

适用于有界通信延迟的交流微网功率分配控制

焦迎雪¹, 黄学劲²

(1. 山西铁道职业技术学院 电子信息系, 山西 太原 030013;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:研究了有界时延条件下交流微网的二次频率恢复和有功功率分配问题。针对分布式发电机组,提出了一种分布式动态事件触发控制法,该方法使用动态事件触发机制,可以极大地减少通信负担。通过 Lyapunov 函数对系统进行分析,得到了保证系统稳定、实现渐近频率恢复和有功功率分配的充分条件。在此条件的基础上,得到了所有时滞的显式可容忍上界。该上界可作为 MG 系统规划阶段的设计指南,提高了系统的实时运行安全性。最后,为了验证所提控制方法的有效性,在基于 DSP 控制器的 OPAL-RT 实时模拟器上进行了实验,实验结果验证了所提控制器的有效性和优越性。

关键词:动态事件触发控制;时间延迟;二次频率恢复;有功功率分配

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22908

Power Distribution Control for AC Microgrid with Bounded Communication Delay

JIAO Yingxue¹, HUANG Xuejin²

(1. Department of Electronic information, Shanxi Railway Vocational and Technical College,

Taiyuan 030013, Shanxi, China; 2. School of Electric Power, South China University

of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The problem of secondary frequency recovery and active power distribution for AC microgrid (MG) with bounded time delay were studied. A distributed dynamic event triggering control method was proposed for distributed generator sets. The method used dynamic event triggering mechanism, which could greatly reduce communication burden. Through the analysis of the system by the Lyapunov function, the sufficient conditions to ensure the stability of the system, realize the asymptotic frequency recovery and active power distribution were obtained. On the basis of this condition, the explicit tolerable upper bound for all time delays was obtained. The upper bound could be used as a design guide in the planning stage of MG system, which improved the safety of real-time operation of the system. Finally, in order to verify the effectiveness of the proposed control method, an experiment was carried out on the OPAL-RT real-time simulator based on DSP controller. The experimental results verify the effectiveness and superiority of the proposed controller.

Key words: dynamic event-triggered control; time delay; secondary frequency restoration; active power distribution

近年来,微网(microgrid, MG)受到了应有的高度关注,与传统电力系统相比,其具有环保、高可靠性和高可控制性等优点^[1]。MG 系统是由分布式电源(distributed generators, DGs)、负载、储能系统和控制器组成的一种小型电力系统,可为用户供电^[2]。根据母线类型,MGs 可分为交流、直流和混合 AC/DC 三大类^[3]。本文主要讨论 AC MG 的控制策略。

为了保证 MG 系统的稳定运行,大部分研究均采用了分层控制方案。在首层控制层中,通过下垂控制可实现各 DG 的无功功率和有功功率按照一定的比例增加或减少。然而,下垂控制不可避免地带来了频率和电压调节偏差。因此,在第二层,会建立二次控制,以消除频率和电压偏差。传统上 MG 的二次控制器采用集中式设计,即 MG 中央控制器^[4]。为了实现这样一个控制器,所有

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51817129)

作者简介:焦迎雪(1986—),女,硕士,讲师,Email:jiaoyingxue123@163.com

DGs的频率和电压被收集,并在一个扩散和计算中心与参考值进行比较。因此,这种集中控制器高度依赖通信网络,从而降低了系统的运行安全性^[5-6]。为了克服这些缺点,在二层引入了分布式控制法。通过分布式方法,每个DG只需要收集自身和相邻DG的信息,并在本地计算控制信号。与集中控制相比,这种分布式控制方案更具弹性。如在文献[7]中,即使DGs发生故障,系统仍然可以正常工作。然而,随着系统规模的扩大,以往分布式方法也可能导致沉重的通信负担。为了解决这个问题,分布式事件触发控制法被应用到二层控制中,以降低通信成本。通过MG网络层的事件触发控制,只有在满足某些触发条件时,每个DG的信号才被传输到其相邻的DG。文献[8]提出了一种分布式事件触发协同控制方法,利用两种新型的事件触发机制(event-triggered mechanisms, ETMs)来保证电压和频率的稳定。此外,在文献[9-10]中,分布式事件触发的有功和无功功率共享控制已被应用到MGs中。

此外,通信延时不可避免,这也是分布式二次控制需要解决的另一个实际问题。上述分布式控制器是基于无控制时滞模型设计的。然而,文献[11]已指出通信时延的存在可能导致不稳定性。回顾已有的时滞相关研究成果,分析时滞系统的相关稳定性有两种方法:频域法和时域法。传统的稳定性分析方法是在频域内进行,即利用根轨迹和伯德图等工具进行分析。这些常规的频域方法不能用于分析时变系统和非线性系统的稳定性,这是因为这些复杂系统没有明确定义的传递函数,除非它们在工作点附近局部线性化;另一方面,Lyapunov方法在时域分析中也是一种强大的分析方法,不局限于小信号稳定性分析^[12]。这是因为该方法允许研究系统的稳定性性质而不需要找到它的解。通常,时滞系统的情况是由Lyapunov-Razumikhin和Lyapunov-Krasovski定理求解的。上述泛函方法可求得系统容忍并保持稳定的最大容许时滞上界的充分条件。文献[13]设计了一种分布式控制协议,用于解决通信时延恒定的MG电压和频率恢复问题。文献[14]针对存在通信延迟的MG电压恢复问题,提出了一种最优结构设计方法。文献[15]将 H_∞ 控制方法应用于具有扰动和固定时滞的交流微网二次控制。文献[16]提出了一种考虑时延和带宽限制的基于鲁棒分布式功率分配控制方案。但上

述结果,很难得到保证稳定性的上界。此外,为了减少通信负担,文献[17]针对存在时变时延的MGs,提出了分布式事件触发二次电压控制。尽管如此,上述研究都是通过假设每个DG同时向它的邻居发送信号得到的。这意味着从每个DG到所有邻居的通信延迟是相同的。然而,在实际工程中,不同的通信渠道必然会导致不同的通信时延,这一假设并不成立^[17-18]。

基于此,本文目标是解决在通信时延变化的情况下MG的频率恢复和功率分配问题^[19]。为了克服这些困难,提出了一种分布式动态周期事件触发控制方法,提高通信延迟下系统的稳定性,同时保持系统频率恢复和功率分配的有效性。

1 交流微网下垂控制模型

图1为具有下垂控制的孤岛交流MG系统结构图。

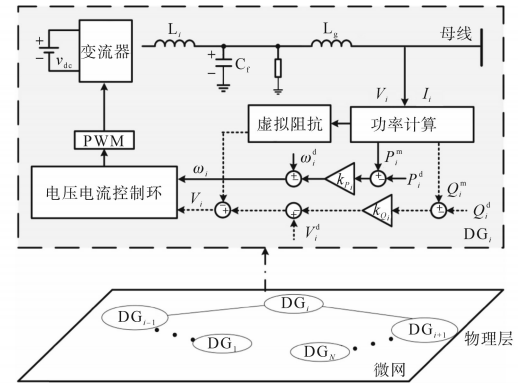


图1 具有下垂控制的孤岛交流MG系统结构图

Fig.1 Structure diagram of island AC MG system with droop control

由图1可知,每个AC MG系统通常包含 N 个DGs,每个DG可被视为一个节点,用 $v = \{1, 2, \dots, N\}$ 来表示。故交流微网模型可以描述为一个加权有向图 $\Gamma_e = (v, \mathcal{E}_e)$,其中 $\mathcal{E}_e$ 为有向图的边集。节点 i 和 k 之间连接输电线路导纳可表示为 $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$,其中 G_{ik} 和 B_{ik} 分别为节点 i 和 k 之间的电导和电纳。节点 i 为节点 j 邻居,可表示为 $i \in N_j$,其中 $N_j = \{i \in v | (i, j) \in \mathcal{E}_e\}$ 为结点 j 的邻居集合。邻接矩阵定义为 $A = [a_{ij}]$,其中,当 $(i, j) \in \mathcal{E}_e$ 时, $a_{ij} = 1$;反之, $a_{ij} = 0$ 。 $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 为图 G 的次数矩阵,其中 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ 。图 G 的拉普拉斯矩阵 L 定义为 $L = D - A$ 。

本文将DGs工作在电压/频率(V/f)控制模式或最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下。在V/f模式下,DG的一次控制器

通常包括功率测量、下垂控制、电压控制和电流控制等功能块。含 N 个 DGs 的 MG 电压和频率下垂函数如下:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_n \mathbf{1}_N - k_{P_i}(P_i^m - P_i^d) \\ V_i = V_n \mathbf{1}_N - k_{Q_i}(Q_i^m - Q_i^d) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{1}_N$ 为 1 的 N 阶列向量; $\omega_i, V_i, \omega_n, V_n$ 分别为频率、电压和它们的参考值; k_{P_i}, k_{Q_i} 分别为有功和无功的下垂系数; $P_i^m, Q_i^m, P_i^d, Q_i^d$ 分别为有功功率实际值、无功功率实际值及其参考值。

通常,在功率测量时, P_i^m 和 Q_i^m 由一阶低通滤波器(LPFs)得到:

$$T_{\omega_i} \dot{P}_i^m = -P_i^m + P_i \quad (2)$$

$$T_{V_i} \dot{Q}_i^m = -Q_i^m + Q_i \quad (3)$$

式中: T_{ω_i}, T_{V_i} 分别为频率和电压 LPFs 的时间常数; P_i 和 Q_i 分别为第 i 个 DG 的有功输出和无功输出。

在 MPPT 模式下, DGs 直接向电网输送电力,在 MG 系统中可视作“负向”负荷。因此,在 MPPT 中加入 DGs。在该模式下,局部功率有时可能为负。局部负荷可分为平衡负荷和不平衡负荷。在设计二次控制器时,通常只考虑平衡负载。这是因为不平衡负载会对分级控制的性能产生轻微的影响,即一级控制和二级控制。

利用图 1 所示的虚拟阻抗,我们可以使阻抗比 R/X 足够小,从而使频率和电压动态解耦。因此,本文主要研究了频率恢复和有功功率分配。由式(1)可知,频率下垂控制会使所有 DGs 的频率输出产生偏差,导致其无法准确跟踪参考值。因此,本文的目标是设计一个分布式二次控制方案,以保证系统的稳定性,并实现以下目标:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\omega_i(t) - \omega_n] = 0 \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{P_i(t)}{P_j(t)} = \frac{k_{P_j}}{k_{P_i}} \quad (5)$$

2 考虑通信延迟的下垂控制设计

本节将设计分布式事件触发控制器来解决上述问题,并设计控制系统,给出采样时间的选择准则。图 2 为本文所提出的控制框架。

在网络层设计一个新的二次控制信号 ω_i^d , 然后发送到物理层的本地控制器。则包含二次控制 ω_i^d 的频率模型为

$$\omega_i = \omega_n - k_{P_i}(P_i^m - P_i^d) + \omega_i^d \quad (6)$$

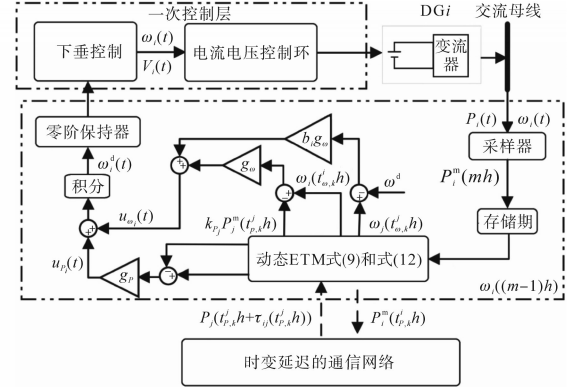


图2 具有动态ETMs的控制器框架

Fig.2 The framework of the controller with dynamic ETMs

$$\text{其中} \quad \omega_i^d = \int u_{\omega_i} + u_{P_i} dt \quad (7)$$

式中: u_{ω_i} 和 u_{P_i} 分别为要设计的频率和功率分配控制输入。

2.1 控制器设计

本文假设在 MG 中,每个二次控制器的采样周期为 h ,即在采样周期 $s_m = mh$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 时,在每个 DG 处更新频率和有功功率等实时数据。采样时间 h 是通过求解线性矩阵不等式推导得到。在通信延迟的影响下,当一个信号从 s_{m-1} 的第 j 个 DG 传输到第 i 个 DG 时,信号将到达 $s_{m-1} + \tau_{ji}(s_{m-1})$ 的第 i 个 DG,其中 $\tau_{ji}(s_{m-1})$ 为 s_{m-1} 处从第 j 个 DG 到第 i 个 DG 的传输延时值。假设所有延时的上界都小于等于 h ,那么 s_{m-1} 处第 j 个 DG 发出的信号到达邻域的时间不迟于瞬时 s_m 。因此,在我们的研究中,我们使用 s_{m-1} 处获得的信息对所有 $t \in [s_m, s_{m+1})$,而不是瞬时 s_m 时刻的信号,以减少时间延迟的影响。为了解决有时滞的频率恢复问题,我们设计了一种含 u_{ω_i} 的新型动态 ETM:

$$u_{\omega_i} = g_{\omega} \sum_{j \in N_i} [\omega_i(t_{\omega,k}^i h) - \omega_j(t_{\omega,k}^j h)] + b_i g_{\omega} [\omega_i(t_{\omega,k}^i h) - \omega_n] \quad (8)$$

式中: $\omega_i(t_{\omega,k}^i h), \omega_j(t_{\omega,k}^j h)$ 分别为第 i, j 个 DG 的频率; g_{ω} 为控制器增益; N_i 为自然数的集合; b_i 用来表示第 i 个 DG 是否知道参考频率 ω_n ,也就是说,如果第 i 个 DG 知道 ω_n ,则 $b_i = 1$,否则, $b_i = 0$ 。

注意,在一个系统中,至少一个 DG 可以获得参考值。事件触发时间序列 $\{t_{\omega,k}^i h\}$ 由以下动态周期 ETMs 生成:

$$\begin{aligned} t_{\omega,k+1}^i &= \min \{ t > t_{\omega,k}^i h \mid |e_{\omega_i}(t)|^2 + \\ &\quad \varepsilon_{\omega} - |e_{\omega_i}(t)|^2 + \varepsilon_{\omega} |e_{\omega_j}(t_{\omega,k}^j h)|^2 + \\ &\quad \theta_{\omega_i} \eta_{\omega_i}(t) \leq 0, t \in \{s_m\}_{m \in N_i} \} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \varepsilon_{\omega} \in (0,1) \quad t_{\omega,0}^i = 0 \quad \theta_{\omega i} \in (0,1) \\ e_{\omega i}(t) = \omega_i(t_{\omega,k}^i h) - \omega_i(s_{m-1}) \\ s_{\omega i}(t_{\omega,k}^i h) = \sum_{j \in N_i} [\omega_i(t_{\omega,k}^i h) - \omega_j(t_{\omega,k}^i h)] + \\ b_i [\omega_i(t_{\omega,k}^i h) - \omega_n] \end{aligned}$$

式中: ε_{ω} 和 $\theta_{\omega i}$ 由用户选择。

对于 $t \in [s_m, s_{m+1})$, 标量 $\eta_{\omega i}(t)$ 的动态特性为
 $\dot{\eta}_{\omega i}(t) = -\eta_{\omega i}(t) - \theta_{\omega i} \eta_{\omega i}(s_m) + \gamma_{\omega} |s_{\omega i}(t_{\omega,k}^i h)|^2$ (10)
 式中: $\dot{\eta}_{\omega i}(t)$ 为标量导数; γ_{ω} 为正标量。

针对有功功率分配问题,基于Lyapunov方法,设计如下分布式事件触发控制器:

$$u_{P_i} = g_P \sum_{j \in N_i} [k_{P_i} P_i^m(t_{\omega,k}^i h) - k_{P_j} P_j^m(t_{\omega,k}^i h)] \quad (11)$$

式中: g_P 为控制器增益,且 $g_P > 0$ 。

事件触发的时间序列 $\{t_{P,k}^i h\}$ 由以下动态周期ETMs生成:

$$\begin{aligned} t_{P,k+1}^i h = \min \{t > t_{P,k}^i h \mid -|e_{P_i}(t)|^2 + \varepsilon_P |s_{P_i}(t_{P,k}^i h)|^2 + \\ \theta_{P_i} \eta_{P_i}(t) \leq 0, t \in \{s_m\}_{m \in N_i}\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } t_{P,0}^i = 0 \quad \varepsilon_P \in (0,1) \quad \theta_{P_i} \in (0,1) \\ e_{P_i}(t) = k_{P_i} P_i(t_{P,k}^i h) - k_{P_i} P_i(s_{m-1}) \end{aligned}$$

式中: ε_P 和 θ_{P_i} 由用户选择。

$$\begin{aligned} \text{对于 } t \in [s_m, s_{m+1}), \text{ 标量 } \eta_{\omega i}(t) \text{ 的动态特性为} \\ \dot{\eta}_{\omega i}(t) = -\eta_{\omega i}(t) - \theta_{P_i} \eta_{\omega i}(s_m) + \gamma_P |s_{P_i}(t_{P,k}^i h)|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

式中: γ_P 为正标量。

2.2 系统稳定性分析及参数选择

所设计的分布式事件触发频率和功率分配控制器有如下规律:

$$\Phi_{\omega} < 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} t_{\omega,k+1}^i h = \min \{t > t_{\omega,k}^i h \mid -|e_{\omega i}(t)|^2 + \varepsilon_{\omega} |s_{\omega i}(t_{\omega,k}^i h)|^2 \leq 0, \\ t \in \{s_m\}_{m \in N_i}\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Phi_P < 0 \quad (16)$$

$$u_{V_i} = g_V \sum_{j \in N_i} [V_i(t_{V,k}^i h) - V_j(t_{V,k}^i h)] + g_V [V_i(t_{V,k}^i h) - V_n] \quad (17)$$

$$\text{其中 } \Phi_{\omega} = [\Phi_{\omega}^{ij}] \in \mathbb{R}^{6N_i \times 6N_i} \quad \Phi_P = [\Phi_P^{ij}] \in \mathbb{R}^{6N_i \times 6N_i}$$

式中: u_{V_i} 为控制量; V_n 为参考电压; g_V 为控制器增益。

利用上述结果,本文总结了控制器参数选择的指导原则。由于篇幅有限,且采用相似的方法,本文仅给出控制器增益 g_{ω} 的一种指导原则:

- 1) 初始化参数 $h, \varepsilon_{\omega}, \beta_{\omega}$ 和 v_{ω} ;
- 2) 求解式(14)所示的不等式;
- 3) 获得控制器增益 g_{ω} 。

3 仿真分析

为了验证所提方法的有效性,本文使用实时模拟器OPAL-RT和DSP(digital signal process)控制器搭建了实验测试平台。在OPAL-RT系统中搭建了一个由四个下垂控制的DGs和一个MPPT模式下工作的光伏的孤岛MG,此外,控制器内置DSP,将PWM信号传输到OPAL-RT,形成了一个完整的CHIL测试平台,具体如图3所示。

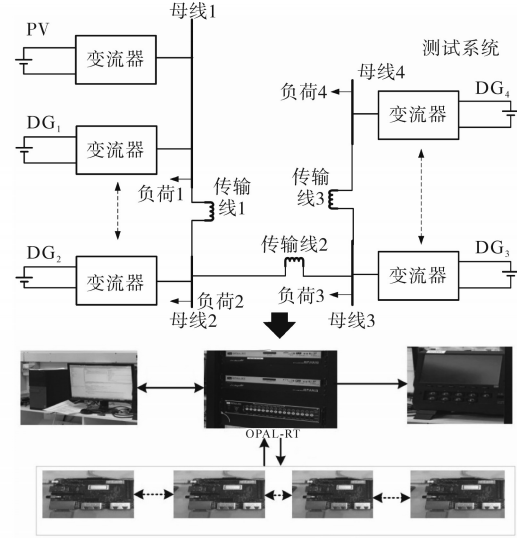


图3 测试系统结构图

Fig.3 Test system structure diagram

图3中虚线表示通信拓扑结构。PWM信号由DSP控制器产生并传输到OPAL-RT系统模拟器。DSP从OPAL-RT系统通过IO接口处接收物理信号。四个DGs和控制器的参数如表1所示。通过求解LMIs(14)和式(16),得到各层控制器采样周期的上界为0.4 s。故本文所提方法对任何 $h < 0.4$ s均是有效的,二次控制器采样时间选择 $h = 0.2$ s, MG一次控制的时间步长为 $5e^{-5}$ s, 其时滞的上界可以为0.2 s。四个DGs的参考电压和频率分别设定为 $220\sqrt{2}$ V和50 Hz,有功功率分配比为 $P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1 : 2 : 3 : 6$,与频率下垂控制增益成反比。

表1 测试系统相关参数

Tab.1 Test system parameters					
参数		DG ₁	DG ₂	DG ₃	DG ₄
负荷	P/W	2 500	2 400	2 300	2 300
	Q/var	1 200	1 300	1 400	1 200
一次 控制器	k_{P_i}	4e ⁻⁴	3e ⁻⁴	2e ⁻⁴	1e ⁻⁴
	k_{Q_i}	1e ⁻³	2e ⁻³	2e ⁻³	2e ⁻³
二次 控制器	$g_{\omega}=0.5, g_P=0.2, g_V=0.5$				
	$b_1=b_2=b_3=1, b_4=0$				
线路参数	$B_{12}=11.11 \text{ S}, B_{23}=20 \text{ S}, B_{34}=33.33 \text{ S},$				
	$G_{12}=0.8 \text{ S}, G_{23}=1.2 \text{ S}, G_{34}=1.63 \text{ S}$				

本文从以下三个案例来验证所提方法的有效性。

3.1 案例1

首先,将所有通信网络的时间延迟设置为 $\tau_{12}=0.15\text{ s}$, $\tau_{21}=0.1\text{ s}$, $\tau_{23}=0.15\text{ s}$, $\tau_{32}=0.05\text{ s}$, $\tau_{34}=0.05\text{ s}$, $\tau_{43}=0.1\text{ s}$ 。该案例分为以下五个阶段:

阶段1:只有一次频率控制器运行;

阶段2:本文设计的二次频率控制器运行;

阶段3:额外负荷 $L_{EL4}=1\ 000\text{ W}+\text{j}500\text{ var}$ 接入母线4;

阶段4:额外负荷 L_{EL4} 断开;

阶段5:额外PV接入系统。

案例1的实验结果如图4~图7所示。

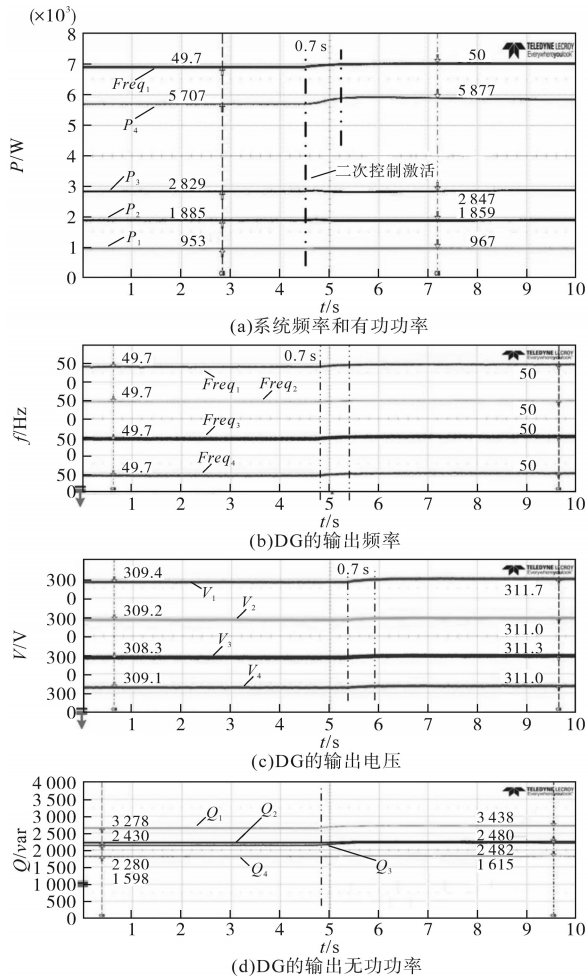


图4 案例1中第2阶段DG的频率、电压、有功功率和无功功率

Fig.4 The frequency, voltage, active and reactive power of each DG at Stage 2 in Case 1

图4中, $Freq_i$ 和 V_i 分别为母线 i 的频率和电压。从图4可以看出,在0.7 s间隔期间,所设计控制器的频率和电压分别恢复到50 Hz和311 V,有功功率比最终保持为 $P_1:P_2:P_3:P_4=967\text{ W}:1\ 859\text{ W}:2\ 847\text{ W}:5\ 877\text{ W}=1:2:3:6$ 。

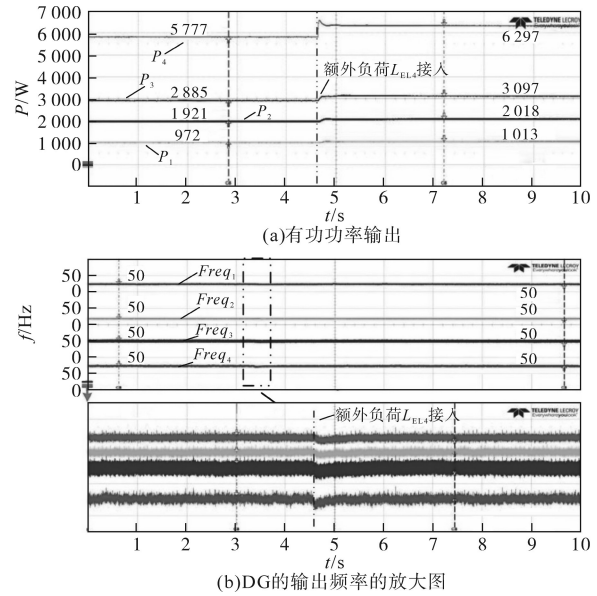


图5 额外负载 L_{EL4} 接入后DG的输出频率和有功功率

Fig.5 The frequency and active power of 4 DGs when L_{EL4} is added

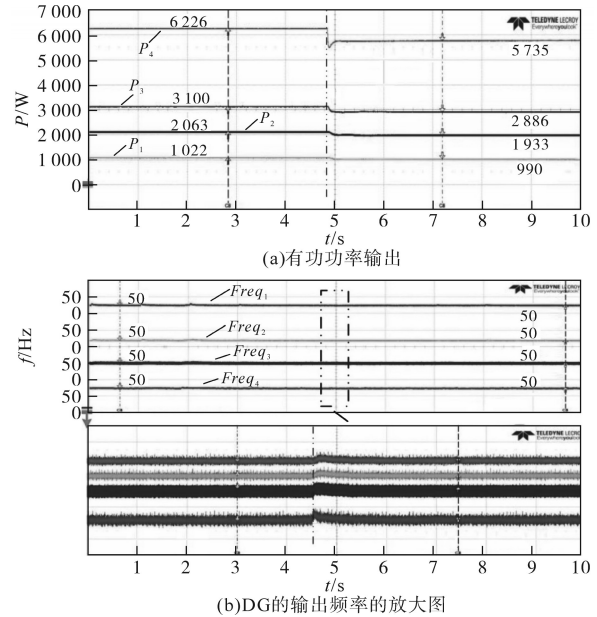


图6 额外负载 L_{EL4} 断开后DG的输出频率和有功功率

Fig.6 The frequency and active power of 4 DGs when L_{EL4} is removed

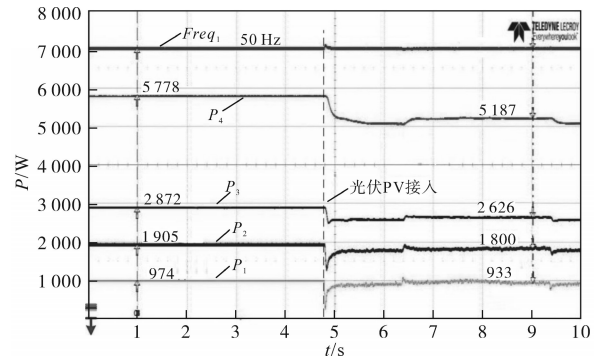


图7 光伏加入后DGs的输出频率和有功功率

Fig.7 The frequency and active power of DGs when the PV is added in the test system

由图6可知,在第三阶段和第四阶段,接入和断开额外负载 L_{EL4} ,有功功率分配最终保持在 $P_1:P_2:P_3:P_4=1:2:3:6$,此外,频率输出仍然收敛到50 Hz,尽管在其瞬态期间存在一些小的波动。

由图7可得,接入PV后,系统频率仍维持在50 Hz。值得注意的是,图7中的有功功率波动是由PV发电机引起的。

3.2 案例2

本案例研究不同延时对系统性能的影响。本文选择以下两组时间延迟, $\tau_{ij}=0.199$ s和 $\tau_{ij}=0.5$ s,其中 $i,j=1,2,3,5,i \neq j$ 。测试系统与案例1相同。实验结果如图8、图9所示。

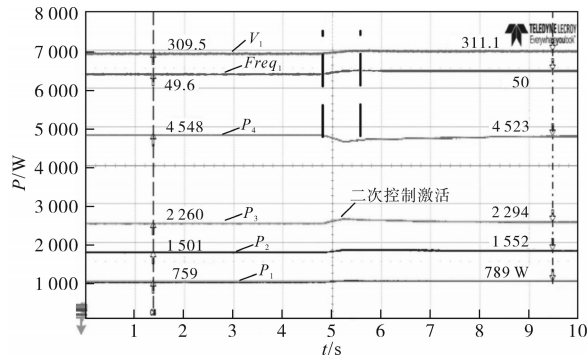


图8 $\tau=0.199$ s时的有功功率、电压和频率

Fig.8 The active power, voltage and frequency when $\tau=0.199$ s

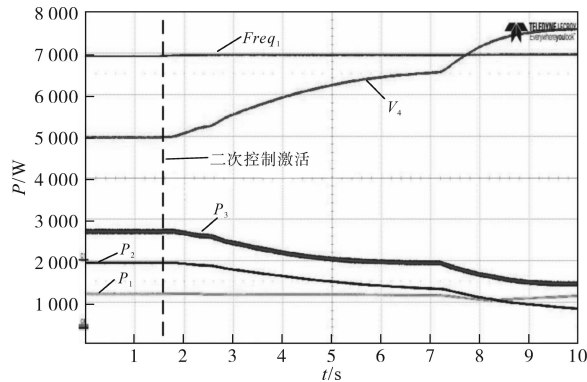


图9 $\tau=0.5$ s时的有功功率、电压和频率

Fig.9 The active power and frequency of DGs when $\tau=0.5$ s

对比图8和图9可知,当延迟 τ 小于所提出的二次控制的采样周期 $h=0.2$ s时,所有系统状态都成功地达到了参考值。这与理论分析是一致的。但是,当 τ 远远大于采样周期 h 时,系统有功输出最终无法达到设计的功率分配比。

3.3 案例3

本案例对比研究动态ETM式(9)与静态ETM式(15)的性能。图10、图11分别为案例1和案例3中的事件触发时间常数。对比图10和图11,可以观察到与提出的ETMs式(9)相比。特别是事件触发的次数大大减少在 DG_2 ,从74减少到41,

这表明本文提出的动态ETMs触发更少。

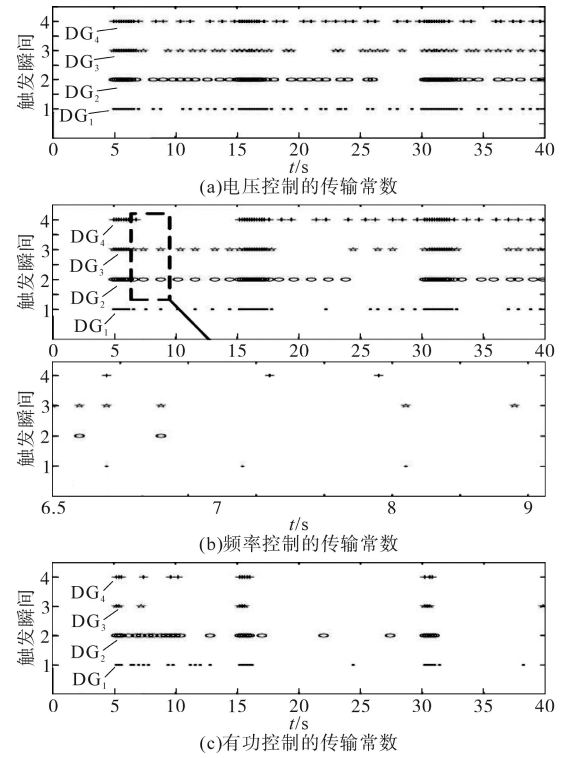


图10 案例1中事件触发时间常数

Fig.10 The event-triggered time constants in case study 1

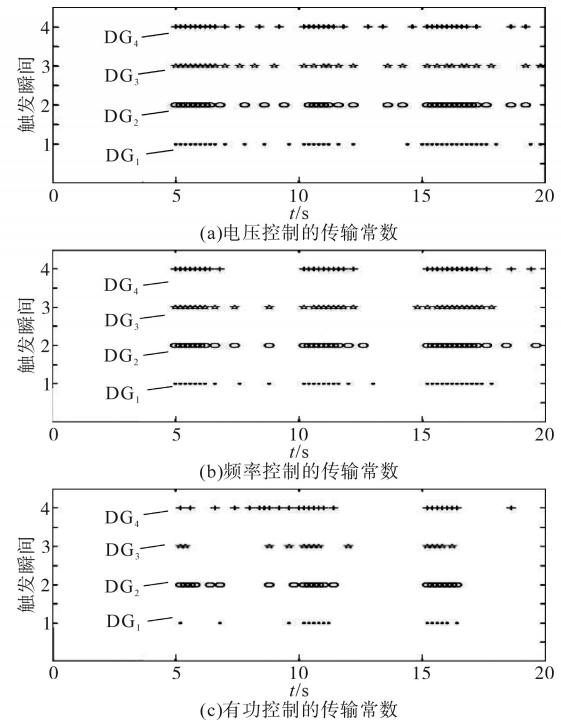


图11 案例3中事件触发时间常数

Fig.11 The event-triggered time constants in case study 3

3.4 案例4

本案例将本文所提方法与分布式控制器进行比较,其参数设置与案例1中时间延迟设置相同,即 $\tau_{ij}=0.199$ s。图12为实验结果图。

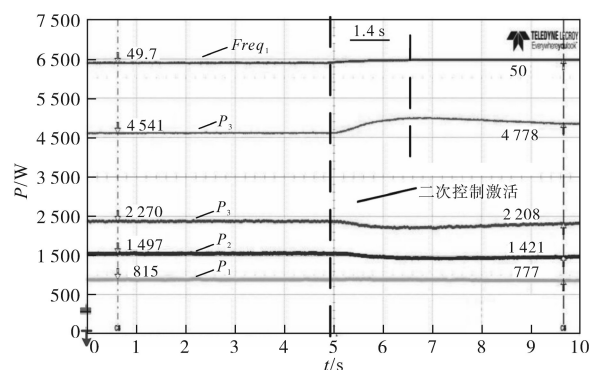


图 12 案例 4 在所有延迟为 0.199 s 时使用分布式控制器的结果

Fig.12 Results in case study 4 using the distributed controller when all the delays are 0.199 s

由图 12 可知,采用本文方法得到的频率的稳定时间约为 1.4 s,远长于图 8 所示的时间。从图 12 中也可以观察到,在这种情况下,有功功率无法保持合理分配,而在图 8 中,有功功率分配比仍然保持理想状态。因此,本文所提方法对通信延迟更有弹性。

4 结论

本文提出了一种分布式动态事件触发的频率恢复和有功功率分配控制方案,以实现以下目标:1)将各 DG 的频率恢复到参考值;2)实现最优有功功率分配;3)减少通信负担,同时保证整个 MGs 系统的稳定性。从理论分析来看,本文建立了计算时滞上界的充分条件,保证了上述目标的实现。所提出的控制器已在基于 OPAL-RT 模拟器的 MG 测试系统中实现。实时测试结果与理论分析结果一致。

参考文献

- [1] SANGWONGWANICH A, YANG Y, BLAABJERG F. High-performance constant power generation in grid-connected power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (3): 1822-1825.
- [2] TAFTI H D, MASWOOD A I, KONSTANTINOU G, et al. A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4088-4101.
- [3] DEHKORDI N M, SADATI N, HAMZEH M. Distributed robust finite-time secondary voltage and frequency control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (5): 3648-3659.
- [4] NUTKANI I U, LOH P C, WANG P, et al. Decentralized economic dispatch scheme with online power reserve for microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 139-148.
- [5] XIA Y, PENG Y, WEI W. Triple droop control method for AC

- microgrids[J]. IET Power Electronics, 2017, 10 (13) : 1705-1713.
- [6] JOHN B, GHOSH A, ZARE F. Load sharing in medium voltage islanded microgrids with advanced angle droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6461-6469.
- [7] NUTKANI I U, PENG W, LOH P, et al. Secondary droop for frequency and voltage restoration in microgrids[C]//European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, 2015: 1-7.
- [8] GUO F, WEN C, MAO J, et al. Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4355-4364.
- [9] BOUZID A M, SICARD P, ABOURIDA S. Secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter based microgrids[C]//IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), 2017: 1-6.
- [10] SOLANKI A, NASIRI A, BHAVARAJU V, et al. A new framework for microgrid management: virtual droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 554-566.
- [11] ZHANG H, KIM S, SUN Q, et al. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1749-1761.
- [12] SCHIFFER J, SEEL T, RAISCH J, et al. Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 96-109.
- [13] YANG Z, XIANG J, LI Y. Distributed consensus-based supply demand balance algorithm for economic dispatch problem in a smart grid with switching graph[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1600-1610.
- [14] 王伟, 徐燕芬. 适用于功率突变的 MTDC 系统改进下垂控制 [J]. 电气传动, 2020, 50(8): 59-64.
- WANG Wei, XU Yanfen. Improved droop control strategy for MTDC system suitable for changed active power[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 59-64.
- [15] 杨旭红, 尹聪聪. 基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.
- YANG Xuhong, YIN Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [16] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 28(4): 1900-1913.
- [17] DENG C, WANG Y, WEN C, et al. Distributed resilient control for energy storage systems in cyber-physical microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17 (2) : 1331-1341.
- [18] 米芝昌, 任春光, 韩肖清, 等. 直流微电网二次调压系统设计

(下转第 76 页)

- QIAO Liwei, WANG Jingyi, GUO Wei, et al. Medium and short-term electricity demand prediction based on random forests algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 150-156.
- [2] 丁业豪, 麦琪. 电力市场用电量需求分析预测模型研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14): 14-23.
- DING Yehao, MAI Qi. Research on power market electricity demand analysis and forecasting model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(14): 14-23.
- [3] 郑国和, 贺民, 郑瑞云, 等. 基于多表融合数据的用户短期用电量预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 146-150.
- ZHENG Guohe, HE Min, ZHENG Ruiyun, et al. Short-term electricity consumption forecasting based on multi-meter fusion data[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 146-150.
- [4] 闵旭, 叶青, 蔡高琰. 基于残差自回归方法的短期区域用电量预测[J]. 技术经济, 2019, 38(6): 119-124.
- MIN Xu, YE Qing, CAI Gaoyan. Short-term regional electricity demand forecasting based on residual autoregression [J]. Technology Economics, 2019, 38(6): 119-124.
- [5] 李海英, 杨冰芳, 孙伟卿. 基于即时学习差异化建模的用电量预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 14-19.
- LI Haiying, YANG Bingfang, SUN Weiqing. Lazy learning based diversity models for electricity consumption forecasting [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 14-19.
- [6] RAMOS D, FARIA P, VALE Z, et al. Industrial facility electricity consumption forecast using artificial neural networks and incremental learning[J]. Energies, 2020, 13(18): 1-18.
- [7] 吕佳倍, 孙伟卿, 韩冬, 等. 基于 GDP-电能消费耦合关系的中长期电量预测[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 1-7, 15.
- LÜ Jiabei, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Medium and long term electricity forecasting based on GDP-electricity consumption coupling[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 1-7, 15.
- [8] 何耀耀, 刘瑞, 撒奥洋. 基于实时电价与支持向量分位数回归的短期电力负荷概率密度预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 768-775.
- HE Yaoyao, LIU Rui, HAN Aoyang. Short-term power load probability density forecasting method based on real time price and support vector quantile regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 768-775.
- [9] 彭喜英, 李博文. 基于随机森林回归算法的感应电机驱动控制[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 61-69.
- MI Zhichang, REN Chunguang, HAN Xiaoqing, et al. Design of secondary voltage regulation system of DC micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 61-69.
- [10] 腾腾, 赵治华. 电磁发射系统监测量预测方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5233-5243.
- TENG Teng, ZHAO Zhihua. The prediction method of monitoring quantities of electromagnetic emission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5233-5243.
- [11] 张林, 刘继春, 马靖宇, 等. 基于函数型特征数据的光伏短期功率预测方法[J]. 电气传动, 2021, 51(12): 66-73.
- ZHANG Lin, LIU Jichun, MA Jingyu, et al. Short term power forecasting method of photovoltaic based on functional characteristic data[J]. Electric Drive, 2021, 51(12): 66-73.
- [12] 苏适, 周立栋, 万筱钟, 等. 计及气象因素的用电负荷短期分类预测模型与方法[J]. 电力建设, 2017, 38(10): 76-83.
- SU Shi, ZHOU Lidong, WAN Xiaozhong, et al. Time-sharing and classified prediction model for short-term load considering meteorological factors[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(10): 76-83.
- [13] 何峰, 钟婷, 谭貌. 基于二次 EEMD 的工业电能需求多步预测[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(3): 72-77.
- HE Feng, ZHONG Ting, TAN Mao. Multi-step forecasting of industrial electrical power demand based on twice ensemble empirical mode decomposition[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(3): 72-77.
- [14] 吴佳懋, 李艳, 符一健. 基于粗糙集-混沌时间序列 Elman 神经网络的短期用电量预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 29-36.
- WU Jiamao, LI Yan, FU Yijian. Short-term power consumption prediction based on rough set chaotic time series Elman neural network [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 29-36.
- [15] 朱尤成, 王金荣, 徐坚. 基于深度学习的中长期风电发电量预测方法[J]. 广东电力, 2021, 34(6): 72-78.
- ZHU Youcheng, WANG Jinrong, XU Jian. Medium and long term wind power generation forecasting method based on deep learning[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(6): 72-78.
- gy storages in a DC microgrid with communication delay[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2033-2042.

收稿日期: 2021-05-27

修改稿日期: 2021-10-17

收稿日期: 2021-01-03

修改稿日期: 2021-01-21