

电化学储能电站主动安全研究

杨 奔¹, 黄小庆², 于慎仟², 狄北辰², 郭宜果¹, 薛炳磊¹, 王志鹏¹

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:随着电化学储能电站装机容量的不断提高,其安全防护问题受到重视。为此,提出了基于主动风险源辨识、主动故障预防、主动事故处理的三道安全防线,构建了电化学储能电站的主动安全体系。第一道防线针对电化学储能电站的正常但不安全运行状态,快速、可靠地辨识风险源和安全诱因,不损失电站设备和运行能力;第二道防线针对已发生故障的不安全运行阶段,利用安全自动装置和安全监控系统,辨识并及时排除早期故障,尽量保持系统正常运行;第三道防线针对电化学储能电站的事故状态,进行事故特征分析、风险管控并实施联动预案,防止电化学储能电站崩溃与人员伤亡。基于三道安全防线实现电化学储能电站安全风险和事故的主动防控,可为储能电站的安全设计提供新思路。

关键词:电化学储能;储能电站;主动安全;安全防线;状态监测;故障预警;事故防控

中图分类号:TM08;TM91

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209017

0 引言

储能系统通过对能量的时空转移,能有效地调节电力供需侧的平衡,提高电网对可再生能源的接纳能力,是实现“双碳”目标的重要技术手段。据不完全统计,2011—2021年全球共发生了41起电化学储能电站起火爆炸事故。2021年4月,北京大红门电化学储能电站发生爆炸事故,直接原因为单个磷酸铁锂电池内发生短路故障,从而引发热失控扩散起火^[1]。韩国电化学储能电站发生了近34起安全事故,事故起因被归纳为电池系统缺陷、应对电气故障的防控体系缺失、运营环境管理不足、储能系统综合管理体系欠缺4个方面^[2]。可见,安全问题成为电化学储能电站大规模应用的首要障碍。

电化学储能电站的安全防控贯穿于电池制造、电站设计建设、电站运行维护、事故后消防等环节。电化学储能电站普遍采用定期检修策略,检修周期以及计划固定,难以及时发现安全隐患,且储能元件数量众多、故障类型多样,离线检测防控方法存在耗时长、成本高、运检工作量大、检修效率低等问题。同时,虽然电化学储能电站的消防标准规定了电站发生事故后的消防灭火措施,但事故发展到消防阶段已造成了设备损坏和电站停运损失,且消防的目的在于防止电池单体热失控蔓延造成的严重燃爆事故和人身伤害,并不能从根本上避免电化学储能电

站的安全事故。

目前,介于电站建设和消防之间的主动安全开始受到重视。电化学储能电站的主动安全是指逐级实现电站风险/故障/事故的主动辨识、主动预防、主动运维、主动应急处理。主动安全为了从源头避免严重事故的发生,利用站控层、间隔层、设备层各层级装置和系统,采用日前、小时前、分钟前等多时间尺度数据,基于事故状态演化机理分析,辨识引起电化学储能电站安全特征变化的内在诱因,自适应地发现并处理电池本体、运行环境、外部激励、管理环境等风险源,电池老化、热失控等故障,以及火灾爆炸等安全事件。相较于被动安全的事件驱动、故障后管理和人工运维,主动安全具有数据驱动、基于规则管理、自优化、自动化的特点,无需检修即可发现早期的劣化单元,能提前预警预测事故,实现电站安全工作的焦点从严重事故向安全风险因素的转变。

美国保险商试验所(Underwriter Laboratories Inc., UL)开发了UL9540电池储能系统热失控蔓延评估测试方法标准,规定“500 kW·h及以上的锂电池储能电站应配置额外的报警通信系统,对储能电站中潜在的安全问题进行提前报警”^[3]。北京市地方标准DB11/T 1893—2021《电力储能系统建设运行规范》中规定“大、中型储能电站应建立状态运行及预警预测平台,宜在站端配置主动安全系统。小型储能电站、分散式储能装置宜建立状态运行及预警预测平台”。在我国已投运的储能电站中:南京江北110 MW/194 MW·h储能电站配备了智能辅助、电池巡检等设备,全站设计采用三级隔离措施;秦皇岛储能电站提供设备状态评估、设备故障预警、故障专家诊断、检修辅助决策等服务;北京怀柔区北

收稿日期:2022-04-14;修回日期:2022-07-16

在线出版日期:2022-09-30

基金项目:国网山东省电力公司经济技术研究院群众性创新项目(52062522000M)

Project supported by the Mass Innovation Project of Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company(52062522000M)

房储能电站采用电芯级监测,实时获取电池、变流器等设备的运行数据,评估设备的健康状态(state of health, SOH),及时反馈预防性运维通知和运维建议。

学界认为,在电站的安全状态监测方面,在终端级、本地级、设备级建立多智能体系统,可实现对数百兆瓦级蓄电池储能电站的实时监控和运行控制^[4]。数字孪生技术可实现系统设备的SOH评估、故障智能诊断、智能巡检等功能。基于在线数据的锂离子电池综合安全风险评估方法,可以为主动安全防控提供有效的决策信息^[5]。在安全预警方面,储能电站预警平台收集数据,进行安全风险辨识与评估,能实现快速、智能、可视化的预警^[6]。含潜伏期、早期警报期、警报期、火焰期4级警报的层次化热失控报警系统被应用于储能用磷酸铁锂电池。在事故处理方面:文献[7]基于热失控机理模型,研究了锂离子电池发生热失控后系统降温、灭火、隔离、引导排出火焰气体等过程;针对锂离子电池系统发生火灾的特殊机理,文献[8]深入研究了水基灭火剂、气溶胶灭火剂等高效的储能电站灭火剂及协同灭火技术。此外,针对数据不可靠的风险问题,文献[9]提出了基于深度学习的电池储能系统假传感器数据检测方法。

综上所述,本文构建了主动风险源辨识、主动故障预防、主动事故处理三道安全防线,支持按需检修、故障在线实时监测、事故联动预防与管控,能实现电化学储能电站的主动安全,为电化学储能电站的安全研究提供了一种新思路。特别地,锂电池凭借自身具备的能量密度高、功率密度高、放电电压稳定、寿命长等优势,在我国储能中的装机容量占比最大,增长速度也最快。现有电化学储能电站主要应用磷酸铁锂电池,如百兆瓦级电化学储能电站——江苏昆山储能电站、青海海西州百兆瓦级示范工程等。本文分析主要针对锂离子电池,但所构建的三道安全防线体系思路适用于所有电池类型的电化学储能电站。

1 电化学储能电站的安全事故、故障、风险源

电化学储能电站的安全问题是系统性问题,事故往往由多种因素交互作用导致。电化学储能电站的主要构成如图1所示。

电化学储能电站中的设备和系统存在多种风险源,各风险源相互影响,容易引发故障,若不能及时解决故障,则会演化为安全事故。电化学储能电站的安全事故、故障、风险源构成的事故树结构如图2所示。

安全事故主要包括火灾、爆炸、化学风险、电气风险4类^[10]。电池和电气设备以及蓄电池充放电过

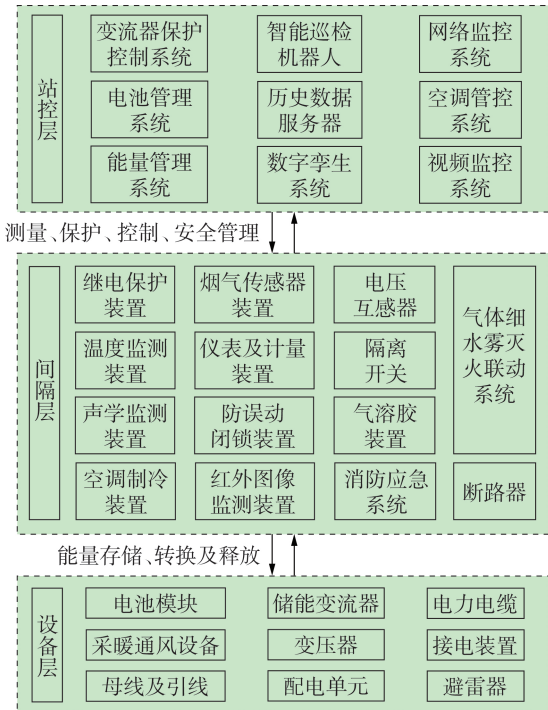


图1 电化学储能电站的构成

Fig.1 Composition of electrochemical energy storage station

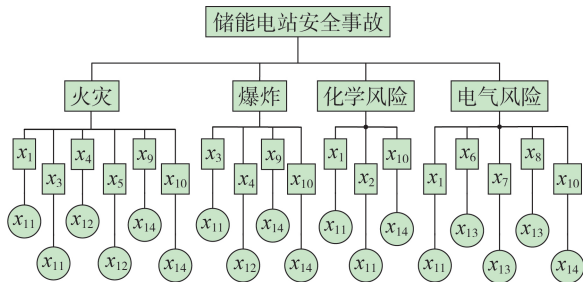


图2 电化学储能电站的事故树结构

Fig.2 Accident tree structure of electrochemical energy storage station

程中遇明火、过充、过放等因素都可能造成火灾。当电池热失控,管道通风不畅时,汽化的有机物电解质累积,遇明火、雷电、短路等意外会引发爆炸^[11]。当电池燃烧时,电解液溶析会产生剧毒晶体,燃烧产物包括氟化氢、氯化氢等有毒气体,化学风险和危害极大。电化学储能电站还存在高直流、高交流电压,可能导致触电、接地故障、短路等电气风险^[4]。

引起电化学储能电站事故的常见故障包括如下几方面:①电力电子设备故障(用 x_1 表示),其为电能变换和控制阶段出现的故障;②电池老化(用 x_2 表示),其表现为电极活性材料随时间逐渐损失,电荷传递阻抗增大,电池性能衰退;③热失控(用 x_3 表示),电池内短路或外短路导致瞬间产生大量的热量,引发正负极活性物质和电解液反应分解,导致电池起火甚至爆炸;④冷却系统故障(用 x_4 表示),电站

设备因自身或外界干扰无法运行在适当的工作温度;⑤传感器故障(用 x_5 表示),电压、电流、温度传感器等发生故障,可能导致电池等超出安全范围运行,使热管理失效,甚至引发事故;⑥过负荷故障(用 x_6 表示),变压器、变流器等设备处于超负荷运行状态,使温度升高,加快绝缘老化,导致发生大面积故障;⑦直流母线缺陷(用 x_7 表示),连接电网与储能电源的公共母线因拓扑结构、线路老化等因素导致的故障;⑧接地故障(用 x_8 表示),设备绝缘劣化出现的过电压、过电流状态;⑨消防系统故障(用 x_9 表示),火灾探测器无法探测到火灾信号或启动灭火造成温升过高和设备寿命损害;⑩能源管理系统故障(用 x_{10} 表示),泛指电池管理系统(battery management system, BMS)、储能变流器(power conversion system, PCS)、能量管理系统(energy management system, EMS)故障造成的整站监控、分析、优化缺陷。

继续溯源可知,导致事故与故障的风险源包括电池本体(用 x_{11} 表示)、运行环境(用 x_{12} 表示)、外部激源(用 x_{13} 表示)、管理系统(用 x_{14} 表示)4类。电池本体风险包括电池制造瑕疵与电池安全性退化两方面。在运行环境方面,低温导致电池内化学反应慢,从而使容量损失严重,甚至造成电池内短路;高温会触发各种材料滥用反应,甚至演化为热失控。外部激源包括绝缘失效造成的电流冲击、外部短路、温度过冷过热及高温热冲击引起的热失控蔓延过程。其中:电流冲击可能造成直流接触器等电池保护装置损坏,甚至引发火灾爆炸事故;高温热冲击造成电池温度过高,很有可能演化为热失控。管理系统风险来自BMS/PCS/EMS及对应联动管控逻辑、规章制度、人为管理等因素^[2]。

2 电化学储能电站主动安全的概念及系架构

电化学储能电站的运行状态包括正常安全运行状态、正常不安全运行状态、不正常不安全状态以及严重事故状态。当处于正常安全运行状态时,各层级设备均运行在规定的参数范围内,不存在严重的风险因素;当存在一系列风险源并交互作用后,电化学储能电站的安全水平逐渐降低,电站进入正常不安全运行状态,此时虽然电站还处于正常运行状态,但个别设备或运行环境参数已临近故障边缘;若未及时对风险源采取有效的预防性措施,则电化学储能电站会进入不正常不安全运行状态,此时电站的设备超过安全运行限值而发生故障,应及时采取隔离故障设备等措施,以避免事故发生;当电化学储能电站进入严重事故状态阶段时,会威胁人员财产安全,应尽可能抑制事故蔓延,使电站恢复到正常运行状态。

基于第1节的分析,当电化学储能电站处于正

常不安全运行状态时,结合灾变机理与管控系统,快速、可靠地辨识风险源和安全诱因,确保电化学储能电站正常且安全运行;当电化学储能电站处于不正常不安全运行状态时,应采用安全自动装置和安全预警系统,辨识并及时排除早期故障,尽量保持系统正常运行;当电化学储能电站处于严重事故状态时,应联合站内多个装置及系统,快速确定事故原因以及阻断方式,防止电化学储能电站崩溃,避免人员伤亡,以实现电化学储能电站的主动安全。为此,本文提出电化学储能电站的主动安全体系架构,如图3所示。

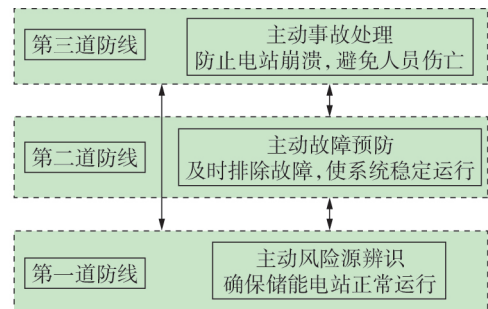


图3 电化学储能电站的主动安全体系架构

Fig.3 Active safety architecture of electrochemical energy storage station

1) 第一道防线: 主动风险源辨识。

第一道防线主要监测电站的安全诱因和风险源状态,快速准确地隔离存在风险的设备、解除安全诱因和风险源,不损失电站设备和运行能力。

以电池本体为例,电池热失控经历缓慢的演化过程。目前,主要依靠BMS评估电池状态,评估较粗糙,且缺乏对电池安全阈值自适应调整的能力,加之BMS自身存在失效风险,不具备电池风险预警能力。构建电池的第一道安全防线后,通过多时间尺度多场耦合建模仿真并与实测数据交互,分析电池外部特征变化的内在诱因,评估状态演化趋势,定位潜在安全风险,从源头降低电池热失控风险。通过BMS监控电池单体及模块温度,配备主动热管理系统以切断热失控线路,阻止电池因外部过热所导致的热失控。针对水分、盐雾、粉尘降低电池内模块绝缘性能的问题,通过电池簇控制器(battery control unit, BCU)实现对电池系统的绝缘监测,并基于空气、湿度等环境参数,对绝缘脆弱的电池或电池模块进行及时排查更换,避免化学电池以外部激源为路径触发系统火灾。同时,通过监测数据和管控系统输入参数反映管理系统的管控滞后甚至失效。

2) 第二道防线: 主动故障预防。

第二道防线利用保障储能电站安全运行的安全自动装置和安全预警系统,通过自动或人工控制,允许损失部分电化学储能电站的运行能力,避免元件

过载和各类故障发生,实现电化学储能电站在线故障诊断。

仍以电池为例,当感知电池将发生热失控故障时,提前 5~15 min 预警热失控,及时启动隔离和消防系统,避免事故扩大。如果发生突变型电池故障,则通过气体传感器配合烟雾传感器、火灾探测器、温度传感器等,进行电压、电流、温度等特征的联合提取,并根据电池热失控特性,设定相应的传感器预警阈值,当不同参数达到所设阈值时,预警热失控异常以采取下一步措施,避免热失控蔓延。同时,多维度比较特征参数,采用基于概率分析的离群点检测方法进行单体间的横向比较,采用轨迹特征拐点识别方法进行特征演变分析,以降低故障误报概率。

3) 第三道防线:主动事故处理。

第三道防线主要启动火灾、爆炸、化学风险和电气事故应急预案,准确辨识事故程度和演化趋势,进行温度、气体控制,及时解决或隔离事故,采取一切必要手段避免人身伤亡,防止电化学储能电站崩溃。

以电池热失控后的事故处理为例:在电池发生火灾的前期,CO、烟雾等传感器报警,触发柜内消防,切断集装箱电流,启动多级灭火装置、有毒气体检测传感器,上报火灾信号,将火灾控制在安全可控状态,防止事故恶化;在电池火焰被熄灭后,将热失控产生的大量易燃易爆气体排出电池模组或预制舱,防止发生爆炸,并更换损坏的电池柜,清理残留灭火剂,使电化学储能电站回到安全无隐患状态;当发生爆炸事故时,应及时在电池预制舱中释放惰性气体,抑制可燃气体发生二次爆炸,并喷洒大面积干粉或将集装箱注水淹没,阻断火焰燃烧。在应急预案方面:预设火灾对周围环境造成的危害程度,拟定应急行动方案和火灾应急预案;预先明确组织机构及职责,报警、应急疏散、扑救初起火灾的程序和措施,附近的后备水源及取水设施,通信联络、安全防护救护的程序和措施,运维检修人员的消防安全培训等。

3 支撑主动安全的关键技术

3.1 主动风险源辨识技术

3.1.1 电池的主动风险源辨识

以电池为例,第一道防线实现电池早期风险预判,提前数十小时维护或更换电池,避免发生热失控。而电池的风险来自各种热失控诱因,如电池制造缺陷,失效、高湿、盐雾、低温、高温、温湿度变化等运行环境导致的电池系统老化衰减或绝缘失效,绝缘失效引发的短路,异常电流、异常过热等引发的电池内短路,漏液、开阀等电池滥用,以及 BMS、EMS、PCS 等系统管理逻辑和硬件故障导致的管理失效,等。

电池风险源辨识的思路如下。

1) 建立精确的电池模型、电池故障特征库和故障特征概率分布模型。如:基于阻抗谱技术构建电池特征故障模型,实现过充过放等故障检测^[12];基于电池充放电特征,计算电池偏差容量,预测系统中潜在的电芯问题,检测磷酸铁锂电池的一致性与短板效应问题;基于等效电路模型辨识极化电阻、电池电压等参数,诊断电池内的短路等相关故障^[1]。

2) 实时监测电池参数,抓取容量、内阻、自放电参数等反映电芯性能的关键参数,匹配故障特征库,捕捉电池关键参数劣化的微先兆,比较电池工作参数与模型预测特征值的差异,识别状态异常的电池。如:构建电化学-热学耦合模型,模拟各种条件下电池的状态行为,延缓热失控扩展^[13];分析锂离子动力电池过充电流、电压参数,研究电池热失控行为。

3) 将电池的荷电状态(state of charge, SOC)和 SOH 参数与标称值进行比较,监测电池能否正常充放电,侧面反映电池的安全状态,筛选出有问题的电池^[14-15]。在线评估要克服数据测量噪声对评估结果收敛性的不良影响,要具有较好的鲁棒性与全局寻优能力,可借助电池全生命周期监测,自动校准累计误差。常用的电池 SOH 评估方法如表 1 所示。

表 1 常用的电池 SOH 评估方法

Table 1 Common evaluation methods of battery SOH

方法	输入特征参数	优点	缺点	使用场景
直接测量	电池容量、内阻、阻抗谱等	简单	与环境关系大,耗时长,成本高	离线评估
特征分析	电池容量或内阻衰退的特征变化量	测量误差、噪声等影响较小	没有普适性,操作复杂	特定充放电过程,离线评估
自适应算法	等效模型	噪声、环境不确定因素的影响小	电池等效模型的影响大,操作难	在线评估
数据驱动	历史老化数据	易于实现,能自适应调参	难以平衡泛化能力和精度	离线/在线评估

4) 电池故障在线分析和诊断。基于电化学机理模型、数据驱动模型、等效电路模型,在电池内短路热失控、正常老化失效前^[16]数周做出定点定位预警。电化学机理模型较难适用于实时在线计算,其合理简化方法有待发展;数据驱动模型是一种纯经验模型,其性能依赖于样本质量,模型鲁棒性难以保证^[17];等效电路模型是一种半经验半机理模型,计算复杂度较低,可结合智能算法进行电池参数在线辨识^[18]。数据驱动方法可实现锂离子电池组的故障诊断和热失控预警,准确识别电池早期故障^[19]。采用随机森林算法诊断外部短路故障,能准确识别电池电解液泄露^[20]。

中标准北皖能储能电站 103 MW / 206 MW · h

项目的美克生能源,自主研发了储能预防性诊断安全管理系统,实时监测电芯性能特征参数,通过分析电池衰老过程中关键性能参数的变化,在线定位劣化单元,同时提供电池SOH评估、电池状态校正、电池剩余寿命预测等服务,用数字化技术实现锂离子电池全生命周期的健康安全状态管理。

3.1.2 绝缘监测与主动风险辨识

由于锂离子电池储能系统的电压远高于安全电压,当电池组绝缘电阻降低到某个阈值时,可能造成安全事故。利用储能系统绝缘电阻的动态、主动监测和针对性维护,可消除风险因素。目前,电池储能系统的绝缘监测大多采用电桥法,包括平衡桥法、双桥法、乒乓桥法、平衡桥+切换桥法。利用BCU判断系统正、负极绝缘电阻的故障状态和电阻值大小,可实现对电池绝缘电阻的检测。但只检测电池组正负端出现的绝缘故障,并不能满足监测系统级绝缘状态的要求。为此,基于等效模型的绝缘电阻检测和绝缘故障定位方法被提出。此外,当电化学储能电站设备发生绝缘损坏时,故障处会产生直流电弧,若不及时处理,则故障电弧释放的高热量容易引发热失控。利用电池模块直流电弧故障检测器并测量SOH、充电状态、温度,可根据输出端尖峰识别电弧故障的存在^[18]。

主动绝缘监测要从系统层考虑,评估整个集成系统的电压等级、安规电容和寄生电容大小、精度要求、检测周期,协调监测主机与绝缘检测装置,设计合理的电磁兼容和软件滤波算法^[21],确保全生命周期绝缘检测准确可靠。

科华数能针对储能系统的电气安全,融合电力电子技术实现了三重绝缘监测与保障,即对电池系统内部的直流绝缘、电池与PCS之间的直流绝缘、PCS与升压箱变之间的交流绝缘。除了绝缘监测,系统还支持绝缘在线复检,自动对每一簇电池进行绝缘监测,遇到异常时自动投切,实现精准定位和实时保护。

3.1.3 其他设备的风险评估

断路器、过电压/过电流保护装置、气体绝缘开关设备等电气安全保护设备的可靠性分析是主动风险源辨识的重要内容。电化学储能电站的断路器故障大多为机械特性故障。提取分析断路器分合闸过程中的振动信号,能识别早期断路器故障。基于优化变分模式分解法对高压断路器分合闸过程中的振动信号进行分析,可有效提高断路器振动信号提取分解的效率^[22]。

3.2 主动故障预防技术

电化学储能电站主动安全的第二道防线基于安全自动装置和安全监控系统实现,从故障出发,找出故障特征,识别和定位劣化单元,实现故障早期预警

并进行排除。

第一道防线的防控对象——风险源具有潜在性、普遍性、满足一定的触发因素才能转化为故障和事故的特征,是各种故障和事故的根源。相较于风险源,故障是现实型危险,是风险源不及时控制的结果,是已经客观存在的不安全状态。电化学储能电站从局部风险源演变成故障需要一个过程,且安全风险广泛,普遍存在于电化学储能电站的设备选型、系统集成、安装调试、运行维护、设施报废等全寿命周期过程中的任何一个环节。

从辨识过程来看,风险源辨识利用安全自动装置、安全监控系统等监测的电池本体及运行环境历史数据,结合机理模型进行推演,判断电化学储能电站各层级设备的参数阈值是否越界,从而辨识风险源。而故障辨识基于故障特征概率分布,匹配故障特征库,结合安全自动装置和安全监控系统的数据识别、预警并处理故障。且当故障发生时,各层级设备的正常运行已受到影响,故障辨识相较于风险源辨识对辨识准确度和效率的要求更高,两者的区别如表2所示。

表2 风险源辨识与故障辨识的区别

Table 2 Difference between risk source identification and fault identification

辨识对象	数据来源	特征分析	辨识方法	安全装置系统作用
风险源	广泛	潜在型,演变时间长,损害小,时效性不强	数字模型、智能算法、机理模型推演	数据来源之一
故障	相对固定	现实型,演变时间短,损害大,快速	故障特征概率模型、故障机理分析	数据主要来源,安全动作执行者

3.2.1 安全自动装置

安全自动装置分为2类:一类为环境参数采集装置,如各类传感器、变送器、集传感变送于一体的环境探知设备,包括舱级储能断路器、簇级继电器、气体探测器、安全阀、声波信号检测仪、烟气传感器、电压互感器、火焰传感器、温度传感器等;另一类为环境参数预警装置,是以单片机为核心的安全预警终端,对接收到的数据进行分析并传送到监控中心服务器。主要的安全自动装置介绍如下。

1) 烟气传感装置:布置在电池箱顶部等位置,当电池过充或起火冒烟时,将数据报送至上位机,驱动预警并动作,降低火灾和爆炸风险。不同类型的锂电池在热失控过程中所释放的气体成分存在差异,气体的质量浓度变化能反映磷酸铁锂电池所处的热失控阶段^[23]。有效识别电池热失控过程中释放的CO₂、CO、H₂、CH₄、C₂H₄、C₃H₆等气体成分与质量浓度,可实现电池事故的早期预警,如利用热失控阶段含量最高的CO₂、CO、H₂进行一级预警。常用气体传

感器包括半导体式、红外式吸收、接触燃烧式、电化学传感器等,半导体式传感器在检测爆炸性与可燃性气体方面的应用更广泛。如费加罗研发的CO传感器TGS5141是电池驱动的电化学式传感器,其使用一个特殊的电极取代储水器,适用于高集成电子产品,对CO的灵敏度高,能将CO浓度线性输出,且自带出厂预标定的灵敏度系数,方便用户使用并进行性能追溯,寿命长达10 a以上。

2)温度监测装置:监控系统内的温度,避免温度变化导致气体发生化学反应而引起设备故障。如外电极温度监测光纤光栅传感器,能实现锂离子电池多个单元的分布式温度测量^[24]。基于温度监测设备的历史和实时数据,集成动作时间序列、测量模拟值,可提前预警温度值变化。常用的电池生热量、生热速率、温升速率测量设备包括加速量热仪、差示扫描量热仪、C80微量热仪等^[7]。

3)声学监测装置:热失控过程释放的气体会增加电池内部的压力,当压力达到设计的临界值时,安全阀将打开并产生独特的声学信号。声波检测仪检测排气声波信号,可实现对热失控故障的辨识。在储能舱角落安装4台声学传感器,如声波检测仪等,基于声波信号进行故障定位,通过小波变换防误判,还可计算单元空间的位置以辅助消防^[25]。

4)电压互感器:监测电压异常变化,可在泄压阀开启前预判电池热失控的发生。电压互感器发生故障可能导致电池过充过放,为此文献^[26]提出了基于自适应扩展卡尔曼滤波的锂离子电池传感器故障检测与隔离方法,保证电压互感器正常运行。

5)红外图像监测装置:主动探测电化学储能电站的温度等状态,辨识风险与故障,主要涉及目标检测和图像拼接两部分算法。将红外测温获得的热辐射信息转化为红外图像中的颜色信息,可得到各设备的温度,且电气设备红外图像分类识别技术已较成熟。根据设备的红外图像,可识别该图像中电气设备的种类及其表面温度,确定设备的故障程度。

3.2.2 安全监控系统及关键技术

安全自动装置可对单一设备进行越限报警,但有其局限性。如电池从生长出枝晶到内短路再到热失控的过程往往十分缓慢,外部表现出的电池端电压信号变化并不明显,单装置监测较难发现问题。当监测到电压信号明显越限时,电池已进入不可逆的热失控进程,会在极短的时间内释放大量的热量,并在电池间迅速蔓延,引发燃爆。此时,需要借助安全监控进行故障预警与处理。

1)主动BMS:主动BMS可实现电池组均衡管理、控制、故障告警、保护及通信管理。不限于单体电池运行电压、电流、温度等的检测,支持SOC、SOH评估,判别老化风险电池;突破参数越限的简单判断

方法,动态调整安全阈值,提供对电池关键参数分析的能力;不限于从电源模块、通信连接、电池状态等方面检查BMS故障,不局限于检查BMS的外观、指示灯、电压、电流、温度等信息以及查看BMS与监控系统、PCS的通信状态来确定BMS系统的失效原因和位置,可借助历史数据模拟BMS故障,及时发现BMS自身失效的原因和位置。主动热管理模块可确保电池在合适的温度范围内运行,维持温度均匀分布,减少热失控风险^[5]。

特斯拉公司融合机器学习、优化算法等技术在2020年开发了电池储能管理软件平台Autobidder,该平台是系统与算法库的结合,可实现温度监测、绝缘检测、高压互锁、接触器控制、对外部通信等功能。

2)主动EMS:一方面,EMS通过数据采集、网络监控等承担储能系统内部能量控制的功能,管控电池单元的充放电和内部均衡,设置传感器报警、BMS保护动作、电池簇内阻与端电压、电池簇温度、PCS运行状况等运行参数,且在故障情况下对BMS下达停机指令,终止电池组充放电,对PCS下达停机指令,使得故障隔离在直流侧;另一方面,确定EMS存在的直接或间接造成储能电池爆炸、失火的原因,实现与BMS、PCS间信息的及时共享,支持PCS和电池之间实现协调保护,解决与PCS故障修复、电池、测量装置及其他管理系统之间的冲突问题。

3)主动变流器保护控制系统:设备层中变流器设备连接电池系统、电网和(或)负荷,实现电能双向转换,如双向DC-DC变换器、电压型脉冲宽度调制整流器等。在系统层,变流器保护控制系统包括电压电流型传感器、保护电路、SOC检测模块、散热器、蜂鸣器、人机界面、系统辅助供电电源等。该系统既能接收后台指令调节PCS的工作模式,监测PCS的运行工况,在过压、过流、BMS保护信号故障条件下触发保护动作停机,提供故障录波功能,还能随时响应自动增益控制、自动电压控制系统指令快速做出响应,并针对PCS自身的典型故障(如跳闸故障、变流器过负荷、声音异常、逆变器着火等),及时辨识其风险故障。

4)智能巡检机器人:安装有红外测温仪、高清摄像头、音频接收器等设备,能按照提前设置好的巡检任务,分时段、分区域地对全站设备进行巡检,及时发现设备异常、缺陷、隐患并告警;能随时随地地检测电化学储能电站情况,有效降低运维人员的工作风险和劳动强度,具有实用价值^[27];一般具有设备图片库、在线匹配及检测识别、图片匹配及输出、全天气全季节识别、运行数据指标显示等功能。

国网山东省电力公司的滨州智慧能源综合示范区大力推行机器人巡检系统,具备红外摄像、状态识别、精准激光定位、巡检报告自动生成、高效应急处

置等功能,提升了设备监控的实时性、故障判断的准确性、设备维护的及时性。

5)数字孪生电化学储能电站:电化学储能电站具有多时间尺度动态特性关联、强非线性、不确定性等混杂特征,其安全依赖于对系统运行状态的深层次理解和掌控,数字空间要求更高效地实现多源量测融合、系统特性分析、发展态势预测、控制决策优化等功能^[28]。构建真实电池系统乃至电化学储能电站在数字空间的投影和镜像,支撑电站主动安全运维,如提取电池运行、环境数据,建立其数据驱动模型、电池机理模型以及半经验模型,构建“电池实体-环境”耦合动态系统模型。文献[29]搭建了云BMS,基于数字孪生技术监测电池SOH,然后对动态模型进行精确辨识,考虑全生命周期参数变化对电池状态进行评估,实现真实物理空间与虚拟数字空间的实时映射,构建电芯与系统的数字孪生模型。机器学习、云计算和数字孪生技术相结合,有望解决电化学储能电站数据爆炸性增长下的主动安全问题。基于数字孪生技术的故障预警体系如图4所示。

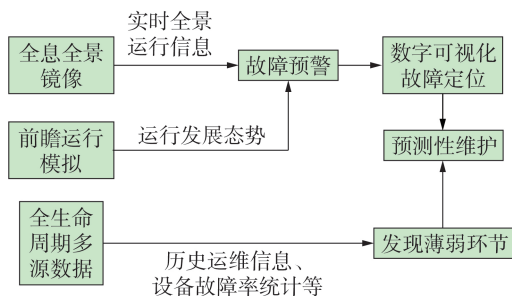


图4 基于数字孪生技术的故障预警体系

Fig.4 Fault early warning system based on digital twin technology

6)主动视频监控系统:实时识别设备故障、电池舱烟雾与火焰等特征以及火灾事故,辅助运维人员及时发现故障、快速定位,与火灾报警系统联动,避免事故扩大^[30]。

此外,空调管控系统、历史数据服务系统、网络监测系统等都能提升电化学储能电站的主动安全监控能力,如:配置嵌入式传感器与人工智能模块的“智能电力设备”,具备自主思维,支持自身实时检测与告警、自我状态分析、SOH评估、信息上传和后台实时查询,可减小数据传输和后台计算压力,实现基于过程监督的主动运维^[31]。

总体而言,系统的主动安全性可从以下四方面提升:①设置不同的监测方式、监测节点、数据采集、信息分析、系统风险预测等模块,确保监测数据的准确性;②通过人工智能算法实现对系统监管对象的高效风险辨识,对不可靠信息和不确定性关联进行推理诊断,推理得到脆弱元件和各设备发生故障的

概率,提升系统的管控准确度和时效;③强化安全监控系统的联动设计,定期维护实现参数校准及判据更新,保证管控系统输入参数的合理性;④实时辨识监控管理系统自身的风险与故障。

3.3 主动事故处理技术

第三道防线不针对各种严重故障逐一采取对策,而是仅针对故障可能引起的事故状态和参数特征采取控制措施,以消除火灾、防止爆炸和有毒气体渗漏、避免发生电气事故等。

3.3.1 事故预警与联动控制

目前,事故预警方法分为基于经验的预警方法与基于模型的预警方法。前者利用层次分析法、模糊数据理论等,结合专家主观评价,建立事故评估模型;后者利用机器学习算法与非线性状态估计技术,训练正常运行数据,判断实际运行数据的残差,通过状态阈值分析,实现事故提前预警。预警结果用于辅助用户进行决策,部分预警事件可以由系统进行自适应处理。

在事故预警与联动控制的数据处理和应用方面,运用物联网监测技术进行实时监测,借助云存储、虚拟存储等技术存储数据,结合数据驱动方法建立并量化事故数据库。构建由基础数据层、图谱构建层、信息解析层、推理决策层和人机交互层形成的知识图谱,实现电化学储能电站事故信息解析判别、智能辅助决策以及多维度人机交换^[32]。采用深度编码器实现预警结果可视化展示^[33],并联动消防灭火控制系统进行事故处理^[6]。

为了避免系统误报、漏报火灾,分级预警及联动控制策略被提出^[6]。故障分级预警可通过预测电化学储能电站的运行状态并计算对应的风险概率实现,分级预警的难点在于有效识别电池热失控演化不同阶段的特征参数,对耦合的传感器灵敏度以及阈值的整定要求较高。风险理论也被用于电站安全等级评价指标的构建^[4],状态预警、阈值预警、快变预警、趋势预警、评价预警、排名预警、关联预警等预警形式也被提及。

锂离子电池的火灾不同于其他典型火灾,需使用CO₂、七氟丙烷、全氟己酮、细水雾等灭火剂和灭火策略相结合的方式灭火^[34],且灭火后需及时排气泄压,以防止事故扩大。七氟丙烷、全氟己酮等可有效扑灭锂离子电池的火灾,但是缺乏有助于缓解热失控重燃、蔓延的冷却效果,因此尽管水会对电站设备的电路完整性有潜在的影响,仍需使用细水雾等灭火技术提供快速冷却和灭火的效果。电化学储能电站需设计安装能够自动扑灭大型电池组火灾,同时能够快速冷却电池组并对电池组损坏最小的二次灭火系统。电化学储能电站的火灾报警系统一般包括气体细水雾灭火联动系统、BMS联动控制系统、

舱级 PCS 断路器、簇级继电器、通风空调监控系统、消防应急广播系统、消防应急照明、疏散指示系统等^[5]。

电化学储能电站的事故预警与联控系统采用多样化分层监测电池模块、电池柜、电池集装箱数据,基于综合预警技术与数据挖掘技术,预测并发出预警信号,在线监测系统将故障上传至站控中心,联动空调降温,及时隔离故障设备。当电池模块起火时,使用气溶胶等新型灭火剂灭火,并联动消防装置切断电池簇电流。利用七氟丙烷与细水雾相结合的灭火方式等抑制电池柜的火焰,同时在电池模组间布置密封结构,防止火灾蔓延。当发生电池集装箱级火灾时,还须联动注水装置淹没集装箱,配合惰性气体、大面积干粉等消防措施,避免发生大规模安全事故,造成电站崩溃与人员伤亡^[4]。

3.3.2 事故特征分析

从电池模块级、集装箱级对电化学储能电站进行全周期、连续性监测,会导致安全事故数据量大,较难从海量多样化监测数据中提炼事故特征。可利用站控中心的数据处理能力,借助大数据云平台,对电化学储能电站各层级设备进行全寿命周期追踪,挖掘与计算数据特征,辨识事故状态,推导事故演变规律,分别实现电池单体、电池模块及电池集装箱的风险、故障、事故特征的快速识别。针对系统失效的可能性,根据事故特征的不同,分别制定不同量程和灵敏度的传感器系统及冗余系统,以保证多渠道事故探测预警。

可将粒子群优化算法、脉冲神经网络等数据驱动方法应用于电化学储能电站的事故特征分析与安全预警控制^[35-36]。文献[37]利用马丁格尔增强等机器学习算法,不断地迭代筛选出了对事故影响最为显著的属性,同时采用延伸知识发现算法进行监督学习。文献[38]采用改进辅助分类生成对抗网络的数据增强方法,实现了对事故原始数据分布特征的有效学习。文献[39]针对传感器网络火灾监测系统,采用二元粒子群优化算法对所提模糊系统进行优化,消除了冗余规则。

4 结论

本文提出了由设备层、间隔层、站控层构成的电化学储能电站主动安全体系架构;设置了电化学储能电站三道安全防线,隔离了电化学储能电站的4种状态;研究了主动风险源辨识、主动故障预防、主动事故处理三方面的关键技术,实现了系统早期预警及事故风险的主动管控与防护,所得结论如下。

1)通过分析风险源、故障、事故的逐层演化机理,可构建电化学储能电站的三道安全防线,隔离电化学储能电站正常安全、正常不安全、不正常不安

全、严重事故这4种状态。

2)不同安全防线的防控对象、支撑技术、监控装置、防控目标各不相同。第一道防线辨识安全诱因和风险源,基于等效模型、数据驱动模型等,确保电化学储能电站正常运行;第二道防线辨识故障,利用安全自动装置和安全预警系统,确保电化学储能电站及时排除故障,继续保持系统稳定运行;第三道防线设置事故预警和联动控制预案,防止电化学储能电站系统崩溃与人员伤亡。

3)确保监测数据的准确、一致和冗余,利用人工智能算法实现风险、故障、事故辨识及特征分析,强化监测装置和监测系统的联动设计,同时保障对安全监控管理系统自身风险与故障的监控,是电化学储能电站进行主动风险预警与按需检修、主动故障诊断与预警、主动事故预防与联动处理的关键。

参考文献:

- [1] FENG X N, PAN Y, HE X M, et al. Detecting the internal short circuit in large-format lithium-ion battery using model-based fault-diagnosis algorithm[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18: 26-39.
- [2] 曹文灵, 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 Wenjing, 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.
- [3] Underwriters Laboratories. Test method for evaluating thermal runaway fire propagation in battery energy storage systems: UL 9540A Ed.2-2018[S]. [S.L.]: Underwriters Laboratories, 2018.
- [4] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站信息架构与安防体系综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 179-191. LI Jianlin, WU Yiwen, WANG Nan, et al. Review of information architecture and security system of gigawatt electrochemical energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 179-191.
- [5] WANG Q S, MAO B B, STOLJAROV S I, et al. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95-131.
- [6] 崔建磊, 文云峰, 郭创新, 等. 面向调度运行的电网安全风险管控系统(二)风险指标体系、评估方法与应用策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 92-97. CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk management system for power system dispatching and operation: part two risk index, assessment methodologies and application strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97.
- [7] 朱晓庆, 王震坡, WANG Hsin, 等. 锂离子动力电池热失控与安全风险管理综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 91-118. ZHU Xiaqing, WANG Zhenpo, WANG Hsin, et al. Review of thermal runaway and safety management for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 91-118.
- [8] YUAN Shuai, CHANG Chongye, YAN Shuaishuai, et al. A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 62: 262-280.

- [9] LEE H, BERE G, KIM K, et al. Deep learning-based false sensor data detection for battery energy storage systems[C]// 2020 IEEE CyberPELS. Miami, FL, USA: IEEE, 2021: 1-6.
- [10] 李建林, 谭宇良, 周喜超, 等. 国内外电化学储能产业消防安全标准对比分析[J]. 现代电力, 2020, 37(3): 277-284.
LI Jianlin, TAN Yuliang, ZHOU Xichao, et al. Comparative analysis on fire safety standards for electromechanical energy storage sectors home and abroad[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3): 277-284.
- [11] 牛志远, 姜欣, 谢槟, 等. 电动汽车过充燃爆事故模拟及安全防护研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 36-47, 57.
NIU Zhiyuan, JIANG Xin, XIE Bin, et al. Study on simulation and safety protection of electric vehicle overcharge and explosion accident[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 36-47, 57.
- [12] SIDHU A, IZADIAN A, ANWAR S. Adaptive nonlinear model-based fault diagnosis of Li-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1002-1011.
- [13] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: a review[J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 178-192.
- [14] CHAOUI H, IBE-EKEOCHA C C. State of charge and state of health estimation for lithium batteries using recurrent neural networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 8773-8783.
- [15] 钟景瑜, 廖凯, 李波, 等. 基于随机片段数据的锂电池状态估计方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 205-212.
ZHONG Jingyu, LIAO Kai, LI Bo, et al. State estimation method of lithium battery based on random fragment data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 205-212.
- [16] 梁海峰, 袁芃, 高亚静. 基于CNN-Bi-LSTM网络的锂离子电池剩余使用寿命预测[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 213-219.
LIANG Haifeng, YUAN Peng, GAO Yajing. Remaining useful life prediction of lithium-ion battery based on CNN-Bi-LSTM network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 213-219.
- [17] 贾俊, 胡晓松, 邓忠伟, 等. 数据驱动的锂离子电池健康状态综合评分及异常电池筛选[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 141-149, 159.
JIA Jun, HU Xiaosong, DENG Zhongwei, et al. Data-driven comprehensive evaluation of lithium-ion battery state of health and abnormal battery screening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 141-149, 159.
- [18] 卫志农, 原康康, 成乐祥, 等. 基于多新息最小二乘算法的锂电池参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 139-145.
WEI Zhinong, YUAN Kangkang, CHENG Lexiang, et al. Parameter identification of lithium-ion battery based on multi-innovation least squares algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 139-145.
- [19] JIANG Lulu, DENG Zhongwei, TANG Xiaolin, et al. Data-driven fault diagnosis and thermal runaway warning for battery packs using real-world vehicle data[J]. Energy, 2021, 234: 121266.
- [20] YANG R X, XIONG R, HE H W, et al. A fractional-order model-based battery external short circuit fault diagnosis approach for all-climate electric vehicles application[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 950-959.
- [21] SONG C X, SHAO Y L, SONG S X, et al. Insulation resistance monitoring algorithm for battery pack in electric vehicle based on extended Kalman filtering[J]. Energies, 2017, 10(5): 714-727.
- [22] 李舒适, 王丰华, 耿俊秋, 等. 基于优化VMD的高压断路器机械状态检测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 148-154.
LI Shushi, WANG Fenghua, GENG Junqiu, et al. Mechanical state detection of high voltage circuit breaker based on optimized VMD algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 148-154.
- [23] LIAO Z H, ZHANG S, LI K, et al. Hazard analysis of thermally abused lithium-ion batteries at different state of charges[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101065.
- [24] PENG J, JIA S H, YU H Q, et al. Design and experiment of FBG sensors for temperature monitoring on external electrode of lithium-ion batteries[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4628-4634.
- [25] LÜ Nawei, YANG Jin, SHAN Miao, et al. Fault warning and location in battery energy storage systems via venting acoustic signal[J/OL]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. [2022-04-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9500197>. DOI: 10.1109/JES-TPE.2021.3101151.
- [26] LIU Z T, HE H W. Sensor fault detection and isolation for a lithium-ion battery pack in electric vehicles using adaptive extended Kalman filter[J]. Applied Energy, 2017, 185: 2033-2044.
- [27] WEI Zhongbao, ZHAO Jiyun, JI Dongxu, et al. A multi-timescale estimator for battery state of charge and capacity dual estimation based on an online identified model[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1264-1274.
- [28] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1597-1608.
WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1608.
- [29] LI W H, RENTEMEISTER M, BADEDA J, et al. Digital twin for battery systems: cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101557.
- [30] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 2-14.
LI Jianlin, WU Yiwen, WANG Nan, et al. Review and prospect of gigawatt-level electrochemical energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 2-14.
- [31] 赵仕策, 赵洪山, 寿佩瑶. 智能电力设备关键技术及运维探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 1-10.
ZHAO Shice, ZHAO Hongshan, SHOU Peiyao. Discussion on key technology and operation & maintenance of intelligent power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 1-10.
- [32] 乔骥, 王新迎, 闵睿, 等. 面向电网调度故障处理的知识图谱框架与关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5837-5849.
QIAO Ji, WANG Xinying, MIN Rui, et al. Framework and key technologies of knowledge-graph-based fault handling system in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5837-5849.
- [33] 徐舒玮, 邱才明, 张东霞, 等. 基于深度学习的输电线路故障类型辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 65-74, 321.
XU Shuwei, QIU Caiming, ZHANG Dongxia, et al. A deep learning approach for fault type identification of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 65-74, 321.
- [34] LIU Yujun, DUAN Qiangling, XU Jiajia, et al. Experimental study on a novel safety strategy of lithium-ion battery integrating fire suppression and rapid cooling[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101185.

- [35] 陈碧云,李弘斌,李滨. 基于数据挖掘和CAPSO-SNN的电力作业风险态势感知[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):148-155.
CHEN Biyun, LI Hongbin, LI Bin. Power operation risk situation awareness based on data mining and CAPSO-SNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 148-155.
- [36] ZHANG J L, JIA Y, ZHU D, et al. Study on the situational awareness system of mine fire rescue using faster ross girshick-convolutional neural network[J]. IEEE Intelligent Systems, 2020, 35(1): 54-61.
- [37] 李亦言,胡荣兴,宋立冬,等. 机器学习在智能配用电领域中的应用:北美工程实践概述[J]. 电力系统自动化,2021,45(16): 99-113.
LI Yiyang, HU Rongxing, SONG Lidong, et al. Application of machine learning in field of smart power distribution and utilization: overview of engineering practice in North America[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 99-113.
- [38] 卢锦玲,张祥国,张伟,等. 基于改进辅助分类生成对抗网络的风机主轴轴承故障诊断[J]. 电力系统自动化,2021,45(7): 148-154.
LU Jinling, ZHANG Xiangguo, ZHANG Wei, et al. Fault diagnosis of main bearing of wind turbine based on improved

auxiliary classifier generative adversarial network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 148-154.

- [39] MUDULI L, MISHRA D P, JANA P K. Optimized fuzzy logic-based fire monitoring in underground coal mines: binary particle swarm optimization approach[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 3039-3046.

作者简介:



杨 旻

杨 旻(1990—),男,工程师,硕士,研究方向为电网接入系统设计与分析、新能源及储能并网技术(E-mail: yh19901018@126.com);

黄小庆(1981—),女,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析、电动汽车入网以及电力大数据(E-mail: huangxiaqing@hnu.edu.cn);

于慎仟(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、储能安全监测(E-mail: 1582923464@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Research on active safety of electrochemical energy storage station

YANG Hang¹, HUANG Xiaoqing², YU Shenqian², DI Beichen², GUO Yiguo¹,
XUE Binglei¹, WANG Zhipeng¹

(1. Economic & Technology Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the increasing installed capacity of electrochemical energy storage station, its safety prevention and control problem has been paid more attention. Therefore, three safety defensive lines based on active risk source identification, active fault prevention and active accident handling are proposed, and the active safety system of electrochemical energy storage station is constructed. The first safety defensive line aims at the normal but unsafe operation state of the electrochemical energy storage, which quickly and reliably identifies the risk sources and safety incentives without loss of station equipment and operation capacity. The second safety defensive line aims at the unsafe operation stage where faults have occurred, which identifies and timely eliminates early faults by using the safety automatic devices and safety monitoring systems to maintain the normal operation of the system. The third safety defensive line aims at the accident state of the electrochemical energy storage station, which carries out accident characteristic analysis and risk control and implements joint contingency plans to prevent the collapse of the electrochemical energy storage station and human casualties. The three safety defensive lines can realize the active prevention and control of safety risks and accidents of electrochemical energy storage station, providing a new idea for the safety design of energy storage stations.

Key words: electrochemical energy storage; energy storage station; active safety; safety defensive line; condition monitoring; fault early warning; accident prevention and control