

储能系统电池寿命预测与健康管理技术

王兴兴¹ 高瑞茂¹ 李艳红¹ 李丹妮²

1. 中国华电科工集团有限公司 北京市 100070

2. 华北电力大学 北京市 100096

摘要: 电池作为储能系统的核心部件,其寿命和健康状况直接影响储能系统的性能和安全性。电池寿命预测与健康管理技术的通过有效的监测和预测方法,延长电池的使用寿命,提升其运行效率,确保储能系统的稳定性和经济性。本文介绍了储能系统电池的基本原理和构成,分析了电池寿命的主要影响因素。接着,探讨了电池寿命预测技术,包括传统模型和基于大数据与机器学习的先进方法。本文还详细阐述了电池健康管理技术,包括电池健康评估指标、实时监控技术以及电池管理系统(BMS)的功能和应用。通过这些技术的结合,能够为储能系统的长期稳定运行提供有力保障。

关键词: 储能系统; 电池寿命; 健康管理; 预测技术; 电池管理系统

引言:

随着全球能源结构的转型,清洁能源的比例不断提高,高效地储存和调度这些可再生能源成为了亟待解决的技术难题。储能系统,尤其是电池储能系统,作为能源储存和调度的关键技术,在电力、交通、通讯等领域得到了广泛应用。电池储能系统能够有效地平衡供需差异,提高电网的稳定性,推动新能源的应用进程,甚至在某些领域,如电动汽车和便携式设备中,电池更是核心动力来源。

1. 储能系统电池的基本原理与构成

1.1 储能系统的基本组成部分

储能系统通常由电池、电池管理系统(BMS)、逆变器、充放电控制器、以及监控系统等组成。电池是储能系统的核心组件,它负责存储和释放电能。电池管理系统(BMS)则主要用于监控电池的状态,保障电池在安全范围内运行,延长电池寿命并优化其性能。逆变器是将电池存储的直流电转换为交流电,使其能够与电网进行交互。充放电控制器负责电池的充放电过程,保障电池不会过充或过放,避免损坏。监控系统通过实时数据采集和分析,对储能系统的运行状态进行全面监控。

1.2 电池的工作原理

电池由正负极、电解质和隔膜构成,充放电过程中通过电解质传导离子,正负极发生氧化还原反应实现能量存储与释放。铅酸电池成本低但能量密度低、寿命短;锂离子电池具有较高能量密度和较长寿命,成为主流选择;钠硫电池

能量密度高、寿命长,但高工作温度限制了其应用。

1.3 电池在储能系统中的作用

电池在储能系统中起到至关重要的作用,它负责电能的储存,还在系统需要时将储存的电能转化为电力输出,确保能源的供应。对于电网调节,电池在负载过高时提供储备电能,在负载过低时进行充电,平衡电力供需。电池在电动汽车、可再生能源的并网应用等方面,也起到了关键作用,在风能和太阳能等间歇性能源的利用上,电池能有效缓解能源的波动性,为这些新能源的稳定供电提供支持^[1]。

2. 电池寿命的影响因素

2.1 环境因素

在高温环境下,电池内部的化学反应加速,虽然能够短期提高其性能,但长期高温使用会加剧电池的老化,导致容量衰减和内部损坏。低温则会导致电池的电化学反应减慢,降低电池的输出能力,在冬季气候条件下,电池的充放电效率明显下降。湿度过高的环境可能会导致电池外壳腐蚀,甚至引发短路,环境温度和湿度是影响电池寿命的重要因素。

2.2 使用条件

充电和放电的次数越多,电池的化学反应就会更加频繁,加速电池老化。尤其是在高放电深度(DoD)下使用时,电池的寿命会显著缩短。深度放电使电池内部的电解液和电极材料遭受更大的压力,容易导致材料的劣化或电池的不可逆损伤。此外,过度充电和过度放电也会影响电池的性能,可能导致电池容量的永久性下降。

2.3 电池的化学性质与设计

铅酸电池的化学反应较为简单，但其能量密度低、循环寿命有限，在深度放电和高负载下容易出现硫酸盐结晶，导致容量衰减。锂离子电池则因为其较高的能量密度和较长的寿命而被广泛应用，但如果使用过程中出现过充、过放或者高温等极端条件，也会加速其电池容量的下降。电池的设计、材料选择以及制造工艺都会影响其性能表现，设计不当的电池可能会导致内部故障，从而缩短使用寿命。

2.4 其他外部影响因素

电池所处的使用环境如果有强烈的震动或冲击，可能会破坏电池内部结构，导致性能衰退。电池在长期未使用或存放在不当环境下（如高温或极低温）也可能导致电池容量的不可恢复性下降。电池寿命受自身性质的影响，还与外部使用条件密切相关，因此了解这些因素能够更好地延长电池的使用周期。

3. 电池寿命预测技术

3.1 传统寿命预测方法

传统的电池寿命预测方法依赖经验模型和数学建模，基于实验数据分析电池的充放电周期、温度等因素。经验模型通过总结电池表现推导公式，数学建模则运用物理化学原理建立电池衰退模型。这些方法简单易行，但通常假设电池使用情况恒定，难以应对复杂和变化较大的应用环境，预测准确性有限。

3.2 基于数据的预测方法

随着大数据和智能算法的发展，基于数据的电池寿命预测方法逐渐成为研究热点。通过采集电池的实时数据（如电压、电流、温度等），并利用机器学习算法（如 SVM、随机森林、决策树）进行建模，能够更准确地预测电池的健康状况和剩余寿命。这些方法能够适应复杂的使用环境，提供较高的预测准确性。

3.3 寿命预测模型的优化与改进

深度学习模型，尤其是卷积神经网络（CNN）和长短时记忆网络（LSTM），在处理复杂、非线性问题方面表现出色，能够从大量的电池历史数据中提取更深层次的特征，提升预测的准确性和鲁棒性。神经网络通过模拟人脑的神经元结构，能自适应地调整网络参数，进行更加精确的预测。在处理时序数据时，LSTM 网络能够捕捉到电池在不同时段的状态变化，基于这一动态特性进行更精准的寿命预测。

3.4 寿命预测技术的优缺点分析

基于数据的预测方法具有更高的精度和适应性，但需要大量高质量的训练数据，并且数据采集与处理成本高。深度学习模型虽强大，但其黑箱特性和长时间训练及高计算资源消耗限制了其应用。与传统的经验模型相比，基于数据的方法更适用于复杂环境和大规模应用。未来，电池寿命预测技术可能会结合传统与先进方法，形成更高效、完善的预测体系。

4. 电池健康管理技术

4.1 健康管理的概念与目标

电池健康管理技术（Battery Health Management, BHM）通过对电池的实时监控与分析，评估电池的健康状况，采取相应的管理策略，延长电池的使用寿命，保障其稳定运行。电池健康管理的核心目标是通过监控电池的各项参数，及时发现潜在的性能衰退或故障，在此基础上制定优化措施，如优化充放电策略、调整工作环境等，以最大化电池的效率和安全性。电池健康管理还需在提升电池可靠性的同时，降低系统维护成本和能量损耗^[2]。

4.2 电池健康评估方法

SOC 是指电池当前的充电状态，反映了电池当前的电量水平，通常以百分比表示。SOH 则表示电池的整体健康状况，衡量电池的性能是否符合出厂标准，并体现了电池的老化程度。SOH 的衰减通常与电池的容量下降、内阻增加等因素密切相关，是评估电池寿命的重要指标。SOD 用于表示电池在放电过程中，电池性能的变化和衰减状况。

除了这些传统的指标，随着监测技术的进步，还引入了多种高精度的健康评估方法，如基于电池内部阻抗的评估、温度变化监测等。这些方法能够更细致地捕捉电池内部的健康变化，为电池的长期健康管理提供更加准确的数据支持。

4.3 实时监控与数据采集技术

电池管理系统通过实时监控电压、电流、温度、充放电速率等数据，帮助评估电池的工作状态和健康状况。这些数据通过传感器、数据采集模块和通信技术实时传输至中央监控平台或云端进行分析与存储。随着物联网（IoT）技术的发展，电池健康管理不再局限于本地采集，而是通过无线网络进行远程监控。远程访问和实时更新使电池健康状况及时评估，管理人员随时调整充放电策略、优化使用方案，延长电池寿命并减少事故风险^[3]。

4.4 基于健康评估的优化管理策略

电池管理系统制定一系列优化管理策略,以确保电池在不同工作条件下能够高效且安全地运行。例如,在电池 SOH 下降至某一临界值时,管理系统自动调整充放电深度,减少电池的过度使用,延缓其衰老进程;在极端温度环境下,系统调节工作温度范围或启用热管理机制,保证电池在适宜的温度范围内运行。基于电池健康评估的管理策略还包括负载均衡、功率优化、充电速率调节等,从而在确保电池健康的前提下,最大化电池的工作效率。

4.5 电池管理系统(BMS)的作用与功能

BMS 的主要功能包括充放电管理、温度控制、电池状态监测、故障诊断和寿命预测。通过实时监控电池的电压、电流和温度,BMS 确保电池在安全范围内运行,并在异常时发出警报。它还负责电池的均衡管理,调节电池单元的电压和电量,避免容量不均或衰退,延长电池组寿命。BMS 的精确控制保障电池系统在不同条件下维持最佳状态,确保储能系统的长期稳定运行。

结论

电池寿命预测与健康管理技术在储能系统中发挥着至关重要的作用,能够有效提升电池性能并延长其使用寿命。通过结合传统的经验模型与先进的数据驱动方法,如机器学习

和深度学习,电池健康评估与管理变得更加精准和高效。

参考文献:

- [1] 付祥雪,刘心毅,王语谦,等.铅炭电池储能技术及其在电力系统的应用[J].蓄电池,2024,61(06):261-265+272.
- [2] 范鹏程,张一凡,殷文倩,等.考虑储能寿命损耗的楼宇风光储系统储能容量优化[J].综合智慧能源,2024,46(11):65-72.
- [3] 刘小铤,蒋力波,高烁,等.基于主动均衡技术的可重构储能系统 SOC 均衡策略[J/OL].电气工程学报,1-10[2025-02-12].

作者简介:

第一作者:王兴兴(1993.02.12-),女,汉,河北石家庄,硕士研究生,工程师,研究方向:储能/电气。

第二作者:高瑞茂(1995.03.04-),男,汉,安徽蚌埠,硕士研究生,助理工程师,研究方向:储能。

第三作者:李艳红(1979.12.05-),女,汉,浙江舟山,博士,正高级工程师,研究方向:储能。

第四作者:李丹妮(2001.11.11-),女,汉,吉林长春,硕士研究生(在读),学生,研究方向:清洁能源技术。

基金项目:华电集团揭榜挂帅《10MW 级可再生能源储能系统设计与关键技术研发》项目(CHDKJ21-01-102)