DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.361 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

储能电站直流侧短路故障计算与诊断

陈培育[1,2]，王 洋[3]，程茹芸[1]，郑骁麟[1]，李 超[2]，曾锴迪[2]
(1.国网天津市电力公司电力科学研究院，天津 300384；2.天津大学国家储能技术产教融合创新平台，天津 300072；3.国网天津市电力公司，天津 300010)

摘要：目前，大量高比例可再生能源接入电网推动了电化学储能电站的快速发展。然而，电化学储能电站安全事故频发，不完善的储能电站保护装置限制了储能电站的运行和使用，因此发展储能电站的故障识别和保护技术十分重要。首先基于实际的储能电站拓扑结构，利用电流叠加法推导出储能电站直流侧簇内短路故障和簇间短路故障的计算公式，并通过仿真模型验证了计算方法的准确性；其次，通过分析故障后不同位置和不同被短路电池数的故障电流，明确故障前、后不同位置的电流变化情况，提出了基于差值电流的储能电站故障诊断方法；最后，通过计算与仿真验证了所提方法能够有效识别储能电站直流侧簇内短路故障和簇间短路故障。

关键词：电化学储能电站；短路故障；短路电流计算；故障诊断

Calculation and Diagnosis of Short-circuit Faulton DC-side of Energy Storage Station

CHEN Peiyu[1,2], WANG Yang[3], CHENG Ruyun[1], ZHENG Xiaolin[1], LI Chao[2], ZENG Kaidi[2]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China; 2. National Industry-Education Platform of Energy Storage, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: At present, the integration of large-scale and high-proportion renewable energy into power grids promotes the quick development of electrochemical energy storage stations. However, safety problems frequently occur at electrochemical energy storage stations, and the inadequate protection equipment for energy storage stations restrict their operation and usage. Therefore, it is necessary to develop the fault identification and protection technology for energy storage stations. First, based on the topology of a real energy storage station, the current superposition method is used to derivecalculation formulas forintra-cluster short-circuit fault and inter-cluster short-circuit fault on the DC side of the energy storage station, and the accuracy of the calculation method is verified through asimulation model. Second, through the analysis of short-circuit current under different fault positions and different numbers of short-circuited battery packs, the changes in current at different positions before and after the occurrence of faults are specified, and a fault diagnosis method forthe energy storage station based on current difference is proposed. Finally, the proposed method is verified by calculation and simulation results, indicating that it can effectively identify the intra-cluster short-circuit fault and inter-cluster short-circuit fault on the DC-side of the energy storage station.

Keywords: Electrochemical energy storage station; short-circuit fault; short-circuit current calculation; fault diagnosis

近年来，在“双碳”目标的背景下，推进可再生能源的快速发展、构建新型电力系统成为必然趋势[1]。然而，可再生能源具有随机性、波动性、间歇性等特点，使电力系统面临着电能质量和系统稳定性下降等问题[2-3]。电化学储能技术因具有快速响应、功率调控灵活等优点，已成为解决新能源

收稿日期：2024-03-20；**修回日期**：2024-05-12；**录用日期**：2024-06-27；**网络首发日期**：2024-07-25
基金项目：国网天津市电力公司科技资助项目(电科-研发2023-52)
This work is supported by State Grid Tianjin Electric Power Company Science and Technology Project under the grant EPRI-R&D 2023-52

发电不稳定问题的有效手段[4]。截至 2025 年 12 月，我国新型储能累计装机规模达到了 144.7 GW，同比增加 85%[5]。

然而，近年来电化学储能电站安全事故频发，据统计，2021—2026 年间已发生超百起事故[6]，严重时会导致火灾、爆炸[7-8]，主要原因是储能电站电气故障或锂离子电池自身故障。电气故障是指在长时间的运行中，由于线路的绝缘老化和运行人员的操作不当，造成的储能电站锂离子电池外部短路；锂离子电池自身故障是指由于电池厂商生产过程中产生的电池本体问题或者电池在运行过程中发生过充、过放、短路等情况，导致的电池内部故障[9]。

目前，对于电化学储能电站直流侧的故障识别鲜有研究，文献[10]提出了大容量锂离子电池储能电站的等值仿真方法，在故障研究方面，测试了发生金属性三相短路的输出功率、外环特性等，但未对储能故障站内特性做研究；文献[11]通过储能电站的最大、最小截止电压计算最大、最小短路电流，并依此配置直流断路器和熔断器；文献[12]则考虑兆瓦级储能电站电池组与换流器之间的故障，通过短路计算与分析配置了完备的主后备保护方案；文献[13]提出了储能电站的保护分区概念，详细分析了分区的保护配置原则和配置方案；文献[14]提出了储能电站直流侧的 3 种接地方式，以极间故障和极地故障分析为基础，比较了各种接地方式下故障电气量的特点，但未细化到电池簇内部的故障诊断与保护；文献[15]在单体电池短路最大电流模型的基础上，计算了锂离子储能电站簇内短路及簇间短路的短路电流，并配置熔断器，但其仅根据最大短路电流来设置熔断器阈值，未考虑不同电池荷电状态 SOC(state-of-charge)[16]及不同故障位置下的短路电流的熔断情况。综上可见现有文献主要考虑的是储能电站交流侧故障的分析，或者是利用电池故障的最大瞬时电流来配置熔断器实现保护。但是，由于不同电池 SOC 和不同短路故障产生的短路电流不同，因此仅靠熔断器和以电流为依据的保护不能快速识别短路故障，并确定故障发生的位置。

因此，基于上述问题，本文提出一种基于差值电流的储能电站直流侧保护方法。通过储能电站的直流侧短路计算方法，分析储能电站不同位置短路电流的大小和方向，并利用簇内与簇间不同位置的电流差异识别储能电站的簇内短路故障和簇间短路故障。

1 储能电站拓扑与短路计算

1.1 储能电站拓扑

目前，常见的储能电站拓扑如图 1 所示，储能单元接入储能变流器 PCS(power conversion system)，PCS 交流侧接入升压变压器低压侧，变压器高压侧与电网连接。其中，储能单元由电池通过不同的串并联形式组合而成。通常来说，电池心串联形成电池模组，电池模组串联形成电池簇，电池簇并联形成电池堆(每个电池堆对应 1 个 PCS 设备)，多个电池堆形成储能单元。

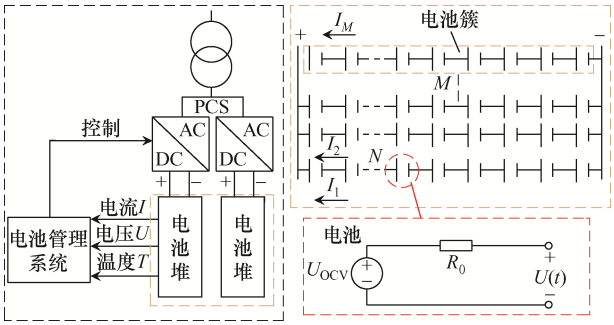


图 1 储能电站拓扑

Fig. 1 Topology of energy storage station

此外，每个储能单元均配置储能电池管理系统 BMS(battery management system)，BMS 能够实现储能系统的数据采集、数据处理、均衡管理及保护，并与站内监控系统进行数据交互。每套储能电站管理系统包括电池堆管理单元、电池簇管理单元和电池模组管理单元，即每套储能电站管理系统对应管理单个 PCS 直流侧的全部电池。

1.2 储能电站短路故障计算

目前储能电站通常由储能系统预制舱组成，其中，电池模组与模组之间通过导线进行连接。当线路发生错误连接时，会导致一簇内的电池之间形成回路，进而形成簇内短路。此外，电缆绝缘的老化、

连接线的错误连接会导致电池簇的电缆引出线相互接触，从而导致电池簇与簇之间发生短路，形成电池簇间短路。因此，本文主要讨论储能电站的电池簇内和簇间的短路电流计算。

值得注意的是，电池通常可以由电压源加电池内阻代替，该模型为 Rint 模型，如图 1 所示中的电池。因此为了方便计算，储能电站的电池被等效为电压源加内阻的形式。

1.2.1　簇内短路故障计算方法

簇内短路故障是指一簇之间 2 个电池的正、负极短接，如图 2 所示。设当其中一簇发生极间短路故障时，短路点在第 x 个电池簇的第 i 个电池和第 i+n 个电池之间；设每一簇的电池数为 N，1 个 PCS 连接了 M 个电池簇，故障簇中被短路部分的电池为 n 个，被短路部分的电流为 I_s，等效负载为 R_L，非故障簇对故障簇产生的电流为 I_m。

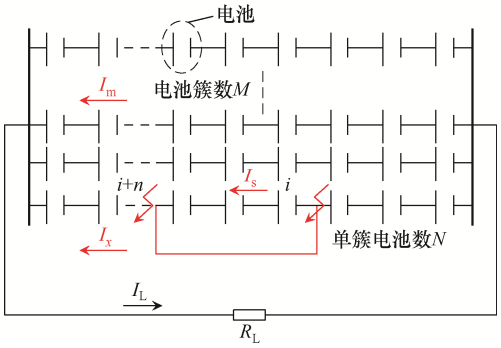


图 2　簇内短路故障示意

Fig. 2 Schematic of intra-cluster short-circuit fault

根据基尔霍夫定律，可得 I_s 为

$$I_s=\frac{U_{OCV}}{R_0} \tag{1}$$

式中：U_{OCV} 为电池的开路电压；R_0 为电池内阻。

当发生短路后，由于故障簇与非故障簇存在电压差，因此 I_m 的计算公式为

$$I_m=-\frac{NU_{OCV}}{NR_0+(NR_0//\cdots//NR_0)//(N-n)R_0//R_L}\cdot\frac{(NR_0//\cdots//NR_0)//(N-n)R_0//R_L}{(N-n)R_0} \tag{2}$$

式中，$(NR_0//\cdots//NR_0)$ 为除故障簇之外的支路内阻并联，“//”表示并联计算。

除非故障簇对故障簇产生电流之外，故障簇外还会对自身产生电流 I_{xx}，具体为

$$I_{xx}=\frac{(N-n)U_{OCV}}{(N-n)R_0+\dfrac{NR_0}{M-1}//R_L} \tag{3}$$

通过电流叠加定律可得发生短路的故障电池簇端口电流 I_x 为

$$I_x=(M-1)\cdot I_m+I_{xx} \tag{4}$$

同理，通过电流叠加定理，可得

$$\begin{cases}I_m=I_{vv}-I_{mv}-I_{xv}\\ I_{vv}=\dfrac{NU_{OCV}}{NR_0+(NR_0//\cdots//NR_0)//(N-n)R_0//R_L}\\ I_{mv}=(M-2)\cdot\dfrac{NU_{OCV}}{NR_0+(NR_0//\cdots//NR_0)//(N-n)R_0//R_L}\cdot\dfrac{(NR_0//\cdots//NR_0)//(N-n)R_0//R_L}{NR_0}\\ I_{xn}=\dfrac{(N-n)U_{OCV}}{(N-n)R_0+[NR_0/(M-1)]//R_L}\cdot\dfrac{[NR_0/(M-1)]//R_L}{NR_0}\end{cases} \tag{5}$$

式中：I_{vv} 为非短路故障电池簇自身提供的电流；I_{mv} 为其他非短路故障电池簇提供的电流；I_{xv} 为故障簇提供的电流。

1.2.2　簇间短路故障计算方法

当锂离子电化学储能电站直流侧某两簇发生连接短路，即为簇间短路，如图 3 所示。电池短路点在第 x 簇的第 i 个电池和第 y 簇的第 i+n 个电池

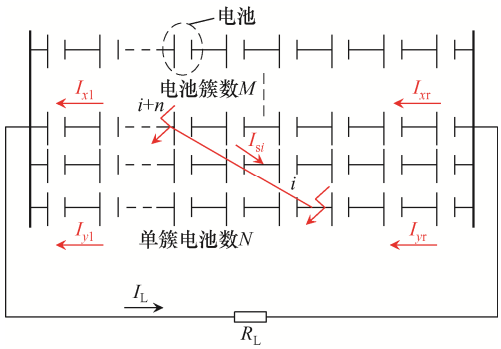


图 3　簇间短路故障示意

Fig. 3 Schematic of inter-cluster short-circuit fault

之间。设被短路部分的 2 个簇的两端电流分别为 I_{xl}、I_{xr}、I_{yl}、I_{yr}，短路处电流为 I_{si}；设 R_{xl}、R_{xr}、R_{yl}、R_{yr} 分别为短路各个支路的之间电池的内电阻之和。

当发生簇间短路后，R_{xl}、R_{xr}、R_{yl}、R_{yr} 可分别表示为

$$\begin{cases} R_{xl}=[N-(i+n)]\cdot R_0 \\ R_{xr}=(i+n)\cdot R_0 \\ R_{yl}=(N-i)\cdot R_0 \\ R_{yr}=i\cdot R_0 \end{cases} \tag{6}$$

非故障簇对故障簇提供的电流 I_{ms} 为

$$I_{ms}=\frac{NU_{OCV}}{NR_0+(R_0//\cdots//R_0)//R//R_L}\cdot \frac{(R_0//\cdots//R_0)//R//R_L}{R} \tag{7}$$

式中，$R=(R_{x1}//R_{y1})+(R_{x2}//R_{y2})$。

根据电流叠加原理，短路簇 x 簇左端的电流 I_{xl} 为

$$I_{xl}=-(M-2)\cdot I_{ms}\cdot\frac{R_{x1}//R_{y1}R_1}{R_{x1}}+I_{xrxl}+I_{ylxl}-I_{yrxl}+I_{xlxl} \tag{8}$$

式中：I_{xrxl}、I_{ylxl}、I_{yrxl}、I_{xlxl} 分别为故障簇其他部分的电池对故障簇 x 簇左侧提供的电流；R_1 为 R_{x1} 和 R_{y1} 的并联电阻，$R_1=R_{x1}//R_{y1}$。

根据电流叠加原理，短路簇 x 簇右端的电流 I_{xr} 为

$$I_{xr}=-(M-2)\cdot I_{ms}\cdot\frac{R_{x2}//R_{y2}R_2}{R_{x2}}+I_{xrxr}+I_{xlxr}+I_{ylxr}-I_{ylxr} \tag{9}$$

式中：I_{xlxr}、I_{ylxr}、I_{ylxr}、I_{xrxr} 分别为故障簇其他部分的电池对故障簇 x 簇右侧提供的电流；R_2 为 R_{x2} 和 R_{y2} 的并联电阻，$R_2=R_{x2}//R_{y2}$。

根据电流叠加原理，短路簇 y 簇的左端电流，I_{yl} 为

$$I_{yl}=-(M-2)\cdot I_{ms}\cdot\frac{R_1}{R_{y1}}+I_{ylyl}+I_{xryl}-I_{xlyl}+I_{yryl} \tag{10}$$

式中，I_{xlyl}、I_{xryl}、I_{yryl}、I_{ylyl} 分别为故障簇其他部分的电池对故障簇 y 簇左侧提供的电流。

根据电流叠加原理，短路簇 y 簇的右端电流 I_{yr} 为

$$I_{yr}=-(M-2)\cdot I_{ms}\cdot\frac{R_2}{R_{y2}}+I_{yryr}+I_{xlyr}-I_{xryr}+I_{ylyr} \tag{11}$$

式中，I_{xlyr}、I_{xryr}、I_{ylyr}、I_{yryr} 分别为故障簇其他部分的电池对故障簇 y 簇右侧提供的电流。

2 储能电站短路计算仿真验证

为了验证短路电流计算方法的准确性，本文利用实际的储能电站拓扑结构搭建 Simulink 模型进行验证。搭建的储能电站结构为 1 个 PCS 有 4 簇电池簇，每簇电池簇有 24 个电池模组，每个电池模组由 20 个电池串联组成，如图 4 所示。取一块储能电站所用的磷酸铁锂离子电池，通过参数识别技术获取其 SOC=100%时的参数，可得电压 $U_{OCV}=3.4$ V、电池内阻 $R_0=0.002\ \Omega$。

2.1 簇内短路故障计算方法验证

通过式(5)的计算和 Simulink 模型的仿真可得不同被短路电池模组数下的短路电流，如图 5 所示。由图可以看出，该短路电流计算方法得出的短路电流结果与 Simulink 仿真模型模拟的短路电流结果一致，且从误差值来看，计算与仿真之间的误差为 0，原因是 Simulink 仿真也符合电流叠加原理，这证明了本文所提短路电流计算方法的准确性。

此外，从图 5 中可以看出，随着被短路电池模组数的增加，故障簇与非故障簇的端口电流都不断增大。这是因为随着被短路电池模组的增加，非故障簇对故障簇的压降增大，故非故障簇对故障簇提供的电流增大，从而导致故障簇和非故障簇的端口电流均增大。然而，短路处电流并未增大，这是因为电池的 SOC 没有改变，由式(1)可知，电池的 U_{OCV} 和 R_0 不变，I_s 不变。

2.2 簇间短路故障计算方法验证

通过式(6)~式(11)的计算和 Simulink 模型的仿

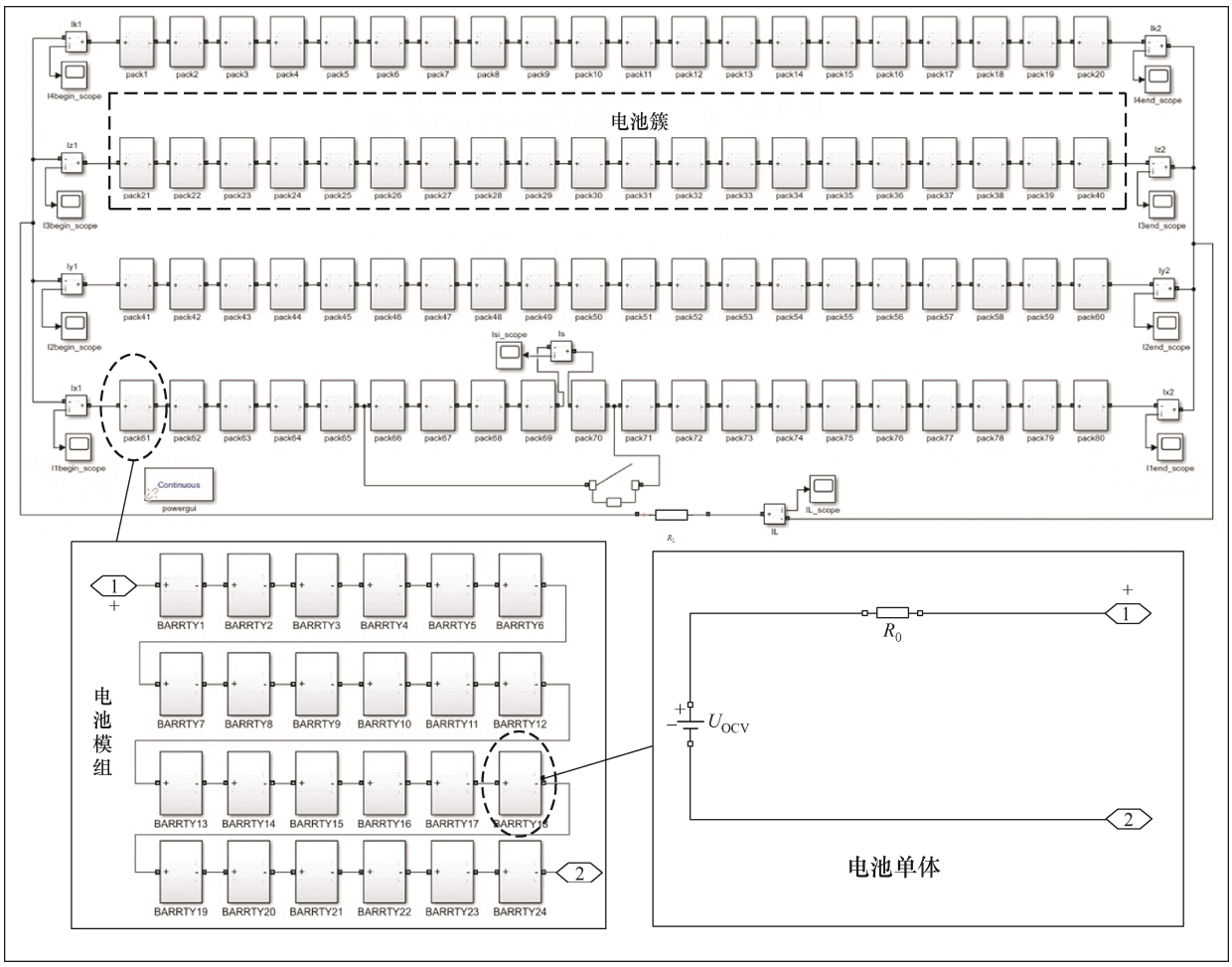


图 4　储能电站 Simulink 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of energy storage station based on Simulink

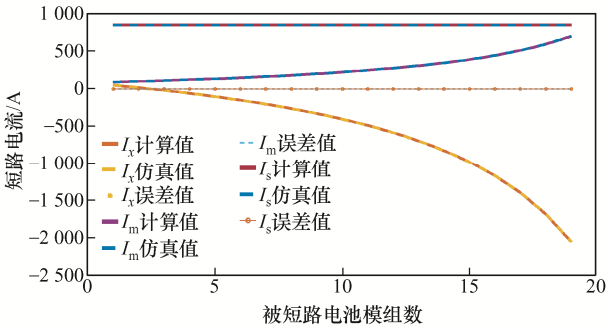


图 5　发生簇内短路时不同被短路电池模组数与短路电流的关系

Fig. 5 Relationship between short-circuit current and number of short-circuited battery packs under intra-cluster short-circuit fault

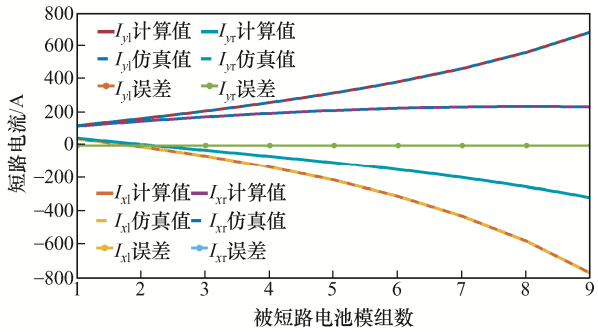


图 6　发生簇间短路时不同被短路电池模组数与短路电流的关系

Fig. 6 Relationship between short-circuit current and number of short-circuited battery packs under inter-cluster short-circuit fault

真可得不同被短路电池模组数下的短路电流，如图 6 所示。

图 6 为固定一簇的短路点为中点，另一簇变化短路点后的短路电流变化结果。由图可见，本文提出的短路电流计算方法所得出的计算结果与 Simulink 仿真结果一致，且从误差值来看，计算与

仿真之间的误差为 0，原因为 Simulink 仿真也符合电流叠加原理，这证明了本文所提短路电流计算方法的准确性。

此外，从图 6 中可以看出，随着被短路电池模组数的增加，故障簇左、右两端的电流都增大。这是因为故障簇短路点两端电池数存在差异，会在 2 个故障簇之间产生电压差，从而产生短路电流，且被短路点左、右两侧电池数的差越大，其产生的短路电流越大。

3 储能电站短路故障诊断

目前主要的短路保护形式是熔断器，但是熔断器仅能基于单一阈值进行保护，而电池参数会随着 SOC 的变化而改变，这使得熔断器不能完全保护储能电站。因此，为了解决这一问题，本文提出一种基于差值电流的保护方法。

当发生簇内短路故障时，I_s 和 I_x 会产生差异；而在正常情况下，由于电池模组是通过串联形式组成的，故各电池模组测得的电流与簇的端口电流相等。同理，在发生簇间短路故障时，I_{xl} 和 I_{xr} 会产生差异。基于这一故障前、后电池簇的端口电流与电池差异，可以进行储能电站直流侧的故障诊断，诊断方法如下。

首先，计算簇端口与各电池模组测得的电流之差，即

$$\Delta I_i = I_d - I_{d,i} \tag{12}$$

式中：ΔI_i 为电池簇端口电流与第 i 个电池模组电流之差；I_d 为电池簇的端口电流；$I_{d,i}$ 为电池簇中第 i 个电池模组测得的电流。

当 ΔI_i 超过某一给定值时，可判断为发生了簇内或簇间短路，表示为

$$\Delta I_i > \Delta I_{ref} \tag{13}$$

式中，ΔI_{ref} 为判断是否发生簇内或簇间短路的阈值，保证在所有短路点及被短路电池模组数下都能够有效识别短路故障。为满足式(13)，ΔI_{ref} 需要表示为

$$\Delta I_{ref} = k \times \min(\Delta I_i) \tag{14}$$

式中：$\min(\Delta I_i)$ 为故障电流情况下会出现的最小差值电流，由图 5 和图 6 可知，最小的差值电流一般出现在被短路模组数为 1 时；k 为防误动系数。因此，只要使 $\Delta I_{ref} < \min(\Delta I_i)$，就能保证所有短路点及被短路电池模组数下都能满足式(13)。故 k 的范围为(0,1)，具体 k 值可根据实际工程并考虑测量误差进行设置。由于本文是在仿真中进行的，因此设置 k 为 0.98。

为了验证该方法的有效性，本文通过 Simulink 中自带的电池模型替代图 4 所示中的电池 Rint 模型。同时，为了保证模型的正确运行，取储能电站拓扑结构一簇的电池数为 24 个，1 个 PCS 连接 2 个电池簇。

由第 2 节中的 2 类储能电站短路计算仿真验证可知，当被短路电池模组数为 1 时，$I_d - I_{d,i}$ 最小。已知 Simulink 中自带的电池模型的电池电压为 3.2 V，内阻为 0.000 177 78 Ω，取 k 为 0.98，通过式(1)~式(5)和式(14)可计算得到 $\Delta I_{ref} = 1\,282.00$ A。当簇内短路故障发生时，其各位置的差值电流如图 7 所示。

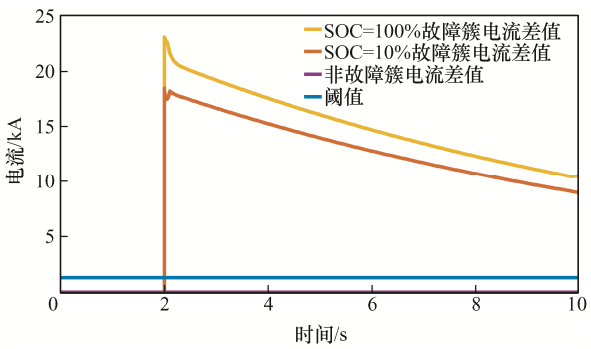


图 7 簇内短路故障诊断示意

Fig. 7 Schematic of diagnosis of intra-cluster short-circuit fault

由图 7 可见，故障发生前，所有电流保持一致，不会诊断为故障；当故障发生后，非故障簇仍保持 $\Delta I_i = 0$，故障簇的电流差值瞬间大于 ΔI_{ref}，满足式(13)，且仅有故障簇的电流满足式(13)，故诊断为簇内短路，此外，随着 SOC 降低到 10%，故障

发生后的差值电流仍大于阈值，这说明该方法不会受到电池 SOC 的影响。

同样，通过式(6)~式(11)和式(14)，取 k 为 0.98，可计算得到 $\Delta I_{\mathrm{ref}}=367.52$ A，当簇间短路故障发生时，其各位置的电流差值如图 8 所示。

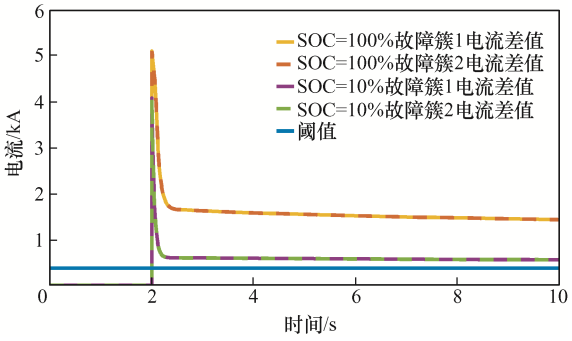


图 8　簇间短路故障诊断示意

Fig. 8 Schematic of diagnosis of inter-cluster short-circuit fault

由图 8 可见，故障发生前，所有电流保持一致，不会诊断为故障；当故障发生后，故障簇 1 和故障簇 2 的 ΔI_i 瞬间大于 ΔI_{ref}，可见 2 个故障簇同时满足式(13)，即诊断为簇间短路。此外，随着 SOC 降低到 10%，故障发生后的差值电流仍然大于阈值，这说明该方法不受电池 SOC 的影响。由此可见该方法能够有效诊断储能电站簇内短路故障和簇间短路故障。

4　结论

本文提出一种基于差值电流的储能电站故障诊断方法，并基于电流叠加原理推导出了储能电站直流侧簇内和簇间短路故障的计算公式，同时通过 Simulink 仿真验证了所提的短路电流计算方法能够精确地计算短路过程中每个支路的故障电流。在短路电流计算公式的基础上，分析了短路电流与被短路电池数之间的关系，结果显示，被短路电池数越多，其短路电流越大。之后，本文利用簇内和簇间短路故障过程中，故障簇端口电流与被短路故障模组电流之间的差异进行故障识别，提出了有效的阈值设置方法，并通过构建仿真模型验证该方法的有效性。结果显示，所提出的方法能够有效识别储能电站直流侧簇内和簇间短路故障。

总的来说，本文提出的储能电站直流侧故障识别方法包括了短路电流计算和故障识别，可以结合储能电站的 BMS 与断路器应用于储能电站直流侧的保护中。

参考文献：

[1] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1776-1798.
Zhao Dongmei, Xu Chenyu, Tao Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1798. (in Chinese)

[2] 王利民, 程静. 用于风电波动平抑的双蓄电池组混合储能控制策略[J]. 电源学报, 2026, 24(3): 88-99.
WANG Limin, Cheng Jing. Hybrid energy storage control strategy of dual battery pack for wind power fluctuation suppression [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 88-99. (in Chinese)

[3] 郭辉, 杨华磊, 冯海波, 等. 面向电网电压主动支撑的电池储能系统自治控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 132-142.
Guo Hui, Yang Hualei, Feng Haibo, et al. Autonomous control method for battery energy storage system oriented to active support of grid voltage [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 132-142. (in Chinese)

[4] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 251-261.
Cheng Yuming, Meng Gaojun, Jia Peng, et al. Optimal hybrid energy storage capacity configuration method for mitigating fluctuations of wind power [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 251-261. (in Chinese)

[5] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2026[R]. 北京, 2026.

[6] Electric Power Research Institute（EPRI）. BESS Failure Incident Database [DB/OL]. [2026-06-09]. https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Incident_Database.

[7] Lai Xin, Yao Jian, Jin Changyong, et al. A review of lithium-ion battery failure hazards: Test standards, accident analysis, and safety suggestions [J]. Batteries, 2022, 8(11): 248.

[8] 曹文炅, 雷博, 史尤杰, 等. 韩国锂离子电池储能电站安全事故的分析及思考[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1539-1547.
Cao Wenjiong, Lei Bo, Shi Youjie, et al. Ponderation over the recent safety accidents of lithium-ion battery energy storage stations in South Korea [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1539-1547. (in Chinese)

[9] 张闯, 杨浩, 刘素贞, 等. 基于阻抗在线测量的锂离子电池过放电诱发内短路识别研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1656-1670.
Zhang Chuang, Yang Hao, Liu Suzhen, et al. Research on overdischarge-induced internal short circuit identification of lithium-ion battery based on impedance online measurement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1656-1670. (in Chinese)

[10] 周姝灿, 卢洵, 刘新苗, 等. 大容量锂电池储能电站的等值仿真方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 30-38.
Zhou Shucan, Lu Xun, Liu Xinmiao, et al. Equivalent simulation method for large capacity lithium battery energy storage power station [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 30-38. (in Chinese)

[11] 郝晋阳. 锂电池储能系统直流侧短路保护方案研究[J]. 自动化应用, 2020, 61(8): 85-87.
Hao Jinyang. Research on the short-circuit protection scheme of the DC side of the lithium battery energy storage system [J]. Automation Application, 2020, 61(8): 85-87. (in Chinese)

[12] 黄文焘, 邰能灵, 陈彬, 等. 兆瓦级电池储能电站直流系统故障分析与保护方案设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 76-83, 167.
Huang Wentao, Tai Nengling, Chen Bin, et al. DC system fault analysis and protection scheme design for megawatt level battery energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 76-83, 167. (in Chinese)

[13] 吴文宣. 大型电池储能电站保护的配置方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 144-148, 155.
Wu Wenxuan. Study on configuration scheme of bulk battery energy storage plants' protection [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 144-148, 155. (in Chinese)

[14] 万军. 大型电池储能电站保护关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Wan Jun. Protection scheme and key technology's research for large scale battery energy storage station [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)

[15] 徐光福, 姜淼, 王万纯, 等.大型储能电池短路故障分析与保护策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2222- 2232.
Xu Guangfu, Jiang Miao, Wang Wanchun, et al. Short circuit fault analysis and protection strategies research of large storage batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2222-2232. (in Chinese)

[16] 赵靖英, 胡劲, 张雪辉, 等. 基于锂电池模型和分数阶理论的 SOC-SOH 联合估计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4551-4563.
Zhao Jingying, Hu Jin, Zhang Xuehui, et al. Joint estimation of the SOC-SOH based on lithium battery model and fractional order theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4551-4563. (in Chinese)



陈培育

作者简介：

陈培育(1983—)，男，博士，正高级工程师。研究方向：电力系统储能规划、运行与控制。E-mail：peiyu_chen@tju.edu.cn。

王洋(1983—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统继电保护。E-mail：yang.wang4@tj.sgcc.com.cn。

程茹芸(1998—)，女，硕士，工程师。研究方向：电力系统实时仿真。E-mail：ruyun.cheng@tj.sgcc.com.cn。

郑骁麟(1992—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统分析。E-mail：xiaolin.zheng@tj.sgcc.com.cn。

李超(1988—)，男，博士，副教授。研究方向：储能安全与运维。E-mail：chaoli315@tju.edu.cn。

曾锴迪(2000—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：储能安全与运维。E-mail：2022229013@tju.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)