

基于联邦学习的分布式储能集群 SOC 一致性控制

梁思建

广东方展电机有限公司 广东佛山

【摘要】针对分布式储能系统在电网中的广泛应用,提出了一种基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法。通过联邦学习框架,各分布式储能单元可以在不共享数据的前提下,实现高效的状态监测与协同控制。该方法通过联合训练多个储能单元的电池状态,实现 SOC 一致性的精确控制,降低了由于单个储能单元电量不均衡带来的系统损耗与性能下降。本文通过对比实验验证了该方法在电池管理系统中的有效性和鲁棒性,具有较强的可扩展性和适应性,适合未来智能电网中对分布式储能系统的控制需求。

【关键词】分布式储能; 联邦学习; SOC 一致性; 电池管理; 智能电网

【收稿日期】2025 年 7 月 17 日 **【出刊日期】**2025 年 8 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250161

SOC consistency control of distributed energy storage clusters based on federated learning

Sijian Liang

Guangdong Fangzhan Motor Co., Ltd., Foshan, Guangdong

【Abstract】 Aiming at the wide application of distributed energy storage systems in power grids, this paper proposes a SOC consistency control method based on federated learning. Through the federated learning framework, each distributed energy storage unit can achieve efficient state monitoring and collaborative control without sharing data. This method realizes precise control of SOC consistency by jointly training the battery states of multiple energy storage units, reducing system losses and performance degradation caused by unbalanced power levels of individual energy storage units. Comparative experiments in this paper verify the effectiveness and robustness of the proposed method in battery management systems. It has strong scalability and adaptability, and is suitable for the control requirements of distributed energy storage systems in future smart grids.

【Keywords】 Distributed energy storage; Federated learning; SOC consistency; Battery management; Smart grid

引言

分布式储能系统作为智能电网的重要组成部分,能够在电力需求高峰时提供必要的能源调度与稳定支持。随着储能技术的发展,如何高效管理大量分布式储能单元,并确保它们之间的协同工作,成为了当前亟待解决的问题。尤其是在多储能单元并行工作的情况下,如何确保各储能单元的电池状态(SOC)保持一致,是影响系统性能的关键因素。传统的集中式控制方法由于数据隐私问题和通信延迟,已逐渐暴露出不足。而联邦学习作为一种新型的分布式学习方法,能够有效解决这一问题。本文提出了一种基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法,旨在通过协同学习优化各储能单元的电池管理策略,从

而提升系统整体的能效与稳定性。

1 分布式储能系统中 SOC 一致性控制面临的挑战

分布式储能系统中的 SOC 一致性控制面临诸多挑战,主要源于系统的复杂性及储能单元之间的异质性。每个储能单元的电池状态(SOC)通常不同,如何实现 SOC 一致性,避免部分单元过充或电量不足,成为提升系统性能的关键。传统的集中式管理方式依赖中央控制中心,存在通信带宽、延迟和隐私问题,特别是在大规模系统中,这可能导致性能下降或协调失败。储能单元的电池类型、寿命和充放电特性各异,如何在全局范围内平衡电池负荷,防止早期衰退或失效,成为设计中的难题。外部环境(如温度、湿度等)的变化也增加了 SOC 一致性

控制的复杂性。如何设计智能控制方法以应对这些复杂因素,成为当前研究的重要课题。

在处理 SOC 一致性控制时,还需要考虑到分布式储能系统中的数据隐私问题。在传统集中式控制方式下,数据需要被频繁传输到中央控制单位进行分析和决策,这不可避免地涉及到敏感数据的交换和存储,容易引发安全隐患。随着人工智能和大数据技术的发展,如何在保证隐私安全的前提下进行数据共享和信息处理,是当前储能系统研究中的一个重要问题^[1]。为了实现高效的 SOC 一致性控制,分布式储能系统中的各个储能单元需要相互协作,但这些协作行为又往往会受到网络延迟、带宽限制等因素的影响,导致协同控制策略的执行效率降低。必须要考虑如何通过高效的算法设计,实现各储能单元间的快速信息交换与协同,确保 SOC 一致性控制的实时性和准确性。

针对这些挑战,基于联邦学习的方法逐渐引起了学术界和工业界的关注。联邦学习能够在保证数据隐私和安全性的前提下,通过分布式计算来实现各储能单元的协同控制。由于其不需要直接访问储能单元的数据,仅通过在本地训练模型并交换模型更新,联邦学习能有效避免数据泄露的问题,同时又能保持系统的协同优化效果。随着技术的不断发展,联邦学习在分布式储能系统中的应用将有助于解决现有控制策略的不足,提升 SOC 一致性控制的精度和效率。

2 基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法框架设计

基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法框架设计需要充分考虑分布式储能系统的特点和复杂性。在设计过程中,首先要明确各储能单元在联邦学习框架中的角色,每个储能单元作为一个独立的参与者,通过局部数据训练本地模型,并与其他储能单元共享模型更新,而不是直接交换原始数据。通过这种方式,可以有效解决分布式储能系统中涉及的数据隐私和安全问题,同时还能够保证系统中各个储能单元在协同控制时的数据一致性。在框架设计中,每个储能单元的电池管理系统(BMS)将充当本地的学习和决策单元,通过与中央服务器或协调中心的定期交互,更新模型参数并调整充放电策略。

在联邦学习的框架设计中,一个重要的问题是如何设计模型的聚合策略。在传统的联邦学习中,通常采用加权平均或简单平均的方式进行模型的聚

合,而在分布式储能系统中,由于储能单元之间的异质性,简单的加权平均可能无法充分体现各个储能单元的实际状态。在 SOC 一致性控制中,聚合策略需要考虑到各储能单元的电池状态、当前负载、历史性能等因素,确保聚合后的全局模型能更准确地反映系统的实际需求^[2-6]。联邦学习的效率和性能还与网络的质量密切相关。在大规模分布式储能系统中,通信延迟和带宽限制可能影响到模型更新的速度和准确性,需要设计适应性强、容错性高的联邦学习算法,以确保系统能够在各种网络环境下正常运行。

除了聚合策略外,联邦学习框架的安全性也是设计中的一个重要考虑因素。在分布式储能系统中,由于涉及多个独立的储能单元,如何防止恶意参与者通过模型更新进行攻击,确保系统的稳定性和可靠性,成为设计联邦学习框架时必须解决的问题。为了保证框架的安全性,可以引入差分隐私、加密技术等方法对模型更新进行保护,确保数据和模型的安全性。这些技术能够有效防止信息泄露和数据篡改,在保证数据隐私的确保全局模型的准确性和可靠性。

3 基于实验验证的 SOC 一致性控制性能评估

在基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法中,实验验证是评估其性能和实用性的关键步骤。通过构建一系列真实的实验场景,可以验证该方法在不同条件下的表现,并与传统的集中式控制方法进行对比分析。在实验中,首先需要模拟多个储能单元之间的协作,并对各储能单元的充放电过程进行控制,观察 SOC 一致性控制策略在实际运行中的效果。实验的核心指标包括电池的 SOC 均衡度、电池寿命、能效提升等。在这些实验中,联邦学习方法能否有效地实现 SOC 一致性,保持系统稳定性,是评估其性能的关键因素。

实验结果表明,基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法相较于传统的集中式控制方法具有明显的优势。在实验中,采用联邦学习框架后,储能单元之间的 SOC 分布更加均衡,整体系统的能效得到了显著提高。通过对比实验,还可以发现,在采用联邦学习控制的情况下,系统的响应速度和灵活性也得到了提升。由于各储能单元之间的数据并不共享,联邦学习能够避免因数据集中处理带来的延迟问题,从而实现更高效的控制^[7]。实验还验证了该方法在不同网络环境下的鲁棒性。在网络带宽不足或通信延迟较大的情

况下,联邦学习框架依然能够有效地完成 SOC 一致性控制任务,展现出了较强的适应性和稳定性。

通过一系列对比实验,联邦学习方法在分布式储能系统中的应用效果得到了充分验证。实验结果也揭示出一些潜在的问题和改进空间。比如,在一些极端情况下,储能单元之间的 SOC 差异仍然会有所增加,这表明在算法的聚合策略和更新机制上可能还需要进一步优化。系统中的存储资源和计算能力也是影响联邦学习方法性能的重要因素,在未来的研究中,需要考虑如何提升系统的计算效率,以更好地应对大规模储能系统的需求。

4 基于联邦学习的 SOC 一致性控制在智能电网中的应用展望

基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法在智能电网中的应用具有广阔的前景。随着智能电网的发展,分布式储能系统将扮演越来越重要的角色,而如何高效地管理和控制这些储能单元,将直接影响电网的稳定性和能效。在未来的智能电网中,基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法可以为系统提供更加智能和灵活的调度能力。通过该方法,储能单元不仅能够自主学习和优化充放电策略,还能在保证数据隐私的前提下,实现全网范围内的协同控制,从而提升电网的整体效能和稳定性。

未来的研究将进一步推动联邦学习技术在智能电网中的应用。可以结合大数据分析和云计算等技术,将联邦学习与其他智能电网控制方法相结合,提升储能系统的响应速度和调度能力。随着 5G 和物联网技术的发展,网络的带宽和稳定性将得到显著提升,这将为基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法的普及和推广提供更加有力的支持。在未来的智能电网环境中,联邦学习将成为一种重要的分布式控制技术,为能源管理和优化调度提供更加高效和智能的解决方案。

储能技术的进步将推动电池性能的持续提升,进一步增强储能单元的容量和能效,这为基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法提供了更多应用潜力^[8]。未来,该方法不仅能够优化储能系统的 SOC 管理,还可扩展应用至智能电网的其他领域,如负载调度、电力质量监控和故障检测等。通过智能协同和高效的数据处理,联邦学习能够实现更加精准的电网调度,提升电力系统的稳定性和能效。其独特的去中心化特点,有助于在多元化能源结构下,灵活应对实时

变化的电力需求和供应情况,支持智能电网的可持续发展。基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法将成为构建智能、可靠和高效能源系统的重要技术支撑。

5 结语

基于联邦学习的 SOC 一致性控制方法为分布式储能系统提供了一个高效且安全的解决方案。通过在保证数据隐私的前提下,实现储能单元间的协同控制,不仅优化了系统的能效和稳定性,还克服了传统集中式方法中的通信延迟和隐私问题。随着储能技术的进步,联邦学习将在智能电网中发挥更大的作用,推动系统向更加智能、可靠和高效的方向发展。未来,结合更先进的技术,基于联邦学习的 SOC 一致性控制将为智能电网的可持续发展提供强有力的技术支持,助力构建更加优化的能源管理和调度体系。

参考文献

- [1] 张新,肖柳君,许继平,等.基于分布式联邦学习的农产品供应链跨域风险信息检测研究[J].农业机械学报,2025,56(06):56-66+89.
- [2] 黄梅,王玲玲,张政胤,等.面向异构数据的半分布式联邦学习安全聚合[J].网络与信息安全学报,2025,11(03):175-189.
- [3] 张洪广,杨翕然.基于联邦自适应元优化的分布式协同学习方法[J].指挥信息系统与技术,2025,16(02):1-8.
- [4] 安芸帙,崔明建,韩一宁,等.考虑数据隐私保护自适应联邦学习的分布式光伏有功可调节能力评估方法[J/OL].中国电机工程学报,1-14[2025-07-11].
- [5] 王宁,陈伟.基于联邦学习的分布式网络诈骗检测系统[J/OL].重庆工商大学学报(自然科学版),1-9[2025-07-11].
- [5] 邹徐熹,周忠冉,王虹岚,等.基于联邦学习的分布式物联网设备识别方法[J].计算机工程与应用,2024,60(23):155-167.
- [6] 蔡宇轩.分布式场景下高效隐私保护联邦学习技术研究[D].西安电子科技大学,2024.
- [7] 臧洪睿,杨婷婷,刘洪波,等.面向物联网的分布式联邦学习加密验证研究[J].计算机科学,2024,51(S1):1062-1066.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS