-18	2.6817e-50	3.7888e-111

4.3 不同串并联关系的储能电池系统可靠性评估分析

本文将对比两种不同串并联关系的储能电池系统可靠性。由图 5 可知：串-并联关系的电池系统与并-串联关系的电池系统在对外输出电压与容量完全一致的情况下，其内部连接关系却并不相同。由式(15)可知，采用 M1 进行评估时，上述两种结构可靠性评估结果完全一致，但采用 M3 进行评估(本文所提可靠性评估方法)时，评估结果却不一致。设置储能电池系统串并联关系对照如表 2 所示。

本文分别对表 2 中串-并联结构和并-串联结构的储能电池系统进行可靠性分析：即基于 1000 次充放电循环，分别用 M3 测试表 2 中并-串联关系电池系统与串-并联关系电池系统的可靠性，并绘制其随充放电循环次数变化的趋势，如图 6 所示。随着充放电循环的进行，串-并联关系的储能电池系统可靠性无论从开始显著衰减还是到达 0 时的循环次数均高于并-串联关系。因此，在储能电池系统设计时，应尽可能多地使用串-并联式连接，以提高储能电池

系统的整体可靠性。

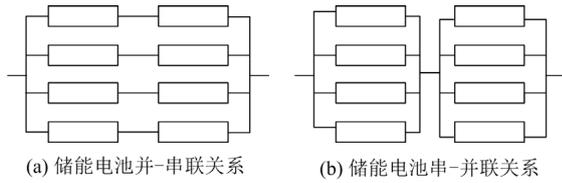


图 5 储能电池联接关系

Fig. 5 Connection mode of energy storage battery

表 2 储能电池系统串并联关系设置

Table 2 Series/parallel mode setting of energy storage battery system

连接方式	每组并联数	串联组数
串-并联结构	12	12
连接方式	并联组数	每组串联数
并-串联结构	12	12

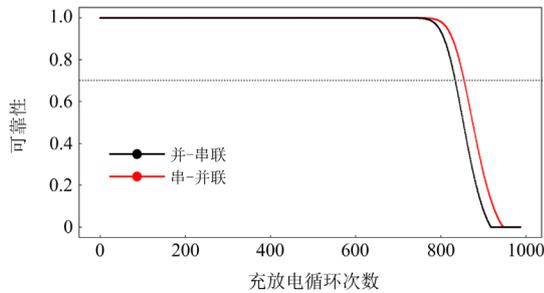


图 6 不同连接方式的可靠性

Fig. 6 Reliability of different connection modes

5 结论

针对现有储能电池系统可靠性评估方法存在的两方面问题, 本文提出考虑多维性能衰减的储能电池系统运行可靠性评估方法, 并结合 NASA18650 锂电池老化数据验证了所提方法有效性。仿真结果表明:

1) 传统储能电池系统可靠性评估结果不够精确, 本文所提可靠性评估方法能更加科学地反映储能电池系统的可靠性水平。

2) 串-并联关系的电池系统与并-串联关系的电池系统在对外输出电压与容量完全一致的情况下, 应尽可能多地使用串-并联式连接。

本文所提方法可为储能电池系统的检修、更换提供依据。储能电池系统在电力系统中发挥着愈加重要的作用, 需要对储能电池系统的可靠性进行更科学的评估。本文所提考虑多维性能衰减的储能电池系统运行可靠性评估方法具有一定的现实意义。

参考文献

[1] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用

功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.

XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Summary and prospect of energy storage application function in new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.

[2] 中国化学与物理电源协会. 储能产业研究白皮书 2023 [EB/OL]. [2023-05-30]. http://www.news.cn/energy/20230408/a2cca24_e8bdc42ff8f9aaf36463956dc/c.html.

[3] 张涛. 2030 年前碳达峰行动方案解读[J]. 生态经济, 2022, 38(1): 9-12.

ZHANG Tao. Interpretation of carbon peak action plan before 2030[J]. Ecological Economy, 2022, 38(1): 9-12.

[4] 新能源网. 国内外储能电站火灾或爆炸事故统计与分析[EB/OL]. [2021-10-28]. <https://www.ne21.com/news/show.php?itemid=160075>.

[5] 发展改革委. 关于加快推动新型储能发展的指导意见[Z]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(25): 43-46.

National Development and Reform Commission. Guidance on accelerating the development of new energy storage[Z]. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(25): 43-46.

[6] 晋殿卫, 顾则宇, 张志宏. 锂电池健康度和剩余寿命预测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 122-130.

JIN Dianwei, GU Zeyu, ZHANG Zhihong. Lithium battery health degree and residual life prediction algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 122-130.

[7] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22-31.

YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.

[8] 刘中孝. 锂离子电池老化分布及状态估计研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.

LIU Zhongxiao. Study of aging distribution and state estimation of lithium-ion batteries[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.

[9] 彭扬. 典型车用锂离子动力电池火灾危险及其控制方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.

PENG Yang. Study on fire hazards and control methods of typical lithium-ion traction battery for electric vehicle[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.

[10] 孙金磊. 基于状态与模型参数联合估计的老化电池可充入电量估计方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5886-5898.

SUN Jinlei. Estimation of rechargeable capacity of aged battery based on joint estimation of state and model parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2022, 37(22): 5886-5898.
- [11] VETTER J, NOVÁK P, WAGNER M R, et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 147(1-2): 269-281.
- [12] AGUBRA V, FERGUS J. Lithium-ion battery anode aging mechanisms[J]. Materials, 2013, 6(4): 1310-1325.
- [13] WANG L, PAN C, LIU L, et al. On-board state of health estimation of lifepo4 battery pack through differential voltage analysis[J]. Applied Energy, 2016: 168: 465-474.
- [14] WU Ji, ZHANG Chenbin, CHEN Zonghai. An online method for lithium-ion battery remaining useful life estimation using importance sampling and neural networks[J]. Applied Energy, 2016, 173: 134-140.
- [15] 孙淑华. 基于微分电压曲线的锂离子电池老化模式分析[J]. 电源技术, 2021, 45(6): 723-727.
SUN Shuhua. Aging mode analysis of li-ion battery based on differential voltage curve[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(6): 723-727.
- [16] 齐腾飞. 基于多因素分析的锂离子电池寿命研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
QI Tengfei. The study of lithium-ion battery life based on multiple-factor analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [17] VULLIGADDALA V B, VERNEKAR S, SINGAMLA S, et al. Li-ion monitoring and active/passive balancing IC with in-built cell balancing switches for electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 16(5): 3335-3344.
- [18] 蔡涛, 张钊诚, 袁奥特, 等. 锂离子电池储能安全管理中的机器学习方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 178-187.
CAI Tao, ZHANG Zhaocheng, YUAN Aote, et al. Review of machine learning for safety management of li-ion battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 178-187.
- [19] 钟宇峰, 黄民翔, 羌丁建. 电池储能系统可靠性建模及其对配电系统可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 95-102.
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, QIANG Dingjian. Reliability modeling of battery energy storage system and its effect on the reliability of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 95-102.
- [20] LI C, CHEN X, YI X, et al. Reliability analysis of primary battery packs based on the universal generating function method[J]. Journal of Risk and Reliability, 2009, 223.
- [21] LIU Zhitao, TAN CherMing, LENG Feng. A reliability-based design concept for lithium-ion battery pack in electric vehicles[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 134: 169-177.
- [22] DUBARRY M, TRUCHOT C. Synthesize battery degradation modes via a diagnostic and prognostic model[J]. Journal of Power Sources, 2012, 219: 204-216.
- [23] DUBARY M, SVOBODA V, HWU R, et al. Capacity loss in rechargeable lithium cells during cycle life testing: the importance of determining state-of-charge[J]. Journal of Power Sources, 2007, 174: 1121-1125.
- [24] CHRISTOPHERSEN J P, SHAW S R. Using radial basis functions to approximate battery differential capacity and differential voltage[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(4): 1225-1234.
- [25] LAI X, DENG C, LI J, et al. Rapid sorting and regrouping of retired lithium-ion battery modules for echelon utilization based on partial charging curves[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1246-1254.
- [26] 贾昊. 基于高斯过程回归的热工系统数据驱动建模研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
JIA Hao. Research on data-driven modeling of thermal system based on Gaussian process regression[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [27] GUILHERME H S, AILSON R S. Combining maximum likelihood estimation and LSTM neural network to forecast reliability distributions: a study based on real data from the sugar-energy sector[J]. IEEE Latin America Transactions, 2022, 20: 608-615.
- [28] WILLIAMS C K, RASMUSSEN C E. Gaussian processes for machine learning[M]. Cambridge, MA, USA: MIT press, 2006.
- [29] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [30] JOHN A. Mathematical statistics and data analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [31] LIU Z, TAN C M, LENG F. A reliability-based design concept for lithium-ion battery pack in electric vehicles[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 134: 169-177.
- [32] LI C Y, CHEN X, YI X S. Reliability analysis of primary battery packs based on the universal generating function method[J]. Journal of Risk and Reliability, 2009, 223.

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-06-14

作者简介:

王辉东(1974—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化工程及技术研究; E-mail: 18244891@qq.com

王博石(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行可靠性; E-mail: 493733680@qq.com

余娟(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力与能源经济优化运行、风险评估、深度学习。E-mail: yujuanqu@cqu.edu.cn

(编辑 姜新丽)