

隐私保护下跨域电池储能系统智能均衡控制策略

谢祥祥¹, 田恩刚¹, 李磊²

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²青岛市即墨区人力资源和社会保障局, 山东 青岛

收稿日期: 2024年2月4日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

基于通信信道的跨域电池储能系统(BESSs)技术在现代智能电网的运行中发挥着重要作用, 每个参与的BESS互动过程中存在泄露敏感消息的高风险问题, 攻击者利用所窃取的重要信息更容易引发电网崩溃、BESS热失控等严重后果。因此, 为解决多源直流微电网中区域互联多储能系统的安全控制问题, 本文提出了一种新型的均衡管理策略, 采用改进的分布式共识算法模型, 通过满足荷电状态(SOC)相对变化率的约束以实现BESS间的一致性, 在满足总体功率需求的同时优化各BESS的能量负载。此外, 在各BESS通讯过程中引入差分隐私保护机制, 避免窃听者获取准确的系统信息, 进一步地提出了一种多级隐私保护框架, 适应BESSs不同阶段的充放电场景。最后, 本文使用Matlab软件进行了仿真实验, 结果表明可以使BESS能量利用时间延长66.98%, 并且在保证均衡效果的前提下也具有一定隐私保护效果。

关键词

SOC, BESS, 差分隐私, 微电网, 协同控制, 多智能体系统, 无向图, 均衡控制

Intelligent Balancing Control Strategy for Cross-Domain Battery Energy Storage Systems under Privacy Protection

Xiangxiang Xie¹, Engang Tian¹, Lei Li²

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Qingdao Jimo District Human Resources and Social Security Bureau, Qingdao Shandong

Received: Feb. 4th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

Battery Energy Storage Systems (BESSs) based on communication channel technology play a pivotal role in the operation of modern smart grids. However, the interaction among participating BESSs presents a high risk of sensitive information leakage, which can lead to severe consequences such as grid failure and thermal runaway of BESSs if attackers exploit the stolen information. To address the security control issues in interconnected multi-energy storage systems within multi-source direct current microgrids, this paper proposes a novel equilibrium management strategy. It employs an improved distributed consensus algorithm model that ensures consistency among BESSs by adhering to constraints on the relative rate of change of the state of charge (SOC), while optimizing the energy load of each BESS to meet the overall power demand. Furthermore, a differential privacy protection mechanism is introduced during the communication process between BESSs to prevent eavesdroppers from obtaining accurate system information. A multi-level privacy protection framework is also proposed to accommodate different charging and discharging scenarios of BESSs. Finally, simulation experiments conducted using Matlab software indicate that the proposed strategy can extend the energy utilization time of BESSs by 66.98% and also provide a certain level of privacy protection while ensuring balancing effects.

Keywords

SOC, BESS, Differential Privacy, Microgrid, Cooperative Control, Multi-Agent System, Undirected Graph, Balancing Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

新能源技术的发展和突破对于解决能源和环境问题有着不言而喻的地位，因此能源的储存也是新型能源技术进一步发展的重要一环[1] [2] [3]。通常，跨域直流微电网的物理层通常由大量可调度或不可调度的发电设备和负荷组成，如常规发电机、BESSs、风力涡轮机和需求单元等；信息层主要由传感器测量设备、数据采集系统、数据存储系统、专用通信网络和管理控制软件组成[4]。跨域储能系统通过利用分布式控制模型和先进的通信技术，实现了在某些物理约束下 BESSs 和用电负荷之间的精确能量调度。然而在实际应用中，每个 BESS 在制造过程中都可能会出现微小的差异，包括容量、内阻和老化速度等，这些差异会随着充放电循环的进行而逐渐放大，如果不进行均衡控制，这会导致当前区域总体容量减少，降低能量使用效率。因此，均衡管理对于跨域储能模型提高能量利用率和避免寿命减少尤其重要[5] [6]。

现有的 BESSs 均衡控制模型主要分为集中式策略和分布式策略，随着 BESSs 规模的扩大和数据量的指数级增长，需要收集系统中所有通信单元信息的集中式能量管理策略已不再适用。相比之下，分布式策略仅利用本地交互信息就能完成复杂的调度任务，在安全性、可扩展性、计算效率等方面表现出独特的优势，因此，分布式能源管理更适合跨域直流微电网系统中 BESS 均衡控制[3] [7]。Xing 等人[8]研究了有限通信带宽的微电网控制问题，提出了一种分布式迭代事件触发控制方案，与连续时间反馈控制相比，有效地降低了控制器更新频率，实现均衡控制下的最佳负荷分担。Hoang 等人[9]引入了虚拟额定功率的概念，在不考虑线路电阻差异的情况下，根据 SOC 级别和虚拟额定功率实现了精确的功率共享。Liang

等人[10]提出了一种级联 H 桥变换器 BESS 均衡方法, 并且考虑了功率限制和老化对系统的影响, 克服了传统比例积分(PI)控制器方法无法有效将有功功率限制在安全工作范围内的问题。

上述控制策略只考虑了 BESS 功率分配和 SOC 均衡, 并未考虑通信网络可能的信息安全, 由于通信链路的存在, 长距离跨域多储能系统很容易造成数据泄露, 严重威胁储能安全和用户隐私。在这方面, 如何在隐私保护前提下实现均衡管理尤为关键。针对多源直流微电网中各类储能系统之间的保隐私及能效优化问题, Zhou 等人[11]针对可重构分布式孤岛微电网的经济运行, 提出了一种隐私保护的分布式控制策略, 实现最优功率共享和频率恢复, 策略可以保护每个智能体在信息交互过程中不被相邻节点窃取, 但是并没有考虑储能系统 SOC 模型, 电压电流对系统的影响无法得到体现。Wang 等人[12]研究了如何以相对较低的成本保护多源微电网隐私的同时实现最优经济调度问题。与经常使用的加性噪声来保护隐私的工作不同, 提出了一种具有误差补偿的新型随机权重隐私保护算法, 在该提案中每个电池储能系统每次生成两个随机权重, 并采用误差补偿项来消除由随机权重引起的误差。Zhao 等人[13]研究了具有隐私问题的分布式能量管理算法, 利用发电设备和消耗负载协同最大化利用率来提高智能电网运行的效率、可扩展性和鲁棒性。

考虑到新能源动力的波动性以及 BESS 作为柔性负荷的高度随机性, 分布式储能系统接入跨域微电网后, 各区域间通过网络通信进行交互以实现总体任务[14] [15]。在信息交互过程中存在被窃听和泄露敏感消息的高风险问题, 一旦遭受恶意攻击可能导致电网崩溃、BESS 热失控等严重后果[16] [17]。因此, 大规模分布式跨域储能系统接入微电网时带来的网络通信隐私保护问题非常重要。

为此, 本文提出一种满足差分隐私的跨域电池储能系统均衡控制策略, 实现均衡的过程无须额外增加电路, 采用改进的分布式通信策略, 相对于集中式可有效减少通信压力。并且满足微电网对功率的需求, 与传统均衡算法相比, 本算法具有显著的优势。首先, 它通过分布式计算降低了通信负担, 智能体之间仅需交换必要的信息, 而非集中式算法中的全局信息。其次, 基于功率补偿的方法提高了响应速度, 使得算法能够更快地适应电网负荷的变化。最后, 该算法具有更好的可扩展性和鲁棒性, 能够适应不断变化的电网环境和不同规模的储能系统。

本文的主要贡献总结如下:

- 1) 首次在跨域电池储能系统的 SOC 均衡控制问题中考虑了隐私保护问题, 防止 BESS 关键信息被恶意单元窃取, 为 BESSs 的实际应用提供了理论基础;
- 2) 改进了传统多智能体均衡策略, 建立 SOC 约束方程, 提高了电池储能系统利用率, 在一定程度上延长 BESS 寿命, 并在差分隐私条件下实现了均衡模型。

2. 模型方法

在本节中, 首先介绍了传统多智能体电池储能体 SOC 均衡模型, 然后为了解决新能源发电功率不匹配问题, 提出了一种改进的满足功率补偿的 SOC 均衡模型。

2.1. 图论知识

跨域电池储能系统是由 N 个相连的 BESS 单元构成的, 这些单元间的信息传输和电力传输可以用一个无向图来描述。为了实现前文提出的 SOC 均衡策略, 本文详细介绍了一种新型的基于功率补偿的多智能体分布式 BESS 均衡算法。该算法旨在实现对总功率指令的快速自适应分配, 确保在多个跨域 BESS 之间实现高效平衡, 用以响应电网的实时控制需求。

具体来说, 算法采用了分布式架构, 允许每个 BESS 根据本地信息和邻居交换的信息独立作出决策。这一设计避免了中央集中式控制所固有的单点故障风险和扩展性限制。每个 BESS 利用一种高效的功率

计算方法, 根据当前 SOC 水平和系统的总功率需求动态调整其输出功率, 以促进整体系统的均衡。

如图 1 所示, 跨域直流微电网包含输电线路、通信线路、BESS、交直流转换器、直流总线和负载等, 在这样的图中, 信息的交流和电力的输送都是双向的, 可以用符号 $G(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 来表示, 这里的 \mathcal{V} 是顶点集合, 每个顶点代表一个区域 BESS 单元。如果集合 (i, j) 是边集 \mathcal{E} 的一部分, 即 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 那么说明第 i 个与第 j 个区域 BESS 单元之间有通信线路。在无向图的环境下, 邻接矩阵 $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 用于表示 BESS 单元间的连接情况。若第 i 个和第 j 个单元之间有链接, 那么邻接矩阵中相应的元素 $a_{ij} = a_{ji} = 1$ 且 $i \neq j$; 如果没有链接, 那么 $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。无向图的拉普拉斯矩阵用 $\mathcal{L} = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示, 满足条件 $l_{ii} = -\sum_{j \neq i} a_{ij}$ 和 $l_{ij} = -a_{ij}$ 同时, N_i 代表着第 i 个单元的邻居集合。

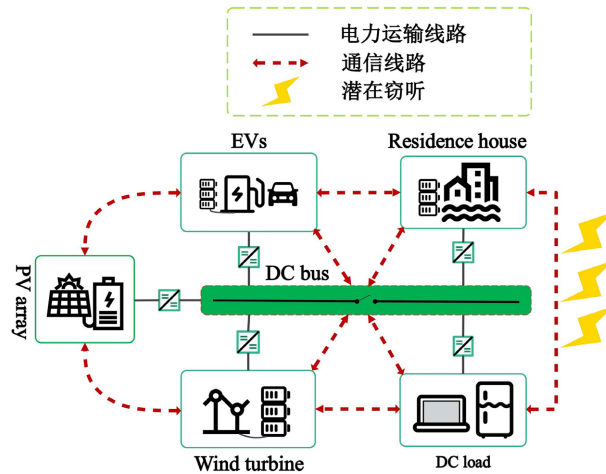


Figure 1. Block diagram of distributed BESSs
图 1. 跨域电池储能系统结构框图

2.2. 传统基于多智能体 SOC 均衡模型

SOC 指的是 BESS 荷电状态, 是 BESS 状态的本指标之一。设 SOC_i 表示第 i 个电池单元的 SOC, 本文用安时积分法评估 SOC, 其简化模型可以写成:

$$SOC_i(k+1) = SOC_i(k) + \frac{\eta_i T}{Q_i} I_i(k) \quad (1)$$

式中: η_i 为库伦效率, I_i 为第 i 个 BESS 端电流, Q_i 为第 i 个 BESS 的额定容量, T 表示采样周期。

在工业应用中, 跨域 BESS 的构成通常涉及将多个 BESS 单元组合在一起以提供所需的储能容量和功率输出。这些单元可能都来自相同的生产线, 并且是同一批次生产的, 看似应该具有一致的性能和参数。然而, 即便是在这种情况下, BESS 之间仍然可能存在细微的差异。这些差异主要是由于不同单元在使用环境(如温度、湿度)和使用过程中(如充放电周期、负载变化)的差异造成的。

随着时间的推移, 这些微小的差异可能会在电化学性能和物理特性上显现出来, 导致各个单元的内部参数, 例如内阻、SOC 和健康状态(SOH)等, 出现偏差。这种偏差对于 BESS 的整体性能和寿命有着直接的影响, 可能会导致系统效率降低、能量损失增加甚至是过早失效。为充分考虑电池老化对 BESS 容量的影响情况定义:

$$Q_i = Q_{ini} \times SOH_i \quad (2)$$

式中: Q_{ini} 表示出厂设定容量, SOH_i 表示第 i 个 BESS 健康状态, 大小满足 $0 \leq SOH_i \leq 1$ 。

根据第 i 个 BESS 功率 $P_i(k) = U_i(k)I_i(k)$ 代入(1)式:

$$SOC_i(k+1) = SOC_i(k) + \frac{\eta_i TP_i(k)}{Q_i U_i(k)} \quad (3)$$

为了应对这 SOC 不一致的问题, 必须实施精细的管理和均衡策略, 来监测和调整每个单元的工作状态, 确保整个系统能够协同工作, 最大限度地发挥其性能。这就需要 对 BESS 进行实时的性能评估和参数调整, 目标是实现所有电池单元的 SOC 的均衡[18], 即:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (SOC_i(k) - SOC_j(k)) = 0, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

每个 BESS 的 SOC 均衡策略随采样时间 T 的离散化写成:

$$SOC_i(k+1) = SOC_i(k) + Tu_i(k) \quad (5)$$

其中:

$$u_i(k) = -g \sum_{ij \in N} (SOC_i(k) - SOC_j(k)) \quad (6)$$

式中: 其中 $g > 0$ 是控制均衡速度的常数。

考虑具有(1)中描述 BESS 单元 SOC 电池系统, 并且通信拓扑满足预期, 在均衡策略(5)下, 基于传统均衡多智能体均衡算法, 所有电池单元的 SOC 将渐近收敛到其初始值的平均值[19], 即:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} SOC_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N SOC_j(0), i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

2.3. 改进 SOC 均衡模型

相比于传统能源电力系统, 新型电力系统具有储能形式多样化、分散化的特征, 新能源接入的随机性、波动性、间歇性导致系统裕量下降、调峰调频压力增大, 所以, 诸如光伏发电(PVs)和风力发电由于其不可预测的输出功率而通常引起功率波动。BESS 目前被认为是减轻功率波动的最好方法。当 PVs 的发电量超过负载功率时, BESS 吸收剩余功率。相反, 当电力需求超过 BESS 的电力时, BESS 放电以补偿不足的负载电力。具体流程如图 2 所示。

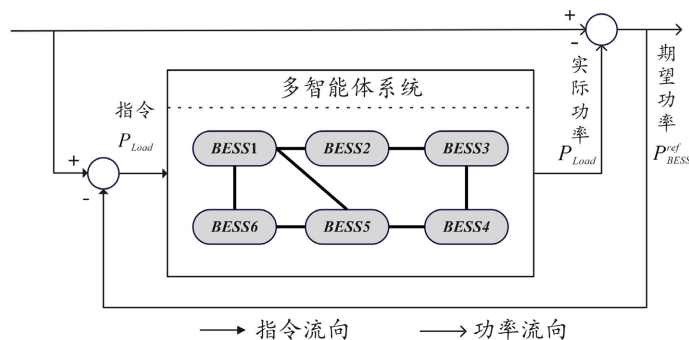


Figure 2. Power compensation model
图 2. 功率补偿模型

因此, 电池储能系统需要解决系统功率不匹配问题:

$$P_{PV} = P_{load} - P_{BESS}^{ref} \quad (8)$$

式中： P_{PV} 表示新能源发电功率， P_{BESS}^{ref} 表示全部 BESS 对系统的功率补偿， P_{load} 表示负载功率。
储能系统实际工作情况：

$$P_{PV} + P_{BESS}^{ref} = P_{load}$$

$$P_{BESS}(k) = \sum_{k=1}^N P_{BESS_{kh}}(k) \quad (9)$$

式中： $P_{BESS_{kh}}$ 表示第 k 个区域内 BESS 提供或吸收的功率。

在放电过程中，需要仔细考虑硬件约束，包括跨域储能微电网区域内每个 BESS 的充电电流、SOC 和端电压等，以确保 BESS 的安全性。

1) 充电电压限制：充电电压的阈值对电池的安全起着重要作用，因为过高的电压会影响电池性能，甚至在充电过程中引起火灾。因此，BESS 的充电电压应保持在合适的范围内：

$$\mathbf{0}_n \leq U(k) \leq u_M \mathbf{1}_n \quad (10)$$

式中： $u_M \in \mathbb{R}$ 是 BESS 的最大允许充电电压， $\mathbf{0}_n$ 是包含 n 个零的列向量， $\mathbf{1}_n$ 是包含 n 个 1 的列向量。

2) SOC 约束：电池的 SOC 不允许超过其上限，以避免过度充电：

$$SOC(k+1) \leq SOC_M \mathbf{1}_n \quad (11)$$

式中： SOC_M 表示单元的 SOC 的上限。

本文提出的 SOC 均衡算法旨在解决电池储能系统中的功率补偿问题，通过实时监测各单元的充电状态 SOC，动态调整放电速率，使得 SOC 较高的单元以更快的速度放电，而 SOC 较低的单元则以较慢的速度放电，以此实现在整个放电过程中的 BESS 单元间功率分配和 SOC 均衡，从而提高系统的整体性能和寿命。

其在放电过程中满足[20]：

$$\frac{SOC_1(k+1)}{SOC_1(k)} = \dots = \frac{SOC_N(k+1)}{SOC_N(k)} \quad (12)$$

保证每个 BESS 放电 SOC 相对变化率一致，如图 3 所示，初始 SOC 不一致的 i 单元和 j 单元，其初始 SOC 分别为 SOC_a 和 SOC_b ，并在同一时间 t_e 到达 SOC 最低值，即 i 单元和 j 单元达到了均衡状态。

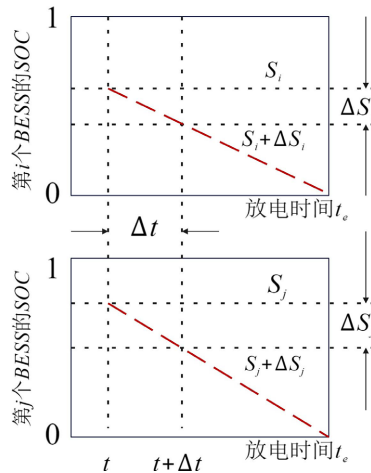


Figure 3. Variations in SOC during the discharge process

图 3. 放电过程中 SOC 变化

为了更好地体现电池参数对均衡的影响，定义集总参数：

$$x_i(k) \triangleq \tau_i SOC_i(k) \quad (13)$$

其中：

$$\tau_i \triangleq \frac{Q_i U_i}{\eta_i}$$

式中： τ_i 表示储能系统硬件参数，与容量电压库伦效率有关。

因此，为了更好地体现固有参数对均衡的影响，以上 SOC 均衡控制的目标转换为实现 $x_i(k)$ 的一致性：

$$\frac{x_i(k+1)}{x_i(k)} = \frac{x_j(k+1)}{x_j(k)}, (i \neq j) \quad (14)$$

设计以下一致性算法。在放电模式下，第 i 个 BESS 从其相邻 BESS 接收信息 $x_j(k)$ ，然后对比大小判断自己需要的功率 $P_i(k)$ ，将分布式控制方案设计为：

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + TP_i(k) \\ P_i(k) = -P_{BESS}^{ref} / N + u_i(k) \\ u_i(k) = -g \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(k) - x_j(k)) \end{cases} \quad (15)$$

3. 差分隐私模型

为应对跨域电池储能系统隐私安全问题，本节提出一种隐私保护模型，采用拉普拉斯方案的差分隐私方案。

3.1. 差分隐私模型设计

长距离跨域 BESS 在每个区域之间都有通信连接，这意味着关键信息可能被恶意单元利用。差分隐私是一种用于保护隐私的技术，它通过在数据发布时添加一定量的噪声来确保即使数据被泄露，即使来自网络内外的潜在攻击者掌握了除敏感信息之外的所有知识，也无法根据已知的数据库提取敏感信息。

差分隐私中最常用的噪声添加方案是拉普拉斯方案(Laplace mechanism)和高斯方案(Gaussian mechanism)，这两种方案在噪声分布和应用前提条件上有所不同。相比于高斯方案，拉普拉斯方案适用性更广和具有更强的隐私保证，并且拉普拉斯方案具有恒定方差，将方差衰减的拉普拉斯噪声引入到系统中，以抵御通信网络中的对手的窃听，这使得动态算法在随机系统的每一步都具有隐私保护[21]。

定义 1：假设随机变量 X 具有以下概率密度函数：

$$\zeta(x) = \frac{1}{2\sigma} \exp\left(-\frac{|x-\mu|}{\sigma}\right) \quad (16)$$

式中： μ 是位置参数， σ 是尺度参数。

符合(15)的变量 X 分布称为拉普拉斯分布，并表示为 $X \sim Lap(x|\mu, \sigma)$ ，此外， X 的期望和方差分别为 $\mathbb{E}\{x\} = \mu$ 和 $\mathbb{V}\{x\} = 2\sigma^2$ 。

定义 2：对于具有正项的给定向量 $\theta \in Rn$ ，满足以下不等式，称向量 $y'(k)$ 和 $y(k)$ 是 θ 相邻的。

$$y_i - y'_i \leq \|\theta\| \quad (17)$$

式中： $\|\theta\|$ 指 θ 的范数

定义 3: 给定初始 $x(0) \in \mathbf{R}^N$ 的任意的随机动态系统, 如果以下不等式成立, 则称其达到 (p, r) -精度:

$$\mathbb{P}\left\{\|x(\tau) - x^{ref}\|_2 \leq r\right\} \geq 1 - p \quad (18)$$

其中 $p \in (0,1)$ 且 $r \geq 0$, $x^{ref} \in \mathbf{R}^N$ 是系统收敛到的随机变量的值。

对于第 l 个区域 BESS 任意一组可观测状态序列 Y 和噪声序列 w , 以及任意一对 θ 相邻初始状态 $x(0)$, 如果以下不等式成立:

$$\mathbb{P}\{X_{x(0)}(w) \in \mathcal{O}\} \leq \exp(\epsilon_l) \mathbb{P}\{X_{x'(0)}(w') \in \mathcal{O}\} \quad (19)$$

式中: w 和 w' 是拉普拉斯噪声序列, ϵ_l 称为隐私等级。

则称随机系统保持 ϵ -差分隐私性, 与(14)相结合, 设计如下图所示的满足差分隐私的跨域电池储能系统:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + TP_i(k) \\ P_i(k) = -P_{BESS}^{ref} / N + u_i(k) \\ u_i(k) = -g \sum_{j \in N_i} a_{ij} (y_i(k) - y_j(k)) \\ y_i(k) = x_i(k) + s_i w_i(k) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $w_i(k)$ 是拉普拉斯噪音序列, s_i 是第 i 个 BESS 的隐私大小, 其中 $s_i \in (0,1)$ 。

在本文中, 隐私分析是基于各区域 BESS 初始状态的差异, 所有 BESS 都可以根据实际的工程规范选择自己的隐私级别。为了不影响均衡算法的收敛性, 采用均值为零且随时间衰减的拉普拉斯型噪音 $w(k) \sim Lap(0, b(k))$, 即:

$$b(k) = cq^k \quad (21)$$

式中: 参数设置为 $c \in (0,1)$ 和 $q \in (0,1)$, 噪音 $w(k) \sim Lap(0, b(k))$, 其中 $b(k) = cq^k$, 则 b 可以随时间指数衰减。

3.2. 差分隐私等级设计

这一步旨在研究所提出的算法的隐私保护水平, 在差分隐私条件下给定两个初始 SOC 序列, 可以得到两个相同的输出结果, 即隐私得到了保护, 对于单元 $l \in [N]$, 给出两个相邻的观测序列 $y'(k)$ 和 $y(k)$ 的联合概率密度函数分别给出如下:

$$\chi(Y_{x(0)}^w \in \mathcal{Y}) = \prod_{t=0}^k \chi(y(t) | y(0), \dots, y(t-1)) \quad (22)$$

$$\chi(Y_{x'(0)}^{w'} \in \mathcal{Y}) = \prod_{t=0}^k \chi(y'(t) | y'(0), \dots, y'(t-1)) \quad (23)$$

然后, 根据拉普拉斯噪声的性质和 $y(k)$ 与 $w(k)$ 的关系, 得到:

$$\chi(Y_{x(0)}^w \in \mathcal{Y}) = \prod_{t=0}^k \prod_{i=1}^N \zeta(w_i(t)) \quad (24)$$

$$\chi(Y_{x'(0)}^{w'} \in \mathcal{Y}) = \prod_{t=0}^k \prod_{i=1}^N \zeta(w'_i(t)) \quad (25)$$

当 $k \rightarrow \infty$ 时, 这进一步推导:

$$\begin{aligned}
 \frac{\chi(Y_{x(0)}^w \in \mathcal{Y})}{\chi(Y_{x'(0)}^{w'} \in \mathcal{Y})} &= \frac{\prod_{t=0}^k \prod_{i=1}^N \zeta(w_i(t))}{\prod_{t=0}^k \prod_{i=1}^N \zeta(w'_i(t))} \\
 &= \frac{\prod_{t=0}^k \zeta(w_t(t))}{\prod_{t=0}^k \zeta(w'_t(t))} \\
 &\leq \prod_{t=0}^k e^{\frac{w'_t(t) - w_t(t)}{c_t q_t}} \\
 &= \prod_{t=0}^k e^{\frac{\|\theta_t\|_1 (1-s_t)}{c_t q_t}} \\
 &= e^{\sum_{t=0}^k \frac{\|\theta_t\|_1 (1-s_t)}{c_t q_t}} \\
 &= e^{\epsilon_t}
 \end{aligned} \tag{26}$$

随后，在(25)的两边从 0 到 k 进行积分运算，得到(18)：

$$\mathbb{P}\{X_{x(0)}(w) \in \mathcal{O}\} \leq \exp(\epsilon_t) \mathbb{P}\{X_{x'(0)}(w') \in \mathcal{O}\}$$

即差分隐私等级：

$$\epsilon_t = \frac{q_t \|\theta_t\|_1}{c_t (q_t + s_t - 1)}, \quad q_t \in (1 - s_t, 1) \tag{27}$$

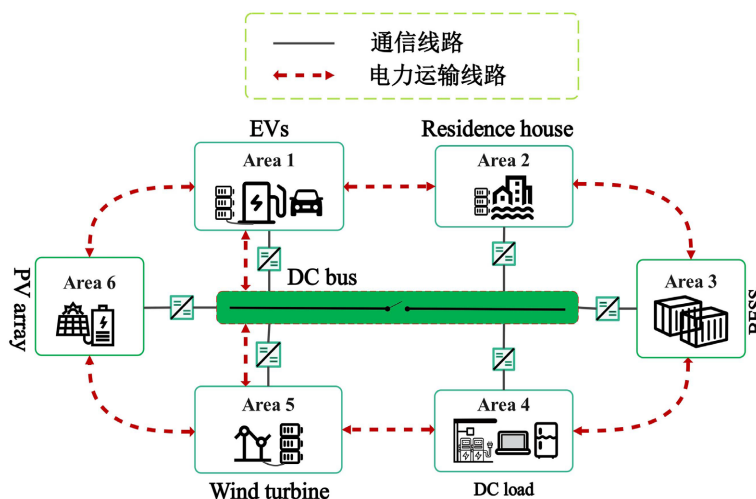


Figure 4. Communication topology of BESS
图 4. BESS 的通信线路图

4. 仿真实验与结果分析

本文使用 Matlab 2023a 进行实验仿真，通过以下仿真案例验证了所提出方案的有效性。对比实验研究了 BESSs 在使用隐私保护和不使用隐私保护均衡算法的性能。在案例研究中，设计 6 个区域 BESS 组合在一起以满足跨域微电网功率补偿要求，6 个区域 BESS 参数如表 1 所示，系统允许的 SOC 最低值为

0.1, 各区域初始 SOC 为[0.83 0.75 0.86 0.9 0.77 0.81] T, 采样周期 T 为 0.001 秒。通信线路如图 4 所示, 通信拓扑的拉普拉斯矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Table 1. BESSi parameters
表 1. BESSi 参数

$BESS_i$	η_i	Q_i (Ah)	V_i (V)	SOH_i
1	0.941	114	214	1
2	0.972	119	223	1
3	0.963	122	219	1
4	0.989	116	217	1
5	0.982	118	220	1
6	0.955	125	216	1

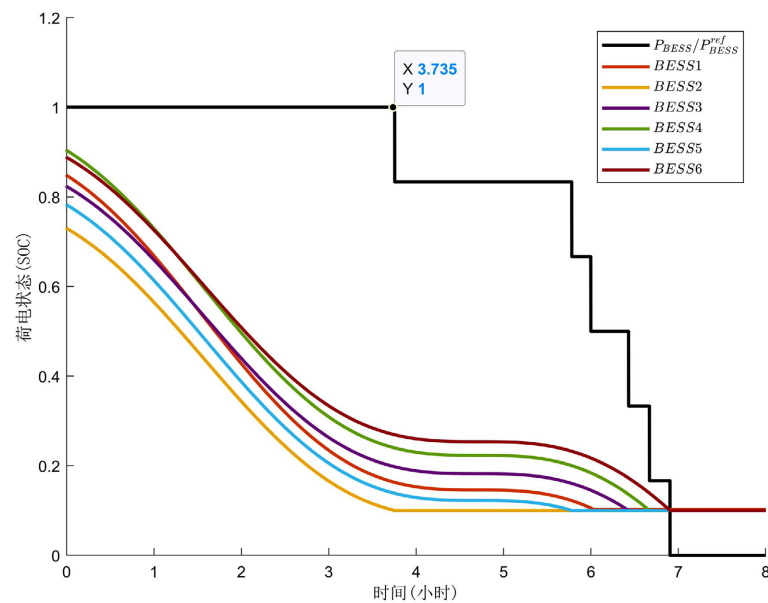


Figure 5. Discharge performance of regional BESS without balance control
图 5. 无均衡控制下各区域 BESS 放电性能

由于跨域微电网负载变化的复杂性, 我们假设 6 个 BESS 单元的期望功率补偿要求为 $P_S(t) = 12,000 \sin(\pi t) + 120,00$ W, 所以每个区域需提供的功率为 $P_i(t) = P_j(t) = P_S(t)/8 = 2000 \sin(\pi t) + 2000$ W, 仿真结果如图 5、图 6 所示。图 5 展示了在无均衡控制下 SOC 和系统总功率 P_{BESS} 变化, 其中 P_{BESS}/P_{BESS}^{ref} 表示系统实际功率和期望功率的比值, 当 P_{BESS}/P_{BESS}^{ref} 等于 1 表示功率补偿与期望值相等, 偏离 1 表示功率补偿偏

离期望值,从图5中可以看出在无均衡的分散控制下,在第3.735小时,第2区域的BESS率先达到最低SOC限制停止放电,导致功率补偿偏离期望值。图6(a)表示加入均衡算法下各区域BESS的SOC变化曲线,从中可以看出,各区域BESS收敛到了设定期望值0.1,均衡算法下功率补偿时间延长到了6.262小时,与无均衡相比,能量利用时间延长了66.98%,并且在到达6.262小时后小于0.5小时功率 P_{BESS} 变为0。由图6(b)可以看出,均衡算法下集总参数的变化符合(13)。总的来说,在本文的均衡算法作用下,系统有更长的功率补偿时间。

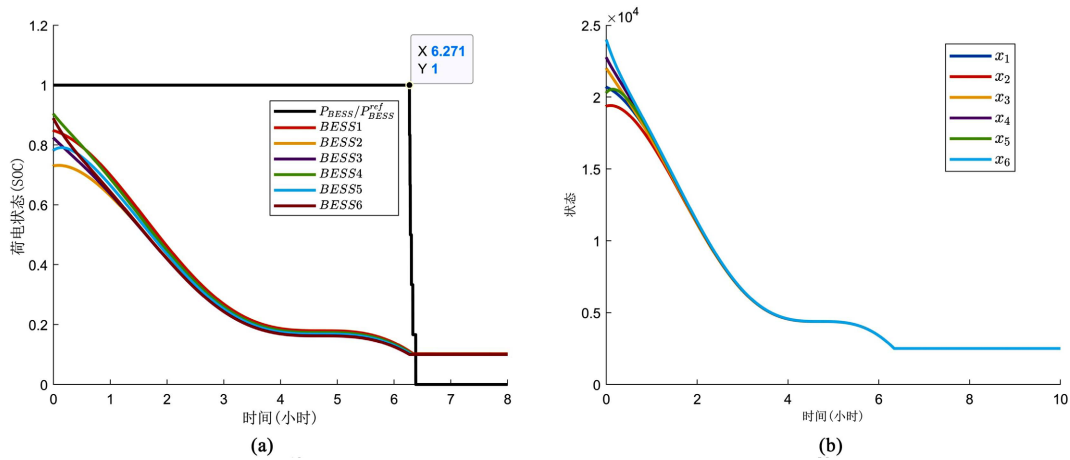


Figure 6. (a) SOC variation curves for regional BESS under balancing algorithm; (b) Variation curves of x for regional BESS under balancing algorithm

图6. (a) 均衡算法下各区域BESS的SOC变化曲线; (b) 均衡算法下各区域BESS的 x 变化曲线

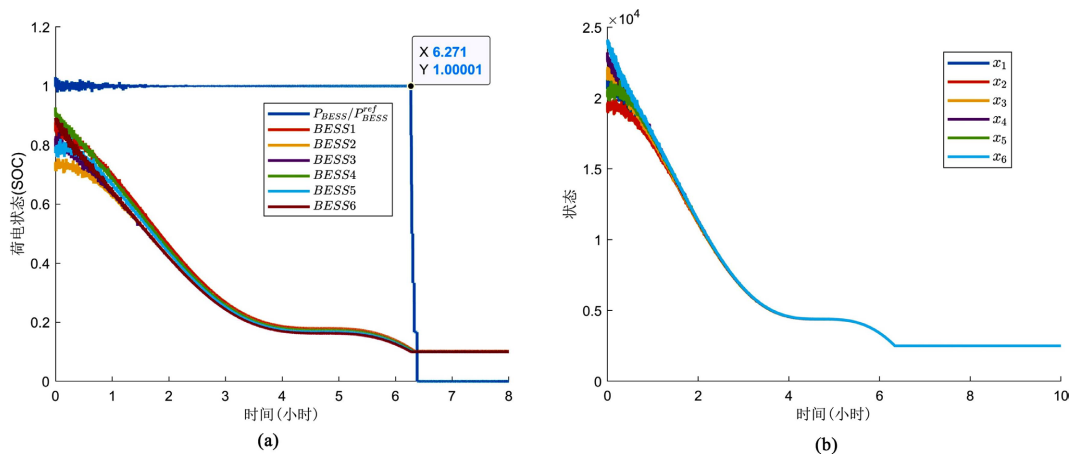


Figure 7. (a) Graph illustrating the SOC balancing under differential privacy; (b) Curve of variable x with respect to changes under differential privacy

图7. (a) 差分隐私下SOC均衡效果图; (b) 差分隐私下 x 变化曲线

在本案例中,设置差分隐私参数, $\mu=0, c_i=5, q_i=0.75, s_i=0.1$, 隐私保护下均衡控制结果如图7所示,从图7中可以看出,隐私保护下所提出的均衡控制也可以实现SOC的收敛,实现6.271小时的功率补偿时间,受差分隐私的影响,在1.5小时内SOC相对不加隐私保护算法波动加剧,但后续波动逐渐收敛。为了更好的体现隐私保护对系统的影响,本案例研究了隐私等级 ϵ 的曲线,如图8(a)所示,随着 c 和 s 的增加,将保证更好的隐私性能,同时本案例研究了系统精度水平 r 的曲线,如图8(b)所示,随着 c

和 s 的减小, 将保证更好的精度性能 r 。在实际应用中, 需要在隐私性和准确性之间进行权衡, 可以根据实际情况选择噪声参数。

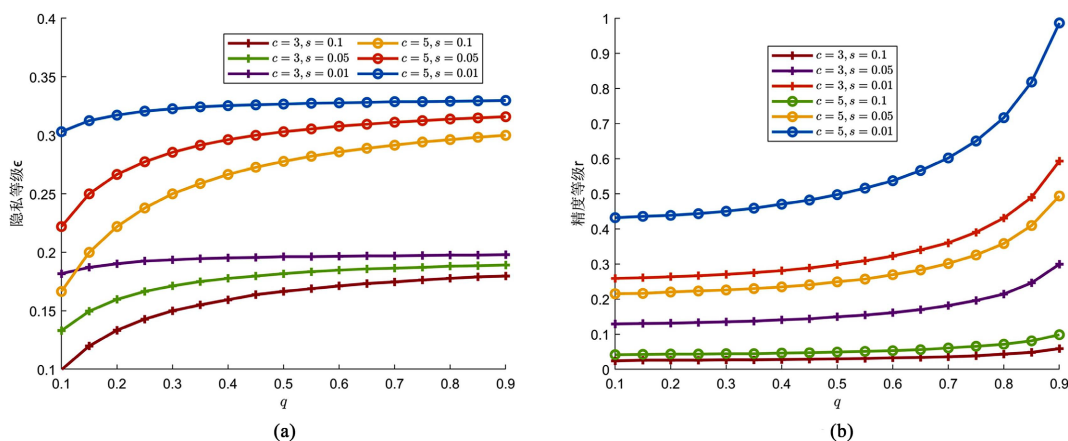


Figure 8. (a) SOC variation curves for regional BESS under balancing algorithm; (b) Variation curves of x for regional BESS under balancing algorithm

图 8. (a) 均衡算法下各区域 BESS 的 SOC 变化曲线; (b) 均衡算法下各区域 BESS 的 x 变化曲线

5. 结论

本文主要研究了跨域直流微电网均衡控制下隐私保护问题, 设计了一种新的隐私保护分布式均衡模型, 该模型可同时实现均衡控制和隐私保护。通过在均衡过程中引入拉普拉斯噪声, 实现了差分隐私控制目标, 同时提供了隐私精确和隐私等级分析, 改进了传统多智能体均衡算法难以实现功率补偿, 结果表明可以使 BESS 能量利用时间延长 66.98%, 该策略可实现功率补偿和 SOC 动态均衡, 所有 BESS 主体的状态都渐近收敛于全局功率目标。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(62173231)。

参考文献

- [1] Lawder, M.T., Suthar, B., Northrop, P.W., *et al.* (2014) Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications. *Proceedings of the IEEE*, **102**, 1014-1030. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2317451>
- [2] Sufyan, M., Rahim, N.A., Aman, M.M., *et al.* (2019) Sizing and Applications of Battery Energy Storage Technologies in Smart Grid System: A Review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **11**, Article ID: 014105. <https://doi.org/10.1063/1.5063866>
- [3] Zhang, Q., Zeng, Y., Liu, Y., *et al.* (2021) An Improved Distributed Cooperative Control Strategy for Multiple Energy Storages Parallel in Islanded DC Microgrid. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **10**, 455-468. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3072701>
- [4] Zhang, R., Savkin, A.V. and Hredzak, B. (2021) Centralized Nonlinear Switching Control Strategy for Distributed Energy Storage Systems Communicating via a Network with Large Time Delays. *Journal of Energy Storage*, **41**, Article ID: 102834. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102834>
- [5] Zeng, Y., Zhang, Q., Liu, Y., *et al.* (2021) State-of-Charge Dynamic Balancing Strategy for Distributed Energy Storage System in DC Shipboard Microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **133**, Article ID: 107094. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107094>
- [6] Oliveira, T.R., Silva, W.W.A.G. and Donoso-Garcia, P.F. (2016) Distributed Secondary Level Control for Energy Storage Management in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **8**, 2597-2607.

- <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2531503>
- [7] Shi, G., Han, H., Sun, Y., Liu, Z., *et al.* (2020) A Decentralized SOC Balancing Method for Cascaded-Type Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68**, 2321-2333. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2973889>
- [8] Xing, L., Mishra, Y., Tian, Y.C., Ledwich, G., *et al.* (2019) Distributed State-of-Charge Balance Control with Event-Triggered Signal Transmissions for Multiple Energy Storage Systems in Smart Grid. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **49**, 1601-1611. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2916152>
- [9] Hoang, K.D. and Lee, H.H. (2018) Accurate Power Sharing with Balanced Battery State of Charge in Distributed DC Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **66**, 1883-1893. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2838107>
- [10] Liang, G., Rodriguez, E., Farivar, G.G., *et al.* (2022) A Constrained Intersubmodule State-of-Charge Balancing Method for Battery Energy Storage Systems Based on the Cascaded H-Bridge Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **37**, 12669-12678. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3170062>
- [11] Zhou, Q., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., *et al.* (2020) Privacy-Preserving Distributed Control Strategy for Optimal Economic Operation in Islanded Reconfigurable Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, **35**, 3847-3856. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2985995>
- [12] Wang, A., Liu, W., Dong, T., *et al.* (2020) DisEHPPC: Enabling Heterogeneous Privacy-Preserving Consensus-Based Scheme for Economic Dispatch in Smart Grids. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **52**, 5124-5135. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3027572>
- [13] Zhao, C., Chen, J., He, J., *et al.* (2018) Privacy-Preserving Consensus-Based Energy Management in Smart Grids. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **66**, 6162-6176. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2872817>
- [14] 王秀茹, 刘刚, 黄华峰, 等. 考虑分布式电源的配电网无功调度和储能优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 134-142+208.
- [15] Meng, T., Lin, Z. and Shamash, Y.A. (2021) Distributed Cooperative Control of Battery Energy Storage Systems in DC Microgrids. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, **8**, 606-616. <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003874>
- [16] 邓超, 唐旗, 郭方洪, 等. FDI 攻击下有源配电网储能系统安全控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2346-2354.
- [17] Chen, P., Liu, S., Chen, B., *et al.* (2022) Multi-Agent Reinforcement Learning for Decentralized Resilient Secondary Control of Energy Storage Systems against DoS Attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **13**, 1739-1750. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3142087>
- [18] Olfati-Saber, R., Fax, J.A. and Murray, R.M. (2007) Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *Proceedings of the IEEE*, **95**, 215-233. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.887293>
- [19] Yang, Y.D., Hu, K.Y. and Tsai, C.H. (2019) Digital Battery Management Design for Point-of-Load Applications with Cell Balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 6365-6375. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2940001>
- [20] 施锐, 张新燕, 刘莎莎, 等. 基于 SOC 均衡的分布式电池储能系统协同控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 546-552.
- [21] Mo, Y. and Murray, R.M. (2019) Privacy Preserving Average Consensus. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **62**, 753-765. <https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2564339>