



计及 SoC 均衡的分布式储能反馈线性化并网控制方法

柳劲松¹, 张凌霄², 柴 炜¹, 刘 舒¹, 薛 花², 王育飞²

(¹国网上海市电力公司, 上海 200031; ²上海电力大学, 上海 200090)

摘 要: 分布式储能因可有效抑制风光出力波动、提升可再生能源消纳率而在直流配网中得到广泛应用, 但通常采用基于一致性的 PI 控制方法, 稳定域较窄, 当直流配网发生大幅不确定性扰动或通信链路中断故障, 系统易失稳。为解决这一问题, 本研究采用了分层控制方法。上层针对分布式储能强耦合、非线性特性, 建立储能并网变换器李导数仿射模型, 重构状态变量与控制变量映射关系, 实现系统完全解耦变换; 构建全局能量函数, 通过对分布式储能动态能量主动整形, 实现系统精确线性化变换, 设计形式简单的反馈线性化控制律, 可使各状态变量沿能量函数梯度方向快速收敛至期望工作点, 确保系统全局渐近稳定。下层设计基于动态事件触发的储能荷电状态 (state of charge, SoC) 均衡控制方法, 根据相邻节点储能 SoC 误差, 自适应调节反馈线性化控制律增益, 提升并网电压和电流期望轨迹跟踪快速性, 降低一致性控制通信频次。基于 dSPACE 的实验结果表明: 直流配网发生光伏与负载功率突变、参数摄动、时变通信时延和通信链路中断故障时, 本研究所提方法能够实现分布式储能稳定协同控制、功率精确分配与 SoC 动态均衡。

关键词: 分布式储能; 反馈线性化控制; 能量函数整形; SoC 均衡

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0141

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 07-2828-19

Feedback linearization control method of distributed energy storage grid-connected system considering SoC balance

LIU Jingsong¹, ZHANG Lingxiao², CHAI Wei¹, LIU Shu¹, XUE Hua², WANG Yufei²

(¹State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200031, China; ²Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Distributed energy storage systems are widely employed in DC distribution networks because of their effectiveness in suppressing fluctuating renewable energy outputs and enhancing the overall rate of energy utilization. However, the traditional consensus-based PI control method has a narrow stability region; thus, the system is prone to instability under large, uncertain disturbances and during interruptions to communication links. To address this issue, a hierarchical control approach is used herein. At the second level, considering the strongly coupled and nonlinear characteristics of grid-connected converters for distributed energy storage, an affine model in the Lie derivative form is established. The mapping relationship between the state variables and control variables is reconstructed and complete decoupling transformation is achieved. By constructing a global energy function, the dynamic

收稿日期: 2026-02-06; 修改稿日期: 2026-03-25。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (520940250003)。

第一作者及通信联系人: 柳劲松 (1971—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为配微协同控制、分布式储能技术, E-mail: evdataanalysis@163.com。

引用本文: 柳劲松, 张凌霄, 柴炜, 等. 计及 SoC 均衡的分布式储能反馈线性化并网控制方法[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(7): 2828-2846.

Citation: LIU Jingsong, ZHANG Lingxiao, CHAI Wei, et al. Feedback linearization control method of distributed energy storage grid-connected system considering SoC balance[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(7): 2828-2846.

energy associated with distributed energy storage can be actively shaped. Exact linearization transformation is realized. A simple feedback linearization control law is sufficient for ensuring that all state variables rapidly converge toward the desired operating point along the gradient of the energy function. Global asymptotic stability is guaranteed. At the primary level, a method of balancing SoC control with a dynamic event-triggering mechanism is designed. The gain of the feedback linearization control law is adaptively adjusted based on neighboring SoC errors. The tracking speed of the grid-connected voltage and desired current trajectories increases, whereas the communication frequency in consensus-based control decreases. The experimental results obtained with dSPACE demonstrate that under test scenarios involving photovoltaic power fluctuations, load-step changes, parameter perturbations, time-varying communication delays, and communication-link interruption faults, the proposed method achieves stable cooperative control of distributed energy storage, accurate power allocation, and a dynamic SoC balance.

Keywords: distributed energy storage; feedback linearization control; shaped energy function; SoC balance

在“双碳”目标背景下,风电、光伏等可再生能源装机规模快速增长,新型配网逐步呈现出“高比例新能源接入”和“高比例电力电子化”的“双高”特征^[1-2]。为克服高比例风、光波动性和高比例电力电子并网设备低惯量给直流配网稳定运行带来的不利影响,分布式储能,因具有技术成熟、惯量可控、动态响应快速、功率双向调节等优势,能够有效维持配网母线电压平稳和源荷功率平衡,得到了广泛关注与应用^[3-4]。

为实现分布式储能协同运行,通常采用基于一致性的PI控制方法,上层利用有功功率-电压下垂关系,设计一致性控制律,求取各储能并网变换器状态变量期望轨迹;下层设计电压外环、电流内环PI控制方法,实现状态变量期望轨迹快速跟踪与有功功率协同^[5-6]。基于一致性的PI控制方法结构简单、易于工程应用,但控制器设计依赖于稳态工作点局部线性化假设,降低了闭环控制系统应对源荷不确定性扰动和参数摄动的鲁棒性,稳定域收窄^[7]。实际工程中分布式储能空间范围广、规模大、数量多,各储能运行工况差异显著,易因荷电状态(state of charge, SoC)不同,发生运行点大幅、频繁变化,导致局部线性化假设条件不再成立,难以确保基于一致性的PI控制方法实现期望动态响应性能和宽范围稳定运行。

为提升分布式储能并网系统稳定性,非线性控制方法无需局部线性化近似,直接构建非线性模

型,设计全局渐近稳定的控制律,使闭环控制系统快速跟踪期望轨迹,实现静态性能指标。文献[8]建立分布式储能系统Lie-Bäcklund同构模型,设计微分平滑控制方法,控制律可由储能并网变换器输出及其有限阶微分项表示,在确保全局稳定的同时简化非线性控制器结构,但未能充分考虑不同SoC约束下储能功率精确分配问题。为提升功率分配精度,文献[9]建立分布式储能并网变换器的Brunovsky标准模型,将非线性系统局部等效为线性系统,设计反馈线性化控制律,以有功功率偏差最小化为目标,实现各储能变换器并网电压、电流期望轨迹快速稳定跟踪,但反馈线性化控制方法对精确的系统模型具有较强依赖性,参数摄动将导致控制性能下降。为提升控制系统鲁棒性,文献[10]将能量函数构造为Lyapunov函数,设计鲁棒控制器,将系统内外部干扰增广为新的可观状态变量,通过与标称模型之间建立等量的补偿关系,实现对反馈线性化控制律关键状态变量的自适应估计,解决传统反馈线性化控制方法依赖于精确模型参数的不足。但其工程应用受限于互联系统状态变量间的耦合关系,在含有多个扰动项情况下,难以实时在线准确估计状态变量,由于未达成储能SoC均衡与状态变量协同控制目标,动态响应性能仍受限于闭环控制系统局部变量设计。因此,在确保动态响应性能前提下,实现非线性控制方法全局渐近稳定性和SoC均衡性能的多目标协同,是分布式储能拓展

工程应用的关键所在。

为提升分布式储能 SoC 均衡性,文献[11]提出了基于一致性算法的分布式储能虚拟阻抗控制方法,通过构建相邻储能 SoC 信息交互机制,在离散空间控制 SoC 均衡,通过在线调节电压-电流闭环回路虚拟阻抗,实现分布式储能输出功率期望轨迹的同步跟踪,但一致性算法需基于周期性通信完成 SoC 信息交互,通信频率固定,对通信时延与通信链路中断故障敏感,且存在通信数据冗余问题。为有效降低通信数据冗余,文献[12]提出基于静态事件触发的非线性干扰观测器,通过准确估计并网电压残差,设计自适应 SoC 平衡因子,实现精确的电流分配与 SoC 均衡,动态响应速度提升 2.2 倍,在线路阻抗失配达 3 倍且负荷功率波动超 50% 情形下,实现电流静态误差小于 0.1 A,母线电压波动小于 0.5 V,双积分静态事件触发机制使通信次数由周期采样 6000 次降至 370 次,有效降低了通信时延影响,但闭环控制系统收敛性依赖于通信延迟有界且变化平缓假设,实际应用难以确保。为提升控制方法适应性,文献[13]提出基于动态事件触发机制的神经网络 SoC 自均衡方法,事件触发阈值根据储能有功功率期望轨迹跟踪误差动态调整,神经网络在线滚动优化生成各储能并网变换器最优控制模式,在通信链路发生中断且负荷功率波动达 30% 情形下,能确保 SoC 偏差始终小于 0.1%,并将通信触发次数由周期采样 10000 次减少至 900 次,实现储能充放电电流的准确跟踪与最小 SoC 误差。但其在线寻优计算量大,随分布式储能接入节点数增加,神经网络规模与算力需求急剧上升。因此,在控制器设计尽量简洁的前提下,最大化提升控制系统抵御工作点大幅变化不利影响的内在鲁棒性和 SoC 协同一致性,成为必须解决的关键技术问题^[14]。

针对现存挑战,从能量角度出发,本研究提出计及 SoC 均衡的分布式储能并网系统反馈线性化控制方法。采用分层控制方式,上层针对分布式储能并网系统非线性、强耦合特性,以分布式储能并网电压和输出电流为状态变量,储能并网变换器占空比和并网电流为控制变量,建立李导数仿射模型,重构状态变量与控制变量映射关系,实现系统完全解耦变换;将系统能量函数直接构建为李导数仿射模型状态变量,在保持系统结构的同时,利用能量函数整形,实现非线性系统的精确线性化变换,设

计形式简单的反馈线性化控制律,即可使各状态变量沿能量函数梯度方向快速收敛至期望工作点。下层设计基于动态事件触发机制的 SoC 均衡控制方法,根据相邻储能节点 SoC 误差,在线调节反馈线性化控制律增益,实现 SoC 自适应均衡,提升各储能状态变量期望轨迹跟踪快速性,基于 Lyapunov 稳定性定理,证明基于动态事件触发机制的反馈线性化闭环控制系统能够渐近收敛至期望工作点,具有全局渐近稳定性。基于 dSPACE 的实验结果表明:直流配网发生光伏与负载功率突变、参数摄动、时变通信时延和通信链路中断故障情形下,本研究方法能够实现分布式储能稳定协同控制,维持并网电压平稳、功率精确分配与 SoC 动态均衡,具有响应快速、稳定性好、鲁棒性强的特点。

1 分布式储能并网变换器李导数仿射模型建立与期望工作点设置

1.1 分布式储能并网变换器李导数仿射模型

分布式储能并网系统拓扑结构如图 1(a)所示,直流子系统由储能单元、可再生能源和区域负载构成,多个直流子系统分布式接入配网,其中储能单元维持母线电压平稳,参与配网全局源荷功率调节,是抑制可再生能源及负载波动的重要调控主体^[15]。储能并网变换器结构如图 1(b)所示,采用双向 DC/DC 变换器,通过调节 PWM 占空比,实现储能与直流配网能量双向流动,并经储能侧电感 L 和网侧电容 C 改善并网电压、电流质量。分布式储能通过直流配网母线形成电气网络,通过交换节点状态信息形成通信网络,通常采用基于一致性的 PI 控制方法,由一致性控制律求取状态变量期望轨迹,设计电压-电流双闭环,实现各储能充放电电流准确跟踪与有功功率分配,如图 1(c)所示。

根据图 1(b),可得各储能并网变换器动态数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{dI_i^{\text{ES}}}{dt} = V_i^{\text{ES}} - RI_i^{\text{ES}} - V_i + d_i V_i \\ C \frac{dV_i}{dt} = I_i^{\text{ES}} - I_i - d_i I_i^{\text{ES}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_i 、 I_i 分别为第 i 节点储能并网电压和电流; R 、 L 分别为储能侧电阻和电感; C 为网侧电容; d_i 为第 i 节点储能并网变换器占空比; V_i^{ES} 、 I_i^{ES} 分别为第 i 节点储能输出电压和电流。

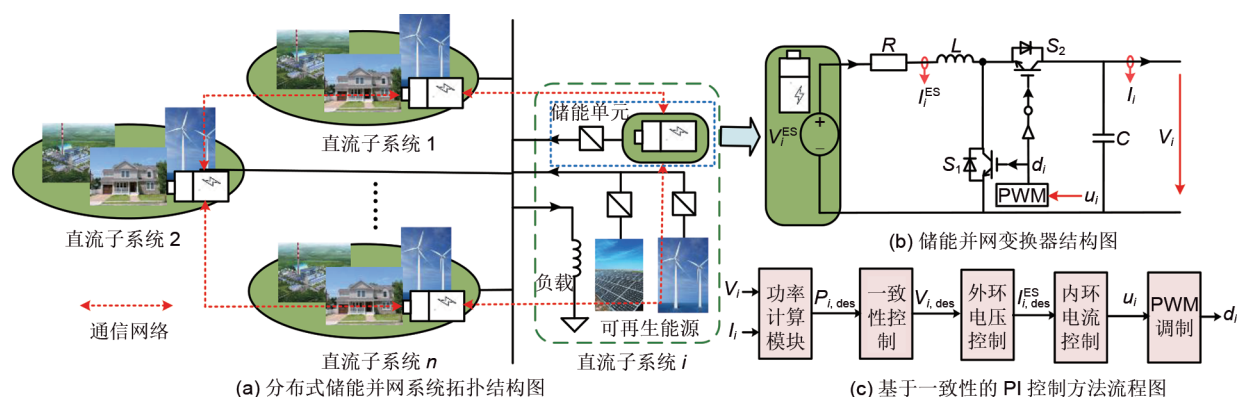


图 1 分布式储能并网系统拓扑及传统基于一致性的 PI 控制方法

Fig. 1 Schematic of distributed energy storage grid-connected system and traditional consensus-based PI control method

分析式(1)可知, 分布式储能并网系统具有显著的非线性、强耦合特性, 储能输出电流 I_i^{ES} 与并网电压 V_i 间的交互耦合关系如图 2(a)所示。基于一致性的 PI 控制方法通常需建立储能并网变换器小信号模型, 在稳定工作点附近局部线性化近似, 完成线性控制器设计, 可在小范围内保持期望动/静态响应性能。但当直流配网发生大幅功率波动、参数

摄动、时变通信时延或通信链路中断故障时, 局部线性化模型与真实系统间产生较大偏差, 基于一致性的 PI 控制器难以准确补偿非线性效应, 将导致暂态跟踪误差快速增大, 易失稳。为解决这一问题, 本研究建立储能并网变换器李导数仿射模型, 无需稳定工作点附近小信号处理, 即可实现状态变量与控制变量的完全解耦变换。

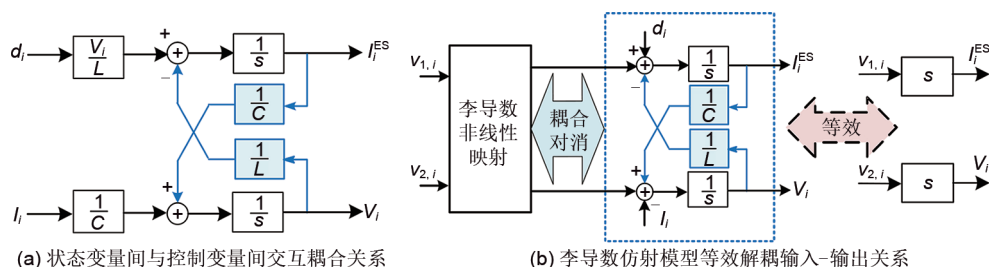


图 2 分布式储能并网变换器变量耦合特性与李导数仿射模型等效解耦

Fig. 2 Schematic of distributed energy storage grid-connected converter with variable coupling characteristics and equivalent decoupling of Lie derivative affine model

定义状态变量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [I_i^{\text{ES}}, V_i]^T$, 控制变量为 $\mathbf{u} = [d_i, I_i]^T$, 输出变量为 $\mathbf{y} = [I_i^{\text{ES}}, V_i]^T$, 根据式(1), 可构建第 i 节点储能并网变换器两输入/两输出李导数仿射模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 为输入向量场函数, 表征状态曲面上储能并网变换器电感、电容与储能单元间的动态变化; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为控制向量场函数, 表征控制变量对状态变量动态的响应幅度; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为储能并网变换器输出函数, 反映状态曲面上状态变量向输出空间变换

的映射关系。具体可表达为式(3)~(5)。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{V_i^{\text{ES}} - V_i - RI_i^{\text{ES}}}{L} \\ \frac{I_i^{\text{ES}}}{C} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} & 0 \\ -\frac{I_i^{\text{ES}}}{C} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i^{\text{ES}} \\ V_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 与 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 均为光滑向量场函数, 根据式(2), 对输出变量求导, 可得输出函数 $\mathbf{h}$ 沿向量 $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{g}$ 方向的李导数 $L_{\mathbf{f}}$ 、 $L_{\mathbf{g}}$ 满足:

$$\dot{\mathbf{y}} = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}] = \mathbf{L}_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{L}_g \mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (6)$$

分析式(2)、式(6)可知,与小信号模型不同,李导数仿射模型清晰表征了储能并网变换器在动态过程中的非线性本质,并可将状态变量的动态演化约束在由控制向量场及其李导数构成的子空间内^[16]。当解耦控制变量 $\mathbf{v}$ 满足 $\mathbf{u}=[\mathbf{v}-\mathbf{L}_f \mathbf{h}(\mathbf{x})]/\mathbf{L}_g \mathbf{h}(\mathbf{x})$ 时,则有 $\dot{\mathbf{y}}=\mathbf{v}$,表明通过构建李导数非线性映射关系,可使系统状态变量沿控制向量场函数的动态不再包含储能输出电流 I_i^{ES} 与并网电压 V_i 的交互耦合分量,利用结构化补偿,可将状态变量在控制向量场内等效为简单一阶微分形式的解耦输入-输出关系 $\dot{\mathbf{y}}=\mathbf{v}$,如图2(b)所示,这为非线性控制器的简化设计提供了条件。

1.2 分布式储能并网变换器期望工作点

为实现分布式储能并网变换器协同运行,本研究提出一致性控制方法,仅需与相邻节点交换有功功率信息,利用有功功率-电压下垂关系,即可获得各储能输出电压调节量,提升状态变量期望轨迹求取准确性。

定义各节点储能并网电压平稳控制目标为^[17]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{\sum_{i=1}^n V_i(t)}{n} - V_0 \right| = 0 \quad (7)$$

式中, n 为分布式储能个数; V_0 为直流配网母线电压额定值。

为实现直流配网母线电压平稳,构建如图3所示的分布式储能并网变换器通信网络,第 i 节点储能并网变换器利用通信网络与相邻节点交换有功功率信息。根据图3,通信网络用拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 可表示为:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}'} - \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{D}'$ 为 $\mathbf{L}$ 的关联度矩阵; $\mathbf{A}$ 为 $\mathbf{L}$ 的邻接矩阵。

根据式(8),设计分布式储能并网变换器一致性控制律,可得第 i 节点储能并网电压调节量 $\Delta V_i(t)$ 为:

$$\Delta V_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} [p_j(t) - p_i(t)] + g_i [p_i^{\text{des}} - p_i(t)] \quad (9)$$

式中, a_{ij} 为矩阵 $\mathbf{A}$ 第 i 行第 j 列元素; g_i 为一致

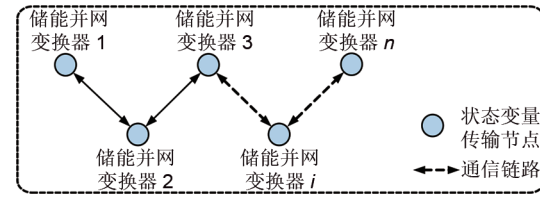


图3 分布式储能并网变换器通信网络

Fig. 3 Communication network structure for distributed energy storage grid-connected converters

性控制牵制项增益; P_i 、 P_i^{max} 分别为第 i 节点储能并网变换器有功功率和最大有功功率; P_i^{des} 为第 i 节点储能并网变换器有功功率期望轨迹; $\bar{P}^{\text{max}}$ 为各储能并网变换器最大有功功率均值。其中, $p_i = \frac{P_i}{P_i^{\text{max}}}$,

$$p_i^{\text{des}} = \frac{P_i^{\text{des}}}{\bar{P}^{\text{max}}}, \bar{P}^{\text{max}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^{\text{max}}.$$

根据式(9),可得第 i 节点储能并网电压期望轨迹为:

$$\mathbf{x}_2^{\text{des}} = V_{i,\text{des}} = V_0 + \Delta V_i(t) \quad (10)$$

根据式(1)、式(10),可得第 i 节点储能并网变换器输出电流期望轨迹为:

$$\mathbf{x}_1^{\text{des}} = I_{i,\text{des}}^{\text{ES}} = \frac{C}{1-d_i} \cdot \frac{dV_{i,\text{des}}}{dt} + I_i \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可得分布式储能并网变换器李导数仿射模型状态变量期望轨迹 $\mathbf{x}_i^{\text{des}}$,完成反馈线性化控制器的期望工作点设置。

2 基于SoC均衡的分布式储能并网系统反馈线性化控制方法设计

2.1 上层基于能量函数塑形的反馈线性化控制方法

计及外部不确定性扰动和内部参数摄动影响,直流配网母线电压波动过程本质为由暂态能量激励的系统动态响应过程^[18]。直流配网稳定运行需维持母线电压平稳并保证有功功率供需平衡,服务于这一需求,动态过程中分布式储能并网变换器根据不确定性扰动引起的有功功率不平衡,调节并网电压和输出电流尺度,实现各尺度环节协同抑制暂态能量激励,可有效增强大扰动条件下系统整体稳定性。从能量角度出发,受控Lyapunov函数方法通过构造能够反映系统原有能量变化特性的Lyapunov函数,设计使其导数保持负定或半负定的控制律,确保闭环控制系统全局渐近稳定,但较为保守的控制增益可能导致复杂工况下动态响应性

能受限；基于 Euler-Lagrange 模型的无源性控制方法通过求取与系统原有结构相关的全局能量函数，以阻尼注入方式，确保闭环控制系统能量耗散特性和渐进稳定性，但系统能量函数需沿预设期望轨迹完成求逆计算；基于 Port-Hamiltonian 模型的无源性控制方法通过构造与闭环控制期望轨迹及模型结构兼容的全局能量函数，依据闭环控制系统动力学特性，设计全局渐进稳定的控制律，但牺牲了对系统能量平衡没有影响的“无功功率”，宽运行范围内难以确保期望的暂态性能。因此，不依赖于系统原有能量结构或动力学特性设计控制律，通过建立表征各尺度环节参与分布式储能并网变换器功率交换机制的全局能量函数，使反馈线性化控制器能够有效引导暂态能量向期望工作点快速收敛，是实现宽范围闭环控制系统稳定的核心所在。

为刻画分布式储能并网系统暂态能量激励响应，根据并网变换器储能元件 L 、 C 存储能量，定义全局能量函数为^[19]：

$$H(x) = [H_1(x) \ H_2(x)]^T = \left[\frac{Lx_1^2 + Cx_2^2}{2} \ x_1 \right]^T \quad (12)$$

式(12)形式简单且物理意义清晰，根据式(12)，重构储能并网变换器李导数仿射模型状态变量为 $z = [z_1 \ z_2]^T = [H(x) \ L_f H(x)]^T$ ，将初始状态空间同胚映射至系统能量空间，状态变量可由全局能量函数 z_1 及能量函数李导数变化率 z_2 直接表征。依据重构后的状态变量，将式(2)规整为标准二阶链式线性表达形式为：

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = v \end{cases} \quad (13)$$

通过能量函数塑形，在系统结构保持的同时，实现非线性系统的精确线性化变换，根据式(12)可得：

$$\ddot{y} = M(x) + N(x)u \quad (14)$$

式中， γ_1 、 γ_2 分别为 $H(x)$ 沿状态向量场的李导数阶数； $M(x)$ 为状态变换矩阵； $N(x)$ 为解耦矩阵。其中，

$$M(x) = \begin{bmatrix} L_{f^{\gamma_1}} H_1(x) \\ L_{f^{\gamma_2}} H_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^{ES} x_1 \\ V_i^{ES} - x_2 - R x_1 \\ L \end{bmatrix},$$

$$N(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(x)}{\partial x} g_1(x) \\ \frac{\partial H_2(x)}{\partial x} g_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} x_1 x_2 & -\frac{L}{C} x_1 x_2 - x_2 \\ \frac{x_2}{L} & -\frac{x_1}{C} \end{bmatrix}$$

由于式(14)中解耦矩阵 $N(x)$ 为非奇异矩阵，其逆矩阵 $N^{-1}(x)$ 存在，则根据式(13)、式(14)，可得反馈线性化控制律为：

$$u = N^{-1}(x)[v - M(x)] \quad (15)$$

将式(15)代入式(6)，对 $H(x)$ 沿向量场求李导数，则有：

$$\begin{cases} L_{g_1(x)}[L_{f^{\gamma_1}}^{-1} H_1(x)] = \frac{\partial H_1(x)}{\partial x} g_1(x) = \frac{x_2}{L} \neq 0 \\ L_{g_2(x)}[L_{f^{\gamma_2}}^{-1} H_2(x)] = \frac{\partial H_2(x)}{\partial x} g_2(x) = \begin{bmatrix} -\frac{x_1}{C} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

分析式(16)可知， $H(x)$ 相对阶数为 2，即 $\gamma_1=1$ 、 $\gamma_2=1$ 、 $\gamma_1+\gamma_2=2$ ，则式(13)满足 $H(x)$ 相对阶数等于模型阶数。

令 $\mu = [\mu_1, \mu_2]^T = [y, \dot{y}]^T$ ，即 μ 由输出变量及其导数构成，则可将分布式储能并网系统视为由输出动态部分 $\dot{\mu}$ 和不影响输出动态的零动态部分 $\dot{\psi}$ 构成，根据微分同胚坐标变换，可得：

$$\begin{cases} \dot{\mu} = [\mu_2 \ M(x) + N(x)u]^T \\ \dot{\psi} = w(\mu, \psi) \end{cases} \quad (17)$$

由于分布式储能并网系统 $H(x)$ 相对阶为 2，则有：

$$L_g L_f H(x) \neq 0 \quad (18)$$

根据式(17)、式(18)可得：

$$\begin{cases} \nabla \mu_1 g(x) = 0 \\ \nabla \mu_2 g(x) \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式(19)表明 $\nabla \mu_1$ 、 $\nabla \mu_2$ 是独立的，又因：

$$\nabla \psi g = 0 \quad (20)$$

则根据 Frobenius 定理，由式(19)、式(20)可知 $\nabla \mu_1$ 、 $\nabla \mu_2$ 、 $\nabla \psi$ 是独立的。

当 $\mu=0$ 时，将 $u=u_0$ 代入式(11)，则有：

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x) u_0 \equiv 0 \quad (21)$$

将式(21)代入式(17)可得：

$$\begin{cases} \dot{\mu} = 0 \\ \dot{\psi} = w(0, \psi) \end{cases} \quad (22)$$

分析式(22)可知，由于 $H(x)$ 相对阶数等于模型阶数，表明零动态 $\dot{\psi}$ 是渐近稳定的，则分布式储能并网控制系统具有最小相位特性^[20]。

基于能量函数塑形，设计的反馈线性化控制律式(15)可使非线性系统实现精确线性化变换，如

图4所示,为避免稳定工作点附近局部线性化近似引入的模型误差,简化非线性控制器设计,采用线性误差控制器 $\mathbf{v}$ 即可达成控制目标,实现状态变量期望轨迹的准确跟踪。

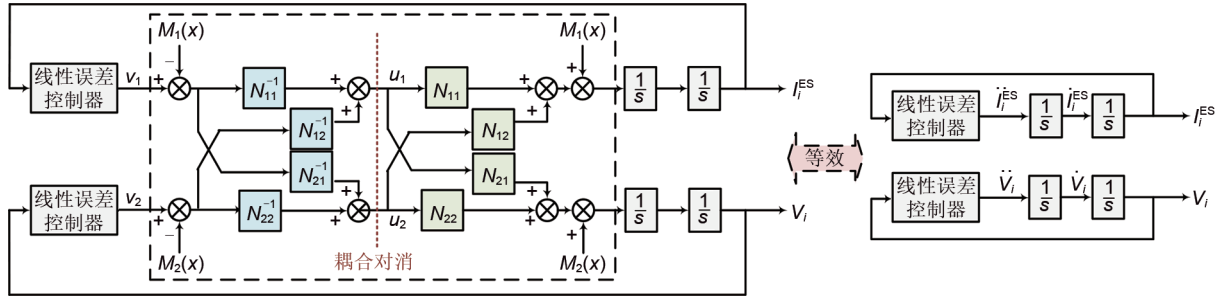


图4 基于能量函数塑形的分布式储能并网系统精确线性化解耦控制框图

Fig. 4 Block diagram of precise linearization decoupling control for distributed energy storage grid-connected system based on shaped energy function

根据式(15),设计形式简单的线性误差控制器 $\mathbf{v}$ 为:

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{z}}_{2des} - k\mathbf{e}_1 - k\mathbf{e}_2 \quad (23)$$

式中, k 为反馈线性化控制律增益; $\mathbf{z}_{1des}$ 、 $\mathbf{z}_{2des}$ 分别为 $\mathbf{z}_1$ 、 $\mathbf{z}_2$ 的期望轨迹。

误差动态微分方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_2 \\ \dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{v} - \dot{\mathbf{z}}_{2des} \end{cases} \quad (24)$$

误差定义为: $\mathbf{e}_1 = \mathbf{z}_1 - \mathbf{z}_{1des}$, $\mathbf{e}_2 = \mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_{2des}$ 。

由于状态变量期望跟踪误差 $\mathbf{e}_1$ 、 $\mathbf{e}_2$ 满足:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_{1des} + k\mathbf{e}_1 = 0 \\ \dot{\mathbf{e}}_{2des} + k\mathbf{e}_2 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

式(25)为指数稳定的误差系统,表明闭环控制系统全局渐近稳定且具有收敛时间上界^[21]。存在外部不确定性扰动和内部参数摄动情形下,反馈线性化控制律式(15)依然能够确保闭环控制系统沿全局能量函数梯度方向收敛至期望工作点,有效抑制动态过程中暂态能量激励,实现各状态变量期望轨迹跟踪误差指数收敛,避免传统反馈线性化控制依赖于精确模型参数的不足。

2.2 下层基于动态事件触发机制的SoC均衡控制方法

为提升分布式储能运行寿命,设计SoC均衡控制方法,根据各储能SoC一致性误差,自适应调节反馈线性化控制律增益,提升状态变量期望轨迹跟踪动态响应速率;设计动态事件触发机制,解决通信数据冗余问题,降低时变通信时延和通信链路中断故障的不利影响。

分布式储能SoC均衡一致性控制目标为^[22]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\mathbf{s}_i(t) - \mathbf{s}_j(t)| = 0 \quad (26)$$

式中, $\mathbf{s}_i(t)$ 、 $\mathbf{s}_j(t)$ 分别为第 i 、 j 节点储能SoC。

为实现式(26),经通信网络[式(8)],实时更新第 i 节点储能SoC一致性误差为:

$$\dot{\mathbf{s}}_i(t) = \sum_{j \in n} a_{ij} [\mathbf{s}_i(t) - \mathbf{s}_j(t)] \quad (27)$$

根据式(27),设计分布式储能SoC均衡控制律为:

$$k = b_j \dot{\mathbf{s}}_i(t) \quad (28)$$

式中, b_j 为储能SoC均衡控制增益。式(28)可在达成分布式储能SoC自主均衡目标的同时,自适应调节反馈线性化控制器增益 k ,实现各状态变量期望轨迹的快速准确跟踪。

由反馈线性化控制律[式(15)],可得分布式储能并网闭环控制系统根轨迹如图5所示。分析图5可知,当增益 k 较小时,闭环主导极点位于负实轴远端,系统稳定裕度较大,但动态响应较慢;随增益 k 增大,闭环极点加速向期望工作点收敛,动态响应性能提升,但闭环极点趋近虚轴,系统稳定裕度下降,影响抗扰动性能。因此,在保证系统极点位于左半平面且远离虚轴的前提下,适当调节增益 k ,可兼顾闭环控制系统达成期望的动态响应性能。

为解决一致性控制频繁通信造成的数据冗余和时变时延敏感问题,提出动态事件触发机制,将式(27)改写为:

$$\dot{\mathbf{s}}_i(t) = \sum_{j \in n} a_{ij} [\bar{\mathbf{s}}_i(t_k^i) - \bar{\mathbf{s}}_j(t_k^j)], \forall t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \quad (29)$$

式中, $\bar{\mathbf{s}}_i(t_k^i)$ 、 $\bar{\mathbf{s}}_j(t_k^j)$ 分别为第 i 、 j 节点当前事件触发时刻 t_k^i 储能SoC,在下一事件触发时刻 t_{k+1}^i 到

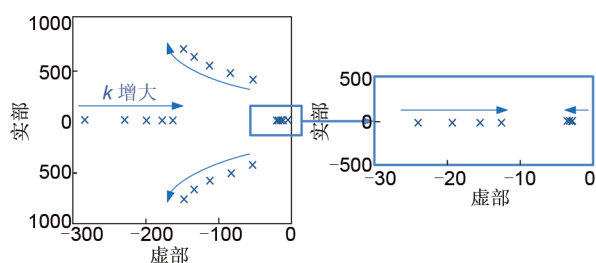


图5 反馈线性化闭环控制系统根轨迹

Fig. 5 Root locus diagram of feedback linearization closed-loop control system

达前各储能 SoC 保持不变，有效降低一致性控制通信频次。

为确定式(29)事件触发时刻, 定义第 i 节点储能 SoC 事件触发误差为:

$$e_i(t) = \bar{s}_i(t_k^i) - s_i(t), \forall t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \quad (30)$$

根据式(30), 设计动态事件触发条件为:

$$t_k^i = \inf \{t > t_{k-1}^i \mid f_i(t) = 0\}$$

$$f_i(t) = \|\mathbf{e}_i(t)\|^2 - \frac{\sigma\alpha(1-n_i)}{n_i/\alpha} \|\dot{\mathbf{s}}(t)\|^2 \quad (31)$$

式中, n_i 为与第 i 节点储能相邻的节点数; σ 、 α 为动态事件触发参数, 满足 $0 < \sigma < 1$ 、 $0 < \alpha < 1/n_i$ 。

计及 SoC 均衡的分布式储能并网系统反馈线性化控制方法结构,如图 6 所示。上层设计具有最小相位特性的反馈线性化控制器,通过重构状态变量与控制变量映射关系,实现系统完全解耦变换;通过对全局能量函数主动整形,实现系统精确线性化变换,准确跟踪各状态变量期望轨迹,抑制由不确定性扰动和参数摄动引起的暂态能量激励,确保宽运行范围内分布式储能并网系统全局渐近稳定。下层设计基于动态事件触发机制的储能 SoC 均衡控制方法,根据相邻节点储能 SoC 一致性误差,实时调节反馈线性化控制律增益,提升状态变量期望轨迹跟踪快速性,减少通信频次,降低时变通信时延和通信链路中断故障的不利影响。本研究方法从非线性本质出发,设计形式简单的非线性控制器,响应快速,同步性好,稳定域宽。

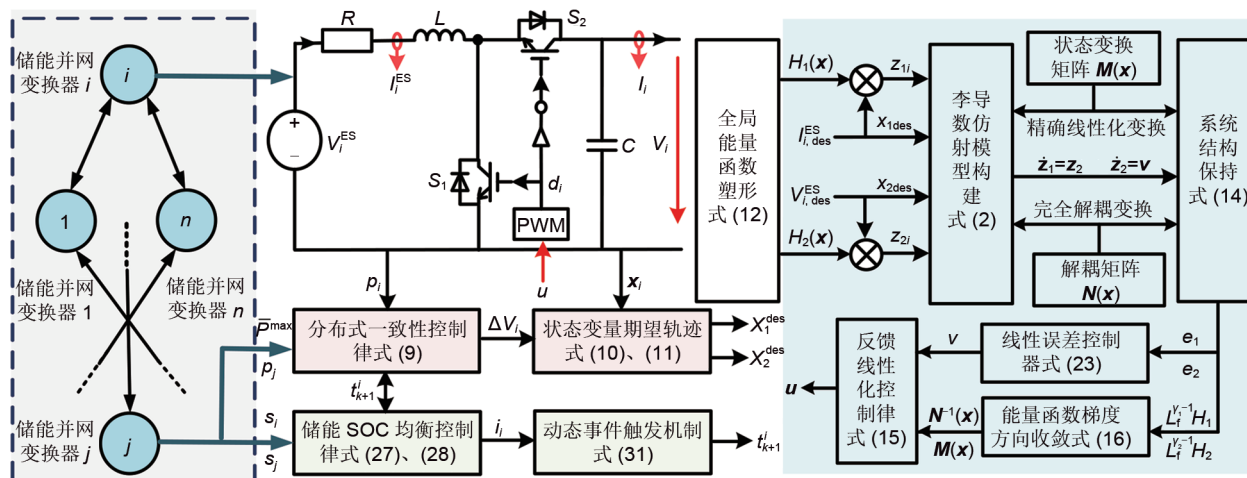


图6 计及SoC均衡的分布式储能并网系统反馈线性化控制框图

Fig. 6 Block diagram of feedback linearization control for distributed energy storage grid-connected system considering SoC balance

3 稳定性分析

利用 Lyapunov 稳定性定理，证明本研究计及 SoC 均衡的分布式储能并网控制系统具有全局渐近稳定性。

定义分布式储能并网控制系统 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^\top \mathbf{L} \mathbf{s} \quad (32)$$

式中, $\mathbf{s}=[s_1, s_2 \cdots s_n]^T$ 。

分布式储能 SoC 一致性误差可写为:

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{L}(\mathbf{s} + \mathbf{e}) \quad (33)$$

式中, $\mathbf{e}=[\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \cdots \mathbf{e}_n]^T$ 。

由于 $\mathbf{L}$ 为对称半正定矩阵, 则式(32)满足 $\mathbf{V} \geq 0$ 。
对式(32)求导可得:

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \mathbf{L} \dot{\mathbf{s}} \quad (34)$$

将式(33)代入式(34)可得:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \mathbf{L}^2 (\mathbf{s} + \mathbf{e}) = -\mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} - \mathbf{e}^T \mathbf{L} \dot{\mathbf{s}} = -\|\dot{\mathbf{s}}\|^2 - \mathbf{e}^T \mathbf{L} \dot{\mathbf{s}} \quad (35)$$

将式(35)展开可得:

$$\dot{V} = -\sum_{i=1}^n \dot{\mathbf{s}}_i^2 - \sum_{i,j=1}^n \mathbf{e}_i (\dot{\mathbf{s}}_i - \dot{\mathbf{s}}_j) = -\sum_{i=1}^n \dot{\mathbf{s}}_i^2 - \sum_{i=1}^n n_i \mathbf{e}_i \dot{\mathbf{s}}_i + \sum_{i,j=1}^n \mathbf{e}_i \dot{\mathbf{s}}_j \quad (36)$$

由于式(36)中 $\mathbf{e}_i \dot{\mathbf{s}}_i$ 满足:

$$\begin{aligned} |\mathbf{e}_i \dot{\mathbf{s}}_i| &\leq \frac{1}{2\alpha} \mathbf{e}_i^2 + \frac{\alpha}{2} \dot{\mathbf{s}}_i^2, \\ 0 < \alpha < 1/n_i \end{aligned} \quad (37)$$

根据式(37), 由式(36)可得:

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n \dot{\mathbf{s}}_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha} n_i \mathbf{e}_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha}{2} n_i \dot{\mathbf{s}}_i^2 + \sum_{i,j=1}^n \frac{\alpha}{2} \dot{\mathbf{s}}_j^2 \quad (38)$$

由于分布式储能通信网络为无向图且对称, 则有:

$$\sum_{i,j=1}^n \frac{\alpha}{2} \dot{\mathbf{s}}_j^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha}{2} n_i \dot{\mathbf{s}}_i^2 \quad (39)$$

根据式(36), 由式(35)可得:

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n (1 - \alpha n_i) \dot{\mathbf{s}}_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha} n_i \mathbf{e}_i^2 \quad (40)$$

由于动态事件触发函数满足 $f_i(t) \leq 0$, 则有:

$$\frac{1}{\alpha} n_i \|\mathbf{e}_i(t)\|^2 \leq \sigma (1 - \alpha n_i) \|\dot{\mathbf{s}}_i(t)\|^2, 0 < \sigma < 1 \quad (41)$$

根据式(41), 由式(40)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\sum_{i=1}^n (1 - \alpha n_i) \dot{\mathbf{s}}_i^2 + \sigma (1 - \alpha n_i) \|\dot{\mathbf{s}}_i(t)\|^2 \leq (\sigma - 1) (1 - \alpha n_i) \|\dot{\mathbf{s}}_i(t)\|^2 \end{aligned} \quad (42)$$

由于 $0 < \alpha < 1/n_i$, $0 < \sigma < 1$, 则式(42)满足:

$$\dot{V} \leq 0 \quad (43)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理, 计及 SoC 均衡的分布式储能并网控制系统能渐近收敛至期望工作点。

4 基于 dSPACE 的实验结果分析

为了验证本研究计及 SoC 均衡的分布式储能并网系统反馈线性化控制方法有效性和可行性, 借助 dSPACE 系统快速原型功能, 搭建如图 7 所示实验系统, 分布式储能并网控制系统 dSPACE 集成化结构如图 8 所示。在 Matlab/Simulink 环境下构建如图 1 所示分布式储能并网系统模型, 通过 RTI 实时接口实现 dSPACE 系统与 Simulink 模型的连接, 利用 RTW 实时工作间进行扩展, 实现 Matlab 模型向 dSPACE 仿真器的代码自动下载转换; 所提方法借助 DSP TMS320F28335 高速处理器调试运行, DSP 生成的 PWM 信号经 DS4002 组件与 dSPACE 连接; 由 dSPACE 的 Control Desk 软件对分布式储

能并网系统模型和反馈线性化控制方法进行联调, 实时监测控制效果。分布式储能并网控制系统实验参数见表 1^[12]。

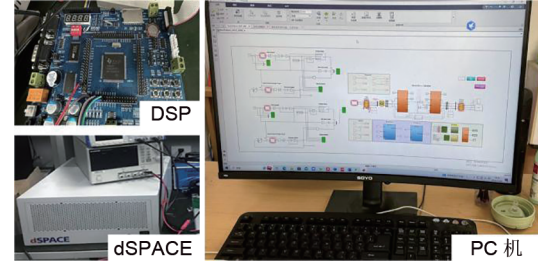


图 7 基于 dSPACE 的实验系统

Fig. 7 Experimental equipment based on dSPACE

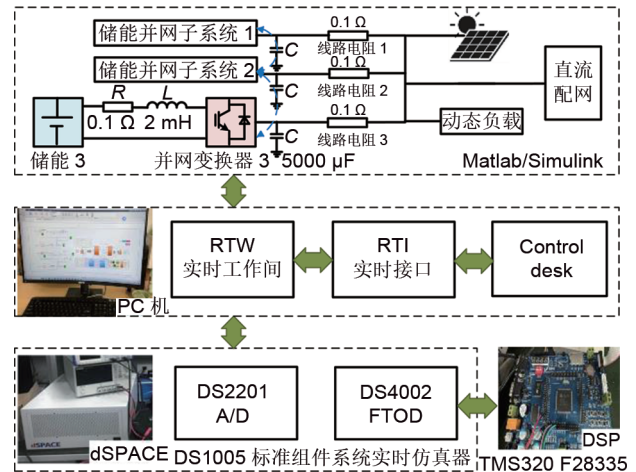


图 8 分布式储能并网控制系统 dSPACE 集成化结构

Fig. 8 The dSPACE integrated structure of distributed energy storage grid-connected control system

表 1 分布式储能并网控制系统实验参数

Table 1 Experimental parameters of distributed energy storage grid-connected control system

物理量	参数值
直流配网额定电压/V	700
储能 1、2、3 初始额定容量/Ah	0.3
储能 1、2、3 初始荷电状态/%	75
储能侧电阻/ Ω	0.1
储能侧电感/mH	2
网侧电容/ μF	5000
各储能并网系统初始线路电阻/ Ω	0.1
各储能并网变换器开关频率/kHz	10
光伏发电初始输出功率/kW	4
负载初始功率/kW	7.4
一致性控制牵制项增益	5
SoC 均衡控制增益	100

4.1 情形 1: 分布式储能并网控制系统动态响应性能测试

(1) 无通信时延情形下

实验设置：储能 1、2、3 额定容量比为 1:1:1，各储能初始 SoC 都为 75%，光伏发电工作在最大功率点跟踪模式，输出功率为 4 kW，动态负载功率为 7.4 kW，各储能并网变换器工作在放电模式，维持源荷功率平衡。在 $t=0$ s 时，启动分布式储能并网变换器协同控制方法，采用非线性干扰观测控制方法^[12]与本研究所提反馈线性化控制方法的实验结果如图 9 所示。

分析图 9(a)、(c) 可知，非线性干扰观测控制方法依据 Lyapunov 稳定性条件估计各储能并网电压误差，在线补偿分布式节点状态变量期望轨迹跟踪

误差，直流母线电压动态响应快速，但观测器对状态变量变化方向较敏感，易在暂态初期造成控制变量输出过调，因而直流母线电压出现较大超调；由于一致性控制器依赖于相邻储能节点控制变量估计，交互耦合作用使得各储能并网变换器状态变量收敛速度变缓慢，直流母线电压调节时间较长。本研究反馈线性化控制方法将直流配网母线电压波动视为暂态能量激励的结果，通过全局能量函数塑形，使闭环控制系统沿全局能量函数梯度方向快速收敛至期望工作点，有效抑制了一致性误差对状态变量期望轨迹跟踪的影响，各直流母线电压动态响应快速性虽不及非线性干扰观测控制方法，但状态变量期望轨迹跟踪无超调，稳态误差小，调节时间短。

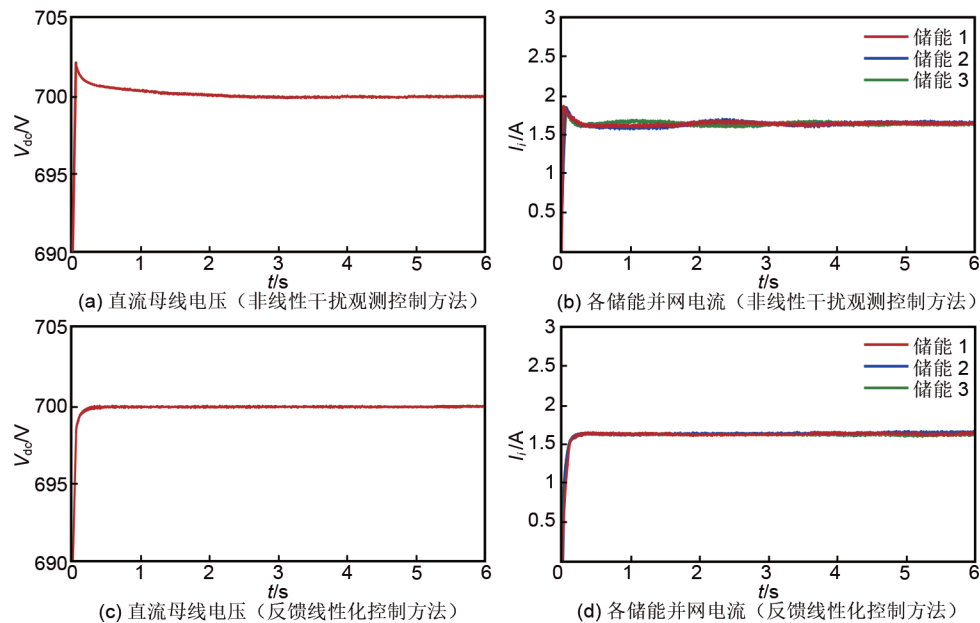


图 9 无通信时延情形下不同控制方法实验结果

Fig. 9 Experimental results of different control methods with zero communication delay

分析图 9(b)、(d) 可知，在 $t=0$ s 时，启动非线性干扰观测控制方法，各储能输出电流具有较快的动态响应速度，上升时间短，但超调较大；非线性干扰观测器利用各储能输出电压和扰动观测残差，准确估计各节点母线电压，实现各储能并网电流渐近收敛至期望轨迹，但干扰观测器一阶残差设计对状态变量变化方向具有高度敏感性，迭加一致性通信网络交互耦合作用，使得各储能并网电流出现小幅波动，经较长调节时间，渐近收敛至期望工作点。在 $t=0$ s 时，启动本研究反馈线性化控制方法，

通过调节各储能并网电压和输出电流，实现各尺度环节协同抑制暂态能量激励，使各状态变量期望轨迹跟踪误差快速收敛，暂态过程中各储能输出电流动态响应同步性好，虽上升时间较长，但具有较小的稳态误差和较短的调节时间。

(2) 时变通信时延情形下

实验设置：情形与无通信时延情形测试条件一致，在一致性通信网络中施加时变通信时延，储能 1、2 间时变通信时延为 $[50+50\sin(10t)]$ ms，储能 2、3 间时变通信时延为 $[60+60\sin(15t)]$ ms，储能

3、1间时变通信时延为 $[70+70\sin(20t)]\text{ms}$ 。在 $t=0\text{ s}$ 时,启动分布式储能并网变换器协同控制方

法,采用非线性干扰观测控制方法^[12]与本研究反馈线性化控制方法的实验结果对比如图10所示。

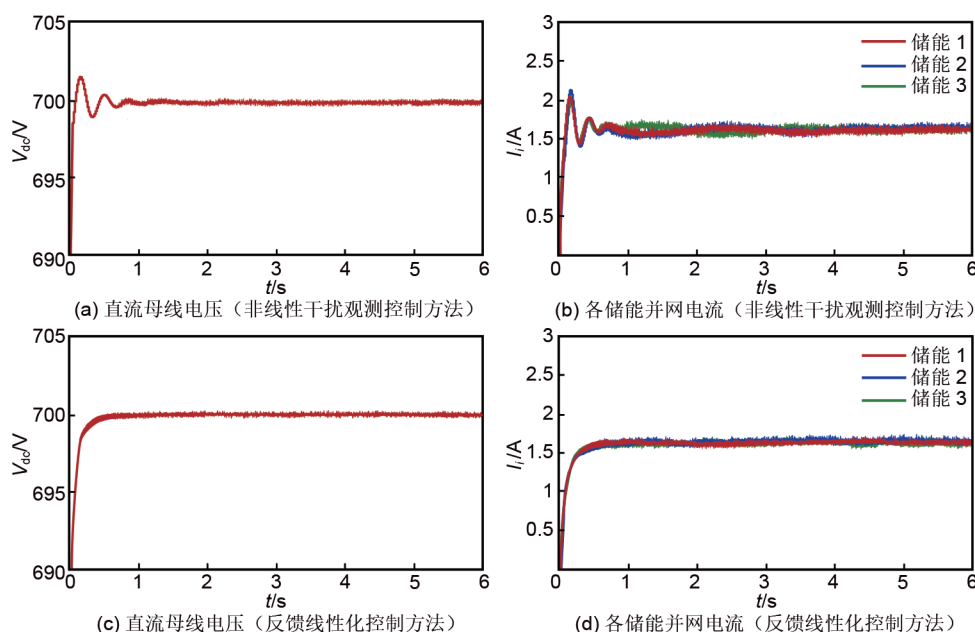


图10 时变通信时延情形下不同控制方法实验结果

Fig. 10 Experimental results of different control methods with time-varying communication delay

分析图10(a)、(c)可知,当系统发生时变通信时延,非线性干扰观测控制方法通过重构各储能并网电压观测信号及其一阶导数,准确估计各储能并网变换器控制变量真实状态,使配网各节点电压恢复可观性,有效抑制时变通信时延对各状态变量造成的不确定性扰动影响,但暂态初期时变通信时延导致观测器状态估计滞后,使直流母线电压超调加剧,发生明显振荡;各储能输出电流 I_i^{ES} 与并网电压 V_i 的耦合作用,使时变通信时延影响下状态变量期望轨迹跟踪变慢,直流母线电压调节时间延长。本研究反馈线性化控制方法通过构建李导数非线性映射关系,实现各储能输出电流 I_i^{ES} 与并网电压 V_i 完全解耦,有利于各储能并网变换器状态变量期望轨迹的快速准确跟踪,虽一致性控制网络存在时变通信时延,但反馈线性化控制方法依然保持了较优的动静态响应性能,虽稳态误差稍有增大,但闭环控制系统沿全局能量函数梯度方向收敛的调节机制确保了控制性能的一致性,无明显超调,调节时间短。

分析图10(b)、(d)可知,非线性干扰观测控制方法通过构建各储能并网电压和一阶残差信号,估计控制变量动态,能准确捕捉定通信时延特征,但

多通信链路时变时延情形下,状态变量误差耦合使得观测器难以获取足够可靠信息准确重构系统控制变量,补偿效果下降,时变通信时延造成各储能输出电流出现明显超调,稳态误差变大,调节时间变长。本研究所提反馈线性化控制方法将多通信链路时变时延造成的状态和控制变量误差视为集总扰动,以各储能并网变换器状态变量渐进稳定跟踪为前提,设计非线性控制器,有效降低了由状态变量估计失准引发的分布式控制连锁失效风险,通过使全局能量函数渐进收敛,确保状态变量准确跟踪期望轨迹,最小化时变通信时延对控制性能的影响,保持了较小的稳态误差和较短的调节时间。

图10比较了变通信时延情形下不同控制方法各储能并网电流动静态响应性能,量化结果见表2。分析表2可知,在储能放电工作模式下,采用非线性干扰观测控制方法,各储能并网变换器跟踪状态变量期望轨迹响应快速,上升时间最大仅为0.195 s;但超调明显,储能并网变换器2最大超调量达30.26%;调节时间较长,储能并网变换器2需3.55 s才能稳定在新的期望工作点;稳态误差较大,储能并网变换器2电流期望轨迹跟踪误差达0.069 A。采用本研究所提反馈线性化控制方法,虽上升时间较长,

各储能并网变换器均需 0.6 s 以上，但调节时间短，仅需约 0.8 s，各储能并网电流超调量、稳态误差均分别低于 1.3% 和 0.03 A，保持了较优的动静态响应性能。

表 2 不同控制方法静态动态响应性能量化比较

Table 2 Quantitative comparison of static and dynamic response characteristics for different control methods

节点	控制方法	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s	稳态误差/A	平稳时间/s
储能 1	非线性干扰观测	0.186	25.79	3.524	0.057	3.939
	反馈线性化	0.651	1.279	0.788	0.021	0.869
储能 2	非线性干扰观测	0.191	30.26	3.550	0.069	3.953
	反馈线性化	0.648	1.253	0.793	0.022	0.877
储能 3	非线性干扰观测	0.195	23.42	3.519	0.065	3.917
	反馈线性化	0.653	1.228	0.789	0.024	0.858

4.2 情形 2: 分布式储能并网控制系统稳定性和鲁棒性测试

为验证本研究所提方法在分布式储能工作点频繁变化情形下的稳定性和鲁棒性，评估 SoC 均衡控制性能，做出如下实验。实验设置：储能 1、2、3 额定容量分别为 0.7 Ah、0.8 Ah、0.6 Ah，储能 1、2、3 初始 SoC 分别为 70%、75%、80%，储能并网变换器 1、2、3 线路电阻分别为 0.1 Ω 、0.1 Ω 、0.3 Ω ，储能并网变换器 1、2、3 通信链路均施加 100 ms 定延时。光伏发电功率和动态负载功率变化如图 11(a)、12(a)所示，在 $t=50$ s 时，各储能侧电阻由 0.1 Ω 突增至 0.2 Ω ，各储能侧电感由 2 mH 突降至 1.8 mH。采用非线性干扰观测控制方法^[12]与本研究提反馈线性化控制方法的实验结果分别如图 11、图 12 所示。

分析图 11(b)、图 12(b)可知，光伏发电和动态负载功率频繁变化，各储能工作模式覆盖充电与放电，宽工作范围情形下，两种控制方法均能使直流配网母线电压维持在额定值 700 V。在系统发生外部不确定性功率扰动、内部参数摄动、定通信时延情形下，非线性干扰观测控制方法通过构建各储能并网电压和扰动观测残差，准确估计各储能变换器控制变量期望轨迹，虽出现较大超调和直流母线电压小幅抖振，但闭环控制系统始终能渐进收敛至期望工作点；在 $t=50$ s 时，系统发生参数摄动，直流母线电压抖振幅度增大，表明非线性干扰观测控制

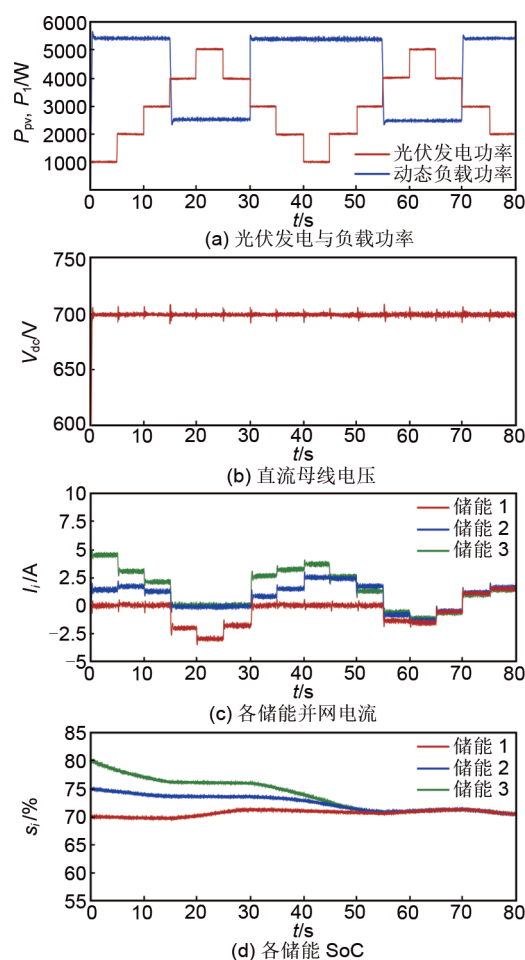


图 11 情形 2 非线性干扰观测控制方法实验结果

Fig. 11 Experimental results of nonlinear disturbance observer control method in case 2

方法对通信时延和系统参数摄动较为敏感。本研究反馈线性化控制方法利用能量函数塑形，使全局能量函数持续向暂态能量最小点收敛，在多重扰动迭加情形下始终能够保持较小的状态变量期望轨迹跟踪误差，具有较平稳的暂态调节过程，有效增强复杂工况条件下系统整体稳定性；在 $t=50$ s 时，各储能侧电阻、电感发生突变，多渠道扰动迭加，直流母线电压依然保持较小的超调和稳态误差，分布式储能协同抑制不确定性扰动带来的暂态能量波动，克服传统反馈线性化控制对参数摄动敏感的不足，闭环控制系统具有较优的同步性和较强的鲁棒性。

分析图 11(c)、(d)和图 12(c)、(d)可知，在储能充放电模式频繁切换情形下，非线性干扰观测控制方法依赖于扰动观测残差的渐近收敛，多渠道扰动使各储能并网电压观测信号及其一阶导数收敛速度

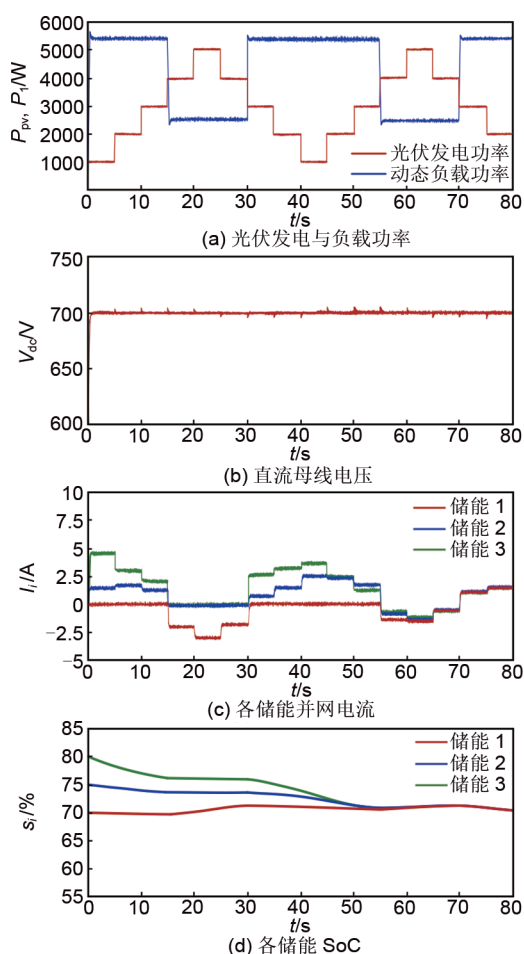


图12 情形2反馈线性化控制方法实验结果
Fig. 12 Experimental results of feedback linearization control method in case 2

变慢,在收敛延迟作用下各储能并网电流在暂态过程出现明显超调,稳态误差较大;非线性干扰观测控制方法基于各储能并网电压残差估计,自适应调节 SoC 平衡因子,收敛延迟作用又反馈影响各储能并网电流轨迹跟踪性能,使稳态误差增大,电流分配精度下降。反馈线性化控制方法将各储能 SoC 一致性误差直接作用至能量函数梯度项,通过自适应调节反馈线性化增益 k ,实现各储能并网变换器状态变量的一致性协同,使 SoC 始终沿能量函数梯度方向快速收敛,确保各储能并网电流分配精确;随各储能 SoC 渐进均衡,各储能输出电流比值逐步与各储能额定容量比例 7:8:6 协同一致,能量函数塑形机制确保各储能有功功率分配沿稳定的能量收敛方向演化,实现各储能有功功率按容量比例精确分配,有益于延长储能运行寿命,提升直流配网经济性。

4.3 情形3:各储能 SoC 均衡自适应调节增益性能测试

为了验证各储能 SoC 均衡自适应调节增益的有效性,实验设置光伏发电功率、动态负载功率分别为 2 kW、6.45 kW,储能 1、2、3 额定容量均为 0.6 Ah,储能 1、2、3 初始 SoC 分别为 70%、71%、72%,储能并网变换器 1、2、3 通信链路均施加 100 ms 定通信延时。采用反馈线性化控制定常增益 $k=5$ 与自适应增益情形下的实验结果如图 13 所示。

分析图 13(a)、(b)可知,在反馈线性化控制定常增益条件下,各储能并网变换器状态变量期望轨迹跟踪并不随各储能 SoC 误差实时调节,将导致闭环控制系统在暂态初期状态变量期望轨迹跟踪时出现较大误差,定常增益使控制变量补偿力度不足,各储能输出电流动态响应快速性受限,使得各 SoC 收敛速度变慢,均衡调节时间较长,在 $t=9.5$ s 时各储能 SoC 才渐进均衡;反馈线性化控制定常增益虽使各储能输出电流上升时间变长,但依然保持了较优的同步性,超调小,稳态误差小。

分析图 13(c)、(d)可知,在反馈线性化控制自适应增益条件下,控制增益根据相邻节点 SoC 一致性误差实时调整,通过与状态变量期望轨迹跟踪形成正反馈,使反馈线性化控制变量补偿强度与各储能 SoC 一致性误差收敛速度保持一致,加速趋近期望工作点,有效减少均衡调节时间,在 $t=8$ s 时已完全收敛一致;通过暂态过程中反馈线性化控制增益的自适应调节,实现状态变量期望轨迹跟踪误差收敛与各储能 SoC 均衡的协同控制,使各储能输出电流具有较快的动态响应速度,有利于闭环控制系统在稳定工作点频繁变化等复杂工况下的稳定运行。

4.4 情形4:不同事件触发机制性能测试

实验设置:分布式储能并网系统运行条件与情形 1 相同,分布式储能一致性控制分别采用周期通信^[11]、双积分静态事件触发机制^[12]和上文所提动态事件触发机制,其中传统周期采样方式通信周期为 0.2 ms。应用反馈线性化控制方法,不同事件触发机制下各储能并网电流波形和在 0.8 s 及之后 20 ms 的各储能 SoC 采样波形实验结果如图 14 所示。

分析图 14(a)、(b)可知,分布式储能一致性控制基于周期性通信完成相邻节点有功功率信息交互,通信频率固定,当储能并网系统已进入稳态运

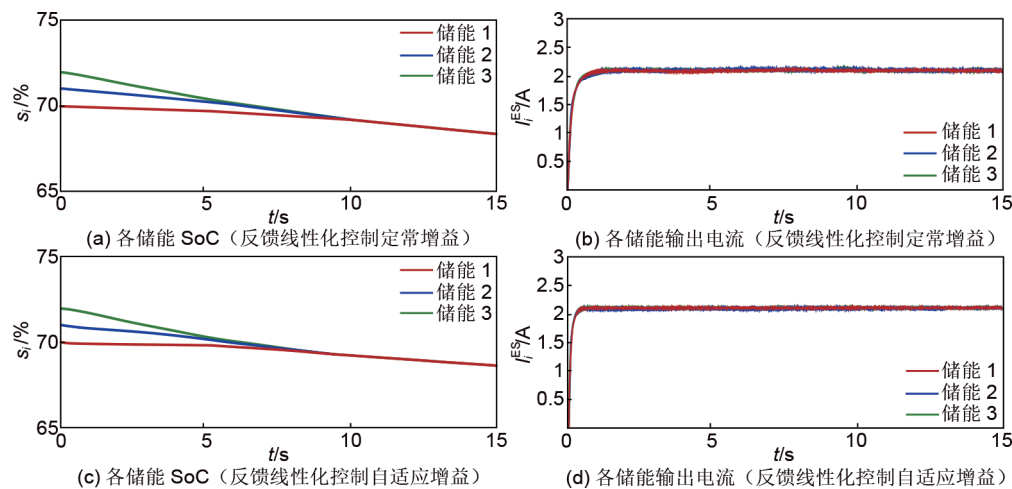


图 13 情形 3 各储能 SoC 均衡自适应调节增益性能测试实验结果

Fig. 13 SoC balance of distributed energy storages for adaptive control gain in case 3

行, 各储能并网电流已完成期望轨迹跟踪, 通信速率仍保持不变, 从而产生大量冗余数据。分布式储能 SoC 均衡精度取决于控制律与采样周期尺度, 为降低通信数据冗余, 若放大采样周期, 可能造成 SoC 均衡误差难以消除; 保持较小采样周期, 虽能确保各状态变量动态响应性能和 SoC 均衡, 但依然存在通信数据庞杂问题。

分析图 14(c)、(d)可知, 双积分静态事件触发机制通过对各储能并网电压和并网电流观测残差进行积分, 实现事件触发阈值的准确设定, 仅在状态变量期望轨迹跟踪误差大于设定的事件触发阈值时启动一致性控制, 实现对各储能并网电压和并网电流期望轨迹的快速跟踪。双积分静态事件触发机制可大幅减少通信需求, 但事件触发常数阈值未与各储能 SoC 均衡控制相关联, 可能造成 SoC 期望轨迹跟踪动态响应需求与通信频率不适配, 复杂工况下暂态过程中各储能并网电压和并网电流期望观测残差准确估计的滞后, 会降低各储能 SoC 的动态响应速度。

分析图 14(e)、(f)可知, 上文所提动态事件触发机制将事件触发条件设置与分布式储能 SoC 一致性误差直接关联, 可以通过尽可能少的通信频次实现 SoC 均衡控制, 同时确保各储能并网变换器维持较优的动静态响应性能。比较不同事件触发机制下各储能并网电流暂态过程局部放大结果可知, 动态事件触发机制下各储能并网电流超调稍有增大, 但调节时间、稳定误差与周期采样方式几乎相同, 动态事件触发机制可在确保控制性能的前提下, 大幅

减少通信频次, 实现状态变量期望轨迹跟踪与分布式储能 SoC 均衡。

1 s 内不同事件触发机制通信事件数见表 3。分析图 14 和表 3 可知, 传统周期通信方式下, 数据采样以固定时间间隔持续进行, 分布式储能一致性控制需保持高频率信号传输, 1 s 内周期采样达 5000 次。采用双积分静态事件触发机制, 随各储能并网电压和并网电流渐近跟踪期望轨迹, 通信事件数明显下降, 与周期通信相比, 各储能通信事件数分别 62.06%、62.96%、64.12%, 但静态事件触发机制未计及各储能 SoC 一致性误差, 仅以各储能并网电压和并网电流观测残差设计事件触发阈值, 为实现各储能 SoC 均衡, 使得一致性通信网络数据交换频次增多。采用本研究所提动态事件触发机制, 与周期通信相比, 各储能通信事件数分别减少 81.58%、83.62%、84.54%; 与静态事件触发机制相比, 各储能通信事件数分别减少 51.45%、55.78%、56.91%, 表明动态事件触发机制引入 SoC 一致性误差, 能够实现各储能状态变量与 SoC 同步快速收敛, 使整体通信量大幅减少, 显著减轻通信负担。

4.5 情形 5: 分布式储能并网控制系统通信链路中断故障恢复性能测试

为测试本研究所提方法在通信链路中断故障情形下动/静态响应性能和 SoC 均衡性能, 实验设置: 储能 1~4 额定容量均为 2 Ah, 各储能初始 SoC 分别为 80%、70%、60%、50%, 储能并网变换器 1~4 线路电阻分别为 1 Ω 、1.3 Ω 、1.6 Ω 、1.9 Ω , 光伏发电功率为 5 kW, 动态负载初始功率为

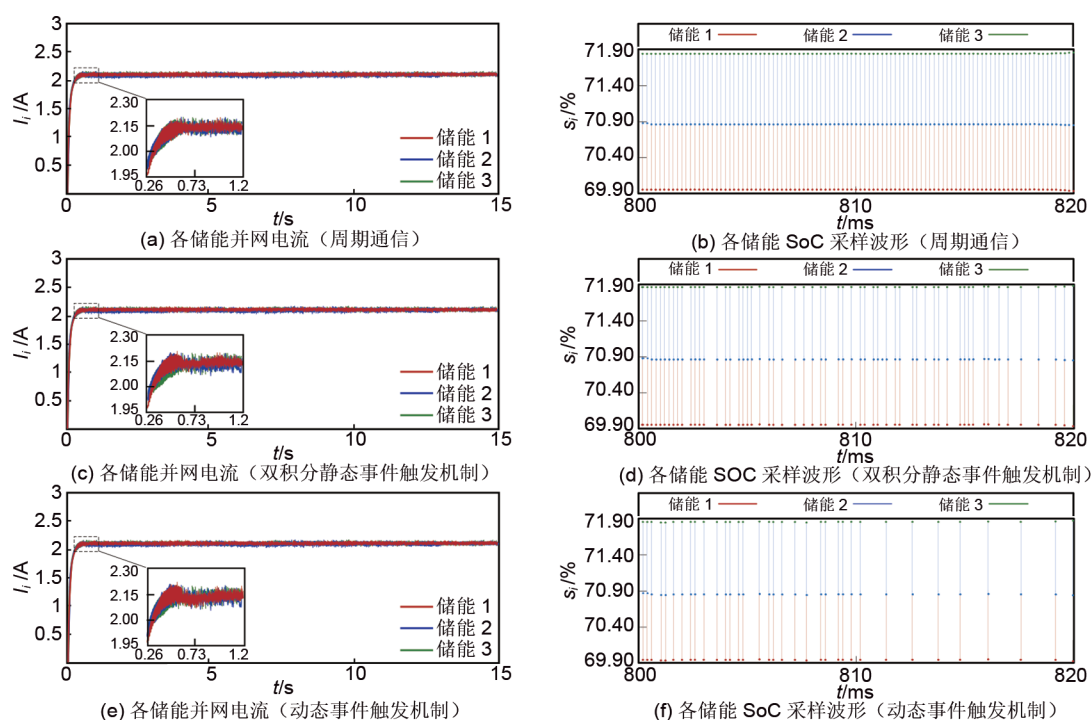


图14 情形4不同事件触发机制性能测试实验结果

Fig. 14 Effect of different event-triggering mechanisms in case 4

表3 1 s内分布式储能一致性控制通信事件数比较
Table 3 Comparison of communication events for consensus-based control of distributed energy storage systems over 1 s

触发方式	各储能SoC均衡控制触发次数		
	储能1	储能2	储能3
周期采样方式	5000	5000	5000
静态事件触发机制	1897	1852	1794
动态事件触发机制	921	819	773

8 kW。在 $t=0$ s时, 储能1-2之间通信链路发生中断故障; 在 $t=4$ s时, 储能3-4之间通信链路发生中断故障; 在 $t=8$ s时, 动态负载功率由8 kW突增至12 kW, 储能1-2之间通信链路发生中断故障清除; 在 $t=12$ s时, 储能3-4之间通信链路发生中断故障清除。采用有限时间一致性控制方法^[23]与本研究提反馈线性化控制方法的实验结果如图15所示。

分析图15(a)~(d)可知, 采用有限时间一致性控制方法, 当系统发生通信链路中断故障时, 能够维持母线电压平稳, 在 $t=8$ s时负载功率发生突变, 母线电压出现小幅跌落, 经短暂调整, 快速恢复至额定值700 V; 在 $t=0$ s时, 储能1-2之间通信链路发生中断故障, 各储能并网变换器依然能够协同分担负载功率需求, 各储能并网电流快速跟踪期望轨

迹; 在 $t=4$ s时, 储能3-4之间通信链路发生中断故障, 通信条件进一步恶化, 显著影响各储能并网变换器协同性能, 各储能并网电流出现大幅超调, 调节时间变长; 在 $t=8$ s时, 负载功率突增, 导致各状态变量期望轨迹发生大幅变化, 各储能并网电流还未完成通信链路中断造成的暂态调整, 继而进入新的暂态过程, 因而出现大幅超调, 调节时间较长; 在 $t=12$ s时, 通信网络拓扑逐步恢复, 各储能并网电流协同跟踪性能逐步提升, 直至一致性收敛至状态变量期望轨迹, 实验结果表明通信链路中断故障对有限时间一致性控制方法动态响应性能影响明显。本研究所提反馈线性化控制方法将通信链路中断故障和负载功率突变引起的有功功率不平衡, 集总视为暂态能量波动, 通过快速调节各储能并网电压和输出电流, 实现有限通信条件下暂态能量激励的快速协同抑制, 使各状态变量沿能量函数梯度方向收敛至期望工作点, 暂态过程中直流母线电压和各储能并网电流能够保持较小的超调与较短的调节时间; 本研究所提方法将系统能量函数直接构建为李导数仿射模型状态变量, 通过能量函数主动整形, 实现全局能量函数与各状态变量期望轨迹一致协同收敛, 不仅有利于保持较优的动静态响应性能, 也进一步增强宽运行

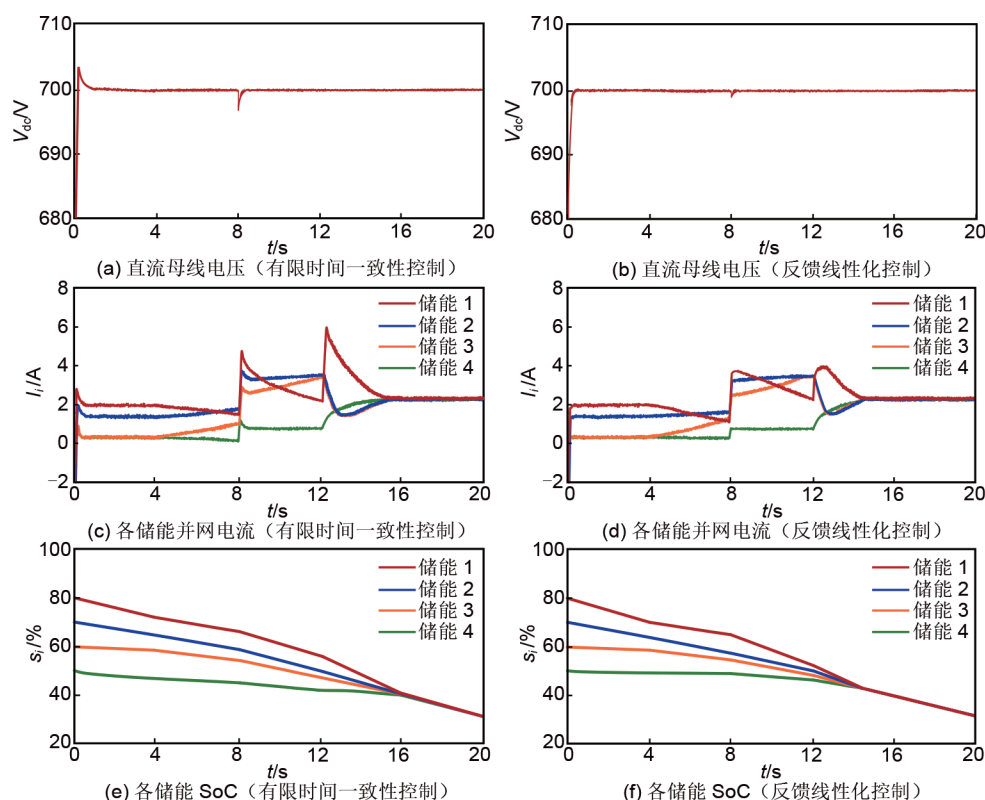


图 15 情形 5 分布式储能并网控制系统通信链路中断故障恢复性能测试实验结果

Fig. 15 Performance of distributed energy storage grid-connected control system with communication link interruption faults in case 5

范围内通信恶劣场景下闭环控制系统的渐近稳定性。

分析图 15(e)、(f)可知，有限时间一致性控制方法与本研究所提反馈线性化控制方法都能实现通信链路中断故障和负载功率突变情形下的各储能 SoC 协同，实现一致性收敛，按额定容量分担负载功率需求。有限时间一致性控制方法利用相邻节点反馈的非线性一致性项，加快各储能状态变量期望轨迹的准确跟踪。但当通信链路发生中断故障时，随通信网络连通性下降，相邻节点反馈一致性误差信息传输受限，导致各储能 SoC 均衡调节时间明显增加。本研究所提反馈线性化控制方法为有效抑制通信链路中断故障对分布式储能 SoC 均衡产生的不利影响，通过能量函数塑形，使各储能并网变换器对系统暂态能量激励进行快速响应，维持各储能功率分配与各状态变量期望轨迹跟踪协同，确保在各状态变量快速收敛的同时，分布式储能 SoC 达成一致性收敛。本方法在通信链路中断故障情形下依然能够保持较优的动态协同能力和 SoC 均衡性能。

4.6 情形 6: 动态通信拓扑条件下分布式储能并网控制系统可扩展性测试

为测试本研究方法在多储能节点接入情形下动态响应性能和 SoC 均衡性能，评估可扩展性和工程适应性，实验设置：分布式储能 12 节点接入直流配网，额定容量均为 2 Ah，各储能初始 SoC 分别为 90%、89%、88%、87%、86%、85%、84%、83%、82%、81%、80%、79%，各储能并网变换器接入直流配网的线路电阻分别为 1 Ω 、1.1 Ω 、1.2 Ω 、1.3 Ω 、1.4 Ω 、1.5 Ω 、1.6 Ω 、1.7 Ω 、1.8 Ω 、1.9 Ω 、2 Ω 、2.1 Ω ，光伏发电输出功率为 5 kW，动态负载初始功率为 8 kW。分布式储能通信拓扑动态变化：在 $t=0$ s 时，储能 1 和储能 12、储能 3 和储能 4 间通信链路中断，储能 1 和储能 3、储能 4 和储能 12 间通信链路连通，形成储能 1-3、储能 4-12 两个闭环通信链路；在 $t=4$ s 时，储能 4 和储能 12、储能 5 和储能 6 间通信链路中断，储能 4 和储能 5、储能 6 和储能 12 间通信链路连通，形成储能 1-3、储能 4-5、储能 6-12 三个闭环通信链路。负载有功功率变化：在 $t=4$ s 时，动态负载功

率由 8 kW 突增至 12 kW; 在 $t=8$ s 时, 动态负载功率由 12 kW 突降至 8 kW。采用有限时间一致性控制

方法^[23]与本研究所提反馈线性化控制方法的实验结果对比如图 16 所示。

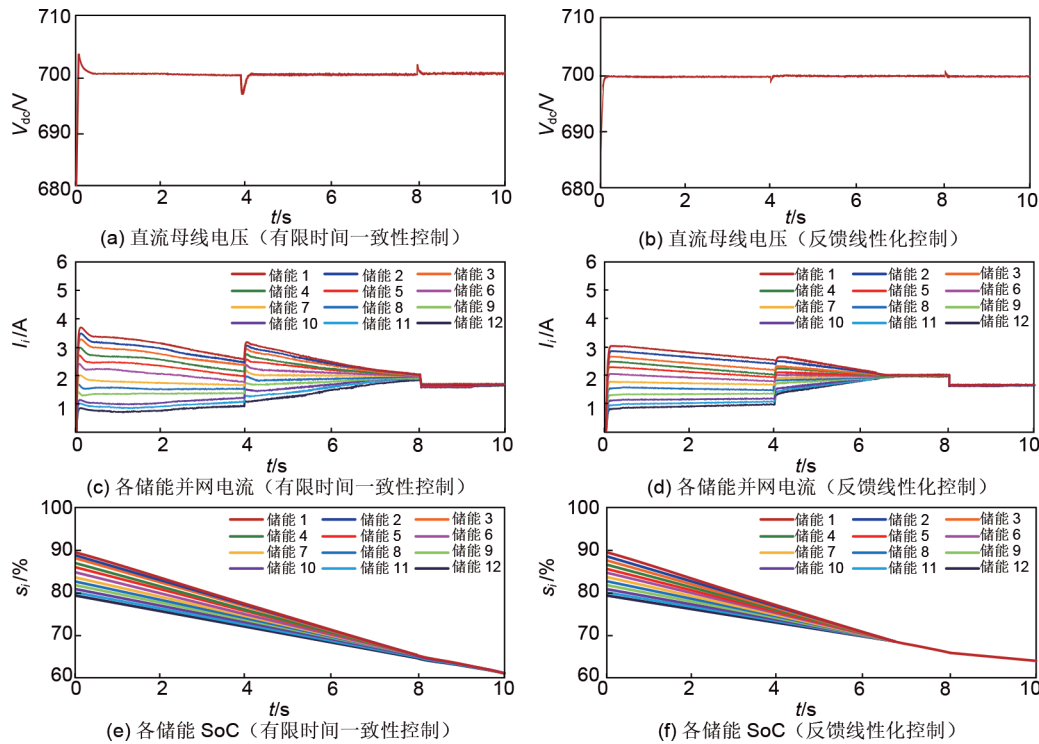


图 16 情形 6 动态通信拓扑条件下分布式储能并网控制系统可扩展性测试结果

Fig. 16 Scalability of distributed energy storage grid-connected control system with dynamic communication topology changes in case 6

分析图 16(a)~(d)可知, 当分布式储能接入直流配网规模扩展至 12 个节点时, 采用有限时间一致性控制方法, 可以维持母线电压平稳。在 $t=4$ s、 8 s 时, 母线电压经快速调整恢复稳定; 当动态负荷需求突增, 各储能并网电流快速增大以维持源荷功率平衡; 当动态负荷需求突降, 各储能并网电流重新调整期望轨迹, 并快速趋稳。由于相邻节点反馈非线性一致性项依赖于通信网络协同, 随着储能接入节点数量增加, 通信网络规模扩大, 一致性算法收敛速度变慢, 导致各储能并网电流调节时间变长。在 $t=0$ s、 4 s 时, 分布式储能通信拓扑发生动态变化, 小规模互联系统具有较快的收敛速度, 但节点数较多的互联系统依然具有较长的调节时间, 分布式储能系统动态响应的同步性难以确保。采用本研究方法时, 即使分布式储能系统规模扩展至 12 个节点, 通信拓扑发生动态变化, 各储能并网变换器依然能够沿能量函数梯度方向朝期望工作点快速收敛。在负载功率突变情形下, 各储能并网电流保持动态响应快速, 超调小, 调节时间短, 稳态

误差小, 具有较优同步性。

分析图 16(e)、(f)可知, 当分布式储能系统规模扩展至 12 个节点时, 有限时间一致性控制方法能确保各储能 SoC 逐渐向均衡状态收敛, 但一致性算法收敛速度受通信网络拓扑变化及节点数增加影响明显, 各储能 SoC 均衡过程收敛速度变慢; 在 $t=4$ s 时负载功率突增, 各储能并网电流期望轨迹再次调整, 使各储能 SoC 一致性收敛调节时间变长。本研究所提反馈线性化控制方法通过建立各状态变量参与分布式储能并网变换器功率交换机制的全局能量函数, 使反馈线性化控制律能够有效引导暂态能量向期望工作点快速收敛, 在 $t=0$ s、 4 s 时, 分布式储能通信拓扑发生动态变化, 仍可实现各储能并网变换器快速协同分担负载功率需求, 促使各储能 SoC 均衡同步性更好, 超调较小, 调节时间较短, 验证了本研究所提方法在分布式储能并网系统具有良好的可扩展性及对动态通信环境的适应性。

5 结 论

针对计及SoC均衡的分布式储能并网系统稳定运行问题,本研究提出基于能量函数塑形的反馈线性化控制方法。通过构建储能并网变换器李导数仿射模型,使状态变量与控制变量在李导数向量场内呈现简单的线性链式微分形式,保留系统非线性特性,避免传统矢量控制方法依赖于稳定工作点附近局部线性化的不足。采用分层控制架构,上层设计具有最小相位特性的反馈线性化控制器,通过对全局能量函数主动整形,实现非线性系统完全解耦和精确线性化变换,控制律形式简单,计算量小,可准确跟踪各储能并网变换器状态变量期望轨迹,确保系统全局渐进稳定;下层基于动态事件触发机制设计SoC均衡控制律,自适应调节反馈线性化控制增益,通信需求少,动态响应快。在参数摄动达100%、负荷功率连续突增1倍情形下,可实现母线电压波动小于0.5 V,并网电流静态误差小于0.1 A,各储能SoC偏差小于0.5%,通信触发次数由周期采样5000次减少至921次。基于dSPACE的实验结果表明,当系统发生功率突变、参数摄动、时变通信时延、通信链路中断故障时,本研究所述方法能有效抑制直流配网母线电压波动,实现分布式储能SoC均衡,功率精确分配,具有较优的可扩展性和工程适应性。

参 考 文 献

- [1] 周郑. 智能电网中用电信息实时监测与分布式储能系统的协同控制[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3619-3621.
ZHOU Z. Real time monitoring of electricity consumption information and collaborative control of distributed energy storage systems in smart grids[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3619-3621.
- [2] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1776-1798.
ZHAO D M, XU C Y, TAO R, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1798.
- [3] 丁同朝. 储能系统在大规模数据中心能源管理中的应用与网络安全[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3444-3446.
DING T C. Application and network security of energy storage systems in energy management of large scale data centers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3444-3446.
- [4] 高嘉伟, 罗颖冰, 孔赖强, 等. 含状态耦合约束的分布式船舶储能系统两层能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(7): 2500-2513. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232209.
GAO J W, LUO Y B, KONG L Q, et al. A two-layer energy management method for distributed ship energy storage system with state coupling constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(7): 2500-2513. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232209.
- [5] ZHANG Y S, SHOTORBANI A M, WANG L W, et al. Distributed secondary control of a microgrid with a generalized PI finite-time controller[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2021, 8: 57-67. DOI: 10.1109/OAJPE.2021.3056507.
- [6] 欧阳斌, 马瑞, 朱文广, 等. 计及碳减排分摊的配电网分布式储能集群配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8897-8907. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231179.
OUYANG B, MA R, ZHU W G, et al. Distributed energy storage cluster configuration method of distribution network considering carbon emission reduction allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8897-8907. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231179.
- [7] SADABADI M S, MIJATOVIC N, DRAGIĆEVIĆ T. A robust cooperative distributed secondary control strategy for DC microgrids with fewer communication requirements[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 271-282. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3202655.
- [8] 薛花, 胡英俊, 董丙伟, 等. 基于分层控制的光-储-燃直流供电系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 53-62.
XUE H, HU Y J, DONG B W, et al. Hierarchical control based energy management method for photovoltaic-energy storage-fuel cell DC generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 53-62.
- [9] SONG G Y, LIU X H, WEI Z B, et al. Event-triggered adaptive tracking control of hybrid energy storage systems with multiple disturbances[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(4): 10618-10632. DOI: 10.1109/TTE.2025.3559968.
- [10] SADIQ M, HAYAT R, ZEB K, et al. Robust feedback linearization based disturbance observer control of quadrotor UAV[J]. IEEE Access, 2024, 12: 17966-17981. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3360333.
- [11] GUAN Y J, MENG L X, LI C D, et al. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4847-4860. DOI: 10.1109/TSG.2017.2672882.
- [12] HUANG Z L, LI Y, KE M J, et al. Distributed secondary control with an event-triggered consensus-based observer for energy storage systems in islanded DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1167-1179. DOI: 10.1109/TSTE.2023.3329950.
- [13] WAN Y, WEN G H, YU X H, et al. Distributed event-triggered learning-based control for battery energy storage systems under persistent false data injection attacks[J]. IEEE Transactions on

- Smart Grid, 2024, 15(5): 4986-4997. DOI: 10.1109/TSG.2024.3370912.
- [14] 曾国辉, 朱相臣, 曾志伟, 等. 具有公共低压直流母线电压支撑功能的储能单元 SOC 自动均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7160-7169.
- ZENG G H, ZHU X C, ZENG Z W, et al. Energy storage unit state-of-charge automatic equalization control strategy with common LVDC bus voltage support function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7160-7169.
- [15] LIU H, ZHANG Y M, SU J S, et al. Distributed optimal control of energy storages in DC microgrids for operation loss minimization with communication delays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5284-5297. DOI: 10.1109/TSG.2024.3408881.
- [16] LI B Q, WEN S P, YAN Z, et al. A survey on the control Lyapunov function and control barrier function for nonlinear-affine control systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 584-602. DOI: 10.1109/JAS.2023.123075.
- [17] 薛花, 任春雷, 张晓雯, 等. 基于一致性理论的直流微电网多电力弹簧分布式电压平稳控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7285-7303.
- XUE H, REN C L, ZHANG X W, et al. Distributed consensus-based voltage regulation control of multiple DC electric springs in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7285-7303.
- [18] 袁小明, 周蓉. 电力电子化并网设备激励下网络不对称故障分析的时变幅频对称分量法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5811-5822. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211261.
- YUAN X M, ZHOU R. Method of time-varying amplitude/frequency symmetrical components for network asymmetrical fault analysis excited by power electronic devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5811-5822. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211261.
- [19] ERROUISSI R, SHAREEF H, VISWAMBHARAN A, et al. Disturbance-observer-based feedback linearization control for stabilization and accurate voltage tracking of a DC-DC boost converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6687-6700. DOI: 10.1109/TIA.2022.3183040.
- [20] TIAN Y J, WANG X C, YUE Z S. Energy-based full-state feedback linear control for modular multilevel converters with improved damping and reduced model order[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(1): 826-837. DOI: 10.1109/TIE.2025.3600547.
- [21] 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. DOI: 10.1109/TIE.2016.2577542.
- [22] LU J H, LIU X J, HOU X C, et al. A distributed control strategy for state-of-charge balance of energy storage without continuous communication in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 206-216. DOI: 10.1109/TSTE.2022.3206327.
- [23] ZENG Y J, ZHANG Q J, LIU Y C, et al. Fixed-time secondary controller for rapid state-of-charge balancing and flexible bus voltage regulation in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(3): 5393-5407. DOI: 10.1109/TPWRS.2023.3323986.