

有向通信拓扑下基于分布式触发控制的微电网二次控制方法

陈郁林^① 谷雨润^② 闫云凤*^③ 丁震宇^④

^①(海南浙江大学研究院 三亚 572025)

^②(澳门科技大学商学院 澳门 999078)

^③(浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

^④(国网桐乡市供电公司 桐乡 314500)

摘要:为实现微电网的灵活运行,分布式协同控制技术以其良好的灵活性、可靠性和可扩展性常被用于管控分布式可再生能源。然而,传统基于时间触发的分布式控制策略极大地浪费了分布式电源本地控制器的通信资源,降低了系统运行效率。基于此,该文提出了有向通信拓扑下基于分布式触发控制的微电网2次控制方法。通过有功功率分配控制设计有向通信拓扑下的分布式触发机制以及为频率恢复设计本地控制器,在实现微电网2次控制目标的同时降低了系统对通信资源的需求。理论证明表明了所设计控制方法不存在芝诺现象。仿真实验结果表明了所提出的频率2次控制方法的有效性和优越性。

关键词: 微电网; 2次控制; 分布式控制; 触发控制

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)11-3806-09

DOI: [10.11999/JEIT220866](https://doi.org/10.11999/JEIT220866)

Secondary Control Methods Based on Distributed Event-triggered Control in Microgrids under Directed Communication Network

CHEN Yulin^① GU Yurun^② YAN Yunfeng^③ DING Zhenyu^④

^①(Hainan Institute of Zhejiang University, Sanya 572025, China)

^②(School of Business, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China)

^③(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

^④(State Grid Tongxiang Power Supply Company, Tongxiang 314500, China)

Abstract: In order to achieve the flexible operation of microgrids, distributed cooperative control is always implemented to manage the distributed renewable energy resources within microgrids due to its better flexibility reliability and scalability. However, the time-triggered traditional distributed control strategies lead to a great waste of the communication resources of distributed generators' local controller, and hence reduce the efficiency of microgrids' operation. To this end, a distributed event-triggered control-based frequency secondary control method in microgrids under directed communication network is proposed. By designing an event-triggered mechanism for the active power sharing control under directed communication network and designing a local controller for the frequency restoration control, the secondary control of islanded microgrids can be achieved with greatly reduced communication resources. It is demonstrated by the theoretical analysis that the designed control method does not exist Zeno behavior. The simulation results show the effectiveness and superiority of the proposed control method.

Key words: Microgrid; Secondary control; Distributed control; Event-triggered control

收稿日期: 2022-06-29; 改回日期: 2022-10-01; 网络出版: 2022-10-11

*通信作者: 闫云凤 21210004@zju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(U190920018, 62001416), 中国博士后科学基金(2020M676719), 浙江省自然科学基金(Q21F030038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(U190920018, 62001416), Chinese Postdoctoral Science Foundation(2020M676719), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Q21F030038)

1 引言

随着“双碳”目标的提出,我国分布式可再生能源的发展进入了全新阶段。为充分消纳可再生能源需要发展更先进的智能电网技术。其中,微电网技术以其高度的运行灵活性和可靠性成为发展分布式可再生能源的关键技术之一^[1]。微电网能够充分利用分散安装的分布式可再生能源,并对系统内的资源进行灵活调控从而减小可再生能源带来的波动性,极大地提升了电网的灵活性以及对分布式可再生能源的消纳能力。

为实现微电网的灵活运行,信息通信和控制过程起到了至关重要的作用。微电网常用的控制结构为分层控制结构^[2,3]。分层控制结构将整个微电网的控制系统按照时间尺度分为3个层级:1次控制、2次控制和3次控制。其中,1次控制的响应速度最快,负责在系统发生扰动后快速实现频率和电压的稳定;2次控制的响应速度次之,主要用于恢复由1次控制引起的频率/电压偏差、实现功率的精确分配等;3次控制的响应速度最慢,其作用主要是实现系统的优化运行^[4]。

由于微电网中一般会包含多个分布式电源(Distributed Generator, DG),因此其不但可以并网运行,还可以脱离大电网孤岛运行。在并网运行时,微电网的频率和电压由大电网支撑。而当微电网孤岛运行时,系统的频率和电压则只能由微电网内的分布式电源承担,因此微电网孤岛运行时的运行调控更具挑战^[5]。因此,本文着眼于孤岛运行微电网的2次控制。

微电网中的2次控制通常可由3种模式实现,即集中式控制、分散式控制和分布式控制模式^[6]。其中,集中式控制需要控制中心收集信息,并与被控对象双向通信进行控制决策以及发送控制指令。这种控制模式不利于分布式电源的扩展,且容易发生单点故障。分散式控制是一种本地控制,不涉及任何通信。但其难以实现变化的全局控制目标。分布式控制则结合了二者的优点,能够通过本地控制和局部通信的方式实现全局控制目标。所以,其具有更好的灵活性和可扩展性。因此,分布式控制模式更适合用于含有大量分布式资源的微电网的2次控制。

近年来,对于微电网分布式2次控制的研究十分广泛^[7-10],但这些研究大多基于连续触发机制,即控制器不断地执行控制和通信操作,造成了通信资源的极大浪费^[11]。为提高控制系统的效率,基于事件触发的分布式2次控制逐渐发展起来^[12-17]。事件触发的基本原理为:为每个DG控制器设计触发

条件,控制器通过实时监测触发条件,决定是否执行控制和通信。在这种模式下,控制器的控制执行和通信是离散、非周期、间歇性的,相比于连续触发机制可极大地减小通信开销。然而,当前基于事件触发的微电网分布式2次控制大多局限于双向连通的通信网络,该条件对于通信网络的建设要求较高,且容易使控制目标受到通信故障的影响。此外,对于频率恢复和有功分配两个控制目标,以往的研究需要分别设计两个分布式触发控制器,因此需要建立两个通信网络和两套控制系统,相应地增加了系统的复杂性和建设成本。

基于此,本文提出一种有向通信拓扑下基于事件触发的分布式2次控制方法。本方法只针对有功功率分配控制建立分布式触发机制,而对于频率恢复控制,则通过本地控制跟踪参考频率,可同时实现孤岛微电网频率恢复和有功分配目标。而且,在建立分布式触发机制时,将通信拓扑要求放松为加权平衡有向拓扑(Weight Balanced Directed Topology, WBDT),进一步扩展了应用范围。

2 微电网频率恢复和有功功率分配2次控制问题

2.1 基于下垂控制的1次控制

微电网在孤岛运行时,其中的DGs可采用模拟同步发电机的下垂控制实现1次控制。下垂控制刻画了系统中频率/有功功率以及电压/无功功率的关系^[18],其中,频率/有功功率下垂关系具体为

$$\omega_i(t) = \omega_i^* - m_i P_i(t) \quad (1)$$

其中, $\omega_i(t)$ 为DG*i*的角频率,其与频率 f_i 的关系为: $\omega_i = 2\pi f_i$; ω_i^* 为下垂控制参考设定点,一般被选作2次控制的调节量; m_i 为下垂系数,通常取决于DG*i*的最大可调节出力,即 $m_i = 1/P_i^{\max}$; $P_i(t)$ 为DG*i*的输出功率。

通过下垂控制,DGs能在微电网发生负荷、出力变化或运行模式切换等扰动下根据下垂关系调整自己的出力,从而实现系统频率的快速稳定。但从下垂关系可知,系统在稳定后会发生频率偏离额定值的情况。因此,需要2次控制进一步进行调节。

2.2 分布式2次控制

在引言中已经分析,分布式控制模式更适用于微电网2次控制。微电网的分布式2次控制通常采用基于多智能体系统的分布式协同控制实现^[19]。微电网2次控制通常有两个主要目标:其一为恢复由下垂控制引起的频率偏差,其二为实现有功功率的精确分配,通常设定为使分布式电源按照相同的利用率进行出力。所以,微电网2次控制的两个主要目标可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \omega_i(t) &= \omega^r \\ \lim_{t \rightarrow \infty} p_i &= p_j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, ω^r 为系统的参考频率; $p_i = m_i P_i$, $\lim_{t \rightarrow \infty} p_i = p_j$ 意味着分布式电源能够按照相同的利用率进行出力。

在实现分布式2次控制时, 通常需要调节下垂控制的参考设定点, 设计辅助分布式控制器。具体根据式(1)可得到

$$\omega_i^* = \int (u_i^\omega + u_i^P) dt \quad (3)$$

其中, $u_i^\omega(t) = \dot{\omega}_i(t)$ 为分布式频率恢复控制器的控制输入, $u_i^P(t) = m_i \dot{P}_i(t)$ 为分布式有功功率分配控制器的控制输入。

通信网络对于微电网分布式2次控制十分重要。通信网络通常用有向图(节点间单向通信的图) $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 表示。其中 \mathcal{V} 为DGs的集合, \mathcal{E} 为通信链路的集合。一条通信链路可以定义为 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 意味着DG*i*可以收到DG*j*的信息, 即DG*j*为DG*i*的信息发出邻居。定义DG*i*的信息发出邻居集合为 $\mathcal{N}_i = \{j | (i, j) \in \mathcal{E}\}$ 。相反, 即DG*i*为DG*j*的信息接收邻居。为刻画通信网络, 定义加权邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$, 其中当 $(i, j) \in \mathcal{E}$ 时, $a_{ij} > 0$, 通常取 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。定义DG*i*的出度和入度分别为 $d_i^{\text{out}} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 和 $d_i = \sum_{i=1}^n a_{ij}$ 。那么, 拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 定义为: $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$, 其中 $\mathbf{D} = \text{diag}\{d_i\}$ 。如果任意两个DGs之间都有1条信息通路, 则称该通信网络是强连通的。若再满足 $d_i^{\text{out}} = d_i$, 则称通信网络是加权平衡网络。

分布式频率恢复控制可采用领导-跟随一致性算法实现^[8]

$$u_i^\omega(t) = -k_\omega \left[\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\omega_i(t) - \omega_j(t)) + b_i (\omega_i(t) - \omega^r) \right] \quad (4)$$

其中, $b_i \in \{0, 1\}$ 定义了DG*i*是否能收到参考频率。

分布式有功功率分配控制通常可采用平均一致性算法实现^[7]

$$u_i^P(t) = -k_P \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (p_i(t) - p_j(t)) \quad (5)$$

基于上述控制器设计, 可分布式地实现微电网的2次控制目标式(2)。然而, 分别对两个控制目标设计分布式控制系统极大地增加了系统的复杂性和通信网络建设成本。为同时减小通信开销和降低系统的复杂性, 本文提出基于分布式触发控制的孤岛微电网频率2次控制方法, 具体控制器设计将于第3节详细介绍。

3 基于事件触发的微电网分布式频率2次控制设计

3.1 分布式有功功率分配触发控制设计

设计分布式有功功率分配触发控制器为

$$u_i^P(t) = -k_P \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i(t) - \hat{p}_j(t)) \quad (6)$$

其中, $\hat{p}_i(t)$ 为 $p_i(t)$ 的估计值, 满足 $\hat{p}_i(t) = p_i(t_k^i)$, $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$, t_k^i 为DG*i*功率分配控制器的第*k*次触发时刻, 通常定义为

$$t_k^i = \min\{t > t_{k-1}^i | f_i(t) \geq 0\} \quad (7)$$

其中, $f_i(t)$ 为待设计的DG*i*功率分配控制器的触发函数。根据控制器的收敛性证明(将在定理1中给出), 设计得到触发函数为

$$f_i(t) = e_i^2(t) - \frac{\sigma_i}{4d_i} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 \quad (8)$$

其中, $e_i(t) = \hat{p}_i(t) - p_i(t)$ 为估计误差, $\sigma_i \in (0, 1)$ 为灵活性调节系数。

此控制器的工作原理为: $\hat{p}_i(t) = p_i(t_k^i)$, $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$ 意味着只有在触发时刻 t_k^i 时, DG*i*的控制器才利用实际状态 $p_i(t_k^i)$ 更新控制输入, 其他时刻, 即 $t \in (t_k^i, t_{k+1}^i)$ 时保持不变。所以 $u_i(t)$ 是分段连续的。触发时刻 t_k^i 是由保证控制器收敛的触发函数式(8)决定的。基于此, 可在不连续触发的条件下实现微电网有功功率分配控制。以下定理给出了所设计控制器的收敛性。

定理1 对于包含*N*个DGs的微电网, 若DGs间通过连通的加权平衡有向通信拓扑相互通信, 如果每个DG配备了分布式触发控制器式(6), 并依据设计的触发函数式(8)和触发时刻式(7)触发控制器, 那么, 微电网系统能够分布式地实现有功功率分配2次控制目标 $\lim_{t \rightarrow \infty} p_i = p_j$ 。

证明 定义李雅普诺夫函数

$$V(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} (\mathbf{p} - \bar{\mathbf{p}})^T (\mathbf{p} - \bar{\mathbf{p}}) \quad (9)$$

这里用粗体小写字母表示列向量, 其中, $\bar{\mathbf{p}} = \frac{1}{N} (\mathbf{1}_N^T \mathbf{p}) \mathbf{1}_N$ 为常数向量, $\mathbf{1}_N = \underbrace{[1, 1, \dots, 1]^T}_{N \uparrow}$ 。

对式(9)求导得

$$\dot{V} = (\mathbf{p} - \bar{\mathbf{p}})^T \dot{\mathbf{p}} = -k_P \mathbf{p}^T \mathbf{L} \dot{\mathbf{p}} - k_P \bar{\mathbf{p}}^T \mathbf{L} \dot{\mathbf{p}} = -k_P \mathbf{p}^T \mathbf{L} \dot{\mathbf{p}} \quad (10)$$

这里用到 $\mathbf{1}_N^T \mathbf{L} = \mathbf{0}_N$ 。将估计误差 $\mathbf{e}(t) = \hat{\mathbf{p}}(t) - \mathbf{p}(t)$ 代入式(10)可得

$$\dot{V} = -k_P \hat{\mathbf{p}}^T \mathbf{L} \dot{\hat{\mathbf{p}}} + k_P \mathbf{e}^T \mathbf{L} \dot{\hat{\mathbf{p}}} \quad (11)$$

展开式(11)有

$$\dot{V} = -k_p \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left[\frac{1}{2} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 - e_i a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j) \right] \quad (12)$$

利用杨氏不等式(Young's inequality): $xy \leq \frac{x^2}{2\alpha} + \frac{\alpha y^2}{2}$, $\alpha > 0$ [20]。那么对于任意 $\beta_i > 0$, 式(12)可放缩为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_p \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left[\frac{1}{2} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 - \frac{e_i^2}{2\beta_i} - \frac{\beta_i (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2}{2} \right] \\ &= -\frac{k_p}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \left[(1 - \beta_i) (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 - \frac{e_i^2}{\beta_i} \right] \\ &= -\frac{k_p}{2} \sum_{i=1}^N \left[(1 - \beta_i) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 - d_i \frac{e_i^2}{\beta_i} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

那么, 为使控制器收敛, 应满足

$$(1 - \beta_i) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 - d_i \frac{e_i^2}{\beta_i} \geq 0 \quad (14)$$

即

$$e_i^2 \leq \frac{\beta_i(1 - \beta_i)}{d_i} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 \quad (15)$$

注意到当 $\beta_i = 1/2$ 时, $\beta_i(1 - \beta_i)$ 取到最大值, 可获得最优收敛条件

$$e_i^2 \leq \frac{1}{4d_i} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 \quad (16)$$

引入灵活性调节系数 $\sigma_i \in (0, 1)$ 定义触发函数式(8)。当系统违背收敛条件时, 即 $f_i(t) \geq 0$ 时, 控制器才进行触发。证明完毕。

值得注意的是, 灵活性调节系数可对触发时刻间隔进行调节, 当 σ_i 较小时, 触发条件会更早达成, 因此, 触发次数会增加。反之, 当 σ_i 较大时, 触发条件会较晚达成, 触发次数会相应减少。

一个成功的基于事件触发控制器的设计, 除了证明所设计的基于事件触发控制器的收敛性之外, 还需要证明控制器不存在芝诺现象(Zeno Behavior)。所谓芝诺现象, 是指控制器在有限时间内触发无限次, 即控制器仍然是连续触发的[1]。如果存在芝诺现象, 意味着触发控制器设计的失败。以下定理证明了所设计的基于事件触发的有功功率分配控制器不存在芝诺现象。

定理2 所定义的分布式触发控制器式(6), 如

果依据设计的触发函数式(8)和触发时刻式(7)进行触发, 则控制器不存在芝诺现象。

证明 为证明控制器不存在芝诺现象, 只需证明每个DG控制器的任意两个相邻触发时刻之间的间隔的下界是一个大于0的常数。假设对于任意DG i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 的控制器在 t_0 时刻刚刚触发, 由 $\hat{p}_i(t) = p_i(t_0)$, $t \in [t_0^-, t_0^+]$ 和估计误差定义可知, $e_i(t_0) = 0$ 。对于 $t \geq t_0$, 当DG i 没有收到邻居信息时, \hat{p}_i 和 \hat{p}_j 均为常数。根据估计误差定义, 有 $\dot{e}_i = -\dot{p}_i$, 则在 t_0, t 内的累积误差为

$$e_i = -k_p(t - t_0)\hat{q}_i \quad (17)$$

其中, $\hat{q}_i = -\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i(t) - \hat{p}_j(t))$ 。接下来考虑满足触发时刻临界条件 $f_i(t^*) = 0$ 的下一触发时刻 t^* 。如果 $\hat{q}_i = 0$, 意味着收敛目标已经达到, 则不会存在下一触发时刻。如果 $\hat{q}_i \neq 0$, 根据式(17)和触发条件的临界条件 $f_i(t) = 0$ 可知

$$k_p^2(t - t_0)^2 \hat{q}_i^2 - \frac{\sigma_i}{4d_i} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 = 0 \quad (18)$$

整理可得

$$(t - t_0)^2 = \frac{\sigma_i \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2}{4d_i k_p^2 \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j) \right)^2} \quad (19)$$

应用柯西不等式 $\left(\sum_{k=1}^m y_k \right)^2 \leq m \sum_{k=1}^m y_k^2$ 可知

$$\begin{aligned} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j) \right)^2 &\leq |\mathcal{N}_i| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}^2 (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 \\ &\leq |\mathcal{N}_i| \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i - \hat{p}_j)^2 \end{aligned} \quad (20)$$

那么, 将式(20)代入式(19)则有

$$t - t_0 \geq \frac{1}{k_p} \sqrt{\frac{\sigma_i}{4d_i |\mathcal{N}_i|}} \quad (21)$$

证毕

值得一提的是, 所设计的触发函数式(8)仅涉及DG本地信息和邻居信息, 因此, 该控制器是完全分布式的。

3.2 频率恢复控制设计

如前文所述, 频率恢复2次控制的目标是恢复由下垂控制等引起的频率偏差, 使系统频率在扰动后仍然能够维持在参考频率。通常, 系统频率要求维持在额定频率50 Hz。当微电网运行在孤岛模式时, 维持供需平衡成为微电网运行的首要目标。所

以，可以假设每个DG都默认在孤岛运行时保持频率为50 Hz。

以往的文献往往利用领导-跟随一致性算法式(4)实现频率恢复的分布式控制，但基于上述分析，可以只通过本地控制让每个DG跟踪参考频率，实现系统频率的恢复。具体为：对于DG i ， $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ，利用比例积分(Proportional Integral, PI)控制原理设计频率恢复控制器为

$$u_i^\omega(t) = -k_1(\omega_i(t) - \omega^r) - k_2 \int (\omega_i(t) - \omega^r) dt \quad (22)$$

其中， $k_1 > 0$ 和 $k_2 > 0$ 分别为比例和积分控制系数。

利用该本地频率恢复控制器，不涉及任何通信过程，可实现微电网频率的恢复和同步。

4 仿真验证

为验证所提基于触发控制的微电网分布式2次控制的有效性，本文在MATLAB/Simulink环境中搭建包含4个DG的微电网系统进行仿真实验。其中，DG根据文献[17]中的详细模型搭建，包含脉冲宽度调制(Pulse-Width Modulation, PWM)控制、电流内环控制、电压外环控制以及下垂控制。

仿真系统的单线图如图1所示。从图1中可知，DGs间的通信是有向通信。系统参数见表1。

仿真过程如下：(1) $t = 0$ s时，系统脱离主电网独立运行。此时，DG只通过下垂控制运行；(2) $t = 1$ s时，启动2次控制；(3) $t = 3$ s时，负荷1突然减少10 kW；(4) $t = 5$ s时，负荷1突然增加10 kW。整个仿真进程持续7 s。

4.1 有效性验证

图2给出了微电网中4个DGs输出的有功和频率。从中可以看出，当微电网脱离主电网孤岛运行后，微电网中的负荷完全由4个DGs承担，由于下垂控制的作用，系统在很短的时间内达到了功率平衡和频率稳定，且DGs按照各自的下垂系数分担负荷。注意到，也正因为下垂机制导致频率稳定后偏离了额定频率50 Hz。当在1 s时启动2次控制后，在2次控制的作用下，DGs的输出频率在约0.5 s后同步到额定频率50 Hz，且DGs仍然能根据各自的下垂系数分担负荷。而当在3 s和5 s分别发生负荷扰动时，系统仍然能够实现控制目标。证明了所提出的基于触发控制的微电网分布式2次控制的有效性。

图3给出了有功功率分配控制控制器的触发时

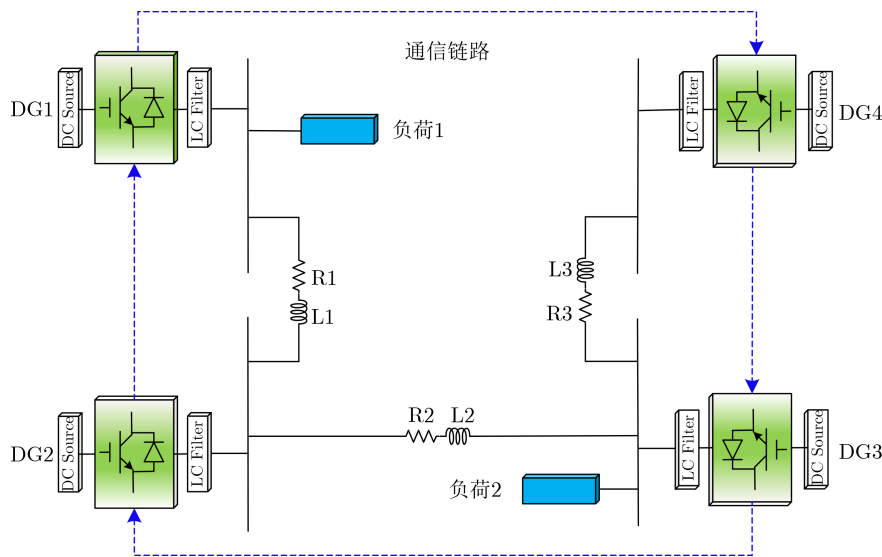


图1 微电网仿真系统单线图

表1 仿真系统参数

	DG1 & DG3 (20 kW)		DG2 & DG4 (10 kW)	
分布式电源	$m_{1\&3}$	2×10^{-5}	$m_{2\&4}$	4×10^{-5}
	$R_{c(1\&3)}$	0.2 Ω	$R_{c(2\&4)}$	0.2 Ω
	$L_{c(1\&3)}$	3×10^{-3} H	$L_{c(2\&4)}$	3×10^{-3} H
输电线	传输线 1 & 传输线 3		传输线 2	
	R1 & R3	0.23 Ω	R2	0.35 Ω
	L1 & L3	0.318×10^{-3} H	L2	1.847×10^{-3} H
负荷	负荷 1	30 kW	负荷 2	20 kW

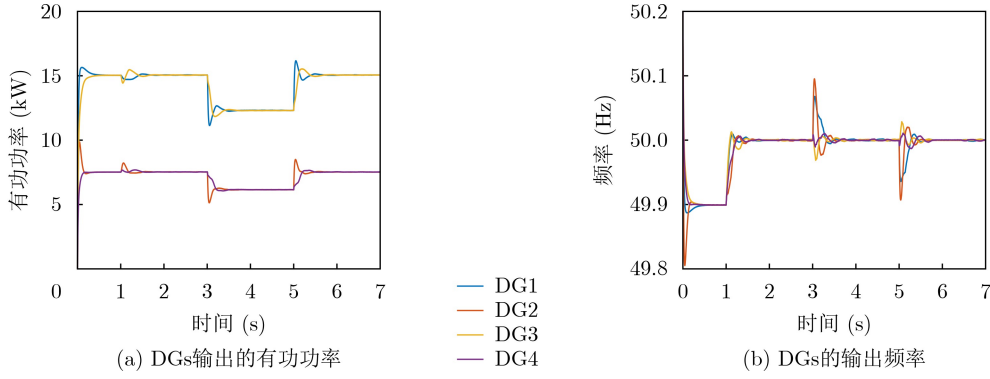


图 2 微电网DGs输出的有功和频率

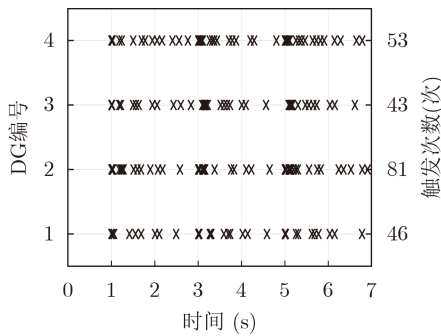


图 3 有功功率分配控制器的触发时间序列

间序列，右侧数字为统计的触发次数。从中可以清晰地看到，DGs的有功功率分配控制器的触发时间序列非常稀疏，呈现出非周期性和间歇性。在2次控制器启动后的6 s内，虽然经历了3个暂态过程，然而每个DG的控制器的触发次数均不超过100次。由图1中通信拓扑可知，每个DG只有1个邻居，因此DG的控制器的每触发1次只需与邻居通信1次，则每个DG的控制器的通信次数与触发次数相同。而且，仔细观察还可以发现，在扰动发生初期(包括2次控制启动)，控制器的触发相对频繁，当系统达到稳定状态(控制收敛)后，控制器的触发相对稀疏。在系统达到稳定后之所以还会发生控制器触发，原因在于本文采用DG的精细模型会产生输出误差，该误差会使系统在稳定状态时仍然偶尔满足触发条件。需要指出的是，在实际的微电网系统中，测量误差和噪声都有可能使系统在稳定状态仍然产生一些触发。因此，本文的仿真结果相比于稳态时不发生触发的结果更贴近真实情况。

4.2 对比验证

为进一步验证本文所提出的基于分布式触发控制的微电网2次控制方法的有效性，本节将给出传统分布式2次控制策略式(4)、式(5)以及文献[17]中基于事件触发的分布式2次控制策略的仿真结果作为对比实验。文献[17]中的控制策略如下：

对于分布式频率恢复控制，控制输入为

$$u_i^\omega(t) = -k_\omega \left[\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{\omega}_i(t) - \hat{\omega}_j(t)) + b_i (\hat{\omega}_i(t) - \omega^r) \right] \quad (23)$$

其中， $\hat{\omega}_i(t) = \omega_i(t_k^{\omega_i})$ ， $t \in [t_k^{\omega_i}, t_{k+1}^{\omega_i})$ ，触发时刻 $t_k^{\omega_i}$ 满足

$$t_k^{\omega_i} = \min \{ t > t_{k-1}^{\omega_i} \mid f_i^\omega(t) = e_{\omega_i}^2(t) - \frac{\alpha_\omega (1 - \beta_\omega \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} - \beta_\omega d_i / 2)}{\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} / \beta_\omega + d_i / (2\beta_\omega)} \cdot \varepsilon_{\omega_i}^2(t) \geq 0 \} \quad (24)$$

其中， $e_{\omega_i} = \omega_i(t_k^{\omega_i}) - \omega_i$ ， $\varepsilon_{\omega_i}(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{\omega}_i(t) - \hat{\omega}_j(t)) + b_i (\hat{\omega}_i(t) - \omega^r)$ ， $0 < \beta_\omega < 1 / (\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} + d_i / 2)$ ， $0 < \alpha_\omega < 1$ 。

对于有功功率分配控制，控制输入同式(6)，其触发时刻满足

$$t_k^{P_i} = \min \{ t > t_{k-1}^{P_i} \mid f_i^P(t) = e_i^2(t) - \frac{\alpha_P (1 - \beta_P \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij})}{\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} / \beta_P} \varepsilon_{P_i}^2(t) \geq 0 \} \quad (25)$$

其中， e_i 与式(8)中的相同， $\varepsilon_{P_i}(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\hat{p}_i(t) - \hat{p}_j(t))$ ， $0 < \alpha_P < 1$ ， $0 < \beta_P < 1 / \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}$ 。

值得一提的是，传统方法和文献[17]方法均设计了分布式频率恢复2次控制器，跟本文方法相比需要额外的通信网络和通信过程。此外，文献[17]中的控制策略要求通信拓扑为无向图。因此，在本节对比实验中，传统分布式控制策略的通信拓扑采用与图1相同的通信拓扑，文献[17]中的控制策略则采用如图4所示的通信拓扑。

图5给出了传统分布式2次控制下微电网DGs输出的有功和频率，显示出了与本文所提方法类似

的收敛效果。仔细观察可以发现，由于传统分布式2次控制是基于连续控制和通信的(在实际中，连续控制系统需要离散化，采样周期通常都非常小，本文设定为1 ms)，因此，在扰动发生后的暂态过程相对于本文方法更加平滑。但收敛效果基本相同。

图6给出了传统分布式2次控制下有功功率分配和频率恢复控制器的触发时间序列。从中可以看出，每个DG的有功分配控制器和频率恢复控制根据时间进行触发，在2次控制启动后的6 s内均触发6000次，相比于本文方法触发次数增加了近27倍。由于传统分布式2次控制采用与本文控制策略一样的通信拓扑，因此所需要的通信资源更多。换言之，就有功功率分配控制而言，本文的基于触发

的分布式控制器相比于传统分布式控制器将控制器触发和通信次数降低了99%，极大地减小了通信负担。

图7给出了文献[17]分布式2次控制下微电网DGs输出的有功和频率，与本文所提方法相比显示出了略差的收敛效果。与图5相比，由于事件触发机制，导致收敛过程出现锯齿波形。图8给出了文献[17]分布式2次控制下有功功率分配和频率恢复控制器的触发时间序列。从中可以看出，控制器的触发与本文方法相似，呈现出非周期性和间歇性。但从控制器触发次数看，两类事件触发控制器的触发次数均略多于本文所提控制器。而由于文献[17]中的控制策略需要双向通信，因此每个DG控制器触发1次需要与两个邻居进行通信，所以每个DG控制器的通信次数是触发次数的2倍。那么，不考虑额外频率恢复通信网络和通信过程，就有功功率分配控制而言，本文方法与文献[17]相比，触发次数降低了34%，通信次数降低了67%。

通过本节的对比实验可以看出，本文所提基于分布式触发控制的微电网频率2次控制方法能够在不牺牲控制效果的情况下，极大地降低控制器对通信资源的需求，降低系统运行负担。与现有文献[17]中基于事件触发的分布式2次控制策略相比，在获得更好的控制表现下能节省更多的通信资源。进一

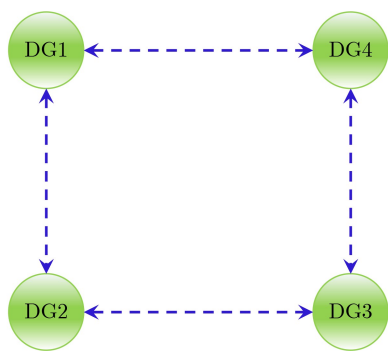


图4 文献[17]控制策略的通信拓扑

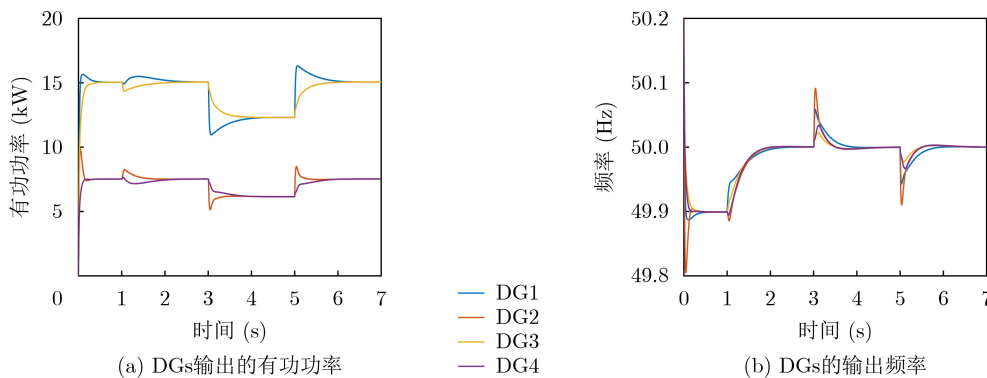


图5 传统分布式2次控制下微电网DGs输出的有功和频率

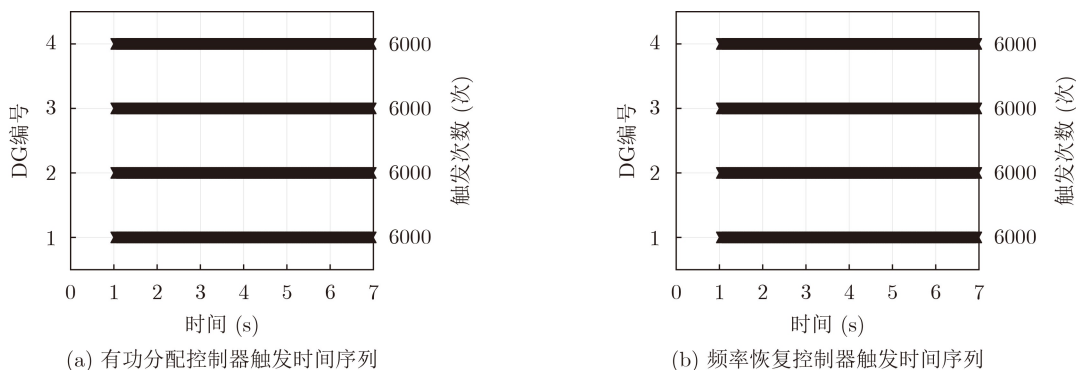


图6 传统分布式2次控制下有功功率分配和频率恢复控制器的触发时间序列

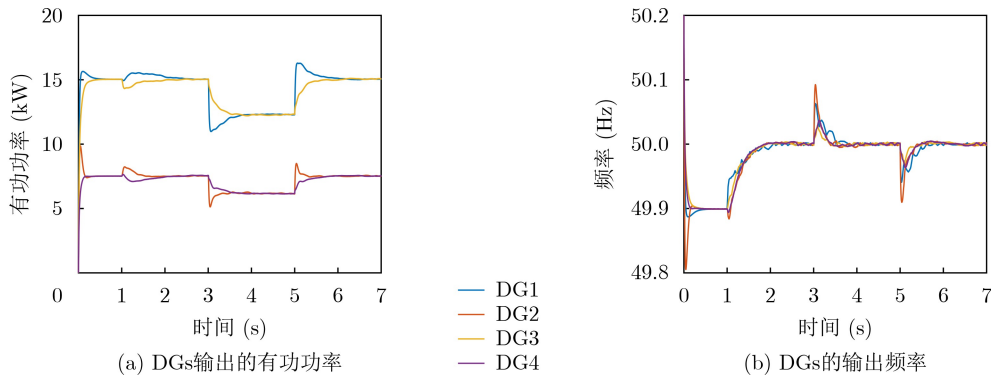


图 7 文献[17]分布式2次控制下微电网DGs输出的有功和频率

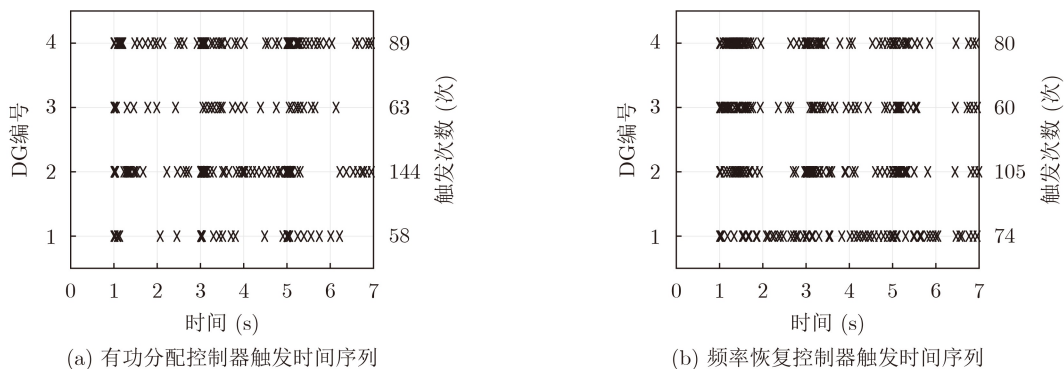


图 8 文献[17]分布式2次控制下有功功率分配和频率恢复控制器的触发时间序列

步验证了本文所提基于分布式触发控制的微电网频率2次控制方法的有效性和优越性。

5 结论

本文提出一种有向通信拓扑下基于分布式触发控制的微电网频率2次控制方法。通过为有功功率分配控制设计有向通信拓扑下的事件触发机制和为频率恢复控制设计本地控制机制，降低系统对通信资源的需求。严格的理论分析和仿真验证证明了：(1)所设计的基于事件触发的功率分配控制器不存在芝诺现象；(2)与基于时间触发的传统分布式2次控制相比，所提出的控制方法不但降低了网络建设成本，而且将控制器触发和通信次数降低了99%，极大地提升了系统运行效率；(3)与现有基于事件触发的分布式2次控制相比，所提出的控制方法除了降低网络建设成本外还能够节省更多的通信资源，同时放宽了控制系统对通信拓扑的要求。

参考文献

- [1] 王成山. 微电网分析与仿真理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-11.
WANG Chengshan. Analysis and Simulation Theory of Microgrids[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-11.
- [2] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158-172. doi: 10.1109/TIE.2010.2066534.
- [3] BIDRAM A and DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4): 1963-1976. doi: 10.1109/TSG.2012.2197425.
- [4] CHEN Yulin, QI Donglian, DONG Hangning, et al. A FDI attack-resilient distributed secondary control strategy for islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3): 1929-1938. doi: 10.1109/TSG.2020.3047949.
- [5] BIDRAM A, LEWIS F L, and DAVOUDI A. Distributed control systems for small-scale power networks: Using multiagent cooperative control theory[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(6): 56-77. doi: 10.1109/MCS.2014.2350571.
- [6] 孙伟, 方昭, 杨建平, 等. 考虑随机时变延时的孤岛微电网分布式二次控制[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(3): 864-875. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.202489.
- [7] SUN Wei, FANG Zhao, YANG Jianping, et al. Distributed secondary control of islanded microgrid with stochastic time-varying delay[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(3): 864-875. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.202489.
- [7] XIN Huanhai, QU Zhihua, SEUSS J, et al. A self-organizing strategy for power flow control of photovoltaic generators in

- a distribution network[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(3): 1462–1473. doi: [10.1109/TPWRS.2010.2080292](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2080292).
- [8] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, *et al.* Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2013, 7(8): 822–831. doi: [10.1049/iet-gtd.2012.0576](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0576).
- [9] ZHANG Guoyue, LI Chaoyong, QI Donglian, *et al.* Distributed estimation and secondary control of autonomous microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 989–998. doi: [10.1109/TPWRS.2016.2590431](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2590431).
- [10] 陈郁林, 齐冬莲, 李真鸣, 等. 虚假数据注入攻击下的微电网分布式协同控制[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5): 97–103. doi: [10.7500/AEPS20200416002](https://doi.org/10.7500/AEPS20200416002).
CHEN Yulin, QI Donglian, LI Zhenming, *et al.* Distributed cooperative control of microgrid under false data injection attacks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5): 97–103. doi: [10.7500/AEPS20200416002](https://doi.org/10.7500/AEPS20200416002).
- [11] NOWZARI C and CORTÉS J. Distributed event-triggered coordination for average consensus on weight-balanced digraphs[J]. *Automatica*, 2016, 68: 237–244. doi: [10.1016/j.automatica.2016.01.069](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.01.069).
- [12] FAN Yuan, HU Guoqiang, and EGERSTEDT M. Distributed reactive power sharing control for microgrids with event-triggered communication[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(1): 118–128. doi: [10.1109/tcst.2016.2552982](https://doi.org/10.1109/tcst.2016.2552982).
- [13] CHEN Yulin, QI Donglian, LI Zhenming, *et al.* Distributed event-triggered control for frequency restoration in islanded microgrids with reduced trigger condition checking[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, To be published. doi: [10.17775/CSEEJPES.2020.05730](https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.05730).
- [14] WENG Shengxuan, YUE Dong, DOU Chunxia *et al.* Distributed event-triggered cooperative control for frequency and voltage stability and power sharing in isolated inverter-based microgrid[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(4): 1427–1439. doi: [10.1109/TCYB.2018.2803754](https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2803754).
- [15] WANG Yu, NGUYEN T L, XU Yan, *et al.* Cyber-physical design and implementation of distributed event-triggered secondary control in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6): 5631–5642. doi: [10.1109/TIA.2019.2936179](https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2936179).
- [16] ABDOLMALEKI B, SHAFIEE Q, SEIFI A R, *et al.* A Zeno-free event-triggered secondary control for AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 1905–1916. doi: [10.1109/TSG.2019.2945250](https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2945250).
- [17] CHEN Yulin, LI Chaoyong, QI Donglian, *et al.* Distributed event-triggered secondary control for islanded microgrids with proper trigger condition checking period[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(2): 837–848. doi: [10.1109/TSG.2021.3115180](https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3115180).
- [18] WANG Yu, DENG Chao, LIU Dan, *et al.* Unified real power sharing of generator and storage in islanded microgrid via distributed dynamic event-triggered control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1713–1724. doi: [10.1109/TPWRS.2020.3039530](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3039530).
- [19] OLFATI-SABER R, FAX J A, and MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 215–233. doi: [10.1109/JPROC.2006.887293](https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.887293).
- [20] HARDY G H, LITTLEWOOD J E, and PÓLYA G. *Inequalities*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1952.
- 陈郁林: 男, 博士, 研究方向为微电网分布式控制、信息物理安全。
谷雨润: 女, 硕士生, 研究方向为电力市场。
闫云凤: 女, 博士, 研究方向为机器视觉、电力安全。
丁震宇: 男, 硕士, 研究方向为变电运维。

责任编辑: 余蓉