

# 基于固定时间一致性算法的孤岛微电网 事件触发二次频率控制

于永进,吴健鹏,孙国强,樊英杰

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**微电网传统一致性算法抗扰能力差、调节时间无法得到保证,控制器周期采样造成大量数据冗余,因此提出一种基于固定时间一致性算法的事件触发机制,实现了输出频率的恢复和有功功率按比例分配。所提出的控制策略提高了系统的收敛速度,实现了固定时间内系统稳定,减小了对系统初始状态的依赖。同时,引入事件触发机制,通过减少采样信息的传输节约了通信资源。利用 Lyapunov 理论证明了所提控制策略的稳定性。Matlab/Simulink 仿真结果验证了本研究所提控制策略的有效性。

**关键词:**孤岛微电网;事件触发控制;固定时间一致性算法;二次频率控制

中图分类号:TM761

文献标志码:A

## Event-triggered secondary frequency control based on fixed-time consensus algorithm for islanded microgrid

YU Yongjin, WU Jianpeng, SUN Guoqiang, FAN Yingjie

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** For its poor anti-interference ability, the traditional consensus algorithm of microgrids cannot guarantee the transient time; controller periodic sampling causes a large amount of data redundancy. Therefore, an event-triggered mechanism based on fixed-time consensus algorithm was proposed to achieve output frequency recovery and proportional allocation of active power. The proposed control strategy improves the convergence speed of the system, achieves system stability within a fixed time, and reduces dependence on the initial state of the system. At the same time, introducing an event-triggered mechanism saves communication resources by reducing the transmission of sampling information. The stability of the proposed control strategy was proved by the Lyapunov theory. The effectiveness of the proposed control strategy was confirmed by the simulation results obtained from Matlab/Simulink.

**Key words:** islanded microgrid; event-triggered control; fixed-time consensus algorithm; secondary frequency control

“双碳”目标背景下,风电、光伏等可再生能源在电力系统中所占比例持续增加,其发电存在的不确定性间歇和波动对互联电网的安全运行带来一定冲击。为解决这一问题,研究人员提出了微电网(microgrid, MG)概念。作为智能电网的组成部分,微电网是由分布式电源(distributed generation, DG)、能量转换装置、储能装置、负荷、通信和控制器等设备构成的微型电力系统,通常具有并网运行和孤岛运行两种工作模式。

收稿日期:2023-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(62003794)

作者简介:于永进(1980—),男,山东烟台人,副教授,博士,主要从事电力系统与控制研究。

吴健鹏(1999—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事微电网二次控制研究,本文通信作者。

E-mail:wujianpeng0508@foxmail.com

孤岛运行模式下,由于缺乏互联电网的支撑,微电网需要自行维持系统频率的稳定以确保系统内负荷的正常工作。因此,合理的控制策略成为系统稳定运行的核心问题。在孤岛微电网系统中,下垂控制为底层控制策略的设计具有控制速度快的优点而被广泛采用,但下垂控制固有的有差调节特性会使系统频率偏离额定值。为实现系统频率的无差控制,二次频率控制策略被广泛采用。传统二次频率控制的结构之一是集中式控制结构,其核心是收集全局状态变量信息的微电网中央控制器(microgrid central controller, MGCC),存在高度依赖通信技术和中央控制器的特点,因而具有通信压力较大、计算负担重、经济性和可靠性差、扩展性不足等缺点<sup>[1]</sup>。

为克服集中式控制结构的短板,分布式控制结构被大量应用于频率恢复控制。文献[2]提出一种基于事件触发机制的分布式协同二次频率控制策略,有效减小了通信网络层的工作压力;文献[3]将系统延时分为通信延时和控制延时,得出通信延时不影响协同控制系统稳定性的结论,并提出了系统在控制延时下的稳定域;文献[4]在包含多智能体混合储能的孤岛型微电网中采用基于事件触发机制的分层控制结构;文献[5]将有限时间一致性算法应用于包含事件触发机制的多智能体系统二次控制,加快了系统在满足事件触发条件时的响应速度;文献[6]和文献[7]采用拓扑结构优化的离散一致性算法将分布式二次控制结构应用于系统电压频率协调控制。

近年来,有限时间分布式二次控制策略因抗干扰能力强、控制精度高等优点受到广泛关注。文献[8]和文献[9]将有限时间控制与传统比例积分(proportion integral, PI)控制相结合,实现了频率无差控制和功率均分;文献[10]设计了一种面向多智能体系统的非线性控制器,实现了系统的有限时间收敛。然而,有限时间一致性算法的收敛时间依赖于系统的初始状态,导致收敛时间的预设存在困难<sup>[11]</sup>。针对这一问题,文献[12]提出了固定时间一致性收敛的概念,文献[13]面向直流微电网系统,提出了针对电压的分布式固定时间二次控制方法。针对执行器和传感器故障等情况,文献[14]将固定时间一致性算法应用于多智能体系统,设计了分布式容错二次控制。

分布式控制结构与事件触发机制相结合的控制策略可以有效克服集中式控制结构的缺点,固定时间一致性算法的发展则加快了控制系统的收敛速度。然而,目前鲜有研究将二者统一形成系统化的控制策略。本研究提出一种基于固定时间一致性算法的分布式事件触发二次频率控制策略,在传统一致性算法的基础上引入事件触发机制和固定时间控制算法来减少通信网络层控制器的通信和计算负担,进一步提高系统的收敛速度,实现频率的无差控制与有功功率的按比例分配。最后,通过稳定性分析和仿真实验验证了控制策略的有效性。

## 1 孤岛微电网分布式控制结构建模

### 1.1 通信网络拓扑图论

将孤岛微电网中的每个分布式电源及其能量转换装置作为一个通信网络中的智能体节点。采用无向通信拓扑图来描述通信网络的拓扑结构。由  $N$  个分布式电源构成的微电网可以映射到图  $G=(V, E, \mathbf{A})$ 。其中,节点集合  $V=\{1, 2, \dots, N\}$  为所有分布式电源构成的节点;边缘集合  $E=\{(i, j) \mid i, j \in V\} \subseteq V \times V$ , 表示能够进行信息交换的通信链路;令加权邻接系数矩阵  $\mathbf{A}=[a_{ij}]_{N \times N}$  中  $a_{ii}=0, a_{ij} \geq 0$ , 当且仅当  $(i, j) \in E$  时  $a_{ij} > 0 (i \neq j)$ , 通常取 1。定义与第  $i$  个分布式电源相邻的节点集合为  $N_i=\{j \mid (i, j) \in E\}$ , 定义节点  $i$  的隶属度(出度)为  $d_i=\sum_{j \in N_i} a_{ij}$ , 则图  $G$  的拉普拉斯矩阵定义为  $\mathbf{L}=\mathbf{D}-\mathbf{A}=[l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ , 矩阵  $\mathbf{D}$  为隶属度矩阵, 且  $\mathbf{D}=\text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N)$ 。

### 1.2 孤岛微电网分布式分层控制结构

图 1 为基于电压型逆变器的孤岛微电网分布式分层控制结构示意图。交流输出侧经滤波器滤波后通过连接阻抗接入微电网。控制回路首先对滤波器输出侧三相电压  $v_i$  和电流  $i_i$  以及节点频率  $f_i$  进行信号采集, 分别传输至下垂控制器和二次控制器。二次控制器通过通信网络接收其他分布式电源变量信号, 通过计算输出一个控制信号  $u_i^f$  给下垂控制部分的功率控制器。同时, 下垂控制器对逆变器输出电流  $i_{oi}$  进行采集

传输至其电压电流双环控制器,最终通过脉冲宽度调制环节控制逆变器输出。

以系统中第  $i$  个分布式电源  $DG_i$  为例,其输出节点的频率和电压的下垂特性为:

$$\begin{cases} f_i(t) = f_n - m_i [P_i(t) - P_i^{\text{ref}}], \\ v_i(t) = v_n - n_i [Q_i(t) - Q_i^{\text{ref}}]. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_i(t)$ 、 $v_i(t)$  分别为逆变器输出侧即时频率和电压;  $f_n$ 、 $v_n$  分别为系统额定频率和电压;  $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$  分别为逆变器输出的实时有功功率和无功功率;  $P_i^{\text{ref}}$ 、 $Q_i^{\text{ref}}$  分别为电源输出的有功功率和无功功率的参考值;  $m_i$ 、 $n_i$  分别为有功功率和无功功率下垂系数。

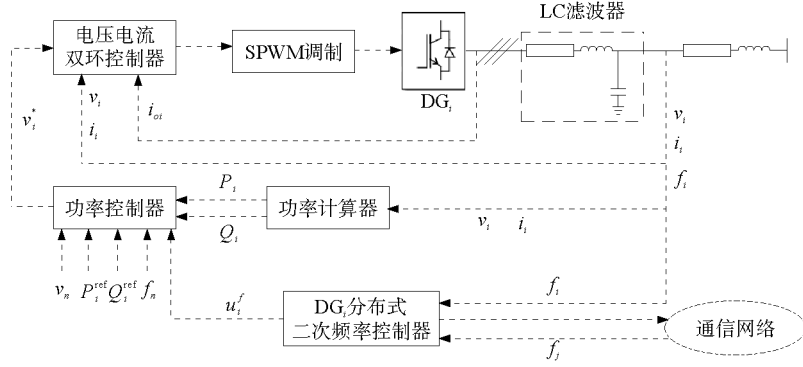


图1 孤岛微电网分布式分层控制结构

Fig. 1 Distributed hierarchical control structure of islanded microgrid

由于下垂控制固有的有差调节特性,为实现微电网电压频率的无差调节及有功功率的合理分配,通常采用一致性算法对式(1)添加二次控制修正项  $u_i^f(t)$  和  $u_i^v(t)$ ,

$$\begin{cases} f_i(t) = f_n + m_i [P_i^{\text{ref}} - P_i(t)] + u_i^f(t), \\ v_i(t) = v_n + n_i [Q_i^{\text{ref}} - Q_i(t)] + u_i^v(t), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_i^f(t) = \int e_i^f(t) + e_i^p(t) dt, \\ u_i^v(t) = \int e_i^v(t) dt. \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} e_i^f(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [f_j(t) - f_i(t)] + b_i [f_n - f_i(t)], \\ e_i^p(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [m_j P_j(t) - m_i P_i(t)], \\ e_i^v(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [v_j(t) - v_i(t)] + b_i [v_n - v_i(t)]. \end{cases} \quad (4)$$

$b_i$  表示虚拟领导节点连接系数,当且仅当  $DG_i$  可以访问虚拟领导节点时,  $b_i > 0$ ,通常取 1。

在采用一致性算法的微电网分布式控制系统中,若通信拓扑是连通的,则对于系统各电源所处的节点,其状态变量将收敛到一致数值。将基于一致性算法的分布式控制系统的典型表达式<sup>[15]</sup>

$$\dot{x}_i = e_i, e_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_j(t) - x_i(t)], i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

推广至全体微电网节点,转化为矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}\mathbf{x}. \quad (6)$$

式中:  $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_N]^T$ ,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ ;  $\mathbf{L}$  为微电网通信拓扑图的拉普拉斯矩阵,除 1.1 节中采用矩阵定义的形式之外,  $\mathbf{L}$  中的元素  $l_{ij}$  还可表示为:

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij}, & i \neq j; \\ \sum_{j \in N_i} a_{ij}, & i = j. \end{cases} \quad (7)$$

不难发现,  $\mathbf{L}$  是一个对称半正定矩阵。定义  $\mathbf{B} = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_N) \in \mathbf{R}^{N \times N}$  为虚拟领导节点邻接矩阵,如果矩阵  $\mathbf{B}$  中至少有一个元素不为 0,则与该微电网对应的拉普拉斯矩阵  $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$  为对称正定矩阵。

## 2 固定时间事件触发二次控制器设计

基于固定时间一致性算法的事件触发二次控制器由固定时间控制策略和事件触发机制共同构成,能够进一步加快系统收敛速度,降低通信网络负担,减少非必要采样信号传输,节约通信网络资源。定义运算  $\text{sig}\{x_i\}^a = \text{sign}(x_i) |x_i|^a$ , 其中  $\text{sign}$  为符号函数。

### 2.1 基于一致性算法的固定时间控制策略

为实现控制算法的固定时间收敛,实现分布式电源与相邻节点的数据传输,根据式(4)对修正项的被积时间函数进一步设计为:

$$\begin{cases} \tilde{e}_i^f(t) = \beta_1^f \text{sig}\{e_i^f(t)\}^{\alpha_1^f} + \beta_2^f \text{sig}\{e_i^f(t)\}^{\alpha_2^f}, \\ \tilde{e}_i^p(t) = \beta_1^p \text{sig}\{e_i^p(t)\}^{\alpha_1^p} + \beta_2^p \text{sig}\{e_i^p(t)\}^{\alpha_2^p}, \\ \tilde{e}_i^v(t) = \beta_1^v \text{sig}\{e_i^v(t)\}^{\alpha_1^v} + \beta_2^v \text{sig}\{e_i^v(t)\}^{\alpha_2^v}. \end{cases} \quad (8)$$

式中,固定时间控制参数  $\beta_1, \beta_2 > 0, 0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1$ 。根据式(2)、式(3)将二次控制修正项改写为:

$$\begin{cases} \tilde{u}_i^f(t) = \int \tilde{e}_i^f(t) + \tilde{e}_i^p(t) dt, \\ \tilde{u}_i^v(t) = \int \tilde{e}_i^v(t) dt. \end{cases} \quad (9)$$

为便于后续稳定性分析,引入下面3个引理。

**引理 1**<sup>[12]</sup> 考虑系统  $\dot{\mathbf{x}} = f(t, \mathbf{x}), \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ , 其中  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \mathbf{R}^N$ 。如果非线性函数  $f: \mathbf{R} \times \mathbf{R}^N \rightarrow \mathbf{R}^N$  不连续,则系统的解定义在 Filippov 意义下。假设原点是系统的一个平衡点,如果存在一个径向无界函数  $V: \mathbf{R}^N \rightarrow \mathbf{R}_+ \cup \{0\}$  使得该函数满足:

$$1) V(\mathbf{x}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{0};$$

2) 存在常数  $c_1, c_2, \alpha_1, \alpha_2, k > 0, \alpha_1 k < 1, \alpha_2 k > 1$  使系统任何解  $\mathbf{x}(t)$  和函数  $V$  的右导数  $D^+ V[\mathbf{x}(t)]$  均满足不等式:  $D^+ V[\mathbf{x}(t)] \leq -\{c_1 V^{\alpha_1}[\mathbf{x}(t)] + c_2 V^{\alpha_2}[\mathbf{x}(t)]\}^k$ , 则系统为固定时间稳定的,且收敛时间估计值满足:

$$T(\mathbf{x}_0) \leq \frac{1}{c_1^k (1 - \alpha_1 k)} + \frac{1}{c_2^k (\alpha_2 k - 1)}, \forall \mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}^N. \quad (10)$$

**引理 2**<sup>[16]</sup> 如果与无向连通图  $G$  对应的拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}$  为半正定矩阵,则 0 是  $\mathbf{L}$  的一个简单特征值且  $\mathbf{1}_N$  是对应 0 特征值的特征向量。 $\mathbf{L}$  的第 2 小特征值  $\lambda_2(\mathbf{L}) > 0$ , 且如果  $\mathbf{1}_N^T \mathbf{x} = 0$ , 则  $\mathbf{x}^T \mathbf{L} \mathbf{x} \geq \lambda_2(\mathbf{L}) \mathbf{x}^T \mathbf{x}$ 。此外,如果存在一个  $b_i > 0$ , 则  $\mathbf{L} + \mathbf{B}$  是正定的,其最小特征值  $\lambda_1(\mathbf{L} + \mathbf{B}) > 0$ , 且有  $\mathbf{x}^T (\mathbf{L} + \mathbf{B}) \mathbf{x} \geq \lambda_1(\mathbf{L} + \mathbf{B}) \mathbf{x}^T \mathbf{x}$ 。

**引理 3**<sup>[17]</sup> 令  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_N \geq 0, 0 < \varphi \leq 1, \varphi > 1$ , 则有  $\sum_{i=1}^N \zeta_i^\varphi \geq (\sum_{i=1}^N \zeta_i)^\varphi$ ,  $\sum_{i=1}^N \zeta_i^\varphi \geq N^{1-\varphi} (\sum_{i=1}^N \zeta_i)^\varphi$ 。

**定理 1** 若微电网的无向通信拓扑是连通的,并且在微电网中至少包含一个与虚拟领导节点进行通信的分布式电源,则所设计的固定时间控制器(式(8))和式(9)可以使系统在固定时间内实现频率恢复和功率按比例分配,并且系统存在收敛时间上限。

**证明:** 令  $y_i(t) = e_i(t)$ , 取 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{L}} \mathbf{x}. \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{x}^T$  和  $\mathbf{x}$  同式(6), 拉普拉斯矩阵  $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$  为对称正定。因此,函数  $V_1$  是正定的。根据式(4)、式(8)、式(9)对式(11)求导,可得:

$$\dot{V}_1 = \mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{L}} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{L}} [-\beta_1 (\tilde{\mathbf{L}} \mathbf{x})^{\alpha_1} - \beta_2 (\tilde{\mathbf{L}} \mathbf{x})^{\alpha_2}] = - \sum_{j \in N_i} y_i(t) [\beta_1 y_i(t)^{\alpha_1} + \beta_2 y_i(t)^{\alpha_2}] =$$

$$-\beta_1 \sum_{j \in N_i} y_i^{\alpha_1+1}(t) - \beta_2 \sum_{j \in N_i} y_i^{\alpha_2+1}(t) = -\beta_1 \sum_{j \in N_i} [y_i^2(t)]^{\frac{\alpha_1+1}{2}} - \beta_2 \sum_{j \in N_i} [y_i^2(t)]^{\frac{\alpha_2+1}{2}}. \quad (12)$$

注意到:

$$\sum_{i=1}^N y_i^2(t) = [\tilde{\mathbf{L}}^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}(t)]^T \tilde{\mathbf{L}} [\tilde{\mathbf{L}}^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}(t)] \geq \lambda_2(\tilde{\mathbf{L}}) \mathbf{x}(t)^T \tilde{\mathbf{L}} \mathbf{x}(t), \quad (13)$$

根据引理 2 和引理 3 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -\beta_1 \left[ \sum_{j \in N_i} y_i^2(t) \right]^{\frac{\alpha_1+1}{2}} - \beta_2 N^{\frac{1-\alpha_2}{2}} \left[ \sum_{j \in N_i} y_i^2(t) \right]^{\frac{\alpha_2+1}{2}} \\ &\leq -\beta_1 [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}}) V_1]^{\frac{\alpha_1+1}{2}} - \beta_2 N^{\frac{1-\alpha_2}{2}} [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}}) V_1]^{\frac{\alpha_2+1}{2}} \\ &= -\beta_1 [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})]^{\frac{\alpha_1+1}{2}} V_1^{\frac{\alpha_1+1}{2}} - \beta_2 N^{\frac{1-\alpha_2}{2}} [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})]^{\frac{\alpha_2+1}{2}} V_1^{\frac{\alpha_2+1}{2}}. \end{aligned} \quad (14)$$

依照引理 1, 函数  $V_1$  在固定时间内收敛到 0, 固定收敛时间满足不等式:

$$T_1 \leq T_{\max} = \frac{1}{\beta_1 2^{\frac{\alpha_1-1}{2}} \lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})^{\frac{\alpha_1+1}{2}} (1-\alpha_1)} + \frac{1}{\beta_2 2^{\frac{\alpha_2-1}{2}} \lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})^{\frac{\alpha_2+1}{2}} N^{\frac{1-\alpha_2}{2}} (\alpha_2-1)}. \quad (15)$$

## 2.2 基于固定时间一致性算法的事件触发控制策略

根据式(4), 利用分布式事件触发机制, 构造事件触发频率控制器的被积时间函数:

$$\begin{cases} e_i^{f,k}(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [f_j(t_i^k) - f_i(t_i^k)] + b_i [f_n - f_i(t_i^k)], \\ e_i^{P,k}(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [m_j P_j(t_i^k) - m_i P_i(t_i^k)], \\ e_i^{v,k}(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [v_j(t_i^k) - v_i(t_i^k)] + b_i [v_n - v_i(t_i^k)]. \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $t_i^k$  为本地二次控制器状态信息采样传递时刻。

根据式(8), 设计基于固定时间一致性算法的事件触发控制器被积时间函数:

$$\begin{cases} \tilde{e}_i^{f,k}(t) = \beta_1^f \text{sig}\{e_i^{f,k}(t)\}^{\alpha_1^f} + \beta_2^f \text{sig}\{e_i^{f,k}(t)\}^{\alpha_2^f} + \sigma_i e_i^{f,k}(t), \\ \tilde{e}_i^{P,k}(t) = \beta_1^P \text{sig}\{e_i^{P,k}(t)\}^{\alpha_1^P} + \beta_2^P \text{sig}\{e_i^{P,k}(t)\}^{\alpha_2^P} + \sigma_i e_i^{P,k}(t), \\ \tilde{e}_i^{v,k}(t) = \beta_1^v \text{sig}\{e_i^{v,k}(t)\}^{\alpha_1^v} + \beta_2^v \text{sig}\{e_i^{v,k}(t)\}^{\alpha_2^v} + \sigma_i e_i^{v,k}(t). \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\sigma_i > 0$  为事件触发阈值。

注意到, 在式(16)中相邻节点的变量采样时刻依然取本地控制器的触发时刻  $t_i^0, t_i^1, \dots, t_i^k$ , 而非相邻节点的触发时刻  $t_j^0, t_j^1, \dots, t_j^k$ , 即本地控制器仅在自身触发时刻进行控制变量的更新, 在相邻节点的触发时刻不进行更新, 上述设计有效减少了系统的触发次数。

定义频率跟踪误差为  $\delta_i^f(t) = f_i(t) - f_n$ , 定义  $y_i(t)$  为:

$$\begin{aligned} y_i(t) &= e_i^f(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [f_j(t) - f_i(t)] + b_i [f_n - f_i(t)] \\ &= \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\delta_j^f(t) - \delta_i^f(t)] + b_i [-\delta_i^f(t)]. \end{aligned} \quad (18)$$

可以得到  $\mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{L}} \boldsymbol{\delta}^f(t)$ , 其中  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$ ,  $\boldsymbol{\delta}^f = [\delta_1^f, \delta_2^f, \dots, \delta_N^f]^T$ 。

定义辅助变量  $\Delta_i^f(t), \Delta_{ij}^f(t)$  分别满足  $\Delta_i^f(t) = f_i(t_i^k) - f_i(t)$ ,  $\Delta_{ij}^f(t) = f_j(t_i^k) - f_j(t)$ , 则式(16)频率被积时间函数可以写作如下统一时域内形式:

$$e_i^{f,k}(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \{ [f_j(t) + \Delta_{ij}^f(t)] - [f_i(t) + \Delta_i^f(t)] \} + b_i \{ f_n - [f_i(t) + \Delta_i^f(t)] \}. \quad (19)$$

定义本地控制器频率测量误差为  $s_i^f(t) = \tilde{e}_i^{f,k}(t) - [\tilde{e}_i^f(t) + \sigma_i e_i^f(t)]$ , 则事件触发函数可设计为:

$$\Gamma_i^f(t) = |s_i^f(t) - \sigma_i |y_i(t)| |。 \quad (20)$$

当  $\Gamma_i^f(t) > 0$  时,事件被触发,触发时刻  $t = t_i^k$ ,  $|s_i^f(t) | / |y_i(t) | > \sigma_i$  成立。设传感器采样周期为  $T$ ,在  $t_i^k$  触发时刻后,若  $t - t_i^k < T$ ,那么即使  $|s_i^f(t) | / |y_i(t) | > \sigma_i$  依然成立,也不进行控制变量的采样更新。当  $t - t_i^k \geq T$  且  $|s_i^f(t) | / |y_i(t) | > \sigma_i$  再次成立时,到达下一事件触发时刻  $t_i^{k+1}$ 。

**定理 2** 若微电网的无向通信拓扑是连通的,并且在微电网中至少包含一个与虚拟领导节点进行通信的分布式电源,则式(16)、式(17)所设计的基于固定时间一致性算法的事件触发二次控制器,可以使系统在固定时间内实现频率恢复和功率按比例分配,并且系统存在恢复时间上限<sup>[18]</sup>。

**证明:**取 Lyapunov 函数

$$V_2 = \frac{1}{2}[\boldsymbol{\delta}^f(t)]^T \tilde{\mathbf{L}}[\boldsymbol{\delta}^f(t)]。 \quad (21)$$

式中:  $\boldsymbol{\delta}^f(t)$  同式(18),拉普拉斯矩阵  $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$  为对称正定,因此函数  $V_2$  是正定的。

对式(21)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= [\boldsymbol{\delta}^f(t)]^T \tilde{\mathbf{L}}[\boldsymbol{\delta}^f(t)] = \mathbf{y}^T(t) \boldsymbol{\delta}^f(t) = - \sum_{i=1}^N y_i(t) [s_i^f(t) + \beta_1^f y_i^{\alpha_1^f}(t) + \beta_2^f y_i^{\alpha_2^f}(t) + \sigma_i y_i(t)] \\ &\leq \sum_{i=1}^N |y_i(t)| |s_i^f(t) - \beta_1^f \sum_{i=1}^N y_i^{\alpha_1^f+1}(t) - \beta_2^f \sum_{i=1}^N y_i^{\alpha_2^f+1}(t) - \sigma_i \sum_{i=1}^N y_i^2(t)| \\ &\leq \sum_{i=1}^N |y_i(t)| [|s_i^f(t) - \sigma_i |y_i(t) |] - \beta_1^f \sum_{i=1}^N y_i^{\alpha_1^f+1}(t) - \beta_2^f \sum_{i=1}^N y_i^{\alpha_2^f+1}(t) \\ &\leq -\beta_1^f \sum_{i=1}^N y_i^{\alpha_1^f+1}(t) - \beta_2^f \sum_{i=1}^N y_i^{\alpha_2^f+1}(t)。 \end{aligned} \quad (22)$$

根据引理 2 和引理 3,可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\beta_1^f \left[ \sum_{j \in N_i} y_j^2(t) \right]^{\frac{\alpha_1^f+1}{2}} - \beta_2^f N^{\frac{1-\alpha_2^f}{2}} \left[ \sum_{j \in N_i} y_j^2(t) \right]^{\frac{\alpha_2^f+1}{2}} \\ &\leq -\beta_1^f [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}}) V_2]^{\frac{\alpha_1^f+1}{2}} - \beta_2^f N^{\frac{1-\alpha_2^f}{2}} [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}}) V_1]^{\frac{\alpha_2^f+1}{2}} \\ &= -\beta_1^f [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})]^{\frac{\alpha_1^f+1}{2}} V_2^{\frac{\alpha_1^f+1}{2}} - \beta_2^f N^{\frac{1-\alpha_2^f}{2}} [2\lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})]^{\frac{\alpha_2^f+1}{2}} V_2^{\frac{\alpha_2^f+1}{2}}。 \end{aligned} \quad (23)$$

依照引理 1,函数  $V_2$  在固定时间内收敛到 0,固定收敛时间满足:

$$T_2 \leq T_{\max} = \frac{1}{\beta_1^f 2^{\frac{\alpha_1^f-1}{2}} \lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})^{\frac{\alpha_1^f+1}{2}} (1-\alpha_1^f)} + \frac{1}{\beta_2^f 2^{\frac{\alpha_2^f-1}{2}} \lambda_2(\tilde{\mathbf{L}})^{\frac{\alpha_2^f+1}{2}} N^{\frac{1-\alpha_2^f}{2}} (\alpha_2^f-1)}。 \quad (24)$$

由式(23)可知, $V_2$  求导后主要由  $\beta_1, \alpha_1$  构成的有限时间控制项和  $\beta_2, \alpha_2$  构成的固定时间控制项组成,参照文献[5],对固定时间一致性算法在收敛速度方面提升的衡量指标主要取决于后者参数的选取。

### 3 仿真实验

为验证提出的固定时间事件触发控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建包含 3 个常规分布式电源(DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub>、DG<sub>3</sub>)和 1 个独立储能装置(DG<sub>4</sub>)并网的四支路孤岛微电网模型,如图 2 所示。DG<sub>1</sub> 为系统唯一可与虚拟领导节点通信的电源,系统额定频率为 50 Hz。此外,系统包含 4 个本地负载与 4 条连接线。相关参数见表 1。

**情景 1** 仿真过程分为两阶段,0~2.4 s 仅采用下垂控制,2.4~5 s 采用所提出控制策略。4 个本地负载分别自 0、0.3、0.2、0.3 s 时刻投入运行,负载 1 全程运行,其余负载分别在 3.1、3、3.2 s 时刻切除,仿真时间为 5 s。仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,在 0~2.4 s 时仅采用下垂控制策略会导致输出频率和电压与额定值存在偏差,在 2.4 s 时应用固定时间事件触发控制策略可以使频率和电压分别在 0.6 和 0.3 s 内恢复到额定值。该恢复

时间小于收敛时间上限 3.374 s。图 3(c) 给出了各分布式电源的输出有功功率情况,有功功率实现了按下垂系数的反比进行分配。通过情景 1 的仿真验证了所提策略的有效性。

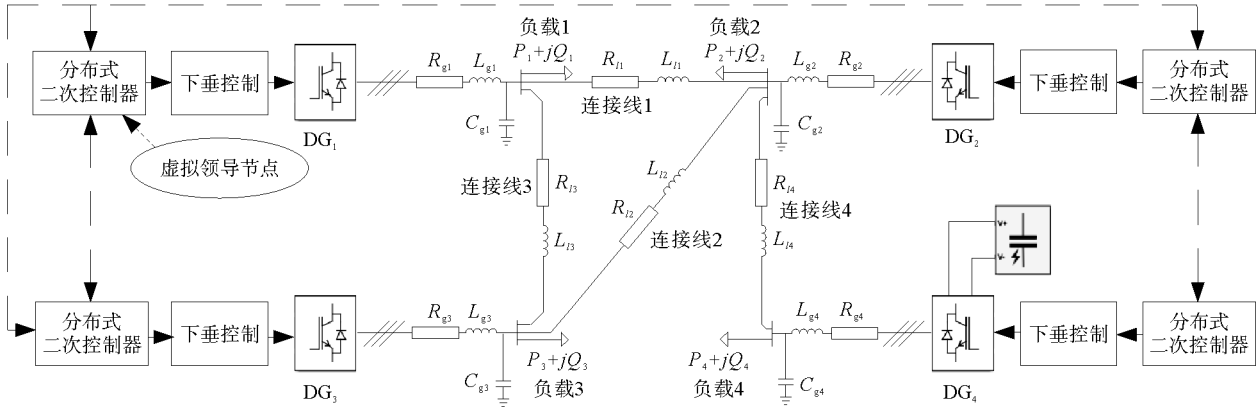


图 2 孤岛微电网测试系统模型

Fig. 2 Model of islanded microgrid test system

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

$i$	$m_i / (\text{Hz/kW})$	$n_i / (\text{V/kVar})$	$R_g / \Omega$	$L_g / \text{mH}$	$C_g / \mu\text{F}$	$R_l / \Omega$	$L_l / \text{mH}$	$P_i / \text{kW}$	$Q_i / \text{kVar}$
1	$\pi^{-1} \times 10^{-2}$	0.4	0.2	3	220	0.9	5	10	1.5
2	$2\pi^{-1} \times 10^{-2}$	0.4	0.2	3	220	0.9	5	30	1.5
3	$\pi^{-1} \times 10^{-2}$	0.4	0.2	3	220	0.9	5	30	1.5
4	$2\pi^{-1} \times 10^{-2}$	0.4	0.2	3	220	0.9	5	30	1.5

$\alpha_1 = 0.8, \alpha_2 = 1.1, \beta_1 = 15, \beta_2 = 30$

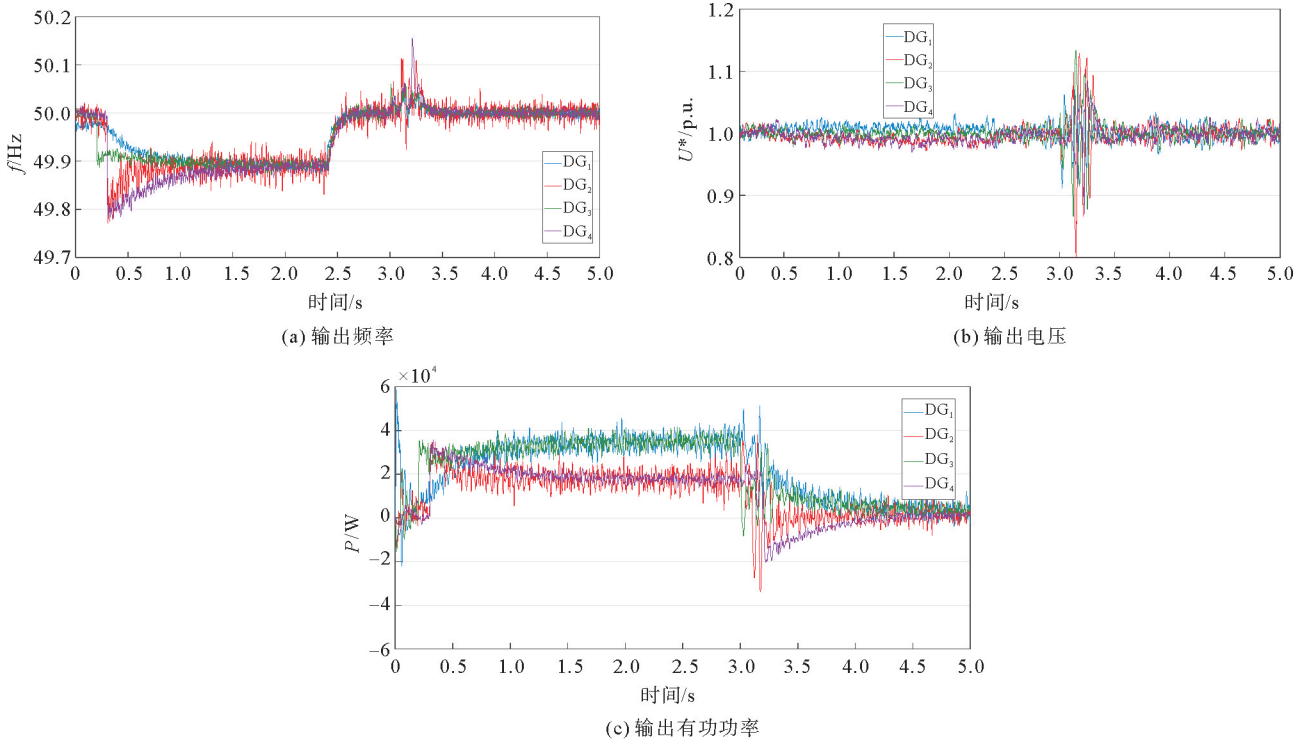


图 3 情景 1 输出频率、电压和有功功率

Fig. 3 Output frequency, voltage and active power (Scenario 1)

**情景 2** 仿真时间内分别采用提出的固定时间事件触发控制策略与有限时间事件触发控制策略和周期触发的固定时间控制策略,其他条件与情景 1 相同。

首先将固定时间事件触发控制策略与文献[8]提出的有限时间事件触发控制策略对比,如图 4 所示,以电源 3 的输出频率为例,可以看出所提出的控制策略在负载波动时收敛速度更快。

与固定时间周期采样时间触发控制和有限时间事件触发控制策略相比,如图 5 所示,所提出的控制策略在确保系统稳定和具有一定动态性能的前提条件下,通信数据量远小于周期采样的时间触发控制,与有限时间事件触发相比通信数据也明显减少。

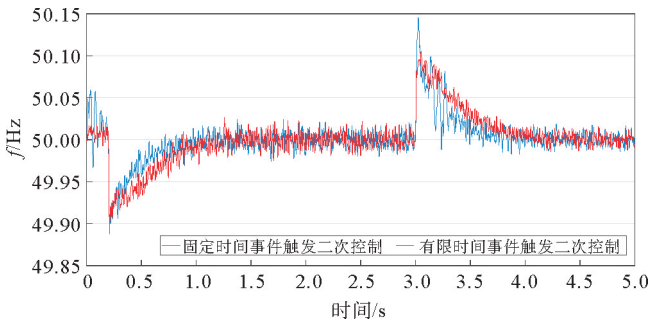


图 4 情景 2 DG<sub>3</sub> 输出频率

Fig. 4 Output frequency of DG<sub>3</sub> (Scenario 2)

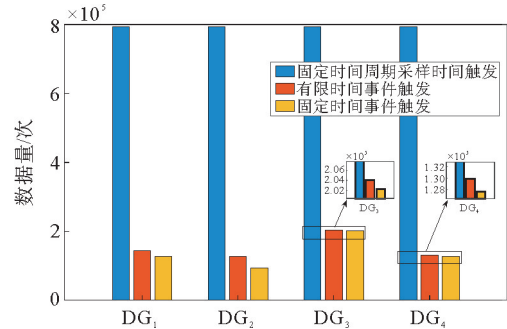


图 5 情景 2 三种控制策略通信数据量对比

Fig. 5 Comparison of communication data between three control strategies (Scenario 2)

**情景 3** 仿真分为两阶段观测,0~0.7 s 仅采用下垂控制,0.7~5 s 采用本研究提出的固定时间事件触发控制策略。4 个本地负载均在 0 时刻投入运行,分别在 2、2.3、2.7、3 s 时刻切除,仿真时间为 5 s。电源 3 仅在 1~2.1 s 时段内并网运行,其他电源全程并网运行。

模拟验证分布式电源即插即用情景下所提控制策略的有效性。如图 6 所示,电源 3 未并网运行时仅为本地负荷提供供电,因此当二次控制投入时,系统的频率恢复时间更短,调节速度更快,所提算法的优势更加明显。而并网运行时,如图 7 所示,控制器将与临近控制器进行通信,通过下垂系数合理分配投入电源的出力情况。

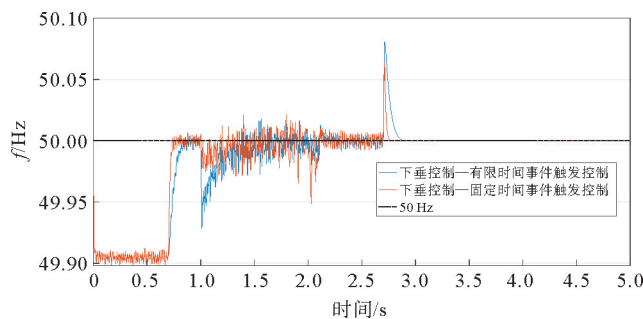


图 6 情景 3 DG<sub>3</sub> 输出频率

Fig. 6 Output frequency of DG<sub>3</sub> (Scenario 3)

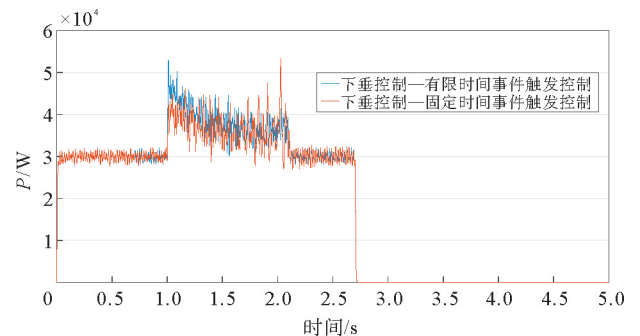


图 7 情景 3 DG<sub>3</sub> 输出有功功率

Fig. 7 Output active power of DG<sub>3</sub> (Scenario 3)

## 4 结论

本研究基于分布式电源和微电网的通信拓扑结构,针对有限时间事件触发控制和周期采样的时间触发控制策略存在的不足,设计了基于固定时间一致性算法的事件触发二次控制策略,使系统在固定时间内实现收敛,收敛时间可以按照控制器设计参数整定,实现了低通信量频率的无差控制和有功功率的按比例分配。仿真结果表明,所提出的控制策略收敛速度更快,通信数据的传输量更少,能够适配微电网电源即插即用的工作特点。



## 参考文献:

- [1] 陈刚,李志勇,赵中原.微电网系统的分布式优化下垂控制[J].控制理论与应用,2016,33(8):999-1006.  
CHEN Gang,LI Zhiyong,ZHAO Zhongyuan. Distributed optimal droop control in micro-grid systems[J]. Control Theory & Applications,2016,33(8):999-1006.
- [2] QIAN T,LIU Y,ZHANG W,et al. Event-triggered updating method in centralized and distributed secondary controls for islanded microgrid restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2):1387-1395.
- [3] 李志军,张牟发,张家安.考虑延时的孤岛微电网频率协同控制策略稳定性分析及改进[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(10):1061-1070.  
LI Zhijun,ZHANG Mufa,ZHANG Jiaan. Stability analysis and improvement of frequency cooperative control strategy for island microgrid considering time delay[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2022,55(10):1061-1070.
- [4] 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.
- [5] 周建萍,张健,茅大钧,等.孤岛微电网的分布式有限时间事件触发二次协调控制[J].电力自动化设备,2021,41(11):127-132.  
ZHOU Jianping,ZHANG Jian,MAO Dajun,et al. Distributed finite-time event-triggered secondary coordinated control of islanded microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):127-132.
- [6] 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.
- [7] 吕振宇,苏晨,吴在军,等.孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J].电工技术学报,2017,32(6):209-219.  
LÜ Zhenyu,SU Chen,WU Zaijun,et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(6):209-219.
- [8] ZHANG Y S,SHOTORBANI A M,WANG L W,et al. Distributed secondary control of a microgrid with a generalized PI finite-time controller[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy,2021,8:57-67.
- [9] LU X Q,YU X H,LAI J G,et al. A novel distributed secondary coordination control approach for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(4):2726-2740.
- [10] ZHANG H P,YUE D,YIN X X,et al. Finite-time distributed event-triggered consensus control for multi-agent systems [J]. Information Sciences,2016,339:132-142.
- [11] 刘洋,井元伟,刘晓平,等.非线性系统有限时间控制研究综述[J].控制理论与应用,2020,37(1):1-12.  
LIU Yang,JING Yuanwei,LIU Xiaoping,et al. Survey on finite-time control for nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications,2020,37(1):1-12.
- [12] POLYAKOV A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2012,57(8):2106-2110.
- [13] YUAN Q F,WANG Y W,LIU X K,et al. Distributed fixed-time secondary control for DC microgrid via dynamic average consensus[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2021,12(4):2008-2018.
- [14] 陆瑶,王杰,王子强,等.基于固定时间一致性算法的孤岛微电网分布式容错二次控制策略[J].电力自动化设备,2022,42(11):17-24.  
LU Yao,WANG Jie,WANG Ziqiang,et al. Distributed fault-tolerant secondary control strategy for islanded microgrid based on fixed-time consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(11):17-24.
- [15] DU Y H,TU H,YU H,et al. Accurate consensus-based distributed averaging with variable time delay in support of distributed secondary control algorithms[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(4):2918-2928.
- [16] LONG W,FENG X. Finite-time consensus problems for networks of dynamic agents[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2010,55(4):950-955.
- [17] ZUO Z Y,TIE L. Distributed robust finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems[J]. International Journal of Systems Science,2014,47(6):1366-1375.
- [18] LIU J,YU Y,SUN J,et al. Distributed event-triggered fixed-time consensus for leader-follower multiagent systems with nonlinear dynamics and uncertain disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control,2018,28(11):3543-3559.

(责任编辑:齐敏华)