煤矿用应急电源储能系统集成设计及应用

靳文涛，刘　骁

（新源智储能源发展（北京）有限公司，北京 102412）

摘要：为满足煤炭行业和煤矿企业对于供电可靠性的需求及实现绿色低碳发展转型，根据某典型煤矿用电负荷及其应急负荷特性，分析其储能功率、容量需求，采用了 1.2 MW/1.2 MW·h 磷酸铁锂电池储能系统，保障矿井故障停电时的井下照明、主扇风机、局扇风机和矿井提升机等的应急负荷用电，并可实现负荷侧削峰填谷控制，分析了兆瓦级别储能变流器结构及其用于煤矿应急电源的储能应用模式，论证电池储能系统应用于煤矿应急电源领域的可行性，确认了该技术的推广应用价值。

关键词：应急负荷；电池储能系统；应急电源；无缝切换；兆瓦级储能变流器

Integrated design and application of energy storage system for emergency power supply in coal mines

JIN Wentao, LIU Xiao

(Xinyuan Intelligent Energy Storage Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102412, China)

Abstract: In order to meet the needs of the coal industry and coal mining enterprises for power supply reliability and realize green and low-carbon development transformation, Based on the electricity load and emergency load characteristics of a typical coal mine, the energy storage power and capacity requirements are analyzed. A 1.2MW/1.2MW h lithium iron phosphate battery energy storage system is adopted to ensure the underground lighting, main fan, local fan and mine hoist in case of mine failure and power failure This paper analyzes the structure of MW level energy storage converter and its energy storage application mode for coal mine emergency power supply, demonstrates the feasibility of battery energy storage system applied in coal mine emergency power supply field, and confirms the popularization and application value of this technology.

Key words: emergency load; battery energy storage system; emergency power supply; seamless switching; MW level energy storage inverter

0　引言

常规煤矿企业电能多由国家供电网络供给，企业处于供电侧、负荷侧的枢纽位置，拥有自备发电厂的大型厂矿企业为少数[1]。随着煤矿井下智能化程度不断提高，其井下供电可靠性受到多重因素的影响，为保证矿山外部电源丧失后井下人员安全撤离，以及矿区重要负荷供电的连续性和可靠性，无自备电场的矿山及单回路供电矿井必须配备应急电源系统[2]。当工作线路出现故障无法正常供电时，通过采取适当处理措施，将

北京未来电化学储能系统集成技术创新中心项目（20230469186-7A）和中国电力 C 类科技项目（ZGDL-KJ-2023-C050）

负荷快速切换至备用线路，实现主风机的不间断供电，消除因电源故障、风机停机引起的煤矿安全隐患[3]。矿山企业配置的应急电源应能迅速接入，保证外电丧失后实现电源的快速切换，确保接入后15 min内恢复提升机供电，60 min内完成人员撤离。

储能系统应用于电网中，可以延缓电网设备投资，减少输电阻塞成本，降低网损，提供辅助服务，提高供电可靠性等，在电力系统发/输/配/用各环节得到示范及工程应用[4-5]，鉴于其具有能量时移、快速响应以及灵活布置等特点[6]，也作为应急电源被广泛使用[7-8]。

常规的应急电源车以柴油发电机为主[9]，柴油机起动时会产生大量烟雾，噪声大，工作时对环境影响严重，并且供电的稳定性不足。作为应急电源用的移动式储能系统具有配置灵活、响应迅速、易于现场安装、可移动性强和不受地域条件限制的特点[10]，同时减少柴油使用引起的环境污染问题。

本文针对移动式电池储能系统在煤矿应急电源中的应用，介绍了在某煤矿移动式兆瓦级电池储能应急电源系统的项目概况和设计要点，探讨了储能系统在煤炭行业的应用方案及应用模式，为储能在煤矿中作为应急电源场景中的多应用需求提供技术探索。

1 典型煤矿电力负荷特性

根据煤矿中各负荷对供电可靠性要求的不同，其负荷可分为以下三类[11]。

（1）一类负荷。因供电突然中断可能造成矿井内作业人员的人身伤亡或重大设备损坏，给煤矿经济造成重大经济损失或不良影响的负荷，包含煤矿主通风机、主副井提升机、主水泵、井上及井下中央变电所、矿区医院的手术室等。

（2）二类负荷。因突然停电会对煤矿造成较大经济损失的负荷，例如压风机、采区变电所、露天矿变电所等。

（3）三类负荷。三类负荷是指除一类、二类负荷外的其他负荷。例如辅助车间的用电及公用事业用电设备等都属于三类负荷。对三类负荷在突然失去电源供电时，无须备用电源提供功率支撑。

该煤矿属于冲击地压矿井，采深超900 m，生产系统复杂、环节多，与其他矿井相比需要的人力也相应更多，其单班入井人数控制在100人以下，每日单班入井人数最大峰值为96人，一般动态保持在60～80人之间[12]，其副井提升机电气连接如图1所示。

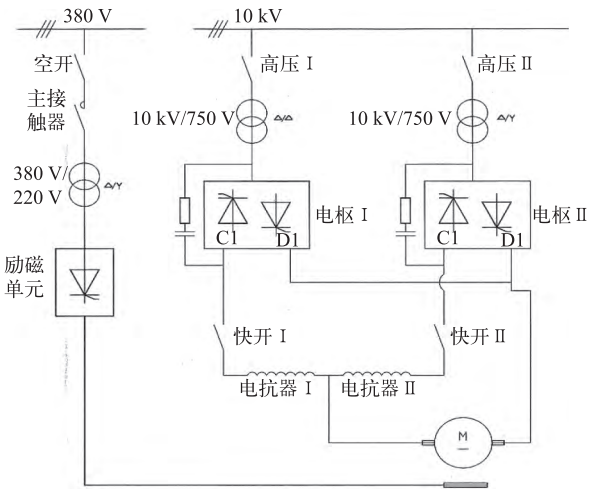


图 1 典型煤矿副井提升机电气连接示意图

Fig. 1 Electrical connection diagram of typical coal mine auxiliary shaft elevator

副井深度约950 m，其提升机额定功率为1 000 kW，额定电压为DC 750 V，额定电流为1 530 A，单次任务提升时间约需要3 min 40 s，平均功率约为655 kW。

2 应急电源储能系统成组设计

目前储能技术及应用研究已日趋成熟，作为智能电网的重要组成部分，国内兆瓦级的储能应用已颇具规模，集装箱式储能是当今电池储能系统的主流装备，具备快速功率支撑、无功响应、保证供电可靠性等多种功能，结合试点煤矿应急电源需求，采用磷酸铁锂电池储能系统作为该煤矿的应急电源系统。

该试点项目储能系统的核心功能是电网失电时，为试点矿井的重要负荷（主扇、局部通风机以及矿井提升机）提供可靠的应急后备电源；

在电网正常时，结合当地工商业用电电价，以经济性最优为原则，参与削峰填谷运行。同时，可进行无功补偿，并实现负荷跟踪、应对矿井内冲击性负荷需求及提高系统供电可靠性等辅助功能。

考虑到储能变流器系统（Power Converter System，PCS）交/直流侧电压范围约束，采用3.2 V/120 A·h的磷酸铁锂单体电池，由24个单体电池串联组成电池箱，17个电池箱串联组成一个电池簇，每簇电池基本单元的直流电压为3.2 V×17×24=1 305.6 V，容量为156 kW·h，8个电池簇并联组成1.2 MW/1.2 MW·h的应急电源储能系统。整个应急电源储能系统布置于40尺（1尺=0.33 m）的集装箱内，集装箱内部布置图如图2所示。

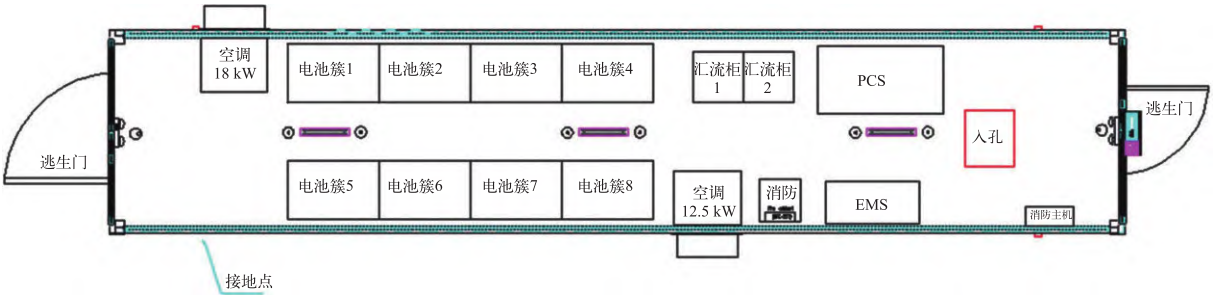


图 2　应急电源储能系统布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of emergency power storage system

针对储能系统的特定应用场景，以安全生产为第一要素。在系统设计过程中，为电池系统提供适宜的环境工作温度，考虑集装箱内配置空调系统和消防系统，用于降低箱体内部电池温度，送风进入电池柜间风道，从电池柜后部流出，进入前部空调系统的回风口，其集装箱散热仿真效果如图3所示。

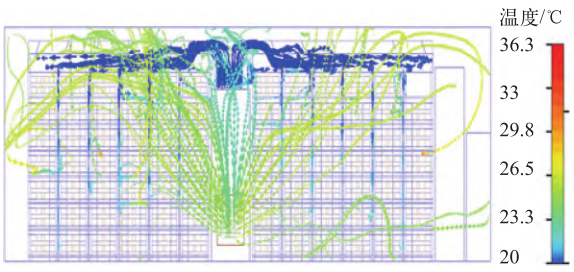


图 3　集装箱散热仿真效果图

Fig. 3 Simulation effect drawing of container heat dissipation

整个气流组织合理，空气完全经过电池，保证电池系统安全；上部风道内的挡板，保证电池柜间有足够空气流量，其集装箱内温度分布如图4所示。

通过合理布局集装箱内电池，实现良好的散热，能快速将热量散到外界空气中，保证系统安全稳定运行。

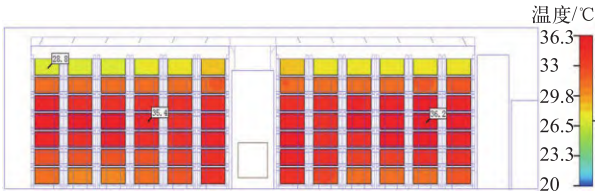


图 4　集装箱内温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution in container

箱式变压器单独放置，同时配置散热风机。PCS通过1台690 V/10 kV的箱式变压器并入10 kV电网。

3　系统关键设备及其要点设计

3.1　兆瓦级储能变流器基本结构

固定和移动应急电源容量应不小于人员提升机额定功率的1.5倍，高瓦斯煤矿、硫化氢气体危害严重的非煤矿山且自然风不能满足人员车里期间用风需求的，按照不小于主风机额定功率2倍配备。在外电丧失后，应急电源需实现快速切换，确保接入后15 min内恢复提升机供电，60 min内完成人员撤离。基于煤矿主扇重要负荷700 kW、局扇负荷220 kW和提升机额定功率

1 000 kW的负荷需求，为确保矿山外部电源丧失后井下人员安全撤离，结合紧急用电负荷需求，该煤矿需采用1.5 MW的PCS。

储能双向变流器作为储能系统和电网间能量交互的关键设备[13]，有别于广泛应用的三电平结构的逆变器[14-15]。其存在的中性点电位不平衡的问题也得到广泛的研究[16]，常规PCS采用三相电压型拓扑结构[17]，部分PCS采用两级式拓扑[18]：前级使用双向DC/DC变换器；后级采用T形三电平拓扑和LCL滤波器。为使煤矿中应急电源具备更高的可靠性及安全性，系统配置的PCS采用1.5 MW集成设计的三电平NPC型拓扑结构，该PCS基本结构如图5所示。

图5中，Bat为应急电源储能系统，其直流电压范围为1 000～1 500 V；C_{in}为直流母线电容；C为输出滤波电容；V_a、V_b、V_c为三相并网电压；i_a、i_b、i_c为电感电流；e_a、e_b、e_c为并网点电网电压。

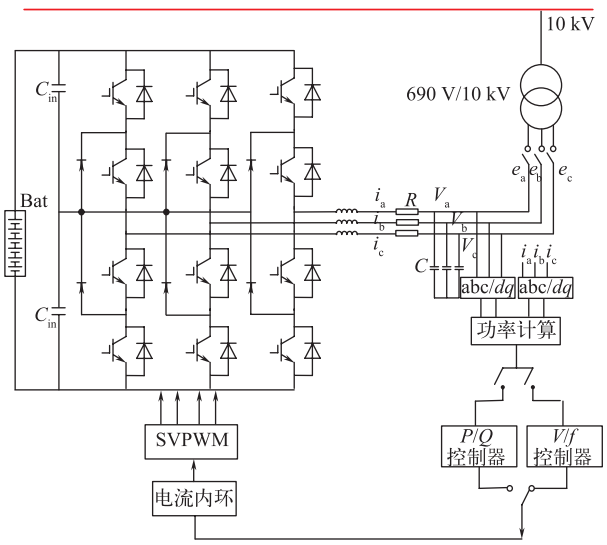


图 5　兆瓦级储能变流器控制结构框图

Fig. 5 Control structure block diagram of megawatt energy storage converter

3.2　储能变流器控制

当煤矿外部公共电网无法供电时，由电池储能系统作为应急电源，此时储能系统切换为V/f模式，建立系统电压、频率支撑[19]。

PCS采用空间矢量脉宽调制（Space Vector Pulse Width Modulation，SVPWM）算法，包括参考矢量所在的扇区号的判断、开关矢量作用时间计算及所选矢量作用顺序的确定，共有27个基本矢量可供选择，整个空间电压矢量图划分为六大扇区，36个小三角形区域，如图6所示。

采用α-β极坐标计算法，通过确定用来合成参考电压矢量的三个系统内部电压矢量判断矢量所在扇区及区域；通过计算各个矢量作用时间确定其开关矢量及其作用顺序。

采用中心对称的七段式SVPWM波形，将基本矢量的作用时间分配给对应的15个矢量状态，输入滤波采用LC滤波器，电抗器采用8%结构，结构方式为C+L（8%）；8%电抗器为78 μH，电流为1 294 A，滤波前后电压波形如图7所示。

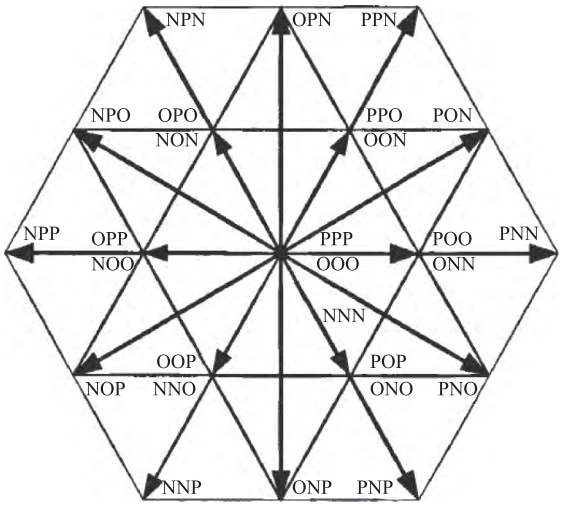


图 6　三电平逆变器 SVPWM 算法区域划分

Fig. 6 SVPWM algorithm and region division of three-level inverter

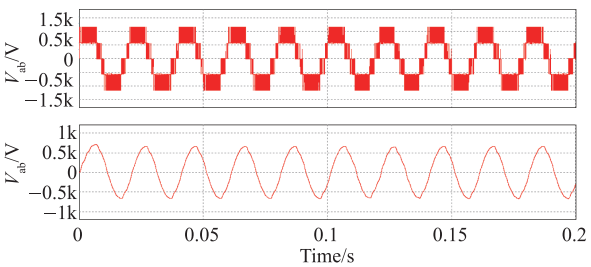


图 7　滤波前后输出电压波形

Fig. 7 Output voltage waveform before and after filtering

交流预充电可充至952 V，交流额定电压的

峰值为975 V，交流预充电至交流额定电压峰值的97.6%。

直流输出电压纹波及母线电容电流仿真波形如图8所示。

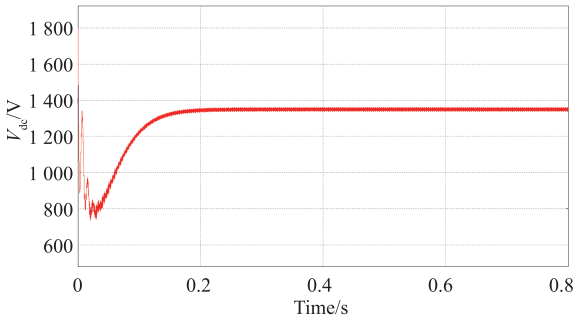


图 8　直流侧 PID 调节稳压仿真波形

Fig. 8 DC side PID regulation voltage stabilizing simulation waveform

通过短时间的PID调节，最终直流母线电压稳定在运行电压附近，当系统运行电压为1 350 V时，电压纹波为24.15 V，电压纹波率为1.79%，满足恒压运行状态下直流电压纹波标准。

4　应急电源用储能系统应用

4.1　紧急功率支撑与无功补偿应用

作为电压源储能系统可实现零压启动，且功率响应速度快，在煤矿园区电网中可实现并/离网运行，同时实现故障停电状态下的无功平衡，为矿井提供紧急功率支撑。在煤矿常用电源故障前，储能系统处于待机状态；在常用电源发生故障时刻，储能系统自动切换至并网状态，保障矿井重要负荷装置的供电，储能系统从待机状态实现1 000 kW功率输出，其PCS交直流的电流标幺值波形曲线如图9所示。

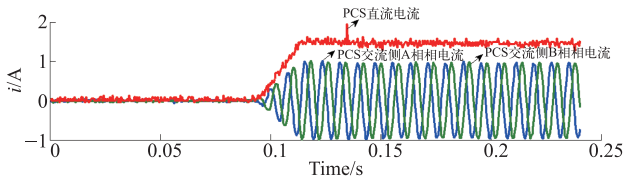


图 9　PCS 交直流侧的电流标幺值波形

Fig. 9 Voltage and current waveforms at AC sides of PCS

储能系统从待机状态（0 kW）切换至500 kW恒定功率输出时，有功功率切换时间在50 ms以内，满足为矿井提供紧急功率支撑的功能需求。

矿井提升机是井下矿山生产的咽喉设备，在提升或者正力减速时段，将电能转化为机械能；在重物下放或负力减速过程中，电机处于发电状态，将系统的机械能转化为电能回馈电网，同时产生制动力。当电网故障时，由储能系统提供其上升、下降过程中的功率输出，其提升阶段储能输出功率曲线如图10所示。

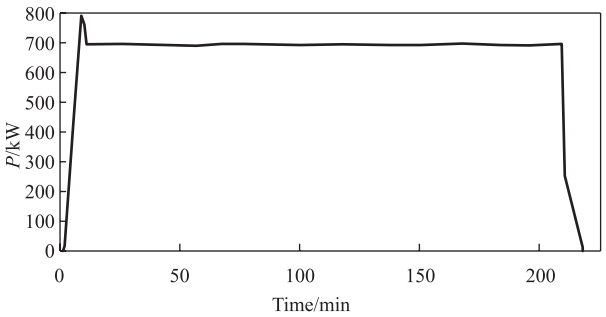


图 10　储能满足提升机工作时的输出功率曲线

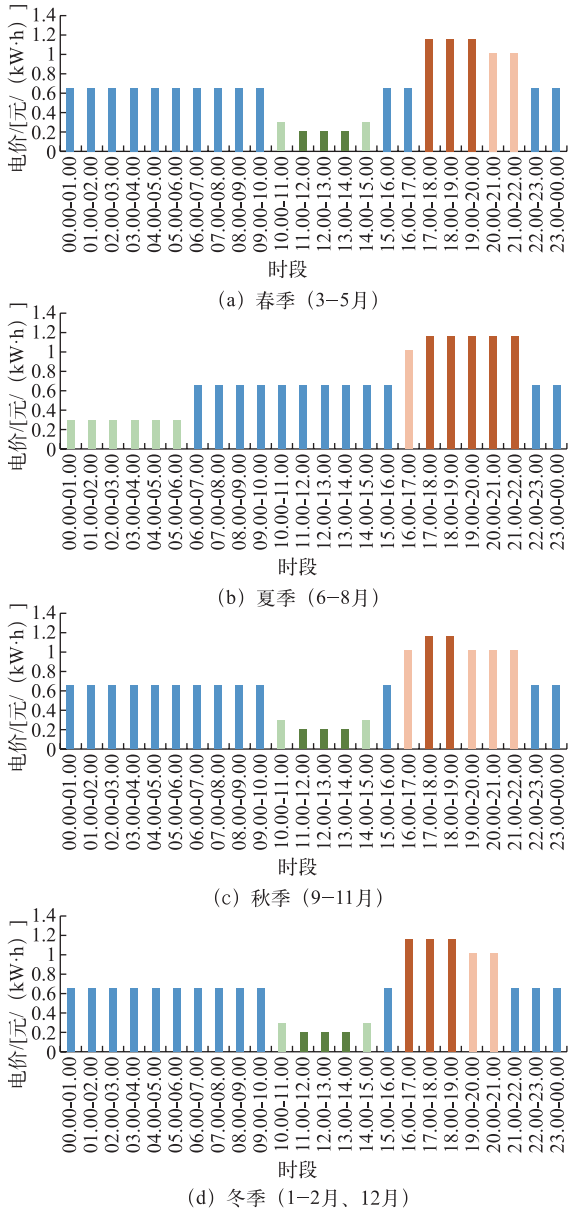
Fig. 10 The energy storage meets the output power curve of the working loading of the hoist

储能变流器具有四象限运行功能，可同时输出或吸收无功及有功功率，具有调频、调压功能。基于储能的无功补偿技术具有响应速度快、连续可调和规模可控等优点[19]，保证了煤矿园区负荷用电电压水平，改善了电能质量。

4.2　负荷移峰填谷应用

煤矿用应急电源储能系统在电网停电事故发生时，提供足够的备用容量供矿下人员安全撤离地面，结合该典型示范煤矿副井提升机工作效率及井下常规作业人员安排，以及矿区三类负荷用电需求，日常应急用电池储能系统可预留500 kW·h容量参与煤矿负荷移峰填谷应用。

国网山东省电力公司发布《2024年工商业分时电价公告》中，分时电价峰谷系数取值分别为：高峰系数1.7；尖峰系数2.0；深谷系数0.1；低谷系数0.3；平段系数1。结合国网山东省电力公司代理购电工商业用户电价表，项目试点所处地区采用两部制35 kV电价，2024年季节及峰谷时段划分如图11所示。



（a）春季（3—5月）

（b）夏季（6—8月）

（c）秋季（9—11月）

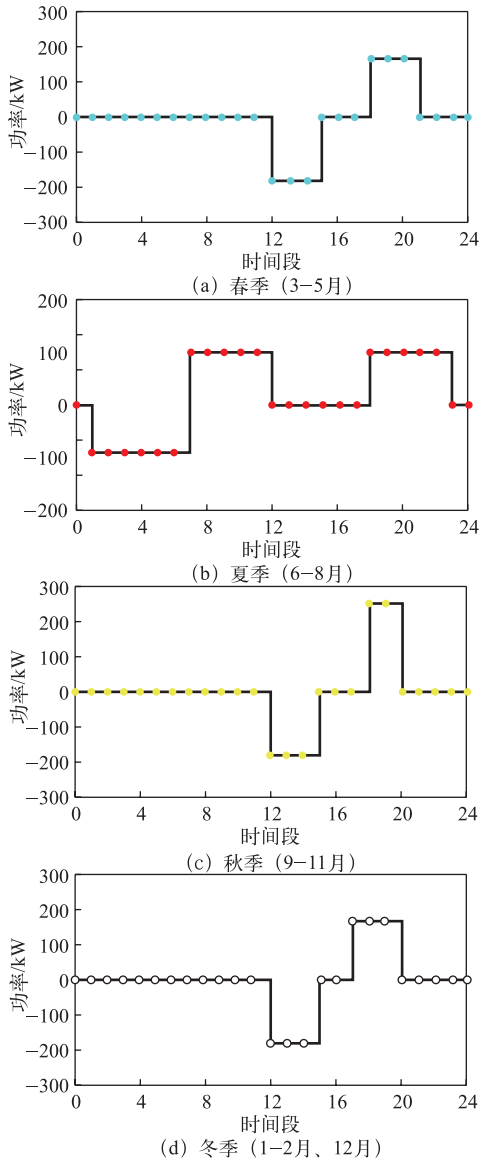
（d）冬季（1—2月、12月）

图 11　分时电价曲线示意图

Fig. 11 Schematic diagram of TOU price curve

结合当地峰谷电价，采用“一充一放”的充放电策略，进行备用电源的移峰填谷控制；在每天低谷时段充电，尖峰/高峰时段放电，储能系统充放电功率曲线如图12所示。

考虑锂离子电池储能系统充放电效率一致，综合92.26%充电效率。考虑日负荷移峰电量，谷时段可增加购进电量约为542 kW·h，高峰/尖峰时段少购进电量为461 kW·h；结合山东分时电价，尖峰时段为1.169 668 75元/（kW·h）、低谷时段为0.209 768 75元/（kW·h），单次满充满放可节约购电成本约540元。



（a）春季（3—5月）

（b）夏季（6—8月）

（c）秋季（9—11月）

（d）冬季（1—2月、12月）

图 12　电池储能系统充放电功率曲线示意图

Fig. 12 Schematic diagram of charging and discharging power curve of battery energy storage system

5　结束语

1）本工作研究的磷酸铁锂电池储能系统采用可移动集装箱式布局，在某煤矿中作为应急电源得到应用，项目成果的实施对于探索兆瓦级储能系统作为应急电源系统在煤矿企业中的应用推广，具有一定的前瞻性和实用价值。

2）煤矿应用环境对储能应急电源系统的安全性和可靠性有着极高的要求，因此选取高电压

等级兆瓦级PCS，在电路拓扑和软硬件设计方面进行有针对性的设计，通过完善的考虑和设计，尽量提高储能系统的安全性、可靠性、经济性和使用寿命，为今后的商业化推广奠定坚实的基础。

3）以安全生产为前提，以节约成本、降低支出为宗旨，煤矿用应急电源储能系统可实现多功能化场景应用，在具备应急电源功能，确保煤矿用电可靠性的同时，还兼顾移峰填谷，以及减少矿区用电成本、负荷跟踪和无功补偿等功能，为储能在煤矿中作为应急电源场景中的多应用需求提供技术探索。

参考文献

[1] 孟小红．矿用大容量备用电源设计[J]．矿业安全与环保，2020，47(3)：96-99．

[2] 应急管理部信息研究院．煤矿安全规程[M]．北京：应急管理出版社，2022．

[3] 牛洪海，蒋立新，严伟．矿用电源快速切换装置的研制及应用[J]．煤炭工程，2014，46(6)：128-130．

[4] 靳文涛，李煜阳，贾学翠，等．储能电站电池一致性综合评估方法研究[J]．电器与能效管理技术，2022(5)：23-28．

[5] 靳文涛，牛萌，吕洪章，等．客户侧分布式储能汇聚潜力评估方法[J]．电力建设，2019，40(4)：34-41．

[6] 李相俊，马锐，王上行，等．考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]．高电压技术，2020，46(1)：62-70．

[7] 范忠明．煤矿应急负荷储能系统配置及其经济性研究[J]．煤炭工程，2017，49(S2)：175-177，181．

[8] 吴峥，周友，牛建娜．储能系统在煤矿智能应急电源中的应用[J]．储能科学与技术，2015，4(1)：104-109．

[9] 李建林，黄健，许德智．移动式储能应急电源关键技术研究[J]．浙江电力，2020，39(5)：10-14．

[10] 田建霞．矿山电力负荷分类及供电要求探析[J]．山东煤炭科技，2009(1)：115-116．

[11] 黄荣，郭家虎．煤矿微电网综合能量调度策略的优化[J]．煤矿机械，2023，44 (8)：128-131．

[12] 王亚峰．滕东煤矿：单班入井百人矿井这样炼成[J]．山东国资，2019(11)：40-43．

[13] 熊文静，朱欣，林建亨，等．基于代数调制的中点箝位型三电平变换器共模电压抑制策略[J/OL]．电源学报，1-16[2024-03-01]．http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240229.0832.002.html．

[14] 于瑞龙，王刚，徐园．基于DSP的三电平APF研究[J]．电气应用，2019，38(3)：21-25．

[15] 周冠卿．三电平逆变器虚拟空间矢量调制及中点电位控制技术研究[D]．合肥：合肥工业大学，2022．

[16] 林汉平，林汉德．在线供电模式的储能系统变流器原理及拓扑研究[J]．电气开关，2020，58(4)：22-24，29．

[17] 张耀文，张政权，刘庆想，等．新型双向储能变流器分析与研究[J]．太阳能学报，2022，43 (4)：82-89．

[18] 赵波，张雪松，李鹏，等．储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计和应用[J]．电力系统自动化，2013，37(1)：161-167．

[19] 李国松，黄云辉，祝诗凯，等．储能电站与清洁能源场站无功电压分层协调控制研究[J]．电工技术，2023(22)：79-81，153．

[20] 叶晖，李爱魁，张忠．基于储能的无功补偿技术综述[J]．储能科学与技术，2021，10(6)：2209-2217．

作者简介

靳文涛（1987—），男，硕士，高级工程师。主要研究方向为大规模储能系统集成及控制技术。

（收稿日期：2024-02-23）