

采用一致性算法的自治微电网群 分布式储能优化控制策略

张步云, 王晋宁, 梁定康, 韩肖清

(电力系统运行与控制山西省重点实验室(太原理工大学), 山西省 太原市 030024)

Optimization Control Strategy of Distributed Energy Storage in Autonomous Microgrid Cluster on Consensus Algorithm

ZHANG Buyun, WANG Jinning, LIANG Dingkang, HAN Xiaoqing

(Shanxi Key Lab of Power System Operation and Control (Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024,
Shanxi Province, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem of high operating cost caused by the charging/discharging loss of distributed battery energy storage and the transmission loss, this paper proposes a distributed energy storage control strategy concerning the economic purpose in the microgrid cluster. In this method, the operating cost model of the battery energy storage system is constructed with the transmission losses. This operating cost model obtain the solution with the consensus algorithm in order to optimize the proper power allocation between the battery energy storage systems. The proposed strategy utilizes a distributed controller to exchange information between the neighboring agents, which obtains fast response, flexible communication network and high robustness. An microgrid cluster model is built with four autonomous microgrids in the real-time digital simulator RTDS. The effectiveness and economics of the proposed control strategy were verified under the different simulation scenarios.

KEY WORDS: battery storage; economic control; incremental cost; consensus algorithm

摘要: 针对多个自治微电网互联合作运行时, 由于分布式电池储能的充放电损耗与线路损耗, 所造成的系统高运行成本问题, 提出了一种以经济性为目标的分布式储能控制策略。该方法通过构建考虑线路损耗的电池储能运行成本模型, 采用一致性算法进行迭代求解, 以优化各储能单元间输出功率的经济分配。所提一致性控制策略仅需与相邻节点进行信息交互, 无需装置中央控制器, 通信拓扑灵活简单, 可靠性高。在实时数字仿真仪 RTDS 中搭建了4个自治微电网形成的微电网群模型, 利用不同场景下仿真结果验证了所提控制策略的有效性和经济性。

关键词: 电池储能; 经济控制; 修正增量成本; 一致性算法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1968

0 引言

在大电网无法覆盖的海岛以及偏远地区, 一般采用光伏, 风电等可再生能源渗透率高的自治微电网^[1-2]。近年来, 多个地理位置毗邻的自治微电网通过信息互联、远程监控与能量调度形成自治型微电网群, 可共享电源及储能资源以提高能源消纳能力, 有利于提高系统可靠性与经济性^[3-4]。然而新能源发电的间歇性, 负荷的时变性以及组成结构的复杂性, 使得自治微电网群运行时控制难度大大提高。将分布式电池储能装置(distributed battery energy storage system, DBESS)引入微电网群, 并进行协调控制, 已成为在自治微电网群中支撑整体系统实现高效、可靠与经济运行的重要措施^[5-6]。

大规模 DBESS 接入自治微电网群时, 协调各储能单元实现经济控制, 以实现各微电网内供需平衡, 电压/频率稳定是重点研究问题。传统上, 常采用集中式控制实现各电池储能装置(battery energy storage system, BESS)间的经济运行。文献[7-8]为解决新能源发电的功率波动问题, 提出了基于荷电状态(state of charge, SoC)反馈机制的 BESS 经济控制方式。文献[9-10]基于储能 SoC 变化情况, 分别提出了储能的自适应调频策略和针对不同工况下的综合控制策略, 可有效改善储能调频效果。文献[11]建立了基于寿命成本的最优经济运行模型, 通过粒子群算法对所提模型求解。综上所述, 集中式控制虽准确性高, 但其控制响应时间慢, 不利于实时调度; 且对中央控制器依赖性高, 易受单点故

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777132)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51777132).

障影响, 可靠性差^[12-13]。

分布式控制可克服上述传统集中式控制的不足, 在实现自治微电网群的实时控制方面具有传输信息量小, 可靠性高等优势^[14]。在分布式控制中, 分布一致性算法可用于解决多智能体一致性问题, 目前已广泛应用于电力系统调压调频, 经济调度等领域。其中, 分布一致性算法已广泛应用于解决多智能体一致性问题。文献[15]提出了一种基于 BESS 寿命成本的优化功率分配分布式控制方法。文献[16-17]针对直流微电网, 建立了分布式电源 (distributed generator, DG) 发电成本模型, 基于有限一致性算法分别实现了经济调度和二次电压调节。文献[18-19]提出储能充放电效率与输出功率间线性关系, 通过增量成本一致原则对 BESS 运行成本进行优化。文献[20-21]基于改进一致性算法, 提出了针对集群 BESS 经济控制方式, 可优化储能服务成本, 实现系统经济运行。

然而, 上述控制中忽略了线路阻抗带来的影响。文献[22]通过构建包含线损比例因子的发电机运行模型, 应用并行一致性算法解决了电网经济调度问题。文献[23]在此基础上, 提出的计及线路损耗的改进边际成本一致分布式控制, 可以实现分布式电源经济性运行, 但侧重于发电侧的优化控制策略。

鉴于上述问题, 本文以自治型微电网群为研究背景, 提出了基于一致性算法的 DBESS 经济优化控制策略。首先, 以系统最优经济运行为目标, 综合考虑储能充放电损耗与线路损耗, 构建 BESS 运行成本模型; 然后选用储能修正增量成本作为一致性变量, 运用一致性算法合理分配 DBESS 输出功率, 从而实现系统的经济运行。最后, 在实时数字仿真仪(real time digital simulator, RTDS)中搭建自治型微电网群模型进行仿真分析, 验证了不同场景下所提策略的有效性与经济性。

1 图论与一致性算法

1.1 图论基础

自治微电网群中各系统可通过通信线路进行局部信息交互, 常采用连通图 G 来描述分布式通信网络的拓扑结构^[11]。连通图 $G = (V, E)$ 由通信拓扑结构的点集 $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 和边集 $E \subseteq V \times V$ 构成; 相邻节点间的通信线路可看作边集 E 的边。若节点 j 与节点 i 间存在通信线路, 则定义节点 j 为节点 i 的邻居, 记为 $N_i = \{j \in V | (i, j) \in E\}$ 。

图 G 的邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$ 可体现节点间的通信

关系, 若节点 i 与 j 存在通信路径, 则 $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$; 且对角线 $a_{ii} = 0$ 。拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}]$ 表示为

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum a_{ij}, i = j & j \in N_i \\ -a_{ij}, i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

1.2 一致性算法模型

一致性算法广泛应用于微电网的分布式控制, 是指各节点状态变量由初始值收敛到相同值的迭代过程^[13]。本文采用离散一致性算法, 迭代过程为

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j(k) \quad (2)$$

写成矩阵形式为

$$X[k+1] = DX[k] \quad (3)$$

式中: $x_i(k+1)$ 为经 $k+1$ 次迭代后节点 i 的状态变量; $x_j(k)$ 为经 k 次迭代后节点 j 的状态变量; d_{ij} 为状态转移矩阵系数; D 为对应状态转移矩阵。

通过引入收敛精度 ε 可改善一致性算法迭代性能, 式(2)更新为

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j(k) + \varepsilon g[x(k)] \quad (4)$$

写成矩阵形式为

$$X[k+1] = DX[k] + \varepsilon G[k] \quad (5)$$

式中 $g[x(k)]$ 为状态变量 $x(k)$ 的偏差函数。

在分布式通信网络中, 各 BESS 通过本地与邻居节点间信息交互, 并基于状态转移矩阵 D 完成迭代更新。状态转移矩阵 D 的构造方式会影响一致性算法收敛速度。为实现算法的高效性与准确性, 按文献[18]所提方式构造状态转移矩阵系数 d_{ij} :

$$d_{ij} = \begin{cases} 2 / (n_i + n_j + 1), & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} 2 / (n_i + n_j + 1), & i = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中 n_i 和 n_j 为节点 i 与 j 的邻居个数。

当状态转移矩阵 D 为双随机矩阵时, 各节点状态变量 $x_i(k)$ 可通过一致性算法迭代收敛于初始状态变量的平均值^[13], 即:

$$x_1(\infty) = x_2(\infty) = \dots = x_n(\infty) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(0) \quad (7)$$

式中 $x_i(0)$ 为节点 i 处的初始状态变量。

2 基于一致性算法的储能控制策略

2.1 问题描述

由于光伏, 风力等清洁能源具有时变性及波动性的特点, 在新能源渗透率过高的自治微电网群中可接入 DBESS 克服新能源波动性带来的不足, 维

持系统内动态功率稳定。

在此过程中，由于 BESS 的充放电损耗，将对其运行成本产生不利影响。文献[18-19]提出在电池储能的 SoC 值处于正常范围时，其充放电效率与输出功率可拟合为线性关系，表示为

$$\eta_i = a_i - b_i P_{B,i} \quad (8)$$

式中： η_i 为微电网 i 内等效 BESS 充放电效率； a_i 和 b_i 为对应 BESS 的参数，与储能硬件参数、容量、使用寿命相关； $P_{B,i}$ 为对应 BESS 的输出功率。

则电池储能的运行成本函数可表示为

$$C_i(P_{B,i}) = S(1 - \eta_i)P_{B,i} \quad (9)$$

经数学推导可得：

$$C_i(P_{B,i}) = (S - Sa_i)P_{B,i} + Sb_i P_{B,i}^2 \quad (10)$$

式中： C_i 为微电网 i 内 BESS 的运行成本； S 为实时电价。

因此，通过对 BESS 输出功率的合理分配，可提高其充放电效率，从而有效降低系统运行成本。由于无功损耗较小，本文主要考虑 BESS 有功功率运行成本。

2.2 储能单元运行成本目标函数

本文通过合理分配 BESS 输出功率，实现自治微电网群的最优经济运行。在此过程中，不仅要求系统内有功功率达到动态稳定，还需满足 BESS 输出功率约束与 SoC 约束条件^[18]。其目标函数与约束条件可用数学模型概括为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n C_i(P_{B,i}) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n P_{G,i} - \sum_{i=1}^n P_{Load,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_{L,i} - \sum_{i=1}^n P_{B,i} = 0 \\ P_{B,i}^{\min} \leq P_{B,i} \leq P_{B,i}^{\max} \\ S_{soc,i}^{\min} \leq S_{soc,i} \leq S_{soc,i}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： n 为自治微电网个数； $P_{B,i}$ 、 $P_{G,i}$ 和 $P_{Load,i}$ 分别为第 i 个微电网中 BESS 输出有功功率，DG 发出有功功率之和与负荷吸收功率； $P_{L,i}$ 为微电网 i 与其邻居微电网间线损之和； $P_{B,i}^{\max}$ 和 $P_{B,i}^{\min}$ 分别为第 i 个 BESS 输出功率的上下限； $S_{soc,i}^{\max}$ 和 $S_{soc,i}^{\min}$ 分别为第 i 个 BESS 荷电状态的最大值与最小值。

通过式(10)与(11)构建拉格朗日函数：

$$l(P_{B,i}) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{B,i}) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{G,i} - \sum_{i=1}^n P_{Load,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_{L,i} - \sum_{i=1}^n P_{B,i} \right) \quad (12)$$

式中 λ 为拉格朗日乘子。

对 $P_{B,i}$ 求偏导得到最优解，可表示为

$$\frac{\partial l_i}{\partial P_{B,i}} = \frac{\partial C_i}{\partial P_{B,i}} - \frac{\lambda}{P_i} = 0 \quad (13)$$

定义各 BESS 的修正增量成本 r_i 为

$$r_i = (\partial C_i / \partial P_{B,i}) P_i = (1 - a_i + 2b_i P_{B,i}) P_i \quad (14)$$

式中： $P_i = S / (1 + \partial P_L / \partial P_{B,i})$ 为线损修正因子； P_L 为系统线路损耗总和，表示为 $P_L = 0.5 \sum P_{L,i}$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

通过式(13)和(14)可得最优解为

$$r_1 = r_2 = \dots = r_n = \lambda \quad (15)$$

即储能单元经济运行的最优解为各 BESS 的修正增量成本相等。

由式(14)可以看出，修正增量成本不仅与储能充放电效率相关，还需考虑系统内线路损耗成本。

下面求解线损修正因子参数。

交流微电网为低压微电网，其线路阻抗主要呈阻性，忽略线路对地支路。则微电网 i 与 j 间线损计算模型为

$$P_{L,ij} = U_i g_{ij} (U_i - U_j), j \in N_i \quad (16)$$

式中： $P_{L,ij}$ 为微电网 i 和 j 之间的线路损耗； g_{ij} 为对应传输线路的电导； U_i 和 U_j 对应微电网的电压幅值。

系统内线路损耗总和表示为

$$P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} P_{L,ij} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} U_i g_{ij} (U_i - U_j) \quad (17)$$

通过式(14)与(17)，可求得修正因子 P_i 为

$$P_i = S / \left[1 + \frac{\partial P_L}{\partial P_{B,i}} \right] = S / \left[1 + \frac{\sum_{j \in N_i} 2(U_i - U_j) g_{ij}}{\sum_{j \in N_i} (2U_i - U_j) g_{ij}} \right] \quad (18)$$

各相邻微电网间利用通信网络传递电压信息，通过式(18)求得线损修正因子，随后根据式(14)计算得出修正增量成本^[22]。

本文以 DBESS 作为研究对象设计分布式控制策略，关键难题是利用相邻 BESS 间信息交互使得计及线路损耗的修正增量成本迭代一致，即实现了自治微电网中储能单元的经济协调运行。为解决这一问题，本文将修正增量成本作为一致性变量，提出了基于一致性算法的 DBESS 分层控制策略。

3 基于一致性算法的分层控制策略设计

本文中 BESS 协调控制采用分层控制。上层控制器基于一致性算法，为下层控制提供储能输出功率参考值；下层控制采用双环控制，实时检测 BESS 输出功率，实现 BESS 有功功率的合理分配。

3.1 上层控制算法实现过程

当自治微电网中分布式电源输出功率与负荷

吸收功率不匹配时, 定义供需不平衡功率为

$$P_{D,i} = P_{G,i} - P_{Load,i} - \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} P_{L,ij} \quad (19)$$

式中 $P_{D,i}$ 为微电网 i 中供需不平衡功率。

为实现自治微电网群稳定运行, 引入 DBESS 吸收不平衡功率, 表示为

$$\sum_{i=1}^n P_{D,i} = \sum_{i=1}^n P_{B,i} \quad (20)$$

当微电网群不平衡功率总和为正时, 各 BESS 处于充电状态; 反之, 则各 BESS 处于放电状态。

为更简明直观地表达微电网内功率平衡状况, 定义不平衡功率偏差值为

$$P_{Derr,i} = P_{B,i} - P_{D,i} \quad (21)$$

式中 $P_{Derr,i}$ 为微电网 i 内不平衡功率偏差值, 当微电网内输入/输出功率达到动态平衡, $P_{Derr,i}$ 为 0。

根据一致性算法相关理论, 设计第 i 个微电网内 BESS 修正增量成本、输出功率及系统内不平衡功率偏差值迭代过程为

$$r_i(k+1) = \sum_{j=1}^n d_{ij} r_j(k) + \varepsilon P_{Derr,i}(k) \quad (22)$$

$$P_{B,i}(k+1) = \frac{a_i - 1 + r_i(k+1) / p_i}{2b_i} \quad (23)$$

$$P_{Derr,i}(k+1) = \sum_{j \in N_i} d_{ij} [P_{Derr,i}(k) + P_{B,i}(k+1) - P_{B,i}(k)] \quad (24)$$

式中: $r_i(k)$ 为迭代 k 次后 BESS 的修正增量成本; 状态转移矩阵系数 d_{ij} 根据式(6)进行构造。

根据一致性算法迭代规则, 各 BESS 通过局部信息交互完成全局信息传递, 可实现修正增量成本与不平衡功率偏差值收敛一致, 且最终收敛值仅与其初始状态有关^[13]。设定各状态变量初始值为

$$\begin{cases} P_{Derr,i}(0) = 0 \\ P_{B,i}(0) = P_{G,i}(0) - P_{Load,i}(0) - \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} P_{L,ij}(0) \\ r_i(0) = [(1 - a_i + 2b_i P_{B,i}(0)) / p_i] \end{cases} \quad (25)$$

在一致性算法迭代过程中, 各储能单元输出功率 $P_{B,i}$ 需满足式(26)所示约束范围。

$$P_{B,i}(k) = \begin{cases} P_{B,\min}, P_{B,i}(k) < P_{B,\min} & \& S_{soc}^{\min} \leq S_{soc} \leq S_{soc}^{\max} \\ P_{B,i}^*(k), P_{B,\min} \leq P_{B,i}^*(k) \leq P_{B,\max} & \& S_{soc}^{\min} \leq S_{soc} \leq S_{soc}^{\max} \\ P_{B,\max}, P_{B,\max} < P_{B,i}^*(k) & \& S_{soc}^{\min} \leq S_{soc} \leq S_{soc}^{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

式中 $P_{B,i}^*(k) = [a_i - 1 + r_i(k) / p_i] / 2b_i$ 为对应 BESS 最优输出功率。若储能存在出力越限情况, 则优化 $P_{B,i}$

为输出功率的上下限值; 若储能存在 SoC 越限情况, 则对应 BESS 退出系统运行。

根据所提控制策略, 在一个控制周期 T 内上层控制流程图如图 1 所示, 详细步骤为:

步骤 1, 各分布式控制器通过通信网络实时更新自身与邻居微电网的数据信息, 构建微电网群拓扑结构, 并设定状态转移矩阵。

步骤 2, 根据本地与邻居的电压信息, 由式(18)求得线损修正因子, 随后根据式(25)确定各微电网内初始状态变量。

步骤 3, 在迭代周期 Δt 内, 根据式(22)~(24)对储能修正增量成本进行迭代, 并求得储能相应输出功率。同时, 实时更新各微电网不平衡功率偏差值。

步骤 4, 判断储能 SoC 是否越限, 若越限, 则该储能单元退出系统运行, 重新更新自治微电网群拓扑结构, 返回步骤 2; 若 SoC 处于正常范围内, 则基于功率约束条件, 输出 BESS 功率参考值。

步骤 5, 计算 BESS 修正增量成本误差, 若其误差满足收敛精度 ε , 则输出 BESS 功率参考值; 若没有达标, 则重复步骤 3。

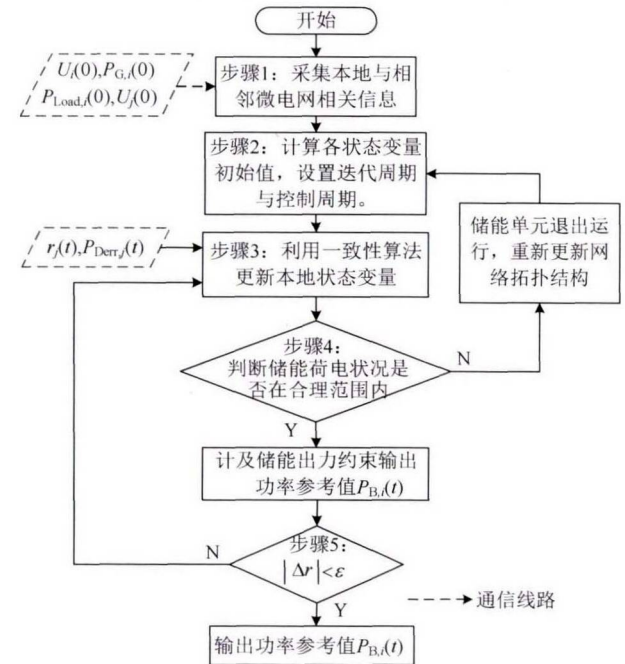


图 1 一致性算法流程图

Fig. 1 Flow chart of distributed algorithm

3.2 下层控制算法实现过程

下层控制采用功率-电流双环控制。系统外环使 BESS 输出功率追踪其参考值变化, 功率误差经过外环控制器得到内环电流参考值; 系统内环通过对电流的快速追踪, 调整 PWM 的输出脉冲, 进而调整 AC/DC 功率变换器出口侧电压。通过内、外环的共同作用, 实现输出功率快速、准确调整^[18]。

3.3 分布式电源控制方式

为提高自治微电网群供电可靠性, 维持系统内电压/频率稳定, 往往还需设计多种分布式电源的控制方式。文中分布式电源包括光伏发电与同步发电机两种, 光伏发电采用包含最大功率点追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 功能的控制方式, 其出力随外界环境变化而变化, 具有间歇性和波动性。当系统内出现供需不平衡功率时, 各 DBESS 采用所提分布式控制策略进行协调运行, 在保证自治微电网群中供需平衡的基础上实现储能的经济化调度。此外, 通过分布式电源的有效控制, 可进一步对各微电网中电压/频率起到支撑作用。下面介绍其控制方式。

光伏发电采用计及电压控制的 MPPT 控制策略, 提高新能源利用率。控制方式运用电压-电流双闭环控制实现, 其中直流电压闭环实现最大输出功率的实时追踪, 交流电压闭环实现光伏发电出口侧电压稳定^[24-25]。

同步发电机控制采用文献[26]所提控制策略, 在微电网运行中承担两个任务: 一是当可再生能源与储能单元无法满足负荷需求时, 同步发电机作为应急电源提供所需功率, 维持系统发电-负荷的动态平衡。二是当微电网内部供需平衡时, 提高惯性和阻尼特性, 对系统内电压/频率起支撑作用。

4 仿真算例分析

4.1 仿真模型

为验证本文所提分布式控制策略的有效性, 在实时仿真平台 RTDS 中搭建中包含 4 个自治微电网的群组模型, 其拓扑结构如图 2 所示。图中传输线路、通信线路分别用于微电网 (microgrid, MG) 间电能和信息传输。

本文所搭建的自治微电网群额定电压/频率为 380 V/50 Hz, 系统内参数设定如表 1 所示。

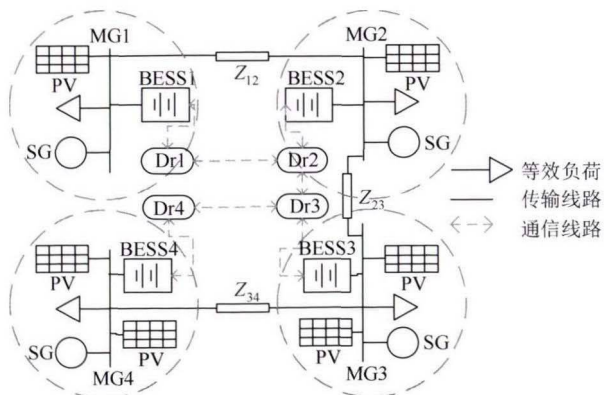


图 2 微电网结构
Fig. 2 Microgrid's structure

各储能单元相关参数如表 2 所示, 设定 DBESS 控制策略中通信周期 $\Delta t = 5 \text{ ms}$, 控制周期 $T = 1 \text{ s}$ 。

表 1 系统参数
Tab. 1 Parameter of system

MG 组件	参数	取值
SG	U_N / V	380
	$P_{\text{max}} / \text{kW}$	200
PV	U_N / V	380
	$P_{\text{max}} / \text{kW}$	200
线路 Z	Z_{12}	$0.5 + j0.0375$
	Z_{23}, Z_{34}	$0.1 + j0.0075$

表 2 储能参数
Tab. 2 Parameter of the BESS

BESS	a_i	b_i	$[P_{\text{min}}, P_{\text{max}}] / \text{kW}$	$[S_{\text{soc}}^{\text{min}}, S_{\text{soc}}^{\text{max}}]$
BESS1	0.85	0.008	[0, 50]	[0.1, 0.9]
BESS2	0.83	0.006	[0, 50]	[0.1, 0.9]
BESS3	0.88	0.009	[0, 50]	[0.1, 0.9]
BESS4	0.92	0.01	[0, 50]	[0.1, 0.9]

4.2 仿真结果与分析

为验证所提策略的高效可靠, 本文对正常情况、BESS 输出功率过限情况、储能 SoC 过限情况和时变不平衡功率情况下 4 种应用场景进行仿真。并通过与多种 DBESS 控制方式进行比较, 证明所提策略的有效性与经济性。

4.2.1 有效性分析

设置各微电网中分布式电源与负荷稳定不变, 各微网内光伏输出功率总和为 $P_{\text{PV}2} = 150 \text{ kW}$, $P_{\text{PV}1} = P_{\text{PV}3} = P_{\text{PV}4} = 100 \text{ kW}$; 各等效负荷吸收功率为 $P_{\text{Load}1} = P_{\text{Load}2} = P_{\text{Load}3} = P_{\text{Load}4} = 120 \text{ kW}$ 。在起始时刻, 投入所提分布式控制策略, 各状态变量迭代过程如图 3 所示。

由图 3(a)(b)可以看出, 各 BESS 修正增量成本初始值各不相同, 经过一致性算法迭代后趋于一致, 并且 BESS 可按照修正增量成本一致原则实现有功功率合理分配。图 3(c)可看出, 从启动控制策略开始, 各微电网内不平衡功率偏差较大, 经过短时调节, 可迭代为 0, 表明系统内整体实现了供需平衡。图 3(d)为仿真过程中微电网群内总有功功率损耗变化过程, 包括各 BESS 有功功率损耗和线路损耗。可以看出, 所提控制策略有效降低了微电网内有功功率损耗, 从而减小分布式储能运行成本。

4.2.2 功率约束情况

各微网内光伏输出功率总和为 $P_{\text{PV}2} = 180 \text{ kW}$, $P_{\text{PV}1} = P_{\text{PV}3} = P_{\text{PV}4} = 100 \text{ kW}$; 各等效负荷吸收功率为 $P_{\text{Load}1} = P_{\text{Load}2} = P_{\text{Load}3} = P_{\text{Load}4} = 130 \text{ kW}$ 。则所提控制策略迭代过程如图 4 所示。

可以看出, 启动分布式控制策略后, 储能单元按照一致性算法调整 BESS 修正增量成本与输出功

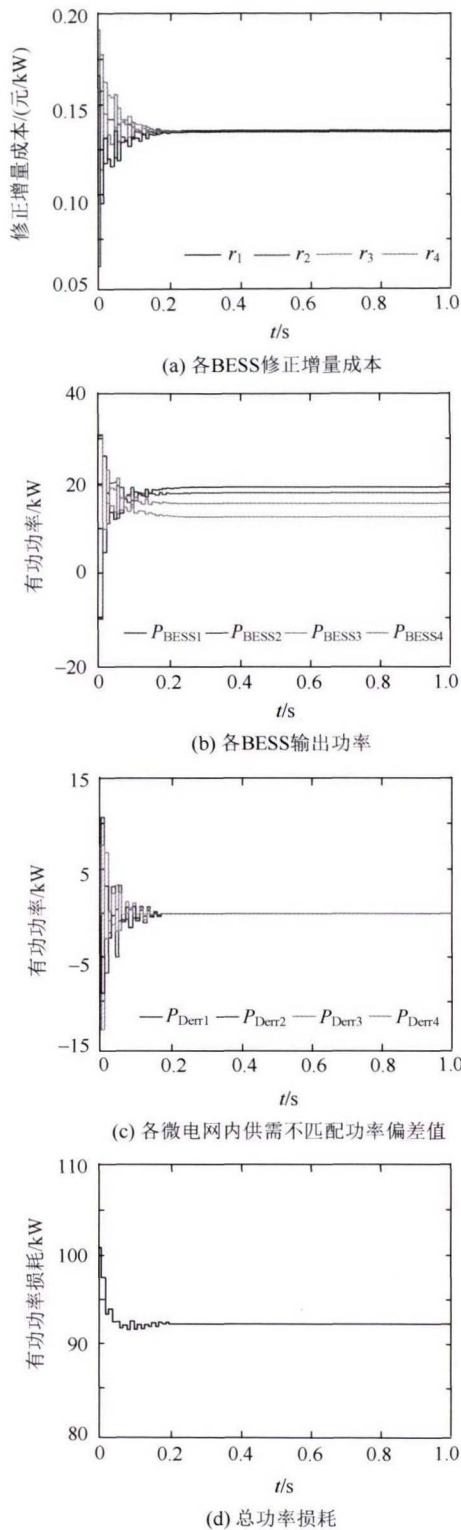


图3 正常情况下的迭代过程

Fig. 3 Iterative process under normal conditions

率，并通过功率约束环节对 BESS 进行限制，控制其输出功率处于安全范围内。仿真结果表明所提控制策略对储能输出功率具有强约束性。

4.2.3 储能 SoC 约束情况

按 4.2.1 节设置自治微电网群中分布式电源与负荷功率情况。假设在 $t=0$ 时，BESS3 由于其 SoC 超限而退出系统运行，所产生的不平衡功率缺额由其

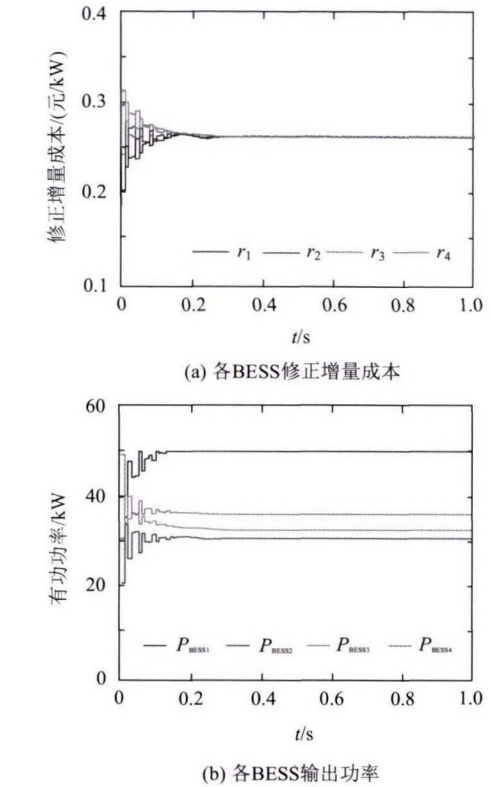


图4 输出功率超限情况下的迭代过程

Fig. 4 Iterative process with power exceeding the range

余节点 BESS 共同承担，各 BESS3 修正增量成本与输出功率迭代过程如图 5 所示。

可以看出，在 $t=0$ 时刻，BESS3 由于其 SoC 超限，退出系统运行，其修正增量成本维持初始值不

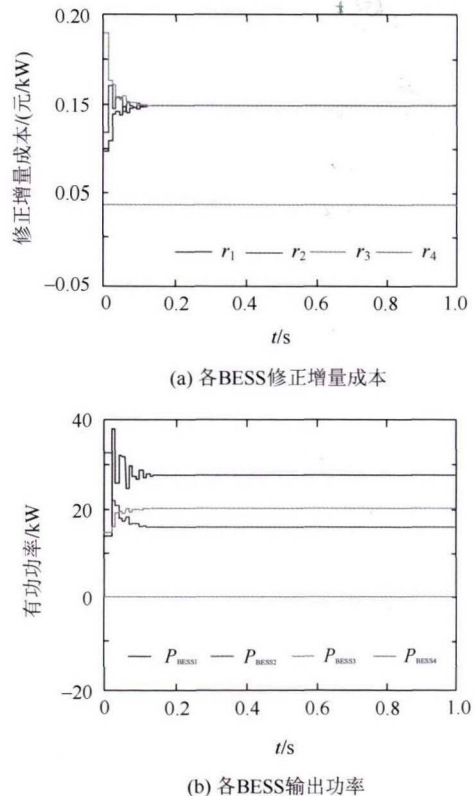


图5 SoC 超限情况下的迭代过程

Fig. 5 Iterative process with SoC exceeding the range

变, 输出有功功率为 0。各 BESS 分布式控制器通过相邻节点信息交互, 更新微电网拓扑结构, 修正状态转移矩阵 D 。其余节点基于一致性算法, 重新按 BESS 修正增量成本一致原则进行输出功率的合理分配。

4.2.4 时变性不平衡功率情况

为进一步分析实际情况下分布式控制策略的响应能力, 本节针对具有时变性的分布式能源和负荷进行长时间仿真, 设定各微电网中光伏出力与等效负荷变化曲线如图 6。

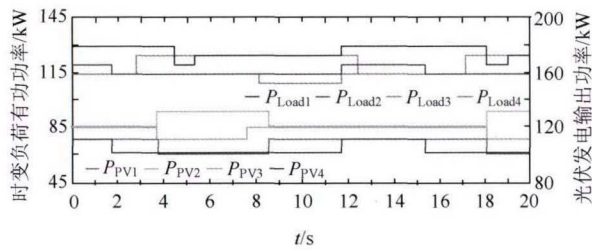


图 6 分布式电源和负荷功率变化曲线

Fig. 6 Power curve of distributed energy and load

设定储能单元分布式控制策略中通信周期 $\Delta t = 5\text{ms}$, 控制周期 $T = 1\text{s}$ 。其中, 通信周期与传输距离, 传输速率和通信延时有关^[27]; 控制周期由实践得出, T 过小会引起系统暂态性能降低, 甚至失稳; 反之, T 过大则会造成系统稳态精度较差, 电能质量降低。

图 7(a)(b)为各 BESS 修正增量成本及实际输出功率仿真曲线, 可以看出, 在每个控制周期 T 内, 各储能单元都可通过所提控制策略实现修正增量成本一致, 完成 BESS 输出有功功率的合理分配; 图 7(c)可看出各节点不平衡功率偏差值可迭代为 0, 表明系统内达到供需平衡。

4.2.5 不同控制方式对比分析

为验证本文所提控制策略的有效性与经济性, 将以下 3 种不同分布式控制方式进行对比分析:

控制方式 1, 各微电网间不进行信息交互, 各 BESS 按完全分布式控制独立运行。

控制方式 2, 根据文献[18]所提控制策略, 各 BESS 间进行不考虑线路损耗的分布式一致性控制。

控制方式 3, 根据本文所提控制策略, 基于分布式一致性算法, 各 BESS 间进行计及线路损耗的经济优化控制。

1) 电压/频率波动情况。

在如图 6 所示的功率波动曲线下, 分别对 3 种控制方式进行长时间仿真, 不同控制方式下各微电网电压/频率长时间仿真结果见图 8。可以看出, 在 3 种不同 DBESS 控制方式下, 各微电网内电压/频

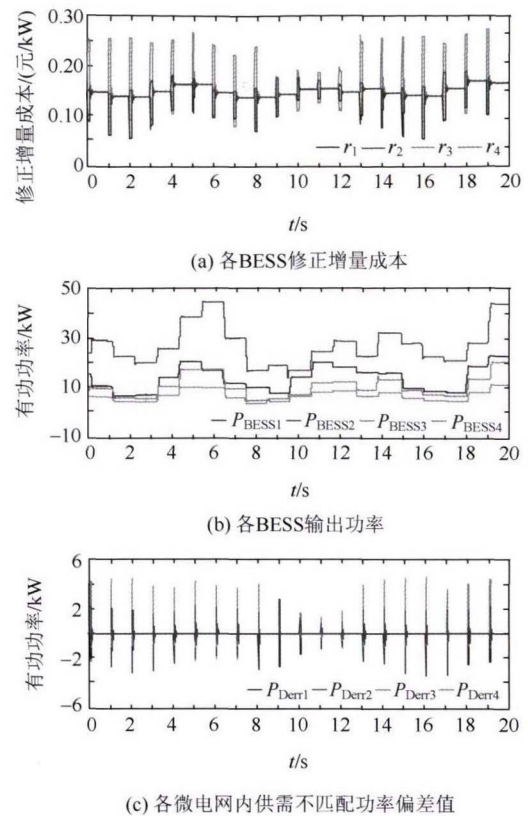


图 7 功率波动情况下的仿真结果

Fig. 7 Simulation results under power fluctuations

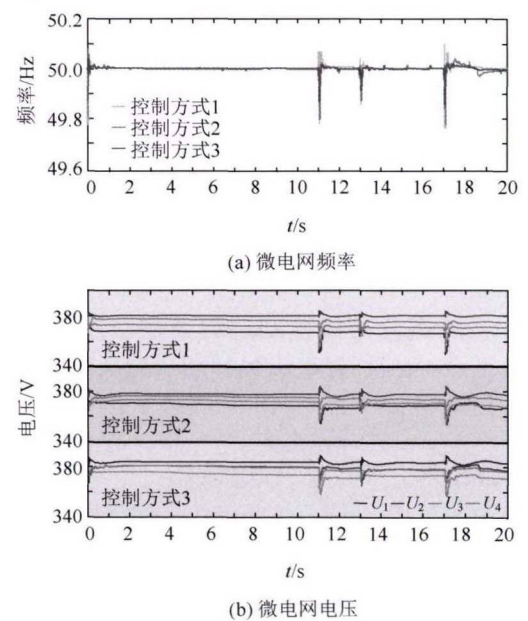


图 8 不同控制方式下电压/频率变化曲线

Fig. 8 Voltage/frequency results under different methods

率波动均处于合理误差范围内, 满足电能质量要求, 表明在 3 种控制方式下, 系统均可维持稳定状态。

2) 经济性对比。

表 3 为不同控制方式下运行成本对比结果, 运行成本不计及储能租赁或安装成本, 仅考虑 BESS 充放电损耗成本和线路损耗成本。

可以看出, 在本文所提的控制方式 3 下, 微电

表 3 不同控制方式运行成本对比
Tab. 3 Comparison of total system operating costs used different methods

控制方式	储能损耗成本/ (元/(kW·h))	线路损耗成本/ (元/(kW·h))	总体成本/ (元/(kW·h))
1	0.033	0.02	0.053
2	0.0214	0.0327	0.0541
3	0.0225	0.0271	0.0496

网群综合考虑 BESS 充放电损耗与线路损耗, 系统总运行成本最小, 其运行成本相较控制方式 1 降低 6.4%, 相较控制方式 2 降低 8.5%, 表明所提策略可实现 BESS 的最优经济运行。

综上, 在 DBESS 不同控制方式下, 电压/频率波动情况差别较小, 均可将其误差控制在合理范围内。但本文所提控制策略可综合考虑储能效率与线路损耗, 其经济性相较于其他方式有显著提高。

5 结论

本文针对自治型微电网群的合作运行, 基于一致性协议相关理论, 提出了计及线路损耗的分布式分层经济控制策略, 可有效提高 DBESS 的运行经济效益。其优点在于:

1) 所提策略将运行优化问题转换为分布一致性问题, 仅需相邻节点间交互所需信息, 无需中心控制器协调控制, 提高了系统可靠性。

2) 所提策略在不同储能工况下具有适用性。

3) 相较于文中所对比的分布式控制方式, 所提策略不仅实现了自治微电网群的稳定运行, 还能够实现 DBESS 的经济调度, 表明所提方案的经济性与有效性。

本文所提分布式控制过程中还涉及响应时间的优化策略, 电压/频率的无差调节等问题, 将作为下一步研究重点。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
Yang Xinfu, Su Jian, Liu Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70(in Chinese).
- [2] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
Zhou Lin, Huang Yong, Guo Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 39(7): 147-152(in Chinese).
- [3] 熊雄, 吴鸣, 季宇, 等. 微电网混合协调控制及功率管理策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1419-1427.
Xiong Xiong, Wu Ming, Ji Yu, et al. Power management and coordinated control strategy research of multi-microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1419-1427(in Chinese).
- [4] 赵敏, 陈颖, 沈沉, 等. 微电网群特征分析及示范工程设计[J]. 电

- 网技术, 2015, 39(6): 1469-1476.
- Zhao Min, Chen Ying, Shen Chen, et al. Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project design[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1469-1476(in Chinese).
- [5] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
Li Xiangjun, Wang Shangxing, Hui Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325(in Chinese).
- [6] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
Li Jianlin, Ma Huimeng, Yuan Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375(in Chinese).
- [7] Xie J, Lu J, Mao C, et al. Optimal control of battery energy storage system based on variable smoothing time constant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 96-102.
- [8] 王炜信, 段建东, 张润松, 等. 孤岛电网中多储能设备 SOC 一致性优化策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 126-135.
Wang Weixin, Duan Jiandong, Zhang Runson, et al. Optimal state-of-charge balancing control for paralleled battery energy storage devices in islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 126-135(in Chinese).
- [9] 李欣然, 邓涛, 黄际元, 等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2362-2369.
Li Xinran, Deng Tao, Huang Jiyuan, et al. Battery energy storage systems self-adaptation control strategy in fast frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2362-2369(in Chinese).
- [10] 李若, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能电池参与二次调频的综合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 74-82.
Li Ruo, Li Xinran, Tan Zhuangxi, et al. Frequency control considering deep and fast load changing capability of thermal power units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 74-82(in Chinese).
- [11] 谢开贵, 胡博, 沈玉明, 等. 计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2371-2378.
Xie Kaigui, Hu Bo, Shen Yuming, et al. Optimal economic operation of isolated microgrid considering battery life loss[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2371-2378(in Chinese).
- [12] Xiao L, Boyd S. Optimal scaling of a gradient method for distributed resource allocation[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2006, 129(3): 469-488.
- [13] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007. 95(1): 215-233.
- [14] Yazdani M, Mehrizi-Sani A. Distributed control techniques in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2901-2909.
- [15] 陈刚, 包宇庆, 张金龙, 等. 计及寿命损耗成本的储能单元分布式协同控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1495-1501.
Chen Gang, Bao Yuqing, Zhang Jinlong, et al. Distributed cooperative control strategy for energy storage units considering life loss cost [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1495-1501(in Chinese).
- [16] Zhang Z, Chow M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1761-1768.
- [17] 李一琳, 董涛, 刘明波, 等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 96-103+

- 228-230.
Li Yilin, Dong Ping, Li Mingbo, et al. Distributed coordinated control of DC microgrid based on finite-time consensus algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 96-103+228-230(in Chinese).
- [18] Xu Y, Zhang W, Hug G, et al. Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 238-248.
- [19] Stevens J W, Corey G P. A study of lead-acid battery efficiency near top-of-charge and the impact on PV system design[C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Washington, USA: IEEE, 2002: 1485-1488.
- [20] 程亦直, 张沛超, 季珉杰, 等. 分布式电池储能系统参与自动发电控制的协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 66-73.
Cheng Yizhi, Zhang Peichao, Ji Minjie, et al. Two-level hierarchical model predictive control for AGC of AC/DC interconnected power grid with integration of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 66-73(in Chinese).
- [21] 蒲天骄, 刘威, 陈乃仕, 等. 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1579-1590.
Pu Tianjiao, Liu Wei, Chen Naishi, et al. Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1579-1590(in Chinese).
- [22] Binetti G, Davoudi A, Lewis F L, et al. Distributed consensus-based economic dispatch with transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1711-1720.
- [23] 苏晨, 吴在军, 周力, 等. 计及线路损耗的自治型微电网群分布式经济控制[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1839-1846.
Su Chen, Wu Zaijun, Zhou Li, et al. Distributed economic control for islanded microgrid cluster with transmission losses[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1839-1846(in Chinese).
- [24] Li X, Hui D, Lai X. Battery energy storage station(BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.
- [25] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 0-973.
- [26] Xu Y, Zhang W, Liu W, et al. Distributed subgradient-based coordination of multiple renewable generators in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 23-33.
- [27] 郝然, 艾芊, 朱宇超. 基于多智能体一致性的能源互联网协同优化控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 10-17+57.
Hao Ran, Ai Qi, Zhu Yuchao, et al. Cooperative optimal control of energy internet based on multi-agent consistency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 10-17+57(in Chinese).



张步云

收稿日期: 2019-09-20.

作者简介:

张步云(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: 573523494@qq.com;
韩肖清(1964), 女, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为电力系统运行与控制、新能源与微电网运行等, E-mail: hanxiaqing@tyut.edu.cn.

(责任编辑 王金芝)