

通信约束下微电网的二级控制及其稳定性综述

冯宜伟, 刘顺民

兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年7月28日; 录用日期: 2022年8月8日; 发布日期: 2022年8月22日

摘要

智能微电网结合通信网络以其高度的灵活性、广泛的适应性、可控的经济性, 受到国内外的高度关注。通信约束是影响智能微电网实现综合调度的关键因素, 首先简要阐述了包括分层控制和二级控制在内的智能微电网控制结构, 对通信网络时延、通信带宽限制和通信链路的不确定性等微电网中常见的通信约束进行了全面的总结, 同时, 分析了在不同通信约束下智能微电网的二级控制方法, 总结了在多种通信约束下智能微电网的稳定性分析方法, 最后对这一领域的发展现状和未来的方向进行了讨论和展望。

关键词

智能微电网, 二级控制, 通信约束, 稳定性分析

Summary of the Secondary Control and Stability of Microgrid under Communication Constraints

Yiwei Feng, Shunmin Liu

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Received: Jul. 28th, 2022; accepted: Aug. 8th, 2022; published: Aug. 22nd, 2022

Abstract

Smart microgrid combined with communication network has attracted great attention at domestic and overseas for its high flexibility, wide adaptability and controllable economy. Communication

constraints are the key factors influencing the microgrid intelligent integrated scheduling. Firstly, the control structure of smart microgrid including hierarchical control and secondary control is briefly described, and the common communication constraints in microgrid such as communication network delay, communication bandwidth limitation and communication link uncertainty are comprehensively summarized. At the same time, the secondary control methods of smart microgrid under different communication constraints are analyzed, and the stability analysis methods of smart microgrid under various communication constraints are summarized. Finally, the development status and future direction of this field are discussed and prospected.

Keywords

Smart Microgrid, The Secondary Control, Communication Constraint, Stability Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着当前社会的不断向前发展, 工业领域的产业升级和家庭用电设备的电力需求正在不断增加。此外, 积极应对气候变化已经基本成为全人类的共识[1]。为了应对不断增长的发展需要和日益严峻的环境形势, 微电网(Micro-Grid)的概念被提出[2]。和传统电网相比, 微电网中将多个分布式电源(distributed energy resources, DERs)和负载聚合为一个整体, 微电网的功率分配系统可以自由调度每一个分布式电源以提高整个电网的可靠性[3]。

在传统的微电网系统中, 传感器、控制器和执行器之间的连接通常是通过端口到端口的布线来实现的。然而, 相较于传统控制理论中各部件之间通过“理想通道”相连, 分布式微电网将通信网络插入控制系统, 通过“非理想通道”对微电网进行控制, 这是传统电网和分布式微电网之间的主要区别。因此, 伴随着通信信道的使用, 可能会出现通信延迟、通讯带宽限制、通讯链接不确定等现象, 这些现象会显著降低系统性能, 甚至会破坏控制系统的稳定性[4]。

为了高效而经济地利用通信基础设施使得微电网更加稳定, 国内外已有大量学者对该问题进行了研究。在包含时间延迟影响的微电网控制研究方面, 解决了在噪声环境中的时延通信下分布式发电机大量渗透的交流微电网的频率恢复和准确负载功率分配问题[5]。针对具有非均匀时变时延的交换通信网络, 提出了一种基于下垂的分布式协同控制方案[6]。之后, 为了应对通信噪声对于微电网通信的影响, 各学者也做出了很多的努力。提出了一种新型的分布式抗噪声二级控制方法[7]。现有的协同控制技术假设逆变器之间的通信是理想情况, 然而事实并不是这样, 因此研究了逆变器之间以及参考信号与逆变器之间的通信链路中存在附加噪声的情况, 提出了一种分布式噪声弹性控制技术[8]。在可变通信拓扑领域, 进行了微电网中不同通信网络拓扑下增量成本一致算法的收敛性分析[9]。采用基于需求的非周期性数据传输方案, 提出了一种用于集成多个基于逆变器的间歇式分布式发电机的全分布式功率共享控制策略, 与大多数现有的负载共享研究相比, 所提出的算法能够减少数据通信需求[10]。此外, 传统的基于下垂的控制会导致频率偏差, 经济效益低。为了解决这个问题, 提出了一种新颖的事件触发最优主动功率控制策略[11]。

为了详细地了解微电网分层控制方法并准确把握具有通信约束的微电网二次控制。本文首先介绍了微电网的分层控制和分层控制中的二级控制方法, 之后将会总结并归纳了几种微电网中通信约束下的二

级控制方法, 紧接着概况了包含通信约束的微电网稳定性分析方法, 最后对通信约束下的微电网控制存在的问题进行了讨论和总结。

2. 微电网的控制结构

目前, 针对微电网的控制策略有主从控制模式和分层控制模式[12]。就二级控制层而言又主要分为集中式和分布式两种, 和集中式的次级控制层相比分布式控制需要相邻的控制器依靠通信网络相互连接, 但相较于集中式控制方法, 分布式控制可以实现全局协同控制[13]。

2.1. 分层控制

微电网作为单一的可控实体, 必须要实现自身的控制以确保正确的操作和协调不同种类的分布式电源[14]。微电网控制器(microgrid control, MGC)用于管理微电网内部的运行、能量的流动以及与主网的互连, 因此微电网设备都需要与 MGC 进行通信, 通常这种控制通过分层的网络结构来实现[15], 微电网的分层控制结构如图 1 所示。

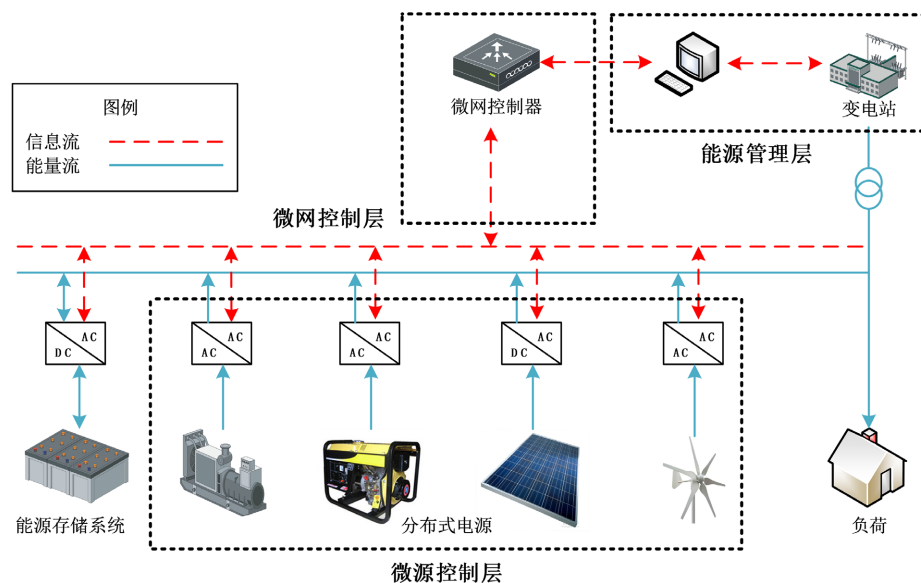


Figure 1. Layered control structure of microgrid
图 1. 微电网的分层控制结构

一级控制主要在毫秒到分钟这个时间尺度内执行, 这个层级的控制需要对分布式微电源和系统的瞬态动作做出快速反应, 以响应系统电压或频率的任何瞬时偏差[16], 因此, 在这一层级每个分布式微电源的控制均由本地控制器完成[17]。为了应对分布式微电源的离散调度, 二级控制通过控制微电网中接入的同一种类部件可以实现微电网最优协调和运行[18]。三级控制运行跨度在数小时到数天范围内, 是从系统优化的层面对微电网潮流进行规划和分配[19]。

2.2. 分布式控制

在分层控制结构中, 一级控制依靠内环控制和下垂控制可以实现功率的分配, 然而由于引入了大量的分布式能源, 因此带来了电压、频率波动和系统稳定性等问题[20]。传统微电网的二级控制是集中式的, 通信网络庞大复杂且系统可扩展性差。与集中式控制方式相比, 分布式控制可以有效提高动态收敛性和通信延时裕度、提升协同性能。分布式控制方案如图 2 所示。

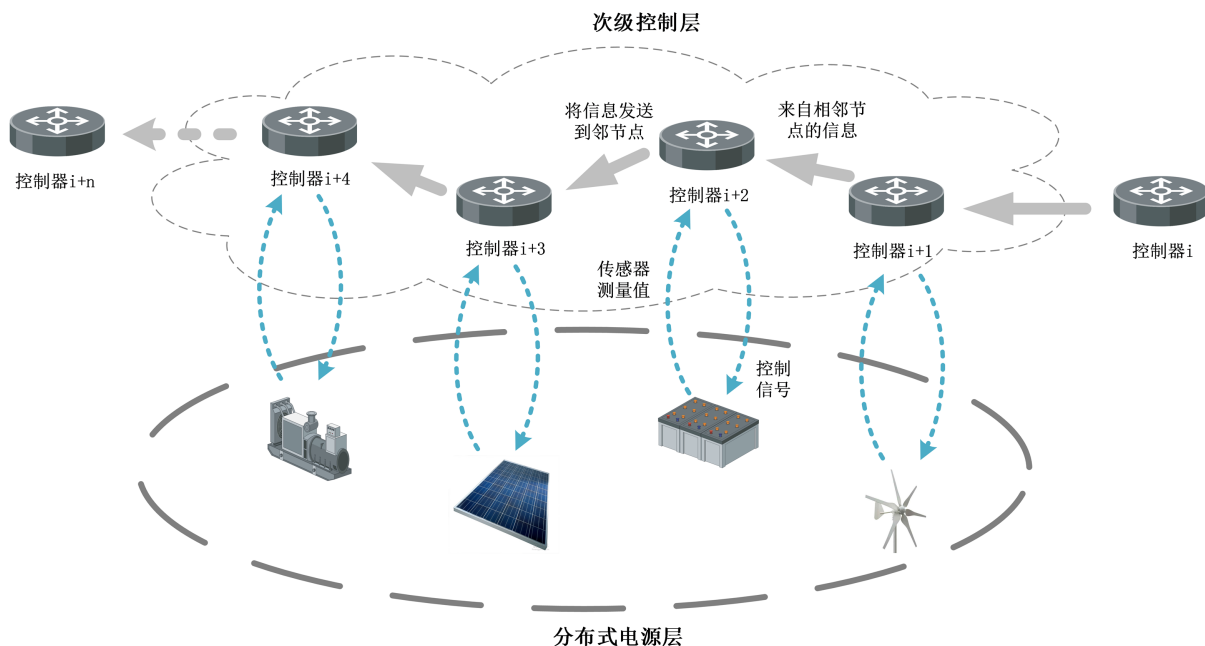


Figure 2. Distributed control architecture of microgrid

图 2. 微电网的分布式控制结构

传统的二级控制一般采用一个带有 PI 结构的中心控制器来对分布式电源进行控制, 其中输出电压幅值误差和输出频率误差表示为如下公式[21]:

$$\begin{cases} \delta E = K_{PE} (v_{ref} - E) + K_{IE} \int (v_{ref} - E) dt \\ \delta \omega = K_{P\omega} (\omega_{ref} - \omega) + K_{I\omega} \int (\omega_{ref} - \omega) dt + \Delta \omega_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, K_{PE} 、 K_{IE} 分别表示二级控制器的电压幅值补偿的比例系数和积分系数, $K_{P\omega}$ 、 $K_{I\omega}$ 表示二级控制器频率补偿的比例系数和积分系数, $\Delta \omega_s$ 代表微电网与大电网的频率误差。

在分布式二级控制中, 二级控制层抵消由一级控制层引起的局部电压偏差和全局频率偏差。在[22] [23] [24]中分布式二级恢复控制是利用 DER_i 中 y_i 自身及其邻居 y_j 之间的信息交换来调整局部状态设定点的值 y_i^n 。一般情况下, 在不考虑通信约束的具有完美通信的分布式协同控制器 $u_i(t)$ 可以设计为[24]:

$$\dot{y}_i = u_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [y_j(t) - y_i(t)] + a_{i0} [y^{ref} - y_i(t)] \quad (2)$$

式中, a_{ij} 表示 DER_i 到 DER_j 的边权值, a_{i0} 表示 DER_i 能够通过虚拟微电网 DER_0 访问状态参考 y^{ref} , y_i 表示 DER_i 的输出状态。因此, 将测量稳态误差 \dot{y}_i 传输到主控制层以恢复终端输出 y_i , 则比例积分恢复补偿器可定义为:

$$\delta y_i = K_i^P u_i(t) + K_i^I \int u_i(t) dt \quad (3)$$

其中 δy_i 为 PI 校正因子, 其中 K_i^P 和 K_i^I 为分布式次级控制器的 PI 校正因子。

3. 常见的通信约束

3.1. 通信网络延时效应

通信网络延时效应是指控制器通过通信网络与执行器和控制器进行数据交换时产生的时延。通信网络延时可以分为数据从传感器传输到控制器之间的时延 τ_{sc} 、数据从控制器传输到执行器的时延 τ_{ca} ,

如图 3 所示。对于控制器的设计来说, 必须考虑到时延的负面影响, 否则可能降低系统的控制性能。

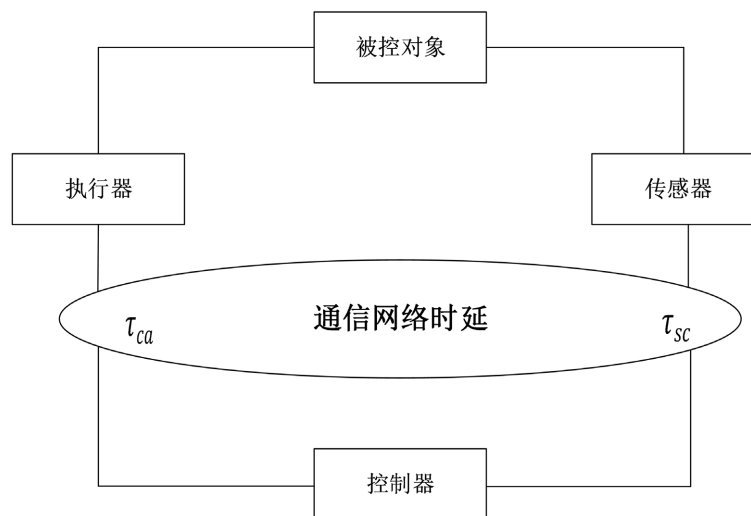


Figure 3. Control system with communication network delay

图 3. 存在通信网络时延的控制系统

在一些文献中, 考虑了非对称通信延迟的分布式控制[23] [25], 此外, 由于微电网系统中链路断开或信息丢失和接收到噪声或干扰信息测量或控制信号丢失可能导致随机延迟的存在, 用滑动模型控制 (sliding model control, SMC) 和网络预测控制 (network predictive control, NPC) 等方法来补偿随机延迟[26] [27]。在另一些文献中, 也提出了一些广义的预测控制方法, 它们具有适应性强、模型精度要求低、对参数变化的鲁棒性等优点[28] [29]。

3.2. 通信带宽限制

在微电网通信网络中, 控制器通过网络与多个传感器和执行器进行通信。由于网络带宽的限制, 任意时刻仅有少数的传感器和执行器获得信道访问权参与数据的传输与交换, 导致数据传输过程中仅有部分数据信息被利用。在微电网中, 支持网络通信的分布式方案一般都使用嵌入式微处理器, 这些微处理器通常计算能力也较弱, 通信网络的带宽有时会受到限制[30]。因此, 通信带宽限制对微电网的稳定运行造成了很大的影响。

在克服通信带宽限制方面, 许多学者进行了研究, 为了提高直流微电网运行的性能, 提出了一种基于低带宽通信的改进下垂控制方法[31]。与传统方法相比, 控制系统不需要中央辅助控制器。为了解决微电网系统动力学的复杂性和通信网络的局限性, 提出了一种基于事件的实时最优状态估计方法, 该算法降低了通信带宽而且减小了计算资源开销[32]。在文献中提出了一种基于自主通信的混合状态/事件驱动控制方案[33], 在初级控制层面它包含状态驱动的本地控制器, 在次级控制层面使用事件驱动的微电网集中控制器。

3.3. 通信链路不确定

在微电网通信网络中, 最基本的特点是各节点之间可以进行数据交换。然而, 由于微电网系统中网络参数的不确定性、高频分量的扰动和噪声、数据包丢失、随机通信故障往往是不可避免的。对于一些具有鲁棒性的控制系统, 虽然能容忍一定概率的丢包, 但也会影响系统的控制性能。

针对通信链路中的不确定性影响, 众多学者进行了相关研究, 提出了基于分布式发电的不确定性来确定并网模式下微电网的最佳等效模型[34]。在文献中提出了一种新型的鲁棒分布式协作控制方案, 并将

该方法用于时变拓扑网络[35]。在另一个文献中采用蒙特卡罗方法,在给定的置信区间内选择相应的情景,并利用预测发电量和负荷的持续时间曲线以考虑不确定性[36]。

4. 通信约束下的二级控制

4.1. 通信延时下的二级控制

根据固定、有界和时变通信延迟的情况下信息从 DER_j 到 DER_i 传输的时间,可以分为对称通信延迟和非对称通信延迟。对称延迟就是指信息从 DER_j 到 DER_i 传输的时间均相同,而非对称通信延迟就是指从 DER_j 到 DER_i 传输的时间不相等,在文献中考虑了非对称通信延迟的分布式控制器可以表示为[23] [25]:

$$u_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} [y_j(t - \tau(t)) - y_i(t)] + a_{i0} [y^{ref} - y_i(t)] \quad (4)$$

其中 $y_i(t)$ 和 $y_j(t - \tau(t))$ 为从自身出发的无时滞导数及其具有时变时滞的相邻单元导数变量。代表分布式单元从前一个分布式单元接收到了有延时的信息 $y_j(t - \tau(t))$ 而不是 $y_j(t)$ 。我们注意到, DER_i 可以立即接收到自己发出的信息,可以忽略 DER_i 的计算时间和执行时间的总和。进一步来说,如果考虑 DER_i 的这些时间,则非对称延迟变为对称延迟情况,在文献中描述了对称通信延迟的分布式控制为[26] [27]:

$$u_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} [y_j(t - \tau(t)) - y_i(t - \tau(t))] + a_{i0} [y^{ref} - y_i(t - \tau(t))] \quad (5)$$

其中 $y_i(t - \tau(t))$ 和 $y_j(t - \tau(t))$ 是自身及其邻近具有时变时滞的 DER_i 单位变量。如果 $\tau(t)$ 是一个常数,那么相应的时间延迟是固定的,由于链路断开或信息丢失和接收到噪声或控制信号丢失可能导致随机延迟的存在,因此该延迟也可以表示为一个随机变量。在文献中提出了网络预测器和延迟补偿器的概念,它通过在随机延迟中加入网络预测器和延迟补偿器增强了系统性能[37]。如图 4 所示,网络预测器的方案将传统的延迟补偿器方案与网络控制系统(networked control system, NCS)相结合。

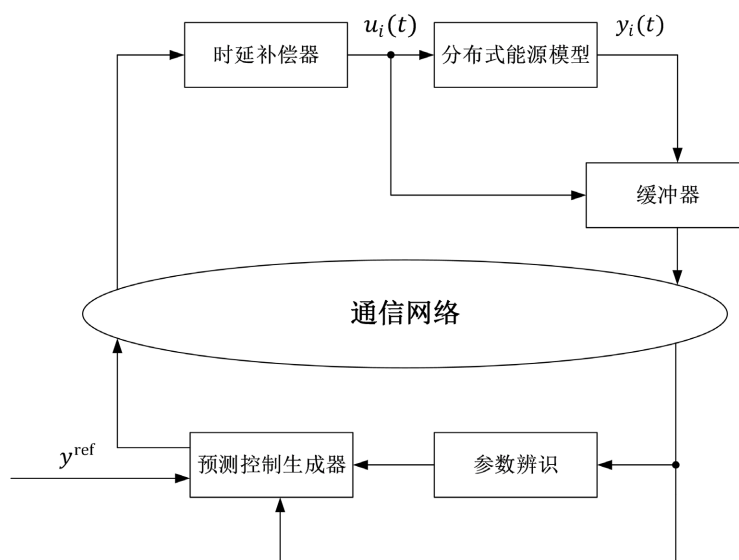


Figure 4. NPC block diagram of random communication delay

图 4. 随机通信延迟的网络预测控制框图

4.2. 通信带宽受限的二级控制

在二级控制过程中,传统的连续或周期性的采样和传播模式将导致有限的带宽资源被浪费,事件触

发通信作为一种良好的数字控制方案, 可以显著减少不必要的采样状态传输[38]。现有的具有事件触发通信的分布式控制器如下:

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left[y_j \left(t_{k'_j}^j(t) \right) - y_i \left(t_k^i \right) \right] + a_{i0} \left[y^{ref} - y_i \left(t_k^i \right) \right] \quad (6)$$

$$k'_j(t) = \arg \max_{l \in N: t \geq t_l^j} \{ t - t_l^j \}, t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \quad (7)$$

设 $0 = t_0^i, t_1^i, \dots, t_k^i$ 表示 DER_i 单元的控制更新时间的驱动时序[39]。一般情况下, 测量误差可以表示为 $e_i(t) = y_i(t_k^i) - y_i(t)$ 。在分布式事件触发控制方案中, 事件触发检测器的设计是核心。对于每个 DER 单元来说, 事件触发检测器用来决定何时使用采样的局部信息来更新自身及其邻居的控制动作。现有的研究主要考虑两种状态相关的事件阈值: 连续事件阈值和分段常数事件阈值。在文献中连续事件阈值被表示为[39] [40]:

$$|e_i(t)| \leq \kappa \sum_{j \in N_i} |y_j(t) - y_i(t)| \quad (8)$$

其中 $\kappa > 0$, 从(6) (7)两个式子可以看出, 由于相邻的 DER 单元保证时刻受到持续的监控, 所以用最新的采样状态替代连续状态, 采用分段常数阈值来避免连续监测。当利用离散测量和基于模型的误差测量时, 由于每个 DER 在其触发时间对其状态进行采样, 因此在文献中事件阈值被表示为[39]:

$$|e_i(t)| \leq \kappa \sum_{j \in N_i} |y_j(t_{k'_j}^j) - y_i(t_k^i)|, t_{k+1}^i = t_k^i + \max \{ \tau_{k_i}^i, \tau_i \} \quad (9)$$

其中 $t_{k_i}^i$ 为控制器的时间间隔, τ_i 为一个与微电网系统动力学及其网络拓扑相关的常数。由上面的讨论可以看出, 在设计包含通信带宽限制的微电网控制器过程中, 事件阈值的设计是核心和难点, 而为了节约通信带宽, 选择合理的触发时间设定适合的控制器时间间隔也十分重要。

4.3. 包含链路不确定的二级控制

对于分布式二次控制而言, 微电网控制系统中网络参数的不确定性、随机通信故障往往是不可避免的。因此研究者对随机通信干扰和不确定性对二次恢复问题的影响进行了进一步的研究[41]。由于微电网控制系统的低惯性特性, 通信链路的不确定性对微电网稳定性的影响比传统电网更为严重[24]。针对于微电网通信不确定的问题, 研究者采用具有不确定通信链路的低成本稀疏通信网络提出了一种基于迭代学习的分布式二次控制方案[42] [43]。

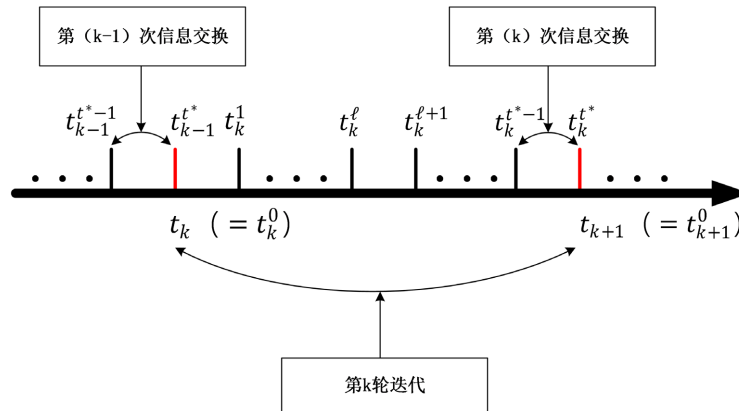


Figure 5. Information exchange time diagram of DERs
图 5. 分布式电源信息交换时间图

图 5 表示了文献中所描述的 *DERs* 之间信息交换的时间轴[36], 在第 k 次迭代过程中, 每个 *DERs* 的状态值 $y_{i,k}(t)$ 都将在每个离散的时间点 $t = t_k^1, \dots, t_k^\ell, \dots, t_k^*$ 处使用控制输入 $u_{i,k}$ 进行更新。离散时间控制输入 $u_{i,k}$ 只需要在 $t = t_k^*$ 即第 k 个迭代过程结束时更新, 这样 *DER* 之间的信息交换只发生在每轮迭代结束时。根据每个 *DER* 自身的信息以及当达到终端时间 t^* 时相邻 *DER* 的信息, 文献中离散时间控制器 $u_{i,k}$ 被设计为以下更新规律[42]:

$$\begin{aligned} y_{i,k}(t+1) &= y_{i,k}(t) + u_{i,k} \\ u_{i,k+1} &= u_{i,k} + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \gamma_{ij} a_{ij} [y_{j,k}(t^*) - y_{i,k}(t^*)] + \gamma_{i0} a_{i0} [y^{ref} - y_{i,k}(t^*)] \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\{\gamma_{ij}\}_{j=0}^N$ 是要设计的相关学习增益, 伴随着跟踪和同步, 每个 *DER* 依据上面给出的更新规律更新 $u_{i,k}$ 并开始下一轮通信。在每个迭代周期 $[t_k, t_k + t^*]$, 初始值 $y_{i,k}(0)$ 对所有 k 保持为 $y_{i,1}(0)$ 。然后通过上述方程的运算, $y_{i,k}^n(t^*)$ 获得的标称设定点并传输到主控制层, 利用主控制层将每个 *DER* 的输出状态 y_i 同步到它们的参考状态 y^{ref} 。

5. 通信约束下微电网的稳定性分析

目前的文献主要基于 Lyapunov 稳定性理论, 通过建立合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 得到泛函的无穷小生成算子。利用一些不等式方法将泛函的无穷小生成算子整理成线性矩阵不等式(LMI, linear matrix inequality)的形式, 从而借助 LMI 工具箱求解的便利性, 得到系统的稳定性准则[44]。

在研究网络控制系统中的延时问题时, 我们希望系统在时滞上界内都能保持其应有的稳定性。目前计算任意时延的延迟裕度的两种方法, 一种是时域方法, 另一种是频域方法[45]。在文献中推导了恒时延下的时滞相关稳定性判据和时变时滞相关稳定性判据[46]。在另一个文献中揭示了通信时延大小、通信网络拓扑结构和控制参数对系统稳定性的影响[47]。然而目前研究得到的时滞上界具有一定的保守性, 在分析延时系统的稳定性方面还有研究的空间[48]。

在包含有限带宽的微电网控制系统的稳定性方面, 研究者们提出了一种分散的动态事件触发机制来判断测量数据是否传输, 并提出了一种新颖的一次尝试丢弃和灵活的循环调度协议来分配通信信道给特定的传感器节点, 以避免由于带宽限制造成的数据冲突, 进一步构造了一个状态时滞和误差时滞的离散随机系统模型, 并给出了设计控制器的充分条件, 证明了闭环系统的随机稳定性[49]。

此外, 为了应对微电网控制器参数的不确定性影响以及通信延迟的影响, 提出了一种非脆弱控制模型方法, 用于设计具有通信延迟的网络电力系统频率和联络线功率调节的事件触发控制[50], 所提出的非脆弱控制方法能够容忍控制器参数的变化而不影响系统性能。

6. 总结与展望

微电网是实现主动配电网的有效方式, 是使传统电网向智能电网的过渡。在微电网分层控制中采用分布式的二级控制方法就显得十分重要。相较于传统的二级控制方法, 其优点在于:

- 相比较传统的二次控制采用的集中式控制结构, 减少了对通信网络的依赖。
- 当控制系统发生局部故障时, 可有效地对故障进行隔离, 将故障影响限制在局部范围内, 这样就更易于保证整个系统的可靠性。
- 对于像微电网这样经常变更和扩大控制对象的复杂系统, 更容易应对局部系统的变更, 因此分布式结构具有适应系统发展的灵活性。

通信约束下的微电网控制问题依然有广泛存在于理论与工程当中, 而且目前还有以下的问题需要深入研究:

- 在未来将需要考虑大量新的 *DER* 进入网络。因此, 接下来的研究应该考虑在不大幅改变当前运行控制框架的前提下, 加入 *DER* 后的微电网架构和控制方案能够实现通信约束的自优化。
- 现有的关于分布式二次控制问题的研究已经涵盖了许多实际系统的网络特性和控制性能的分析。然而, 对两种或两种以上的通信约束紧密耦合的问题研究依然不够深入。因此, 设计可以适应多个约束条件的分布式协作控制算法是十分迫切的。

基金项目

国家自然科学基金项目编号 62141304; “甘肃省科技计划资助” 项目编号 20YF8NA059; 甘肃省自然科学基金项目编号 21JR7RA211。

参考文献

- [1] 肖兰兰. 中国能源安全与绿色“一带一路”建设[J]. 闽江学刊, 2020, 12(5): 36-44+121.
- [2] Dileep, G. (2020) A Survey on Smart Grid Technologies and Applications. *Renewable Energy*, **146**, 2589-2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
- [3] Zhou, Q., Shahidehpour, M., Paaso, A., et al. (2020) Distributed Control and Communication Strategies in Networked Microgrids. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **22**, 2586-2633. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3023963>
- [4] Lai, J. and Lu, X. (2021) Communication Constraints for Distributed Secondary Control of Heterogenous Microgrids: A Brief Survey. 2021 *IEEE/IAS 57th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Las Vegas, 27-30 April 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1109/ICPS51807.2021.9416597>
- [5] Lai, J., Lu, X. and Yu, X. (2019) Stochastic Distributed Frequency and Load Sharing Control for Microgrids with Communication Delays. *IEEE Systems Journal*, **13**, 4269-4280. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2901711>
- [6] Lai, J., Zhou, H., Lu, X., et al. (2016) Droop-Based Distributed Cooperative Control for Microgrids with Time-Varying Delays. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 1775-1789. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2557813>
- [7] Dehkordi, N.M., Bagha Ee, H.R., Sadati, N., et al. (2019) Distributed Noise-Resilient Secondary Voltage and Frequency Control for Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 3780-3790. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834951>
- [8] Agha Ee, F., Dehkordi, N.M., Bayati, N., et al. (2021) Delay and General Multiplicative Noise-Resilient Secondary Frequency and Voltage Control for an Autonomous Microgrid. *IEEE 12th Annual Power Electronics, Drive Systems and Technologies (PEDSTC 2021)*, Tabriz, 2-4 February 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC52094.2021.9405834>
- [9] Marzal, S., Salas, R., González-Medina, R., et al. (2018) Current challenges and Future Trends in the Field of Communication Architectures for Microgrids. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3610-3622. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.101>
- [10] Meng, W., Wang, X. and Liu, S. (2016) Distributed Load Sharing of an Inverter-Based Microgrid with Reduced Communication. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **9**, 1354-1364. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2587685>
- [11] Chen, G., Li, Z. and Zhao, Z. (2019) Event-Triggered Optimal Active Power Control in Islanded Microgrid with Variable Demand and Time-Varying Communication Topology. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 4015-4025. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2848282>
- [12] Ortiz, L., González, J.W., Gutierrez, L.B., et al. (2020) A Review on Control and Fault-Tolerant Control Systems of AC/DC Microgrids. *Heliyon*, **6**, e04799. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04799>
- [13] Karkar, H.M. and Trivedi, I.N. (2020) Primary and Secondary Droop Control Method for Islanded Microgrid with Voltage Regulation and Current Sharing. Gujarat Technological University, Ahmedabad. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0226-2_6
- [14] Meje, K.C., Bokopane, L. and Kusakana, K. (2020) Microgrids Control Strategies: A Survey of Available Literature. 2020 *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, Kuching, 4-7 October 2020, 167-173. <https://doi.org/10.1109/ICSGCE49177.2020.9275651>
- [15] Dou, C., Li, Y., Yue, D., et al. (2020) A Distributed Cooperative Control Method Based on Network Topology Optimization in Microgrid Cluster. *IET Renewable Power Generation*, **14**, 939-947. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0450>
- [16] Shrivastava, S. and Subudhi, B. (2020) Comprehensive Review on Hierarchical Control of Cyber-Physical Microgrid

- System. *IET Generation Transmission & Distribution*, **14**, 6397-6416. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0971>
- [17] Ko, B.S., Lee, G.Y., Choi, K.Y., *et al.* (2020) Flexible Control Structure for Enhancement of Scalability in DC Microgrids. *IEEE Systems Journal*, **14**, 4591-4601. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2963707>
- [18] Dehaghani, M.N., Taher, S.A. and Arani, Z.D. (2021) An Efficient Power Sharing Approach in Islanded Hybrid AC/DC Microgrid Based on Cooperative Secondary Control. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **31**, e12897. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12897>
- [19] Abhishek, A., Ranjan, A., Devassy, S., *et al.* (2020) Review of Hierarchical Control Strategies for DC Microgrid. *IET Renewable Power Generation*, **14**, 1631-1640. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1136>
- [20] Ashfaq, S. and Zhang, D. (2020) Voltage and Frequency Regulation of Islanded Microgrid with Multiple Conventional Generators. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Hobart, 29 November-2 December 2020, 1-6.
- [21] Lai, J., Zhou, H., Lu, X., *et al.* (2016) Droop-Based Distributed Cooperative Control for Microgrids with Time-Varying Delays. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 1775-1789. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2557813>
- [22] Tavassoli, B., Fereidunian, A. and Savaghebi, M. (2020) Communication System Effects on the Secondary Control Performance in Microgrids. *IET Renewable Power Generation*, **14**, 2047-2057. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1170>
- [23] Schiffer, J., Drfler, F. and Fridman, E. (2016) Robustness of Distributed Averaging Control in Power Systems: Time Delays & Dynamic Communication Topology. *Automatica*, **80**, 261-271. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.02.040>
- [24] Lai, J., Lu, X., Yu, X., *et al.* (2019) Distributed Voltage Regulation for Cyber-Physical Microgrids with Coupling Delays and Slow Switching Topologies. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **50**, 100-110. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2924612>
- [25] Nguyen, D.H. and Khazaei, J. (2017) Multi-Agent Time-Delayed Fast Consensus Design for Distributed Battery Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **9**, 1397-1406. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2785311>
- [26] Yan, H.C., *et al.* (2019) A Novel Sliding Mode Estimation for Microgrid Control with Communication Time Delays. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 1509-1520. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2771493>
- [27] Xie, Y. and Lin, Z. (2019) Distributed Event-Triggered Secondary Voltage Control for Microgrids with Time Delay. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **49**, 1582-1591. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2912914>
- [28] Vafamand, N., Khooban, M.H., Dragičević, T., *et al.* (2019) Networked Fuzzy Predictive Control of Power Buffers for Dynamic Stabilization of DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **66**, 1356-1362. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2826485>
- [29] Sahoo, S. and Blaabjerg, F. (2021) A Model-Free Predictive Controller for Networked Microgrids with Random Communication Delays. 2021 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Phoenix, 14-17 June 2021, 2667-2672. <https://doi.org/10.1109/APEC42165.2021.9487438>
- [30] Yang, C., Yao, W., Fang, J., *et al.* (2019) Dynamic Event-Triggered Robust Secondary Frequency Control for Islanded AC Microgrid. *Applied Energy*, **242**, 821-836. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.139>
- [31] Han, Y., Yang, M., Yang, P., *et al.* (2019) Reduced-Order Model for Dynamic Stability Analysis of Single-Phase Islanded Microgrid with BPF-Based Droop Control Scheme. *IEEE Access*, **7**, 157859-157872. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950069>
- [32] Alavi, S.A., Mehran, K. and Yang, H. (2020) Optimal Observer Synthesis for Microgrids with Adaptive Send-on-Delta Sampling over IoT Communication Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68**, 11318-11327. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3034853>
- [33] Saleh, M., Esa, Y. and Mohamed, A. (2018) Communication-Based Control for DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 2180-2195. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2791361>
- [34] Cai, C., Tao, Y., Liu, H., *et al.* (2018) Multiple Scenarios Microgrid Equivalent Modeling Based on the Uncertainty of Distributed Generations. 2018 *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, 20-22 October 2018, 1-6. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582071>
- [35] Raeispour, M., Atrianfar, H., Baghaee, H.R., *et al.* (2020) Robust Distributed Disturbance-Resilient H_∞ -Based Control of Off-Grid Microgrids with Uncertain Communications. *IEEE Systems Journal*, **15**, 2895-2905. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3001243>
- [36] Lee, B.H. and Jin, A.Y. (2015) A Study on Optimal Operation of Microgrids Considering the Uncertainty of Renewable Generation and Load by Use of Duration Curves. *Power & Energy Society General Meeting*, Denver, 26-30 July 2015, 1-5.

-
- [37] Liu, G.P. (2010) Predictive Controller Design of Networked Systems with Communication Delays and Data Loss. *IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs*, **57**, 481-485. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2010.2048377>
- [38] Shahidehpour, M., Shi, M., Chen, X., *et al.* (2020) Optimal Consensus-Based Event-Triggered Control Strategy for Resilient DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, **36**, 1807-1818. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3026256>
- [39] Pullaguram, D., Mishra, S. and Senroy, N. (2018) Event-Triggered Communication Based Distributed Control Scheme for DC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **33**, 5583-5593. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2799618>
- [40] Lai, J., Lu, X., Yu, X., *et al.* (2018) Distributed Multi-DER Cooperative Control for Master-Slave-Organized Microgrid Networks with Limited Communication Bandwidth. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **15**, 3443-3456. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2876358>
- [41] Sun, X., Li, T. and Xing, L. (2020) Research on the Influence of Microgrid to Distribution Network Protection and Improvement Measures. 2020 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Chengdu, 23-25 November 2020, 2243-2248. <https://doi.org/10.1109/iSPEC50848.2020.9351093>
- [42] Lu, X.Q., *et al.* (2017) Distributed Secondary Voltage and Frequency Control for Islanded Microgrids with Uncertain Communication Links. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **13**, 448-460. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2603844>
- [43] Liu, J., Li, J., Song, H., *et al.* (2020) Nonlinear Secondary Voltage Control of Islanded Microgrid via Distributed Consistency. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **35**, 1964-1972. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2998897>
- [44] Zhang, Y., Xie, L. and Ding, Q. (2017) Interactive Control of Coupled Microgrids for Guaranteed System-Wide Small Signal Stability. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 1088-1096. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2495233>
- [45] Yao, W., Yu, W. and Yan, X. (2020) Communication Time-Delay Stability Margin Analysis of the Islanded Microgrid under Distributed Secondary Control. *IEEE PES General Meeting*, Montreal, 2-6 August 2020, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281487>
- [46] Dong, M., Li, L., Nie, Y., *et al.* (2019) Stability Analysis of a Novel Distributed Secondary Control Considering Communication Delay in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 6690-6700. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2910190>
- [47] Wu, X., Xu, Y., He, J., *et al.* (2019) Delay-Dependent Small-Signal Stability Analysis and Compensation Method for Distributed Secondary Control of Microgrids. *IEEE Access*, **7**, 170919-170935. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2955090>
- [48] Nie, Y., Dong, M., Yuan, W., *et al.* (2017) Delay-Dependent Stability Analysis of DC Microgrid with Distributed Control Considering Communication Delay. *Chinese Automation Congress*, Jinan, 20-22 October 2017, 7646-7651. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8244162>
- [49] Zhao, G., Hua, C. and Guan, X. (2020) Reset Observer-Based Zero-Free Dynamic Event-Triggered Control Approach to Consensus of Multiagent Systems with Disturbances. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **52**, 2329-2339. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3003330>
- [50] Anand, S., Dev, A., Sarkar, M.K., *et al.* (2021) Non-Fragile Approach for Frequency Regulation in Power System with Event-Triggered Control and Communication Delays. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **57**, 2187-2201. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3062774>