

自触发改进一致性算法的孤岛微电网分布式二次控制策略

马骏杰, 周托[†]

(山东工商学院 信息与电子工程学院, 山东 烟台 264000)

摘要: 提出一种基于动态事件触发机制的改进分布式协同控制算法, 用于实现孤岛微电网频率、电压的恢复及有功功率的精确分配。首先, 在采样数据框架下, 通过引入内部动态变量对传统事件触发条件进行优化, 构造出具有自适应调节能力的触发阈值, 系统能够有效降低触发频次, 同时避免 Zeno 行为的发生; 其次, 设计一种基于积分算子的分布式误差预估策略, 构建出具有状态预测能力的自触发机制, 该机制使得事件触发判断完全克服了周期性采样的缺点, 实现了在非连续通信条件下的自主决策; 然后, 基于 Lyapunov 稳定性理论对该算法进行收敛性分析, 并利用 MATLAB/Simulink 搭建典型孤岛微电网仿真模型验证所提算法的有效性; 最后, 通过与传统事件触发方法进行比较, 结果表明所提方法在维持同等控制性能的前提下可有效减少系统开销。

关键词: 微电网; 二次控制; 动态事件触发控制; 自触发控制; 触发频次; 系统开销

中图分类号: TM76 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1075

引用格式: 马骏杰, 周托. 自触发改进一致性算法的孤岛微电网分布式二次控制策略 [J]. 控制与决策, xxxx, x(x): xxxx-xxxx.

Self-triggered improved consensus algorithm distributed secondary control for islanded microgrids

MA Jun-jie, ZHOU Tuo[†]

(School of Information and Electronic Engineering, Shandong Technology and Business University, Yantai 264000, China)

Abstract: In this paper, an improved distributed dynamic event-triggered secondary control algorithm is proposed to restore frequency and voltage, as well as to achieve accurate active power sharing in islanded AC microgrids. Based on the sampled-data mechanism, the proposed design begins with the optimization of the event-triggering conditions by introducing internal dynamic variables. This approach not only reduces the triggering frequency but also inherently prevents Zeno behaviour. Subsequently, a self-triggered scheme is introduced using an integral operator to predict estimation errors. This allows event checking to rely only on the states at triggering instants, thereby eliminating the need for unnecessary periodic sampling. Furthermore, a rigorous stability analysis is conducted using Lyapunov stability theory. Finally, the effectiveness is demonstrated through numerical simulations in MATLAB/Simulink. Compared to the traditional methods, the proposed scheme significantly reduces system overhead without compromising control performance.

Keywords: microgrid; secondary control; dynamic event-triggered control; self-triggered control; triggering frequency; system overhead

0 引言

微电网作为分布式可再生能源利用的重要形式, 能够有效平抑可再生能源发电的间歇性与波动性, 提升能源利用效率^[1]. 为保证在与主网脱离后仍能稳定运行, 微电网需具备可靠的孤岛运行能力, 目前普

遍采用分层控制结构^[2]. 在该结构中, 一次控制用于实现各个分布式发电 (Distributed Generation, 简称 DG) 之间的自主功率分配; 二次控制负责消除一次控制引入的频率与电压稳态偏差, 并确保各单元间功率的精确分配; 三次控制侧重于系统的经济运行

收稿日期: xxxx-xx-xx; 录用日期: 2026-01-29.

基金项目: 山东省重点研发计划资助 (2024CXGC010704); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2024QF255); 烟台市科技创新发展计划基础研究项目 (2024YT06000226).

[†]通信作者. E-mail: tzhou@sdtbu.edu.cn.

与优化调度. 本文的研究内容为微电网的二次控制. 传统的集中式控制需借助专用的微电网中央控制器, 以实现与所有分布式发电单元的信息交互. 集中控制需构建覆盖所有单元的通信网络, 以实现中央控制器与各分布式单元间的信息汇集, 这对通信链路的带宽与可靠性提出了较高要求. 随着系统规模不断扩大, 控制架构需要重新设计, 鉴于微电网本身固有的分布式特性, 该方法在系统可扩展性方面存在明显不足. 此外, 该架构本身存在单点故障风险: 一旦中央控制器发生故障, 将导致整个控制系统瘫痪, 系统可靠性较低.

在此背景下, 基于多智能体系统的分布式控制为微电网提供了一种有效的替代方案^[3]. 文献[4]提出了一种面向未来能源互联网的多智能体微电网分布式控制方案, 通过协调内外部智能体交互实现了频率及电压恢复. 以此为基础, 研究者们相继提出了有限时间控制^[5]与固定时间控制^[6-7]等优化方案. 为进一步提升系统收敛性能, 文献[8-9]提出了基于预设时间一致性的分布式优化控制策略, 该控制策略通过控制器中的可调参数直接预设其收敛时间上界, 能在不依赖系统初始条件的情况下, 有效提升二次控制的快速性和灵活性. 相较于集中式控制, 这类方法仅需通过与相邻单元进行局部通信即可实现全局协同控制目标, 在微电网二次控制中展现出显著优势. 然而, 这类方法均建立在连续时间域框架下, 其信息传输依赖于实时通信. 在实际系统中, 通信频率通常设置得极高, 使得各单元以固定高频进行信息交互, 从而逼近连续时间控制的效果, 即所谓时间触发机制^[10]. 在该机制下, 当系统状态趋于稳定时, 各单元仍需进行高频通信, 这无疑进一步加剧了通信负担.

区别于传统的通信模式, 将事件触发机制引入控制器设计已成为近年来微电网二次控制领域的研究热点^[11]. 该机制以“按需触发”为核心原则, 控制器仅在满足特定事件触发条件时才执行通信与控制更新. 在此框架下, 多种事件触发控制结构被提出. 文献[12-13]分别设计了领导者-跟随者和无领导者一致性算法, 实现了微电网频率与电压的恢复以及有功功率的精确分配. 考虑拒绝服务 (DoS) 攻击的影响, 文献[14]设计了带有预测补偿功能的事件触发二次控制方案. 此外, 文献[15]结合有限时间控制思想, 提出了一种事件驱动协同控制策略, 消除了由功率失配引起的频率偏差, 同时解决了荷电状态的均衡问题, 提高了系统的收敛速度. 需要指出的是, 上述研究中的触发阈值均设为固定值, 其大小不随

系统状态或时间动态调整, 属于静态触发机制. 由于阈值固定, 该机制仍可能产生冗余触发事件, 引发不必要的通信负担. 动态事件触发机制通过引入动态变量自适应调整触发阈值, 展现出更高的灵活性, 被视为缓解通信压力的更优方案. 文献[16]提出了一种基于动态事件触发机制的二次频率控制方法, 并通过与静态事件触发控制进行对比, 验证了动态触发机制在减轻系统通信负担方面的优越性. 在此基础上, 文献[17]优化了触发条件, 进一步减少了冗余控制数据. 此外, 动态触发方案还被应用于在线式UPS 并联系统以实现准确的功率分配^[18], 且应用于直流微电网系统以维持输出电流的均衡^[19]. 更多相关研究可参考文献[20-23]. 然而, 无论是静态触发还是动态触发, 现有事件触发机制仍存在两个问题亟待解决: 首先, 所有事件触发控制都必须避免 Zeno 行为, 即确保任意两次触发事件间隔严格大于零. 该问题的理论分析较复杂, 在存在外部扰动时尤为突出; 其次, 触发条件需要被持续监测, 这在实际的数字控制平台中难以直接应用.

为克服上述局限, 采样数据机制被引入事件触发控制, 形成了“采样数据型事件触发控制”方法^[24], 该方法的核心是将连续的触发条件监测转变为离散采样时刻的周期性检测. 文献[25-26]基于采样数据机制, 实现了交流微电网的频率恢复与功率分配; 进一步地, 文献[27]探讨了异步通信环境下交流微电网的一致性. 此外, 文献[28]将该方法拓展至直流微电网系统, 有效解决了系统的均流问题. 由于事件触发被限制在离散的采样时刻, 其最小间隔被约束为至少一个采样周期, 因而从根本上消除了 Zeno 行为. 其次, 由于无需连续监测系统状态, 控制更新频率也显著降低. 这些特性相较于传统方法在资源利用方面具有显著优势. 然而, 这类方案仍存在不足: 每个采样时刻均需执行状态测量, 这一过程本身仍会产生不可忽视的资源开销, 在一定程度上削弱了事件触发控制的优势. 为此, 部分研究转向基于自触发机制的优化算法. 文献[29]提出了一种用于频率恢复的自触发协调策略, 文献[30-31]设计了交流微电网的自触发二次控制方案, 以实现控制目标的一致性. 此外, 文献[32]针对通信拓扑切换场景提出了优化控制方法. 然而, 这些算法的控制性能依赖于精确的预设参数或系统模型, 预测算法复杂, 计算成本高昂.

针对现有研究的不足, 本文提出了一种基于动态事件触发机制的改进型分布式协同控制算法, 用于解决孤岛微电网的频率电压恢复与精确有功功率

分配问题. 本文主要贡献如下:

1) 提出了一种基于采样数据机制的新型动态事件触发一致性算法. 与文献 [25-26] 中的方案相比, 本算法通过引入内部动态变量自适应调整触发阈值, 优化了原有触发机制, 延长了平均事件间隔时间, 有效降低了分布式电源之间的通信频次;

2) 相较于文献 [21-23] 的事件触发机制, 本文提出的动态事件触发方案不依赖于全局信息 (如拉普拉斯矩阵特征值), 实现了完全分布式控制;

3) 在动态事件触发算法的基础上, 本文进一步提出了一种优化控制策略. 该策略仅通过对邻居节点在触发时刻的状态进行积分来重构估计误差, 从而免除了持续采样的需求. 该控制策略在维持原有控制性能的前提下, 显著降低了系统资源消耗. 尤为重要, 相较于文献 [29-32] 中的自触发算法, 本方案摆脱了对精确系统模型的依赖, 并可无缝嵌入事件触发控制框架之中.

1 预备知识

1.1 代数图论

$G = (V, E, A)$ 为描述多智能体系统的无向通信拓扑. 其中, $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ 为顶点集, $E \subseteq V \times V$ 为边集, $A = A^T = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 为邻接矩阵, 若 v_i 可接收 v_j 的信息, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. $\mathcal{N}_i = \{j \in V, a_{ij} = 1\}$ 表示智能体 i 的邻居集. $L = D - A$ 为拉普拉斯矩阵, 其中, $D = \text{diag}(d_i)$,

$$d_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}.$$

1.2 一次控制与二次控制

本文将 DG 单元等效为三相电压源型逆变器, 其内部结构如图 1 所示.

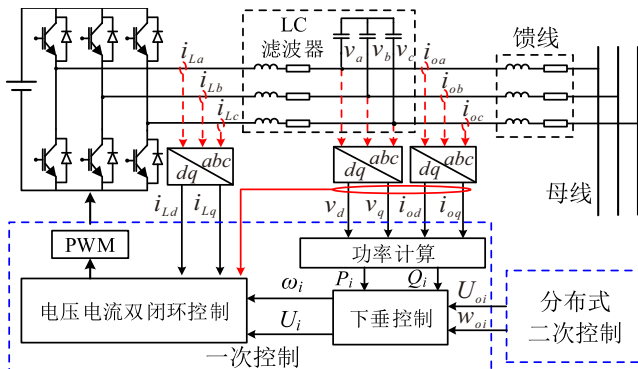


图1 基于逆变器的分布式发电单元控制结构图

系统结构包含多个内部控制回路. 其中, v_a 、 v_b 、 v_c 为检测的三相电容电压, i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为三相电感电流, i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} 为三相输出电流, 通过 abc/dq 坐标变换实现解耦.

1) 一次控制

一次控制包含功率计算单元、下垂控制器和电压电流双闭环控制单元. 其中, 功率计算单元计算本机的输出功率, 随后下垂控制器依据该功率值自动调整输出电压和频率, 并将其作为电压电流双闭环控制单元的参考, 最后通过 PWM 技术调节逆变器输出, 实现 DG 之间功率的合理分配. 作为一次控制的核心环节, 下垂控制器以二次控制提供的设定值为基准, 结合本机输出功率, 利用下垂公式计算出频率与电压的参考值. 假设系统输出阻抗呈感性, 其代数关系由式 (1) 给出.

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_{oi} - m_{pi} P_i \\ U_i = U_{oi} - n_{qi} Q_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, 下角标 i 表示逆变器索引; ω_i 和 U_i 分别为其工作频率和电压参考值; ω_{oi} 和 U_{oi} 分别为二次控制提供的频率与电压的设定值; P_i 和 Q_i 分别为输出的有功功率与无功功率; m_{pi} 和 n_{qi} 表示对应的下垂系数.

2) 二次控制

尽管下垂控制可以实现逆变器间的功率自主分配, 却会引入频率与电压的偏差. 下垂系数越高, 功率分配性能越好, 但频率与电压的偏差越大, 这也是下垂控制的固有矛盾. 因此, 需要二次控制进行恢复, 从而实现以下控制目标, 即对于 $\forall i, j = 1, 2, \dots, N$ 且 $i \neq j$, 有:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} |p_i(t) - p_j(t)| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_i(t) - \omega_{ref}| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |U_i(t) - U_{ref}| = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_{ref} 、 ω_{ref} 分别为电压和频率的额定值. 此外, 为简洁起见定义 $p_i(t) = m_{pi} P_i(t)$.

需要说明的是, 下垂控制通过调节输出有功响应频率变化, 稳态频率仅取决于总有功负荷与各电源的下垂特性, 不受线路阻抗影响. 但线路阻抗会影响各电源的输出电压, 且因阻抗不匹配, 系统难以兼顾精确的电压恢复与无功功率均分. 故本文不考虑无功的分配控制.

对式 (1) 求导可得:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{oi} - m_{pi} \dot{P}_i \\ \dot{U}_i = \dot{U}_{oi} - n_{qi} \dot{Q}_i \end{cases} \quad (3)$$

考虑有功功率、频率和电压控制具有一阶系统的动态特性, 即 $u_{pi}(t) = \dot{p}_i(t)$, $u_{\omega i}(t) = \dot{\omega}_i(t)$ 和 $u_{vi}(t) = \dot{U}_i(t)$, 则设定值 U_{oi} 和 ω_{oi} 可改写为:

$$\begin{cases} \omega_{oi} = \int (u_{\omega i} + u_{pi}) dt \\ U_{oi} = \int (u_{vi} + n_{qi} \dot{Q}_i) dt \end{cases} \quad (4)$$

故对设定值 U_{oi} 和 ω_{oi} 的设计可转化为对控制器 $u_{pi}(t)$, $u_{\omega i}(t)$ 和 $u_{vi}(t)$ 的设计, 具体将在后文展开.

2 分布式二次控制器设计

本节首先设计有功功率控制控制器. 随后, 遵循类似的原理, 再设计频率与电压控制器.

2.1 分布式有功功率二次控制器设计

2.1.1 事件触发条件设计

令采样周期为 h , 且规定各 DG 仅在采样时刻 $t \in \{0, h, 2h, \dots, \vartheta h | \vartheta \in \mathbb{N}^+\}$ 对状态量进行监测. 在 ϑh 采样时刻, 有功功率可表示为 $p_i(\vartheta h) = m_{pi} P_i(\vartheta h)$. 为减轻各单元间的通信负担, 引入事件触发机制. 设 $0, \vartheta_1^i h, \vartheta_2^i h, \dots, \vartheta_k^i h, k \in \mathbb{N}^+$ 为事件触发序列, 其中, $\vartheta_k^i h$ 表示第 i 台逆变器的第 k 次事件触发时刻, 这表明事件仅在某些离散采样时刻被触发.

则有功功率控制器设计为:

$$\begin{cases} u_{pi}(t) = \dot{p}_i(t) = k_p \hat{\delta}_{pi}(t), t \in [\vartheta_k^i h, \vartheta_{k+1}^i h) \\ \hat{\delta}_{pi}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\hat{p}_j(t) - \hat{p}_i(t)) \end{cases} \quad (5)$$

其中, k_p 为有功控制增益, $\hat{p}_i(t) = p_i(\vartheta_k^i h)$ 为第 i 台逆变器在最新事件触发时刻的有功功率, $\hat{p}_j(t)$ 为从其邻居节点最新接收的功率值. 与文献[31]不同, 本文将估计误差定义为事件触发时刻的有功功率与后续采样时刻有功功率之差, 则在区间 $[\vartheta_k^i h, \vartheta_{k+1}^i h)$ 内, 有功估计误差可表示为:

$$e_{pi}(\vartheta_k^i h + sh) = p_i(\vartheta_k^i h) - p_i(\vartheta_k^i h + s^{pi} h) \quad (6)$$

其中, $s^{pi} = 1, 2, \dots$

注 1 变量 s^{pi} 表示第 i 台逆变器在连续两次事件触发时刻之间的采样次数. 当该逆变单元发生新的触发事件时, 该计数器将重置为零. 因此, ϑ_k^i 可视为第 i 台逆变器在当前采样时刻 ϑ 之前 (或恰处于该时刻) 最近一次的触发时刻. 图 2 展示了数据采样机制下的触发序列示意图. 鉴于事件触发仅发生于采样时刻, 因此连续两次事件触发时刻的间隔必然不小于一个采样周期, 从而自然避免了 Zeno 行为. 基于此标记方法, 当前采样索引 ϑ 可表示为 $\vartheta_k^i + s^{pi}$.

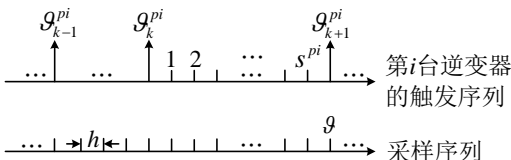


图2 数据采样机制下触发序列示意图

相应地, (6) 可改写为:

$$e_{pi}(\vartheta h) = \hat{p}_i(t) - p_i(\vartheta h). \quad (7)$$

有功功率也可记为:

$$p_i(t) = p_i(\vartheta h) + (t - \vartheta h) \dot{p}_i(t), t \in [\vartheta h, \vartheta h + h). \quad (8)$$

定理 1 对于一个包含 N 台 DG 的孤岛微电网, 假设通信拓扑 \mathbf{G} 是无向连通的, 则在控制器 (5) 及事件触发控制器 (9) 的作用下, 所有单元将渐近实现式 (2) 中的有功控制目标.

$$\begin{aligned} \vartheta_{k+1}^i &= \vartheta_k^i + \min_{s^{pi} > 0} \{s^{pi} |\beta_p^{-1} d_i e_{pi}^2(\vartheta_k^i h + sh) - \\ &\sigma_p(1 - \beta_p d_i) \hat{\delta}_{pi}(t) > \eta_{pi}(t)\}. \end{aligned} \quad (9)$$

式中,

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_{pi}(t) &= -\eta_{pi}(t) + k_p [\sigma_p(1 - \beta_p d_i) \hat{\delta}_{pi}(t) - \\ &\beta_p^{-1} d_i e_{pi}^2(\vartheta_k^i h + sh)]. \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $0 < \sigma_p < 1$, $0 < \beta_p < d_i^{-1}$, $k_p > 0$, λ_L 为拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 的最大特征值, 采样周期需满足

$$0 < h < (1 - \sigma_p)(1 - \beta_p d_i) / k_p \lambda_L. \quad (11)$$

首先, 给出引理 1 以说明 $\eta_{pi}(t)$ 的重要性质.

引理 1 若初始值 $\eta_{pi}(0) > 0$, 则事件触发条件 (10) 中的内部动态变量 $\eta_{pi}(t)$ 恒为正.

证明 由式 (9) 可知, 不等式 $\beta_p^{-1} d_i e_{pi}^2(\vartheta_k^i h + sh) - \sigma_p(1 - \beta_p d_i) \hat{\delta}_{pi}(t) > \eta_{pi}(t)$ 仅在触发时刻成立, 因此结合式 (10) 有:

$$\dot{\eta}_{pi}(t) \geq -\eta_{pi}(t) - k_p \eta_{pi}(t) \quad (12)$$

可推得

$$\eta_{pi}(t) \geq e^{-(1+k_p)t} \eta_{pi}(0) \quad (13)$$

因此当 $\eta_{pi}(0) > 0$, 可保证 $\eta_{pi}(t)$ 始终非负.

证明完毕.

注 2 式 (9) 中的阈值通过变量 $\eta_{pi}(t)$ 进行动态调节. 值得注意的是, 当 $\eta_{pi}(t) = 0$ 时, 该事件触发条件即为文献 [24,26] 中的传统表示形式, 这表明本文的触发条件是一种更广义化的表述. 此外, $\eta_{pi}(t)$ 的非负性保证了式 (10) 比传统方法具有更严格的触发条件. 因此, 由 (9) 生成的事件间隔必然不小于传统事件触发机制所产生的事件间隔, 从而进一步减少了触发次数.

定理 1 的完整证明如下.

证明 为简化表述, 定义 $\mathbf{p}(t) = [p_1(t), \dots, p_N(t)]^T$, $\mathbf{e}_p(t) = [e_{p2}(t), \dots, e_{pN}(t)]^T$, $\hat{\delta}_p(t) = [\hat{\delta}_{p1}(t), \dots, \hat{\delta}_{pN}(t)]$, 式 (8) 则可以写成如下的紧凑格式:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = k_p \hat{\delta}_p(t) = -k_p \mathbf{L} \hat{\mathbf{p}}(t). \quad (14)$$

定义李雅普诺夫候选函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} \mathbf{p}^T(t) \mathbf{L} \mathbf{p}(t) + \sum_{i=1}^N \eta_{pi}(t), t \in [\vartheta h, \vartheta h + h). \quad (15)$$

由于 $\frac{1}{2} \mathbf{p}^T(t) \mathbf{L} \mathbf{p}(t) > 0$ 且 $\eta_{pi}(t) > 0$, 故 $V(t) > 0$. 进一步, 对 $V(t)$ 求导得:

$$\dot{V}(t) = \mathbf{p}^T(t) \mathbf{L} \dot{\mathbf{p}}(t) + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t). \quad (16)$$

结合式 (5), (7) 和 (14) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= k_p (\mathbf{e}_p(\vartheta h) - \hat{\mathbf{p}}(t)) + \\ &k_p (t - \vartheta h) \mathbf{L} \hat{\mathbf{p}}(t)^T \mathbf{L} \mathbf{L} \hat{\mathbf{p}}(t) + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t) = \\ &- k_p \hat{\mathbf{p}}^T(t) \mathbf{L} \mathbf{L} \hat{\mathbf{p}}(t) + k_p \mathbf{e}_p^T(\vartheta h) \mathbf{L} \mathbf{L} \hat{\mathbf{p}}(t) + \\ &k_p^2 (t - \vartheta h) \hat{\mathbf{p}}^T(t) \mathbf{L}^T \mathbf{L} \mathbf{L} \hat{\mathbf{p}}(t) + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t) = \\ &- k_p \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) - k_p \mathbf{e}_p^T(\vartheta h) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) + \\ &k_p^2 (t - \vartheta h) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t). \quad (17) \end{aligned}$$

由于 $t \in [\vartheta h, \vartheta h + h)$, 有 $t - \vartheta h \leq h$, 结合不等式 $\hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) \leq \lambda_L \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t)$, (17) 可记为:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -k_p \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) - k_p \mathbf{e}_p^T(\vartheta h) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) + \\ &k_p^2 h \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t) \leq \\ &k_p [(k_p h \lambda_L - 1) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) - \mathbf{e}_p^T(\vartheta h) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t)] + \\ &\sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t). \quad (18) \end{aligned}$$

因为

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_p^T(\vartheta h) \mathbf{L} \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) &= \\ &\sum_{i=1}^N e_{pi}(\vartheta h) \sum_{j \in N_i} (\hat{\delta}_{pi}(t) - \hat{\delta}_{pj}(t)) = \\ &\sum_{i=1}^N d_i e_{pi}(\vartheta h) \hat{\delta}_{pi}(t) - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} e_{pi}(\vartheta h) \hat{\delta}_{pj}(t). \quad (19) \end{aligned}$$

将式 (19) 代入式 (18), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq k_p [(k_p h \lambda_L - 1) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p^T(t) \hat{\boldsymbol{\delta}}_p(t) - \\ &\sum_{i=1}^N d_i e_{pi}(\vartheta h) \hat{\delta}_{pi}(t) + \\ &\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} e_{pi}(\vartheta h) \hat{\delta}_{pj}(t)] + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t). \quad (20) \end{aligned}$$

由杨氏不等式 $xy \leq \frac{x^2}{2\beta_p} + \frac{y^2\beta_p}{2}$ ($\beta_p > 0$), 式 (20) 进一步可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \\ &k_p \left[\sum_{i=1}^N (k_p h \lambda_L - 1) \hat{\delta}_{pi}^2(t) + \sum_{i=1}^N \frac{\beta_p}{2} d_i \hat{\delta}_{pi}^2(t) \right] + \\ &\sum_{i=1}^N \frac{1}{\beta_p} d_i e_{pi}^2(\vartheta h) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \frac{\beta_p}{2} \hat{\delta}_{pj}^2(t) \quad (21) \end{aligned}$$

由于通信网络为无向全连通图, 则拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 为对称矩阵, 故式 (21) 第 4 项可简化为:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \frac{\beta_p}{2} \hat{\delta}_{pj}^2(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\beta_p}{2} d_i \hat{\delta}_{pi}^2(t). \quad (22)$$

将其代入式 (21), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq k_p \sum_{i=1}^N [(k_p h \lambda_L - 1 + \beta_p d_i) \hat{\delta}_{pi}^2(t) + \\ &\frac{1}{\beta_p} d_i e_{pi}^2(\vartheta h)] + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_{pi}(t). \quad (23) \end{aligned}$$

将 (10) 代入式 (23), 整理可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq k_p \sum_{i=1}^N [k_p h \lambda_L - (1 - \sigma_p)(1 - \beta_p d_i)] \hat{\delta}_{pi}^2(t) - \\ &\sum_{i=1}^N \eta_{pi}(t). \quad (24) \end{aligned}$$

由引理 1 可知 $\eta_{pi}(t) > 0$. 因此当采样周期满足 $h < (1 - \sigma_p)(1 - \beta_p d_i) / k_p \lambda_L$ 时, 式 (24) 为负定. 其中, $0 < \sigma_p < 1$, $0 < \beta_p < d_i^{-1}$.

证明完毕.

2.1.2 自触发控制器设计

由于引入了数据采样机制, 本方案将触发条件 (9) 的判断限定于离散采样时刻, 从而避免了传统连续监测方式带来的计算负担. 然而, 估计误差 $e_{pi}(\vartheta h)$ 的计算依赖于对状态量 $p_i(\vartheta h)$ 的周期性采样, 因此各逆变器在每个采样时刻仍须检测本地状态, 从而导致该触发机制尚未完全摆脱对实时信息的依赖. 为解决这一问题, 本文在动态事件触发架构的基础上, 提出了一种优化控制策略.

由式 (7) 可知, 其时间导数满足

$$\dot{e}_{pi}(t) = -\dot{p}_i(t) = -k_p \hat{\delta}_{pi}(t), t \in [\vartheta_k^{pi} h, \vartheta_{k+1}^{pi} h). \quad (25)$$

将式 (25) 在该区间内积分, 可得:

$$\begin{aligned} e_{pi}(t) &= \int_{\vartheta_k^{pi} h}^t \dot{e}_{pi}(t) dt = -k_p \int_{\vartheta_k^{pi} h}^t \hat{\delta}_{pi}(t) dt = \\ &k_p \int_{\vartheta_k^{pi} h}^t [\sum_{j=1}^N a_{ij} (\hat{p}_j(t) - \hat{p}_i(t))] dt. \quad (26) \end{aligned}$$

可见,在本机连续的两个触发时刻之间,即区间 $t \in [\vartheta_k^{pi}h, \vartheta_{k+1}^{pi}h)$ 内, $\hat{\delta}_{pi}(t)$ 仅在其邻居节点发生事件触发时才会更新,因此 $\hat{\delta}_{pi}(t)$ 可视为分段恒定. 进而估计误差 $e_{pi}(\vartheta h)$ 可通过对 $\hat{\delta}_{pi}(t)$ 进行积分获取:

$$e_{pi}(\vartheta h) = -k_p \left[\int_{\vartheta_k^{pi}h}^{l_m^{pi}h} \hat{\delta}_{pi}(t) dt + \hat{\delta}_{pi}(l_m^{pi}h)(s^{pi} - l_m^{pi}h) \right] = -k_p [e_{temp} + \hat{\delta}_{pi}(l_m^{pi}h)(s^{pi} - l_m^{pi}h)]. \quad (27)$$

其中, $e_{temp} = \sum_{q=1}^m \hat{\delta}_{pi}(l_{q-1}^{pi}h)(s^{pi} - l_{q-1}^{pi}h)$; m 表示第 i 台逆变器的邻居节点在区间 $[\vartheta_k^{pi}h, \vartheta_{k+1}^{pi}h)$ 内产生的事件触发次数; l_m^{pi} 表示对应的采样时刻.

结合图2,图3给出了相应变量的逻辑关系.

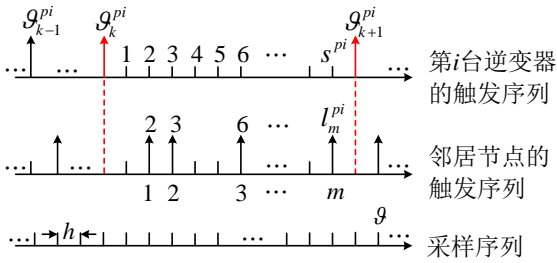


图3 该机制下相应变量的逻辑关系

以第 i 台单元为例, 自触发算法描述如下:

- 1: if (式 (9) 触发条件满足) then
- 2: $\hat{p}_i(t) \leftarrow p_i(\vartheta h)$; // 更新状态估计
- 3: $\hat{\delta}_{pi}(t) \leftarrow \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{p}_j(t) - \hat{p}_i(t))$;
- 4: $s^{pi} \leftarrow 0, l_m^{pi} \leftarrow 0, e_{temp} \leftarrow 0, e_{pi}(\vartheta h) \leftarrow 0$;
- 5: else
- 6: $s^{pi} \leftarrow s^{pi} + 1$; // 更新计数器
- 7: $e_{pi}(\vartheta h) \leftarrow -k_p [e_{temp} + \hat{\delta}_{pi}(t)(s^{pi} - l_m^{pi}h)]$;
- 8: if (接收到邻居节点的新状态) then
- 9: $\hat{\delta}_{pi}(t) \leftarrow \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{p}_j(t) - \hat{p}_i(t))$;
- 10: $e_{temp} \leftarrow e_{pi}(\vartheta h); l_m^{pi} \leftarrow s^{pi}$; // 变量暂存
- 11: end if
- 12: end if

注3 该算法每个采样周期执行一次, 流程如下:

若满足式 (9) 的事件触发条件, 则控制器将 $\hat{p}_i(t)$ 更新为当前本地状态并将其广播至所有邻居节点、根据式 (5) 计算 $\hat{\delta}_{pi}(t)$, 并将相关参数清零; 若不满足式 (10) 的事件触发条件, 则控制器将 s^{pi} 加 1、通过式 (27) 计算 $e_{pi}(\vartheta h)$, 并检测是否收到来自邻居节点的新状态.

若邻居节点未触发任何事件 (即本机未收到任何邻居的新状态), $e_{pi}(\vartheta h)$ 将继续基于当前 $\hat{\delta}_{pi}(t)$ 进

行积分; 否则, 控制器将利用接收到的邻居节点最新触发的值 $\hat{p}_j(t)$ 更新 $\hat{\delta}_{pi}(t)$, 并保存当前的 $e_{pi}(\vartheta h)$ 和 s^{pi} , 作为下一周期计算 (27) 的初始条件.

定理2 对于一个包含 N 台分布式电源的孤岛微电网, 假设通信拓扑 \mathbf{G} 是无向连通的, 则在控制器 (5) 及事件触发控制器 (9) 的作用下, 所有单元将渐近实现式 (2) 中的有功控制目标, 采样周期条件需满足 (11), 估计误差通过自触发算法计算得到.

证明: 由于自触发算法源于 (27) 且在数学上等价于 (7), 因此可保证 $V(t)$ 为非递增. 其余部分的证明与定理 1 类似, 在此省略.

注4 该算法的核心在于利用 $\hat{\delta}_{pi}(t)$ 的分段线性特性, 推导出非均匀采样条件下的估计误差 $e_{pi}(\vartheta h)$, 使得事件触发控制器能够完全摆脱对实时采样信息的依赖. 由于该算法在数学上等价于 (7), 因此该算法在显著降低系统资源的同时, 仍能完整保持系统的控制性能. 此外, 相较于文献 [29-32] 的自触发算法, 本方案可直接嵌入事件触发控制框架, 且无需依赖精确的系统动态模型, 具备良好的通用性, 可推广至几乎所有的事件触发方案.

2.2 分布式电压二次控制器设计

区别于有功功率控制器, 电压与频率控制器的设计采用“领导—跟随者”一致性架构. 定义对角矩阵 $\mathbf{G} = \text{diag}(g_i)$, 其中 g_i 为铆钉系数, 若该逆变器可接收主控的参考信号则 $g_i = 1$, 否则 $g_i = 0$; 此时系统拉普拉斯矩阵为 $\mathbf{H} = \mathbf{L} + \mathbf{G}$.

令 $0, \vartheta_1^{ui}h, \vartheta_2^{ui}h, \dots, \vartheta_k^{ui}h, k \in \mathbb{N}^+$ 为电压控制的事件触发序列. 其中, $\vartheta_k^{ui}h$ 表示第 i 台逆变器在电压控制中的第 k 次事件触发时刻. 电压控制器设计为:

$$u_{ui}(t) = \dot{U}_i(t) = k_u \hat{\delta}_{ui}(t), t \in [\vartheta_k^{ui}h, \vartheta_{k+1}^{ui}h). \quad (28)$$

其中,

$$\hat{\delta}_{ui}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{U}_j(t) - \hat{U}_i(t)) + g_i(U_{ref} - \hat{U}_i(t)). \quad (29)$$

式中, k_u 为电压控制增益; $\hat{U}_i(t) = U_i(\vartheta_k^{ui}h)$ 表示第 i 台逆变器在最新事件触发时刻的电压值; $\hat{U}_j(t)$ 表示从其邻居节点最新接收的电压值.

定义采样时刻的电压估计误差为:

$$e_{ui}(\vartheta_k^{ui}h + s^{ui}h) = U_i(\vartheta_k^{ui}h) - U_i(\vartheta_k^{ui}h + s^{ui}h). \quad (30)$$

其中, s^{ui} 为区间 $[\vartheta_k^{ui}h, \vartheta_{k+1}^{ui}h)$ 内的采样序号.

事件触发条件可设计为:

$$\vartheta_{k+1}^{ui} = \vartheta_k^{ui} + \min_{s^{ui} > 0} \{s^{ui} | \beta_u^{-1} \chi_i e_{ui}^2(\vartheta_k^{ui}h + s^{ui}h) - \sigma_u(1 - \beta_u \chi_i) \hat{\delta}_{ui}^2(t) > \eta_{ui}(t)\}. \quad (31)$$

其中, $\chi_i = d_i + \frac{g_i}{2}$, 且

$$\dot{\eta}_{ui}(t) = -\eta_{ui}(t) + k_u[\sigma_u(1 - \beta_u\chi_i)\hat{\delta}_{ui}^2(t) - \beta_u^{-1}\chi_i e_{ui}^2(\vartheta_k^{\omega_i}h + s^{\omega_i}h)]. \quad (32)$$

与有功功率控制类似, 得到如下定理:

定理3 对于一个包含 N 台 DG 的孤岛微电网, 假设通信拓扑 \mathbf{G} 是无向连通的, 则在控制器 (28) 及触发控制器 (31) 的作用下, 所有单元会实现式 (2) 中的电压控制目标. 其中, 采样周期满足 (33), 电压估计误差遵循与有功功率控制相同的自触发流程.

$$0 < h < (1 - \sigma_u)(1 - \beta_u\chi_i)/k_u\lambda_H. \quad (33)$$

其中, $0 < \sigma_u < 1$, $0 < \beta_u < \chi_i^{-1}$, $k_u > 0$, λ_H 为拉普拉斯矩阵 \mathbf{H} 的最大特征值.

证明 由于 (30) 中定义的误差项 $e_{ui}(\vartheta_k^{\omega_i}h + s^{\omega_i}h)$ 与式 (7) 具有相同形式, 因此可完全遵循有功功率自触发算法流程进行计算. 唯一区别在于需将李雅普诺夫函数修改为:

$$V(t) = \frac{1}{2}\varepsilon_u^T(t)\mathbf{H}\varepsilon_u(t) + \sum_{i=1}^N \eta_{ui}(t), t \in [\vartheta h, \vartheta h + h). \quad (34)$$

其中, $\varepsilon_{ui}(t)$ 为电压跟踪误差, 定义为 $\varepsilon_{ui}(t) = U_i(t) - U_{ref}$, 并有 $\varepsilon_u(t) = [\varepsilon_{u1}(t), \dots, \varepsilon_{uN}(t)]^T$. 剩余的证明部分与定理 2 类似, 此处予以省略.

证明完毕.

2.3 分布式频率二次控制器设计

与 2.2 相似, 令 $0, \vartheta_1^{\omega_i}h, \vartheta_2^{\omega_i}h, \dots, \vartheta_k^{\omega_i}h, k \in \mathbb{N}^+$ 为频率控制的事件触发序列, 则频率控制器设计为:

$$u_{\omega_i}(t) = \dot{U}_i(t) = k_{\omega}\hat{\delta}_{\omega_i}(t), t \in [\vartheta_k^{\omega_i}h, \vartheta_{k+1}^{\omega_i}h). \quad (35)$$

其中,

$$\hat{\delta}_{\omega_i}(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{\omega}_j(t) - \hat{\omega}_i(t)) + g_i(\omega_{ref} - \hat{\omega}_i(t)). \quad (36)$$

式中, k_{ω} 为频率控制增益; $\hat{\omega}_i(t) = \omega_i(\vartheta_k^{\omega_i}h)$ 表示第 i 台逆变器在最新事件触发时刻的频率值, $\hat{\omega}_j(t)$ 表示从其邻居节点最新接收的频率值.

定义采样时刻的频率估计误差为:

$$e_{\omega_i}(\vartheta_k^{\omega_i}h + s^{\omega_i}h) = \omega_i(\vartheta_k^{\omega_i}h) - \omega_i(\vartheta_k^{\omega_i}h + s^{\omega_i}h). \quad (37)$$

其中, s^{ω_i} 为区间 $[\vartheta_k^{\omega_i}h, \vartheta_{k+1}^{\omega_i}h)$ 内的采样序号.

事件触发条件可表示为:

$$\vartheta_{k+1}^{\omega_i} = \vartheta_k^{\omega_i} + \min_{s^{\omega_i} > 0} \{s^{\omega_i} | \beta_{\omega}^{-1}\chi_i e_{\omega_i}^2(\vartheta_k^{\omega_i}h + s^{\omega_i}h) - \sigma_{\omega}(1 - \beta_{\omega}\chi_i)\hat{\delta}_{\omega_i}^2(t) > \eta_{\omega_i}(t)\}. \quad (38)$$

其中,

$$\dot{\eta}_{\omega_i}(t) = -\eta_{\omega_i}(t) + k_{\omega}[\sigma_{\omega}(1 - \beta_{\omega}\chi_i)\hat{\delta}_{\omega_i}^2(t) - \beta_{\omega}^{-1}\chi_i e_{\omega_i}^2(\vartheta_k^{\omega_i}h + s^{\omega_i}h)]. \quad (39)$$

定理4 对于一个包含 N 台 DG 的孤岛微电网, 假设通信拓扑 \mathbf{G} 是无向连通的, 则在控制器 (35) 及触发控制器 (38) 的作用下, 所有单元会实现式 (2) 中的频率控制目标. 其中, 采样周期满足 (40), 频率估计误差遵循与有功功率控制相同的自触发流程.

$$0 < h < (1 - \sigma_{\omega})(1 - \beta_{\omega}\chi_i)/k_{\omega}\lambda_H. \quad (40)$$

式中, $0 < \sigma_{\omega} < 1$, $0 < \beta_{\omega} < \chi_i^{-1}$, $k_{\omega} > 0$, λ_H 为拉普拉斯矩阵 \mathbf{H} 的最大特征值.

该证明过程与定理 3 类似, 此处予以省略.

证明完毕.

所提二次控制器的整体结构如图 4 所示.

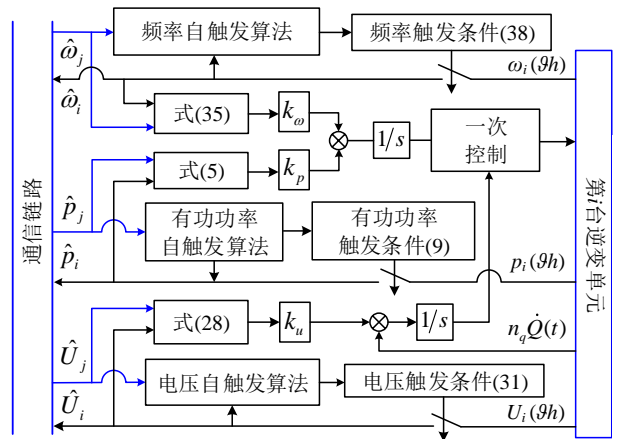


图4 本文设计的二次控制器整体控制框图

3 案例分析

为验证所提控制方案的有效性, 本节采用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建测试平台, 该测试

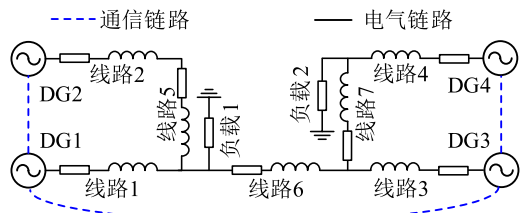


图5 测试平台示意图

表1 控制参数

参数	数值
线路1~线路4	0.026 Ω, 0.6 mH
线路5~线路7	0.016 Ω, 0.16 mH
负载1, 负载2	(40 kW, 20 kVar), (20 kW, 10 kVar)
ω_{ref}, U_{ref}	50 Hz, 380 V
k_{ω}, k_u, k_p	45, 26, 26
$\sigma_{\omega}, \sigma_u, \sigma_p$	0.2
$\beta_{\omega}, \beta_u, \beta_p$	0.3
h	0.0008

平台结构如图5所示. 系统详细参数列于表1.

3.1 收敛性能

初始阶段, 系统仅工作于下垂控制, 所有逆变单元共同为两个负载供电; 当 $t = 1$ s, 启动本文设计的二次控制器.

工况1: 所有逆变器均配置为相同下垂系数, 即 $m_p=5 \times 10^{-5}$, $n_q=6 \times 10^{-4}$. 图6给出了该过程的频率、有功功率和电压幅值响应. 初始阶段由于下垂控制

的作用, 各逆变器输出的有功功率可保持均分 (即 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4=15$ kW), 但频率和电压均偏离其额定值. 当 $t = 1$ s启用二次控制后, 频率和电压分别恢复至50 Hz和380 V, 并且该过程有功功率始终保持精确的分配. 图7给出了 $t = 1$ s至 $t = 2$ s之间各逆变器产生的事件触发序列. 可以看出, 各控制器的触发呈非周期性与间歇性, 并非连续进行. 由于各单元仅在本地区触发条件满足时才与邻居节点通信, 因此该机制可有效降低系统的通信负担.

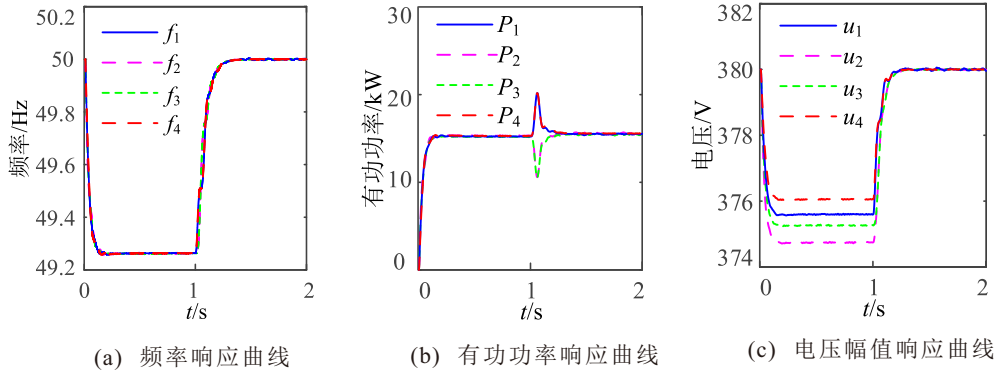


图6 工况1下的系统收敛性能

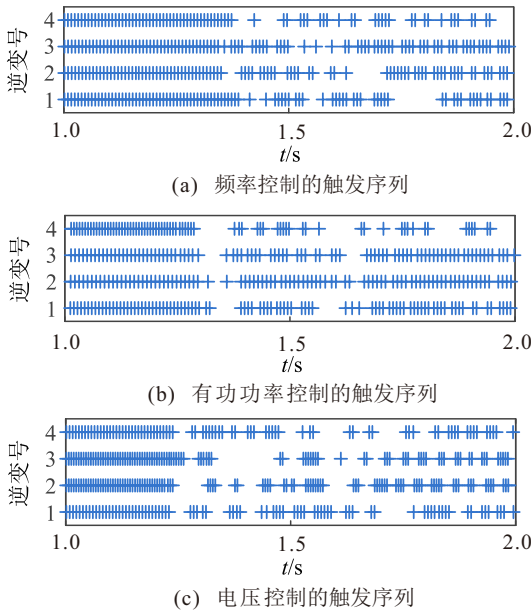


图7 工况1下的触发序列

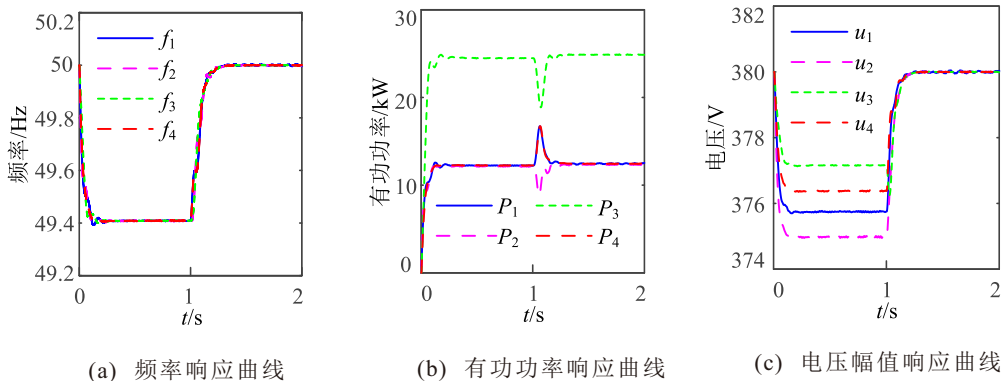


图8 工况2下的系统收敛性能

工况2: 本文还对下垂系数进行差异化配置, 即逆变器1、2、4的下垂系数设置为 $m_p=5 \times 10^{-5}$ 、 $n_q=6 \times 10^{-4}$, 逆变器3设置为 $m_p=2.5 \times 10^{-5}$ 、 $n_q=3 \times 10^{-4}$. 仿真波形如图8所示. 该工况下, 有功功率按下垂系数反比进行分配, 即 $P_1:P_2:P_3:P_4=1:1:2:1$, 电压与频率的恢复性能仍与工况1情形保持一致.

表2统计了 $t=1$ s至 $t=2$ s时段内, 两种配置下各单元的累计触发次数. 数据表明, 不同配置下的总触发次数基本相当, 均在100次左右, 验证了所提控制器对下垂系数配置变化的鲁棒性, 体现了其在孤岛微电网运行中的较强适应性.

3.2 通信延迟下的控制性能

本文所提出的控制器基于理想通信条件设计, 然而实际应用中存在的通信延迟可能导致控制器在

表2 两种工况下触发次数对比

逆变序号	频率		电压		有功	
	工况1	工况2	工况1	工况2	工况1	工况2
1	91	94	81	105	91	93
2	91	96	102	98	91	92
3	99	84	94	74	88	92
4	80	79	80	98	74	84

系统稳定条件的临界时刻之后才触发,继而引发系统震荡.本节初步研究通信延迟对系统性能的影响.由于篇幅限制,仅展示通信延迟下电压幅值的响应曲线,且所有单元均配置为相同下垂系数.如图9所示,当通信延迟为1.2 ms时,电压及频率呈现振荡收敛特性,此时系统仍能保持稳定;随着延迟增加,控制器出现振荡发散现象,最终导致系统失稳.

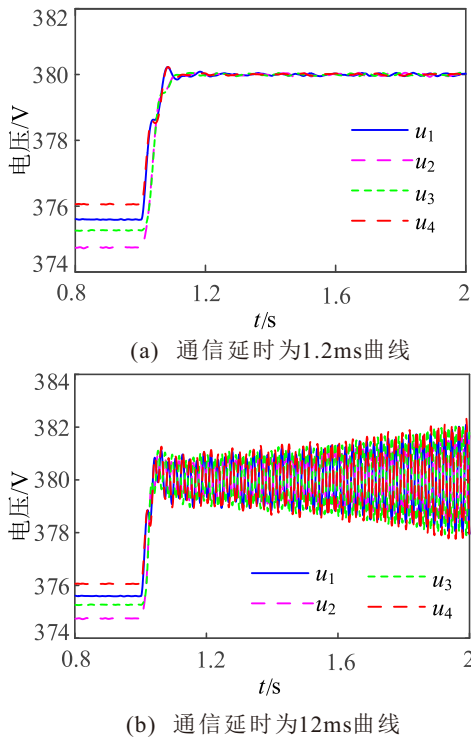


图9 通信延时下电压幅值曲线

仿真结果表明,本文设计的控制器对通信延迟具有一定耐受能力,较短的通信延迟虽不会破坏系统稳定性,但会降低系统收敛性.虽然现有文献已探讨了事件触发机制的延迟稳定性问题,但自触发控制在通信延迟下的稳定性分析仍尚未深入分析,可作为后续的研究方向.

3.3 动态性能

初始阶段,系统仅工作于下垂控制模式,所有逆变器共同为两个负载供电; $t=1\text{ s}$ 时启动本文设计的二次控制器; $t=2\text{ s}$ 时切除负载2,并在 $t=3\text{ s}$ 时重新投入,仿真结果如图10所示.如图可知,当负载突变时,各逆变器的频率和电压在经历短暂调节后迅速

恢复至额定值. $t=2\text{ s}$ 由于负载突卸,各单元的有功功率由15 kW下降至10 kW,但仍保持准确的分配精度.而在 $t=3\text{ s}$ 负载2重新投入后,有功功率恢复至15 kW.

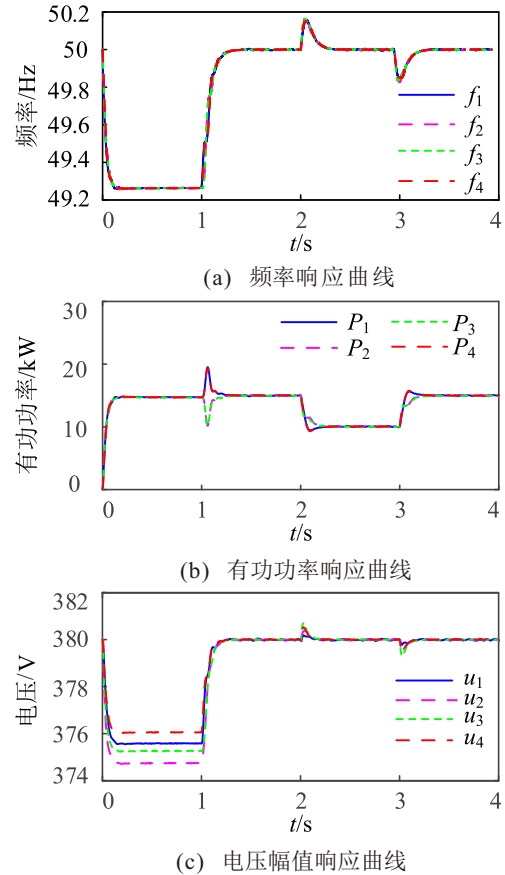


图10 负载突变时系统的响应曲线

图11为该过程对应的触发序列.如图所示,暂态时控制器需快速响应系统的动态变化,触发频率显著提高;而在进入稳态后,触发行为变得极为稀疏.这表明所设计的控制器具有良好的自适应能力,可有效减轻系统通信负担.

3.4 性能对比

本文将所提控制方案与文献[4]和文献[27]中的控制方案进行对比.仿真过程与节3.3一致.其中,文献[4]基于连续时间域设计,为接近连续控制性能,控制间隔设为 $50\text{ }\mu\text{s}$;文献[27]则基于采样机制,利用静态事件触发方法实现交流微电网协同控制,其采样周期与本文控制策略一致.由于篇幅限制,仅给出频率控制的性能对比结果,如图12所示.

结合图12(a)~(b)与图10(a)的对比可以看出,3种控制方法呈现出相近的控制性能.相较而言,由于文献[4]与文献[27]中的估计误差均为实时采样计算,二者在动态过程中呈现出相对较小的超调量.

在触发次数和采样次数方面,三种控制方式存在显著差异.表3汇总了1 s~4 s时段内三种控制算

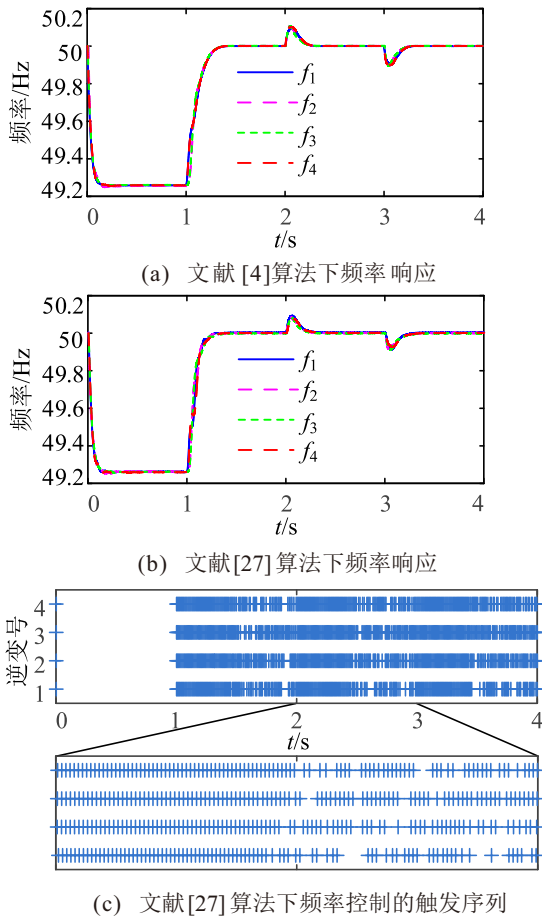


图11 负载突变时触发序列

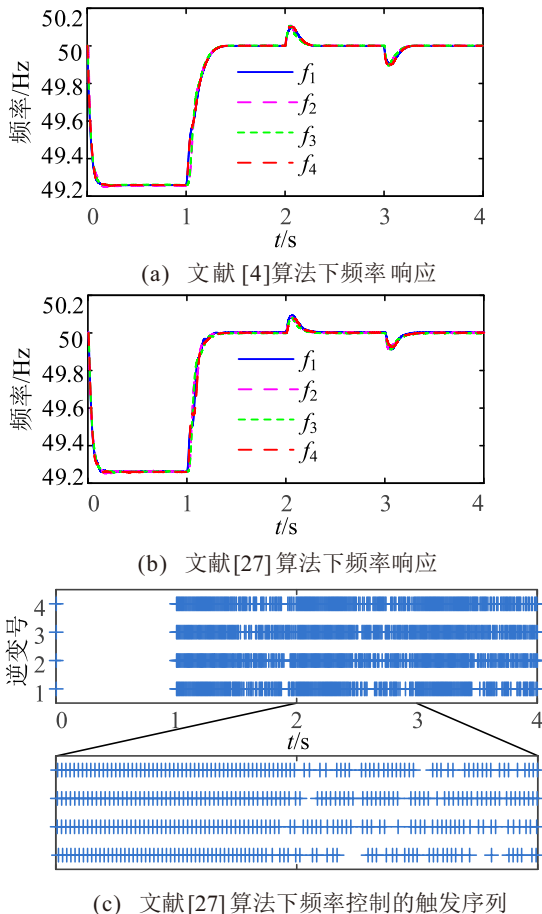


图12 两种算法下的频率响应

法的对比数据. 结果显示, 由于文献 [4] 采用时间触发机制, 其控制器每 $50 \mu\text{s}$ 更新一次 (对应 20×10^3 次/s), 因此触发次数与总采样次数均为最高. 文献 [27] 虽也采用事件触发控制, 表现出非周期、间歇性触发特征 (见图 12(c)), 但其机制为静态事件触发. 相比之下, 本文采用动态事件触发方案, 进一步降低了触发次数, 这与前文理论分析一致. 在采样次数方面, 本文方法仅在触发时刻进行数据采样, 即采样次数等于触发次数; 而文献 [27] 在每个控制周期均需采样, 累计采样次数高达 3750. 这一结果充分体现了本算法在节省通信与计算资源方面的显著优势.

表3 两种算法下触发次数和总采样次数对比

序号	次数	本算法	文献[27]	文献[4]
1	触发次数	246	286	60000
	采样次数	246	3750	60000
2	触发次数	238	300	60000
	采样次数	238	3750	60000
3	触发次数	240	310	60000
	采样次数	240	3750	60000
4	触发次数	242	303	60000
	采样次数	242	3750	60000

4 结论

本文研究了一种适用于孤岛微电网的分布式协同控制新架构, 通过引入动态事件触发与自触发融合机制, 实现了系统频率与电压的恢复控制及有功功率的优化分配. 该架构通过优化事件触发规则, 显著降低了通信与计算资源的占用率. 仿真结果表明, 本方案在动态调节速度、稳态精度和时滞鲁棒性方面均表现出较好的控制性能. 与典型分布式二次控制器相比, 本方案在保持相当收敛性能的前提下, 在降低系统资源消耗方面具有显著优势.

参考文献 (References)

- [1] 何晋伟, 王程锦, 历成元, 等. 新能源工业微电网运行控制问题分析及应对方案[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 3762-3784. (He J W, Wang C J, Li C Y, et al. Typical problems in operation and control of renewable energy industrial microgrid: Analysis and solutions[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3762-3784.)
- [2] 刘骁康, 王致恒, 邢兰涛, 等. 面向构网-馈网混合转换器的直流微电网分布式均流调压控制[J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(10): 2622-2636. (Liu X K, Wang Z H, Xing L T, et al. Distributed current sharing and voltage regulation control for DC microgrids with grid-forming and grid-feeding converters[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2025, 55(10): 2622-2636.)

- [3] 罗彪, 胡天萌, 周育豪, 等. 多智能体强化学习控制与决策研究综述[J]. *自动化学报*, 2025, 51(3): 510-539. (Luo B, Hu T M, Zhou Y H, et al. Survey on multi-agent reinforcement learning for control and decision-making[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(3): 510-539.)
- [4] Wang Y, Nguyen T L, Syed M H, et al. A distributed control scheme of microgrids in energy Internet paradigm and its multisite implementation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(2): 1141-1153.
- [5] Ning B D, Han Q L, Ding L. Distributed finite-time secondary frequency and voltage control for islanded microgrids with communication delays and switching topologies[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(8): 3988-3999.
- [6] Ghazzali M, Haloua M, Giri F. Fixed-time distributed voltage and reactive power compensation of islanded microgrids using sliding-mode and multi-agent consensus design[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022, 10(1): 232-240.
- [7] 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 X, Li Z, Cui G Z. Distributed robust fixed-time secondary control of islanded microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 143-153.)
- [8] 徐明林, 范德涛, 王镐哲, 等. 交流孤岛微电网的分布式预定义时间二次控制[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(13): 128-136. (Xu M L, Fan D T, Wang H Z, et al. Distributed predefined-time secondary control for islanded AC microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(13): 128-136.)
- [9] 李斌, 龚祥祥, 胡丹丹, 等. 基于预设时间一致性的虚拟同步发电机二次电压控制[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(10): 166-176. (Li B, Gong X X, Hu D D, et al. Secondary voltage control of virtual synchronous generator based on preset time consistency[J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(10): 166-176.)
- [10] Nowzari C, Garcia E, Cortés J. Event-triggered communication and control of networked systems for multi-agent consensus[J]. *Automatica*, 2019, 105: 1-27.
- [11] Chen J B, Yue D, Dou C X, et al. Static and dynamic event-triggered mechanisms for distributed secondary control of inverters in low-voltage islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(7): 6925-6938.
- [12] 董家伟, 龚春阳, 包俊, 等. 事件触发改进一致性算法的孤岛运行多逆变器微电网系统分布式二次调频方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(2): 476-489. (Dong J W, Gong C Y, Bao J, et al. Event-triggered improved consensus algorithm distributed secondary frequency regulation of multi-inverter microgrid systems with islanded operation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(2): 476-489.)
- [13] Meng W C, Wang X Y, Liu S C. Distributed load sharing of an inverter-based microgrid with reduced communication[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1354-1364.
- [14] Yang H Q, Li T S, Long Y, et al. Event-triggered distributed secondary control with model-free predictive compensation in AC/DC networked microgrids under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(1): 298-307.
- [15] 马溪原, 王鹏宇, 杨铎炯, 等. 基于有限时间事件驱动协同的微电网频率恢复和荷电状态平衡控制[J]. *高压电压技术*, 2024, 50(12): 5457-5467. (Ma X Y, Wang P Y, Yang D T, et al. Finite-time event-driven microgrid secondary frequency regulation and state of charge balance control[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(12): 5457-5467.)
- [16] 于永进, 孙国强, 樊英杰. 基于动态事件触发机制的孤岛微电网频率控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 60-71. (Yu Y J, Sun G Q, Fan Y J. A frequency control method for an islanded microgrid based on a dynamic event-triggered mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 60-71.)
- [17] 张奕, 李泽, 崔国增, 等. 动态事件触发下的孤岛微电网分布式协同控制[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(12): 2335-2344. (Zhang Y, Li Z, Cui G Z, et al. Distributed cooperative control of islanded microgrids under dynamic event trigger[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(12): 2335-2344.)
- [18] Lu J H, Savaghebi M, Zhang B F, et al. Distributed dynamic event-triggered control for accurate active and harmonic power sharing in modular on-line UPS systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(12): 13045-13055.
- [19] 孟范伟, 邵源政, 张煜, 等. 动态事件触发下直流微电网分布式二次控制[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2025, 46(6): 16-25. (Meng F W, Tai Y Z, Zhang Y, et al. Distributed secondary control for DC microgrid under dynamic event trigger[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2025, 46(6): 16-25.)
- [20] Jia H T, Zhu Z Y, Zhang Y L, et al. Dynamic event-triggered mechanism of SOC balancing for battery energy storage system[C]. 2022 China Automation Congress. Xiamen, 2023: 3030-3035.
- [21] Cheng T H, Kan Z, Klotz J R, et al. Event-triggered control of multiagent systems for fixed and time-varying network topologies[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(10): 5365-5371.
- [22] Ma D Z, Liu M L, Zhang H G, et al. Accurate power sharing and voltage regulation for AC microgrids: An event-triggered coordinated control approach[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(12): 13001-13011.

- [23] Liu W, Huang J. Event-triggered cooperative robust practical output regulation for a class of linear multi-agent systems[J]. *Automatica*, 2017, 85: 158-164.
- [24] Zhang W B, Zhao Y J, Wu G L, et al. Sampled-data control for linear systems on hybrid time domains[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(5): 2729-2733.
- [25] Guo G, Ding L, Han Q L. A distributed event-triggered transmission strategy for sampled-data consensus of multi-agent systems[J]. *Automatica*, 2014, 50(5): 1489-1496.
- [26] Li W R, Fan Y, Fang X H. An improved sampled-data-based distributed event-triggered secondary control in islanded microgrids[C]. 2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Chongqing, 2023: 2183-2187.
- [27] Mohammadi K, Azizi E, Choi J, et al. Asynchronous periodic distributed event-triggered voltage and frequency control of microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4524-4538.
- [28] Fan B, Peng J K, Yang Q M, et al. Distributed periodic event-triggered algorithm for current sharing and voltage regulation in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 577-589.
- [29] Chen Y L, Qi D L, Hui H X, et al. Self-triggered coordination of distributed renewable generators for frequency restoration in islanded microgrids: A low communication and computation strategy[J]. *Advances in Applied Energy*, 2023, 10: 100128.
- [30] Duan Q S, Tang Z, Ding D, et al. Distributed adaptive optimal secondary control for AC islanded microgrid based on dynamic self-triggered rules[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2025, 40(4): 3017-3028.
- [31] Chen Y L, Lao K W, Qi D L, et al. Distributed self-triggered control for frequency restoration and active power sharing in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(10): 10635-10646.
- [32] Shahabadi M Z, Atrianfar H, Gharehpetian G B, et al. Distributed self-triggered control of islanded microgrids under switching communication topologies[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(12): 13904-13915.

作者简介

马骏杰 (1982-), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为分布式电源控制, E-mail: 202214010@sdtbu.edu.cn;

周托 (1989-), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为多智能体协同控制, 微电网控制, E-mail: tzhou@sdtbu.edu.cn.