

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.225

引用格式:姚海燕,王博石,夏红军,等. 计及电池储能系统失效特性的电力系统运行可靠性评估[J]. 重庆大学学报, 2025,48(11): 1-13.



计及电池储能系统失效特性的电力系统运行可靠性评估

姚海燕¹,王博石²,夏红军³,余娟²,俞啸玲³,缪宇峰¹

(1. 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, 杭州 311100; 2. 重庆大学 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044; 3. 国网浙江省电力有限公司 杭州市余杭区供电公司, 杭州 311100)

摘要: 储能电池系统响应速度快、调节能力强,能够有效应对可再生能源随机性。然而,随着电池储能比例提高,其失效特性对电力系统可靠性的影响逐步增大。文中提出了计及电池储能系统失效特性的电力系统运行可靠性评估方法。首先,基于通用生成函数建立了电池储能系统多维性能衰减概率模型,结合储能电池热失控失效预警概率,建立综合考虑电池储能失效的可用输出功率模型;然后,构建了计及电池储能系统失效的电力系统负荷削减模型,并基于蒙特卡洛模拟法,提出了考虑电池储能系统失效特性的电力系统可靠性评估方法,精准考虑电池储能系统热失控失效和多维性能衰减失效对电力系统可靠性的影响;最后,在 IEEE RTS-79 节点系统仿真分析,验证了文中所提方法的有效性。

关键词: 储能电池;热失控失效;性能衰减;可靠性分析

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)11-001-13

Power system operational reliability assessment considering battery energy storage system failures

YAO Haiyan¹, WANG Boshu², XIA Hongjun³, YU Juan², YU Xiaoling³, MIAO Yufeng¹

(1. Yuhang Qunli Complete Electrical Manufacturing Branch of Hangzhou Electric Power Equipment Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 311100, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Hangzhou Yuhang District Power Supply Company, Hangzhou 311100, P. R. China)

Abstract: Battery energy storage systems (BESS) feature rapid response and strong regulation capabilities, making them effective in handling the intermittency of renewable energy. However, as the penetration of BESS increases, their failure characteristics pose a growing influence on power system reliability. To address this issue, this paper proposes a reliability assessment method for power system operation that explicitly accounts for BESS failures.

收稿日期: 2024-01-03 网络出版日期: 2024-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFE0191000)。

Supported by the National Key R&D Program of China (2021YFE0191000).

作者简介: 姚海燕(1978—), 女, 硕士, 主要从事数据资产、配网规划工作。

通信作者: 余娟, 女, 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) yujuancqu@cqu.edu.cn。

First, a multi-dimensional performance degradation probability model of BESS is established using the generalized generating function. By integrating this model with the probability of thermal runaway failure, an available output power model that comprehensively considers BESS failure is established. Then, a load curtailment optimization model considering BESS is constructed. Furthermore, a Monte Carlo simulation-based reliability assessment method is proposed to capture both thermal runaway failures and multi-dimensional performance degradation of BESS. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through case studies in the IEEE RTS-79 bus system.

Keywords: battery energy storage; thermal runaway; performance degradation; reliability assessment

电池储能响应速度快、调节能力强,现已被广泛应用于含风力、光伏等可再生能源的电力系统。随着电池储能逐渐步入规模化发展阶段,电力系统对电池储能的安全性和可靠性提出了更高要求^[1]。目前,电池储能已经开始从商业化初期阶段进入规模化发展的阶段,逐步具备更大规模商业化应用条件。至2021年底,中国储能电池市场累计装机容量规模为5 117.1 MW,位居全球第一^[2]。截至2022年底,中国已投运新型储能项目装机容量规模达8 700 MW,其中,储能电池占比为97.8%^[3]。到2025年,预计新型储能装机容量规模将达到50 GW以上,其中,储能电池将达到12 GW^[4]。国家发改委、国家能源局在《关于加快推动新型储能发展的指导意见》中指出^[5]:到2025年,新型电池储能技术的创新能力需显著提高,应加强现行电力系统可靠性评估方法与储能电池失效评估方法的统筹衔接。

电力系统可靠性指系统对供应电力的能力度量^[6],包括充裕性和安全性两方面。现阶段关于电力系统运行可靠性评估的主要在充裕性范围内,考虑指标包括失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和电力不足期望(expected demand not supplied, EDNS)等^[7]。电力系统运行可靠性评估方法主要通过蒙特卡洛模拟在电网可能出现的状态,并优化计算在满足系统安全约束情况下的最小负荷削减量,实现对电网充裕性评估^[8]。储能电池系统作为电力系统中可调节资源,能够通过优化调度缓解线路阻塞,提升电力系统运行可靠性水平^[9],在电力系统调频^[10-11]、经济调度^[12]、电力市场^[13]等方向广泛研究。

在含电池储能系统的电力系统运行可靠性方面,国内外主要分为电池储能系统控制策略研究和储能电池系统参数优化。在储能电池系统控制策略方面,为提高电力系统的可靠性,Xu等^[14]基于序贯蒙特卡洛方法的可靠性评估框架,提出了系统运营商储能协调策略,以准确量化储能对电力系统可靠性的影响。在含有风电和储能的电力系统中,Luo等^[15]针对风力电力过剩时蓄电池储能系统容量空间问题,提出了一种风电和储能协调控制策略,并定量分析了该运行策略对电力系统运行可靠性影响。在储能电池系统参数优化研究方面,Oh等^[16]对配置多个电池储能的风电系统运行可靠性进行评估,结果表明电池储能的配置能够明显减少风电功率波动。并且,Shahoei等^[17]研究表明接入储能电池系统可提高电力系统运行可靠性,并量化了充放电约束对储能接入电力系统运行可靠性提升的限制能力。然而,电池储能随着使用时间的推移,存在失效的问题。现有研究对含储能电池的电力系统运行可靠性评估时,缺乏考虑储能电池失效特性,导致运行可靠性评估不精准,如何在运行可靠性评估中考虑储能电池失效特性是亟待解决的问题。

电池储能失效主要分为热失控失效和性能衰减失效。一方面,储能电池热失控在初期阶段现象不明显,而在末期会引发燃烧甚至爆炸^[18-20],导致储能电池系统直接丧失出力能力,对储能电池及电力系统的安全可靠运行造成显著影响。为此,夏向阳等^[21]提出了基于化学机理和数据驱动的储能电池热失控失效预警方法^[22-23],以适应复杂实际工况。另一方面,储能电池性能随时间呈现明显的衰减趋势,直接影响储能电池系统出力上限。现有方法从储能电池电压、容量衰减等维度进行独立评估^[24-25],或进一步构建多维度融合通用生成函数,综合考虑电池储能多维性能衰减失效^[26]。李思颖等^[27]深入分析温度对电池储能系统性能衰减和热失控传播的影响,建立了电池储能系统的可靠性模型。然而,现有研究主要分别针对热失控失效和性能衰减

失效进行独立预警与评估,缺乏对电池储能系统热失控失效与多维性能衰减失效综合影响精准建模,电池储能系统的可靠供电能力难以有效衡量,缺乏综合考虑储能电池失效特性对电力系统运行可靠性的影响。因此,如何综合反映电池储能或者电池储能系统热失控失效和多维性能衰减失效特性,并构建考虑储能电池系统失效的电力系统运行可靠性评估方法是亟待解决的问题。

文中提出了考虑电池储能系统热失控失效和多维性能衰减失效的电力系统运行可靠性评估方法。1)考虑潜在电池储能热失控失效预警概率和电池储能系统性能衰减失效对电池储能系统可用输出功率的影响,基于通用生成函数建立了储能电池系统多维性能衰减概率模型,并进一步结合储能电池热失控失效预警概率,提出了综合考虑储能电池失效的可用输出功率模型。2)考虑功率平衡和储能运行可靠性等约束,建立了计及储能电池系统失效特性的电力系统负荷削减优化模型,并基于蒙特卡洛模拟法,提出考虑电池储能系统失效特性的电力系统可靠性评估方法,精准考虑电池储能系统热失控失效与多维性能衰减失效对电力系统运行可靠性的影响,最后通过 IEEE RTS-79 节点系统仿真,验证了文中所提方法的有效性。

1 考虑储能电池系统运行可靠性的可用输出功率模型

文中同时考虑电池单体热失控失效与储能电池系统多维性能衰减失效的储能电池系统综合可靠性,准确刻画储能电池的输出功率模型,为电力系统运行可靠性评精准评估奠定模型基础。

1.1 电池储能系统失效模型

储能电池失效主要分为储能电池单体热失控失效和储能电池系统性能衰减失效两方面。储能电池热失控失效由于储能电池单体过热或外界物理影响,电池单体温度快速上升甚至燃烧,能够直接影响储能电池系统。因此通过热失控预警模型计算储能电池热失控失效概率系数,进而评估储能电池系统可用输出功率。

首先,针对储能电池热失控失效,建立基于重构误差无监督学习的热失控概率模型。该模型主要包括热失控预警模型构建和热失控失效概率模型构建。在储能电池热失控预警模型构建中,将储能电池管理系统中(battery management system, BMS)实时监控的电池电压 V 、电流 I 、荷电状态(state of charge, SOC)、温度 T 等特征作为神经网络输入输出特征 X ,通过对正常状态下储能电池状态特征 X 进行编码和解码学习,使神经网络能够精准编码和解码状态特征 X ,重构误差约等于 0,即: $|X-f(X)| \approx 0$ 。当输入异常状态特征 X' 时,由于神经网络对与训练集不同分布数据适应性弱的特性,神经网络编码解码误差增大,即 $|X'-f(X')|$ 增大。最后根据设定重构误差阈值判断,实现储能电池热失控预警。在热失控概率模型构建方面,主要采用多个储能电池状态特征编码解码神经网络集成学习的方法,通过统计所有模型中热失控预警的比例,计算储能电池热失控概率。最后根据设定的阈值计算储能电池热失控系数 P_{thermal} 。假设,电池单体潜在热失控失效率阈值为 δ ,若当前热失控概率大于 δ ,电池单体热失控失效系数 R_{Tr} 取 0;若当前热失控概率小于 δ , R_{Tr} 取 1,如式(1)所示。

$$R_{\text{Tr}} = \begin{cases} 0, & P_{\text{thermal}} > \delta; \\ 1, & P_{\text{thermal}} \leq \delta. \end{cases} \quad (1)$$

对于储能电池多维性能衰减失效,考虑电压衰减和容量衰减两方面,建立储能电池系统电压和容量性能衰减的概率模型。首先,将电压特征量和电池容量特征量划分为不同区间,每个区间对应一个性能状态等级,基于高斯概率密度函数计算不同性能状态等级 j 的概率 p_j 。然后,按照通用生成函数定义,构建储能电池系统的容量通用生成函数 $u_o(z)$ 和电压特征量通用生成函数 $u_d(z)$,如式(2)和式(3)。根据电池容量和电压特征量通用生成函数与可靠性的关系,设定储能电池系统的最低需求容量性能状态等级 γ_o ,当储能电池系统的容量通用生成函数多项式指数 e_o 低于 γ_o 时,对满足条件的电池容量性能状态等级概率 p_{o,e_o} 求和,即为储能电池系统的衰减系数 R_o ,如式(4)所示。同理,可得电池系统的电压衰减系数 R_d ,如式(5)所示。

$$u_d(z) = \sum_{e_d=1}^{L_d} p_{d,e_d} z^{e_d}, \quad (2)$$

$$u_Q(z) = \sum_{e_Q=1}^{L_Q} p_{Q,e_Q} z^{e_Q}, \quad (3)$$

$$R_Q = P_r(e_Q \leq \gamma_Q) = p_{Q,e_Q}, \quad (4)$$

$$R_d = P_r(e_d \leq \gamma_d) = \sum_{e_d \leq \gamma_d} p_{d,e_d}, \quad (5)$$

式中： L_v 、 L_Q 分别表示电压性能等级和电池容量性能等级数量； z 表示通用生产函数中的多项式变量； $P_r(*)$ 表示满足条件*的概率； e_d 、 γ_d 分别表示电池电压特征量通用生成函数多项式指数及其最低需求电压特征量状态等级； p_{d,e_d} 表示电池电压特征量通用生成函数多项式指数 e_d 对应性能等级的概率。

1.2 储能电池系统可用输出功率模型

当储能电池系统参与电力系统联合调度决策时，储能电池系统可用输出功率主要受电池容量上下限限制、充放电功率效率上下限限制。储能电池系统需满足的运行约束介绍如下。

储能电池系统的充放电功率上下限约束为

$$0 \leq P_{d,t} \leq P_{d,\max}, \quad (6)$$

$$0 \leq P_{c,t} \leq P_{c,\max}, \quad (7)$$

式中：第 t 个时间段内，储能电池系统的放电功率为 $P_{d,t}$ ；储能电池系统的充电功率为 $P_{c,t}$ ，即储能电池的期望充电功率； $P_{d,\max}$ 、 $P_{c,\max}$ 分别表示储能电池系统所允许的最大额定放电功率和最大额定充电功率。

储能电池系统充放电功率将影响电池储能系统存储能量，其容量约束为

$$E_{B,t} = E_{B,t-1} + (\eta_c P_{c,t} - P_{d,t}/\eta_d) \Delta t, \quad (8)$$

$$E_{B,\min} \leq E_{B,t} \leq E_{B,\max}, \quad (9)$$

式中： $E_{B,t}$ 、 $E_{B,t-1}$ 分别为 t 时段和 $t-1$ 时段电池储能系统存储电量； $E_{B,\max}$ 、 $E_{B,\min}$ 分别为电池储能系统存储电量的最大、最小值； η_c 、 η_d 分别表示储能电池系统的充电和放电效率； Δt 表示 t 时段和 $t-1$ 时段的时间间隔。

在同一时刻，储能电池系统的状态不能同时处于充电、放电状态，约束公式为

$$P_{d,t} P_{c,t} = 0. \quad (10)$$

综上所述，储能电池运行受到功率上限和容量上限的限制，现有文献一般采用额定功率和容量作为储能运行限制，如式(6)、式(7)与式(9)所示。然而，储能电池系统容量衰减、电压特征量衰减与热失控失效将会导致其最大输出功率减少，即当其容量衰减与电压特征量衰减时，储能的充放电功率无法达到其功率上限，存储电量也无法达到最大值，并且充放电效率也会降低，为电力系统提供相同电量的情况下将会消耗更多储能电池系统存储电量。对于电力系统运行可靠性评估而言，综合表现为输出功率上限和储能电池系统存储容量上限下降。当储能电池热失控时，储能电池系统被破坏，无可用输出功率。因此，构建了储能电池系统的综合可靠性 R'_S ，如式(11)所示，定义考虑储能电池综合可靠性的储能电池系统可用输出功率为储能电池系统最大额定充放电功率与综合可靠性的乘积，计及综合可靠性对其存储容量上限的影响，定义储能电池系统存储容量上限为额定容量与综合可靠性的乘积。那么，储能电池系统的充放电功率上下限约束将改写为式(12)、式(13)，容量约束式(9)将进一步改写为式(14)。

$$R'_S = R_{Tr} R_Q R_d, \quad (11)$$

$$0 \leq P_{d,t} \leq R'_S P_{d,\max}, \quad (12)$$

$$0 \leq P_{c,t} \leq R'_S P_{c,\max}, \quad (13)$$

$$E_{B,\min} \leq E_{B,t} \leq R'_S E_{B,\max}. \quad (14)$$

通过式(6)~(14)构建了考虑储能电池性能衰减和热失控失效的储能电池系统可用输出功率模型，可为负荷削减优化模型提供模型支撑。

2 计及储能电池系统失效的电力系统运行可靠性评估

2.1 电力系统运行可靠性指标

将使用失负荷概率和电力不足期望可靠性指标对含风、光、储的电力系统可靠性进行评估。

2.1.1 失负荷概率

失负荷概率 R_{LOLP} 表示系统发电可用容量小于或等于某一恒定负荷需求的概率,其表达式为

$$R_{LOLP} = \sum_{x \in G} P(x), \quad (15)$$

式中: $P(x)$ 为系统状态 x 的概率; G 为出现电负荷削减的状态集合。

2.1.2 电力不足期望

电力不足期望 R_{EDNS} 表示由于供电不足造成的用户停电所损失的电力期望值,其表达式为

$$R_{EDNS} = \sum_{x \in G} P(x) C_c(x), \quad (16)$$

式中, $C_c(x)$ 为系统状态 x 的负荷削减量。

2.2 计及储能电池系统失效的电力系统负荷削减优化模型

文中采用了工业界常用的直流潮流模型对电力系统负荷削减优化模型进行建模^[28],并在此基础上,考虑了储能电池系统失效的特性和风/光新能源的消纳。以系统总削负荷量、弃风量和弃光量最小作为优化目标,考虑功率平衡和储能运行可靠性等约束,建立了如下计及电池储能系统失效特性的电力系统负荷削减模型。

2.2.1 目标函数

以负荷削减、弃风量、弃光量的加权之和最小为目标建立优化模型,通过储能电池系统与风电/光伏电站的协调,在满足运行约束的情况下,尽可能减少系统弃风、弃光和负荷削减的情况。目标函数的表达式为

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_{ld}} \sum_{t=1}^T \lambda_{ld,i} C_{c,i,t} \Delta t + \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T \lambda_{w,k} \Delta P_{w,k,t} \Delta t + \sum_{r=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \lambda_{s,r} \Delta P_{s,r,t} \Delta t, \quad (17)$$

式中: $\Delta P_{w,k,t}$ 为 t 时段第 k 个风电场的弃风量; $\Delta P_{s,r,t}$ 为 t 时段第 r 个光伏电站的弃光量; $C_{c,i,t}$ 为 t 时段第 i 个负荷的削减量; $\lambda_{w,i}$ 、 $\lambda_{s,i}$ 、 $\lambda_{ld,i}$ 为权重因子; N_w 为风电场数量; N_s 为光伏电站数量; N_{ld} 为负荷节点数量; Δt 为间隔时段; T 为时段总数。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束为

$$\sum_{m=1}^{N_g} P_{F,m,t} + \sum_{k=1}^{N_w} P_{Wmax,k,t} + \sum_{r=1}^{N_s} P_{Smax,r,t} + \sum_{j=1}^{N_b} P_{d,j,t} + \sum_{i=1}^{N_{ld}} C_{c,i,t} = \sum_{i=1}^{N_{ld}} P_{load,i,t} + \sum_{j=1}^{N_b} P_{c,j,t} + \sum_{k=1}^{N_w} \Delta P_{w,k,t} + \sum_{r=1}^{N_s} \Delta P_{s,r,t}, \quad (18)$$

式中: $t=1, 2, \dots, T$; N_g 为火电机组数量; N_b 为接入电池储能的节点数; $P_{F,m,t}$ 为 t 时段第 m 个传统机组的功率; $P_{Wmax,k,t}$ 为 t 时段第 k 个风电场的最大可发电功率; $P_{Smax,r,t}$ 为 t 时段第 r 个光伏电站的最大可发电功率; $P_{load,i,t}$ 为 t 时段第 i 个节点的负荷; $P_{c,j,t}$ 、 $P_{d,j,t}$ 分别为 t 时段第 j 个储能电池的充、放电功率。

2) 线路功率约束为

$$P_{lmin} \leq P_{l,t} \leq P_{lmax}, \quad (19)$$

式中: $t=1, 2, \dots, T$, $l=1, 2, \dots, L$; L 为系统中线路总数; $P_{l,t}$ 为在 t 时段第 l 条线路的有功功率; P_{lmax} 、 P_{lmin} 分别为第 l 条支路的有功功率上、下限值。

3) 爬坡约束为

$$r_{m,down} \leq P_{F,m,t} - P_{F,m,t-1} \leq r_{m,up}, \quad (20)$$

式中: $t=2, \dots, T$, $i=1, 2, \dots, N_g$; $r_{m,up}$ 、 $r_{m,down}$ 分别为传统机组爬坡的上下限值。

4) 负荷削减约束: 负荷削减应小于等于当前负荷功率, 为

$$0 \leq C_{c,i,t} \leq P_{load,i,t} \quad (21)$$

5) 弃风量、弃光量约束:风电场弃风量、光伏电站弃光量应分别小于等于当前时刻风电场、光伏电站最大可发电功率,如式(22)~(23)所示;风电、光伏实际功率与弃风量、弃光量的关联关系如式(24)~(25)所示。

$$0 \leq \Delta P_{W,k,t} \leq P_{W\max,k,t}, \quad (22)$$

$$0 \leq \Delta P_{S,r,t} \leq P_{S\max,r,t}, \quad (23)$$

$$P_{W,k,t} = P_{W\max,k,t} - \Delta P_{W,k,t}, \quad (24)$$

$$P_{S,r,t} = P_{S\max,r,t} - \Delta P_{S,r,t}, \quad (25)$$

式中: $t=2, \dots, T, k=2, \dots, N_w, r=1, 2, \dots, N_s$; $P_{W,k,t}$ 表示 t 时段第 k 个风电场实际功率; $P_{S,r,t}$ 表示 t 时段第 r 个光伏电站实际功率。

6) 储能运行约束。

基于储能电池系统可用输出功率模型的构建,对电力系统中第 j 个储能电池系统运行约束整理如下:可用充放电功率为储能电池系统最大充放电功率与综合可靠性的乘积,因此,储能电池系统的充放电功率上下限约束如式(26)~(27)所示;储能电池系统充放电约束如式(28)所示;储能电池系统当前时段所存储能量由上一时段所存储能量、当前时段的充放电功率,以及充放电效率共同决定,如式(29)所示;储能电池系统可储存电量由其装置自身物理特性、储能电池系统的综合可靠性决定上下限约束如式(30)所示。

$$0 \leq P_{d,j,t} \leq R_{S,j}^t P_{d,\max,j}, \quad (26)$$

$$0 \leq P_{c,j,t} \leq R_{S,j}^t P_{c,\max,j}, \quad (27)$$

$$P_{c,j,t} P_{d,j,t} = 0, \quad (28)$$

$$E_{B,j,t} = E_{B,j,t-1} + (\eta_{c,j} P_{c,j,t} - P_{d,j,t} / \eta_{d,j}) \Delta t, \quad (29)$$

$$E_{B,j,\min} \leq E_{B,j,t} \leq R_{S,j}^t E_{B,j,\max}, \quad (30)$$

式中: $t=1, 2, \dots, T, j=1, 2, \dots, N_b$; $R_{S,j}^t$ 表示第 j 个储能电池系统由式(11)所计算的综合可靠性; $P_{c,\max,j}$ 、 $P_{d,\max,j}$ 分别为第 j 个储能电池系统充电和放电的功率上限; $E_{B,j,t}$ 、 $E_{B,j,t-1}$ 分别为 t 时段和 $t-1$ 时段第 j 个储能电池系统所存电量; $\eta_{c,j}$ 、 $\eta_{d,j}$ 分别表示第 j 个储能电池系统的充电和放电效率; $E_{B,j,\min}$ 、 $E_{B,j,\max}$ 分别为第 j 个储能电池系统可存储电量的上下限值。

综上所述,建立的计及储能电池系统失效的电力系统负荷削减优化模型包括式(17)~(30)。

2.3 计及储能电池系统失效的电力系统运行可靠性评估方法

基于计及储能电池系统失效的负荷削减优化模型,提出计及储能电池系统失效的电力系统运行可靠性评估方法,其流程如图1所示。主要包含如下6个步骤。

步骤1:数据读入。

输入系统元件(电力机组、输电线路、变压器等)状态、负荷、风电场、光伏电站和储能电池数据。

步骤2:建立储能电池系统可用输出功率模型。

利用文中所提储能电池系统可用输出功率模型确定当前各储能电池系统的可用功率。

步骤3:状态抽样。

利用蒙特卡洛模拟法对系统元件状态、负荷 $P_{load,i,t}$ 、风电场出力 $P_{W\max,k,t}$ 和光伏电站出力 $P_{S\max,r,t}$ 等随机变量进行抽样,由此确定一个系统状态。

步骤4:拓扑分析与潮流计算。

对抽样得到系统状态进行连通性辨识,然后进行潮流计算,判断系统是否存在线路潮流越限问题。

步骤5:最小切负荷求解与可靠性指标计算。

若系统存在问题,则根据式(17)~(30)对存在负荷削减或弃风弃光的系统状态,进行最小切负荷计算和弃风/弃光量计算,然后用式(15)~(16)计算系统可靠性指标。若系统不存在问题,则直接利用式(15)~(16)计算系统可靠性指标。

步骤 6: 抽样收敛判据。

以运行可靠性指标的最大方差系数 $\mu \leq 0.01$ 或累计抽样次数 $K > 30\ 000$ 作为收敛判据, 若满足收敛判据则结束计算, 输出运行可靠性评估结果; 否则返回步骤 3, 进行下一次抽样。

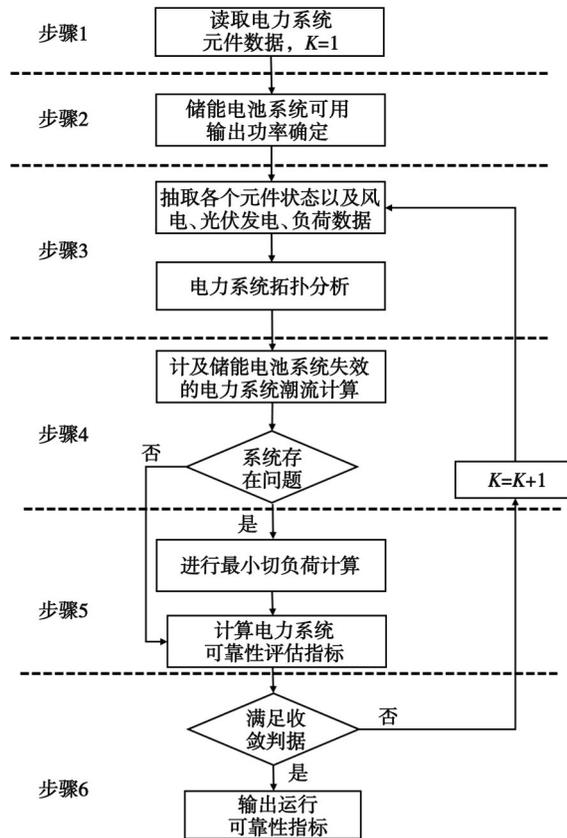


图 1 计及电池储能系统失效特性的电力系统运行可靠性评估流程

Fig. 1 Process for evaluating the operational reliability of power systems considering the failure characteristic of BESS

综上所述,文中构建了考虑电池储能系统多维性能衰减和热失控失效的综合可靠性系数,并以此为基础,结合储能电池系统的运行约束,构建了考虑储能电池系统运行可靠性的可用输出功率模型,并提出了计及储能电池系统失效电力系统负荷削减模型与运行可靠性评估方法,准确考虑储能电池失效特性对电力系统可靠性的影响。

3 算例分析与讨论

探究了不同容量、不同充放电功率和不同工况下运行的储能电池系统对其所在的电力系统可靠性影响,在 IEEE RTS-79 系统中进行了算例分析,并对 IEEE RTS-79 系统的算例进行了详细说明。

3.1 模型设置与指标介绍

IEEE RTS-79 系统被广泛用于测试发/输电系统的可靠性^[29],文中采用中国某内陆城市年度负荷曲线、风电场输出功率曲线、光伏电站输出功率曲线,并对其数值进行等比缩小以适应 RTS-79 系统。在负荷节点 2、5、9、15 分别接入装机容量为 100 MW 的风电场,并在负荷节点 1、3、7、19 分别接入装机容量为 100 MW 的光伏电站,其他参数与 IEEE RTS-79 原始系统保持一致。

对上述增加了新能源的 IEEE RTS-79 系统进行可靠性评估,统计各个负荷节点的 R_{EDNS} ,由图 2 可知,当含新能源的 RTS-79 系统中不含有储能电池系统时,负荷节点 1、2 的 R_{EDNS} 最大,分别为 2.21 MW 和 2.28 MW,负荷节点 18 峰荷最大,为 334 MW。结合新能源场站的安装位置、RTS-79 系统各负荷节点峰荷大小和各负荷节点的削负荷量,为使储能电池系统能够尽可能减小电力系统负荷削减量,文中在负荷节点 1、2、3、5、7、9、15、18、19 分别接入容量为 100 MW·h 的储能电站,修改后的系统拓扑结构如图 3 所示。

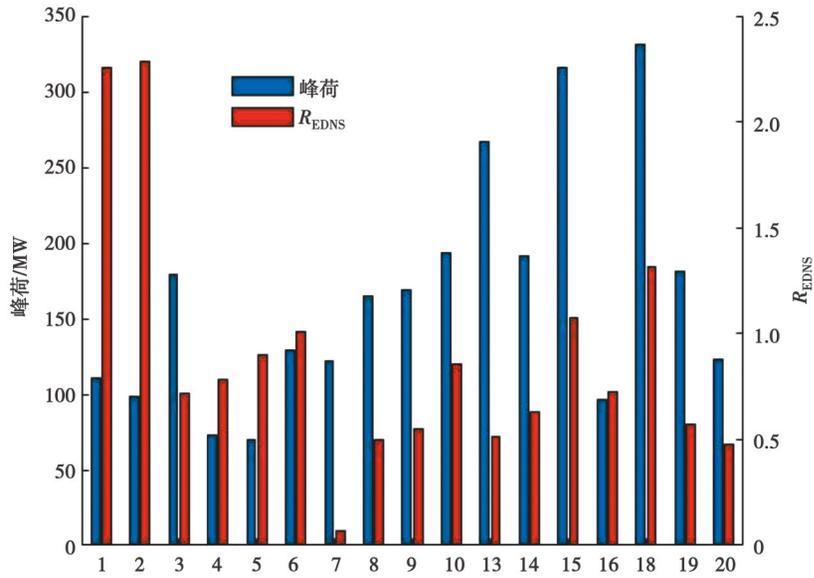


图 2 含新能源的 RTS-79 系统各负荷节点 R_{EDNS} 及峰荷

Fig. 2 R_{EDNS} and peak load of each load node in the RTS-79 containing renewable energy

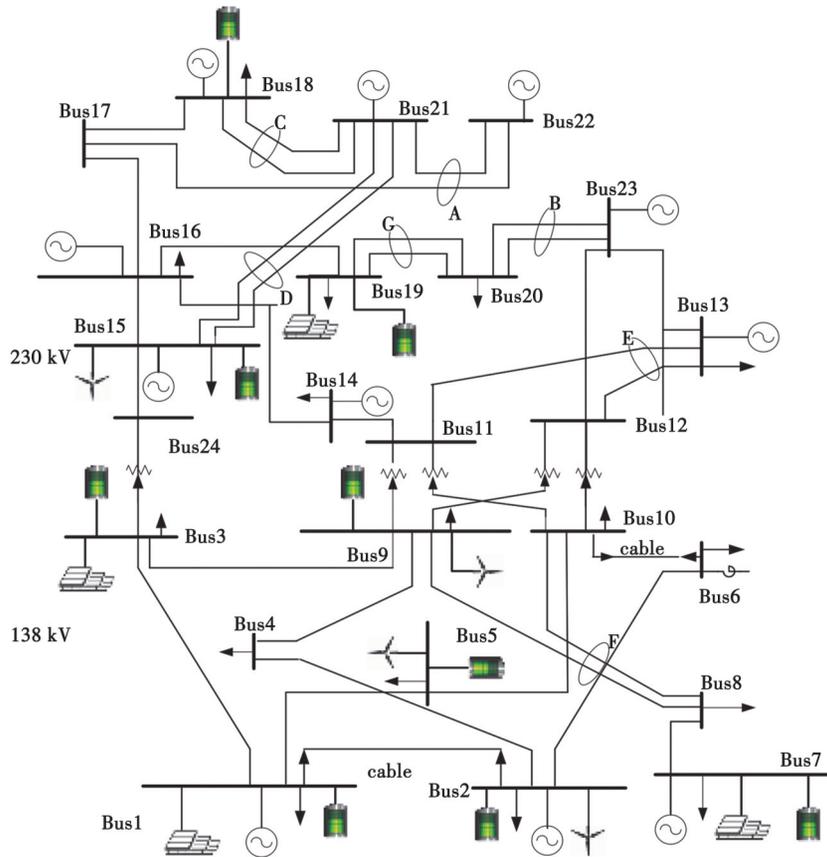


图 3 含有新能源与储能电池系统的 IEEE RTS-79 系统

Fig. 3 IEEE RTS-79 system containing renewable energy and BESS

结合上述修改后的 RTS-79 仿真系统,对比 3 种场景下的电力系统可靠性指标,论证储能电池系统自身失效对其接入的电力系统可靠性评估结果存在影响。设置不同容量、不同充放电功率的储能电池系统,探究能够提高电力系统可靠性的储能参数;同时,通过设置不同的储能电池系统的温度、放电深度,探究不同储能工况对电力系统可靠性的影响。文中所有算例仿真均在 Intel(R) Core(TM) i7-10700、K CPU @3.80GHz、24 GB RAM 的硬件环境下测试。

3.2 计及电池储能系统失效的电力系统可靠性评估结果分析

设置 3 组场景应用于仿真系统:一是不含储能电池的 RTS-79 系统,即图 3 中不含储能电池系统部分;二是含储能的 RTS-79 系统,其拓扑结构如图 3 所示,但不考虑储能电池系统的失效特性,其中,各储能电池系统充放电效率 η_c 、 η_d 均设置为 0.9,充放电功率均设置为 50 MW,正常运行最大容量 $E_{B,j,max}$ 为 90 MW·h,最小容量 $E_{B,j,min}$ 为 10 MW·h;三是含储能的 RTS-79 系统,并考虑储能电池系统的失效特性,其中,储能电池系统温度 T 设置为 25 °C,储能电池系统以 2C 倍率进行充放电,其余参数同第 2 组仿真系统。抽样收敛判据为 $\mu \leq 0.01$ 或 $K \leq 30\ 000$,统计仿真结果 R_{EDNS} 、 R_{LOLP} 指标,如图 4 所示。

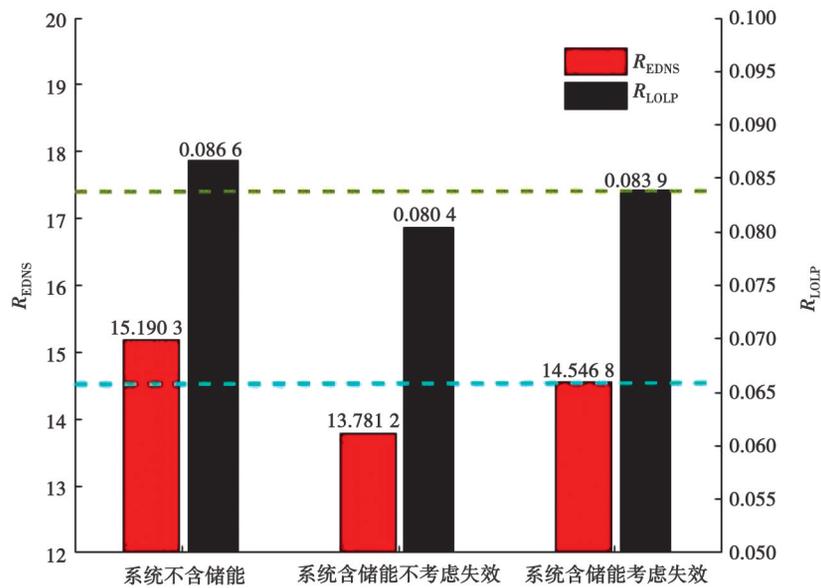


图 4 储能电池系统失效对电力系统可靠性影响

Fig. 4 The impact of BESS failure on the reliability of power systems

由图 4 可知,在电力系统其他输入量不变的情况下,储能电池系统的有无与会对系统可靠性指标 R_{EDNS} 、 R_{LOLP} 造成直接影响。IEEE RTS-79 系统(接入新能源)自接入储能电池系统(不考虑失效特性)后,其 R_{EDNS} 从 15.1903 MW 下降至 13.7812 MW,下降了 1.4091 MW, R_{LOLP} 从 0.0866% 下降至 0.0804%,下降了 0.0062%。但接入储能电池系统并考虑其失效特性后,IEEE RTS-79 系统的 R_{EDNS} 仅下降 0.6435 MW, R_{LOLP} 仅下降 0.0027%。上述结果说明,储能电池系统的接入能够增强电力系统的可靠性,但若未考虑其本身的失效特性,则可能导致对电力系统可靠性预期过于乐观,进而造成电力系统的故障,因此,在计算含储能电池系统的电力系统可靠性时,有必要考虑储能电池系统本身的失效特性。

3.3 电池储能系统不同容量对电力系统可靠性影响

电池储能系统失效特性对其容量具有不可或缺的影响,随着时间的推移,其容量也将逐步衰减。通过设置不同容量的储能电池系统(最大充/放电功率、负荷设置均与 3.2 节中第 3 组场景设置相同),以探索储能电池系统容量衰减对修改后的 RTS-79 系统的可靠性指标影响。

由图 5 可知,当各电池储能系统容量大于 800 MW·h 之后,修改后的 RTS-79 系统 R_{EDNS} 指标变化很小,然而,当各电池储能系统容量为 0~700 MW·h,RTS-79 系统 R_{EDNS} 指标从 14.5399 MW 提升至 15.2064 MW,上升了 0.6665 MW,系统可靠性水平下降。然而,当电池储能系统容量从 1 500 MW 下降至 800 MW 时,电池储能系统容量充裕,容量衰减对于电力系统运行可靠性的影响非常小。

3.4 电池储能系统充放电功率对电力系统可靠性影响

设置不同最大充/放电功率的储能电池系统(容量设置为 200 MW·h、可靠性函数、负荷设置均与 3.2 节中第 3 组场景设置相同),以探索储能电池系统容量对修改后的 RTS-79 系统的 R_{EDNS} 指标影响。令储能电池系

统最大充/放电功率同时从100 MW下降到10 MW。在研究最大充/放电功率的影响时,其他条件保持与3.2节中设置一致。改造后的RTS-79系统 R_{EDNS} 指标随最大充/放电功率变化过程如图6所示。

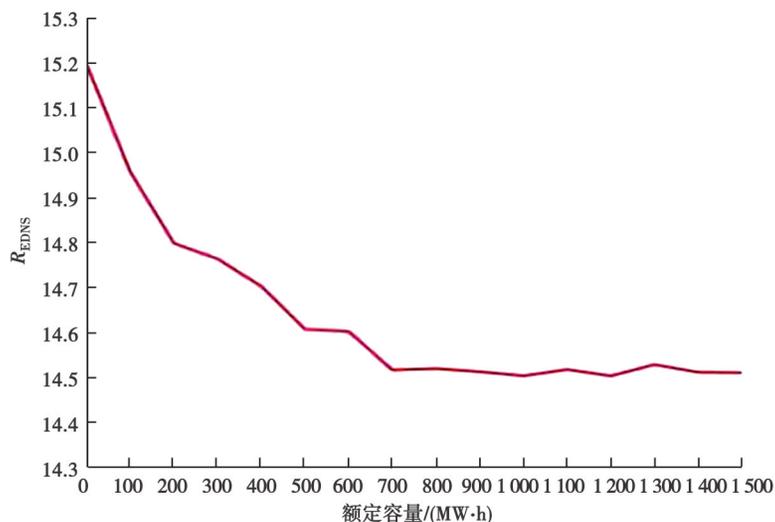


图5 修改后RTS-79系统 R_{EDNS} 随储能电池系统容量变化

Fig. 5 Variation of modified RTS-79 system R_{EDNS} with BESS capacity

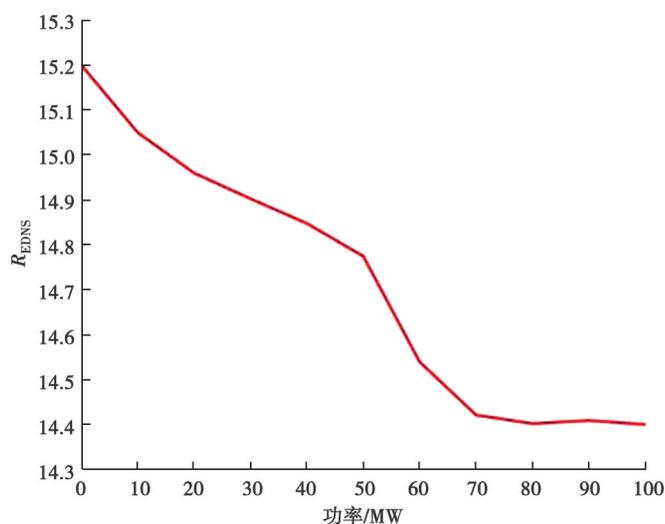


图6 修改后RTS-79系统 R_{EDNS} 随储能电池系统充/放电功率变化

Fig. 6 Variation of modified RTS-79 system R_{EDNS} with the charging/discharging power of BESS

由图6可知,电池储能系统最大充/放电功率为0~70 MW时,随最大充/放电功率的减小,系统的 R_{EDNS} 明显上升,当最大充电/放电功率大于70 MW时,系统 R_{EDNS} 变化幅度很小。对充电功率而言,当发电机组大于负荷需求时,储能电池系统充电功率越大,存储在其中的电能越多,因此,当系统电力功率小于负荷需求时,储能电池系统能够放出的电能就越多,满足了负荷需求。对放电功率而言,当发电机组所提供功率小于负荷需求时,储能电池系统能够输出的功率越大,削负荷量越小。对于该系统,当充/放电功率在60~70 MW时,电池储能系统失效特性导致的充放电能力下降,对电力系统运行可靠性的影响尤为灵敏,但是当充放电功率大于70 MW时,电池储能系统失效特性导致的充放电能力下降,对电力系统运行可靠性的影响将会非常小。

3.5 不同工况下储能电池系统失效过程对电力系统可靠性影响

储能电池系统运行工况与其可靠性直接相关,即储能电池系统在不同工况下,其可靠性曲线会随之变化,进而影响电力系统可靠性评估结果。因此,为了探究不同工况下含储能电池系统的电力系统可靠性,设置如下算例:设定不同温度来反映不同的储能电池系统运行工况。将储能电池系统分别运行于15、25、35 °C

下(储能电池系统容量、最大充/放电功率、负荷设置均与 3.2 节中第 3 组场景设置相同)计算其所在的 RTS-79 系统可靠性指标,结果如图 7 所示。由图 7 可知,温度自 15 °C 变化至 35 °C 的过程中,含储能电池系统的 RTS-79 系统的 R_{EDNS} 从 14.183 1 MW 增长至 15.271 7 MW,增长了 1.086 6 MW, R_{LOLP} 从 0.081 6 增长至 0.089 7,增长了 0.008 1,即储能电池系统运行过程中,温度越高,电力系统的可靠性越低。因此,在储能电池系统的工作温度应尽量降低,以提高其所在电力系统的运行可靠性。

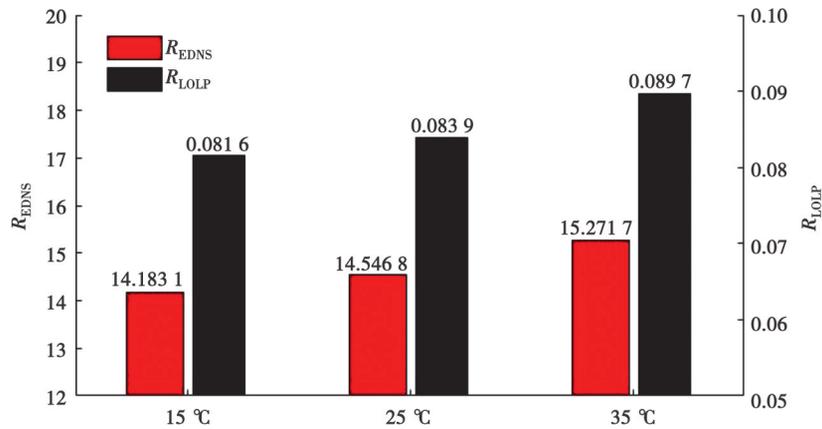


图 7 不同工况下储能电池系统可靠性指标计算结果

Fig. 7 Calculation results of reliability indicators for BESS under different operating conditions

4 结束语

为探究电池储能失效对含储能电池的电力系统层面可靠性的影响,以真实热失控失效数据为基础,结合储能电池系统性能衰减失效评估结果,提出计及储能电池系统失效的电力系统运行可靠性评估方法。

首先,基于潜在热失控失概率和储能电池系统性能衰减失效的可靠性评估结果,构建考虑储能电池系统失效的储能电池系统可用输出功率模型;然后,提出了计及储能电池系统失效的电力系统可靠性优化方法——将储能电池失效特性考虑进其运行约束中,采用蒙特卡洛模拟法对系统进行元件故障抽样,进而计算分析电力系统可靠性指标;最后,在 IEEE RTS-79 系统验证了所提方法必要性,并探究了不同容量、不同充放电功率和不同工况下运行的储能电池系统对其所在的电力系统可靠性影响。

结果表明,当电池储能系统容量充裕、充放电功率足以满足电力系统调节需求时,其失效特性导致的容量衰减和充放电能力下降对电力系统运行可靠性的影响非常小;反之,电池储能的失效特性对运行可靠性的影响则极为显著。此外,应尽量降低电池储能系统的工作温度,以降低工况对其所在电力系统的运行可靠性的影响。文中结果可为系统运行与调度提供更科学的指导,支撑电力系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] Hannan M A, Wali S B, Ker P J, et al. Battery energy-storage system: a review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103023.
- [2] 中国化学与物理电源协会. 2022 储能产业应用研究报告[EB/OL]. <http://www.viltd.com/news/2022/290438286.html>.
China Industrial Association of Power Sources. 2022 Energy Storage Industry Application Research Report [EB/OL]. <http://www.viltd.com/news/2022/290438286.html>.(in Chinese)
- [3] 国家能源局. 国家能源局 2023 年一季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. https://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm.
National Energy Administration. Transcript of the press conference of the National Energy Administration in the first quarter of 2023 [EB/OL]. https://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm.(in Chinese)

- [4] 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 T. Interpretation of the carbon peak action plan before 2030[J]. Ecological Economy, 2022, 38(1): 9-12. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321_ext.html.2021-7-15[2023-7-3].
National Development and Reform Commission of China. Guiding opinions on accelerating the development of new energy storage [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321_ext.html. 2021-7-15[2023-7-3].
- [6] 程林,何剑.电力系统可靠性原理和应用[M].2版.北京:清华大学出版社,2015.
Cheng L, He J. Principles and applications of power system reliability[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [7] 杨金刚,李顺昕,赵炜炜,等.电网可靠性评估的网络静态等值模型分析[J].重庆大学学报,2017,40(4):35-43.
Yang J G, Li S X, Zhao W W, et al. Network static equivalent model for power system reliability evaluation[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(4): 35-43. (in Chinese)
- [8] Li W Y. Probabilistic transmission system planning[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [9] 陈刚,黄杨,丁理杰,等.考虑高压配电网转供能力的储能电站双层规划模型[J].电力建设,2021,42(1):85-95.
Chen G, Huang Y, Ding L J, et al. Bi-level programming model of energy storage power station considering transfer capability of high voltage distribution network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1): 85-95. (in Chinese)
- [10] 刘英培,田仕杰,梁海平,等.考虑SOC的电池储能系统一次调频策略研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):107-118.
Liu Y P, Tian S J, Liang H P, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118. (in Chinese)
- [11] 李立,王佳明,张青蕾,等.兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J].电力建设,2023,44(12):125-135.
Li L, Wang J M, Zhang Q L, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 125-135. (in Chinese)
- [12] 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 Z H, Yu J, Yang Z F, 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)
- [13] 时雨,张忠,杨晶莹,等.储能电池系统提供AGC调频的机会成本建模与市场策略[J].储能科学与技术,2022,11(7):2366-2373.
Shi Y, Zhang Z, Yang J Y, et al. Opportunity cost modelling and market strategy of energy storage participating in the AGC market[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2366-2373. (in Chinese)
- [14] Xu Y X, Singh C. Power system reliability impact of energy storage integration with intelligent operation strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 5(2): 1129-1137.
- [15] Luo L, Abdulkareem S S, Rezvani A, et al. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101306.
- [16] Oh U, Lee Y, Choi J, et al. Reliability evaluation of power system considering wind generators coordinated with multi-energy storage systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(5): 786-796.
- [17] Shahoeei Z, Fotuhi-Firuzabad M, Abbaspour A. Reliability improvement of power system utilizing BESS with wind farm[C]//2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). IEEE, 2015: 1120-1125.
- [18] Shah K, Chalise D, Jain A. Experimental and theoretical analysis of a method to predict thermal runaway in Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2016, 330: 167-174.
- [19] Chalise D, Shah K, Halama T, et al. An experimentally validated method for temperature prediction during cyclic operation of a Li-ion cell[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 112: 89-96.
- [20] Ren D S, Liu X, Feng X N, et al. Model-based thermal runaway prediction of lithium-ion batteries from kinetics analysis of cell components[J]. Applied Energy, 2018, 228: 633-644.
- [21] 夏向阳,邓子豪,张嘉诚,等.基于动力锂离子电池健康状态的全寿命周期优化充电策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):17-24.

- Xia X Y, Deng Z H, Zhang J C, et al. Life cycle optimal charging strategy based on the SOH of power lithium ion battery[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(6): 17-24. (in Chinese)
- [22] 王博石, 余娟, 杨燕, 等. 基于重构误差计算的数据驱动储能电池热失控预警方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(11): 4244-4254.
- Wang B S, Yu J, Yang Y, et al. A data-driven thermal runaway early warning method for energy storage battery with reconstruction error calculation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(11): 4244-4254. (in Chinese)
- [23] Chen S C, Wang Z R, Yan W. Identification and characteristic analysis of powder ejected from a lithium ion battery during thermal runaway at elevated temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123169.
- [24] 孙淑华, 贾新羽. 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 S H, Jia X Y. Simulation analysis of aging mode of Li-ion battery based on differential voltage curve[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(6): 723-727. (in Chinese)
- [25] Atalay S, Sheikh M, Mariani A, et al. Theory of battery ageing in a lithium-ion battery: Capacity fade, nonlinear ageing and lifetime prediction[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 478: 229026.
- [26] 王辉东, 王博石, 张盛, 等. 考虑多维性能衰减的储能电池系统运行可靠性评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(19): 12-20.
- Wang H D, Wang B S, Zhang S, et al. Operational reliability evaluation method for an energy storage battery system considering multi-dimensional performance degradation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 12-20. (in Chinese)
- [27] 李思颖, 叶承晋, 丁一, 等. 考虑性能热衰减和热失控传播的大规模电池储能系统可靠性建模与评估[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2202-2212.
- Li S Y, Ye C J, Ding Y, et al. Reliability modeling and evaluation of large scale battery energy storage systems considering thermal degradation and thermal runaway propagation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2202-2212. (in Chinese)
- [28] Yang Y, Yang Z F, Yu J, et al. Fast economic dispatch in smart grids using deep learning: an active constraint screening approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(11): 11030-11040.
- [29] Grigg C, Wong P, Albrecht P, et al. The IEEE reliability test system-1996. a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, 14(3): 1010-1020.

(编辑 詹燕平)