

面向干扰和时延的孤岛微电网二次电压与频率控制方法

吴云龙, 曹晓, 李泽, 陶镓伟, 崔国增
(苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 孤岛微电网在独立运行时易受多重干扰影响, 可再生能源出力波动与负载波动会破坏功率平衡, 引发电压和频率偏移; 长距离通信以及网络堵塞会导致控制指令传输时延, 降低二次控制实时性。为解决上述问题, 提出了一种基于动态事件触发机制的固定时间分布式二次控制算法(dynamic event-triggered mechanism, DETC-P)。针对周期性干扰, 运用 H_∞ 鲁棒控制策略增强干扰抑制性; 针对通信时延问题, 采用模型降阶技术简化分布式发电单元的动态模型提高时延补偿效率。所提出的动态事件触发基于电压与频率的偏差动态调整触发阈值, 在保证事件触发间隔下限的前提下显著降低了节点间的通信负担, 并避免了Zeno行为。最后, 构建了孤岛微电网的系统模型并进行仿真实验验证了所提算法的可行性。

关键词: 孤岛微电网; 未知干扰; 通信时延; 固定时间一致性; 动态事件触发机制

Secondary Voltage and Frequency Control Method for Island Microgrids Facing Disturbance and Time-Delay

WU Yunlong, CAO Xiao, LI Ze, TAO Jiawei, CUI Guozeng

(School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

Abstract: Isolated microgrids are susceptible to multiple disturbances while they are operating independently. Fluctuations in renewable energy outputs and load variations can disrupt power balance, causing voltage and frequency deviations. And long-distance communication and network congestion may induce control command transmission delays that compromise the real-time performance of secondary control. To address these challenges, a fixed-time distributed secondary control algorithm based on a dynamic event-triggered mechanism (DETC-P) is proposed. To counter periodic disturbances, an H_∞ robust control strategy is adopted to strengthen disturbance rejection capability. For communication delay issues, model order reduction techniques are employed to simplify the dynamic models of distributed generation units, enhancing delay compensation efficiency. The proposed dynamic event-triggering mechanism adaptively adjusts triggering thresholds based on voltage and frequency deviations, significantly reducing communication burden between nodes while ensuring a lower bound on event-triggering intervals and avoiding Zeno behavior. Finally, a system model of the islanded microgrid is constructed, and simulation experiments are conducted to validate the feasibility of the proposed algorithm.

Key words: islanded microgrids; unknown disturbances; communications delay; fixed-time consensus; dynamic event-triggered mechanism

基金项目: 江苏省自然科学基金优秀青年基金资助项目(BK20211605);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJCX23_1721, SJCX24_1864);苏州市科技发展计划(民生科技)资助项目(SS202024)。

Foundation item: Supported by the Excellent Youth Foundation of the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20211605); the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX23_1721, SJCX24_1864); the Suzhou Science and Technology Development Plan (People's Livelihood Science and Technology) Project (SS202024).

0 引言

在全球能源需求激增与环境污染加剧的背景下,构建清洁、高效的能源系统已成为全球共识。微电网作为分布式可再生能源集成与智能控制的核心载体,凭借其灵活并网与独立孤岛运行的双重能力为电力系统的稳定性和可持续性提供了创新性解决方案^[1-2]。相较于传统电网,微电网的独立架构和智能控制不仅能在并网模式下优化能源调度^[3-4],也可以通过本地化控制保障供电连续性,为用户用电提供坚实保障^[5-6]。

然而,孤岛模式下微电网脱离主电网支撑后的动态稳定性面临严峻挑战:负载波动功率与分布式能源出力不确定性的耦合作用,导致一次控制虽能快速调节有功/无功功率分配,却无法消除频率与电压的稳态偏差。

为了应对负载波动对系统动态稳定性的挑战,采用分层控制策略已成为微电网可靠运行的核心保障^[7-8]。典型的分层控制通常包括3层^[9],其中第一层为一次控制,主要通过调整发电单元的有功功率和无功功率输出实现对微电网中频率和电压的自动调节。然而,由于脱离电网支撑,电压和频率不可避免地会偏离参考值^[10]。二次控制作为分层控制的第二层,可以有效将电压和频率恢复到所需的额定值。位于顶部的三次控制主要用于对电力系统进行经济调度。本文主要探讨如何在二次控制设计相关策略来解决一次控制可能导致的电压和频率偏差问题^[11-12]。

目前,二次控制主要采用分布式控制策略,因为这种方法允许每个分布式发电(distributed generator, DG)单元通过通信网络交换相邻DG的状态信息调节电压和频率,提高系统的灵活性和可靠性^[13]。

该策略在实际工程应用中面临着复杂干扰源和通信时延问题的挑战。自然环境中的恶劣天气会威胁DG的稳定运行。大风致使风力发电机叶片受力不均,输出功率剧烈波动,严重破坏微电网的功率平衡。暴雨降低光伏板光透过率,影响发电效率。同时人为的大型设备启停产生的电磁脉冲也会干扰微电网的电压和频率稳定性。同时由于微电网通信距离远,光纤通信在长距离下也会导致时延累积,网络拥塞及通信设备性能限制也会造成时延增加。

针对这些问题,文献[14]提出了一种基于弹性分布 H_∞ 共识的控制方案,用于交流异构微电网分

层控制结构的第二层。 H_∞ 控制算法通过优化系统在不确定性和干扰下的最差性能确保控制系统的稳定性和抗干扰性。文献[15]针对含通信时延的混合微电网负载频率控制提出了一种改进的非线性自抗扰控制(improved nonlinear active disturbance rejection control, INLADRC)方法。INLADRC技术包括一个非线性扩展状态观测器用于估计系统状态,以及一个非线性控制器用于消除作用在系统上的广义干扰。文献[16]则提出了一种分布式二次鲁棒控制方法,该方法首先通过小信号模型对DG单元进行线性化处理,并推导出微电网系统的全局闭环状态空间形式,从而确定鲁棒控制器的参数,解决了随机时变延迟和外部干扰的问题。

上述方法在微电网应用中存在局限,由于微电网需要即插即用的特性,各DG在接入微电网时的初始状态可能存在差异,难以精确估计收敛时间。为了解决这一问题,文献[17]首次提出固定时间的概念。文献[18]研究了一种固定时间滑模干扰观测器来估计不确定时变运动下的瞬时电流。基于负载功率估计开发了快速固定时间反步法,控制升压变换器占空比,从而在固定时间内稳定电网并跟踪直流母线的期望电压。文献[19]利用Artstein变换将模型转换为没有任何延迟的形式,同时设计了一种基于并网逆变器的固定时间分布式控制器,能够有效解决通信链路干扰和信息延迟问题。但在通信过程中其具有较大的通信负担。

近年来,基于事件触发的固定时间一致性控制方案因其解决持续通信问题的优势受到了广泛关注^[20-22]。文献[23]提出了一种静态事件触发控制策略,通过仅在特定事件发生时让每个DG与相邻DG通信,减少了通信负担,但存在触发频率较高的问题。为此,文献[24]引入了动态事件触发机制,通过将事件触发间隔设定为严格正值的下界,进一步减轻了通信负担,但其触发阈值固定不变,无法根据干扰强度动态调整,因此在应对未知干扰时表现欠佳。文献[25]则提出了一种改进的动态事件触发方法,有效解决了DG间通信延迟不一致的问题,减少了数据传输次数,从而减轻了系统的通信负担,但其触发参数固定,会引发冗余通信,同时受限于线性控制设计,导致收敛速度较慢。

鉴于此,本文通过设计每个DG的触发函数以及内部动态变量提出了一种固定时间分布式二次控

制算法, 解决了对二次频率和电压的恢复问题。本文主要贡献如下。

1) 面对微电网的干扰以及通信时延带来的电压偏差以及频率失调问题, 本文提出了一种二次控制算法可以快速将电压和频率补偿到参考值, 提升了微电网在复杂情况下的调节能力与抗干扰性能, 避免了控制设备误动作风险。

2) 考虑到算法需要对大量的通信数据进行实时处理和计算来预测和补偿干扰和时延带来的影响, 本文引入动态事件触发机制, 通过设计触发函数和内部动态变量有效降低了 DG 的通信频率, 降低了通信负担。验证结果表明, 控制策略的最小事件间隔为正, 避免了 Zeno 行为。

3) 本文提出的控制策略可以在固定时间内将系统的电压和频率复原到额定值, 且独立于系统的初始状态。

1 孤岛微电网系统结构

本文研究的孤岛微电网系统架构如图 1 所示, 其核心由风力发电机、太阳能光伏、电池储能单元及柴油发电机组组成, 各组件通过交流总线实现能量交互。风力发电机和太阳能光伏作为主要可再生能源, 其输出功率受风速和光照强度波动影响显著, 导致微电网功率存在间歇性; 电池储能单元通过充放电调节实时平衡系统功率, 确保供需匹配; 柴油发电机作为备用电源, 仅在可再生能源供电不足或系统故障时启动, 保障供电连续性。

当与主电网断开连接时微电网会进入孤岛模式, 采用自主供电方式同时维持微电网的稳定运

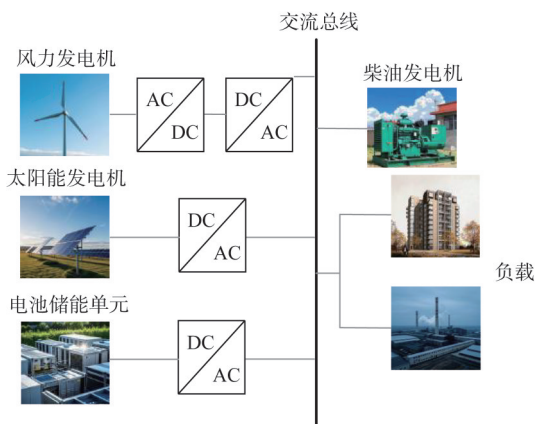


图 1 微电网配置

Fig. 1 Microgrid configurations

行, 如图 2 所示。

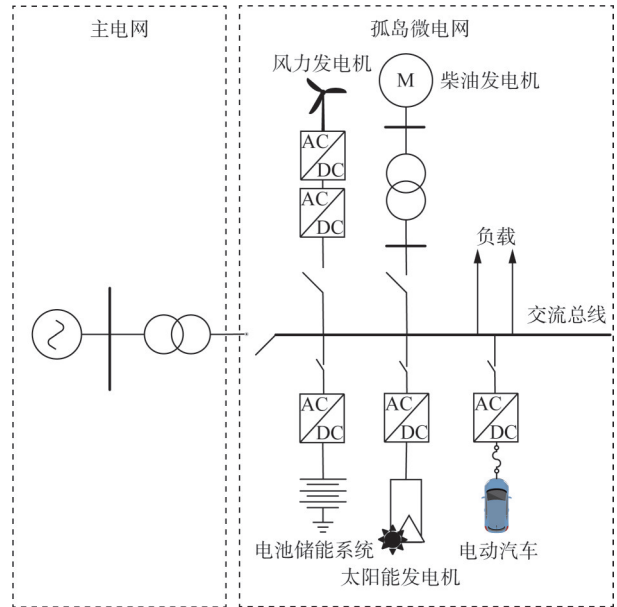


图 2 脱离主电网的孤岛微电网结构图

Fig. 2 Structure of the islanded microgrid disconnected from the main grid

在孤岛微电网系统中各个单元由多种关键组件组成, 包括逆变器、下垂控制器、电压控制器、电流控制器以及功率计算模块^[26], 如图 3 所示。这些组件共同作用从而确保微电网能够在孤岛模式下有效运行。电流控制器负责调节电流的幅值和相位, 而电压控制器则用于维持输出电压的稳定性和精度。下垂控制器通过调节每个 DG 输出的有功功率和无功功率来适应微电网中的功率供需变化, 并利用下垂系数来实现负载共享和系统稳定。

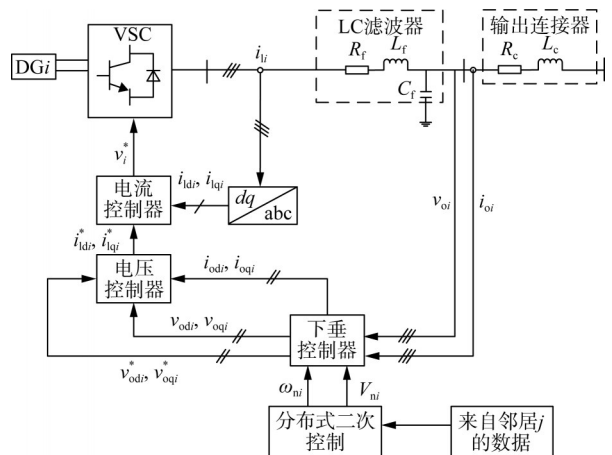


图 3 单个 DG 的控制结构图

Fig. 3 Control structure of a single DG

下垂控制是一种广泛应用于微电网的控制策略, 通过调节功率与频率之间的关系来控制各发电单元的输出, 从而保证系统的频率稳定性和电压稳定性。然而, 为了实现精确的调节, 下垂控制通常需要依赖二次控制和分布式控制器的参考值。二次控制通过协调各发电单元的运行从而确保微电网的电力供应与负载平衡, 因此提高了系统的可靠性与稳定性。下垂控制器的控制方程可以表示为:

$$\omega_i = \omega_i^* - K_{\omega i} P_i \quad (1)$$

$$v_i = v_i^* - K_{v i} Q_i \quad (2)$$

式中: i 为第 i 个分布式电源 (DG); ω_i 和 v_i 分别为 i 的频率和电压幅值; ω_i^* 和 v_i^* 分别为 i 的频率和电压幅值的参考值; P_i 和 Q_i 分别为 i 的逆变器末端实际测量的有功功率和无功功率; $K_{\omega i}$ 和 $K_{v i}$ 分别为 i 的频率和电压幅值的下垂系数。

$$K_{\omega i} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{P_i^{\max}}, K_{v i} = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{Q_i^{\max}} \quad (3)$$

式中: $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别为允许的最大频率和最小频率; $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 分别为允许的最大电压幅值和最小电压幅值; $P_i^{\max}$ 和 $Q_i^{\max}$ 分别为 i 的最大有功功率和最大无功功率。

二次控制层通过精确的电压调节和频率调节确保了电网在各种运行条件下保持稳定。尤其是在负载变化或出现异常情况时二次控制层能够以极快的响应速度调整系统参数, 避免因电压或频率波动而引发的不稳定状况。其高精度的控制能力不仅能够快速应对突发事件, 还能够在长期运行中保持电力系统的平衡和可靠性, 从而有效提升整个系统的稳定性和安全性。当存在输入干扰以及通信时延时第 i 个 DG 的频率和有功功率动态方程 $\dot{\omega}_i$ 和 $\dot{P}_i$ 分别为:

$$\dot{\omega}_i = u_{\omega i}(t-h) + d_i^{\omega} \quad (4)$$

$$\dot{P}_i = u_{p i}(t-h) + d_i^p \quad (5)$$

式中: $u_{\omega i}(t)$ 和 $u_{p i}(t)$ 分别为 i 的频率和有功功率的控制输入; h 为输入时延; d_i^{ω} 和 d_i^p 分别为 i 的频率和有功功率控制的干扰。

2 分布式二次控制算法的设计

考虑到微电网系统中存在的复杂干扰源以及通信时延, 本文提出一种基于动态事件触发机制的分布式控制算法, 用以消除干扰以及通信时延的影响, 实现对微电网中电压偏差和频率失调的补偿。

2.1 动态事件触发下的电压恢复控制

本文考虑由 N 个 DG 构成的微电网系统定义中间变量 $\vartheta_{vi}(t)$ 如式 (6) 所示。

$$\vartheta_{vi}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{v}_i(t) - \hat{v}_j(t) + b_i(\hat{v}_i(t) - v_{\text{ref}})) \quad (6)$$

式中: $v_i(t)$ 为 i 的电压值; v_{ref} 为电压参考值;

$$\hat{v}_i(t) = v_i(t) + \int_{t-h}^t u_{vi}(s) ds; u_{vi}(t) \text{ 为电压控制器; } b_i$$

为节点 i 和虚拟领导节点间的连接权重; a_{ij} 为通信权重。通过引入一个虚拟的参考节点作为系统电压的虚拟领导节点为整个系统提供全局目标, 其他 DG 通过控制策略跟踪该领导者的状态。若 i 能够收到虚拟领导者节点提供的参考值, 则 $b_i = 1$, 否则 $b_i = 0$ 。对于一个无向图, 若第 j 个分布式电源是 i 的邻居节点, 则 $a_{ij} = a_{ji} = 1$, 否则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。 $\hat{v}_i(t)$ 的设计依赖于模型降阶法。

利用相邻 DG 之间的局部信息交换, 为 i 设计分布式电压控制器 $u_{vi}(t)$ 如式 (7) 所示。

$$u_{vi}(t) = -\eta_1 \vartheta_{vi}(t_k^i)^{1+\frac{m}{n}} - \eta_2 \vartheta_{vi}(t_k^i) - \eta_3 \tanh(\beta(\vartheta_{vi}(t_k^i))) \quad (7)$$

式中: η_1 、 η_2 、 η_3 为控制增益, 均为正常数; n 、 m 、 β 为控制参数, $n > 0$, $m > 0$, $\beta \gg 1$; $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$; t_k^i 为 i 的第 k 次触发时刻, 即 i 的最新触发时刻。在 t_k^i 的下一个触发时刻 t_{k+1}^i 之前 i 的控制输入不变。

定义 i 的电压测量误差 $e_{vi}(t) = v_i(t_k^i) - v_i(t)$ 。

i 的事件触发函数为:

$$\Phi_{vi}(t) = \theta(|e_{vi}(t)| - \tau \eta_1 |\vartheta_{vi}(t)|^{1+\frac{m}{n}} - \tau \eta_2 |\vartheta_{vi}(t)| - \tau \eta_3 N) \quad (8)$$

式中: $\theta > 0$; τ 为控制增益且 $0 < \tau < 1$ 。

本文考虑动态事件触发机制, 设计 i 的内部动态变量 $\phi_{vi}(t)$ 为:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_{vi}(t) = & \chi |\vartheta_{vi}| (\tau \eta_1 |\vartheta_{vi}(t)|^{1+\frac{m}{n}} + \tau \eta_2 |\vartheta_{vi}(t)| + \tau \eta_3 N - \\ & |e_{vi}(t)|) - \eta_4 \phi_{vi}(t)^{\frac{2n+m}{2n}} - \eta_5 \phi_{vi}^{\frac{1}{2}}(t) - \\ & \eta_6 \phi_{vi}^2(t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\dot{\phi}_{vi}(t)$ 为内部动态变量 $\phi_{vi}(t)$ 的导数; $0 < \chi < 1$; η_4 、 η_5 、 η_6 为控制增益, 均为正常数。

基于内部动态变量 $\phi_{vi}(t)$ 构造的动态事件触发条件如式 (10) 所示。

$$t_{k+1}^i = \inf \{ t > t_k^i | \Phi_{vi}(t) \geq \phi_{vi}(t) \}, k = 0, 1, \dots \quad (10)$$

式中 $\inf \{ \cdot \}$ 表示集合的下确界。

当满足上述触发条件时信号 $v_i(t)$ 将被导入到控制器模块, 经过控制器运算生成的控制信号通过通信网络发送至执行器; 若条件未满足则控制信号不被传输, 其运行逻辑如图 4 所示。相较于采用固定零阈值的经典事件触发机制, 本文提出的动态事件触发控制机制在控制中作为通信网络的智能开关角色, 如图 5 所示。

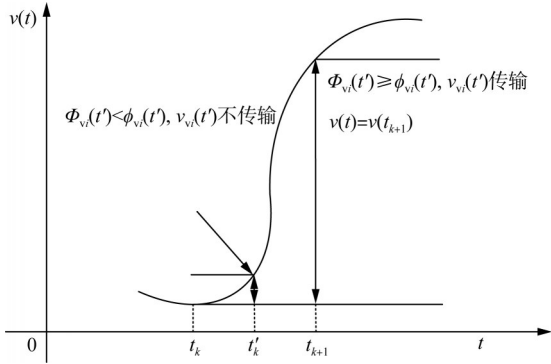


图 4 动态事件触发机制运行逻辑

Fig. 4 Operational logic of dynamic event-triggered mechanism

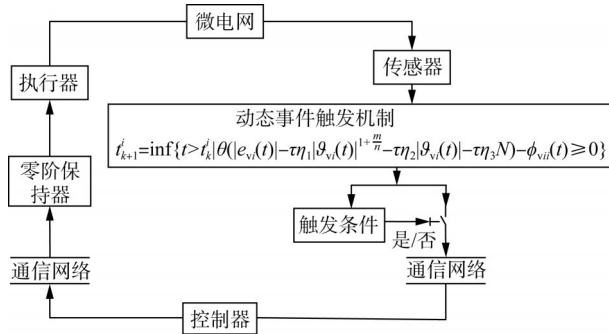


图 5 孤岛微电网动态事件触发二次控制系统图

Fig. 5 Dynamic event-triggered secondary control system diagram for islanded microgrids

控制器和执行器之间存在一个零阶保持器, 其作用为一直保持零阶时刻的采样信号直到零阶时刻的采样信号到达。

在非触发时刻由式(8)和(10)得:

$$|e_{vi}(t)| \leq \frac{\phi_{vi}(t)}{\theta} + \tau \eta_1 |\partial_{vi}(t)|^{1+\frac{m}{n}} + \tau \eta_2 |\partial_{vi}(t)| + \tau \eta_3 N \quad (11)$$

结合式(9)得:

$$\dot{\phi}_{vi}(t) \geq -\chi \frac{|\partial_{vi}(t)|}{\theta} \phi_{vi}(t) - \eta_4 \phi_{vi}(t)^{\frac{2n+m}{2n}} - \eta_5 \phi_{vi}^{\frac{1}{2}}(t) - \eta_6 \phi_{vi}^2(t) \quad (12)$$

即:

$$\phi_{vi}(t) \geq \phi_{vi}(0) e^{\int_0^t \rho(s) ds} > 0 \quad (13)$$

$$\rho(t) = -\chi \frac{|\partial_{vi}(t)|}{\theta} - \eta_4 \phi_{vi}(t)^{\frac{m}{2n}} - \eta_5 \phi_{vi}^{\frac{1}{2}}(t) - \eta_6 \phi_{vi}(t) \quad (14)$$

触发条件式(10)不仅取决于系统的状态, 还依赖于一个额外的内部动态变量 $\phi_{vi}(t)$ 。由于 $\phi_{vi}(t)$ 的非负性, 在相同参数的前提下式(10)将比对应静态事件触发条件更晚得到满足, 这意味着动态事件触发具有更大的触发间隔, 触发次数更少。

引理 1^[27]: 令非负实数 $x_i \geq 0$, 则:

$$\sum_{i=1}^N x_i^p \geq \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^p, \quad 0 < p \leq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i^p \geq N^{1-p} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^p, \quad p > 1 \quad (16)$$

引理 2^[28]: 对于任意实数 $y \in \mathbb{R}$, $\mathbb{R}$ 为实数集, 有:

$$0 \leq |y| - y \tanh(\beta y) \leq \frac{\gamma}{\beta} \quad (17)$$

式中: $\beta \gg 1$; $\gamma = 0.2785$ 。

引理 3^[29]: 考虑如下动态系统。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}(0)) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^N$ 为状态向量, $\mathbb{R}^N$ 为 N 维实数集。原点是该系统的平衡点。若存在一个 Lyapunov 函数 $V(\mathbf{x}(t)): \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^+$, $\mathbb{R}^+$ 为正实数集, 满足:

$$\dot{V}(\mathbf{x}(t)) \leq -aV^p(\mathbf{x}(t)) - bV^q(\mathbf{x}(t)) + \varphi \quad (19)$$

式中: $a, b, \varphi > 0$; $p \in (0, 1)$; $q \in (1, +\infty)$ 。则系统式(18)的原点是实际固定时间稳定的, 并且稳定时间 T 满足 $T \leq T_{\max} = \frac{1}{a\kappa(1-p)} + \frac{1}{b\kappa(1-q)}$, $T_{\max}$ 为最大稳定时间, κ 为标量且有 $0 < \kappa < 1$ 。

定理 1 对于所研究的微电网系统, 在满足至少存在一个 DG 单元能够接收到虚拟领导者节点提供的参考值且干扰信号有界的前提下, 若满足式(20)则所有 DG 可以在固定时间内实现电压恢复。

$$\sqrt{2\eta_2\eta_6(1-\tau)} \leq \frac{1-\chi}{\theta} \quad (20)$$

证明: 考虑以下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = V_1 + V_2 \quad (21)$$

式中: $V_1 = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{v}}^T(t)(\mathbf{L} + \mathbf{B})\hat{\mathbf{v}}(t)$, $V_2 = \sum_{i=1}^N \phi_{vi}(t)$,

$\hat{\mathbf{v}}(t) = [\hat{v}_1, \dots, \hat{v}_N]^T$. 对 $V(t)$ 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -\sum_{i=1}^N \vartheta_{vi}(e_{vi}(t) + \eta_1 \vartheta_{vi}(t)^{1+\frac{m}{n}} + \eta_2 \vartheta_{vi}(t) + \\ & \eta_3 \tanh(\beta(\vartheta_{vi}(t))) - d_i) + \\ & \sum_{i=1}^N \chi |\vartheta_{vi}|(\tau \eta_1 |\vartheta_{vi}(t)|^{1+\frac{m}{n}} + \tau \eta_2 |\vartheta_{vi}(t)| + \\ & \tau \eta_3 N - |e_{vi}(t)|) - \sum_{i=1}^N \eta_4 \phi_{vi}^{\frac{2n+m}{2n}}(t) - \\ & \sum_{i=1}^N \eta_5 \phi_{vi}^{\frac{1}{2}}(t) - \sum_{i=1}^N \eta_6 \phi_{vi}^2(t) \end{aligned} \quad (22)$$

运用 H_∞ 鲁棒控制策略, 假设 DG i 受到的干扰是有界的, 且以一个正常数 D 为界, 即 $d_i^\omega \leq D_\omega$ 和 $d_i^p \leq D_p$, D_ω 和 D_p 分别为频率和有功功率所受干扰的上界, 运用引理 2, 式(22)可化为:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & (1 - \chi) \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}| |e_{vi}(t)| - \eta_1 \sum_{i=1}^N \vartheta_{vi}^2(t)^{2+\frac{m}{n}} - \\ & \eta_2 \sum_{i=1}^N \vartheta_{vi}^2(t) - \eta_3 \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}(t)| + \eta_3 \frac{\gamma N}{\beta} + \\ & D \sum_{i=1}^N \vartheta_{vi}(t) + \lambda \tau \eta_1 \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}(t)|^{2+\frac{m}{n}} + \\ & \lambda \tau \eta_2 \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}(t)|^2 + \lambda \tau \eta_3 N \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}(t)| - \\ & \sum_{i=1}^N \eta_4 \phi_{vi}^{\frac{2n+m}{2n}}(t) - \sum_{i=1}^N \eta_5 \phi_{vi}^{\frac{1}{2}}(t) - \sum_{i=1}^N \eta_6 \phi_{vi}^2(t) \end{aligned} \quad (23)$$

根据引理 1, 当式(20)成立时式(23)可化为:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -\eta_1(1 - \tau) \sum_{i=1}^N [\vartheta_{vi}^2(t)]^{\frac{2n+m}{2n}} - \\ & (\eta_3 - \eta_3 \tau - D) \times \sum_{i=1}^N [\vartheta_{vi}^2(t)]^{\frac{1}{2}} + \eta_3 \frac{\gamma N}{\beta} - \\ & \frac{1}{2} \eta_2(1 - \tau) \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}^2(t)| - \sum_{i=1}^N \eta_6 \phi_{vi}^2(t) + \\ & \frac{1 - \chi}{\theta} \sum_{i=1}^N \phi_{vi}(t) |\vartheta_{vi}(t)| - \\ & \frac{1}{2} \eta_2(1 - \tau) \sum_{i=1}^N |\vartheta_{vi}^2(t)| - \eta_4 N^{-\frac{m}{2n}} V_2^{\frac{2n+m}{2n}} - \\ & \eta_5 V_2^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (24)$$

定义度矩阵 $\mathbf{D} = \text{diag}\{d_i\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 其中, d_i 为对角元素, 定义 $d_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}$. 定义拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_{ij}]_{N \times N}$, 满足 $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$, 其中, 当 $i = j$ 时 $\mathbf{L}_{ij} =$

$\sum_{j=1}^N a_{ij}$, 否则 $\mathbf{L}_{ij} = -a_{ij}$. 若 $\mathbf{1}_N^T \mathbf{x} = 0$, 则 $\mathbf{x}^T \mathbf{L} \mathbf{x} \geq \lambda_1(\mathbf{L}) \mathbf{x}^T \mathbf{x}$. 若牵制矩阵 $\mathbf{B}$ 中的元素 $b_i > 0$, 则 $\mathbf{L} + \mathbf{B}$ 为正定矩阵, 其最小特征值 $\lambda_1(\mathbf{L} + \mathbf{B}) > 0$, 满足 $\mathbf{x}^T (\mathbf{L} + \mathbf{B}) \mathbf{x} \geq \lambda_1(\mathbf{L} + \mathbf{B}) \mathbf{x}^T \mathbf{x}$. 由式(24)可化为:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\eta_1(1 - \tau) N^{-\frac{m}{2n}} (2\lambda(\mathbf{L} + \mathbf{B}))^{\frac{2n+m}{2n}} - \\ & \eta_4 N^{-\frac{m}{2n}} V_2^{\frac{2n+m}{2n}} - (\eta_3 - \eta_3 \tau - D) (2\lambda(\mathbf{L} + \mathbf{B}))^{\frac{1}{2}} - \\ & \eta_5 V_2^{\frac{1}{2}} + \eta_3 \frac{\gamma N}{\beta} \end{aligned} \quad (25)$$

式中:

$$\begin{cases} \rho_1 = \min \{ \eta_1(1 - \tau) N^{-\frac{m}{2n}} (2\lambda(\mathbf{L} + \mathbf{B}))^{\frac{2n+m}{2n}}, \eta_4 N^{-\frac{m}{2n}} \} \\ \rho_2 = \min \{ (\eta_3 - \eta_3 \tau - D) (2\lambda(\mathbf{L} + \mathbf{B}))^{\frac{1}{2}}, \eta_5 \} \end{cases}$$

则式(25)可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\rho_1 (V_1^{\frac{2n+m}{2n}} + V_2^{\frac{2n+m}{2n}}) - \rho_2 (V_1^{\frac{1}{2}} + V_2^{\frac{1}{2}}) + \eta_3 \frac{\gamma N}{\beta} \\ \leq & -\rho_1 2^{-\frac{m}{2n}} (V_1 + V_2)^{\frac{2n+m}{2n}} - \rho_2 (V_1 + V_2)^{\frac{1}{2}} + \eta_3 \frac{\gamma N}{\beta} \\ = & -\rho_1 2^{-\frac{m}{2n}} V^{\frac{2n+m}{2n}} - \rho_2 V^{\frac{1}{2}} + \eta_3 \frac{\gamma N}{\beta} \end{aligned} \quad (26)$$

由引理 3 可得微电网二次电压控制的稳定时间如式(27)所示。

$$T_1 \leq T_1^{\max} = \frac{2}{\rho_2 \kappa} + \frac{2n}{2^{-\frac{m}{2n}} \rho_1 \kappa m} \quad (27)$$

定理 2: 在分布式电压控制器式(7)作用下对应的动态事件触发条件式(10)可以避免电压控制系统的芝诺行为。

定理 3: 对于所研究的微电网系统, 若满足最小事件间隔 $t_{k+1}^i - t_k^i$ 严格为正, 所提出的动态事件触发控制协议下系统将不存在 Zeno 行为。

证明: 对于 $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$, 根据式(15)可得

$$\begin{aligned} \frac{d|e_{vi}(t)|}{dt} \leq & |\dot{e}_{vi}(t)| = \\ & (\eta_1 \mu (\vartheta_{vi})^{\mu-1} + \eta_2 + \eta_3 \beta (1 - \tanh^2(\beta \vartheta_{vi}))) \times \\ & (|u_i(t) - u_j(t)| + 2D) \leq \\ & (\eta_1 \mu |\vartheta_{vi}|^{\mu-1} + \eta_2 + \eta_3 \beta) \times \\ & (|u_i(t)| + |u_j(t)| + 2D) \leq \\ & (|u_i(t_k^i)| + \max_{1 \leq j \leq N} |u_j(t_k^i)| + 2D) \times \\ & (\eta_1 \mu N^{\frac{1-\mu}{2}} (2\lambda(\mathbf{L} + \mathbf{B}) V_1)^{\frac{\mu-1}{2}} + l_{ii} \eta_2 + l_{ii} \eta_3 \beta) \\ & = \varpi_0 + \varpi_1(t_k^i) + \varpi_2(t_k^i) \end{aligned} \quad (28)$$

式中 t_k^i 为第 j 个分布式电源的最近一次触发时刻。

$$\begin{aligned}\varpi_0 &= 2D(\eta_1 \mu N^{\frac{1-\mu}{2}} (2\lambda(L+B)V_1)^{\frac{\mu-1}{2}} + \\ &\quad l_{ii}\eta_2 + l_{ii}\eta_3\beta); \\ \varpi_1 &= |u_i(t_k^i)|(\eta_1 \mu N^{\frac{1-\mu}{2}} (2\lambda(L+B)V_1)^{\frac{\mu-1}{2}} + \\ &\quad l_{ii}\eta_2 + l_{ii}\eta_3\beta); \\ \varpi_2 &= \max_{1 \leq j \leq N} |u_j(t_{k'}^j)|(\eta_1 \mu N^{\frac{1-\mu}{2}} (2\lambda(L+B)V_1)^{\frac{\mu-1}{2}} + \\ &\quad l_{ii}\eta_2 + l_{ii}\eta_3\beta).\end{aligned}$$

由于 $e_i(t_k^i) = 0$, 得:

$$|e_{vi}(t)| \leq \int_{t_k^i}^t |\dot{e}_{vi}(s)| ds \leq \int_{t_k^i}^t (\varpi_0 + \varpi_1(t_k^i) + \varpi_2(t_{k'}^j)) ds \quad (29)$$

式中 s 为中间变量, 范围为 $[t_k^i, t]$ 。

又由触发条件式(10)可知, 当 $t = t_{k+1}^i$ 时, i 的下一个事件触发, 即 $\Phi_i(t_{k+1}^i) \geq \phi_i(t_{k+1}^i)$, 从而可得:

$$|e_{vi}(t_{k+1}^i)| \geq \tau\eta_1 |\vartheta_{vi}(t_{k+1}^i)|^m + \tau\eta_2 |\vartheta_{vi}(t_{k+1}^i)| + \tau\eta_3 N + \frac{\phi_i(t_{k+1}^i)}{\theta} \quad (30)$$

根据上述两式可得:

$$\begin{aligned}\tau\eta_3 N &< |e_{vi}(t_{k+1}^i)| \leq \int_{t_k^i}^{t_{k+1}^i} (\varpi_0 + \varpi_1(t_k^i) + \varpi_2(t_{k'}^j)) ds \\ &\leq (\varpi_0 + \varpi_1^{\max} + \varpi_2^{\max})(t_{k+1}^i - t_k^i)\end{aligned} \quad (31)$$

式中:

$$\begin{cases} \varpi_1^{\max} = \max \{ \varpi_1(t_0^i), \varpi_1(t_1^i), \varpi_1(t_2^i), \dots \} \\ \varpi_2^{\max} = \max \{ \varpi_2(t_0^i), \varpi_2(t_1^i), \varpi_2(t_2^i), \dots \} \end{cases}$$

从而有:

$$t_{k+1}^i - t_k^i > \frac{\tau\eta_3 N}{\varpi_0 + \varpi_1 + \varpi_2} \quad (32)$$

因此, 微电网系统不会发生 Zeno 行为。

2.2 动态事件触发下的频率和有功功率恢复控制

定义中间变量如式(33)~(34)所示。

$$\vartheta_{wi}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{\omega}_i(t) - \hat{\omega}_j(t) + b_i(\hat{\omega}_i(t) - \omega_{\text{ref}})) \quad (33)$$

$$\vartheta_{pi}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(K_{pj}\hat{P}_j(t) - K_{pi}\hat{P}_i(t)) \quad (34)$$

式中: $\hat{\omega}_i(t) = \omega_i(t) + \int_{t-h}^t u_{wi}(s) ds$; ω_{ref} 为频率参考

值; $\hat{P}_i(t) = P_i(t) + \int_{t-h}^t u_{pi}(s) ds$; u_{wi} 和 u_{pi} 分别为频率和有功功率控制器。 $\hat{\omega}_i(t)$ 和 $\hat{P}_i(t)$ 的设计依赖于

模型降阶法。

利用相邻 DG 之间的局部信息交换, 为 i 设计的分布式频率以及有功功率控制器 $u_{wi}(t)$ 和 $u_{pi}(t)$ 如下。

$$u_{wi}(t) = -\sigma_1 \vartheta_{wi}(t_k^i)^{1+\frac{m}{n}} - \sigma_2 \vartheta_{wi}(t_k^i) - \sigma_3 \tanh(\beta \vartheta_{wi}(t_k^i)) \quad (35)$$

$$u_{pi}(t) = -\sigma_1 \vartheta_{pi}(t_k^i)^{1+\frac{m}{n}} - \sigma_2 \vartheta_{pi}(t_k^i) - \sigma_3 \tanh(\beta \vartheta_{pi}(t_k^i)) \quad (36)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为控制增益, 均为正常数。

定义 i 的频率测量误差为 $e_{wi}(t) = \omega_i(t_k^i) - \omega(t)$ 。

i 的事件触发函数为:

$$\begin{aligned}\Phi_{wi}(t) &= \theta(|e_{wi}(t)| - \tau\sigma_1 |\vartheta_{wi}(t)|^{1+\frac{m}{n}} - \\ &\quad \tau\sigma_2 |\vartheta_{wi}(t)| - \tau\sigma_3 N)\end{aligned} \quad (37)$$

本文考虑动态事件触发机制, 设计 i 的内部动态变量 $\phi_{wi}(t)$ 如式(38)所示。

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_{wi}(t) &= \chi |\vartheta_{wi}|(\tau\sigma_1 |\vartheta_{wi}(t)|^{1+\frac{m}{n}} + \tau\sigma_2 |\vartheta_{wi}(t)| + \\ &\quad \tau\sigma_3 N - |e_{wi}(t)|) - \sigma_4 \phi_{wi}(t)^{\frac{2n+m}{2n}} - \\ &\quad \sigma_5 \phi_{wi}^{\frac{1}{2}}(t) - \sigma_6 \phi_{wi}^2(t)\end{aligned} \quad (38)$$

式中 σ_4 、 σ_5 、 σ_6 为控制增益, 均为正常数。

基于内部动态变量 $\phi_i(t)$ 构造 i 的动态事件触发条件为:

$$t_{k+1}^i = \inf \{ t > t_k^i | \Phi_{wi}(t) \geq \phi_{wi}(t) \}, k = 0, 1, \dots \quad (39)$$

定理 3: 对于所研究的微电网系统, 在满足至少存在一个 DG 单元能够接收到虚拟领导者节点提供的参考值且干扰信号有界的前提下, 所有 DG 可以在固定时间内实现频率和有功功率恢复。

$$\sqrt{2\sigma_2\sigma_6(1-\tau)} \leq \frac{1-\chi}{\theta} \quad (40)$$

证明: 考虑以下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = V_3 + V_4 \quad (41)$$

式中: $V_3 = \frac{1}{2} \hat{\omega}^T(t)(L+B)\hat{\omega}(t)$, $V_4 = \sum_{i=1}^N \phi_{wi}(t)$,

$\hat{\omega}(t) = [\hat{\omega}_1, \dots, \hat{\omega}_N]^T$ 。对 $V(t)$ 求导可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &\leq -\sigma_1(1-\tau)N^{-\frac{m}{2n}} \left(\sum_{i=1}^N |\vartheta_{wi}^2(t)| \right)^{\frac{2n+m}{2n}} - \\ &\quad (\sigma_3 - \sigma_3\tau - D) \left(\sum_{i=1}^N |\vartheta_{wi}^2(t)| \right)^{\frac{1}{2}} - \\ &\quad \frac{1}{2} \sigma_2(1-\tau) \times \sum_{i=1}^N |\vartheta_{wi}^2(t)| + \sigma_3 \frac{\gamma N}{\beta} - \\ &\quad \sigma_4 N^{-\frac{m}{2n}} V_4^{\frac{2n+m}{2n}} - \sigma_5 V_4^{\frac{1}{2}}\end{aligned} \quad (42)$$

式中:

$$\begin{cases} v_1 = \min \{ \sigma_1 (1 - \tau) N^{-\frac{m}{2n}} (2\lambda(L+B))^{\frac{2n+m}{2n}}, \sigma_4 N^{-\frac{m}{2n}} \} \\ v_2 = \min \{ (\sigma_3 - \sigma_3 \tau - D) (2\lambda(L+B))^{\frac{1}{2}}, \sigma_5 \} \end{cases}$$

则式(42)可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -v_1 (V_3^{\frac{2n+m}{2n}} + V_4^{\frac{2n+m}{2n}}) - v_2 (V_3^{\frac{1}{2}} + V_4^{\frac{1}{2}}) + \sigma_3 \frac{\gamma N}{\beta} \\ &\leq -v_1 2^{-\frac{m}{2n}} (V_3 + V_4)^{\frac{2n+m}{2n}} - v_2 (V_3 + V_4)^{\frac{1}{2}} + \sigma_3 \frac{\gamma N}{\beta} \\ &= -v_1 2^{-\frac{m}{2n}} V^{\frac{2n+m}{2n}} - v_2 V^{\frac{1}{2}} + \sigma_3 \frac{\gamma N}{\beta} \end{aligned} \quad (43)$$

由引理3可得微电网二次电压控制的稳定时间 T_2 如式(44)所示。

$$T_2 \leq T_2^{\max} = \frac{2}{\eta_2 \kappa} + \frac{2n}{\eta_1 \kappa m 2^{\frac{m}{2n}}} \quad (44)$$

式中 $T_2^{\max}$ 为最大稳定时间。

在孤岛微电网中当系统面临可再生能源出力突变、负荷干扰或通信时延累积等工况时, 快速变化的系统状态可能导致触发条件频繁满足, 进而引发事件间隔趋近于0的Zeno行为。本文提出的证明方法有效验证了触发机制的可靠性, 并确保在不同条件下不会发生Zeno行为, 从而保障了微电网系统的稳定运行。

3 仿真研究

为验证本文提出的二次控制算法在孤岛微电网中的控制效果, 本研究构建了一个包含5个DG及其对应负载的孤岛微电网系统, 其拓扑结构图如图6所示, 系统采用无向连通拓扑结构设计, 在通信方面设置典型的通信拓扑架构: 其中DG1作为唯一能够获得参考值的DG, DG1与DG5不互相通信, 以此来模拟实际工程中可能存在的通信约束场景。

该系统采用MATLAB/Simulink中的Specialized Power Systems等搭建系统仿真模型, 并针对实际运行场景设置了线路阻抗 R_l 、电感 L_l 、负载有功功率 P_{Load} 和负载无功功率 Q_{Load} 等关键参数, 详细的仿真参数^[26]如表1所示。

孤岛微电网的频率参考值设定为50 Hz, 电压幅值参考值为311 V。设置控制增益 $\eta_1 = 13$, $\eta_2 = 10$, $\eta_3 = 20$, $\eta_4 = 25$, $\eta_5 = 0.01$, $\eta_6 = 20$; 参数 $m/n = 2/3$, $\beta = 10$, 内部动态变量参数 $\tau = 0.008$,

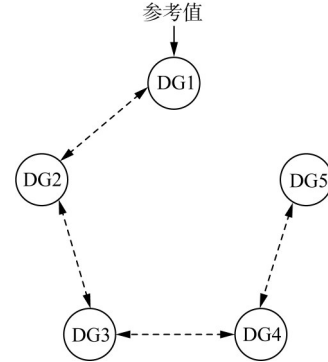


图6 微电通信拓扑图

Fig. 6 Topology diagram of microgrid communication

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
$K_{\omega i} / (\times 10^{-5})$	7.95	6.41	7.37	6.92	8.65
$K_{v i} / (\times 10^{-4})$	9.45	7.23	9.16	7.92	9.70
$P_i^{\max} / \text{kW}$	79.004	97.649	84.369	90.548	92.472
参数	Line1	Line2	Line3	Line4	Line4
R_l / Ω	0.77	0.49	0.28	0.75	0.41
L_l / mH	0.96	1.5	0.36	0.74	0.56
参数	Load1	Load2	Load3	Load4	Load4
$P_{\text{Load}} / \text{kW}$	32.73	40.45	37.5	43.18	35.58
$Q_{\text{Load}} / \text{kvar}$	12.47	16.19	12.63	29.72	15.37

$\chi = 0.6$, $\theta = 0.15$; 为进一步验证控制策略的鲁棒性与适应性, 本文引入了周期性干扰信号来模拟实际运行中的干扰。频率和电压干扰信号分别设定为:

$$d_i^{\omega} = 0.1 \cos(5\pi t) \quad (45)$$

$$d_i^v = 2 \cos(5\pi t) \quad (46)$$

通信时延为 $h = 0.01$ 。

为了评估所提出控制策略在负荷干扰情境下的表现, 本次仿真实验在DG3总线的一侧接入了一个额外的负荷, 进行了连接和断开的模拟测试。具体的仿真步骤如下所述。

- 1) $t = 0-2 \text{ s}$, 仅采用下垂控制;
- 2) $t = 2-6 \text{ s}$, 应用本文提出的二次控制算法;
- 3) $t = 6-10 \text{ s}$, 将负荷 $L_{\text{Load}} = 14 + \text{j}10$ 接入DG3总线一侧;
- 4) $t = 10-14 \text{ s}$, 负荷 L_{Load} 断开。

图7呈现了基于动态事件触发机制下的分布式控制器对频率和电压的恢复过程。在第一阶段, 仅采用下垂控制时微电网系统频率和电压能够保持稳

定状态，然而却无法有效收敛到预设的参考值。

在应用本文提出二次控制算法后系统频率和电压幅值迅速恢复至预设参考值。同时，无论负载处于断开状态还是连接状态，电压和频率都能够快速恢复到参考值，具有良好的自适应能力。依据引理 3 可计算得出电压恢复和电压调节的稳定时间上界为 7.88 s 和 6.58 s。而仿真结果表明，在 2 s 时应用本文提出的算法，频率恢复和电压调节分别在 0.72 s 和 0.65 s 后实现，由此可以证明控制器具有较好的收敛速度和抗干扰能力，验证了其在复杂干扰源和通信延时下的微电网系统中的有效性。

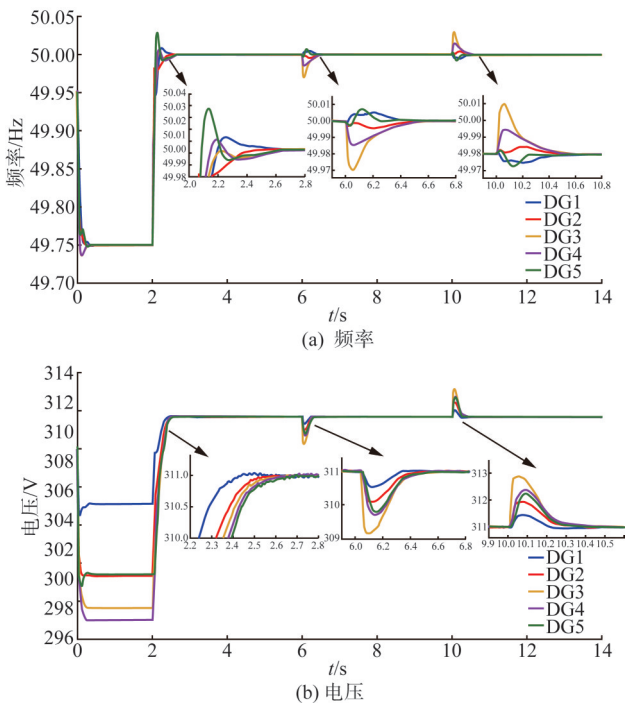


图7 动态事件触发机制下的分布式控制器对频率和电压的恢复过程

Fig. 7 Recovery process of frequencies and voltages by distributed controllers with dynamic event triggering mechanism

3.1 不同事件触发机制下的通信效率对比实验

图 8 展示了在本文动态事件触发控制下各 DG 在 $t = 2 - 2.1$ s 的触发情况，其中 1 代表有通信，0 代表无通信。传统静态事件触发机制或文献[23]的分布式策略可能因频繁触发通信导致时延累积，加剧系统控制性能的恶化。为验证所提算法在微电网复杂工况下的通信效率优势，本文提出一种二次控制算法，用 DETC-P (dynamic event-triggered control-proactive adaptation) 来表示，

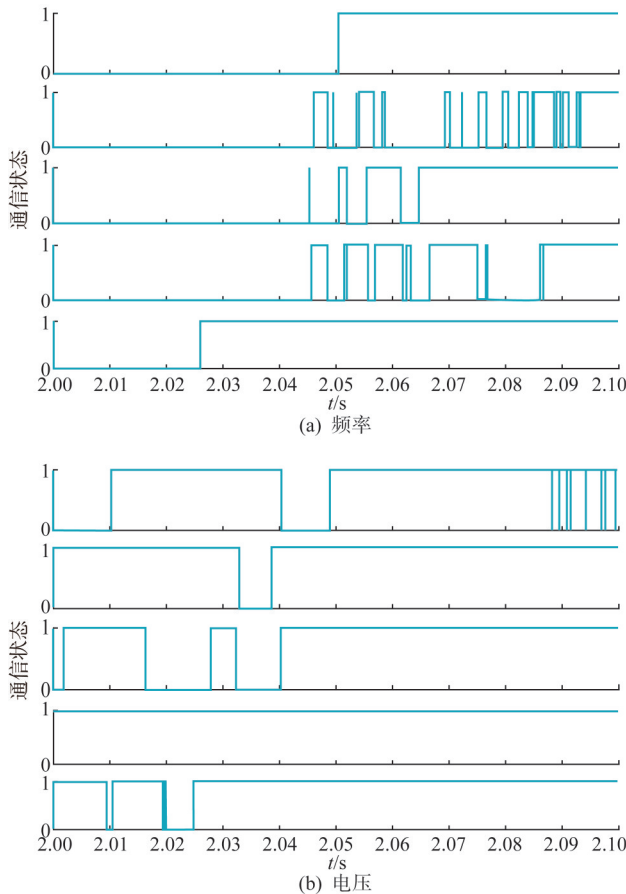
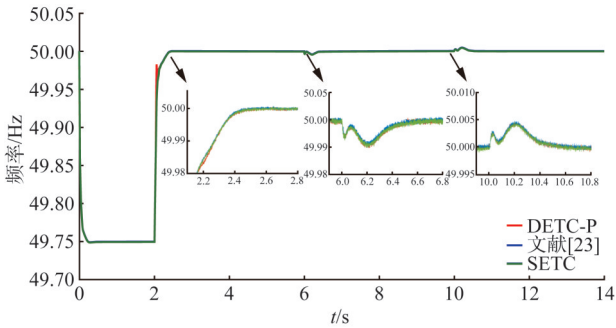


图8 各控制器的事件触发次数
Fig. 8 Event-triggered times of each controller

SETC 代表静态事件触发机制，对比结果见表 2 和图 9。显而易见，在三者控制策略的收敛速度、抗干扰等性能相差甚微的情况下，本文采用的动态事件触发机制的通信次数远小于文献[23]以及静态事件触发机制的通信次数，降低了系统的通信负担。

表2 3种不同事件触发机制下控制器响应次数的对比
Tab 2 Comparison of controller response times under three different event-triggered mechanisms

对象	方法	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
频率	文献[23]	239 983	239 999	240 102	240 001	241 023
	SETC	194 289	199 163	200 679	205 984	148 593
	DETC-P	136 177	158 435	161 456	166 317	108 152
有功功率	文献[23]	239 878	231 029	239 878	240 247	240 314
	SETC	199 681	193 735	198 002	203 164	145 884
	DETC-P	136 177	158 435	161 456	166 317	108 152
电压	文献[23]	240 217	248 426	247 545	242 474	240 219
	SETC	243 187	243 519	244 462	244 769	240 669
	DETC-P	192 659	193 358	194 208	195 051	190 512



(a) 频率

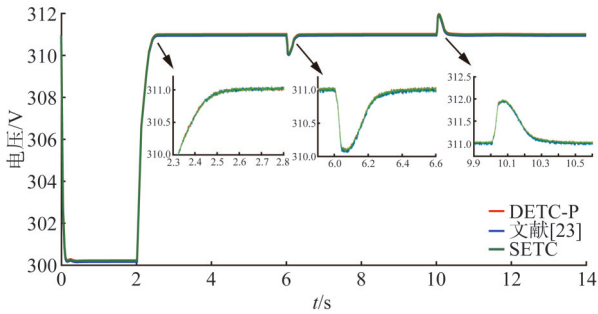


图 9 不同事件触发机制下频率和电压的恢复过程

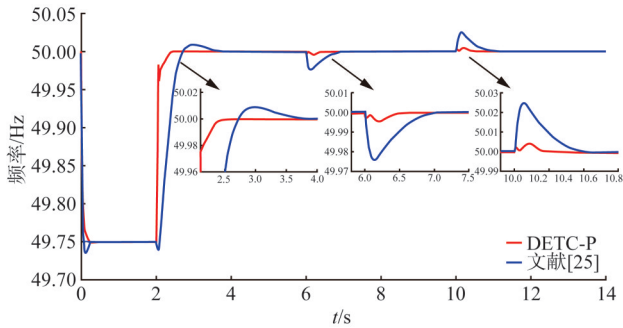
Fig. 9 Recovery process of frequencies and voltages under different event-triggered mechanisms

3.2 不同控制策略下的控制效率对比试验

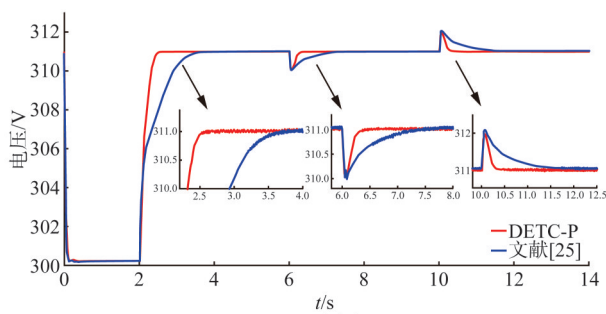
传统控制策略可能因抗干扰能力不足或通信时延累积导致调节滞后甚至失稳, 未验证所提算法在微电网动态运行环境中的优越性, 在面对复杂干扰源和通信时延的影响下将本文算法与文献[25]的控制算法进行了比较。实验采用 DG2 为对象, 在只改变控制算法的情况下开展仿真实验, 仿真实验结果如图 10 所示, 表 3—4 分别为各 DG 响应次数和恢复到参考值所需时间。本文提出的控制策略在处理复杂干扰源和通信时延时展现出显著优势: 它减少了通信次数, 提高了系统的收敛速度, 并在面对不确定因素时具有更强的鲁棒性。

3.3 不同干扰与时延下的抗干扰能力对比试验

在孤岛微电网中复杂干扰源与通信时延的耦合作用会严重制约二次控制性能, 干扰和时延可能呈现不同形式, 微电网系统需要频繁应对功率失衡引发的电压与频率偏移。为验证本文控制算法的有效性, 设计两组对比实验: 首先将系统所受外部干扰幅值扩大一倍进行测试, 用 DETC-D 表示, 其次在系统模型中引入 0.04 s 的时延参数开展仿真研究, 用 DETC-T 表示。仿真实验结果如图 11 所示, 本文提出的控制策略在处理不同的干扰和时延都能在固



(a) 频率



(b) 电压

图 10 DG1 的控制方法比较分析

Fig. 10 Comparative analysis of control methods for DG1

表 3 不同控制算法下的控制器响应次数的对比

Tab 3 Comparison of controller response times with different control algorithms

对象	方法	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
频率	文献[25]	255 035	195 888	241 855	239 537	252 957
	DETC-P	136 177	158 435	161 456	166 317	108 152
有功功率	文献[25]	255 618	235 089	191 205	197 597	157 417
	DETC-P	136 177	158 435	161 456	166 317	108 152
电压	文献[25]	248 577	253 521	254 501	254 240	250 762
	DETC-P	192 659	193 358	194 208	195 051	190 512

表 4 不同控制算法下的控制器收敛速度的对比

Tab 4 Comparison of controller convergence rates with different control algorithms

对象	方法	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
频率	文献[25]	1.90	1.91	1.95	1.95	1.89
	DETC-P	0.62	0.65	0.72	0.73	0.68
电压	文献[25]	1.86	1.86	1.90	1.91	1.87
	DETC-P	0.62	0.61	0.62	0.65	0.65

定时间内收敛到参考值, 具有较强的鲁棒性。

4 结论与展望

针对孤岛微电网在面临复杂干扰源以及通信时延耦合作用难题, 本文提出了一种基于动态事件触

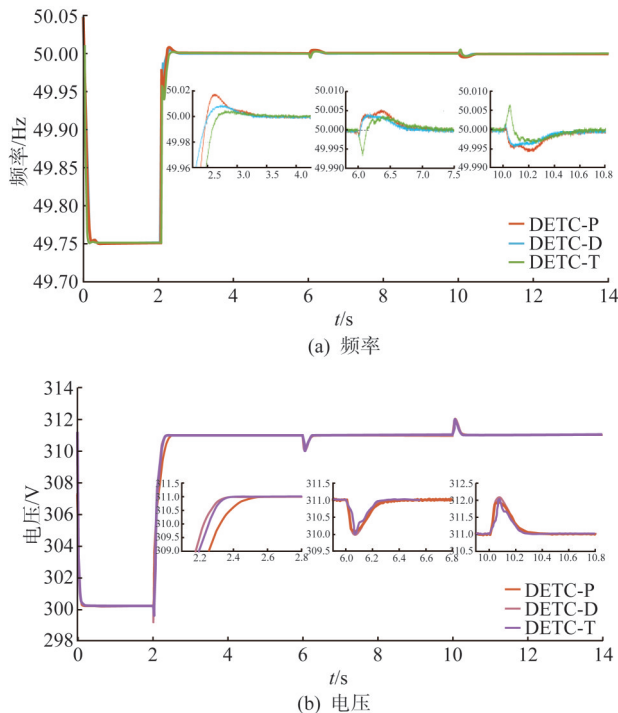


图 11 不同干扰和时延的对比试验

Fig. 11 Comparative tests with different time-delay and disturbance

发的固定时间分布式二次算法。通过分析验证得到以下结论。

1) 相较于传统的静态事件触发, 引入内部动态变量实时调整触发阈值, 触发次数更少, 减少了微电网系统的通信负担, 降低了通信成本, 确保了微电网在复杂工况下的高效运行。

2) 在面对可再生能源波动和负载波动所带来的功率不平衡问题时, 通过模型降阶技术和 H_∞ 鲁棒控制策略增强了系统的抗干扰能力, 确保了电压和频率的稳定恢复, 避免了因电压和频率波动引起的设备损坏风险, 进一步确保了微电网系统的长期稳定运行。

3) 微电网的电压和频率可以在固定时间内恢复到参考值, 不依赖系统的初始状态。

未来研究将关注预定义时间控制算法来解决固定时间控制算法高度依赖控制器参数设计这一局限性, 同时在硬件开发平台验证了控制算法的有效性。

参考文献

[1] HALEV A, LIU Y, LIU X. Microgrid control under uncertainty [J]. Engineering Applications of Artificial Intel-

ligence, 2024(138): 109360. 1 – 109360. 10.

[2] 方响, 俞登科, 王亿, 等. 基于模糊解耦线性自抗扰控制的混合微电网直流母线电压波动抑制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 116 – 129.

FANG Xiang, YU Dengke, WANG Yi, et al. Suppression strategy of dc bus voltage fluctuation in hybrid microgrid based on fuzzy decoupling linear auto disturbance rejection control [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 116 – 129.

[3] 曹晓, 李泽, 崔国增. 孤岛微电网固定时间分布式鲁棒二次控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 143 – 153.

CAO Xiao, LI Ze, CUI Guozeng. Fixed-time distributed robust secondary control for islanded microgrids [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 143 – 153.

[4] JAIN D, SAXENA D. Comprehensive review on control schemes and stability investigation of hybrid AC-DC microgrid [J]. Electric Power Systems Research, 2023(218): 109182. 1 – 109182. 13.

[5] MAGED N A, HASANIEN H M, EBRAHIM E A, et al. Optimal super twisting sliding mode control strategy for performance improvement of islanded microgrids: Validation and real-time study [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024(157): 109849. 1 – 109849. 8.

[6] TARIQ A H, KAZMI S A A, HASSAN M, et al. Analysis of fuel cell integration with hybrid microgrid systems for clean energy: a comparative review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024(52): 1005 – 1034.

[7] 董德智, 周松林, 朱云国, 等. 适用于非线性负载的逆变器多电压谐波控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 152 – 166.

DONG Dezhi, ZHOU Songlin, ZHU Yunguo, et al. A multi-voltage harmonic control strategy for inverters applicable to nonlinear loads [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 152 – 166.

[8] SHEYKHI N, SALAMI A, GUERRERO J M, et al. A comprehensive review on telecommunication challenges of microgrids secondary control [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(140): 108081. 1 – 108081. 10.

[9] YAMASHITA D Y, VECHIU I, GAUBERT J P. A review of hierarchical control for building microgrids [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020 (118): 109523. 1 – 109523. 8.

[10] 翁亮涛, 杨菱, 魏茂华, 等. 含自适应虚拟电容控制的直流母线电压综合控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 1 – 10.

WENG Liangtao, YANG Ling, WEI Maohua, et al. Integrated control strategy of DC bus voltage with adaptive virtual capacitor control [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 1 – 10.

[11] BABAEI M R, GHASEMI-MARZBALI A, ABBASALI -ZADEH S. Control of a combined battery/supercapacitor storage system for DC microgrid application [J]. Journal of Energy Storage, 2024(96): 112675. 1 – 112675. 12.

[12] LU X, LAI J. Communication constraints for distributed secondary control of heterogeneous microgrids: a survey [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 5636 – 5648.

[13] MOHIUDDIN S M, QI J. Optimal distributed control of AC

- microgrids with coordinated voltage regulation and reactive power sharing[J]. IEEE transactions on smart grid, 2022, 13(3): 1789 – 1800.
- [14] RAEISPOUR M, ATRIANFAR H, BAGHAEI H R, et al. Resilient H_∞ consensus-based control of autonomous AC microgrids with uncertain time-delayed communications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3871 – 3884.
- [15] JAIN S, HOTE Y V. Design of improved nonlinear active disturbance rejection controller for hybrid microgrid with communication delay [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1101 – 1111.
- [16] SUN W, FANG Z, HUANG L, et al. Distributed robust secondary control of islanded microgrid with stochastic time-varying delays and external disturbances [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(143): 108448. 1 – 108448. 9.
- [17] POLYAKOV A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 57(8): 2106 – 2110.
- [18] WANG Z, WANG J, MA M, et al. Distributed event-triggered fixed-time fault-tolerant secondary control of islanded AC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4078 – 4093.
- [19] WANG L, HUANG S, WANG Q, et al. Distributed fixed-time control for islanded AC microgrids based on grid-forming converters with time delay[C]//2023 IEEE PELS Students and Young Professionals Symposium (SYPS), August 27 – 29, 2023, Shanghai, China. New York:IEEE, 2023: 1 – 6.
- [20] CHEN G, XIANG H. Distributed fixed-time nonlinear control of microgrids based on event-triggered strategy [J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(21): 19931 – 19946.
- [21] XU D, LI Z, CUI G, et al. Distributed fixed-time secondary control of an islanded microgrid via distributed event-triggered mechanism[J]. International Journal of Control, 2023, 96(5): 1146 – 1164.
- [22] WANG Z, WANG J, MA M, et al. Distributed event-triggered fixed-time fault-tolerant secondary control of islanded AC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4078 – 4093.
- [23] CHEN Y, LI C, QI D, et al. Distributed event-triggered secondary control for islanded microgrids with proper trigger condition checking period [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 13(2): 837 – 848.
- [24] LIAN Z, DENG C, WEN C, et al. Distributed event-triggered control for frequency restoration and active power allocation in microgrids with varying communication time delays [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(9): 8367 – 8378.
- [25] ZHAO G, JIN L, CUI H, et al. Distributed dynamic event-triggered secondary control for islanded microgrids with disturbances and communication delays: a hybrid systems approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 19(8): 8795 – 8805.
- [26] 许德明, 李泽, 崔国增, 等. 孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 2034 – 2041.
- XU Deming, LI Ze, CUI Guozeng, et al. Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid [J]. Control and Decision, 2021, 36(8): 2034 – 2041.
- [27] ZHAO D, ZHANG C, SUN Y, et al. Distributed robust frequency restoration and active power sharing for autonomous microgrids with event-triggered strategy [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3819 – 3834.
- [28] LIU J, YU Y, XU Y, et al. Fixed-time average consensus of nonlinear delayed MASs under switching topologies: an event-based triggering approach [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 52(5): 2721 – 2733.
- [29] RAN G, LIU J, LI C, et al. Event-based finite-time consensus control of second-order delayed multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 68(1): 276 – 280.

收稿日期: 2025-02-25; 网络首发日期: 2025-04-30

作者简介:

吴云龙(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网二次控制, 控制工程, wuyunlong20000826@163.com;

曹晓(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网分布式协同控制, 建筑智能化, cx20000110cx@163.com;

李泽(1983), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为复杂模糊系统随机系统与时滞系统的智能控制建筑智能化, lizeing@163.com。