

储能系统多维热场监控的柔性热电阵列设计与动态重构算法

陈 磊

浙江艾罗网络能源技术股份有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要：本研究聚焦储能系统多维热场监控，针对其热管理难题，开展柔性热电阵列设计与动态重构算法研究。开篇点明储能系统热管理对性能、寿命及安全的关键意义，阐述引入柔性热电阵列技术的独特价值。深入剖析储能系统热场特性，涵盖热源、热传递机制、时空变化规律及对系统性能的影响。据此开展柔性热电阵列设计，包括材料选择、结构设计及与储能系统的适配设计。同时，构建动态重构算法理论基础，明确算法目标与需求，建立数学模型并融合相关算法技术。通过数值模拟与实验平台测试对二者协同验证，优化设计与算法。研究成果有望显著提升储能系统多维热场监控水平，为储能系统高效稳定运行提供有力支撑。

关键词：储能系统；多维热场监控；柔性热电阵列；动态重构算法；热管理

1 引言

在全球能源转型的大背景下，储能系统作为平衡能源供需、提升能源利用效率的关键环节，其重要性日益凸显。然而，储能系统在运行过程中会产生大量热量，若热管理不善，将导致电池性能衰减、寿命缩短，甚至引发安全隐患。传统热管理技术在应对储能系统复杂多变的多维热场时，暴露出诸多局限性，难以实现精准、高效的热监控与调控。柔性热电阵列技术的兴起，为解决这一难题带来新契机。它凭借可灵活贴合复杂表面、对热场变化响应迅速等优势，有望实现对储能系统热场的全方位、高精度感知。在此基础上，开发与之适配的动态重构算法，能够依据实时热场变化智能调整监控策略。本研究旨在深入探究二者融合应用，为储能系统热管理开辟新路径，推动储能技术迈向新高度。

2 储能系统热场特性分析

2.1 储能系统热源与热传递机制

储能系统热源多元复杂。电池作为核心部件，充放电期间，电化学反应伴生焦耳热，以锂电池为例，其内阻致电流通过时发热，充放电倍率越高，产热越剧烈。功率变换器在电能转换进程中，因功率器件的导通电阻与开关损耗，亦为重要热源。这些热源共同塑造储能系统热环境。

热传递以传导、对流、辐射三种方式进行。热传导于电池模组内部，借由电池材料、连接件传输热量，如电池极柱与电极片间的热传导影响局部温度。风冷系统靠空气流动，液冷系统借冷却液循环，实现热对流散热。热辐射虽占比小，但高温部件向周围环境的辐射散

热，在特定情形下不可忽视，多种方式交织成复杂热传递体系。

2.2 热场分布的时空变化规律

空间层面，储能系统热场分布不均。电池模组因结构与工作状态差异，边缘电池散热佳、温度低，中心部位散热难、温度高。功率变换器等热源周边温度高，远热源处温度渐低，这种空间温差影响电池性能一致性，进而波及储能系统整体表现^[1]。

时间维度上，热场随运行工况动态演变。快速充电时，电池产热剧增，热场温度飙升；放电时，温度变化相对缓和。环境温度的昼夜、季节交替，也作用于热场。长期运行致使系统积热，温度持续攀升。掌握热场时空变化规律，是实施精准热管理、保障储能系统稳定运行的关键。

2.3 热场特性对储能系统性能的影响

热场特性极大影响储能系统充放电效率。温度过高，电池内化学反应加速，副反应增多，极化加剧、内阻增大，充放电效率降低，如高温下锂离子电池充电接受能力变差、放电容量减小。温度过低，电解液黏度增加，离子扩散受阻，同样拉低效率。

同时，热场特性关乎储能系统容量衰减与安全性。长期高温，电池材料老化、分解，加速容量衰减、缩短寿命。不均匀热场分布，使电池模组内各电池性能分化，易引发热失控，严重威胁储能系统安全，凸显热场调控对保障系统性能与安全的重要性。

3 柔性热电阵列设计基础

3.1 热电材料选择与性能优化

热电材料是柔性热电阵列的核心。在选择材料时,需着重考量其热电性能参数,如塞贝克系数、电导率与热导率。具备高塞贝克系数的材料,能在较小温差下产生较大热电势,利于将热能高效转化为电能,为热场监控提供能量。像碲化铋(Bi_2Te_3)基材料,在室温附近有着优异的热电性能,是常用的热电材料之一。为进一步优化性能,可通过材料改性手段,如在 Bi_2Te_3 中掺杂特定元素,调整其晶体结构,改变载流子浓度与迁移率,提升电导率的同时降低热导率,从而提高材料的热电优值,增强柔性热电阵列的整体效能,使其在热场监控中更精准地感知温度变化并输出有效信号^[2]。

3.2 柔性热电阵列结构设计原则

柔性热电阵列的结构设计需兼顾多方面需求。首先是热电单元的排列方式,常见的有串联与并联。串联排列可提高输出电压,适用于需要较高电压驱动监控设备的场景;并联则能增大输出电流,满足对功率需求较大的情况。电极设计也极为关键,要选用导电性良好且与热电材料兼容性佳的材料,以降低接触电阻,减少能量损耗。同时,为实现对多维热场的精准监控,阵列应具备一定的柔韧性及可弯折性,能够贴合储能系统复杂的表面轮廓。例如采用柔性基底材料,将热电单元有序集成于其上,形成可随储能系统外形变化而自适应的结构,确保阵列能全方位、无死角地感知热场信息,为后续的热场分析与调控提供可靠数据^[3]。

3.3 阵列与储能系统的适配性设计

将柔性热电阵列与储能系统适配时,要充分考虑储能系统的内部结构与运行特性。一方面,需依据储能系统不同部位的发热情况,合理规划阵列的布局。在电池模组等发热量大的区域,密集布置热电单元,提高热场监测精度;在发热相对较小的部位,适当减少单元数量,优化资源配置。另一方面,要确保阵列与储能系统的电气兼容性,避免因电气干扰影响储能系统正常运行。同时,考虑到储能系统运行时的振动、温度波动等因素,柔性热电阵列需具备良好的稳定性与可靠性,通过加固连接、选用耐温变材料等措施,保障阵列在复杂工况下持续稳定工作,有效实现对储能系统多维热场的精准监控。

4 动态重构算法理论基础

4.1 算法设计目标与需求分析

动态重构算法旨在让柔性热电阵列能根据储能系统实时热场变化,灵活调整自身工作模式,实现热场监控的高效与精准。首要目标是提升监控精度,确保在复杂热场环境下,能精准捕捉细微温度变化,为热管理决

策提供可靠数据。比如,当储能系统局部出现异常升温时,算法能迅速定位并准确反馈温度信息。同时,要提高系统响应速度,热场变化瞬间,算法即刻驱动热电阵列做出调整,减少热场失控风险。此外,还需兼顾节能需求,避免热电阵列过度耗能。从需求层面看,算法需适应不同储能系统的热场特性,无论是电池储能还是超级电容储能,都能稳定运行。并且要具备良好扩展性,随着储能系统规模扩大或功能升级,算法可轻松适配新的热场监控需求。

4.2 算法所基于的数学模型

算法构建依托一系列数学模型来描述柔性热电阵列与储能系统热场的相互作用。热传导方程是关键模型之一,它依据傅里叶定律,刻画储能系统内热量在空间和时间上的传导过程,帮助算法理解热场分布随时间的演变规律。热电效应方程则阐述了热电材料在温度梯度下产生热电势的关系,为算法利用热电阵列感知热场变化提供理论依据。此外,还涉及描述储能系统内部结构与材料属性的物理模型,用于确定热传递边界条件。通过将这些数学模型有机整合,算法能够模拟不同工况下热场的动态变化,预测热电阵列在各种热场环境中的响应,进而优化自身运行策略,实现对储能系统热场的精准动态监控与重构。

4.3 相关算法技术借鉴与融合

为提升动态重构算法性能,可借鉴多种相关算法技术。智能控制算法中的神经网络算法极具价值,它通过对大量热场数据的学习,挖掘热场变化的潜在规律,实现对热电阵列的智能调控。例如,利用神经网络训练热场历史数据,让算法能自动识别热场异常模式,并快速调整热电阵列工作状态。优化算法如遗传算法也可融入其中,通过模拟自然选择和遗传机制,在众多可能的热电阵列重构方案中,搜索出最优解,以最小能耗达成最佳热场监控效果^[4]。此外,模糊控制算法可处理热场监控中的模糊信息,增强算法对复杂、不确定热场环境的适应性,多种算法技术相互融合,协同提升动态重构算法的效能,为储能系统热场监控提供有力支持。

5 柔性热电阵列与动态重构算法协同验证

5.1 数值模拟验证方案设计

为全面验证柔性热电阵列与动态重构算法的协同效果,精心设计数值模拟方案。首先,利用专业多物理场仿真软件,构建精确的储能系统模型,涵盖其内部复杂结构、热源分布及热传递特性。将设计好的柔性热电阵列模型精准嵌入储能系统模型中,确保二者物理连接与实际情况相符。设定多种典型热场工况,包括正常充放

电时的均匀热场、局部故障引发的异常热场等。在模拟过程中,动态重构算法依据设定的热场变化实时调整柔性热电阵列的工作参数,如热电单元的连接方式、数据采集频率等。通过软件内置的监测模块,详细记录不同时刻储能系统各部位的温度分布、热电阵列的输出电信号以及算法的重构策略执行情况。对模拟结果进行多维度分析,对比不同工况下理论预期与实际模拟数据,评估柔性热电阵列对热场的感知精度以及动态重构算法的响应速度与调控效果,为后续优化提供数据支撑。

5.2 实验平台搭建与测试

搭建专门的实验平台用于实际验证。实验平台核心由真实储能系统、定制柔性热电阵列、数据采集与处理系统以及算法控制单元组成。储能系统选用常见的锂电池模组,模拟实际应用场景中的充放电过程。柔性热电阵列按照设计方案制作,紧密贴合在储能系统表面关键发热部位。数据采集与处理系统配备高精度温度传感器和数据采集卡,实时采集储能系统热场温度数据以及热电阵列输出的电信号数据,并传输至算法控制单元。动态重构算法在控制单元中运行,根据采集的数据实时调整柔性热电阵列工作状态。实验过程中,依次模拟储能系统的不同运行工况,如不同充放电倍率、环境温度变化等。记录实验数据,包括热场温度变化曲线、热电阵列响应时间、算法重构决策时间等。将实验测试结果与数值模拟结果相互印证,进一步检验柔性热电阵列与动态重构算法协同工作在实际场景中的可行性与有效性,同时发现实际应用中可能出现的问题。

5.3 模拟与实验结果对比分析

对数值模拟与实验测试结果展开深入对比分析。从热场温度监测精度来看,对比模拟和实验中储能系统各部位温度数据与实际理论值的偏差。若模拟结果与实验结果在偏差范围内相近,说明柔性热电阵列无论是在理论模型还是实际应用中,都能较为准确地感知热场温度。在动态重构算法的响应速度方面,对比模拟和实验中算法检测到热场变化后,调整柔性热电阵列工作状态的时间。若模拟响应时间与实验响应时间基本一致,表

明算法在虚拟环境和现实场景中的运行效率稳定。分析二者差异原因,若模拟结果与实验结果存在较大偏差,可能源于模拟模型对实际储能系统的简化、实验环境中的干扰因素或测量误差等^[5]。针对差异进行针对性优化,如完善模拟模型细节、改进实验设备与方法,进一步提升柔性热电阵列与动态重构算法的协同性能,确保其在实际储能系统热场监控中可靠运行。

6 结语

本研究围绕储能系统多维热场监控,成功完成柔性热电阵列设计与动态重构算法构建。通过对储能系统热场特性的深入剖析,明确了热管理痛点,依此打造出适配的柔性热电阵列,并利用创新性算法实现其动态重构。数值模拟与实验验证结果表明,所设计的系统能够精准感知多维热场变化,有效提升热场监控效能,为储能系统安全稳定运行提供了有力保障。展望未来,一方面可拓展研究成果在不同类型储能系统中的应用,提升普适性;另一方面,随着材料科学与信息技术的发展,持续优化热电阵列材料性能与算法智能程度,进一步挖掘提升热场监控精度与效率的潜力,为储能领域的技术革新贡献更多力量,助力能源产业高效、绿色发展。

参考文献

- [1]崔杨,于一凡,付小标,仲悟之,赵钰婷.考虑多热源协同互补的含先进绝热压缩空气储能系统容量配置方法[J].电网技术,2024,48(10):4195-4205+I0090-I0092.
- [2]潘国兵,王杰,欧阳静.基于改进MRF-KFCM有效区域分割的储能系统三维温度场重构方法[J].电工技术学报,2020,35(19):4019-4027.
- [3]陈志坤,崔津赫,王伟,陈智斌,郭云飞.一种基于柔性形变天线的极化波束在线重构技术[J].电子与信息学报,2024,46(6):2533-2541.
- [4]陆兴华,黄浩瀚,邱纪涛,孙宜帆.基于压缩感知的异构网络数据动态重构算法[J].计算机技术与发展,2021,31(3):133-137.
- [5]谭文勇,刘敏,罗永平,广颖.配电网动态重构算法及时段划分研究综述[J].电测与仪表,2020,57(11):63-67+73.