

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240127

基于动态事件触发机制的孤岛微电网频率控制方法研究

于永进¹, 孙国强², 樊英杰¹

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 国网山东省电力公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600)

摘要: 针对传统周期采样方案在微电网频率控制中存在数据冗余和通信资源浪费等问题, 研究了基于动态事件触发机制的孤岛微电网二次频率控制方法。为了减少冗余控制数据, 采用阈值可根据最新传输值和当前测量值误差调整的动态事件触发的方式来确定是否需要发送采样信息。首先, 选取合适的 Lyapunov 泛函数, 推导出微电网频率控制系统渐进稳定且满足给定期望 H_∞ 鲁棒性能的充分条件。其次, 对控制器进行联合设计得到满足以上要求的控制器增益, 保证事件触发机制的可行性。证明相邻两次触发时刻的差值为唯一非零正数, 保证了 Zeno 现象不会发生。最后, 通过 4 种场景的仿真分析验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 事件触发机制; 频率控制; 孤岛微电网; 稳定性分析

A frequency control method for an islanded microgrid based on a dynamic event-triggered mechanism

YU Yongjin¹, SUN Guoqiang², FAN Yingjie¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Binzhou Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Binzhou 256600, China)

Abstract: There are problems of data redundancy and communication resource waste in traditional periodic sampling schemes in frequency control of microgrids. Thus this paper studies the secondary frequency control methods of islanded microgrids based on dynamic event-triggered mechanism. To reduce redundant control data, a dynamic event-triggered method using thresholds that can be adjusted based on the latest transmission value and the current measurement value error is used to determine whether sampling information needs to be sent. First, a series of appropriate Lyapunov functionals are selected to derive sufficient conditions for the asymptotic stability of the microgrid frequency control system and to achieve the expected H_∞ robust performance. Then, a controller is designed jointly to get controller gains meeting the above requirements to ensure the feasibility of the dynamic event-triggered mechanism. It is concluded that the difference between two adjacent triggering times is a unique non-zero positive number, which can ensure that the Zeno phenomenon will not occur. Finally, the effectiveness and practicality of the proposed method are verified through simulation analysis of four scenarios.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62003794).

Key words: event-triggered mechanism; frequency control; islanded microgrid; stability analysis

0 引言

出于环境和经济因素的考虑, 常规分布式电源 (distributed energy resource, DER) 和可再生能源 (renewable energy sources, RES) 的并网发电对我国绿色发展必不可少。为此, 研究人员提出微电网 (microgrid, MG) 的概念用以高效管理分散的 DER 和 RES^[1-2]。但由于缺乏主电网的支撑, 运行在孤岛模

式下的 MG 频率稳定需由其内部发电设备维持。通常孤岛 MG 中的二次频率控制 (secondary frequency control, SFC) 有两种方案, 即分布式控制方案和集中式控制方案^[3-5]。分布式控制方案可以用同步控制技术来实现^[6-7], 其可以赋予 MG 发电子系统即插即用的能力和对通信故障的鲁棒性^[8]。然而, 分布式控制方案忽略了 DER 单元的独特功能和特点^[9]。此外, 分布式控制器的同步可能会很耗时, 在某些情况下甚至不能收敛到全局最优。集中式控制对通信要求较高, 适合高精度要求的任务情景。当前, 无

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (62003794)

论是在实验室模拟的 MG 场景还是在世界各地实际运行的 MG 系统中, 其应用的二次控制方案主要包含上述两种。尽管两种方式都有应用, 但目前仍以集中式控制方式为主^[10]。对于应用广泛的集中式 SFC 方案而言, 一个具有挑战性的问题是通信资源受限: 即随着 DER 数量的增加, 维持系统频率响应性能是以增加系统消耗的通信资源为代价。总而言之, SFC 对孤岛 MG 的稳定运营起到至关重要的作用^[11]。因此, 一种有效的、通信成本低的 SFC 方案对于补偿 RES 与负荷之间的有功功率不平衡是必不可少的。

随着事件触发机制(event-triggered mechanism, ETM)在网络化控制中的发展, 其理论研究成果也被广泛应用到电力系统和 MG 运行控制中。文献[12]提出了基于周期事件触发机制(period event-triggered mechanism, PETM)的 PI 控制器的设计方法, 在设计过程中引入了较多自由矩阵, 使得结论的保守性降低, 并通过一个三区域的互联电力系统验证了所提方法在节省了通信资源的同时实现对频率的稳定控制。文献[13]给出了一种在延迟影响下提高计算精度和减轻计算负担的方案。但是该方案实施的前提是对模型进行重构, 增加了问题复杂度。文献[14]提出了一种基于 ETM 的 PI 控制器的最小鲁棒性能指标(robust performance index, RPI)的计算方法, 并将扰动对受控输出的影响程度定义为闭环系统 RPI, 且讨论了不同通信延迟下的最小 RPI。

实际 MG 工程出于扩建方便性和经济性考虑, 不宜用专用通信网络进行信息交互^[15]。数据通信系统的投资成本取决于覆盖地理区域的面积和提高传输信号质量所需的中继器的数量^[16]。采用共享的网络进行数据交互是新时代电力事业的发展趋势, 将 MG 通信系统依附于已建成的通信网络是未来的方向^[17]。然而, 在开放共享通信网络的驱动背景下, 提高真实可用且不可或缺数据的传输效率, 减少冗余数据的传输次数, 珍惜宝贵的网络通信资源, 减轻控制器的计算负担, 维持系统的频率稳定, 才是亟待完成的重任。为此, 采用一种“类人”的采样机制—事件触发机制来解决上述问题。ETM 利用系统状态来决定数据是否传输, 可以将冗余的信息剔除, 较好地缓解了通信压力。目前大多数系统采用的都是连续事件触发机制(continuous event-triggered mechanism, CETM)和 PETM, 虽然这两种 ETM 亦可较传统周期采样机制更好地完成任务, 但在保证系统稳定的前提下, 拥有更大平均触发间隔的 ETM 才是目前急需的^[18]。现有的研究大多是在给定稳定控制器增益下讨论加入 ETM 对系统稳定性的影响。

然而, 在考虑系统鲁棒性能的前提下, 利用系统已知参量进行控制器的联合设计同样不可或缺^[19-21]。

综上所述, 本文主要研究了动态事件触发机制下的孤岛微电网频率控制稳定性的相关问题。本文主要贡献如下所述。

1) 对传统的静态事件触发机制进行改进, 在阈值中引入内部动态变量 $\eta(t)$, 提出一种动态事件触发机制, 对微电网频率控制系统引入这一机制的渐进稳定性给出一般证明方法, 并对动态事件触发控制器进行协同设计。

2) 本文从连续两次采样瞬间的间隔大于零是避免 Zeno 现象发生的关键入手, 给出了避免 Zeno 现象的定理。

1 基于动态事件触发机制的微电网二次频率控制模型

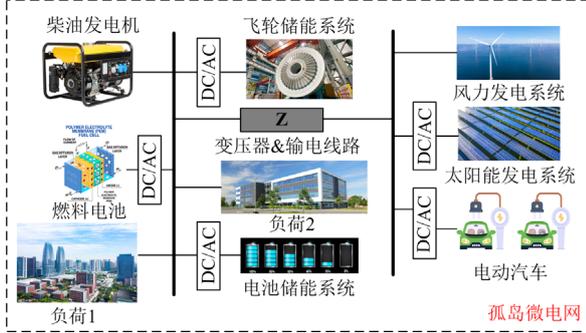
1.1 微电网二次频率控制模型

本文构造的微电网模型如图 1 所示。图 1(a)中一部分 DER 连接到交流母线上, 用来同步交流电源, 如柴油发电机(diesel engine generator, DEG)、风力发电机(wind turbine generator, WTG), 还有一部分通过电力电子器件将直流电逆变为交流电连接到交流母线上, 如光伏系统(photovoltaic, PV)、飞轮储能系统(flywheel energy storage system, FESS)、燃料电池(fuel cell, FC)、电池储能系统(battery energy storage system, BESS)。由于 PV 和 WTG 的输出功率取决于环境条件, 因此通常不用于频率调节, FC 和 DEG 作为功率平衡的旋转备用。

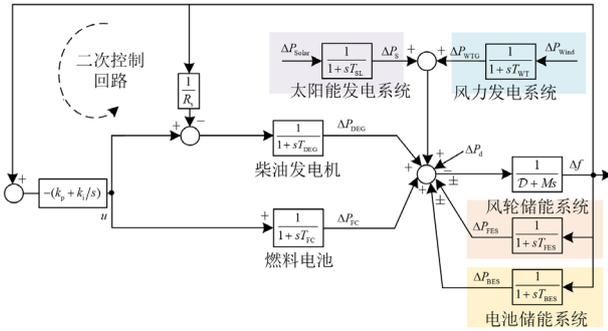
一次频率控制完全基于本地测量, 是自发完成的并且不依赖于通信系统, 但是此时的频率无法恢复到原本的期望值。一次频率控制的设计通常应基于微电网的详细动态模型, 包括阻性、感性、容性本地负荷和配电系统, 同时该模型应适应 MG 的实际运行条件, 以确保控制器对系统的固有动态和瞬态变化做出适当响应。本文在建模过程中为体现一次频率控制的作用引入了下垂系数。对于微电网二次频率控制问题的研究, 要求微电网建模不用完全考虑各个发电子系统、储能系统的高阶非线性模型, 这是由于上述设备的低阶模型足以支撑微电网二次频率控制的研究分析^[22]。具体模型可见文献[23]。由此可得到图 1(b)所示的动态频率响应模型。供需侧分布式电源的总容量 P_d 包括 DEG、WTG、PV 和 FC 的输出功率以及 FESS 和 BESS 的交换功率, 如式(1)所示。

$$P_d = P_{\text{DEG}} + P_{\text{WTG}} + P_s + P_{\text{FC}} \pm P_{\text{BES}} \pm P_{\text{FES}} \quad (1)$$

式中: P_d 为供需侧分布式电源的总容量; P_{DEG} 、 P_{WTG} 、 P_s 、 P_{FC} 、 P_{FES} 、 P_{BES} 分别为 DEG、WTG、PV 和 FC 的输出功率以及 FESS 和 BESS 的交换功率。



(a) 孤岛微电网简化示意图



(b) 孤岛微电网动态频率响应模型

图 1 孤岛微电网示意图

Fig. 1 Schematic of an islanded MG

在二次频率控制回路中, 负荷、WTG 和 PV 输出功率的波动通过 DEG 和 FC 输出功率的减小或增大来补偿。与频率调节相关联的 MG 功率变化的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta P_d + \Delta P_{\text{DEG}} + \Delta P_{\text{WTG}} + \Delta P_{\text{FC}} + \\ \Delta P_s + \Delta P_{\text{BES}} + \Delta P_{\text{FES}} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ΔP_d 为供需侧分布式电源总容量的变化; ΔP_{DEG} 、 ΔP_{WTG} 、 ΔP_s 、 ΔP_{FC} 、 ΔP_{FES} 、 ΔP_{BES} 分别为 DEG、WTG、PV 和 FC 的输出功率变化以及 FESS 和 BESS 的交换功率变化。

图 1(b)显示了各种 DER 连接到 MG 系统时的动态频率响应模型。图 1(b)中: T_{SL} 为太阳能发电系统时间常数, T_{DEG} 、 T_{FC} 、 T_{WT} 、 T_{FES} 、 T_{BES} 分别为其相应发电设备的时间常数; D 和 M 分别为微电网混合动力系统的阻尼常数和等效惯性常数; Δf 为 MG 频率偏移; R_s 为 MG 一次调频控制的下垂常数; k_p 、 k_i 分别为 PI 控制中的比例和积分参数。

由此, 可以给出相应的状态-空间模型。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}(t) + \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{w}(t) \\ \tilde{\mathbf{y}}(t) = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}(t) &= \text{col} \left\{ \Delta f(t), \Delta P_{\text{DEG}}(t), \Delta P_{\text{FC}}(t), \Delta P_s(t), \right. \\ &\quad \left. \Delta P_{\text{WTG}}(t), \Delta P_{\text{FES}}(t), \Delta P_{\text{BES}}(t) \right\} \\ \tilde{\mathbf{y}}(t) &= \Delta f(t) \quad \mathbf{w}(t) = \text{col} \{ \Delta P_{\text{Wind}}(t), \Delta P_{\text{Solar}}(t), \Delta P_d(t) \} \\ \tilde{\mathbf{A}} &= \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & & & & & & \\ & \tilde{\mathbf{A}}_{12} & & & & & \\ & & \tilde{\mathbf{A}}_{21} & & & & \\ & & & \tilde{\mathbf{A}}_{22} & & & \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{A}}_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{21} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_s T_{\text{DEG}}} & -\frac{1}{T_{\text{FC}}} & 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{FES}}} & \frac{1}{T_{\text{BES}}} \end{bmatrix}^T$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{22} = \text{diag} \left\{ -\frac{1}{T_{\text{DEG}}}, -\frac{1}{T_{\text{FC}}}, -\frac{1}{T_{\text{SL}}}, -\frac{1}{T_{\text{WT}}}, -\frac{1}{T_{\text{FES}}}, -\frac{1}{T_{\text{BES}}} \right\}$$

$$\tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{WT}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{SL}}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_{\text{DEG}}} & \frac{1}{T_{\text{FC}}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad \tilde{\mathbf{C}} = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

式中: $\tilde{\mathbf{A}}$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}$ 、 $\tilde{\mathbf{F}}$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}$ 为系统参数矩阵; $\mathbf{u}(t)$ 为系统输入; $\mathbf{w}(t)$ 为系统所受到的扰动; $\text{diag}\{\}$ 表示适当维数的块对角矩阵; $\text{col}\{\}$ 表示适当维数的列向量。

将 $\Delta f(t)$ 作为控制器的输入, 设计了如式(4)所示的 PI 控制器。

$$\mathbf{u}(t) = -k_p \Delta f(t) - k_i \hat{f} \quad (4)$$

式中, \hat{f} 是一个虚拟状态量, $\hat{f} = \int_0^t \Delta f(s) ds$ 。

构造 $\mathbf{y}(t) = \text{col}\{\Delta f(t), \hat{f}\} = \text{col}\{\tilde{\mathbf{y}}(t), \hat{f}\}$ 形式的列向量, 相应的控制器可表示为

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{y}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{K} = [k_p, k_i]; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}} & 0 \\ \mathbf{0}_{1 \times 7} & 1 \end{bmatrix}.$$

基于上述讨论, 式(3)可进一步表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \text{col}\{\tilde{\mathbf{x}}(t), \tilde{\mathbf{f}}\}, \mathbf{y}(t) = \text{col}\{\tilde{\mathbf{y}}(t), \tilde{\mathbf{f}}\} \\ \mathbf{w}(t) &= \text{col}\{\Delta P_{\text{Wind}}(t), \Delta P_{\text{Solar}}(t), \Delta P_d(t)\} \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \mathbf{0}_{7 \times 1} \\ 1 & \mathbf{0}_{1 \times 7} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{F}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}} & 0 \\ \mathbf{0}_{1 \times 7} & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由于电力系统运行状态的变化, 负荷的功率会在一段时间内发生波动。负荷扰动 $\Delta P_d(t)$ 是由两相短路接地故障、单相接地故障、三相短路故障等多种故障在有限时间内发生引起的, $\Delta P_d(t) \in \mathcal{L}_2[0, \infty)$; 风速和风向是影响风力发电的重要因素; 一天 24 h 内光照强度的变化对光伏发电也有很大影响。

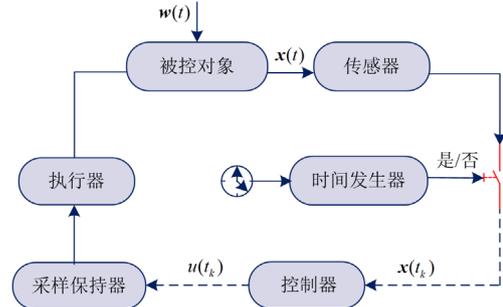
1.2 基于动态事件触发的二次频率控制模型

本文考虑到依赖于传统的时间采样机制的微电网难以应对如今复杂的运行模式, 将事件触发机制应用到微电网的频率控制当中, 将极大地节约微电网的通信资源, 同时也将排除一些冗余信号。对于调度人员来说, 电力系统的操作也会变得更加简便快捷。另一方面, 对于一些偏远地区、海岛、军事基地而言, 由于地域的封闭性和成本问题, 传统的周期采样频率过于频繁会导致中央控制器(microgrid central controller, MGCC)过载运行, 反之则会因控制不及时而使微电网的稳定性无法得到保障, 甚至会导致频率崩溃。不仅如此, 传统时间采样机制会沿着人为设定的采样间隔一直进行工作, 直到闭环链中断, 这就意味着会存在许多冗余的信号进入控制器, 存在以下缺点: (1) 增加控制器处理数据的负担; (2) 网络出现延迟、丢包、无序通信, 其工作机制原理如图 2(a)所示。传统时间采样机制能够成功的基础在于优异的通信网络, 包括低延迟、高带宽、低占用比等特点的一系列专用网络。相反, 事件触发机制不同于时间采样机制的定时传输, 而是根据事件判断是否传输。数据通过通信网络传输的条件不是固定的时间间隔而是满足一定条件的事件, 其工作机制原理如图 2(b)所示。由图 2 可知, 事件触发机制模拟“人在回路”的场景, 信号传输的条件不再是时间而是事件。

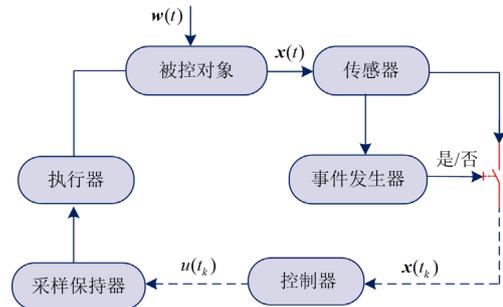
动态事件触发条件为

$$t_{k+1} = \min_{t > t_k} \{t > 0 \mid \sigma \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) - \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \leq -\eta(t)\} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t_k) - \mathbf{y}(t)$, 其中 t_k 为事件触发机制的第 k 次采样时刻; σ 为(0,1)内的标量; $\eta(t)$ 为满足式(8)的内部动态变量。



(a) 时间触发机制原理图



(b) 事件触发机制原理图

图 2 采样机制原理图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling mechanism

$$\dot{\eta}(t) = -\lambda \eta(t) + \sigma \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) - \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \quad (8)$$

式中: $\lambda > 0$; $\eta(0) = \eta_0 \geq 0$ 。

当满足式(7)的条件时, 信号 $\mathbf{y}(t)$ 将会被传送到控制器, 经过控制器处理后的信号通过通信通道传输给执行器, 否则信号不被传输, 工作原理如图 3 所示, 其中 $\|\mathbf{e}(t)\|$ 表示 $\mathbf{e}(t)$ 的范数。可以看出, 由于内部动态变量 $\eta(t)$ 的引入, 使得 $\|\mathbf{y}(t)\|$ 的变化为一条随时间 t 变化的曲线。相较于阈值恒等于零的传统事件触发机制, 对应的事件触发机制在网络化控制中作为通信网络中的开关控制信号的传输, 其位置如图 4 所示。

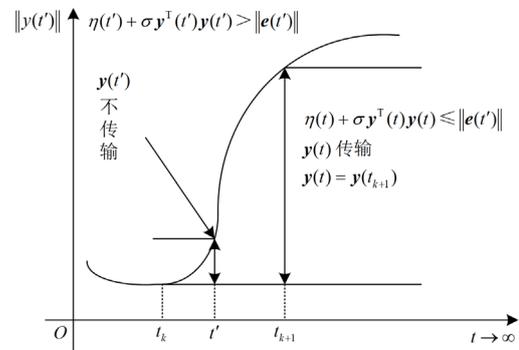


图 3 动态事件触发机制图解

Fig. 3 Illustration of dynamic event-triggered mechanism

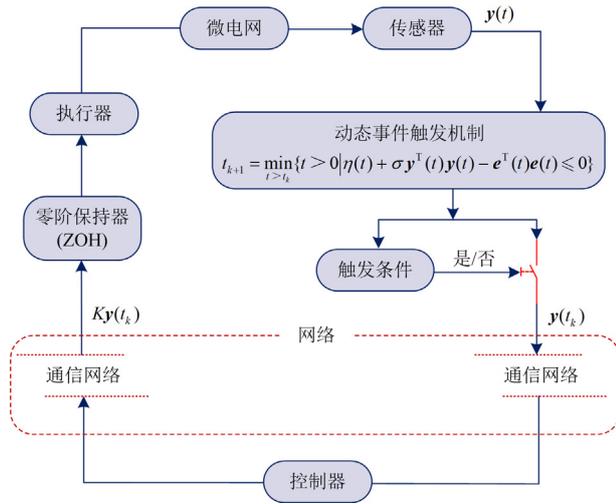


图4 动态事件触发微电网二次频率控制系统图

Fig. 4 Dynamic event-triggered microgrid secondary frequency control system diagram

不仅如此，控制器和执行器之间存在一个零阶保持器(zero-order holder, ZOH)，其作用为一直保持 t_k 时刻的采样信号直到 t_{k+1} 时刻的采样信号到达。采样信号瞬间 t_k 满足下列时间序列：

$$0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < \lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \infty \quad (9)$$

然后，在事件触发机制的作用下，式(6)可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t_k) + \mathbf{F}w(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (10)$$

考虑式(5)和式(10)，动态事件触发机制下的微电网二次频率控制模型可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{K}e(t) + \mathbf{F}w(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (11)$$

从合理性角度分析，式(11)是从式(6)衍生而来的，因此式(11)代表的系统建模也是合理的。本文研究分析事件触发机制下的微电网二次频率控制问题，具体要满足以下条件。

1) 当扰动 $w(t) \equiv 0$ 时，所得的闭环动态事件触发机制下的微电网二次频率控制系统(11)是渐进稳定的。

2) 由于扰动的存在，本文通过所设计的动态事件触发机制方案，以最小化扰动抑制程度为目标。具体而言，对于微电网频率控制系统中不可避免的扰动，本文的目标是将干扰抑制程度 γ 最小化。因此，对于任意的非零扰动 $w(t) \in \mathcal{L}_2[0, \infty)$ 和 $\gamma > 0$ ，不等式 $\|y(t)\|_2 < \gamma \|w(t)\|_2$ 成立。

式(7)中的内部动态变量 $\eta(t)$ 可以看作

$\sigma y^T(t)y(t) - e^T(t)e(t)$ 的滤波值。若将 $\eta(t)$ 消去，则动态事件触发机制将会退化为静态事件触发机制。

$$t_{k+1} = \min_{t > t_k} \{t > 0 | \sigma y^T(t)y(t) - e^T(t)e(t) \leq 0\} \quad (12)$$

这表明静态事件触发机制可以作为动态事件触发机制的一个特例。与阈值恒等于零的静态事件触发机制相比，由于内部动态变量 $\eta(t)$ 的存在，不必使动态事件触发机制的阈值由0变为 $-\eta(t)$ 。同式(12)相比， $\sigma y^T(t)y(t) - e^T(t)e(t)$ 不必一直保持非负状态。由此，引入 $\eta(t)$ 将有助于扩大连续两个触发事件之间的时间间隔。

另一方面，式(7)中参数的选择对通信机制是有影响的。标量 σ 代表动态事件触发机制瞬时采样时刻的紧密性，一个较大的 σ 会使得 t_{k+1} 和 t_k 之间的间隔变大，并且可以允许更大的误差 $\|e(t)\|$ ，这意味着通过通信网络传输的数据将会减少，有助于提高通信质量和微电网的频率稳定性。参数 λ 表示滤波的衰减率，为了保证滤波器的衰减速率不高于滤波信号 $\sigma y^T(t)y(t) - e^T(t)e(t)$ ， λ 通常取较小值。

2 稳定性分析

将传统的时间采样替换为事件触发采样机制，不仅仅是器件的替换，前者的工作方式为定时机制，只要设定的采样时间一到，必传输数据，将伴随着产生许多的冗余控制数据，不仅占用带宽而且增加了MGCC的计算量；然而后者虽然可以减少冗余数据发送，但是其机制的正常工作依赖于MG系统的正常工作，事件触发机制提取MG系统的“事件”作为数据传输的依据，这必然涉及到MG系统的稳定性分析。本文将着重分析微电网二次频率控制系统的稳定性问题，并且对上述提到的渐进稳定性和 H_∞ 稳定性问题进行了研究。

本文用到的数学符号： A^T 表示 A 的转置； $\text{Sym}\{A\} = A^T + A$ ；矩阵中“*”表示矩阵的对称项； $\mathbb{R}^{n \times n}$ 表示 $n \times n$ 阶实数矩阵的集合； \mathbb{R}^n 表示 n 维欧几里得空间； $\mathbb{S}_+^{n \times n}$ 表示正定 $n \times n$ 阶矩阵的集合； $A < 0 (> 0)$ 表示 A 是一个对称的负定(正定)矩阵； $I(0)$ 表示恒等式(零)矩阵； $\|\cdot\|_p$ 是向量或矩阵的 p -范数， $p = 1, 2, \dots, \infty$ 。

2.1 H-infinity 稳定性分析

在给出相关性定理之前，首先引入以下引理作为理论基础。

引理1^[24] 假定 $u(t), v(t)$ 是连续函数。函数 $f(t, g(t))$ 对于所有 $t \geq 0$ 是连续可微的。当 $t \geq 0$ 时，

$v(t) \leq u(t)$, 满足式(13)。

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = f(t, u(t)), u(t_0) = u_0 \\ \dot{v}(t) \leq f(t, v(t)), v(t_0) \leq u_0 \end{cases} \quad (13)$$

接下来将给出一个保证微电网控制系统 H_∞ 性能的充分条件。首先讨论内部动态变量 $\eta(t)$ 的相关问题, 具体内容如下。

定理 1 存在参数 $\lambda > 0$, $\eta_0 \geq 0$ 和 $\sigma \in (0, 1)$, 对所有 $t \geq 0$, $\eta(t)$ 是非负的。

证明: 将式(7)和式(8)结合, 对所有 $t \geq 0$ 满足式(14)。

$$\dot{\eta}(t) + \lambda \eta(t) = \sigma \mathbf{y}^\top(t) \mathbf{y}(t) - \mathbf{e}^\top(t) \mathbf{e}(t) \geq -\eta(t) \quad (14)$$

应用引理 1 可得到

$$\eta(t) \geq \eta_0 e^{-(\lambda+1)t}, \forall t \geq 0 \quad (15)$$

这表明 $\eta(t) \geq 0$ 。

证毕。

定理 2 对于给定标量 $\gamma > 0$ 、 $\sigma \in (0, 1)$, 如果存在适当维数的矩阵 \mathbf{P} 和给定的控制器增益矩阵 \mathbf{K} 使得不等式(16)成立, 则称基于动态事件触发机制下的微电网二次频率控制系统(11)是渐进稳定的, 并具有不超过 $\gamma > 0$ 的 H_∞ 性能。

$$\mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Xi} & \mathbf{PBK} & \mathbf{PF} \\ * & -\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ * & * & -\gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (16)$$

式中, $\mathbf{\Xi} = (\sigma + 1) \mathbf{C}^\top \mathbf{C} + \text{Sym}\{\mathbf{PA} - \mathbf{PBK}\}$ 。

证明: 构造如下的 Lyapunov 泛函。

$$V(t) = \mathbf{x}^\top(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t) + \eta(t) \quad (17)$$

沿着系统(11)轨迹对式(17)求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2\mathbf{x}^\top(t) \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}}(t) + \dot{\eta}(t) = f(t, \mathbf{x}, \mathbf{e}, \mathbf{w}) + \dot{\eta}(t) \leq \\ & f(t, \mathbf{x}, \mathbf{e}, \mathbf{w}) + \sigma \mathbf{y}^\top(t) \mathbf{y}(t) - \mathbf{e}^\top(t) \mathbf{e}(t) \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} f(t, \mathbf{x}, \mathbf{e}, \mathbf{w}) &= \mathbf{x}^\top(t) \left[\begin{array}{c} \mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{BK}) + \\ (\mathbf{A} - \mathbf{BK})^\top \mathbf{P} \end{array} \right] \mathbf{x}(t) + \\ & 2\mathbf{x}^\top(t) \mathbf{PBK} \mathbf{e}(t) + 2\mathbf{x}^\top(t) \mathbf{PBF} \mathbf{w}(t) \end{aligned}$$

定义 $\zeta_1(t) = [\mathbf{x}^\top(t) \ \mathbf{e}^\top(t)]^\top$, 则当 $\mathbf{w}(t) \equiv \mathbf{0}$ 时, 有不等式(19)成立。

$$\dot{V}(t) \leq \zeta_1^\top(t) \mathbf{\Pi}' \zeta_1(t) \quad (19)$$

$$\text{式中, } \mathbf{\Pi}' = \begin{bmatrix} \mathbf{\Xi} - \mathbf{C}^\top \mathbf{C} & \mathbf{PBK} \\ * & -\mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

显然式(16)中 $\mathbf{\Pi} \leq 0$ 可以保证 $\mathbf{\Pi}' \leq 0$ 的成立, 因此当扰动 $\mathbf{w}(t) \equiv \mathbf{0}$ 时, 所得的闭环动态事件触发机制下的微电网二次频率控制系统(11)是渐进稳定的。

为了研究系统的 H_∞ 性能, 构造函数 $\mathcal{J}(t)$ 为

$$\mathcal{J}(t) = \dot{V}(t) + \mathbf{x}^\top(t) \mathbf{x}(t) - \gamma^2 \mathbf{w}^\top(t) \mathbf{w}(t) \quad (20)$$

进一步可得:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(t) &= 2\mathbf{x}^\top(t) \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}}(t) + \sigma \mathbf{y}^\top(t) \mathbf{y}(t) - \mathbf{e}^\top(t) \mathbf{e}(t) + \\ & \mathbf{y}^\top(t) \mathbf{y}(t) - \gamma^2 \mathbf{w}^\top(t) \mathbf{w}(t) \leq \zeta^\top(t) \mathbf{\Pi} \zeta(t) \end{aligned} \quad (21)$$

式中, $\zeta(t) = [\mathbf{x}^\top(t) \ \mathbf{e}^\top(t) \ \mathbf{w}^\top(t)]^\top$ 。因此, 当式(16)成立时, 有 $\mathcal{J}(t) < 0$ 。

将式(20)中的不等式从 $t = 0$ 积分到 ∞ , 可得

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \dot{V}(s) + \mathbf{x}^\top(s) \mathbf{x}(s) - \gamma^2 \mathbf{w}^\top(s) \mathbf{w}(s) ds &= \\ V(\infty) - V(0) + \int_0^\infty \mathbf{x}^\top(s) \mathbf{x}(s) - \gamma^2 \mathbf{w}^\top(s) \mathbf{w}(s) ds &< 0 \end{aligned} \quad (22)$$

因此, 对于任意的非零扰动 $\mathbf{w}(t) \in \mathcal{L}_2[0, \infty)$ 和 $\gamma > 0$, 不等式 $\|\mathbf{y}(t)\|_2 < \gamma \|\mathbf{w}(t)\|_2$ 成立。即系统(11)是渐近稳定的, 并具有不超过 $\gamma > 0$ 的 H_∞ 性能。

证毕。

2.2 事件触发控制器的协同设计

定理 3 对于给定标量 $\gamma > 0$ 、 $\sigma \in (0, 1)$, 如果存在适当维数的矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{G} , 常数 j_1 、 j_2 、 j_3 使得不等式(23)成立, 则在具有 H_∞ 性能指标的事件触发控制器和相应的增益矩阵 $\mathbf{K} = \text{diag}\{\tilde{\mathbf{e}}_1^\top \tilde{\mathbf{K}}, \tilde{\mathbf{e}}_2^\top \tilde{\mathbf{K}}, \dots, \tilde{\mathbf{e}}_{j_3}^\top \tilde{\mathbf{K}}\}$ 的控制下, 所设计的控制系统(11)是渐进稳定的。

$$\tilde{\mathbf{\Pi}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{\Xi}} & \mathbf{G} & \mathbf{PF} \\ * & -\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ * & * & -\gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (23)$$

式中, $\tilde{\mathbf{\Xi}} = (\sigma + 1) \mathbf{C}^\top \mathbf{C} + \text{Sym}\{\mathbf{PA} - \mathbf{GC}\}$ 。

证明: 定义矩阵(24)

$$\begin{cases} \mathbf{e}_i = [\mathbf{0}_{n \times (i-1)} \ \mathbf{I} \ \mathbf{0}_{n \times (j_1-i)}]^\top & (1 \leq i \leq j_1) \\ \bar{\mathbf{e}}_i = [\mathbf{0}_{n \times (i-1)} \ \mathbf{I} \ \mathbf{0}_{n \times (j_2-i)}]^\top & (1 \leq i \leq j_2) \\ \tilde{\mathbf{e}}_i = [\mathbf{0}_{n \times (i-1)} \ \mathbf{I} \ \mathbf{0}_{n \times (j_3-i)}]^\top & (1 \leq i \leq j_3) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $j_1 \geq j_2$ 、 j_3 为常量, 系统确定则 j_1 、 j_2 、 j_3 的数值也相应确定。

令 $\mathbf{G} = \mathbf{PBK}$, 则可得

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{e}_1^\top \mathbf{PB} \tilde{\mathbf{e}}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_2^\top \mathbf{PB} \tilde{\mathbf{e}}_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{e}_{j_3}^\top \mathbf{PB} \tilde{\mathbf{e}}_{j_3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}} \tilde{\mathbf{K}} = \\ \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{e}_1^\top \mathbf{G} \bar{\mathbf{e}}_1 & \mathbf{e}_2^\top \mathbf{G} \bar{\mathbf{e}}_2 \\ \mathbf{e}_3^\top \mathbf{G} \bar{\mathbf{e}}_3 & \mathbf{e}_4^\top \mathbf{G} \bar{\mathbf{e}}_4 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{e}_{j_2-1}^\top \mathbf{G} \bar{\mathbf{e}}_{j_2-1} & \mathbf{e}_{j_2}^\top \mathbf{G} \bar{\mathbf{e}}_{j_2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{其中 } \tilde{\mathbf{K}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{K}_{P1} & -\mathbf{K}_{I1} \\ -\mathbf{K}_{P2} & -\mathbf{K}_{I2} \\ \vdots & \vdots \\ -\mathbf{K}_{Pj_3} & -\mathbf{K}_{Ij_3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}} = [\mathbf{K}_1 \quad \mathbf{K}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{K}_{j_3}]^T, \text{ 显}$$

然, 由式(25)可得到 $\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y}$ 。

综上, 可得到 $\mathbf{K} = \text{diag}\{\tilde{\mathbf{e}}_1^T \tilde{\mathbf{K}}, \tilde{\mathbf{e}}_2^T \tilde{\mathbf{K}}, \dots, \tilde{\mathbf{e}}_{j_3}^T \tilde{\mathbf{K}}\}$ 。

证毕。

许多相关文献研究了相关解耦方法, 如文献[25]通过左乘和右乘构造的矩阵及其逆矩阵, 将上述问题转化为 W-problem, 但结论正确的条件是矩阵 \mathbf{C} 是行满秩的。这也就意味着需要重新构造系统的状态-空间模型以使 \mathbf{C} 行满秩, 这在无形中增加了问题的复杂度。

2.3 Zeno 现象分析

以连续事件触发机制为基础设计的动态事件触发机制存在着与连续事件触发机制一样的 Zeno 现象问题。Zeno 现象是指事件在单位时间内触发了无穷多次, 即在单位时间内事件触发机制工作了无穷次, 数据被传输了无穷多次。这种现象的发生与减少数据传输的目标相违背, 因此要避免这种现象的发生。本文给出了避免 Zeno 现象发生的定理, 其证明的关键是连续两次采样瞬间的间隔大于零。

定理 4 对于所设计的动态事件触发机制(7)和微电网二次频率控制系统(11), 存在正执行间隔时间 T_{ic} , 其表达式为

$$T_{ic} = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha \delta}{\beta(1-\sigma)} + 1 \right), & \alpha \neq 0 \\ \frac{\delta}{\beta(1-\sigma)}, & \alpha = 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\delta = \sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 + (1-\sigma)\eta(t) - \sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|}$; $\alpha = |\rho_{\max}(\mathbf{A} + \mathbf{BKC})|$, $\rho(\cdot)$ 为矩阵的特征值集合; $\beta = |\rho_{\max}(\mathbf{A} + \mathbf{BKC})| \|\mathbf{y}(t_k)\| + \|\mathbf{CF}\| \|\mathbf{w}(t)\|$ 。

证明: 由 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t_k) - \mathbf{y}(t)$, $t \in [t_k, t_{k+1})$ 可知

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\dot{\mathbf{y}}(t) = -\mathbf{C}[\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}\mathbf{w}(t)] \quad (27)$$

可得

$$\begin{aligned} \|\dot{\mathbf{e}}(t)\| &= \|\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{C}\mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{C}\mathbf{F}\mathbf{w}(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{A} + \mathbf{BKC}\| \|\mathbf{y}(t_k) - \mathbf{e}(t)\| + \|\mathbf{CF}\| \|\mathbf{w}(t)\| \leq \\ &\|\mathbf{A} + \mathbf{BKC}\| \|\mathbf{e}(t)\| + \|\mathbf{A} + \mathbf{BKC}\| \|\mathbf{y}(t_k)\| + \\ &\|\mathbf{CF}\| \|\mathbf{w}(t)\| \leq \alpha \|\mathbf{e}(t)\| + \beta \end{aligned} \quad (28)$$

假设存在 $\varphi(t)$ 使 $\varphi(t_k) = 0$ 并且满足

$$\|\dot{\varphi}(t)\| = \alpha \|\varphi(t)\| + \beta, t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (29)$$

由引理 1 可知 $\|\mathbf{e}(t)\| \leq \|\varphi(t)\|$ 显然成立, 则式(29)的解可用式(30)表示。

$$\|\varphi(t)\| = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} (e^{\alpha(t-t_k)} - 1), & \alpha \neq 0 \\ \beta(t-t_k), & \alpha = 0 \end{cases} \quad (30)$$

同时, 对于 $t \in [t_k, t_{k+1})$, 动态事件触发机制(7)满足式(31)。

$$\eta(t) + \sigma \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) - \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) > 0 \quad (31)$$

从中得到

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}(t)\| &< \sqrt{\sigma \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) + \eta(t)} \leq \\ &\sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 + \eta(t)} = \sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k) - \mathbf{e}(t)\|^2 + \eta(t)} \end{aligned} \quad (32)$$

由于 $(\|\mathbf{y}(t_k)\| - \|\mathbf{e}(t)\|)^2 \leq \|\mathbf{y}(t_k) - \mathbf{e}(t)\|^2$, 故此得到式(32)成立的一个充分条件, 即

$$\|\mathbf{e}(t)\|^2 \leq \sigma (\|\mathbf{y}(t_k)\| - \|\mathbf{e}(t)\|)^2 + \eta(t) \quad (33)$$

式(32)可进一步写为

$$\|\mathbf{e}(t)\| \leq \frac{\sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 + (1-\sigma)\eta(t) - \sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|}}{1-\sigma} \quad (34)$$

当 $\alpha \neq 0$ 时, 结合式(30)一式(34)有

$$\begin{aligned} T_{ic} &= \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha \sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 + (1-\sigma)\eta(t) - \sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|}}{\beta} + 1 \right) > \\ &\frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha \sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 - \sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|}}{\beta} + 1 \right) = \\ &\frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha (\sqrt{\sigma} - \sigma) \|\mathbf{y}(t_k)\|}{\beta} + 1 \right) \end{aligned} \quad (35)$$

当 $\alpha = 0$ 时, 则有

$$\begin{aligned} T_{ic} &= \frac{\sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 + (1-\sigma)\eta(t) - \sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|}}{\beta(1-\sigma)} > \\ &\frac{\sqrt{\sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|^2 - \sigma \|\mathbf{y}(t_k)\|}}{\beta(1-\sigma)} = \frac{(\sqrt{\sigma} - \sigma) \|\mathbf{y}(t_k)\|}{\beta(1-\sigma)} \end{aligned} \quad (36)$$

因为 $0 < \sigma < 1$, 可以保证 $T_{ic} > 0$, 从而排除了

Zeno 现象。

证毕。

Zeno 现象的发生违背了事件触发控制设计的初衷, 因此在基于所设计的事件触发机制下所得的闭环微电网二次频率控制系统(11)不发生 Zeno 现象是十分重要的。定理 4 给出了动态事件触发机制的关于 Zeno 现象的研究, 若将 $\eta(t) \equiv 0$, 则定理 4 变

为式(12)关于 Zeno 现象的研究, 其结论仍成立。

3 仿真验证

本文从考虑 WTG 和 PV 输出功率间歇性和不确定性的角度进行了不同场景的分析, 并且对定理 2 和定理 3 进行了仿真分析。微电网中的主要设备参数如表 1 所示, 需要指出的是相关参数以标幺值的形式给定^[26]。

表 1 微电网主要设备参数

Table 1 Main equipment parameters of microgrid

参数	数值	参数	数值
\mathcal{D}	1	T_{BES}	0.1
M	10	T_{DEG}	2
R_s	0.05	T_{WT}	1.5
T_{FC}	34	T_{FES}	0.1
T_{SL}	1.8	—	—

下面将讨论以下 2 个采样瞬间。

1) 静态事件触发机制 (static event-triggered mechanism, SETM)

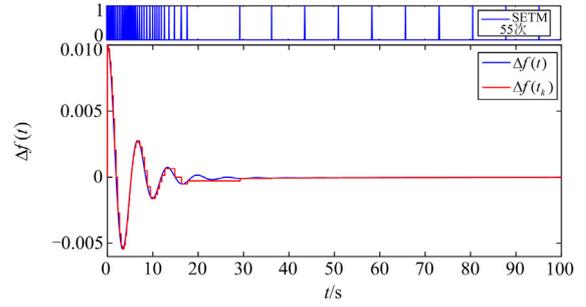
$$t_{k+1} = \min \left\{ \begin{array}{l} t \geq t_k | (\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_k))^T (\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_k)) \geq \\ \sigma \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) \end{array} \right\}$$

2) 动态事件触发机制 (dynamic event-triggered mechanism, DETM)

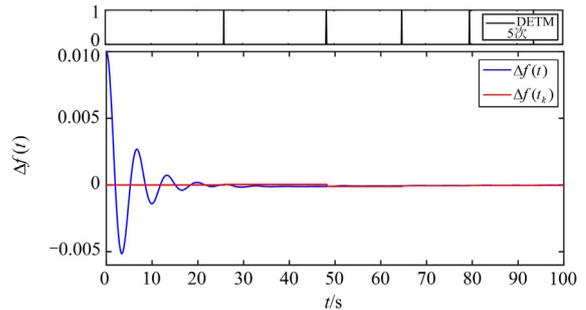
$$t_{k+1} = \min \left\{ \begin{array}{l} t \geq t_k | \eta(t) + \sigma \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) - \\ (\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_k))^T (\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_k)) \leq 0 \end{array} \right\}$$

情景 1: 为了验证系统(11)的稳定性, 结合定理 2、表 1 和 $\gamma=10$ 、 $\lambda=0.01$ 、 $\sigma=0.03$ 、 $\eta_0=0.001$ 以及给定控制器增益 $\mathbf{K}=[-0.1, 0.2]$, 在 $t=100$ s 时的运行结果如图 5 所示。图 5 是在零初始条件 $\mathbf{x}(0)=0.01$ 和 $\mathbf{w}(t)\equiv\mathbf{0}$ 下, 得到的不同 ETM 下微电网二次频率控制系统的频率偏移 $\Delta f(t)$ 随时间变化的曲线, 其结果证明了在不存在扰动 $\mathbf{w}(t)$ 时系统(11)是渐进稳定的。

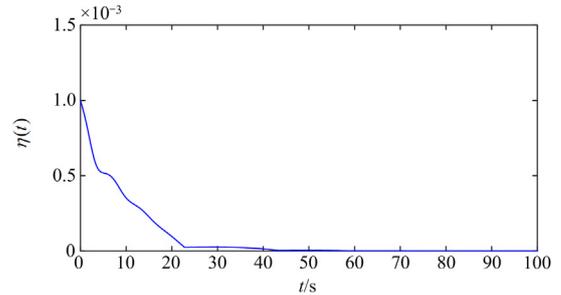
图 5 中: 0 和 1 之间竖线代表 ETM 采样瞬间 t_k , 连续两个竖线之间的直线长度代表了采样间隔 $(t_{k+1}-t_k)$; $\Delta f(t_k)$ 代表采样瞬间 t_k 时 ZOH 保持的频率波动; 由图 5(a)可知, $t \in [0, 20]$ s 时传输非常频繁, $\Delta f(t)$ 变化较大时数据传输次数随之增多, 但其中也包含了许多冗余数据; 由图 5(b)可知, 微电网二次频率控制系统(11)在 DETM 下数据传输的次数少、采样间隔大, 并且在 $t \in [0, 100]$ s 时的传输次数非常少。



(a) SETM 的采样瞬间和频率偏移



(b) DETM 的采样瞬间和频率偏移



(c) 内部动态变量随时间变化的曲线

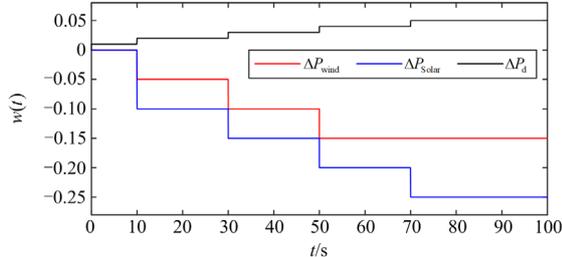
图 5 情景 1 下不同 ETM 的频率偏移变化曲线和内部动态变量演化曲线

Fig. 5 Frequency deviation variation curve and internal dynamic variable evolution curve of different ETMs under scenario 1

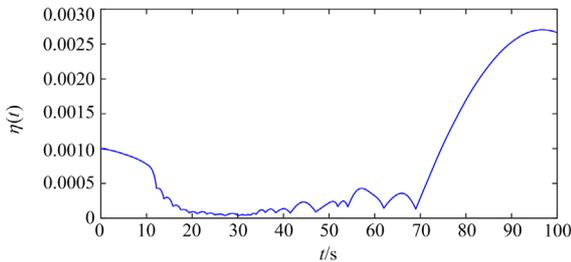
从图 5(a)、图 5(b)中可以得出, SETM 下传输次数为 55, 比 DETM 下传输的 5 次高了 11 倍, 这体现出 DETM 在减少数据传输方面的优势。产生上述结果的原因是存在非负的内部动态变量 $\eta(t)$ 使得相邻两次的采样间隔增大, 给定内部动态变量 $\eta(t)$ 的初始值 ($\eta_0=0.001$), 可得到如图 5(c)所示的扰动 $\mathbf{w}(t)\equiv\mathbf{0}$ 时, 内部动态变量 $\eta(t)$ 随时间变化的曲线, 可以看出 $\eta(t)$ 最终收敛到很小的固定值。

情景 2: 在本情景中考虑了扰动 $\mathbf{w}(t)$ 多级阶跃变化的影响。具体阶跃变化时间分别发生在 10、30、50、70 s, 其结果如图 6(a)所示。利用 Matlab/LMI 工具箱求解定理 3 可得控制器增益, $\hat{\mathbf{K}}=[-0.9516,$

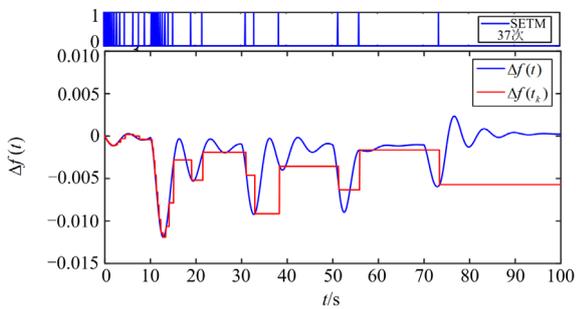
1.1890]。基于此,本场景将在所得控制器增益 \hat{K} 和扰动 $w(t) \neq 0$ 的条件下分析系统(11)满足 H_∞ 性能的稳定性的结果如图 6(c)和图 6(d)所示。可以看出在情景 2 条件下微电网中的频率偏差随时间趋于 0,其中 DETM 和 SETM 的频率波动不完全重合,这是



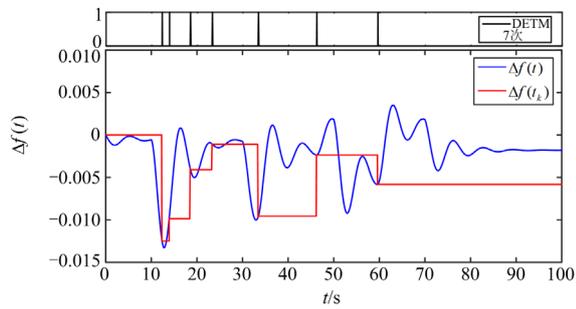
(a) 多级阶跃扰动



(b) 内部动态变量随时间变化的曲线



(c) SETM的采样瞬间和频率偏移



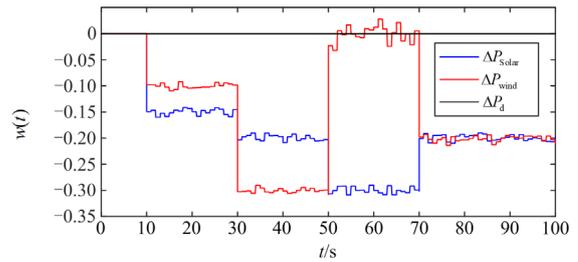
(d) DETM的采样瞬间和频率偏移

图 6 情景 2 下不同 ETM 的频率偏移变化曲线和内部动态变量演化曲线

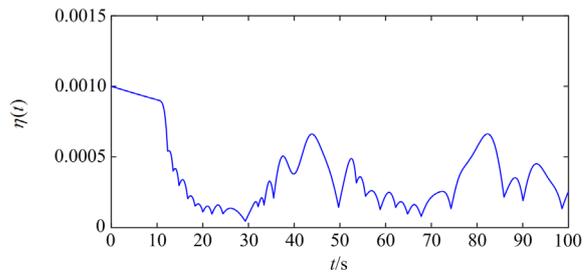
Fig. 6 Frequency deviation variation curve and internal dynamic variable evolution curve of different ETMs under scenario 2

由于它们的采样时刻不同所导致的,但其波动幅值都在系统鲁棒性允许的范围内。在 SETM 下,所得的微电网二次频率控制闭环系统(11)进行了 37 次采样,这比 DETM 下的 7 次采样多了 30 次,体现了 DETM 在减轻通信负担方面的优越性。内部动态变量 $\eta(t)$ 随时间变化的曲线如图 6(b)所示,其结果表明 $\eta(t)$ 的数值会先减小后增大,且中间过程存在波动,这一点正是 DETM 比 SETM 可以有效减少数据传输次数的关键。

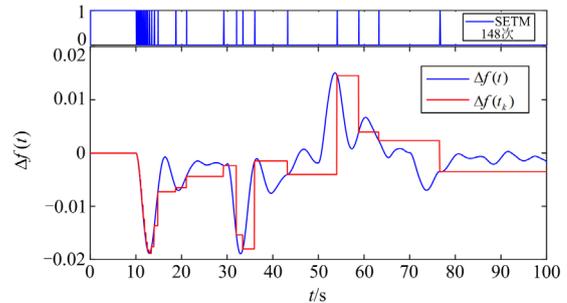
情景 3: 与情景 2 中的纯阶跃变化不同,在 10、30、50、70 s 纯阶跃变化的基础上还模拟了风力发电和太阳辐射的波动性,其结果如图 7(a)所示。在本场景中,DETM 的通信次数 10 比 SETM 的 148 少了 138 次,极大地减少了冗余数据的传输。内部动态变量 $\eta(t)$ 随时间变化的曲线如图 7(b)所示,表明 $\eta(t)$ 受到随机噪声的影响有较小幅度的波动且波动时间节点约在 10、30、50、70 s 处。



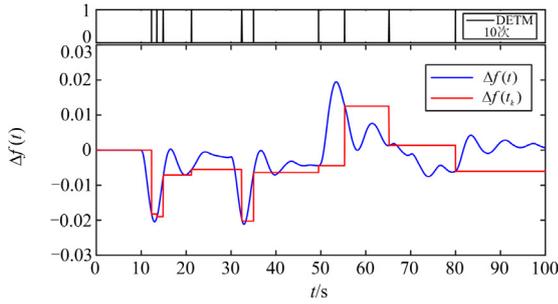
(a) 多级阶跃扰动



(b) 内部动态变量随时间变化的曲线



(c) SETM的采样瞬间和频率偏移

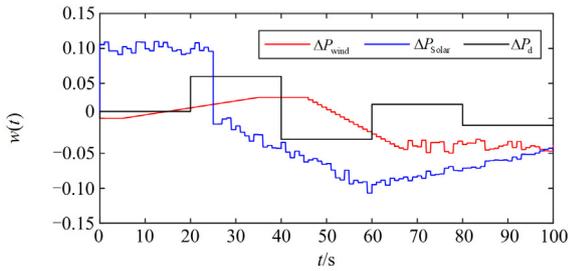


(d) DETM的采样瞬间和频率偏移

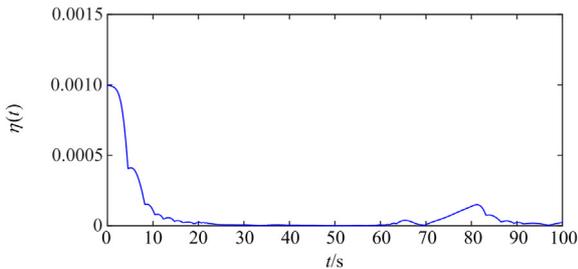
图 7 情景 3 中不同 ETM 下采样瞬间及传输间隔和内部动态变量变化曲线

Fig. 7 Sampling instant and transmission interval and internal dynamic variable evolution curve of different ETMs under scenario 3

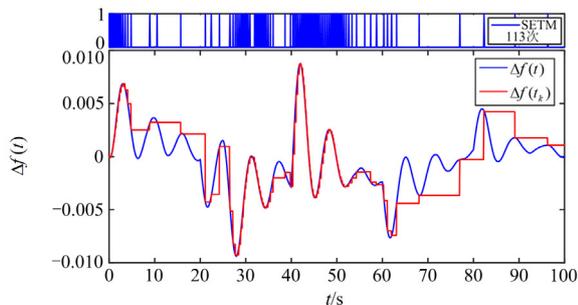
情景 4: 在本场景中, 太阳能和风能没有模拟阶跃变化且仅考虑存在非平稳波动模式, 其结果如图 8(a)所示。在上述扰动的干扰下, SETM 和 DETM 下的微电网频率波动和通信次数分别如图 8(c)和图



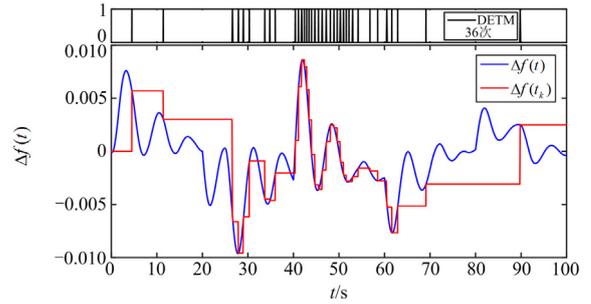
(a) 多级阶跃扰动



(b) 内部动态变量随时间变化的曲线



(c) SETM的采样瞬间和频率偏移



(d) DETM的采样瞬间和频率偏移

图 8 情景 4 中不同 ETM 下采样瞬间及传输间隔和内部动态变量变化曲线

Fig. 8 Sampling instant and transmission interval and internal dynamic variable evolution curve of different ETMs under scenario 4

8(d)所示。SEMT 和 DETM 下的传输次数分别为 113 和 36。内部动态变量 $\eta(t)$ 随时间变化的曲线如图 8(b)所示, 表明 $\eta(t)$ 受到随机噪声和非平稳波动的影响, 其值也收敛到较小值。

4 总结与分析

本文讨论了在无扰动 $w(t) \equiv 0$ 和有扰动(情景 2、3 和 4)下微电网二次频率控制系统的稳定性问题。进一步可以通过频率偏差的变化范围来评价具有不同 ETM 的二次频率控制系统的鲁棒性。为了定量评估系统在过渡过程中的动态性能, 采用了如下两个指标^[20]。

$$\begin{cases} J_H = \int_0^{t_{sim}} \Delta f^2(s) ds \\ J_{ITAE} = \int_0^{t_{sim}} t \cdot |\Delta f(s)| ds \end{cases} \quad (37)$$

式中: t_{sim} 为仿真运行时间; J_H 为频率平方误差的积分; J_{ITAE} 为系统频率偏差的时间乘以绝对误差的积分。前者是频率平方误差的积分, 后者是系统频率偏差的时间乘以绝对误差的积分。利用式(37)可得到表 2 所示的在不同情景下的指标。从表 2 可知, SETM 和 DETM 的两个指标较为接近, 且后者的鲁棒性更强。

表 2 微电网主要设备参数

Table 2 Main device parameters of microgrid				
指标	ETM	情景 2	情景 3	情景 4
J_H	SETM	0.0014	0.0028	0.0013
	DETM	0.0009	0.0023	0.0009
J_{ITAE}	SETM	9.4313	17.3230	10.3382
	DETM	8.1489	14.6720	9.336 25

从表 3 可以看出, DETM 下的微电网二次频率控制系统的平均间隔时间大于 SETM。这意味着在

含扰动的情况下，DETM 下的微电网二次频率控制比 SETM 下的可以承受更长的采样时间。DETM 下的微电网二次频率控制比 SETM 下有较大优势，即 DETM 下的微电网二次频率控制具有更少的通信量。因此，与 SETM 相比，DETM 下的微电网二次频率控制在保持系统稳定性的同时减轻了通信负担。不仅如此，本文还研究了式(7)中不同 σ 对通信次数的影响，考虑在含扰动情景下(情景 2、3 和 4)的 DETM 机制的通信情况，此时控制器增益设为 $K = -[0.1, 0.2]$ ， $\gamma = 30$ 、 $\lambda = 0.035$ ，其结果如图 9 所示。从图中可以看出随着参数 σ 的增大，通信次数会减少，因此设定一个合适的 σ 也是事件触发机制成功的关键。

表 3 含扰动情景下不同 ETM 的平均间隔时间和通信次数

Table 3 Average interval time and communication times of different ETMs under the scenario with disturbance

指标	ETM	情景 2	情景 3	情景 4
平均间隔 时间/s	SETM	2.70	0.68	0.89
	DETM	14.29	10.00	2.78
通信次数	SETM	37	148	113
	DETM	7	10	36

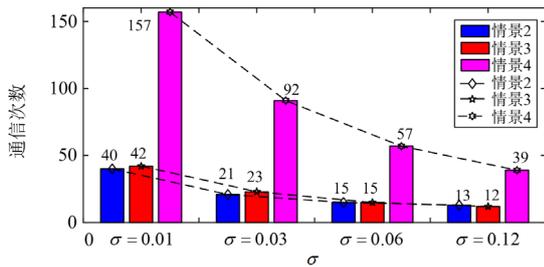


图 9 不同 σ 对通信次数的影响

Fig. 9 Influence of different σ on communication times

5 结论

本文以孤岛微电网的二次频率控制环节为基础，对所提出的动态事件触发机制进行了研究分析。

1) 考虑风力发电机组和太阳能发电设备输出功率的波动性和不确定性，利用李雅普诺夫稳定性理论、不等式放缩技术、矩阵理论等推导出了控制系统满足一定 H_∞ 性能指标的渐进稳定性定理，给出控制器联合设计方法。

2) 对 Zeno 现象进行了分析，并且证明了所研究系统不会发生 Zeno 现象。在不含扰动和含扰动的场景中进行了仿真模拟分析，结果表明基于动态事件触发机制的微电网二次频率控制系统可以在保证稳定性和鲁棒性的基础上，减少数据传输，减轻通信负担。

由网络堵塞引起的数据丢包、无序通信也会影

响二次频率控制的结果。同时，网络攻击也会对控制系统的准确性和可控性带来破坏。因此上述问题的进一步研究有助于提高系统的鲁棒性能，是未来十分有意义的工作方向。

参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 崔嘉, 杨俊友, 葛维春, 等. 互联微电网孤岛运行频率稳定性协调控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2901-2909.
CUI Jia, YANG Junyou, GE Weichun, et al. Coordinated control strategy for interconnected microgrids in islanded mode considering frequency stability[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2901-2909.
- [3] TAN K T, PENG X Y, SO P L, et al. Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1977-1987.
- [4] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [5] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [6] 孙佳航, 黄景光, 徐慧鑫, 等. 基于改进线性二次调节器的微电网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 120-132.
SUN Jiahang, HUANG Jingguang, XU Huixin, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation mode based on an improved linear secondary regulator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 120-132.
- [7] RIVERSO S, TUCCI M, VASQUEZ J C, et al. Stabilizing plug-and-play regulators and secondary coordinated control for AC islanded microgrids with bus-connected topology[J]. Applied Energy, 2018, 210: 914-924.
- [8] 米阳, 钱翌明, 张浩杰, 等. 考虑通信异常的直流微电

- 网储能单元分布式协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 50-59.
- MI Yang, QIAN Yiming, ZHANG Haojie, et al. Distributed coordinated control of a DC microgrid energy storage unit considering abnormal communication[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 50-59.
- [9] AMANI A M, GAEINI N, JALILI M, et al. Which generation unit should be selected as control leader in secondary frequency control of microgrids?[J]. IEEE Journal on Emerging & Selected Topics in Circuits & Systems, 2017: 1-10.
- [10] 米阳, 王晓敏, 钱翌明, 等. 考虑通信时延的直流微电网分布式储能单元协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 91-100.
- MI Yang, WANG Xiaomin, QIAN Yuming, et al. Coordinated control method of distributed energy storage units in a DC microgrid considering communication delay[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 91-100.
- [11] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.
- ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [12] WEN S, YU X, ZENG Z, et al. Event-triggering load frequency control for multiarea power systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1308-1317.
- [13] JIN L, ZHANG C K, HE Y, et al. Delay-dependent stability analysis of multi-area load frequency control with enhanced accuracy and computation efficiency[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3687-3696.
- [14] ZHANG C K, JIANG L, WU Q H, et al. Delay-dependent robust load frequency control for time delay power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2192-2201.
- [15] ZIA M F, ELBOUCHIKHI E, BENBOUZID M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects[J]. Applied Energy, 2018, 222: 1033-1055.
- [16] GOMEZ-CUBA F, ASOREY-CACHEDA R, GONZALEZ-CASTANO F J. Smart grid last-mile communications model and its application to the study of leased broadband wired-access[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 5-12.
- [17] USMAN A, SHAMI S H. Evolution of communication technologies for smart grid applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 191-199.
- [18] ZHANG C K, JIANG L, WU Q H, et al. Further results on delay-dependent stability of multi-area load frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4465-4474.
- [19] AHMADI A, ALDEEN M. An LMI approach to the design of robust delay-dependent overlapping load frequency control of uncertain power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 81: 48-63.
- [20] 钱伟, 孙晓彤, 费树岷. 可再生能源高渗透下时滞孤岛微电网的负荷频率控制[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 630-640.
- QIAN Wei, SUN Xiaotong, FEI Shumin. Load frequency control of islanded microgrids with time-delay under high penetration of RESs[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 630-640.
- [21] BEVRANI H. Robust power system frequency control[M]. Springer, 2009.
- [22] JALAL H, MEYSAM G, HASSAN R, et al. Survey on microgrids frequency regulation: modeling and control systems[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213.
- [23] ATAEE, SIRWAN, FEIZI, et al. Robust frequency control in an islanded microgrid: H-infinity and MU-synthesis approaches[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 706-717.
- [24] 俞立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [25] 池小波, 张灵, 刘宇韬, 等. 拒绝服务攻击下多区域互联电力系统负荷频率控制方法[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 124-136.
- CHI Xiaobo, ZHANG Ling, LIU Yutao, et al. Load frequency control of multi-area interconnected power systems under denial of service attacks[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2022, 45(1): 124-136.
- [26] YU Y, SUN G, ZHANG Y. Dynamic switching event-triggered secondary frequency control of isolated microgrid with communication delay[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(21): 4339-4355.

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-03-29

作者简介:

于永进(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yaydjo@163.com

孙国强(1999—), 男, 硕士, 研究方向为事件触发机制在电力系统中的应用。E-mail: 2936884920@qq.com

(编辑 姜新丽)