

光伏发电系统中储能技术的控制

化希波

张掖市绿动建业光伏电站 甘肃 兰州 730000

摘要：光伏发电系统因受光照和温度影响，存在间歇波动性和随机性。储能技术作为重要支撑，通过平滑电力输出、解决不稳定性问题，确保电力系统稳定。本文探讨储能技术在光伏发电系统中的应用及控制策略，包括储能电池种类选择、充放电管理、智能监控与安全控制等，旨在提高能源利用效率，增强电网稳定性，为光伏发电系统的可持续发展奠定基础。

关键词：光伏发电系统；储能技术；控制

引言：随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻，光伏发电作为一种清洁、可再生的能源形式，正得到广泛的关注和应用。然而，光伏发电系统受天气、光照等自然条件的影响，存在电力输出不稳定的问题。因此，储能技术的引入成为解决这一问题的关键。本文旨在探讨光伏发电系统中储能技术的控制策略，以确保电力系统的稳定和安全，推动光伏发电技术的进一步发展。

1 光伏发电系统与储能技术基础

1.1 光伏发电系统原理及构成

(1) 太阳能电池板的工作原理。太阳能电池板是光伏发电系统的核心部分。它由多个太阳能电池单元串联和并联组成，每个电池单元都由两层半导体材料（通常是硅）组成，形成p-n结。当太阳光照射到太阳能电池板上时，光子会激发半导体中的电子，产生电子-空穴对。在p-n结的电场作用下，电子被推向n区，空穴被推向p区，从而在电池两端产生电动势。当外部电路接通时，电子流通过外部电路形成电流，从而将光能转化为电能。(2) 逆变器的功能与作用。逆变器是光伏发电系统中的关键设备，其功能是将太阳能电池板产生的直流电（DC）转换为交流电（AC），以供家庭、工业或电网使用。逆变器还负责监控和调整系统电压、频率和相位，以确保输出电力与电网或负载要求相匹配。此外，一些高级逆变器还具备最大功率点追踪（MPPT）功能，能够实时调整太阳能电池板的工作点，以最大化能源产出。

1.2 储能技术概述

(1) 储能技术的种类与特点。储能技术是新能源发展的重要支撑，它可以平滑电力输出，解决新能源发电的不稳定性和间歇性问题。储能技术种类繁多，主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、电化学储能等。其中，电化学储能以锂离子电池、铅酸电池、钠硫

电池等为代表，因其高效、灵活、易于规模化等优点，在光伏发电系统中应用最为广泛。(2) 储能电池在光伏发电系统中的应用。在光伏发电系统中，储能电池主要用于储存多余的电能，并在光照不足或用电需求高峰时释放电能，以确保电力系统的稳定性和可靠性。此外，储能电池还能参与电力辅助服务市场，如调峰、调频等，为电网提供额外的灵活性和稳定性支持。随着技术的不断进步和成本的降低，储能电池在光伏发电系统中的应用前景将越来越广阔。

2 磷酸铁锂电池控制技术

2.1 磷酸铁锂电池基本原理及性能特点

(1) 电池结构与工作原理。磷酸铁锂电池的结构主要由正极、负极、电解液和隔膜组成。正极材料是磷酸铁锂（ LiFePO_4 ），负极通常为石墨或其他碳材料，电解液则是溶解了锂盐的有机溶剂，隔膜则位于正负极之间，防止直接接触导致短路。在充放电过程中，磷酸铁锂电池内部的锂离子会在正负极之间迁移。充电时，外部电源提供能量，正极的锂离子获得能量后脱嵌，经电解液传输至负极并嵌入其中；放电时，负极的锂离子脱嵌，经电解液回流至正极，电子在外部电路形成电流，为设备供电^[1]。(2) 高能量密度、长循环寿命等优势。磷酸铁锂电池具有高能量密度，能够在较小的体积内储存大量电能，这对于提高设备的续航能力至关重要。同时，其化学性质稳定，循环寿命长达2000次以上，远低于传统电池的更换频率，降低了长期使用成本。此外，磷酸铁锂电池还具有安全性高、工作温度范围宽（ $-20^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ ）、环保性好等优点，广受市场青睐。

2.2 磷酸铁锂电池的充放电控制技术

(1) 充电策略：快充、均充、浮充模式。快充模式能够在短时间内为电池充入大量电能，适用于紧急情况下的快速补电；均充模式注重充电过程的平稳性，通过

精确控制充电电流和电压,使电池逐渐达到满电状态,有助于延长电池寿命;浮充模式则主要用于维持电池的电量状态,避免电池因长时间搁置而自放电导致电量耗尽。(2)放电管理:放电深度控制、保护机制。放电深度是影响磷酸铁锂电池寿命的关键因素之一。过度的放电会导致电池内部结构的破坏,加速容量衰减。因此,在放电过程中,需要严格控制放电深度,避免电池电量过低。同时,磷酸铁锂电池还需配备完善的保护机制,如过流保护、短路保护、过温保护等,确保在异常情况下电池能够迅速切断电路,防止损坏。

2.3 磷酸铁锂电池的智能监控系统

(1)电池状态的实时监测。磷酸铁锂电池的智能监控系统能够实时监测电池的电压、电流、温度等关键参数,通过采集和分析这些数据,系统可以实时评估电池的健康状况和剩余电量,为电池管理和维护提供重要依据。同时,监控系统还能记录电池的历史数据,为电池的性能分析和故障预测提供数据支持。(2)故障预警与诊断技术。智能监控系统还具备故障预警与诊断功能。当电池状态出现异常时,如电压波动、电流异常、温度过高等,系统能够及时发出预警信号,提醒管理人员进行干预。同时,系统还能通过数据分析,定位故障源头,为维修人员提供精准的故障信息,缩短维修时间,降低维修成本^[2]。

2.4 磷酸铁锂电池的安全控制

(1)过充过放保护。过充和过放是磷酸铁锂电池面临的主要安全风险。为了防止这些风险的发生,电池管理系统(BMS)需要配备过充过放保护功能。当电池电量接近满电或耗尽时,BMS会自动切断充电或放电电路,防止电池受到损害。这一功能通过精确监测电池的电压和电流,确保电池在安全范围内工作,有效延长电池使用寿命并减少安全风险。(2)热管理策略。磷酸铁锂电池在充放电过程中会产生热量,若热量无法及时散出,会导致电池温度升高,进而影响电池的性能和安全性。因此,热管理策略是磷酸铁锂电池安全控制的关键环节。热管理策略主要通过散热设计和温度监控来实现。散热设计包括在电池包内部设置散热通道,利用空气或液体对流散热,确保电池工作在适宜的温度范围内^[3]。此外,先进的散热设计还可能采用热管、相变材料等高效散热元件,进一步提高散热效率。温度监控则是在电池包的关键位置安装温度传感器,实时监测电池温度,一旦发现温度过高,立即启动散热机制,如增加风扇转速、开启冷却液循环等,以降低电池温度,防止热失控事故的发生。

3 储能与光伏 AGC 控制的配合

3.1 光伏AGC技术基础

3.1.1 功能与原理

光伏AGC系统通过实时跟踪电网调度指令,动态调整逆变器输出功率,实现电网频率稳定($50\text{Hz} \pm 0.05\text{Hz}$)和功率平衡。其核心原理包括:频率响应特性:根据电网频率偏差计算功率调节量,通过PI控制器或模糊逻辑算法生成逆变器目标值;功率预测与分配:结合光伏出力预测模型(如辐照度、温度数据),将调度计划分解至各逆变器群;安全约束:需满足逆变器最大可调范围、爬坡速率限制(如每分钟1-2%额定功率)。

3.1.2 应用挑战

光伏波动性:云层遮挡导致出力骤降(可达80%),传统火电AGC响应速度(分钟级)无法匹配;预测误差:光照预测偏差导致AGC指令与实际出力失配,需储能补偿瞬时功率缺口;谐波干扰:逆变器频繁调节可能引入25次以上谐波,需配合有源滤波器优化电能质量。

3.2 储能协同控制策略

3.2.1 功率调节作用

储能系统通过以下方式增强AGC性能:一次调频:利用下垂控制(Droop Control)在100ms内响应频率偏差,填补光伏响应延迟;二次调频:基于区域控制偏差(ACE)动态调整储能出力,平抑10分钟级功率波动;经济性补偿:在电价峰谷时段储存/释放能量,降低AGC调频成本(约0.3元/kWh)。

3.2.2 预测算法调度

双层优化模型:上层基于LSTM预测光伏出力与负荷曲线,下层通过混合整数规划优化储能充放电计划;滚动修正机制:每15分钟更新一次调度指令,应对短期预测误差。

3.2.3 动态平衡控制

虚拟同步机(VSG)技术:模拟同步发电机惯量特性,提升电网抗扰动能力;混合储能架构:超级电容(响应<1秒)与锂电池(持续调频)协同,延长电池寿命30%以上^[4]。

3.3 案例分析:磷酸铁锂电池应用

3.3.1 系统架构

某100MW光伏电站配置20MW/40MWh储能系统:

硬件层:PCS变流器(效率>98%)、电池管理系统(SOC精度 $\pm 1\%$)、AGC/AVC群控终端;通信层:5G同步相量传输(延迟<20ms),支持秒级指令分解。

3.3.2 实施效果

频率合格率:从97.2%提升至99.6%,ACE偏差降低

72%；经济收益：参与调峰辅助服务市场，年增收约1200万元。

3.3.3 问题与改进

电池衰减：频繁浅充放导致容量年衰减4%，通过引入SOC分段管理（20-80%循环）缓解；策略冲突：AGC与AVC指令叠加导致逆变器过载，开发协调控制器实现有功/无功解耦。储能与光伏AGC的协同需从硬件响应速度、算法预测精度、控制策略鲁棒性三方面优化。未来可探索氢储能能在跨日调频中的应用，进一步降低对锂电池的依赖。

4 磷酸铁锂电池控制技术的挑战与未来展望

4.1 技术挑战

（1）电池成本、性能提升需求。磷酸铁锂电池的成本主要由原材料、制造工艺及规模效应决定。尽管铁和磷资源丰富，但锂元素供应紧张且价格波动较大，这对电池成本构成了直接影响。为了降低成本，企业需要优化生产工艺、提高原材料利用率，并通过技术创新提升电池性能，如提高能量密度和循环寿命。然而，性能提升往往伴随着成本的增加，如何在保持成本竞争力的同时提升电池性能，成为企业需要解决的关键问题。（2）控制系统的复杂性与可靠性。磷酸铁锂电池控制系统需具备高度的复杂性和可靠性，以应对电池在充放电过程中的各种变化。控制系统需实时监测电池状态，如电压、电流、温度等，并根据这些数据调整充放电策略，确保电池在安全、稳定的状态下运行。然而，随着电池技术的进步和电动汽车续航里程需求的提高，控制系统的复杂性也在不断增加。如何在保证可靠性的前提下，提升控制系统的智能化和响应速度，成为另一个重要挑战。

4.2 政策与市场环境分析

（1）政府政策支持与补贴机制。政府政策对磷酸铁锂电池的发展具有重要影响。为了推动新能源汽车和储能产业的发展，各国政府纷纷出台了一系列支持政策和补贴机制。这些政策不仅降低了消费者的购车成本和使用成本，还促进了储能电站的建设和运营。然而，随着市场的逐渐成熟和技术的不断进步，政府对补贴的力度可能会逐渐减弱，企业需更加注重技术创新和成本控制，以提高市场竞争力。（2）储能技术市场的发展趋势。随着可再生能源的快速发展和电网智能化水平的提高，储能技术市场呈现出蓬勃发展的态势。磷酸铁锂电

池作为重要的储能电池类型之一，其市场需求将持续增长。特别是在电动汽车充电站、家庭储能系统以及大规模电网储能等领域，磷酸铁锂电池将发挥越来越重要的作用。未来，随着技术的进步和成本降低，磷酸铁锂电池在储能市场的份额有望进一步提升。

4.3 未来展望

（1）磷酸铁锂电池控制技术的创新方向。未来，磷酸铁锂电池控制技术的创新方向将主要集中在智能化、高精度和自适应控制等方面。通过引入先进的传感器和算法，实现对电池状态的实时监测和精确控制；同时，结合大数据和人工智能技术，对电池数据进行深度挖掘和分析，为电池管理和维护提供科学依据。此外，随着固态电池等新型电池技术的不断发展，磷酸铁锂电池控制技术也需要不断适应和创新，以满足新技术对控制精度和稳定性的要求。（2）储能与光伏AGC控制的深度融合趋势。随着可再生能源的大规模并网和电网智能化水平的提高，储能与光伏AGC控制的深度融合将成为未来发展的重要趋势。通过引入储能技术，可以有效地平抑光伏电站的出力波动，提高电网的稳定性和可靠性。同时，结合先进的控制算法和通信技术，可以实现储能电站与光伏电站之间的协同优化运行，进一步提高能源利用效率。这种深度融合趋势将为磷酸铁锂电池在储能领域的应用带来新的发展机遇。

结束语

综上所述，储能技术在光伏发电系统中的应用与控制是提升能源利用效率、增强电网稳定性的关键所在。通过精细的充放电管理、智能监控以及安全控制策略，储能技术能够有效解决光伏发电的波动性问题，为电力系统的可靠运行提供有力保障。未来，随着储能技术的不断进步和创新，其在光伏发电领域的应用前景将更加广阔，为构建清洁、高效的能源体系贡献力量。

参考文献

- [1]千冬,李瑶.储能技术在光伏并网发电系统中的应用研究[J].中国设备工程,2021(20):196-197.
- [2]郭子兴.储能技术在光伏发电系统中的应用[J].电子产品世界,2021,(11):83-85.
- [3]潘涛,黄鸿志,周冉冉.浅析储能技术在光伏发电系统中的控制策略[J].风力发电,2020,(04):38-39.
- [4]金阳.新能源电力系统中的储能技术研究[J].低碳世界,2023,(11):49-50.