第 50 卷 第 12 期：5457-5468 高电压技术 Vol.50, No.12: 5457-5468
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230504

基于有限时间事件驱动协同的微电网频率恢复和荷电状态平衡控制

马溪原，王鹏宇，杨铎炯，张子昊，林振福，徐　全
（广东省数字电网技术企业重点实验室(南方电网数字电网研究院)，广州 510000）

摘　要：为解决由于功率失配引起的分布式发电系统频率偏差问题，该文针对带电池储能系统(battery energy storage system, BESS)的多智能体交流微电网，提出了一种基于低带宽通信网络的分布式有限时间控制算法。该控制算法以 Lyapunov 方法和齐次逼近理论为基础，可确保系统节点不依赖初始条件，在一定时间内加速收敛。另外，为减轻通信负担，设计了一种能够避免芝诺(Zeno)行为的事件驱动通信机制，并导出了该行为触发边界的充分条件。通过模拟多个孤岛交流微电网案例进行仿真分析。研究结果表明，与传统控制器相比，所提出的控制算法在保证收敛时间不随初始条件变化的前提下，可以协调 BESS 以消除其与标准频率的偏差，同时解决荷电状态(state of charge, SoC)平衡问题，提高了同步速度，降低通信负担，确保了整个系统的稳定性和可靠性。
关键词：电池储能系统；多智能体交流微电网；分布式有限时间控制算法；事件驱动通信机制；荷电状态

Finite-time Event-driven Microgrid Secondary Frequency Regulation and State of Charge Balance Control

MA Xiyuan, WANG Pengyu, YANG Duotong, ZHANG Zihao, LIN Zhenfu, XU Quan
(Guangdong Provincial Key Laboratory of Digital Grid Technology(Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510000, China)

Abstract: To address the frequency deviation issue in distributed generation systems caused by power mismatches, this paper proposes a distributed finite-time control algorithm based on low-bandwidth communication networks for multi-agent AC microgrids with battery energy storage systems (BESS). This control algorithm, founded on the Lyapunov method and homogeneous approximation theory, ensures that system nodes converge rapidly within a certain time without dependence on initial conditions. Moreover, to significantly alleviate communication burdens, an event-triggered communication mechanism is designed to avoid Zeno behavior, and the sufficient conditions for the triggered boundary behavior are derived. Simulation analyses are conducted on multiple islanded AC microgrid cases. The research results show that, compared with traditional controllers, the proposed control algorithm can coordinate BESS to eliminate deviations from the standard frequency while ensuring that the convergence time does not vary with initial conditions; simultaneously, the problem of the state of charge (SoC) balance can be solved, improving synchronization speed, reducing communication burdens, and ensuring the stability and reliability of the entire system.
Key words: battery energy storage system; multi-agent AC microgrid; distributed finite-time control algorithm; event-driven communication mechanism; state of charge

0　引言

在孤岛微电网(microgrid，MG)中，大部分分布式能源(distributed energy resources，DER)的间歇性特征可能导致负载扰动，会对相对较小的交流微电网的系统频率产生显著影响。因此，微电网控制对于提高频率同步性能至关重要。然而，由于功率失配[1]，每个分布式发电(distributed generation，DG)单元本地执行的初级下垂控制器可能导致系统稳态偏离标准频率值。为了应对这种情况，孤岛交流微电网中的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)可以通过DER充放电来增强系统的稳定性和可靠性[2]。因此，BESS 成为缓冲 DER 和负载之间短期功率不平衡的必不可少模块之一[3]。然而，由此产生的荷电状态(state of charge, SoC)平衡问题可能导致 BESS 系统出现过充和过放电行为[4-6]。目

前，许多研究致力于解决频率恢复和SoC平衡问题，使其更为稳定。本文将微电网中的BESS视为多智能体系统(multi-agent system，MAS)，使用分布式控制结构来实现二级控制。具体地，所提出的控制协议被设计成在BESS之间根据其功率额定值共享有功功率，补偿系统的失配总功率，并使稳态频率恢复到设定值。这种分布式控制结构可以看作是多智能体系统中各个智能体之间相互协作、共同完成任务的一种典型形式。为了减少微电网中DG之间的通信负担，采用事件驱动控制策略，即仅当触发某事件时才需要信息交换[7-11]。在事件触发控制系统中，Zeno 现象是一个需要特别注意的问题。Zeno现象是指在有限的时间间隔内触发无穷多次的事件，这可能导致控制系统的实施变得困难，甚至不可能实现。如果在设计事件触发控制器时没有适当地处理这个问题，则系统可能会陷入频繁的更新中，进而导致大量的计算和通信开销，甚至可能使系统无法在实际硬件上实施。为了避免 Zeno 现象，通常需要在设计事件触发机制时引入适当的保护机制，例如设置最小触发间隔或使用基于时间的备份触发机制[12-13]。

此外，随着网络中单元数量的增加，微电网的同步速率会大大降低，DER的低惯性使系统对负载变化非常敏感，进而迫使系统长时间、频繁地停留在异常频率区间内。传统的下垂控制提供了一种基于频偏的同步速率调节方法[14-15]，该方法便于调节但限制了下垂系数的选择。因此，为避免下垂系数在同步速率优化方面受到严重限制，加速同步过程和提高频率控制的收敛性尤为重要。

BESS 控制器的收敛速度对分布式发电系统的频率同步率至关重要。现有的提高收敛速度的策略主要分为：(1)加大耦合强度，优化通信权值，设计最佳网络拓扑[16-17]；(2)利用有限时间控制技术优化收敛时间[18-20]。对于第1种策略，优化控制参数往往以牺牲系统的动态性能为代价；由于实际微网即插即用特性，网络的全局拓扑始终不为各节点单元所知，且难以保持最大熵。

此外，这些策略的主要目的是实现渐近稳定性，这意味着在无限时间内，收敛速度呈指数级。然而，由于初始状态较大，收敛时间的估计相当保守，在运行系统之前，无法准确估计稳定时间。为了解决这个问题，设计了一种改进后的有限时间事件驱动控制算法，在不改变初始条件的情况下，用较短时间解决系统频率恢复和SoC平衡问题。

本研究的主要贡献可以概括为以下几点：

1）本研究开发了一种新颖的微电网二层控制方案。现有研究通常单独研究频率恢复和SoC平衡问题[1,4]，而本文方案能够同时解决这2个问题，从而在整体上提高系统性能和效率。

2）相比于已有的有限时间控制器[18-20]，本文设计了一种改进后的有限时间控制器。该控制器结合Lyapunov和齐次逼近理论，能够忽视初始条件的变化，并在短时间内解决频率恢复和SoC平衡问题，从而提供更快速和更稳定的控制性能。

3）本文方法强调了分布式和事件驱动的设计理念。在本文方案中，每个DER或BESS单元只需要使用本地和邻近的局部信息，并在事件触发时刻更新其控制输入，从而有效地避免全局信息的收集和连续信号的采样，进而降低了系统的通信和计算负担。此外，本文证明了所提出的有限时间事件驱动控制方法的事件间隔时间>0，从而有效避免Zeno现象，进一步增强了系统的实用性和鲁棒性。

1 含储能单元的微电网建模

1.1 表示法与代数图论

设定：$\mathbb{R}_+$为集合$[0,+\infty)$；给定一个n元组$(x_1,\cdots,x_n)$，令$\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^n$为相关向量；$\mathbf{1}_n\in\mathbb{R}^n$和$\mathbf{0}_n\in\mathbb{R}^n$分别为单位$n$维向量和零分量$n$维向量；$\boldsymbol{J}_n\in\mathbb{R}^{n\times n}$和$\mathbf{0}_n\in\mathbb{R}^{n\times n}$分别为元素均为1或0的$n\times n$矩阵；$\mathbf{1}_n^{\perp}$表示$\mathbf{1}_n$的正交补，$\mathbf{1}_n^{\perp}=\{\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^n:\mathbf{1}_n^{\perp}\boldsymbol{x}=0\}$；$\boldsymbol{I}_n$表示单位矩阵，$\boldsymbol{I}_n\in\mathbb{R}^{n\times n}$。给定一个有序索引集$N$和1维数组$\{x_i\}_{i\in N}$，令$\mathrm{diag}(\{x_i\}_{i\in N})$为关联的对角矩阵；$\|\bullet\|$表示欧几里得范数；$\lambda_1(\boldsymbol{A})\le\cdots\le\lambda_n(\boldsymbol{A})$为矩阵$\boldsymbol{A}\in\mathbb{R}^{n\times n}$的特征值。给定向量$\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^n$，定义一种向量$\boldsymbol{x}$的元素的$\gamma$次幂组成的新向量的简要表达形式 $\mathrm{sig}(\boldsymbol{x})^{\gamma}=\left[|x_1|^{\gamma}\mathrm{sgn}(x_1),\cdots,|x_n|^{\gamma}\mathrm{sgn}(x_n)\right]^{\mathrm{T}}$，$|\boldsymbol{x}|^{\gamma}=\left[|x_1|^{\gamma},\cdots,|x_n|^{\gamma}\right]^{\mathrm{T}}$，其中$\mathrm{sgn}(\cdot)$是符号函数。函数$\mathfrak{H}:\mathbb{R}_+^2\to\mathbb{R}_+$定义为$\mathfrak{H}(a,b)=\dfrac{a}{1+a}(1+b)$。对于$\boldsymbol{r}\in\mathbb{R}^n$和$\boldsymbol{v}\in\mathbb{R}^n$，$\boldsymbol{v}^{\boldsymbol{r}}\Delta\boldsymbol{x}=\left[\lambda^{r_1}x_1,\cdots,\lambda^{r_n}x_n\right]^{\mathrm{T}}$是$\mathbb{R}^n$中和权重为$\boldsymbol{r}$的向量$\boldsymbol{x}$的扩张；$G(V,\varepsilon,\boldsymbol{A})$表示无向连通图，其中$V=\{1,2,\cdots,n\}$为顶点集，$\varepsilon\in V\times V$为边集合，$\boldsymbol{A}\in\mathbb{R}^{n\times n}$为邻接矩阵。矩阵$\boldsymbol{A}$的元素满足对

于每个无向边 $e=(i,j)\in\varepsilon$。节点 i 的邻居集表示为 $N_i=\{j|(i,j)\in\varepsilon\}$。对于节点 $i\in V$，定义度 $d_i=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}$，度矩阵 $\boldsymbol{D}=\mathrm{diag}\left(\{d_i\}\in\mathbb{R}^{n\times n}\right)$，$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{D}-\boldsymbol{A}$ 为拉普拉斯矩阵。若对 $i\in\{1,2,\cdots,n\}$，$d_l+r_{l,i}>0$，且对于 $C\in\mathbb{R}^n\setminus\{0\}$，$\lim_{\varepsilon\to l}\left(\max_{x\in C}\left|\frac{f_l\left(\varepsilon^{r-l}\lozenge\boldsymbol{x}\right)}{\varepsilon^{d_3+n_{i,j}}}-f_{l,i(x)}\right|=0\right)$ 成立，则连续向量函数 $f:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^n$ 在具有相关的三元组 $\left(\boldsymbol{r}_l,k_l,\phi_l\right)$ 的 l 极限中是齐次函数，其中 $\boldsymbol{r}_l$ 在 $\left(\mathbb{R}_+\setminus\{0\}\right)^n$ 中是权重，$\mathbb{R}$ 中的 d_l 是度，而 f_l 是近似矢量函数[21]。

1.2 基于逆变器的交流微电网的动态建模

考虑以孤岛模式运行的基于逆变器的无损交流微电网。微电网的物理拓扑可以用一个无向连通图 $G_P(V,\varepsilon)$ 来表示。子集 $\mathcal{R}\in\varepsilon$ 表示与 DG 连接的逆变器，其可以将直流电能转换为交流电能；子集 $\mathcal{B}$ 表示能够运行在充放电模式下、与 BESS 单元相接的双向逆变器，它能够将直流电转换为交流电，并将交流电转换为直流电，在一种运行模式(通常被称为逆变模式)下，双向逆变器将直流电源(例如蓄电池或太阳能电池板)转换为交流电源，以供给交流负载或向电网供电。在另一种运行模式(通常被称为整流模式)下，双向逆变器从交流电源(例如电网或发电机)获取电能，转换为直流电能，用于充电电池或供给直流负载。

设 $\mathcal{L}:=V(\mathcal{R}\cup\mathcal{B})$ 表示负载集合。对逆变器 $i\in(\mathcal{R}\cup\mathcal{B})$，分配一个正弦函数形式的电压信号 $U_i(t)=\sqrt{2}U_i^{\mathrm{mag}}\cos\left(\omega^{\mathrm{nom}}t+\varphi_i\right)$，矢量形式为 $U_i^{\mathrm{mag}}\angle\varphi_i$，其中 U_i^{mag} 为节点电压幅度，ω^{nom} 为标准频率 ($2\pi\times50$ 或 $2\pi\times60$ Hz)，φ_i 为节点电压相角。逆变器 i 的角频率由 ω_i 表示。P_i 和 Q_i 分别表示在逆变器 i 处注入网络或从网络吸收的有功和无功功率。对于 $i\in\mathcal{R}$，不可控的有功功率注入 P_i 被限制于 $\left[0,P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{rat}}\right]$，其中 $P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{rat}}$ 为逆变器 i 的额定值。对于 $i\in\mathcal{B}$，当逆变器处于充电模式时，充电/放电功率 P_i 为正；而当处于放电模式时，充电/放电功率 P_i 为负，$P_i\in\left[P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{cha}},P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}\right]$，其中 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{cha}}$、$P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}$ 分别是逆变器 i 的充电功率和放电功率的上限，$P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}>0,-P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{cha}}>0$。对于 $(i,j)\in\varepsilon,Z_{ij}\angle\delta_{ij}$ 为节点 i 和 j 之间的复阻抗。假设与逆变器 i 相邻的逆变器 j 的电压为 $U_i^{\mathrm{mag}}\angle\varphi_i$。则从第 i 个逆变器传递到第 j 个逆变器的复功率为：

$$S_{ij}=U_{ij}I_{ij}^{*}=\frac{U_i^{\mathrm{mag}}U_j^{\mathrm{mag}}\angle\left(\delta_{ij}-\left(\varphi_i-\varphi_j\right)\right)}{Z_{ij}}-\frac{\left(U_i^{\mathrm{mag}}\right)^2}{Z_{ij}}\delta_{ij}\tag{1}$$

如果线路的电阻足够小则可忽略，$\delta_{ij}\to90°$，可得逆变器 i 到 j 的有功功率与无功功率分别为：

$$\begin{cases}P_{ij}=\dfrac{U_i^{\mathrm{mag}}U_j^{\mathrm{mag}}\sin\left(\varphi_i-\varphi_j\right)}{Z_{ij}}\\ Q_{ij}=\dfrac{U_i^{\mathrm{mag}}U_j^{\mathrm{mag}}\cos\left(\varphi_i-\varphi_j\right)}{Z_{ij}}-\dfrac{\left(U_i^{\mathrm{mag}}\right)^2}{Z_{ij}}\end{cases}\tag{2}$$

可以利用频率和电压下垂特性，通过初级下垂机制来调节逆变器的频率和电压，对于 $i\in\mathcal{B}(i\in\mathcal{R}$ 同理)，有：

$$\begin{cases}\omega_i=\omega^{\mathrm{nom}}-K_i^{\mathrm{P}}\left(P_i-P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{nom}}\right)\\ U_i^{\mathrm{mag}}=U^{\mathrm{nom}}-K_i^{\mathrm{Q}}Q_i^{\mathrm{nom}}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{nom}}\in[0,P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{rat}}]$ 为设定值，与逆变器 i 接口 RES 的额定功率有关；控制变量 $P_{\mathcal{B},i}\in\left[P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{cha}},P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}\right]$ 是逆变器 i 的参考功率，用作调节充电/放电功率 P_i 的输入；K_i^{Q} 和 K_i^{P} 是相应的下垂系数；ω^{nom} 和 U^{nom} 分别是逆变器输出频率和电压的额定值。需要注意的是，对于 $i\in\mathcal{B}$，如果 K_i^{P} 为负，则当逆变器 i 处于充电模式时，功率-频率下垂方程有效。

为实现逆变器 i 的下垂控制，采用局部多回路解耦方案。附录 A 图 A1 和图 A2 分别为逆变器 i 向网络注入有功功率和从网络吸收有功功率时的多回路控制图。图 A1、A2 中的局部多回路解耦方案可以使逆变器的输出电压、输入有功功率在短时间内跟踪其参考值。显然，图 A1 的控制方案适用于属于 $\mathcal{R}$ 组的逆变器和属于 $\mathcal{B}$ 组的放电逆变器。图 A2 的控制方案适用于属于 $\mathcal{B}$ 组的充电逆变器。在多环控制策略中，每个控制环对应一个特定的控制目标。

如图 A1 所示，电压控制环的目标是让逆变器的输出电压在短时间内跟踪其参考值。这通常通过比较实际输出电压和参考电压来实现。这个比较结果(即电压误差)会被送入一个控制器(如比例-积分(PI)控制器)进行处理，控制器的输出即为脉宽调制(pulse width modulation, PWM)的调制信号，这个信号用来控制逆变器的开关状态，从而调节输出电压。因此，当输出电压偏离参考电压时，调制信号将相应改变，进而调整逆变器的输出电压，使其向参考

电压靠拢。

当逆变器用于 BESS 单元的充电过程时，控制环变成了功率控制环，如图 A2 所示。功率控制环的目标是让输入的有功功率在短时间内跟踪其参考值。这个环通常使用的控制策略与电压环类似，即比较实际输入功率和参考功率，根据差值(即功率误差)调整控制信号。这个控制信号会作为电流环的参考电流，因此功率控制环通过控制电流环来间接调节逆变器的输入功率。对于 BESS 单元，根据其具体的运行要求，可能需要在这 2 种控制策略之间进行快速切换，从而确保在不同操作条件下都能满足 BESS 的性能需求。此处忽略有关多回路控制算法的详细信息[22]。

由于本文主要关注频率调节，因此利用有功-频率下垂控制机制来建立基于逆变器的交流微电网的动力学特性方程。用 $\omega_i^{\mathrm{dev}} \triangleq \omega_i - \omega^{\mathrm{nom}}$ 表示逆变器节点角频率与标准角频率的偏差。基于式(2)、(3)，可通过摆动方程对网络动力学方程进行建模，即：

$$\begin{cases} \dfrac{\omega_i^{\mathrm{dev}}}{K_i^{\mathrm{P}}} = P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}} - \sum\limits_{j\in N_i} \dfrac{U_i^{\mathrm{mag}} U_j^{\mathrm{mag}} \sin\left(\varphi_i - \varphi_j\right)}{Z_{ij}}, i \in \mathcal{R} \\ \dfrac{\omega_i^{\mathrm{dev}}}{K_i^{\mathrm{P}}} = P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{nom}} - \sum\limits_{j\in N_i} \dfrac{U_i^{\mathrm{mag}} U_j^{\mathrm{mag}} \sin\left(\varphi_i - \varphi_j\right)}{Z_{ij}}, i \in \mathcal{B} \\ 0 = P_{\mathcal{L},i}^{\mathrm{nom}} - \sum\limits_{j\in N_i} \dfrac{U_i^{\mathrm{mag}} U_j^{\mathrm{mag}} \sin\left(\varphi_i - \varphi_j\right)}{Z_{ij}}, i \in \mathcal{L} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$P_{\mathcal{L},i}^{\mathrm{nom}}$ 是节点 $i \in \mathcal{L}$ 上的负载需求；$P_{\mathcal{L}} \triangleq \sum\limits_{i\in\mathcal{L}} P_{\mathcal{L},i}$ 是虚拟节点 $i \in \mathcal{B}$ 上的总负载需求的局部估计。为了在负荷需求时变的情况下保持系统的功率平衡，需要满足以下约束条件：

$$\begin{cases} \max\left(P_{\mathcal{L}}\right) - \sum\limits_{i\in\mathcal{R}} P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}} \le \sum\limits_{i\in\mathcal{B}} P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}} \\ \min\left(P_{\mathcal{L}}\right) - \sum\limits_{i\in\mathcal{R}} P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}} \ge \sum\limits_{i\in\mathcal{B}} P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{cha}} \end{cases} \tag{5}$$

即 BESS 的总充电/放电功率能够将电力从高峰时段转移到非高峰时段。

1.3 有限时间频率恢复和 SoC 平衡问题

模型(4)的频率同步需满足 $\omega_i^{\mathrm{dev}} = \omega^{\mathrm{nom}}$、$\omega_{\mathrm{syn}} \in \mathbb{R}$。对式(4)求和，并根据 $i \in \mathcal{R} \cup \mathcal{B}$、$\omega_i^{\mathrm{dev}} = \omega^{\mathrm{syn}}$，可得同步频率为：

$$\omega_{\mathrm{syn}} = \frac{\sum\limits_{i\in\mathcal{R}} P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}} + \sum\limits_{i\in\mathcal{B}} P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} + \sum\limits_{i\in\mathcal{L}} P_{\mathcal{L},i}}{\sum\limits_{i\in\mathcal{R}\cup\mathcal{B}} \dfrac{1}{K_i^{\mathrm{P}}}} \tag{6}$$

即只有在以下情况下，所有逆变器才能在稳态下以标称角频率运行。根据功率平衡原则，可以得到：

$$\sum_{i\in\mathcal{B}} P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} = -\sum_{i\in\mathcal{R}} P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}} + P_{\mathcal{L}} \tag{7}$$

式中：$\sum\limits_{i\in\mathcal{R}} P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}} + P_{\mathcal{L}}$ 为失配功率 P^{mis}，若 $P^{\mathrm{mis}} = 0$，则同步角频率等于设定值 ω^{nom}。因此，可以通过调节 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}}$ 来解决频率恢复问题。

尽管以上分析给出了频率恢复的控制目标之一，但没有提供如何调节参考值 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}}$ 以满足约束式(5)。受文献[1]中功率共享策略的启发，给出以下调节标准。

定义 1：对于每个 i、$j \in \mathcal{B}$，如果在充电模式下 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} / P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{cha}} = P_{\mathcal{B},j}^{\mathrm{ref}} / P_{\mathcal{B},j}^{\mathrm{cha}}$、放电模式 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} / P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}} = P_{\mathcal{B},j}^{\mathrm{ref}} / P_{\mathcal{B},j}^{\mathrm{dis}}$，则期望的参考值 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}}$ 按比例分担失配总功率。

与文献[1]中定理 7 相似，可证明：若按比例调节属于 $\mathcal{B}$ 的逆变器，则可以满足约束式(5)。不失一般性，本节其余部分只讨论属于 $\mathcal{B}$ 的逆变器需要在放电模式下运行的情况(充电模式原理相同)。需要注意的是，对于所有 $i \in \mathcal{B}$，$P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} / P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}$ 自主达成协议，令 $\lambda_i \triangleq P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} / P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}$、$\lambda^*$ 为动态平衡值。因此，易证：

$$\lambda^*(t) = \frac{P^{\mathrm{mis}}(t)}{\sum\limits_{i\in\mathcal{B}} P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}} \tag{8}$$

考虑 SoC 平衡问题，与逆变器 $i \in \mathcal{B}$ 相连的 BESS 的 SoC 估计通过库仑计数法表示为：

$$\mathscr{M}_i = \mathscr{M}_0 - \frac{1}{C_i}\int \eta_{i_i^{\mathrm{dc}}} \mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：$\mathscr{M}_0$ 是 SoC 的初始值；C_i 和 i_i^{dc} 分别为 BESS 的容量和输出直流电流；$\eta_{i_i^{\mathrm{dc}}}$ 是 BESS 的放电效率。分别定义 P_{dc} 和 U_i^{dc} 为 BESS 的直流输出功率和电压。本文忽略接口逆变器的功率损耗，并根据 $\omega_i = \omega^{\mathrm{nom}}$，可以得到 $P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}} = P_i \approx P_{\mathrm{dc}} = U_i^{\mathrm{dc}} i_i^{\mathrm{dc}}$ 且 $\eta = 1$。得出关于有功功率参考输出功率和初始 SoC 值的 SoC 估计并对时间 t 微分，即：

$$\dot{\mathscr{M}}_i = -\frac{1}{C_i}\frac{P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}}}{U_i^{\mathrm{dc}}} = -\frac{1}{C_i}\frac{\lambda_i P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{ref}}}{U_i^{\mathrm{dc}}} \tag{10}$$

假设对于 $i \in \mathcal{B}$，$K^M \triangleq -P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}} / (C_i U_i^{\mathrm{dc}})$ 为常数，则虚拟领导者 r 的动态建模为：

$$\begin{cases}\dot{\mathscr{M}}_r(t)=K^{\mathscr{M}}\lambda_r(t)\\ \dot{\lambda}_r(t)=\dot{P}^{\mathrm{mis}}(t)/\left(\sum\limits_{i\in\mathcal{B}}P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}\right)\end{cases}\tag{11}$$

对于频率恢复和 SoC 平衡问题，为调整跟随者 $i\in\mathcal{B}$ 的状态变量 λ_i 和 $\mathscr{M}_i$ 来跟踪虚拟领导者 r 的轨迹，在其前面插入一个二次积分控制器，即：

$$\dot{\lambda}_i=u_i\tag{12}$$

式中：u_i 是插入的积分控制器的输入信号，并且仅需要来自逆变器 i 的相邻节点信息。此外，如果存在稳定时间 T_{f} 满足以下条件式(13)，则可采用二次积分控制器来解决有限时间内的频率恢复和SoC平衡问题。

$$\begin{cases}\lim\limits_{t\to t_0+T_{\mathrm{f}}}\dot{\lambda}_i(t)=\lambda^*(t),\lambda_i(t)=\lambda^*,\forall t\ge t_0+T_{\mathrm{f}},\forall i\in\mathcal{B}\\ \lim\limits_{t\to t_0+T_{\mathrm{f}}}\mathscr{M}_i(t)=\mathscr{M}_j(t),\mathscr{M}_i(t)=\mathscr{M}_j(t),\forall t\ge t_0+T_{\mathrm{f}},\forall i,j\in\mathcal{B}\end{cases}\tag{13}$$

这确保了在 $t=t_0+T_{\mathrm{f}}$ 之后，所有 $\lambda_i(t)$ 和 $\mathscr{M}_i(t)$ 都能精确达到同步稳定。

2 改进后的分布式有限时间控制算法

交流微电网中所有 BESS 都可以视为 MAS 中的节点。通过访问参考值，领导节点 $r\in\mathcal{B}$ 的固定增益 $g_r>0$。$\boldsymbol{G}=\mathrm{diag}(\{g_r\})\in\mathbb{R}^{|\mathcal{B}|\times|\mathcal{B}|}$ 是固定增益的对角矩阵。令 $q_i=K^{\mathscr{M}}\lambda_i$、$S_i=\mathscr{M}_i$，可以将节点 i 和虚拟领导者 r 的动态改写为：

$$\begin{cases}\begin{cases}\dot{s}_i(t)=q_i(t)\\ \dot{q}_i(t)=u_i(t)\end{cases},i\in\mathcal{B}\\ \begin{cases}\dot{s}_r(t)=q_r(t)\\ \dot{q}_r(t)=M(t)\end{cases}\end{cases}\tag{14}$$

式中：$M(t)=K^{\mathscr{M}}\dot{P}^{\mathrm{mis}}(t)/\left(\sum\limits_{i\in\mathcal{B}}P_{\mathcal{B},i}^{\mathrm{dis}}\right)$。由于二级控制器的收敛时间尺度比失配总功率的时间尺度短得多，因此可以假设 q_r 是具有连续变化时间的分段恒定信号。在微电网频率控制中，每个局部控制器 u_i (对应于微电网中的 1 个 DG 或 BESS)都会监测其自身的输出频率，并与邻居频率进行比较。如果存在频率偏差，则控制器将调整其输出功率以减小这一偏差。这一过程通过局部控制器的协作可以使得微电网的频率在全局上达成一致。至于 SoC 平衡，也是由各个局部控制器来实现。每个控制器都会监测其对应的储能设备的 SoC，并与目标 SoC 进行比较。如果存在 SoC 偏差，则控制器将通过调整其电池的充放电功率来减小这一偏差。例如，如果 SoC 偏低，则可以增加电池的充电功率；如果 SoC 偏高，则可以增加电池的放电功率或者减小充电功率。通过这种方式，各个储能设备的 SoC 可以在全局上达到平衡。而这整个过程的动力学描述可见二阶系统(式(14))。

2.1 分布式有限时间和事件驱动控制策略

针对式(14)微电网系统，构造了一个改进后的分布式有限时间和事件驱动控制策略，即：

$$\begin{cases}u_i(t)=u_{i1}(t)+u_{i2}(t)\\ u_{i1}(t)=-k_1\mathrm{sig}(\alpha\sum\limits_{j\in N_i}(s_i(t_k^i)-s_j(t_k^i))+g_i(s_i(t_k^i)-s_r(t_k^i))+\\ \beta\sum\limits_{j\in N_i}q_i(t_k^i)-q_j(t_k^i)+g_i(q_i(t_k^i)-q_r(t_k^i)))^{\gamma_1}-\\ k_2\mathrm{sig}(\alpha\sum\limits_{j\in N_i}s_i(t_k^i)-s_j(t_k^i)+g_i(s_i(t_k^i)-s_r(t_k^i))+\\ \beta\sum\limits_{j\in N_i}q_i(t_k^i)-q_j(t_k^i)+g_i(q_i(t_k^i)-q_r(t_k^i)))^{\gamma_2}\\ u_{i2}(t)=-k_3(\alpha\sum\limits_{j\in N_i}(s_i(t_k^i)-s_j(t_k^i))+g_i(s_i(t_k^i)-s_r(t_k^i))+\\ \beta\sum\limits_{j\in N_i}(q_i(t_k^i)-q_j(t_k^i))+g_i(q_i(t_k^i)-q_r(t_k^i)))\end{cases}\tag{15}$$

式中：$t\in\left[t_k^i,t_{k+1}^i\right]$，其中 t_k^i 是节点 i 的最新事件；$0<\gamma_1<1$、$\gamma_2>1$、$k_1>0$、$k_2>0$、$k_3>0$、$\alpha>0$、$\beta>0$ 均为正常数，简洁起见，令：

$$\xi_i\left(t_i^k\right)=\sum_{j\in N_i}s_i\left(t_k^i\right)-s_j\left(t_k^i\right)+g_i\left(s_i\left(t_k^i\right)-s_r\left(t_k^i\right)\right)$$

$$\zeta_i\left(t_i^k\right)=\sum_{j\in N_i}q_i\left(t_k^i\right)-q_j\left(t_k^i\right)+g_i\left(q_i\left(t_k^i\right)-q_r\left(t_k^i\right)\right)$$

$$\varphi_i\left(t_k^i\right)=\alpha\xi_i\left(t_k^i\right)+\beta\zeta_i\left(t_k^i\right)$$

将节点 i 的测量误差表示为 $e_i(t)=u_i\left(t_k^i\right)-u_i(t)$，则节点 i 的触发即时序列 t_k^i 的迭代定义为：

$$t_{k+1}^i=\{t\mid t>t_k^i:f_i(t)\ge0\}\tag{16}$$

与节点 i 对应的事件驱动函数为：

$$f_i(t)=\|e_i(t)\|-\rho\|\varphi_i(t)\|\tag{17}$$

始终有：$0<\rho$。根据控制协议式(15)，可以将节点 i 的动力学写为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{s}}(t)=\boldsymbol{q}(t)\\ \dot{\boldsymbol{q}}(t)=\boldsymbol{e}(t)-k_1\,\mathrm{sig}(\boldsymbol{\varphi}(t))^{\gamma_1}-k_2\,\mathrm{sig}(\boldsymbol{\varphi}(t))^{\gamma_2}-k_3\boldsymbol{\varphi}(t)\end{cases}\tag{18}$$

式中：$t\in\left[t_k^i,t_{k+1}^i\right)$。通过变换 $\hat{s}_i=s_i(t)-s_r(t)$、$\hat{q}_i=s_i(t)-s_r(t)$ 可得：$\boldsymbol{\xi}(t)=(\boldsymbol{L}+\boldsymbol{G})\hat{\boldsymbol{s}}(t)$、$\boldsymbol{\xi}(t)=(\boldsymbol{L}+\boldsymbol{G})\hat{\boldsymbol{q}}(t)$。因此，由式(18)可得：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{\xi}}=\boldsymbol{\zeta}(t)\\ \dot{\boldsymbol{\zeta}}(t)=\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{e}(t)-k_1\,\mathrm{sig}(\boldsymbol{\varphi}(t))^{\gamma_1}-\\ \qquad k_2\,\mathrm{sig}(\boldsymbol{\varphi}(t))^{\gamma_2}-k_3\boldsymbol{\varphi}(t))\end{cases}\tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{L}+\boldsymbol{G}$。令 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)=\left[\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t),\boldsymbol{\zeta}^{\mathrm{T}}(t)\right]^{\mathrm{T}}$，可得：

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}=\boldsymbol{M}\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{N}\tag{20}$$

其中：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{O}_{|\mathcal{B}|} & \boldsymbol{I}_{|\mathcal{B}|}\\ -\alpha\boldsymbol{Q} & -\beta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{2|\mathcal{B}|\times 2|\mathcal{B}|}$$

$$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{|\mathcal{B}|}\\ \boldsymbol{Q}\left(\boldsymbol{e}(t)-k_1\,\mathrm{sig}(\boldsymbol{\varphi}(t))^{\gamma_1}-k_2\,\mathrm{sig}(\boldsymbol{\varphi}(t))^{\gamma_2}\right)\\ -\left(k_3-1\right)\boldsymbol{\varphi}(t)\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{2|\mathcal{B}|\times 1}$$

基于控制协议式(15)，可以提出一些条件来保证所研究的动力学系统式(20)的一致稳定性。简便起见，用 $\hat{\boldsymbol{s}}$、$\hat{\boldsymbol{q}}$、$\boldsymbol{\xi}$、$\boldsymbol{\zeta}$、$\boldsymbol{\varphi}$、$\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{e}$ 来表示 $\hat{\boldsymbol{s}}(t)$、$\hat{\boldsymbol{q}}(t)$、$\boldsymbol{\xi}(t)$、$\boldsymbol{\zeta}(t)$、$\boldsymbol{\varphi}(t)$、$\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 和 $\boldsymbol{e}(t)$。

基于有限时间事件驱动协同的控制器式(15)旨在实现 2 个关键目标：微电网频率恢复和荷电状态平衡。通过精准、灵活地调整微电网中各个分布式能源的输出功率，控制器能够对系统扰动作出快速响应，维持系统频率稳定，从而保证电力供应的连续性和质量。同时，控制器还通过优化能源分配，确保微电网各节点的荷电状态达到平衡，以避免电网过载或供电不足，进一步提高微电网的运行效率和可靠性。

在给出主要结果之前，给出以下引理，这些引理将有助于本文主要结论的证明。

引理 1[21]：如果 $f(x)$ 是 0 极限和∞极限中具有相关三元组 $\left(r_Z,d_Z,f_Z\right)$ 和 $\left(r_I,d_I,f_I\right)$ 的齐次矢量函数，则系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=f(x)$ 是连续的，$f\left(0_n\right)=0_n$，其中 $\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}$、$f:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^n$。此外，原始系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=f_z(\boldsymbol{x})$ 以及近似系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=f_z(\boldsymbol{x})$ 和 $\dot{\boldsymbol{x}}=f_I(\boldsymbol{x})$ 全局渐近稳定。然后满足：令 d_{V_Z} 和 d_{V_I} 为实数，使得 $d_{V_Z}>\max\limits_{1\le i\le n}r_{Z,i}$、$d_{V_I}>\max\limits_{1\le i\le n}r_{I,i}$。则存在一个正定函数 $V:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}_+$，使得对于 $i\in\{1,2,\cdots,n\}$，有：

$$\frac{\partial V}{\partial x}(x)f(x)\le -c_V\,\mathfrak{H}(V(x)^{\frac{d_{V_Z}+d_Z}{d_{V_Z}}},V(x)^{\frac{d_{V_I}+d_I}{d_{V_I}}})\tag{21}$$

式中：c_V 为正实常数。

引理 2[23]：若有一个连续径向无界函数 $V:\mathbb{R}_+^2\to\mathbb{R}_+$ 使得：(1) $V(\boldsymbol{x})=0\Leftrightarrow\boldsymbol{x}=0_n$；(2)对于某些 $\tilde{\alpha}$、$\tilde{\beta}$、$\tilde{p}$、$\tilde{q}$、$r>0$：$\tilde{p}r<1$、$\tilde{q}r>1$，满足 $D*V(\boldsymbol{x}(t))\le-(\tilde{\alpha}V^{\tilde{p}}(\boldsymbol{x}(t))+\tilde{\beta}V^{\tilde{q}}(\boldsymbol{x}(t)))^r$，则 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}_n$ 具有全局固定时间吸引，稳定时间 $T_{\mathrm{f}}\le\dfrac{1}{\tilde{\alpha}r(1-\tilde{p}r)}+\dfrac{1}{\tilde{\beta}r(\tilde{q}-1)}$。

引理 3[24]：考虑一簇系统：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=f_\sigma(\boldsymbol{x})\\ f_\sigma(0)=0\\ \boldsymbol{x}\in R^n\end{cases}$$

设 $\mathcal{P}$ 表示有限切换索引集，$\sigma:[0,\infty)\to\mathcal{P}$ 是时间的分段常数函数，对于固定的 $p\in\mathcal{P}$，f_p 关于 x 是连续的，τ 是驻留时间。如果上述切换系统是渐近稳定的，并且对于固定的 $p\in\mathcal{P}$，$\dot{x}=f_p(x)$ 是有限时间稳定的，则切换系统是有限时间稳定的。进而可以得到如下结论：

1）基于控制协议式(15)可得，如果事件驱动函数式(17)≤0 且满足式(22)—式(24)，则式(13)中的频率恢复和 SoC 平衡问题在与初始条件无关的有限时间内得到解决。

$$2\beta^2-\alpha\lambda_{|\mathcal{B}|}(\boldsymbol{Q}^{-1})>0\tag{22}$$

$$k_3-1-\frac{d}{2}+\alpha^2-\beta^2+\lambda_{|\mathcal{B}|}\left(\boldsymbol{Q}^{-1}\right)>0\tag{23}$$

$$0<\rho<2d\left(k_3-1-\frac{d}{2}+\alpha^2-\beta^2+\lambda_{|\mathcal{B}|}\left(\boldsymbol{Q}^{-1}\right)\right)\tag{24}$$

式中：$d>0$。且稳定时间的上限估计为：

$$\begin{gathered}T_{\mathrm{f}}\le\frac{2}{c_V\left(1-\dfrac{d_{V_Z}+d_Z}{d_{V_Z}}\right)}+\frac{2}{c_V\left(\dfrac{d_{V_I}+d_I}{d_{V_I}}-1\right)},\\ c_V>0,d_{V_Z}>0,d_{V_I}>0,d_Z<0,d_I<0\end{gathered}\tag{25}$$

该定理的证明过程详见附录 A。

2.2 事件间隔分析

在本节中，事件间隔时间 $t_{k+1}^i-t_k^i\left(i\in\mathcal{B}\right)$ 应对于任意 $k\in\mathbb{N}$ 具有下界 0，以便能够避免控制过程中的 Zeno 行为。如果节点 i 的事件驱动函数式(17)在 $t_k^i+\tau$ 时刻达到 0，则有：

$$\begin{aligned}&\left\|e_i\left(t_k^i+\tau_i\right)\right\|=\left\|\int_{t_k^i}^{t_k^i+\tau_i}\dot{e}_i(s)\mathrm{d}s\right\|=\\ &\left\|\int_{t_k^i}^{t_k^i+\tau_i}\dot{\varphi}_i\left(k_1\gamma_1\varphi_i^{\gamma_1-1}+k_2\gamma_1\varphi_i^{\gamma_2-1}+k_3\right)\mathrm{d}s\right\|\le\\ &\dot{\varphi}_i\left\|k_1\gamma_1\varphi_i^{\gamma_1-1}+k_2\gamma_1\varphi_i^{\gamma_2-1}+k_3\right\|\tau_i\end{aligned}\tag{26}$$

式中：令 $\phi_i=\max\left(\dot{\varphi}_i\left\|k_1\gamma_1\varphi_i^{\gamma_1-1}+k_2\gamma_1\varphi_i^{\gamma_2-1}+k_3\right\|\right)$。可知在达成全局稳定之前可以实现 $\phi_i>0$，进而可得：

$$\tau_i \geq \left\| e_i\left(t_k^i+\tau_i\right)\right\| / \phi_i \tag{27}$$

由于节点 i 的下一个触发时刻 t_{k+1}^i 发生在事件驱动函数式(17)≥0 时，因此可得 $\left\| e_i\left(t_k^i+\tau_i\right)\right\| \geq 0$ 。事件间隔 $\tau_i=t_{k+1}^i-t_k^i$ 满足式(28)，从而在达成全局稳定之前避免 Zeno 行为。

$$\tau_i \geq \left(k_3-1\right)\left\|\varphi_i\right\| / \phi_i>0 \tag{28}$$

2.3 改进后的事件驱动策略

基于上述分析，本文提出的事件驱动函数式(17)在事件瞬间的计算中需要在相连节点之间进行连续的信息交换。为进一步减少通信负担和计算负担，提出一种改进后的事件驱动策略。这种改进后的事件驱动策略只使用离散信息，这些离散信息由相邻节点在瞬间采样和发送。由于 $\varphi_i(t)$ 使得事件驱动过程需要持续的沟通，因此需要重新表述 $\varphi_i(t)$ 。根据式(19)有：

$$\begin{aligned}&\varsigma_i(t)=\int_{t_i'}^{t}\dot{\varsigma}_i(s)\mathrm{d}s+\varsigma_i\left(t_k^i\right)=\\&\left(\int_{t_0'}^{t_1'}+\int_{t_1'}^{t_2'}+\cdots+\int_{t_{l-1}'}^{t}\right)\dot{\varsigma}_i(t)+\varsigma_i\left(t_k^i\right)=\\&\sum_{h=0}^{l-1}\dot{\varsigma}_i\left(t_h'\right)\left(t_{h+1}'-t_h'\right)+\dot{\varsigma}_i\left(t_l'\right)\left(t-t_l'\right)+\varsigma_i\left(t_k^i\right)\end{aligned} \tag{29}$$

式中：$\left[t_{k+1}^i,t_k^i\right)$ 和 $t_k^i=t_0'<t_1'<\cdots<t_l'<t_{l+1}'=t_{k+1}^i$ 是 ς_i 的更新时刻。此外，由式(29)可得：

$$\begin{aligned}&\xi_i(t)=\left(\varsigma_i\left(t_k^i\right)-\dot{\varsigma}_i\left(t_l'\right)t_l'+\sum_{k=0}^{l-1}\dot{\varsigma}_i\left(t_h'\right)\left(t_{h+1}'-t_h'\right)\right)+\\&\frac{\dot{\varsigma}_i\left(t_l'\right)}{2}\left(t^2-\left(t_k^i\right)^2\right)+\varsigma_i\left(t_k^i\right)\end{aligned} \tag{30}$$

由于 $\varphi_i(t)=\alpha\xi_i(t)+\beta\varsigma_i(t)$，因此可通过离散信息计算 $\varphi_i(t)$，避免了连续的信息交换。

2.4 分布式控制器的实现

如附录 C 图 C1 所示，每个 DG 单元的分布式控制器基于多智能体系统框架，所有逆变器都采用基于一致性的控制协议来达成状态量的一致。本文设计了一种基于有限时间事件触发机制的控制算法，为每个 DG 中的控制器分别部署一次调节控制策略和二次调节控制策略，其中，部分 DG 单元通过本地测量来检测总功率的不匹配量。所设计的控制器不断将一次调节控制中的有功功率设定值驱动到所有逆变器的输出有功功率，并使频率收敛到设定值。此外，这个分布式算法还融合了各种局部约束(例如 SoC 约束和频率偏差约束)，以延长电池的使用寿命。首先，将电池的 SoC 控制在一个适当的范围内，避免过充/过放电。其次，在微电网系统频率偏差可接受的范围内(例如 2%以内)，通过加入额外的约束设定，BESS 将被控制以保持其之前的模式，从而避免充电/放电状态之间的频繁切换。

3 仿真分析

本章中，使用 MATLAB/SIMULINK 搭建 IEEE 14 节点电力系统测试模型来验证所提出的控制算法。IEEE 14 节点测试系统是一个被广泛使用的标准测试系统，被用来测试和验证电力系统的各种算法和技术。它包含 14 个母线(节点)、20 条输电线、11 个负载以及 5 个发电单元。方便起见，将其中部分负载节点设置为可以充放电的 BESS 单元，如附录 D 图 D1 所示。仿真参数见表 1。仿真测试涵盖了以下场景：(1)在不考虑上述局部约束的情况下，使用提出的改进分布式有限时间控制算法(式(18))，通过诱导负载/功率的变化来检测微网频率的恢复和 BESS 的 SoC 平衡；同时记录事件间隔，验证所设计的事件触发机制的抗 Zeno 特性；(2)研究考虑局部约束的控制器的性能；(3)将所提方法与文献[19-20]中的有限时间控制器以及文献[1]中的常规渐近控制器进行对比分析。

3.1 不考虑局部约束的改进分布式控制器的频率恢复与 SoC 平衡

此仿真研究分为 5 个阶段。

第 1 阶段(0~3 s)为启动阶段，总负载在 0~70 kW

表 1 IEEE 14 节点测试系统仿真参数

Table 1 Parameter values for simulation in the IEEE 14-bus system

参数项	取值
标准频率/Hz	50
标准电压/V	311
DG	下垂系数：0.02 MWs； 额定功率：{5.0, 8.0, 15, 12, 10} kW
BESS	额定放电功率：{25, 35, 25, 32, 28} kW； 额定充电功率：{−25, −35, −25, −32, −28} kW
导线阻抗	R_{di}：{0.20, 0.23, 0.3, 0.12, 0.15, 0.25} Ω； X_{di}：{3.0, 2.9, 3.1, 3.0, 3.0, 3.0} mH； R_{bi}：{0.17, 0.13, 0.15, 0.12, 0.15, 0.14} Ω； X_{bi}：{3.1, 3.0, 3.1, 3.0, 3.0, 3.0} mH
其他参数	$\alpha=72,0,\beta=12,k_1=6,k_2=7,k_3=3.5,$ $d=2,\rho=85,\gamma_1=0.9,\gamma_2=1.1$

之间，DG1—5 的标称功率分别为 5.0、8.0、15、12 和 10。此阶段的失配总功率为 20 kW。由于在该阶段未激活控制器，所以 BESS 的 SoC 保持不变，BESS 的 $\lambda_i(t)$ 都保持为 0，并且系统的稳态频率偏离 50 Hz，如图 1(c)、(d)和(e)所示。

第 2 阶段(3~6 s)开始时，控制器被激活，然后所有的 $\lambda_i(t)$ 在短暂振荡后的一定时间内自动达到平衡点 $\lambda^*=0.28$，如图 1(b)所示。由图 1(c)可知，随着 $\lambda_i(t)$ 收敛到正的公共值，SoC 平衡得以实现。此外，由图 1(e)可知，由式(8)计算出的 BESS 输出功率补偿失配总功率，从而使系统的稳态频率相应地恢复到设定值。

第 3 阶段，总负载降低到 40 kW，失配总功率从−20 kW 变为 10 kW，结果如图 1(b)、(c)所示，平衡点 λ^* 减小到−0.07，随着 SoC 的增加，BESS 从放电模式切换到充电模式，并且稳态频率保持在 50 Hz。

在第 4、5 阶段中，所有标称有功功率 $P_{\mathcal{R},i}^{\mathrm{nom}}$ 分别增加 120%和减少 50%。SoC 的相应趋势和 BESS 的充电/放电功率如图 1(c)、(d)所示。图 1(d)表明，随着 DG 的功率和负载的变化，控制器始终将系统的频率恢复到设定值。

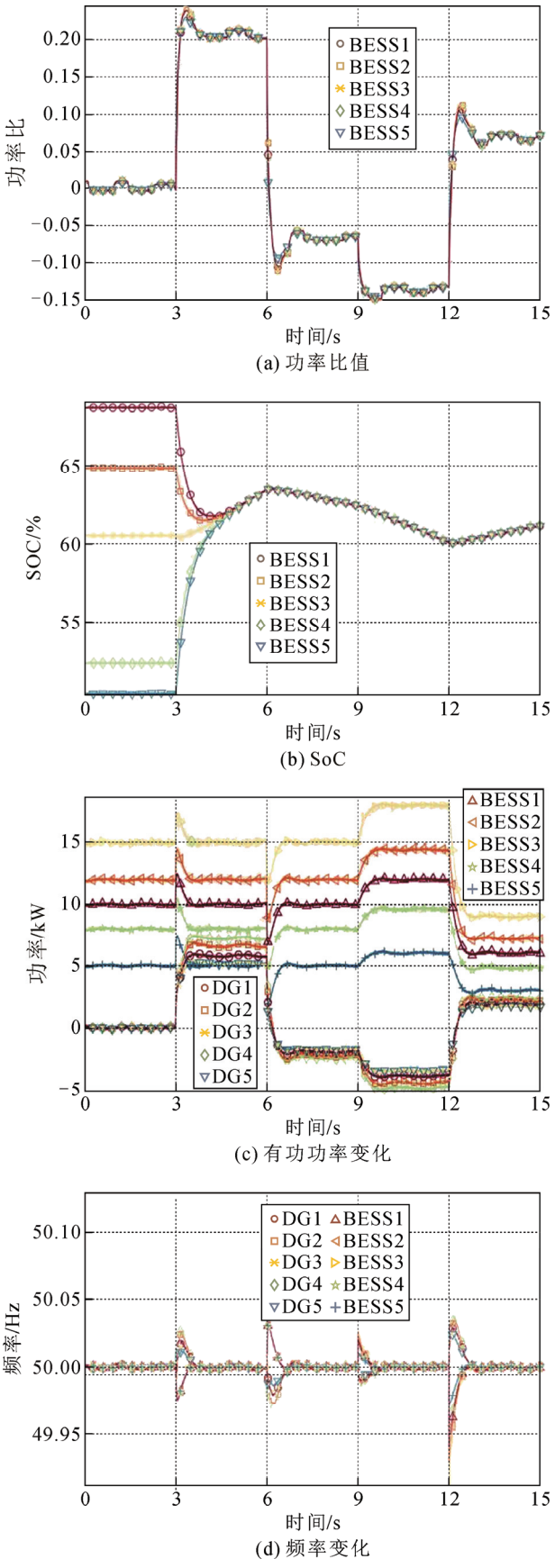
图 2 中以 BESS1 到 BESS5 为例，描述了各控制器的事件间隔，从而在实现控制目标的情况下减少通信负担。由图 2 可知，事件触发机制下所有事件间隔都是正的，即有效地避免了 Zeno 行为。

本节的仿真结果表明，在无局部约束情况下，所提出的改进的控制器可以在 DG 功率和负载变化时减少通信负担，避免 Zeno 行为，始终将系统的频率恢复至标准频率且实现 SoC 平衡。

3.2 改进分布式控制器与传统控制器的对比

将所提方法与文献[19-20]中的有限时间控制器、具有相同参数的常规渐近控制器进行比较。相应的控制参数见表 2。

对于给定的初始条件 1，在上述 3 个控制器下，获得了负荷变化量 0~70 kW 的频率曲线。如图 3(a)所示，使用本文所提出的控制器，频率在时间 3.11 s 内达到平衡；使用传统有限时间控制器则在建立时间 4.99 s 内达到平衡；尽管在渐近控制器的有限时间内不能等于平衡值，但会在 7.81 s 内以可接受的误差达到稳态。故而可得，本文所提出的有限时间控制器可在最短时间内将频率恢复到 50 Hz。



(a) 功率比值

(b) SoC

(c) 有功功率变化

(d) 频率变化

图 1 控制器性能反馈

Fig.1 Control performance feedback

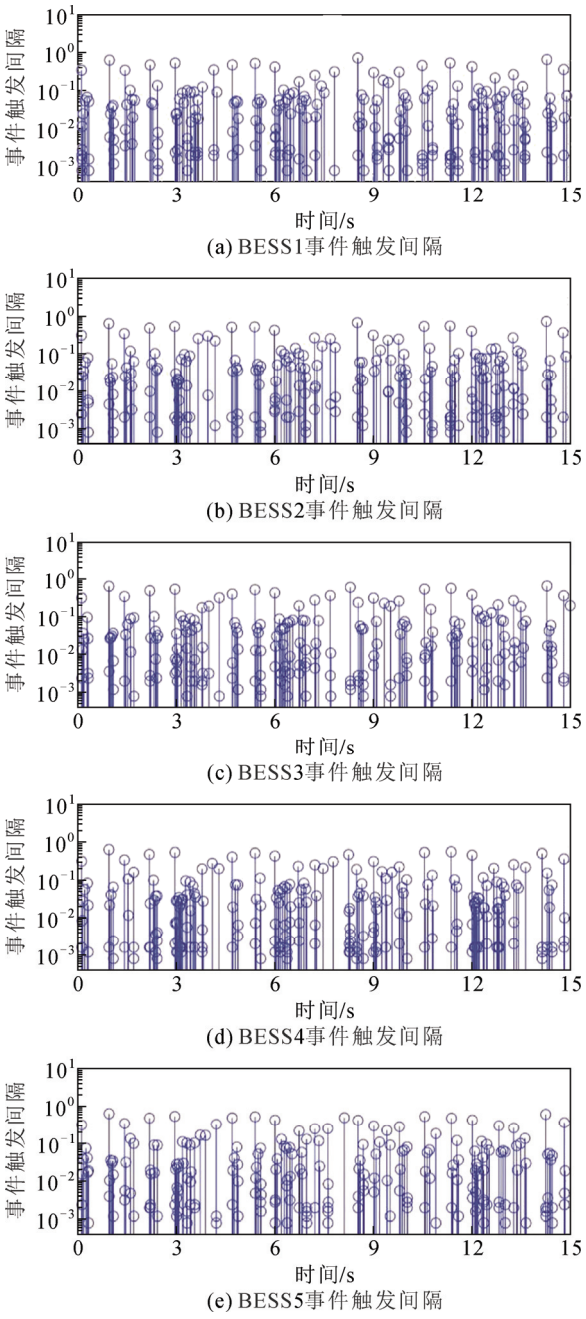


图 2　事件驱动控制中的事件的时刻和间隔

Fig.2　Event instantsand intervals of BESS in the event-driven control

表 2　对比测试仿真参数设置

Table 2　Comparative tests' simulation parameter settings

控制方法	指数参数	控制增益参数
改进有限时间控制	$\gamma_1=0.9,\gamma_2=1.1$	$k_1=6,k_2=7,k_3=3.5$
传统有限时间控制	$\gamma_1=0.9,\gamma_2=1.1$	$k_1=6,k_2=7$
渐进式控制	—	$k_1=7$

对于给定的初始条件 2，在上述 3 个控制器下，获得了负荷变化量 0~70 kW 的频率曲线。如图 3(b)所示，使用本文所提的控制器，频率在时间 3.05 s

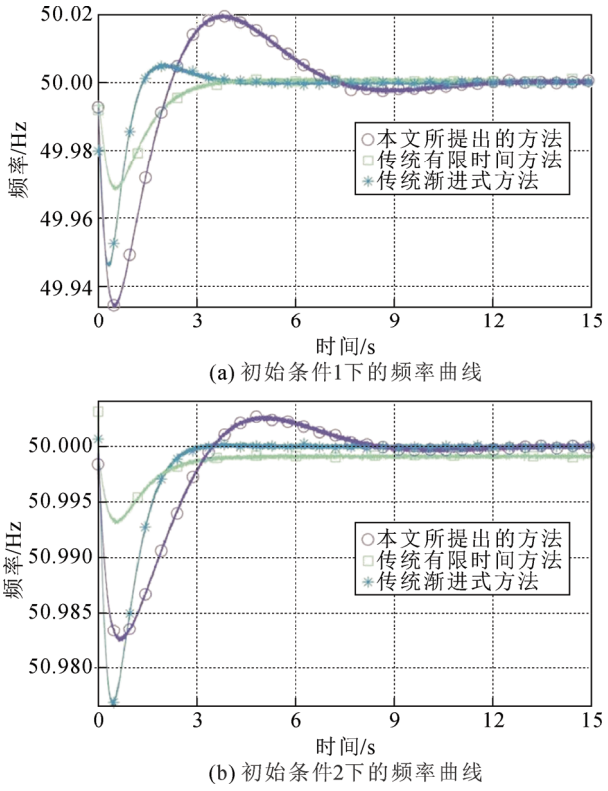


图 3　3 种控制器频率变化曲线对比

Fig.3　Frequency comparison under three types of controllers

内达到平衡；使用传统有限时间控制器在建立时间 18.99 s 内达到平衡；尽管在渐近控制器的有限时间内不能等于平衡值，但会在 8.73 s 内以可接受的误差达到稳态。故而可得，本文所提出的有限时间控制器可在最短时间内将频率恢复到 50 Hz，且该时间不受初始条件的影响。

综上所述，相对于传统有限时间控制，本文所提出的方法不仅在通信成本上具有优势，还具有更短的收敛时间，而传统渐进式控制器则无法在有限时间内达到稳态，仅能无限接近稳态。

3.3　控制参数对事件触发性能的影响讨论

在事件触发控制系统中，控制参数对系统性能产生重要影响，涉及到稳定性、响应速度、能耗和通信负载等方面。举例来说，事件触发控制系统的触发阈值(如误差范围或概率阈值)，以决定何时激活控制更新，在本文中，k_3、α 以及 β 共同决定了 ρ 的上界，进一步决定了控制阈值的上界。较高的阈值可能会导致更少的控制更新，从而降低通信负载和能耗，但可能会导致系统稳定性和响应速度降低。较低的阈值可能会提高系统稳定性和响应速度，但可能增加通信负载和能耗。控制器增益 k_1—k_3 对系统性能有很大影响。较高的增益会使得系统响应

更快，但可能会导致振荡和不稳定。较低的增益会降低响应速度，但会提高稳定性。

4 结论

本文针对孤岛式交流微电网中具有无向连接通信网络的分布式有限时间频率恢复和SoC平衡问题进行了研究。结论如下：

1）所提出的控制协议能在BESS之间共享有功功率，并使稳态频率恢复到设定值。

2）确立了所提二级控制器的稳定性和收敛时间上限。

3）与传统控制器相比，新控制器提高了同步速度、降低了通信负担，并确保了系统的稳定性和可靠性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 李忠文，吴 龙，程志平，等. 光储系统参与微电网频率调节的模糊自适应滑模控制[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2065-2076.
LI Zhongwen, WU Long, CHENG Zhiping, et al. Fuzzy adaptive sliding mode control of photovoltaic and storage systems for providing frequency regulation of microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2065-2076.

[2] 崔 杨，周慧娟，仲悟之，等. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1674-1683.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal dispatch of power system with energy storage considering deep peak regulation initiative of thermal power and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1674-1683.

[3] 张 学，裴 玮，梅春晓，等. 含电/氢复合储能系统的孤岛直流微电网模糊功率分配策略与协调控制方法[J]. 高电压技术，2022，48(3)：958-968.
ZHANG Xue, PEI Wei, MEI Chunxiao, et al. Fuzzy power allocation strategy and coordinated control method of islanding DC microgrid with electricity/hydrogen hybrid energy storage systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 958-968.

[4] 刘红锐，张昭怀. 锂离子电池组充放电均衡器及均衡策略[J]. 电工技术学报，2015，30(8)：186-192.
LIU Hongrui, ZHANG Zhaohuai. The equalizer of charging and discharging and the balancing strategies for lithium-ion battery pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 186-192.

[5] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Distributed cooperative control of microgrid storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2780-2789.

[6] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.

[7] 肖湘宁，王 鹏，陈 萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报，2018，33(8)：1894-1902.
XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1894-1902.

[8] CHEN M, XIAO X N, GUERRERO J M. Secondary restoration control of islanded microgrids with a decentralized event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 3870-3880.

[9] LAI J G, LU X Q, YU X H, MONTI A. Stochastic distributed secondary control for AC microgrids via event-triggered communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2746-2759.

[10] HAN R K, MENG L X, GUERRERO J M, et al. Distributed nonlinear control with event-triggered communication to achieve current-sharing and voltage regulation in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6416-6433.

[11] LAI J G, LU X Q, MONTI A, et al. Event-driven distributed active and reactive power dispatch for CCVSI-based distributed generators in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 3125-3136.

[12] HEEMELS W P M H, JOHANSSON K H, TABUADA P. An introduction to event-triggered and self-triggered control[C]// 2012 IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC). Maui, USA: IEEE, 2012: 1-8.

[13] 白星振，郑鑫磊，葛磊蛟，等. 基于事件触发机制的配电网自适应UKF动态状态估计[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2312-2320.
BAI Xingzhen, ZHENG Xinlei, GE Leijiao, et al. Dynamic state estimation method with adaptive UKF for distribution network based on the event-triggered mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2312-2320.

[14] 朱作滨，黄绍平，李振兴. 孤岛型微网并联逆变器下垂控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报，2020，32(2)：119-124.
ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing. Research on droop control strategy of parallel inverters for isolated micro-grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(2): 119-124.

[15] 魏 星，朱信舜，葛 健，等. 级联型电力电子变压器并联运行的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1274-1282.
WEI Xing, ZHU Xinshun, GE Jian, et al. Improved droop control strategy for parallel operation of cascaded power electronic transformers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1274-1282.

[16] GHADIMI E, TEIXEIRA A, SHAMES I, et al. Optimal parameter selection for the alternating direction method of multipliers (ADMM): quadratic problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(3): 644-658.

[17] ZHOU J, WANG Q. Convergence speed in distributed consensus over dynamically switching random networks[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1455-1461.

[18] DEHKORDI N M, SADATI N, HAMZEH M. Distributed robust finite-time secondary voltage and frequency control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3648-3659.

[19] XU Y L, SUN H B. Distributed finite-time convergence control of an islanded low-voltage AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2339-2348.

[20] LU X Q, WANG Y N, YU X H, et al. Finite-time control for robust tracking consensus in MASs with an uncertain leader[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(5): 1210-1223.

[21] ANDRIEU V, PRALY L, ASTOLFI A. Homogeneous approximation,

recursive observer design, and output feedback[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2008, 47(4): 1814-1850.

[22] KESLER M, KISACIKOGLU M C, TOLBERT L M. Vehicle-to-grid reactive power operation using plug-in electric vehicle bidirectional offboard charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6778-6784.

[23] POLYAKOV A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106-2110.

[24] WANG X L, HONG Y G. Distributed finite-time *X*-consensus algorithms for multi-agent systems with variable coupling topology[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2010, 23(2): 209-218.



MA Xiyuan
Ph.D., Professor

马溪原
1986—，男，博士，教授级高工
主要研究方向为新能源预测与控制、碳监测、电力系统仿真与人工智能应用
E-mail: maxy@csg.cn



WANG Pengyu
Ph.D.
Senior engineer

王鹏宇
1992—，男，博士，高工
主要研究方向为新能源技术、微电网运行控制技术
E-mail: wangpy1@csg.cn



YANG Duotong
Ph.D., Professor
Corresponding author

杨铎炯(通信作者)
1988—，男，博士，教授级高工
主要研究方向为新能源技术、电力系统仿真、微电网运行控制技术
E-mail: yangdt@csg.cn

收稿日期 2023-03-30 修回日期 2024-05-10 编辑 程子丰

附录 A

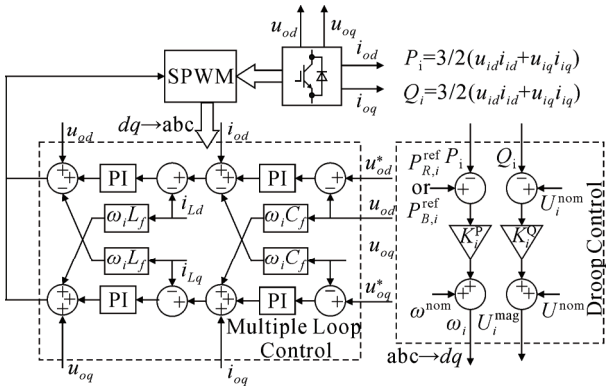


图 A1　向网络注入能量的逆变器内部多回路控制图

Fig.A1　Internal multiple loop control diagram for inverters injecting power into the network

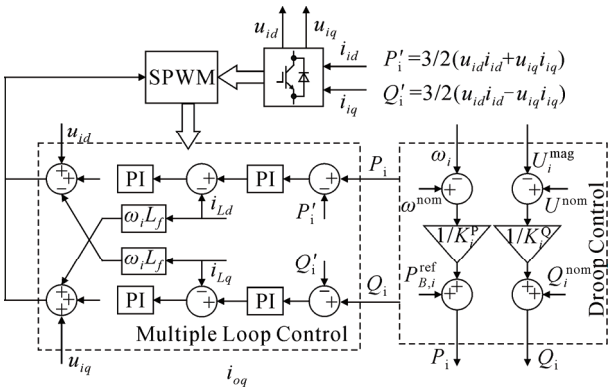


图 A2　从网络吸收能量的逆变器内部多回路控制图

Fig. A2　Internal multiple loop control diagram for inverters absorbing power from the network

附录 B 定理 1 的证明过程：

证明将分为 2 个步骤。首先，建立闭环系统(式(18))的全局渐近稳定性。接下来，证明协议(式(15))下系统(式(18))的原点在 $t\in[t_k^i,t_{k+1}^i)$ 下是有限时间稳定的。

基于上述步骤，满足引理 1 的所有条件，并且原始系统(式(18))存在正常数 c_v 和正定 Lyapunov 候选函数 V，使得

$$\dot{V}\le -c_V\mathcal{H}\left(V^{\frac{d_{VZ}+d_Z}{d_{VZ}}},V^{\frac{d_{VI}+d_I}{d_{VI}}}\right) \tag{B1}$$

式中：$d_{V_Z}=\max\limits_{1\le i\le 2} r_{Z,i}$；$d_{V_I}=\max\limits_{1\le i\le 2} r_{I,i}$。此外 $0<\gamma_1<1$、$\gamma_2>1$，可推出：

$$\mathcal{H}(V^{\frac{d_{VZ}+d_Z}{d_{VZ}}},V^{\frac{d_{VI}+d_I}{d_{VI}}})\ge\frac{1}{2}(V^{\frac{d_{VZ}+d_Z}{d_{VZ}}}+V^{\frac{d_{VI}+d_I}{d_{VI}}}) \tag{B2}$$

随后可得：

$$\dot{V}\le\frac{-c_V}{2}(V^{\frac{d_{VZ}+d_Z}{d_{VZ}}}+V^{\frac{d_{VI}+d_I}{d_{VI}}}) \tag{B3}$$

通过引理 2，上述动力学系统在一个确定时间 T_f 内达到全局稳定：

$$T_f\le\frac{2}{c_V\left(1-\frac{d_{V_Z}+d_Z}{d_{V_Z}}\right)}+\frac{2}{c_V\left(\frac{d_{V_I}+d_I}{d_{V_I}}-1\right)} \tag{B4}$$

上述分析主要针对时间区间 $t\in[t_k^i,t_{k+1}^i]$，系统可以被证明是有限时间稳定的。为了得到整个时间轴上的系统的稳定性情况，本文结合引理 3 可以得出，在不同的时间区间切换的过程中，系统(式(18))的原点是全局有限时间稳定的。证明完成。

附录 C

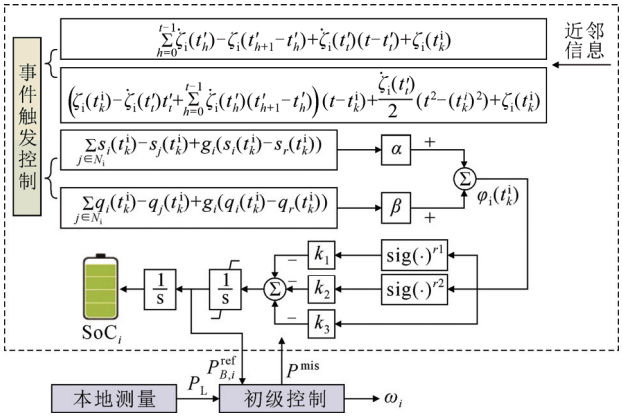


图 C1　控制方案示意图

Fig.C1　Diagram of the proposed control scheme

附录 D

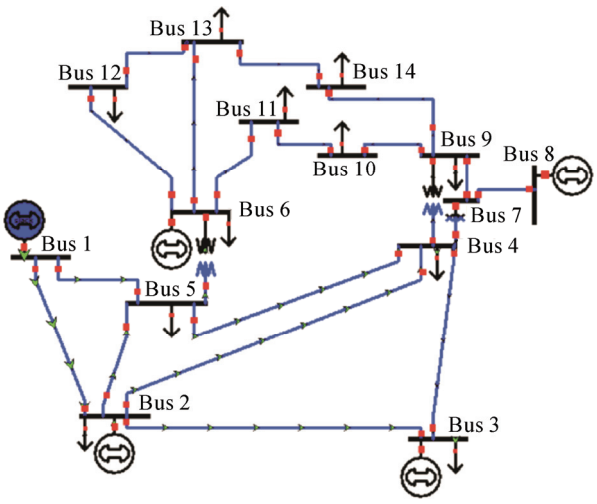


图 D1　交流微电网 IEEE 14 测试系统

Fig.D1　IEEE 14-bus AC microgrid system