

# 基于分舱式储能系统的集成热管理系统控制方法及策略研究

沈洋 郭傅傲 王强

(上海勘测设计研究院有限公司 上海市 200335)

**摘要:** 在分舱式储能系统中,每个储能舱室都有其特定的热能需求。通过控制热交换装置,可以根据不同舱室的需求来调节热能的分配。当某些舱室需要热能时,热交换装置将从其他舱室中转移热能过来,以满足这些舱室的需求。相反,当某些舱室有多余的热能时,可以将其转移到其他舱室中进行储存。为此本论文针对分舱式储能系统的集成热管理系统进行了控制方法及策略的研究。首先,通过对分舱式储能系统的热特性进行分析,建立该系统数学模型。并以某国内大型储能电站为例对兆瓦级热管理设计方案做了讨论,以期对热管理设计有一定帮助。

**关键词:** 分舱式储能系统;集成热管理;系统控制方法

Research on the control method and strategy of integrated thermal management system based on separate compartment energy storage system

Shen Yang, Guo Fuao, Wang Qiang

Shanghai Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200335

**Abstract:** In the separate cabin energy storage system, each energy storage cabin has its own specific thermal energy needs. By controlling the heat exchange device, the heat energy distribution can be adjusted according to the needs of different compartments. When some chambers require heat energy, the heat exchange device will transfer heat energy from other chambers to meet the needs of these compartments. Conversely, when some compartments have excess heat energy, they can be transferred to other compartments for storage. In this paper, the control method and strategy of the integrated thermal management system of separate cabin energy storage system are studied. Firstly, the mathematical model of the system is established by analyzing the thermal characteristics of the separate cabin energy storage system. Taking a large domestic energy storage power station as an example, the megawatt thermal management design scheme is discussed, in order to be helpful to the thermal management design.

**Key words:** separate energy storage system; integrated thermal management; system control method

## 一、引言:

当前,为了满足全球经济和社会发展对电网的需求,应对全球气候变暖带来的电网危机和严峻挑战,世界各国正在积极探索和实践智能电网技术。当前我国正积极开展智能电网的建设。将储能技术运用到电网当中,不但可以实现用户需求侧管理、消除昼夜峰谷差、平滑负荷、降低供电成本、促进可再生能源利用、增强电网系统运行稳定性、改善电网电能质量、确保供电可靠等多种功能,而且对于构建坚强智能电网具有至关重要的意义。集装箱式电池储能系统因其具有显著的优点,是当前主流储能方式。在标准集装箱内集成锂离子电池管理系统,交直流转换装置,热管理系统及消防系统的集装箱式电池储能系统由于它以其高度集成化,占地小,容量大,便于运输和安装等特点,成为了当前使用最为普遍的储能技术。集装箱式储能系统中因电池密集排列且集装箱内部环境较为封闭,电池散发的热量极易集聚,造成温度上升过高,进而对电池使用寿命及性能造成不利影响。

## 二、相关工作综述

### (一)分舱式储能系统的概述

分舱式储能系统是一种将储能设备分散放置在不同舱室中的系统。与传统的集中式储能系统相比,分舱式储能系统具有更高的灵活性和可靠性,同时减少了储能设备之间的相互干扰。

分舱式储能系统的基本原理是将储能设备分散放置在不同的舱室中,每个舱室都有独立的控制系统和能量管理系统。这样一来,当某个舱室的储能设备出现故障时,其他舱室的储能设备仍然可以正常工作,不会影响整个系统的运行。同时,分舱式储能系统还可以根据实际需求,灵活地增加或减少舱室的数量,以适应不同的应用场景<sup>[1]</sup>。

分舱式储能系统的结构主要包括储能设备、舱室、控制系统和能量管理系统。储能设备可以是锂离子电池、超级电容器、燃料电池等,根据不同的应用需求选择合适的储能设备。舱室是储能设备的容器,可以根据实际情况设计不同大小的舱室。控制系统负责监控和控制各个舱室的储能设备,确保系统的正常运行。能量管理系统则负责对储能设备的充放电过程进行管理,以提高系统的能量利用效率。

### (二)集成热管理系统的研究现状

在集成热管理系统中,热传导材料的选择是至关重要的。热传导材料的性能直接影响着热能的传输效率和系统的热管理能力。目前常用的热传导材料有金属、陶瓷及高分子材料,等等。金属导热性能好,但重量较大,不适合在轻量化的储能设备中使用。陶瓷材料具有较高的导热性能和较低的密度,但在实际应用中易受到热应力的影响,容易发生破裂。高分子材料具有较低的导热性能,但重量轻、成本低,适合在轻量化储能设备中使用。因此,在选择热传导材料时需要权衡各种因素,找到最适合的材料<sup>[2]</sup>。

另外,热界面材料的设计也是集成热管理系统中的关键问题。热界面材料用于提高储能设备与热管理设备之间的热传导效率。常用的热界面材料有导热膏、导热垫片和导热胶带等。导热膏具有良好的导热性能和填充性能,能够填充储能设备和热管理设备之间的微小间隙,提高热传导效率。导热垫片和导热胶带则可以在热界面处形成良好的热接触,提高热传导效率。因此,在设计热界面材料时需要考虑材料的导热性能、填充性能和耐高温性能等因素。

### (三)控制方法和策略的研究进展

控制方法和策略是指用于管理和控制储能系统运行的算法和策略。这些方法和策略可以根据系统的需求和运行状态来调节储能设备的充放电行为,以实现系统的优化性能。目前,控制方法和策略的研究进展主要包括基于模型的控制、优化控制和智能控制等方面。上述研究成果可望促进储能系统能量利用效率、延长装置使用寿命、提高系统可靠性。

## 三、集装箱式电池储能系统

集装箱式电池储能系统主要由标准集装箱,锂离子电池系统、电池管理系统、储能变流器、空调及风道、配电柜和七氟丙烷灭火装置<sup>[3]</sup>。该技术通过模块化设计,使储能设备与外部能源互连形成一个整体,另外,还可以实现能量回收再利用以最大限度地利用资源。江苏所生产的铝壳磷酸铁锂电池,其电池单体为方形结构,其电压为每 86Ah3.2V;该电池模组采用 2P24S 串联并联的结构,由 48 个独立的电池单体组成;每个电池模组均与一个超级电容连接,超级电容通过充电电路分别与电池组中其他各电池单体连接,并采用直流母线供电。电池系统采用六个电池簇并联结构,每个电池簇由十个电池模组组成。额定电压、容量分

别为 768V、1.2MWh。

(一) 集装箱冷负荷的计算

机舱内冷负荷主要来源于电池发热引起的冷负荷, 还受舱内外温差及太阳辐射的作用, 从而引起穿过集装箱壁的热进入机舱。本论文对这些冷负荷进行了分析, 并设计了一种以磷酸铁锂电池为核心的能量回收和储能系统。进行储能系统 1C 充放电实验, 选用了磷酸铁锂电池单体作为实验材料, 评价电池单体充放电能效  $\eta$  值。根据试验结果, 对电池散热过程中电池内部温度的变化规律进行了分析。其中由蓄电池在储能系统中产生的热量, 造成的冷负荷  $Q_1$  如式 (1) 所示:

$$Q_1 = \frac{\eta P(1-\eta)}{t_1} \quad (1)$$

在式 (1) 中:

$\eta$  —— 电池单体数量;

$P$  —— 电池单体额定能量 (单位: Wh);

$t_1$  —— 充放电时间 (单位: h)。

通过运用传热方程如式 (2) 所示, 可以计算出集装箱所承受的传热冷负荷  $Q_2$ :

$$Q_2 = AS\Delta R_1 \quad (2)$$

在式 (2) 中:

$A$  —— 为传热系数 ( $W/(m^2 \cdot K)$ );

$S$  —— 换热面积 (单位:  $m^2$ );

$\Delta R_1$  —— 内外温差。

在集装箱热量传递过程中, 舱体内外以及舱体之间均经历了对流传热过程, 而舱体壁面之间则经历了导热传热过程, 因此传热系数  $A$  的公式呈现如式 (3) 所示:

$$A = 1 / \left[ \frac{1}{L_w} + \left( \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{L_n} \right] \quad (3)$$

在式 (3) 中:

$L_w$  —— 外壁传热系数 ( $W/(m^2 \cdot K)$ );

$L_n$  —— 内壁传热系数 ( $W/(m^2 \cdot K)$ );

$\lambda_i$  —— 壁面各层导热率 ( $W/(m \cdot K)$ );

$\delta_i$  —— 壁面各层厚度 (单位: m)。

储能能量的系统所承受的总低温负荷  $Q_3$  如式 (4) 所示:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (4)$$

(二) 空凋制冷量的设计

部分热量从电池中释放通过传送到机舱内部集装箱壁上, 部分热量转换到设备内部主要来源于电池温度, 部分热量通过空调电池的散热设计带到集装箱外, 这部分热量就是空凋要求的最低制冷量。电池在

1C 充放电状态下释放能量, 电池所吸收的热量  $N_1$  如式 (5) 所示:

$$N_1 = DF\Delta R_2 \quad (5)$$

在式 (5) 中:

$D$  —— 电池比热容 (单位:  $J/(kg \cdot K)$ );

$F$  —— 储能系统内电池质量 (单位: kg);

$\Delta R_2$  —— 电池平均温升。

那么空凋的最小制冷功率  $Q_4$  可以有式 (6) 来表示:

$$Q_4 = k \left( Q_3 - \frac{N_1}{t_2} \right) \quad (6)$$

在式 (6) 中:

$k$  —— 为安全系数 (取值范围 1.2~1.5);  $t_2$  —— 充放电时间 (单位: s)。

(三) 电池模组风扇设计

在电池温度达到规定值之前, 储能系统会先启动风扇以提供必要的辅助降温措施, 以确保电池模块的正常运行。假设此时风扇风量为  $X_f$ 。则  $X_f$  如 (7) 式:

$$X_f = \mu \frac{0.05Q_4}{\Delta R_3} \quad (7)$$

在式 (7) 中:

$\mu$  —— 电池模组中气流阻力引入的增量系数 (取值 1.1~1.2);

$Q_4$  —— 电池模块发热功率 (单位: W);

$\Delta R_3$  —— 进风口温差。

通过准确分析电池模块散热风量要求, 可准确确定风扇类型及规格, 从而实现最佳的散热效果。

四、热管理系统控制策略

文章重点研究冬季极端天气条件下集装箱温度场的分布规律, 并提出储能系统集装箱保温方案保温效果较好, 能满足集装箱内部湿度需求。空凋的控制按照集装箱内部的不同温度条件可以将其划分为制热模式与制冷模式, 前者旨在在较低温度下控制和保护电池, 后者则旨在在较高温度下有效地控制电池的升温。对集装箱内温度变化时空凋运行状态与制冷系统运行状态之间的关系进行分析发现。气温在 12℃ 以下就会启动集装箱内部空凋制热功能; 一旦集装箱内的温度超过 28℃, 空凋制冷功能即刻启动。电池模块风扇的运行状态可以被电池管理系统独立控制, 以确保其正常运转。通过对风扇电机转速及功率的调节, 实现了对整个电池组各单体电池之间温差的调节当电池模块的温度超过 33℃ 时, 电池管理系统将启动风扇的工作机制, 直至其温度差降至 2℃ 以下, 从而停止运行。经试验证明, 温控策略能保持储能系统内蓄电池组运行温度较为平稳。该方案可根据不同的运行条件采用个性化的热管理控制, 通过在满足热管理性能指标前提下提升热管理系统温度控制能力来有效降低储能系统能耗。

五、实验验证

本文提出一种以集装箱内部环境及温度控制为核心的空凋控制策略。在典型工况 (1C) 下, 储能系统运行, 并通过对其生热率 38KW 的计算来评估其性能, 储能系统要求空凋制冷功率最小为 25KW。同时, 分析得出电池温度和冷却风流量, 送风风速及电机转速有一定的联系。因此选择一体式的工业空凋, 制冷量为, 风量为 2900 $m^3/h$ 。基于计算结果, 对电池模块冷却方式的选取进行了研究和分析, 为了更好地满足该储能装置的散热需求建议采用水冷方案。

集装箱式储能系统集成后, 对每个电池模组进行了电池温度变化的采集和记录, 并对 35℃ 环境温度, 0.5C 及 1C 环境温度充电测试。得到了如图 1, 图 2 中的计算结果。

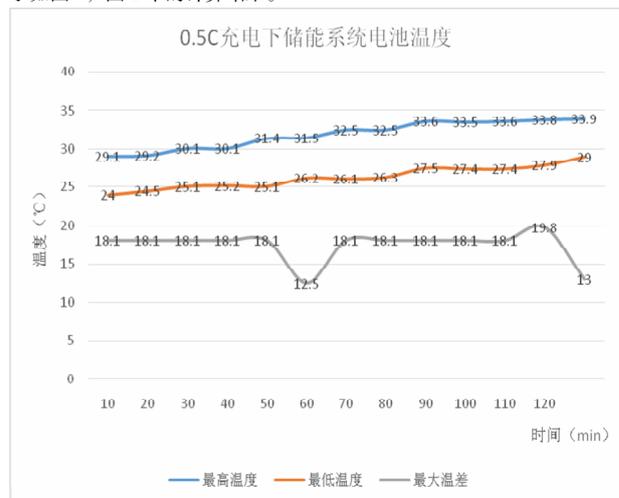


图 1 电池在 0.5C 充电状态下的温度曲线

(下转第 33 页)

(上接第 25 页)

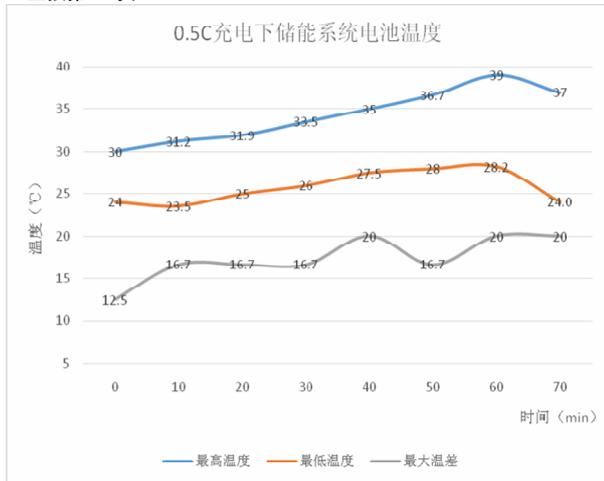


图 2 电池在 1C 充电状态下的温度曲线

由图 1 图 2 可知：在进行 0.5C 充电时，低倍率工作下，储能系统能够维持电池在最优温度区间内，由于系统设定电池温度上限 34° C，

储能系统最大温差控制在 5° C。储能系统在充电运行过程中，1c 内电池的最高温度不得高于 40℃；而储能系统在温度为 8℃时显示出很好的热管理能力。

**结论：**

综上所述，本文针对集装箱式储能系统提出一种新型热管理策略，即通过调节通风散热风扇转速、风机功率等参数来控制舱内温度场分布以及改善电池组性能。此外，以上热管理系统结构设计，保证空调出风主要向封闭空间内的电池模块方向流动，从而最大限度地减少了风量损失，并实现了完全流经电池表面的热交换，从而提高了换热效率。

**参考文献：**

- [1]刘怀照,张照雪,王文博,邹乃佳,张跃伟,李同超,王一鸣.风电场配置电化学储能系统设计[J].船电技术,2023,43(5):39-43.
- [2]李明飞,饶睦敏,孙婉妹,崔树鑫,陈伟.基于多孔介质模化的大容量电池储能热管理系统性能分析方法[J].储能科学与技术,2022,11(8):2526-2536.
- [3]晏阳,王梦蔚,姜华,闫安心.电动公交充电站预制舱式储能系统设计方案研究[J].电工技术,2018(7):105-107.