

控制与决策

Control and Decision

孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

许德明, 李泽, 崔国增, 郝万君

引用本文:

许德明, 李泽, 崔国增, 等. 孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 2034–2041.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

控制与决策. 2021, 36(8): 1849–1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪

Finite-time cooperative path following of surface vessels with surge velocity and yaw angle constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 363–370 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0977>

一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

许德明, 李 泽[†], 崔国增, 郝万君

(1. 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 苏州智慧城市研究院, 江苏 苏州 215009; 3. 江苏省建筑智慧节能重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要: 针对孤岛微电网异构电池储能系统频率、电压以及电池能量的一致性, 考虑初级下垂控制, 提出一种新的分布式有限时间次级控制策略. 采用所提出的控制方案能够在有限时间内实现系统频率、电压恢复一致到额定值, 并获得电池能量等级的均衡一致和期望的有功功率分配. 该控制方法的优势在于整定时间的上界独立于系统的任意初始条件, 能够保证微电网有限时间控制的及时性, 同时基于Lyapunov方法分析控制策略的一致性收敛特性. 最后, 通过Matlab/Simulink仿真实验, 结果进一步佐证了分布式有限时间次级控制策略的有效性.

关键词: 孤岛微电网; 电池储能系统; 一致性; 有限时间; 次级控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 许德明, 李泽, 崔国增, 等. 孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 2034-2041.

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid

XU De-ming, LI Ze[†], CUI Guo-zeng, HAO Wan-jun

(1. School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Suzhou Institute of Intelligent City, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Province Key Laboratory of Intelligent Building Energy Efficiency, Suzhou 215009, China)

Abstract: This paper investigates the consensus problem of the frequency, voltage and energy level for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid. Considering the primary droop control, a new distributed finite-time secondary control strategy is proposed. The proposed control scheme is implemented to restore the frequency and voltage to the rated values, and achieve the energy level balancing and active power sharing within a finite-time. The advantage of this control method is that the upper bound of settling time is independent of any initial conditions, which guarantees the timeliness of finite-time control of the microgrid. The consensus convergence characteristics of the proposed control strategy are analyzed based on the Lyapunov method. Finally, simulation results with Matlab/Simulink demonstrate the effectiveness of the proposed distributed finite-time secondary control strategy.

Keywords: islanded microgrid; battery energy storage system; consensus; finite-time; secondary control

0 引言

微电网是一种新型的能源结构,它容纳了大量的分布式电源、负荷和储能装置,并能在并网和孤岛两种模式下运行^[1]. 并网运行时,它向主网提供或吸收电能,一旦主网发生故障,则能从公共耦合点处断开,进入孤岛模式运行^[2]. 孤岛模式时,系统内部一些关键负荷对电能质量的要求较高. 为此,电池储能系统(battery energy storage systems, BESSs)开始广泛应用

在微电网中,以提升电能质量和供电的可靠性^[3].

储能系统传统的控制方法采用集中式控制,这种控制方式不仅可靠性和鲁棒性差,而且不能适应系统可扩展性的要求^[4]. 针对这一弊端,利用分布式方法研究储能系统的控制问题成为研究热点. 文献[5]设计了分布式滑膜控制器,以实现直流微电网中BESS之间的荷电状态平衡. 文献[6]提出了分布式均衡策略来解决多个BESS的荷电状态不平衡问题. 以上分

收稿日期: 2020-01-04; 修回日期: 2020-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703059, 61873144); 江苏省自然科学基金项目(BK20170291); 中国博士后基金项目(2018M632621).

责任编辑: 关新平.

[†]通讯作者. E-mail: lizeing@163.com.

布式方法虽有效实现了控制目标,但未考虑到储能系统的下垂控制. 微电网储能系统的下垂控制对于稳定系统频率和电压,以及分配有功和无功功率有着良好的控制效果^[7]. 文献[7]考虑储能系统的频率下垂控制,设计了一种能量等级和频率的分布式协同控制系统,但未考虑储能单元的异构性,储能系统的异构性是由储能装置容量的差异性所致,故为了使控制结果更加精确,在研究储能系统的控制问题时需考虑这一因素. 为此,文献[8]同时考虑了BESS的异构性和下垂控制,分别设计了有领导者和无领导者的一致性算法,以实现对比BESS的输出频率、电压、能量等级和输出有功功率的控制. 然而,文献[8]采用的是渐近收敛的协同控制方法,使得算法的收敛时间可能趋于无穷大.

近年来,基于有限时间的控制策略已被应用到微电网的控制领域,取得了较好的控制效果. 例如,文献[9]提出了基于有限时间的次级控制策略,在有限时间内恢复系统的频率和电压,但仅针对由分布式电源供电的微电网. 文献[10]提出了微电网异构BESS的分布式有限时间控制策略,在有限时间内实现对电池能量等级、频率和电压的一致性控制. 然而,该方法估计的整定时间上界受制于系统的初始状态,其往往难于测得. 文献[11-12]研究多智能体系统的一致性问題,提出了一类能够预设收敛时间的一致性算法. 文献[13]提出了孤岛微电网的分布式固定时间控制策略,在固定时间内实现控制目标,然而,仅考虑了由分布式发电单元供电的微电网. 随着电池储能技术的进步,利用电池储能装置供电的微电网在孤岛模式时能够提供更加稳定的电能.

鉴于此,本文针对含有大量异构电池储能装置的孤岛微电网,采用分级控制的方式提出一种分布式有限时间次级控制策略,不同于以往储能系统的控制策

略,所提出的控制方法能够在有限时间内完成控制目标,且整定时间的上界不依赖于系统的初始条件. 最后从理论和仿真实验两个角度验证了所提出控制策略的正确性和有效性.

1 BESS的模型描述和预备知识

1.1 BESS模型

图1为微电网中一个BESS的基本控制结构,如图1所示,每个BESS单元主要由一个储能电池、一个电压源逆变器(VSC)、一个LC滤波器、一个输出连接器、功率计算模块以及各个分级的控制器构成. BESS采用分级控制的方式,分级控制主要包括初级控制和次级控制. 初级控制由电流控制器、电压控制器和下垂控制器构成^[10]. 下垂控制器按照下垂系数调节各BESS的输出有功功率和输出无功功率,以满足微电网的功率需求. 考虑到电压控制器和电流控制器均具有PI控制结构,文献[7]给出了具体的控制方法. 该类控制器具有较快的动态特性,通常用BESS的输出电压幅值代替下垂控制器输出电压的d轴分量,具体的下垂控制方程^[9-10]为

$$\omega_i = \omega_i^* - k_i^p P_i, \tag{1}$$

$$v_i = v_i^* - k_i^q Q_i. \tag{2}$$

其中: k_i^p 和 k_i^q 是角频率和电压幅值的下垂系数; ω_i^* 和 v_i^* 是角频率和电压幅值的参考值. 下垂控制会造成系统的电压幅值和频率偏离额定值,为此,需要设置次级控制器对BESS的输出电压幅值和频率进行二次补偿. 次级控制器采用分布式协同控制方法,并为下垂控制器提供电压幅值和角频率的参考值,实现对系统电压和频率的恢复控制.

当微电网孤岛运行时,为满足系统内部负荷需求,所有BESS处于放电模式,部分初始能量较低的BESS会提前耗光电能. 鉴于此,考虑到电池的异构性

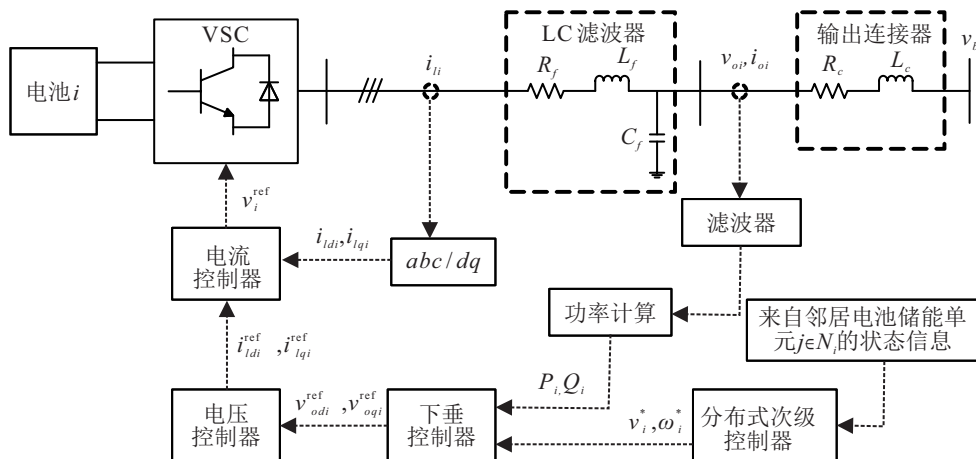


图1 单个BESS单元的控制结构

特征,在次级控制中增加对能量等级的控制,其基本的控制结构^[8]为

$$\dot{E}_i = \frac{-k_i^E}{3600} P_i + u_i^E, \quad (3)$$

$$\dot{P}_i = u_i^P. \quad (4)$$

其中: k_i^E 为表征第 i 个 BESS 异构性的系数; u_i^E 和 u_i^P 分别为第 i 个 BESS 的能量等级控制输入和有功功率控制输入,具体设计方法在下文给出.

为获得微电网孤岛运行时的频率和电压幅值的一致性,以及实现 BESS 的输出有功功率按比例分配,为第 i 个 BESS 建立如下控制结构模型:

$$\dot{\omega}_i^* = u_i^\omega + k_i^P u_i^P, \quad (5)$$

$$\dot{v}_i^* = u_i^v + k_i^Q \dot{Q}_i, \quad (6)$$

其中 u_i^ω 、 u_i^v 分别为第 i 个 BESS 的次级频率控制输入和次级电压控制输入. 如上所述,式(3)~(6)即为本文第 i 个 BESS 的控制结构模型.

1.2 基于微电网的系统建模

将微电网系统视为一个多智能体系统,每个 BESS 视为多智能体系统中的一个智能体,利用无向图 $G = \{V, E, A\}$ 表示系统的通信拓扑,用顶点集 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示系统中 N 个 BESS,边集 $E \subseteq V \times V$ 表示 BESS 之间的通信链路, $A = [a_{ij}]_{N \times N}$ 为对应的邻接矩阵,若 $(V_j, V_i) \in E$,则 $a_{ij} = a_{ji} = 1$,反之 $a_{ij} = a_{ji} = 0$. 定义入度矩阵 $D = \text{diag}\{d_i\} \in R^{N \times N}$,其中 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$. 定义拉普拉斯矩阵为 $L = D - A$,定义牵制矩阵 $B = \text{diag}\{b_i\} \in R^{N \times N}$. 考虑微电网中存在一个虚拟领导者节点为 BESS 提供参考信号,若第 i 个 BESS 能够接收到该节点提供的参考值,则 $b_i = 1$,否则 $b_i = 0$.

1.3 预备知识

引理 1^[9] 对于一个无向连通图,其拉普拉斯矩阵 L 为半正定矩阵,且 L 的第 2 小特征值 $\lambda_2(L) > 0$. 若 $1_N^T x = 0$,则 $x^T L x \geq \lambda_2(L) x^T x$. 若牵制矩阵 B 中存在元素 $b_i > 0$,则 $L + B$ 为正定矩阵,其最小特征值 $\lambda_1(L + B) > 0$,且 $x^T (L + B) x \geq \lambda_1(L + B) x^T x$.

引理 2^[11] 考虑如下标量系统:

$$\dot{y} = -\alpha y^{2-\frac{p}{q}} - \beta y^{\frac{p}{q}}, y(0) = y_0. \quad (7)$$

其中: $p < q$ 且均为正奇整数, $\alpha, \beta > 0$. 系统(7)是有限时间稳定的,且整定时间满足

$$T \leq \frac{q\pi}{2\sqrt{\alpha\beta}(q-p)}. \quad (8)$$

假设 1 无向图 G 为连通图,且系统中至少存在一个 BESS 能够接收到虚拟领导者提供的参考值.

2 BESS 的分布式有限时间次级控制

2.1 频率、有功功率和能量等级的有限时间控制

为了实现 BESS 的输出频率恢复一致到额定值,同时获得有功功率的按比例重新分配,以及实现 BESS 的电池能量等级的一致性,设计了频率、有功功率和电池能量等级的分布式有限时间控制规则. 为了简化形式,设 $\tilde{P}_i = k_i^P P_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$. 具体的控制规则如下:

$$\begin{aligned} u_i^\omega &= \\ c_\omega &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j - \omega_i)^{\frac{m}{n}} + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i)^{\frac{m}{n}} \right] + \\ c_\omega &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_j - \omega_i)^{2-\frac{m}{n}} + b_i (\omega_{\text{ref}} - \omega_i)^{2-\frac{m}{n}} \right], \quad (9) \\ u_i^P &= \\ \frac{c_P}{k_i^P} &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (\tilde{P}_j - \tilde{P}_i)^{\frac{m}{n}} + \sum_{j=1}^N a_{ij} (\tilde{P}_j - \tilde{P}_i)^{2-\frac{m}{n}} \right], \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_i^E &= \\ c_E &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (E_j - E_i)^{\frac{m}{n}} + \sum_{j=1}^N a_{ij} (E_j - E_i)^{2-\frac{m}{n}} \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

其中: $m < n$ 且均为正奇整数, $c_\omega, c_P, c_E > 0$ 为控制增益常数. 分别定义角频率、有功功率和电池能量等级的偏差变量为

$$e_{\omega i}(t) = \omega_i(t) - \omega_{\text{ref}}, \quad (12)$$

$$e_{P_i}(t) = \tilde{P}_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{P}_i(t), \quad (13)$$

$$e_{E_i}(t) = \hat{E}_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(t), \quad (14)$$

其中 $\hat{E}_i(t)$ 为方程 $\dot{E}_i(t) = u_i^E$ 的解. 考虑假设 1 中无向连通图的条件成立,有 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{\tilde{P}}_i(t) = 0$ ^[9] 和

$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{E}_i(t) = 0$ ^[10] 成立. 分别对如上所述的偏差变量求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\omega i} &= \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_{\text{ref}} = \dot{\omega}_i = u_i^\omega = \\ c_\omega &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{\omega j} - e_{\omega i})^{\frac{m}{n}} - b_i e_{\omega i}^{\frac{m}{n}} \right] + \\ c_\omega &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{\omega j} - e_{\omega i})^{2-\frac{m}{n}} - b_i e_{\omega i}^{2-\frac{m}{n}} \right], \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{pi} &= \dot{\hat{P}}_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{\hat{P}}_i = k_i^p u_i^p = \\ c_p &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{pj} - e_{pi})^{\frac{m}{n}} + \sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{pj} - e_{pi})^{2-\frac{m}{n}} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{Ei} &= \dot{\hat{E}}_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{\hat{E}}_i = u_i^E = \\ c_E &\left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{Ej} - e_{Ei})^{\frac{m}{n}} + \sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{Ej} - e_{Ei})^{2-\frac{m}{n}} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

定理1 若假设1成立,则在分布式有限时间控制规则(9)~(11)的作用下,系统能够在有限时间内实现所有BESS的输出频率恢复一致到参考值,同时获得有功功率的按比例分配,以及实现电池能量等级的一致性,且整定时间的上界不依赖于系统初始的频率、有功功率和电池能量等级的状态偏差。

证明 为了证明频率和有功功率控制的收敛性质,选取李雅普诺夫方程

$$V_1 = \frac{1}{2} e_\omega^T e_\omega + \frac{1}{2} e_p^T e_p.$$

其中: $e_\omega = [e_{\omega 1}, \dots, e_{\omega N}]^T$, $e_p = [e_{p 1}, \dots, e_{p N}]^T$. 对 V_1 求导,并根据文献[14]中的引理2和引理3,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \\ &- \frac{1}{2} \left[\sum_{i,j=1}^N (c_\omega a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}} (e_{\omega i} - e_{\omega j})^2 + \right. \\ &2 \sum_{i=1}^N (c_\omega b_i)^{\frac{2n}{m+n}} e_{\omega i}^2 + \\ &\left. \sum_{i,j=1}^N (c_p a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}} (e_{pi} - e_{pj})^2 \right]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ &\frac{1}{2} (2N(N+1))^{\frac{m-n}{2n}} \left[2 \sum_{i=1}^N (c_\omega b_i)^{\frac{2n}{3n-m}} e_{\omega i}^2 + \right. \\ &\sum_{i,j=1}^N (c_\omega a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}} (e_{\omega i} - e_{\omega j})^2 + \\ &\left. \sum_{i,j=1}^N (c_p a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}} (e_{pi} - e_{pj})^2 \right]^{\frac{3n-m}{2n}}. \end{aligned} \quad (18)$$

定义 Γ_1 和 Γ_2 ,使得式(18)可用如下公式表示:

$$\dot{V}_1 \leq -\frac{1}{2} [\Gamma_1]^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{1}{2} (2N(N+1))^{\frac{m-n}{2n}} [\Gamma_2]^{\frac{3n-m}{2n}}. \quad (19)$$

定义无向图 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 ,其对应的邻接矩阵分别为

$$\begin{aligned} A_1 &= [(c_\omega a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}}]_{N \times N}, A_2 = [(c_\omega a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}}]_{N \times N}, \\ A_3 &= [(c_p a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}}]_{N \times N}, A_4 = [(c_p a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}}]_{N \times N}. \end{aligned}$$

L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 是对应的拉普拉斯矩阵. 令 $B_1 = \text{diag}(b_i^{\omega 1})$ 和 $B_2 = \text{diag}(b_i^{\omega 2})$,其中 $b_i^{\omega 1} = (c_\omega b_i)^{\frac{2n}{m+n}}$, $b_i^{\omega 2} = (c_\omega b_i)^{\frac{2n}{3n-m}}$. 根据引理1可得

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= 2e_\omega^T (L_1 + B_1) e_\omega + 2e_p^T L_3 e_p \geq \\ &2\underline{\lambda}_1 (e_\omega^T e_\omega + e_p^T e_p) > 0, \\ \Gamma_2 &= 2e_\omega^T (L_2 + B_2) e_\omega + 2e_p^T L_4 e_p \geq \\ &2\underline{\lambda}_2 (e_\omega^T e_\omega + e_p^T e_p) > 0. \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \underline{\lambda}_1 &= \min\{\lambda_1(L_1 + B_1), \lambda_2(L_3)\}, \\ \underline{\lambda}_2 &= \min\{\lambda_1(L_2 + B_2), \lambda_2(L_4)\}. \end{aligned}$$

将式(20)改写为 $\Gamma_1/V_1 \geq 4\underline{\lambda}_1$, $\Gamma_2/V_1 \geq 4\underline{\lambda}_2$,于是有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \\ &- \frac{1}{2} [4\underline{\lambda}_1 V_1]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ &\frac{1}{2} (2N(N+1))^{\frac{m-n}{2n}} [4\underline{\lambda}_2 V_1]^{\frac{3n-m}{2n}} \leq \\ &- \frac{1}{2} [4\underline{\lambda}_3 V_1]^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{1}{2} (2N(N+1))^{\frac{m-n}{2n}} [4\underline{\lambda}_3 V_1]^{\frac{3n-m}{2n}}, \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $\underline{\lambda}_3 = \min\{\underline{\lambda}_1, \underline{\lambda}_2\}$. 考虑如下方程:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \\ &- 2^{\frac{m-n}{2n}} \underline{\lambda}_3 y^{\frac{m}{n}} - (2N(N+1))^{\frac{m-n}{2n}} 2^{\frac{n-m}{2n}} \underline{\lambda}_3 y^{2-\frac{m}{n}}, \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $y = \sqrt{2\underline{\lambda}_3 V_1}$ 为上述方程的解.

根据引理2和文献[15]中的比较引理,有

$$\lim_{t \rightarrow T(\omega)} V(t) = 0, \quad (23)$$

其中频率控制和有功功率控制的整定时间满足

$$T(\omega) \leq \frac{n\pi(2N(N+1))^{\frac{n-m}{4n}}}{2(n-m)\underline{\lambda}_3}. \quad (24)$$

由此可见,系统中所有 N 个BESS满足

$$\lim_{t \rightarrow T(\omega)} e_\omega(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow T(\omega)} e_p(t) = 0. \quad (25)$$

为了证明电池能量等级的一致性收敛性质,选取李雅普诺夫方程 $V_2 = \frac{1}{2} e_E^T e_E$,其中 $e_E = [e_{E1}, \dots, e_{EN}]^T$. 定义无向连通图 G_B 和 G_C ,其对应的邻接矩阵分别为

$$\begin{aligned} A_B &= [(c_E a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}}]_{N \times N}, \\ A_C &= [(c_E a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}}]_{N \times N}. \end{aligned}$$

L_B 和 L_C 是对应的拉普拉斯矩阵. 同样地,采用与上述频率和有功功率的有限时间控制中类似的分析方法,可得

$$\dot{V}_2 \leq -\frac{1}{2} [4\underline{\lambda}_4 V_2]^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{1}{2} N^{\frac{m-n}{n}} [4\underline{\lambda}_4 V_2]^{\frac{3n-m}{2n}}, \quad (26)$$

其中 $\lambda_4 = \min\{\lambda_2(L_B), \lambda_2(L_C)\}$.

根据引理2和文献[15]中的比较引理,有

$$\lim_{t \rightarrow T(\mu)} e_E(t) = 0, \quad (27)$$

其中整定时间满足

$$T(\mu) \leq \frac{n\pi N^{\frac{n-m}{2n}}}{2(n-m)\lambda_4}. \quad (28)$$

由此可见, $\hat{E}_i(t)$ 在整定时间 $T(\mu)$ 内同步到 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(t)$. 由文献[10]可知, BESS 的有功功率比率能够反映电池的异构性, 于是设 $k_i^E = rk_i^P$, 其中 r 为正常数. BESS 的电池能量能级可表示为

$$E_i(t) = \hat{E}_i(t) - \frac{r}{3600} \int_0^t \tilde{P}_i(\tau) d\tau. \quad (29)$$

前面已证出有功功率比值的一致性在整定时间 $T(\omega)$ 内获得, 故整定时间 $T(E)$ 的估计方法为

$$T(E) \leq \max\{T(\omega), T(\mu)\}. \quad (30)$$

考虑到有功功率比值的一致性在 $T(\omega)$ 内实现, 有

$$\lim_{t \rightarrow T(E)} E_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(t) - \frac{r}{3600N} \sum_{i=1}^N \tilde{P}_i(t)t. \quad (31)$$

综上, BESS 的输出频率能够在有限时间内恢复一致到参考值, 同时实现有功功率的重新按比例分配, 并且系统内 BESS 的电池能量等级的一致性同样能够在有限时间内完成, 由式(24)、(28)和(30)可知整定时间的上界不依赖于系统的初始状态. \square

2.2 电压幅值的有限时间控制

为了实现 BESS 的输出电压幅值恢复一致到参考值, 设计分布式有限时间控制规则为

$$u_i^v = c_v \left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (v_j - v_i)^{\frac{m}{n}} + b_i (v_{\text{ref}} - v_i)^{\frac{m}{n}} \right] + c_v \left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (v_j - v_i)^{2-\frac{m}{n}} + b_i (v_{\text{ref}} - v_i)^{2-\frac{m}{n}} \right], \quad (32)$$

其中 c_v 是正的控制增益常数.

定义电压幅值的偏差变量为

$$e_{vi}(t) = v_i(t) - v_{\text{ref}}, \quad (33)$$

对该偏差变量求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_{vi} &= \dot{v}_i - \dot{v}_{\text{ref}} = \dot{v}_i = u_i^v = \\ & c_v \left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{vj} - e_{vi})^{\frac{m}{n}} - b_i e_{vi}^{\frac{m}{n}} \right] + \\ & c_v \left[\sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{vj} - e_{vi})^{2-\frac{m}{n}} - b_i e_{vi}^{2-\frac{m}{n}} \right]. \end{aligned} \quad (34)$$

定理2 若假设1成立, 则在分布式有限时间控制规则(32)的作用下, 系统中所有 BESS 的输出电压幅值能够在有限时间内恢复到参考值, 且整定时间的上界不依赖于系统初始电压幅值状态偏差.

证明 选取李雅普诺夫方程 $V_3 = \frac{1}{2} e_v^T e_v$, 其中 $e_v = [e_{v1}, \dots, e_{vN}]^T$. 对 V_3 求导, 并根据文献[14]中的引理2和引理3, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &\leq \\ & -\frac{1}{2} \left[\sum_{i,j=1}^N (c_v a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}} (e_{vi} - e_{vj})^2 + \right. \\ & \left. 2 \sum_{i=1}^N (c_v b_i)^{\frac{2n}{m+n}} e_{vi}^2 \right]^{\frac{m+n}{2n}} - \\ & \frac{1}{2} (N(N+2))^{\frac{m-n}{2n}} \left[\sum_{i,j=1}^N (c_v a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}} (e_{vi} - e_{vj})^2 + \right. \\ & \left. 2 \sum_{i=1}^N (c_v b_i)^{\frac{2n}{3n-m}} e_{vi}^2 \right]^{\frac{3n-m}{2n}}. \end{aligned} \quad (35)$$

定义无向图 G_α 和 G_β , 其对应的邻接矩阵为

$$A_\alpha = [(c_v a_{ij})^{\frac{2n}{m+n}}]_{N \times N},$$

$$A_\beta = [(c_v a_{ij})^{\frac{2n}{3n-m}}]_{N \times N}.$$

L_α 和 L_β 是对应的拉普拉斯矩阵. 令

$$B_3 = \text{diag}(b_i^{v1}), \quad B_4 = \text{diag}(b_i^{v2}).$$

其中

$$b_i^{v1} = (c_v b_i)^{\frac{2n}{m+n}}, \quad b_i^{v2} = (c_v b_i)^{\frac{2n}{3n-m}}.$$

采用与定理1类似的分析方法, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &\leq \\ & -\frac{1}{2} [4\lambda_5 V_3]^{\frac{m+n}{2n}} - \frac{1}{2} (N(N+2))^{\frac{m-n}{2n}} [4\lambda_5 V_3]^{\frac{3n-m}{2n}}, \end{aligned} \quad (36)$$

其中 $\lambda_5 = \min\{\lambda_1(L_\alpha + B_3), \lambda_1(L_\beta + B_4)\}$.

根据引理2和文献[15]中的比较引理, 有

$$\lim_{t \rightarrow T(v)} e_v(t) = 0, \quad (37)$$

其中电压幅值一致性的整定时间满足

$$T(v) \leq \frac{n\pi(N(N+2))^{\frac{n-m}{4n}}}{2(n-m)\lambda_5}. \quad (38)$$

综上, 系统内 BESS 的输出电压幅值能够在有限时间内恢复一致到参考值, 且由式(38)可知整定时间的上界不依赖于系统的初始状态. \square

3 仿真结果

为了验证所提出分布式有限时间次级控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真环境中搭建如图2(a)所示的孤岛微电网的测试系统. 该测试系统

包含5个分布式电池储能单元、5条电力传输线和5个局部负荷单元. 设定测试微电网的额定频率为50 Hz, 额定相电压幅值为311 V. 图2(b)描述了微电网系统中BESS之间的通信拓扑结构, 将BESS1作为唯一能够接收到参考信号的节点. 设定控制增益参数为 $c_\omega = c_p = 5, c_v = 10, c_E = 0.5$, 控制参数

$m = 1, n = 3$. 仿真开始时, 系统中各BESS的初始电池能量等级在 $270 \text{ kW}\cdot\text{h} \sim 210 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 之间; 设置LC滤波器参数 $R_f = 0.15 \Omega, L_f = 1.37 \text{ mH}, C_f = 51 \mu\text{F}$; 输出连接器参数: $R_c = 0.05 \Omega, L_c = 0.37 \text{ mH}$. 微电网其他电力参数如表1所示.

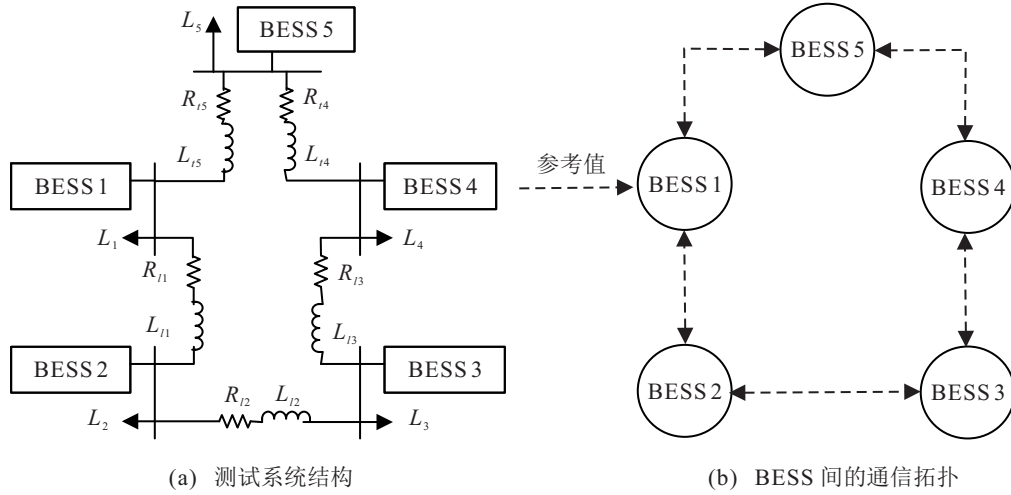


图2 微电网测试系统结构

表1 微电网系统的仿真参数

| 参数 | BESS1 | BESS2 | BESS3 | BESS4 | BESS5 |
|--------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------|--------|
| $k_i^p (\times 10^{-5})$ | 7.95 | 6.21 | 7.32 | 6.95 | 8.71 |
| $k_i^q (\times 10^{-4})$ | 9.5 | 7.32 | 9.12 | 7.95 | 9.75 |
| k_i^E | 1.1925 | 0.9315 | 1.098 | 1.0425 | 1.3065 |
| | line1 | line2 | line3 | line4 | line5 |
| R_l / Ω | 0.75 | 0.5 | 0.27 | 0.73 | 0.37 |
| L_l / mH | 0.97 | 1.5 | 0.37 | 0.75 | 0.53 |
| | load1 | load2 | load3 | | |
| | 31.75 kW+17.3 kVar | 43 kW+23 kVar | 37.51 kW+17.5 kVar | | |
| | load4 | load5 | | | |
| | 47.5 kW+27.5 kVar | 35.5 kW+15 kVar | | | |

仿真开始时仅采用初级控制, 5 s以后采用所提出的次级控制方法. 为了验证所提出控制方案在负荷扰动发生时的有效性, 设置固定负荷 $L_C = 13 \text{ kW} + 10 \text{ kVar}$, 在20 s时增加至负荷3的总线一侧, 并于35 s时从系统中断开. 仿真实验结果如图3~图7所示. 图3和图4分别为BESS的输出频率和电压幅值曲线. 从图3和图4可见, 在0~5 s时, 输出频率和电压幅值均偏离额定值, 由于5 s后采用了所提出的控制方法, 频率和电压幅值迅速恢复到了额定值, 并具有较好地应对负荷扰动的能力. 根据式(24)和(38)计算出频率和电压幅值一致性的整定时间上界分别为10.02 s和5.45 s, 由图中可见, 输出频率和电压幅值分别在2.1 s和2.0 s内恢复到了额定值, 均小于整定时间的上界. 图5和图6分别为BESS输出有功功率

和有功功率比值的变化曲线. 由图5和图6可见, 有功功率的按比例重新分配约在2.1 s内实现, 小于其整定时间上界10.02 s. 图7给出了BESS的能量等级曲线. 根据定理1证明过程中给出的整定时间上界的计算方法可知, 能量等级一致性的整定时间上界为10.02 s, 如图7所示, 能量等级的一致性约在3.1 s内获

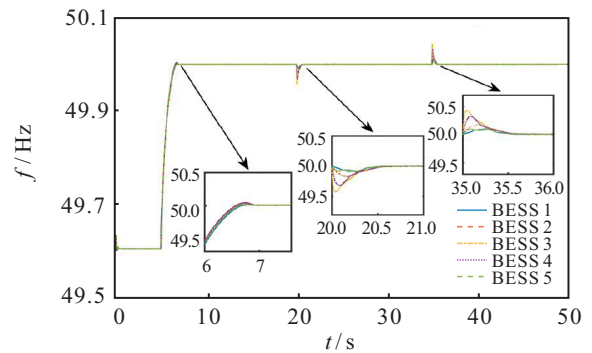


图3 BESS的输出频率

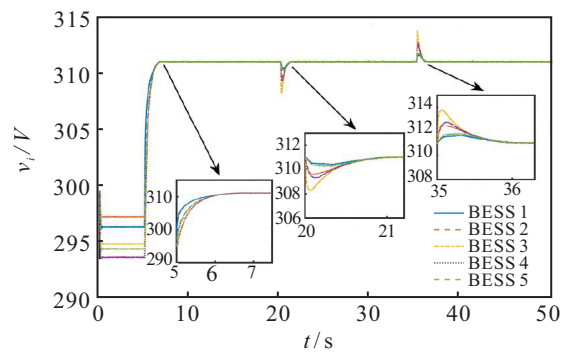


图4 BESS的输出电压幅值

得,显然小于整定时间的上限值.基于以上仿真分析可知,所提出控制方法在有限时间内实现了BESS的输出频率、电压幅值和能量等级的一致性,同时获得了有功功率的重新按比例分配,并且在预设的整定时间内完成了控制目标.

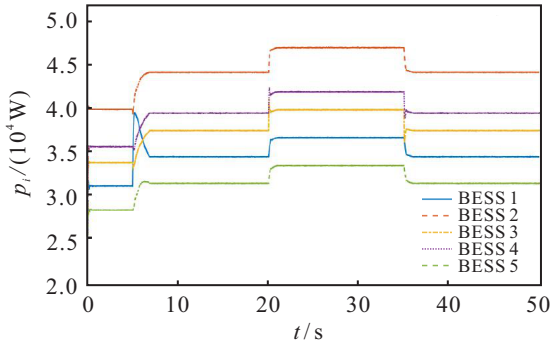


图5 BESS的输出有功功率

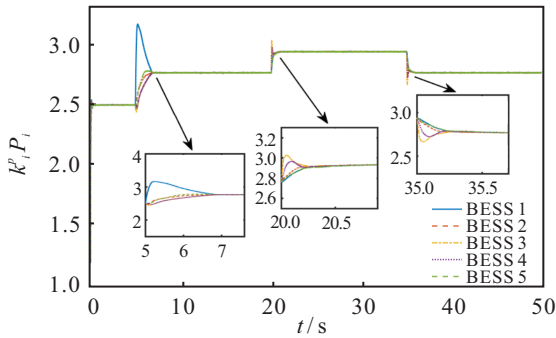


图6 BESS的有功功率比值

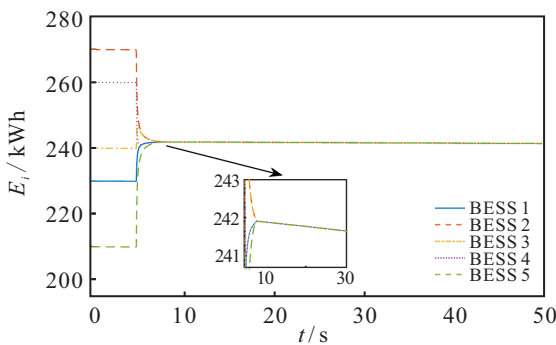


图7 BESS3的能量等级

为了进一步表明所提出控制方案的优势,分别将本文的次级控制方案与未加次级控制的初级控制策略、文献[8]有领导者的一阶一致性控制方法以及文献[10]有限时间一致性控制方法进行对比,仿真实验结果如图8~图10所示.为简明扼要地表明优势,仅对比BESS3的输出频率、电压幅值和输出有功功率,图中曲线AFT即为所提出控制策略,曲线PRI为未加次级控制的初级控制策略.可见,在未施加所提出次级控制策略的情形下,系统的输出频率和电压幅值均偏离了额定值,而所提出控制方法能够在较短时间内恢复系统电压幅值和频率.通过与文献[8]有领导者的一阶一致性控制方法和文献[10]异构电池储能系

统的有限时间控制方法进行对比可以看出,所提出的新的分布式有限时间控制方案在收敛速度上具有明显的优势,且具有较好的收敛性能.

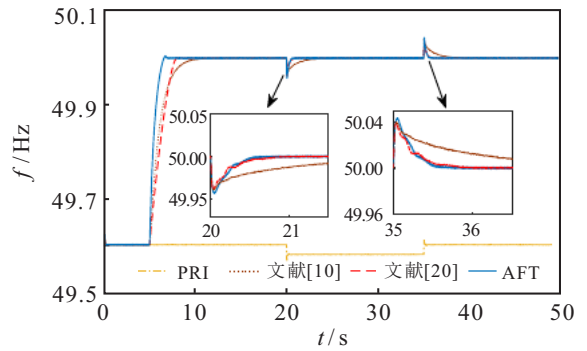


图8 BESS3的输出频率对比

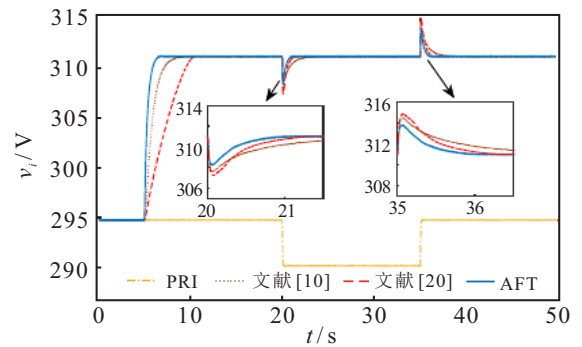


图9 BESS3的输出电压幅值对比

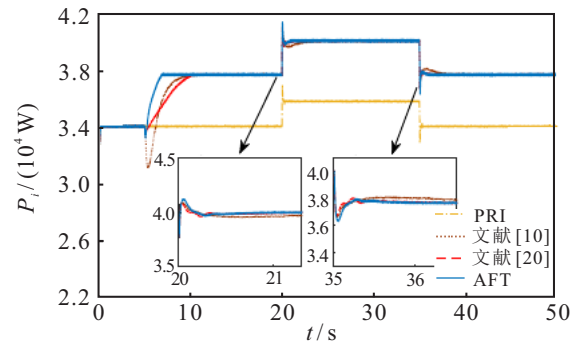


图10 BESS3的输出有功功率对比

4 结论

本文研究了孤岛微电网电池储能系统的一致性问题,考虑了储能电池的异构性特征,设计了一种新的分布式有限时间控制方案.所提出的控制方案在有限时间实现了频率、电压幅值和电池能量等级的一致性,同时获得了有功功率的按比例分配.不同于以往的有限时间一致性控制方法,所提出的控制策略能在预设的时间内完成控制目标,即整定时间的上界独立于系统初始的状态偏差.所提出控制策略的正确性和有效性在理论分析和仿真实验两个方面均得到了验证.

参考文献(References)

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2):1-12.
(Wang C S, Wu Z, Li P. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.)
- [2] Olivares D E, Mehrizi-Sani A, Etemadi A H, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [3] Li X J, Hui D, Lai X K. 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.
- [4] Golsorkhi M S, Shafiee Q, Lu D D C, et al. A distributed control framework for integrated photovoltaic-battery-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(6): 2837-2848.
- [5] Morstyn T, Savkin A V, Hredzak B, et al. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4735-4743.
- [6] Fan F L, Tai N L, Huang W T, et al. Distributed equalisation strategy for multi-battery energy storage systems[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 1986-1990.
- [7] Morstyn T, Hredzak B, Agelidis V G. Distributed cooperative control of microgrid storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(5): 2780-2789.
- [8] Khazaei J, Nguyen D H. Multi-agent consensus design for heterogeneous energy storage devices with droop control in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(2): 1395-1404.
- [9] Zuo S, Davoudi A, Song Y D, et al. Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 5988-5997.
- [10] Hu J, Lanzon A. Distributed finite-time consensus control for heterogeneous battery energy storage systems in droop-controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4751-4761.
- [11] Zuo Z Y, Tie L. A new class of finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems[J]. International Journal of Control, 2014, 87(2): 363-370.
- [12] Liu J L, Zhang Y, Sun C Y, et al. Fixed-time consensus of multi-agent systems with input delay and uncertain disturbances via event-triggered control[J]. Information Sciences, 2019, 480: 261-272.
- [13] 陈刚, 李志勇, 韦梦立. 孤岛微电网的分布式固定时间二次协调控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 205-212.
(Chen G, Li Z Y, Wei M L. Distributed fixed-time secondary coordination control of islanded microgrids[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 205-212.)
- [14] Deng Z C, Xu Y L, Sun H B, et al. Distributed, bounded and finite-time convergence secondary frequency control in an autonomous microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(3): 2776-2788.
- [15] Khalil H K. Nonlinear systems[M]. The 3rd edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001: 1-750.

作者简介

许德明(1995—), 男, 硕士生, 从事微电网控制与调度策略的研究, E-mail: 18860899171@163.com;

李泽(1983—), 女, 副教授, 博士, 从事随机系统、复杂时滞系统、模糊系统的智能控制等研究, E-mail: lizeing@163.com;

崔国增(1986—), 男, 讲师, 博士, 从事非线性系统自适应控制、多智能体系统分布式控制等研究, E-mail: guozengcui@gmail.com;

郝万君(1965—), 男, 教授, 博士, 从事复杂系统的建模、控制与优化等研究, E-mail: hao_wanjuan@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)