

孤岛微电网的分布式有限时间事件触发二次协调控制

周建萍,张健,茅大钧,葛祥一,叶剑桥,方乐

(上海电力大学 自动化工程学院,上海 200090)

摘要:针对传统的下垂控制策略会导致孤岛微电网稳态角频率和电压偏离额定值,且其依赖周期性通信的问题,提出一种孤岛微电网的分布式有限时间事件触发二次协调控制。首先基于多智能体系统的追踪一致性,即以系统稳态电压和角频率参考值为虚拟领航者,视分布式电源(DG)为多智能体系统的智能体,来实现系统电压和角频率的恢复控制以及期望的有功功率比例分配。然后设计了分布式有限时间事件触发二次协调控制,且只在事件触发时刻进行信息交换,其余时刻利用状态估计器输出代替DG实际状态。采用李雅普诺夫方法分析了所提策略的稳定性和可行性。最后在MATLAB/Simulink中搭建孤岛微电网测试系统进行仿真分析,仿真结果及理论分析验证了所提控制方法的有效性和优越性。

关键词:孤岛微电网;有限时间;事件触发;二次协调控制;多智能系统;一致性

中图分类号:TM 743

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110010

0 引言

近年来,随着分布式电源(DG)的广泛应用,集成大量DG的微电网系统得以迅速发展。微电网是可运行在并网模式或者孤岛模式下^[1],具有DG、能量储存和本地负载的低压网络。并网模式下,微电网电压和角频率参考值可由主网提供,通过联络线实现与主网的功率交换。孤岛模式下,微电网将面临更严峻的问题,既要求微电网系统自行维持角频率和电压的稳定以及实现有功和无功分配,又必须随时保持供需平衡,否则会导致系统稳态角频率和电压偏移额定值。因此,合理的角频率和电压控制策略是实现其自身稳定运行的关键。为了补偿传统下垂控制导致孤岛微电网系统的稳态角频率和电压偏差,提出了二次协调控制^[1]。

孤岛微电网二次协调控制是通过电压和角频率的给定参考值计算得到相应的调整量,反馈给初次控制并进行补偿。二次协调控制分为集中式控制结构和分布式控制结构。集中式控制结构是利用中央处理器检测系统的电压和角频率,使用比例积分控制器为初次控制设置参考值,而分布式控制结构则不需要建立中央控制器来收集所有本地控制器的信息,只需要和相邻控制器之间交换信息即可,并且可以进行并行数据处理以提高响应速度。因此文献[2-3]将分布式多智能体系统MAS(Multi Agent System)结构用于孤岛微电网的二次协调控制中,将孤岛微电

网二次协调控制问题转化为MAS追踪同步问题,即视微电网中的DG为MAS中的智能体,同时将电压和角频率期望值设置为虚拟领航者,只需小部分DG直接访问领航者,电压和角频率可以通过相邻DG之间的通信来准确恢复到参考值。文献[2]和文献[3]分别提出了分布式固定时间控制方法和分布式均值法来实现电压和角频率的二次协调控制。进一步地,文献[3]利用内模设计方法,保证了功率按下垂系数分配。文献[4]则是从离散化角度来设计角频率、电压二次协调控制。

大多数二次协调控制策略只能达到渐近一致性,这意味着收敛速度至多呈指数型增加。但是,在某些工程应用中,要求在有限时间内收敛才能达成一致性(例如当控制精度至关重要时)。因此,研究微电网有限时间下的二次协调控制具有十分重大的实际意义。文献[5]在有限时间内实现了电压和角频率恢复控制以及准确的有功功率分配。文献[6]提出了一种鲁棒的有限时间控制算法对孤岛微电网进行二次协调控制,对于各种干扰和参数扰动下,其收敛性可以得到保持。文献[7]和文献[8]分别提出了具有无界控制输入和有界控制输入的有限时间二次协调控制策略。相比文献[7],文献[8]采用饱和和功能避免超出控制输入范围以实现有界控制输入的有限时间二次协调控制,通过这种控制算法,可以在有限时间内实现系统角频率恢复至额定角频率以及精确的有功功率分配,并抑制了瞬态过冲。

上述方法均是基于周期性采样控制策略,这意味着各DG之间的通信负担大,然而在实践中,通信带宽往往是有限的。因此,为了减轻通信负担,提出了基于事件触发控制机制的孤岛微电网二次协调控制^[9]。事件触发控制机制是指控制任务按需执行,在保证控制性能的前提下,减少通信主体之间的通

收稿日期:2020-12-04;**修回日期:**2021-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61275038);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设专项(19020500700)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61275038) and the Special Project for Capacity Building of Local Colleges and Universities of Shanghai “Science and Technology Innovation Action Plan”(19020500700)

信次数,避免了大量的冗余信息传输。事件触发控制不仅需要设计事件触发函数,还需证明其具有正的最小事件间隔时间(排除Zeno现象)。文献[10]采用分布式事件触发控制策略用于孤岛微电网二次电压控制。进一步地,文献[11]将分布式事件触发控制策略用于电压和角频率的二次协调控制以及实现准确的有功功率比例分配,由于对于电压-无功平衡中的无功功率采用的是滤波前后的差值,这使得电压的控制更加准确。文献[12]将事件触发控制应用于多混合储能的孤岛微电网的分层协调控制中。

基于上述研究成果,为了加快孤岛微电网二次协调控制在事件触发下的响应速度,增强系统抗干扰能力以及提升系统的即插即用性能,设计了一种基于有限时间下的分布式事件触发控制算法。该算法是以一致性收敛速度为突破口,通过设计有限的时间上限来提高收敛速度。同时所提策略既能使微电网实现电压、角频率二次协调控制以及功率均分控制,又解决了传统二次协调控制中连续通信导致通信耗能大的问题。李雅普诺夫稳定理论和仿真实例验证了所提策略的可行性和有效性。

1 孤岛微电网的分布式控制结构和图论

1.1 孤岛微电网的分布式控制结构

图1为孤岛微电网基于电压源变换器(VSC)的分布式控制结构图,由能量源、VSC、串联LC滤波器、RL输出连接器和局部控制器组成,其中,局部控制器包含功率、电压和电流控制回路。图中, p' 、 q' 分别为线性化前有功功率和无功功率; P 、 Q 分别为线性化后有功功率和无功功率; i_x ($x=a, b, c$)为三相电流; i_{gx} 为滤波后三相电流; V_{dc} 为直流源的直流电压; m_d 、 m_q 分别为电压、电流控制环输出调制比的 d 轴和 q 轴分量; V_{dref} 、 V_{qref} 分别为输入电压 d 轴、 q 轴分量的参考值; ω 为输出角频率; ω_0 为二次控制角频率输出值; v_0 为二次控制电压输出值; D_p 、 D_q 分别为有功功率下垂系数和无功功率下垂系数。

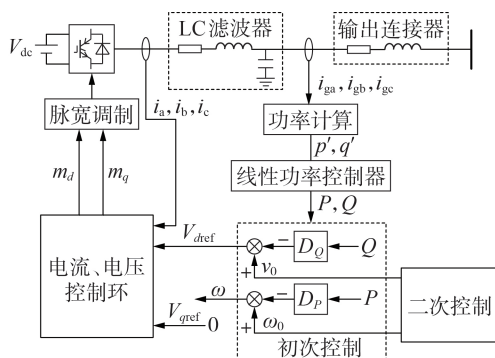


图1 孤岛微电网分布式控制结构

Fig.1 Distributed control structure of islanded microgrid

下垂控制广泛应用于孤岛微电网初次控制,初次控制通常可利用 P - ω 和 Q - V 下垂控制实现^[13],分

别如式(1)、(2)所示。

$$\omega_i = \omega_{ni} - D_{pi} P_i \quad (1)$$

$$v_i = v_{ni} - D_{qi} Q_i \quad (2)$$

式中: ω_i 、 v_i 分别为 DG_i 的输出角频率和电压幅值; ω_{ni} 、 v_{ni} 分别为 DG_i 的 ω_i 、 v_i 的参考值,由二次协调控制给定; P_i 、 Q_i 分别为 DG_i 的有功功率、无功功率输出值; D_{pi} 、 D_{qi} 分别为 DG_i 的有功功率下垂系数、无功功率下垂系数。通常,可以分别通过式(3)、(4)所示的一阶低通滤波器来获得 P_i 和 Q_i ^[14],其中 p'_i 和 q'_i 由式(5)、(6)所示的功率计算模块计算得出^[15]。

$$P_i = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} p'_i \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} q'_i \quad (4)$$

$$p'_i = v_{di} i_{odi} + v_{qi} i_{oqi} \quad (5)$$

$$q'_i = v_{di} i_{odi} - v_{qi} i_{oqi} \quad (6)$$

式中: ω_c 为低通滤波器截止角频率,取31.25 rad/s; v_{di} 、 v_{qi} 分别为 v_i 的 d 轴、 q 轴分量; i_{odi} 、 i_{oqi} 分别为 i_x 的 d 轴、 q 轴分量。下垂控制器在 dq 坐标系下进行设计,电压参考值基于 d 轴定向,即 $v_{di} = v_i$ 和 $v_{qi} = 0$ 。

为了补偿下垂控制所导致的角频率和电压偏离额定值,本文采用分布式有限时间事件触发二次协调控制来设计新的参考值 ω_{ni} 和 v_{ni} ,使得 DG_i 输出 ω_i 和 v_i 恢复至所设计的额定值以补偿偏差。

1.2 图论

设通信拓扑图为 $G=(V, E, A)$,其中 $V=\{1, 2, \dots, N\}$ 为顶点非空有限集, N 为节点总数, $E \in V \times V$ 为边集, $A=[a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 为加权邻接矩阵。如果在节点 i 和节点 j 之间存在路径,那么通信拓扑图 G 被称为连接图。如果存在边 $(i, j) \in E$ 并且假设边的邻接元素满足 $a_{ij} > 0$ 、 $a_{ii} = 0$,那么节点 i 和节点 j 被称为相邻,可表示为 $N_i = \{j | j \in V, (j, i) \in E\}$ 。设节点 i 的对角度为 $d_i = \sum a_{ij} (j \in N_i)$;度矩阵为 $D = \text{diag}\{d_i\} (i=1, 2, \dots, N)$ 。通信拓扑图 G 的拉普拉斯矩阵定义为 $L = D - A$,且 $L=[L_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 。

2 有限时间事件触发二次协调控制设计

在大多数二次协调控制的收敛方法中,收敛时间都是未知的,并且是在无限时间范围内实现DG系统的一致性收敛。在本节中,设计有限时间事件触发二次协调控制算法,以消除角频率和电压偏差以及实现精准的有功功率比例分配,同时根据李雅普诺夫函数从给定初始衰减到0的时间来估算收敛时间,以及给出事件触发函数来确定事件触发时刻。有限时间事件触发二次协调控制算法中,收敛时间大幅缩短,这在快速操作中是理想的,结合事件触发机制则可以减少DG之间的通信次数以达到节约硬件资源的目的。有限时间事件触发二次协调控制具

有如下的期望。

1)角频率二次协调控制及有功功率分配。存在角频率恢复时间 T_f 、有功功率恢复时间 T_p 使各个 DG 下垂控制的 ω_{ni} 都满足式(7)、(8)所示关系式。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T_f} (\omega_i(t) - \omega_j(t)) = 0 \\ \omega_i(t) = \omega_j(t) = \omega_{ni} \end{cases} \quad t \geq T_f, i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T_p} (D_{P_i} P_i - D_{P_j} P_j) = 0 \\ D_{P_i} P_i = D_{P_j} P_j \end{cases} \quad t \geq T_p, i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

角频率及有功功率分配的恢复时间为:

$$T_F = \max\{T_f, T_p\} \quad (9)$$

式中: $\max\{\cdot, \cdot\}$ 为最大值函数。

2)电压二次协调控制。存在电压恢复时间 T_v 使各个 DG 下垂控制的 v_{ni} 都满足:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T_v} (v_i(t) - v_j(t)) = 0 \\ v_i(t) = v_j(t) = v_{ni} \end{cases} \quad t \geq T_v, i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (10)$$

3)排除 Zeno 行为。任意第 k 次事件触发时刻 t_k 之间存在时间下界 t_D , 即:

$$t_{k+1} - t_k \geq t_D > 0 \quad (11)$$

式(7)~(10)表示所设计策略使系统在对应的有限时间实现恢复控制,式(11)表示避免所设计事件触发策略在某段时间内发生无限次事件触发。

2.1 角频率二次协调控制及有功功率分配设计

角频率二次协调控制及有功功率分配的目的是设计初次控制输出角频率参考值 ω_{ni} , 使各个 DG 的输出角频率 ω_i 恢复到额定值。通过使用输入输出反馈线性化方法, 对式(1)求导获得 ω_{ni} 的动态系统为:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i(t) = \dot{\omega}_{ni} - D_{P_i} \dot{P}_i = u_{\omega_i}(t) \\ D_{P_i} \dot{P}_i = u_{P_i}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: u_{ω_i} 、 u_{P_i} 分别为 DG_{*i*} 的角频率、有功功率辅助控制器。下垂控制中 DG_{*i*} 的输出角频率参考值 ω_{ni} 为:

$$\omega_{ni} = \int u_{\omega_i}(t) + u_{P_i}(t) dt \quad (13)$$

具有有限时间控制输入的辅助控制器 u_{ω_i} 和 u_{P_i} 设计为:

$$\begin{cases} u_{\omega_i} = -\beta_{\omega_i} s_{ig} \left\{ \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\omega_i - \omega_j) + b_i (\omega_i - \omega_{ni}) \right]^{\alpha_{\omega_i}} \right\} \\ u_{P_i} = -\beta_{P_i} s_{ig} \left\{ \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (D_{P_i} P_i - D_{P_j} P_j) \right]^{\alpha_{P_i}} \right\} \end{cases} \quad (14)$$

式中: α_{ω_i} 、 α_{P_i} 分别为 DG_{*i*} 的角频率控制增益和有功功率控制增益, $\alpha_{\omega_i}, \alpha_{P_i} \in (0, 1)$; β_{ω_i} 、 β_{P_i} 分别为 DG_{*i*} 的角频率放大系数和有功功率放大系数, 且 $\beta_{\omega_i}, \beta_{P_i} > 0$; b_i 为领导者连接系数, 若 DG_{*i*} 与虚拟领导者相连, 则 $b_i = 1$, 否则 $b_i = 0$; $s_{ig}\{\cdot\} = \text{sign}(\cdot) \cdot |\cdot|$, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

为了降低 DG 之间对通信网络的依赖程度, 将角频率和有功功率状态估计值代替式(14)中的实际

值。则 u_{ω_i} 和 u_{P_i} 可进一步改写为:

$$\begin{cases} u_{\omega_i} = -\beta_{\omega_i} s_{ig} \left\{ \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{\omega}_i - \hat{\omega}_j) + b_i (\hat{\omega}_i - \omega_{ni}) \right]^{\alpha_{\omega_i}} \right\} \\ u_{P_i} = -\beta_{P_i} s_{ig} \left\{ \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (D_{P_i} \hat{P}_i - D_{P_j} \hat{P}_j) \right]^{\alpha_{P_i}} \right\} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \hat{\omega}_i(t) = \omega_i(t_{l_{\omega_i}}) \quad t \in [t_{l_{\omega_i}}, t_{l_{\omega_i}+1}) \\ D_{P_i} \hat{P}_i(t) = D_{P_i} P_i(t_{l_{P_i}}) \quad t \in [t_{l_{P_i}}, t_{l_{P_i}+1}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: 上标“ $\wedge$ ”表示相应变量的估计值; l_{ω_i} 、 l_{P_i} 分别表示 DG_{*i*} 的角频率控制器、有功功率控制器发生第 l 次事件触发。定义角频率测量误差 $e_{\omega_i}(t)$ 和有功功率测量误差 $e_{P_i}(t)$ 分别为:

$$\begin{cases} e_{\omega_i}(t) = \omega_i(t_{l_{\omega_i}}) - \omega_i(t) \\ e_{P_i}(t) = D_{P_i} P_i(t_{l_{P_i}}) - D_{P_i} P_i(t) \end{cases} \quad (17)$$

当测量误差范数 $\|e_i(t)\|_1$ 达到事件触发条件时, 事件就会被触发, 状态估计器估计值就等于实际控制器的值, 且同时更新为 0, 此时 $\omega_i(t_{l_{\omega_i}-1})$ 、 $P_i(t_{l_{P_i}-1})$ 分别变为 $\omega_i(t_{l_{\omega_i}})$ 、 $P_i(t_{l_{P_i}})$ 。随着事件推移, $\|e_i(t)\|_1$ 会增加, 直到下一个事件触发时刻到来, 事件触发函数逐渐收敛至 0。在事件触发时间间隔内, DG 间是无需通信的, 只需在事件触发时刻进行信息交换而不必进行连续信息交换, 降低了对通信系统的要求。在本文中, 各 DG 都有自己的事件触发函数, 仅使用自身 DG 和相邻 DG 信息进行定义。事件触发机制见图 2。

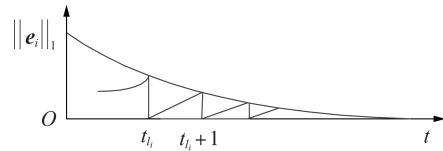


图 2 事件触发机制

Fig.2 Event-tiggered generation mechanism

针对角频率二次协调控制与有功功率分配的分布式有限时间事件触发函数设计和证明如下。

结合式(16)和式(17), 则式(15)可写成:

$$\begin{cases} u_{\omega_i} = -\beta_{\omega_i} s_{ig} \left\{ \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} [(\omega_i - \omega_j) + (e_{\omega_i} - e_{\omega_j})] + b_i (\omega_i + e_{\omega_i} - \omega_{ni}) \right]^{\alpha_{\omega_i}} \right\} \\ u_{P_i} = -\beta_{P_i} s_{ig} \left\{ \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} [(D_{P_i} P_i - D_{P_j} P_j) + (e_{P_i} - e_{P_j})] \right]^{\alpha_{P_i}} \right\} \end{cases} \quad (18)$$

定义角频率误差 $\varepsilon_{\omega_i}(t) = \omega_i(t) - \omega_{ni}$, 则式(18)可写成:

$$\begin{cases} u_{\omega i} = -\beta_{\omega i} s_{ig} \left\{ \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(b_i/a_{ij} + 1) \varepsilon_{\omega i} - \varepsilon_{\omega j}] + \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(b_i/a_{ij} + 1) e_{\omega i} - e_{\omega j}] \right\}^{\alpha_{\omega i}} \\ u_{P_i} = -\beta_{P_i} s_{ig} \left\{ \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(D_{P_i} P_i - D_{P_j} P_j) + (e_{P_i} - e_{P_j})] \right\}^{\alpha_{P_i}} \end{cases} \quad (19)$$

引入角频率相关变量 $y_{\omega i}(t)$ 、 $E_{\omega i}(t)$ 及有功功率相关变量 $y_{P_i}(t)$ 、 $E_{P_i}(t)$ ，并定义为：

$$\begin{cases} y_{\omega i}(t) = -\sum_{j \in N_i} a_{ij} [(b_i/a_{ij} + 1) \varepsilon_{\omega i} - \varepsilon_{\omega j}] \\ E_{\omega i}(t) = -\sum_{j \in N_i} a_{ij} [(b_i/a_{ij} + 1) e_{\omega i} - e_{\omega j}] \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} y_{P_i}(t) = -\sum_{j \in N_i} a_{ij} (D_{P_i} P_i - D_{P_j} P_j) \\ E_{P_i}(t) = -\sum_{j \in N_i} a_{ij} (e_{P_i} - e_{P_j}) \end{cases} \quad (21)$$

考虑 DG 间的无向通信拓扑是连通的，且至少 1 个 DG 能够获取参考角频率信息，则在辅助控制器式(15)的作用下，采用如式(13)所示的一次角频率控制参考值，使系统能在有限时间内实现角频率二次协调控制和有功功率的比例分配。本文设计了如式(22)所示事件触发函数。

$$\begin{cases} f_{\omega i}(E_{\omega i}, y_{\omega i}) = E_{\omega i}(t) - k_{\omega i} y_{\omega i}(t) \\ f_{P_i}(E_{P_i}, y_{P_i}) = E_{P_i}(t) - k_{P_i} y_{P_i}(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中：以角频率事件触发为例，非负序数 $k_{\omega i}$ 规定了 $E_{\omega i}/y_{\omega i}$ 的上界，将 $E_{\omega i}/y_{\omega i} = k_{\omega i}$ 作为事件触发时刻，DG_i 传输信息，初始化角频率状态估计器输出为实际角频率值 $\omega_i(t_{l_i})$ ，同时 $E_{\omega i}/y_{\omega i}$ 复归 0。而当 $E_{\omega i}/y_{\omega i} < k_{\omega i}$ 时，DG_i 无需传输信息，控制系统采用状态估计值维持系统稳定。设 $k_{\omega i} > 0$ ， $k_{P_i} > 0$ ，详细推导及李雅普诺夫稳定性证明见附录 A^[16]。

避免 Zeno 现象的出现，在附录 B 中证明了任意 DG 的事件触发时间间隔 $t_k^i - t_{k+1}^i$ 均大于 0，时间下界为严格正的 τ_i ，如式(23)所示^[17]。

$$\tau_i \geq \frac{\ln(k_i + 1)}{2k_i \lambda_{\max}(L + D)} \quad (23)$$

式中： $\lambda_{\max}(L + D)$ 表示矩阵 $L + D$ 的最大特征值； k_i 为任意 DG_i 所对应的 $k_{\omega i}$ 、 k_{P_i} 或者 k_{V_i} 。

经过上述分析，角频率二次协调控制和有功功率比例分配的分布式有限时间事件触发二次协调控制设计见附录 C 图 C1。

2.2 电压二次协调控制设计

电压二次协调控制的目的是设计初次控制输出电压参考值 v_{ni} ，使各个 DG 的输出电压幅值恢复到额定值。对式(2)求导以获得 v_{ni} 的动态系统为：

$$\dot{v}_i = \dot{v}_{ni} - D_{Q_i} \dot{Q}_i = u_{vi} \quad (24)$$

式中： u_{vi} 为电压辅助控制器。下垂控制中 DG_i 的输出电压参考值 v_{ni} 为：

$$v_{ni} = \int (u_{vi} + D_{Q_i} \dot{Q}_i) dt \quad (25)$$

具有有限时间控制输入的电压辅助控制器 u_{vi} 设计为：

$$u_{vi} = -\beta_{vi} s_{ig} \left\{ a_{ij} \left[\sum_{j \in N_i} (v_i - v_j) + b_i (v_i - v_{ni}) \right] \right\}^{\alpha_{vi}} \quad (26)$$

式中：电压放大系数 $\beta_{vi} > 0$ ；电压控制增益 $\alpha_{vi} \in (0, 1)$ 。

为了降低 DG 之间对通信网络的依赖程度，电压辅助控制器 u_{vi} 可进一步改写为：

$$u_{vi} = -\beta_{vi} s_{ig} \left\{ a_{ij} \left[\sum_{j \in N_i} (\hat{v}_i(t) - \hat{v}_j(t)) + b_i (\hat{v}_i(t) - v_{ni}) \right] \right\}^{\alpha_{vi}} \quad (27)$$

式中： $\hat{v}_i(t) = v_i(t_{l_i})$ ， $t \in [t_{l_i}, t_{l_i+1})$ 。电压二次控制的触发函数为：

$$f_{vi}(E_{vi}, y_{vi}) = E_{vi}(t) - k_{vi} y_{vi}(t) \quad (28)$$

式中：非负系数 $k_{vi} > 0$ 。

电压二次协调控制的分布式有限时间事件触发二次协调控制见附录 C 图 C2。分布式有限时间事件触发二次协调控制框架见附录 C 图 C3。

3 仿真算法分析

为验证本文提出的孤岛微电网的分布式有限时间事件触发二次协调控制策略的有效性，在 MATLAB / Simulink 中搭建包含 4 个 DG、额定输出电压幅值为 380 V 且额定角频率为 50 Hz 的孤岛微电网模型，如附录 C 图 C4 所示，相关参数见附录 C 表 C1—C3。

为测试所提策略的动态响应特性，仿真过程分成 2 个阶段： $[0, 3)$ s 采用初次控制，即仅采用下垂控制；第 3 s 加入所设计的分布式有限时间事件触发二次协调控制。

3.1 所提策略的响应实验

分布式有限时间事件触发二次协调控制的输出波形见附录 D 图 D1—D4。由图可知：在 3 s 之前，仅靠下垂控制可使系统的角频率达到稳定，但不能稳定在 100π rad/s，输出电压达到稳定，但无法稳定在 380 V，所以下垂控制会使系统产生稳态偏移；在 3 s 时，加入二次协调控制后，使得系统角频率逐渐稳定至额定值，输出电压也稳定至额定值。可以看出，DG 输出的有功功率反比于下垂系数，实现了有功功率比例分配。这说明所提策略能有效实现无静差控制，同时实现有功功率比例分配。

针对所提策略的事件触发时刻，以 3~4 s 为例（其中具体事件触发次数见附录 D 表 D1，平均通信时间

间隔见附录 D 表 D2,可知有限时间事件触发控制,角频率、电压和有功功率在分布式事件触发控制的离散通信行为下可实现信息交换,因此减少了信息交换量,同时降低了对通信网络的要求。

3.2 所提策略与传统策略对比实验

图 3 为采用 3 种不同策略下角频率、电压幅值对比图。本文分别选择 DG_3 的角频率和 DG_1 的电压进行对比。由图可知,所提出的分布式有限时间事件触发二次协调控制取得了最快的收敛速度。

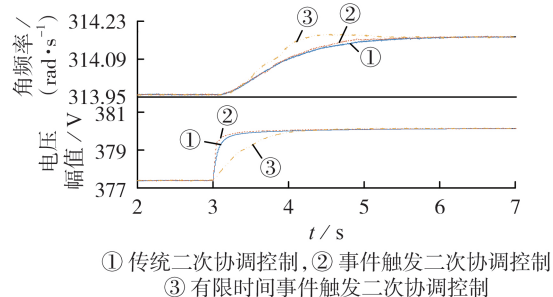


图 3 3 种不同策略的实验结果对比

Fig.3 Comparison of experimental results among three different strategies

3.3 负荷切换测试实验

所提策略在 7 s 时负荷切换的波形响应图见附录 E 图 E1。由图可知,负荷切换电压幅值、角频率、有功功率和有功功率分配在经过小的波动后稳定在所期望的稳态,说明在所提策略下,系统切换负荷后,经过小波动能保持稳定。

3.4 即插即用测试实验

本节测试所提策略的即插即用能力。在 7 s 时断开 DG_4 与系统的连接,并在 9 s 时重新连接。由附录 C 图 C4 可知,当断开 DG_4 时, DG_1 — DG_3 与期望值仍能组成一个完整系统,依旧可以从虚拟领导节点接收信息。因此, DG_1 — DG_3 仍可以实现二次协调控制的目的。实验结果如图 4 所示,当重新连接 DG_4 时,系统将承受严重的振荡,这是因为未实现预同步。但是,系统角频率波动范围保持在 $[311, 316]$ rad/s,

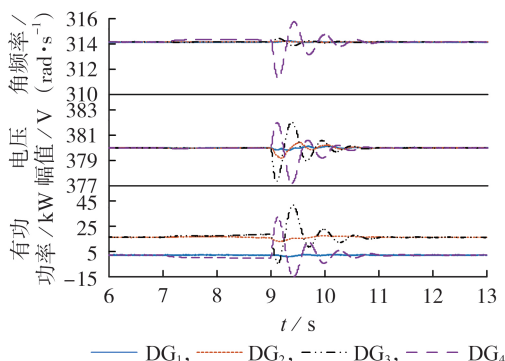


图 4 所提策略即插即用测试结果

Fig.4 Results of plug and play test of proposed strategy

说明即使在这种情况下,系统仍然可以保持稳定。

4 结论

为了解决传统下垂控制电压和角频率偏移以及通信负担大等问题,本文基于 DG 自身信息和其相邻 DG 信息,设计了分布式有限时间事件触发二次协调控制。所设计方案在有限时间内解决角频率和电压偏移问题,且实现了有功功率比例分配,在提高收敛速度的同时,利用李雅普诺夫稳定理论设计事件触发函数以减少系统的通信次数,节约通信资源。基于仿真实验结果可得如下结论。

1) 所提策略能补偿传统下垂控制引起的角频率和电压偏移,使角频率和电压恢复至额定值,且实现有功功率比例分配,保证孤岛微电网的稳定运行。

2) 所设计的分布式有限时间事件触发控制机制,在保证系统稳态性能的前提下,减少系统的通信次数,节约通信资源。负荷切换时,能快速协调控制角频率和电压达到期望值,具有即插即用的功能。

3) 采用分布式有限时间事件触发二次协调控制能够更有效地加快微电网的角频率和电压的响应特性,提高收敛速度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 米阳,宋根新,宋元元,等. 孤岛交直流混合微电网多级功率管理策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(7):38-45.
MI Yang, SONG Genxin, SONG Yuanyuan, et al. Strategy of multi-level power management for islanded AC/DC hybrid microgrid cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(7):38-45.
- [2] 陈刚,李志勇,韦梦立. 孤岛微电网的分布式固定时间二次协调控制[J]. 控制与决策,2019,34(1):205-212.
CHEN Gang, LI Zhiyong, WEI Mengli. Distributed fixed-time secondary coordination control of islanded microgrids[J]. Control and Decision, 2019,34(1):205-212.
- [3] 陈萌,肖湘宁. 基于分布式内模设计的微电网协调二次控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(10):145-153.
CHEN Meng, XIAO Xiangning. Cooperative secondary control strategy of microgrids based on distributed internal model design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10):145-153.
- [4] 吕振宇,苏晨,吴在军,等. 孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J]. 电工技术学报,2017,32(6):209-219.
LÜ Zhenyu, SU Chen, WU Zaijun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(6):209-219.
- [5] 吴丽珍,王晓婷,郝晓弘,等. 孤岛微电网电压不平衡网络化分层补偿方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):137-144.
WU Lizhen, WANG Xiaoting, HAO Xiaohong, et al. Networked hierarchical approach for voltage unbalance compensation in island microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(2):137-144.
- [6] GUO F H, WEN C Y, MAO J F, 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.
- [7] ZUO S, DAVOUDI A, SONG Y D, et al. Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10):5988-5997.
- [8] ZHAO T Q, DING Z T. Distributed finite-time optimal resource management for microgrids based on multi-agent framework[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8):6571-6580.
- [9] LU X Q, YU X H, LAI J G, et al. A novel distributed secondary coordination control approach for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):2726-2740.
- [10] 肖湘宁, 王鹏, 陈萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8):1894-1902.
- XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8):1894-1902.
- [11] CHEN M, XIAO X N. Secondary voltage control in islanded microgrids using event-triggered control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(8):1872-1878.
- [12] CHEN M, XIAO X N, GUERRERO J M. Secondary restoration control of islanded microgrids with a decentralized event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9):3870-3880.
- [13] 苏晨, 吴在军, 窦晓波. 孤岛微电网分布式P-V协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):101-108.
- SU Chen, WU Zaijun, DOU Xiaobo. Distributed P-V coordinated control strategy for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):101-108.
- [14] 张忠, 王建学, 刘世民. 计及网络拓扑下微电网有功调节对电压控制的适应性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4):22-29.
- ZHANG Zhong, WANG Jianxue, LIU Shimin. Adaptability of active-power adjustment to voltage control considering network topology of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4):22-29.
- [15] 耿英明, 侯梅毅, 朱国防, 等. 基于虚拟阻抗的微电网有功均分阻性下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10):132-138.
- GENG Yingming, HOU Meiyi, ZHU Guofang, et al. Resistive droop control strategy of active power distribution for microgrid based on virtual impedance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):132-138.
- [16] ZHANG H P, YUE D, YIN X X, et al. Finite-time distributed event-triggered consensus control for multi-agent systems[J]. Information Sciences, 2016, 339:132-142.
- [17] DIMAROGONAS D V, FRAZZOLI E, JOHANSSON K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(5):1291-1297.

作者简介:



周建萍

周建萍(1978—),女,江西萍乡人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网技术等(E-mail:zhoujianping@shiep.edu.cn);

张健(1995—),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为分布式发电与微电网技术等(E-mail:zj1642451799@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Distributed finite-time event-triggered secondary coordinated control of islanded microgrids

ZHOU Jianping, ZHANG Jian, MAO Dajun, GE Xiangyi, YE Jianqiao, FANG Le

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: For the problems of the steady-state angular frequency and voltage deviated from the rated value of islanded microgrid caused by the traditional droop control strategy and the dependence on periodic communication, a distributed finite-time event-triggered secondary coordinated control is proposed. Firstly, based on the tracking consistency of the multi agent system, taking the system steady-state voltage and angular frequency reference value as the virtual leader and regarding DG (Distributed Generator) as the agent of the multi agent system to achieve the recovered control of the system voltage and angular frequency and the desired active power sharing property. Then, a distributed finite-time event-triggered secondary coordinated control is designed, in which information is exchanged only at the moment of event-triggered time, and the output of the state estimator is used to replace the actual state of DG at the rest time. The Lyapunov method is used to analyze the stability and feasibility of the proposed strategy. Finally, an islanded microgrid test system is built in MATLAB/Simulink for simulation analysis, simulative results and theoretical analysis verify the effectiveness and superiority of the proposed control method.

Key words: islanded microgrid; finite-time; event-triggered; secondary coordinated control; multi agent systems; consistency

附录 A

证明：构造李雅普诺夫函数 $V(t) = V_\omega + V_p$ 。

$$V_\omega = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_{\omega i}}{1 + \alpha_{\omega i}} |y_{\omega i}|^{1 + \alpha_{\omega i}} \quad (A1)$$

明显 $V_\omega > 0$ ，对其进行求导：

$$\begin{aligned} \dot{V}_\omega &= \sum_{i=1}^n \frac{\beta_{\omega i}}{1 + \alpha_{\omega i}} (1 + \alpha_{\omega i}) s_{ig} \left\{ |y_{\omega i}|^{\alpha_{\omega i}} \right\} = \\ &= \sum_{i=1}^n \beta_{\omega i} s_{ig} \left\{ (y_i)^{\alpha_{\omega i}} \right\} \left[-L_i (I_n \otimes \beta_\omega) s_{ig} \left\{ (y_\omega + E_\omega)^{\alpha_{\omega j}} \right\} \right] = \\ &= -\sum_{i=1}^n \beta_{\omega i} s_{ig} \left\{ (y_i)^{\alpha_{\omega i}} \right\} \left\{ \sum_{j=1}^n \beta_{\omega j} l_{ij} s_{ig} \left\{ (y_{\omega j} + E_{\omega j})^{\alpha_{\omega j}} \right\} \right\} = \\ &= -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \beta_{\omega i} s_{ig} \left\{ (y_i)^{\alpha_{\omega i}} \right\} \right\} l_{ij} \left\{ \beta_{\omega j} s_{ig} \left\{ (y_{\omega j} + E_{\omega j})^{\alpha_{\omega j}} \right\} \right\} = \\ &= -\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \left\{ \beta_{\omega i} s_{ig} \left\{ (y_{\omega i})^{\alpha_{\omega i}} \right\} \right\} l_{ij} \left\{ \beta_{\omega j} s_{ig} \left\{ (y_{\omega j} + E_{\omega j})^{\alpha_{\omega j}} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (A2)$$

式中： $L_i = [l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{in}]$ ； $y_\omega = [y_{\omega 1}, \dots, y_{\omega i}, \dots, y_{\omega j}, \dots]$ ；

$E_\omega = [E_{\omega 1}, \dots, E_{\omega i}, \dots, E_{\omega j}, \dots]$ 。

推出不等式：

$$s_{ig} \left\{ (y_{\omega i})^{\alpha_{\omega i}} \right\} \leq |y_{\omega i}|^{\alpha_{\omega i}} \quad (A3)$$

$$\begin{aligned} s_{ig} \left\{ (y_{\omega i})^{\alpha_{\omega i}} \right\} (y_{\omega j} + E_{\omega j})^{\alpha_{\omega j}} &\leq |y_{\omega j} + E_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} \leq (|y_{\omega j}| + |E_{\omega j}|)^{\alpha_{\omega j}} \leq \\ &= |y_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} + |E_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} \end{aligned} \quad (A4)$$

结合式(A3)、(A4)，式(A2)可写成：

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n \sum_{j \in N_i} \left\{ \left\{ \beta_{\omega i} s_{ig} \left\{ (y_{\omega i})^{\alpha_{\omega i}} \right\} \right\} l_{ij} \left\{ \beta_{\omega j} s_{ig} \left\{ (y_{\omega j} + E_{\omega j})^{\alpha_{\omega j}} \right\} \right\} \right\} &\geq \\ \sum_{i=0}^n \sum_{j \in N_i} \left\{ \left(\beta_{\omega i} |y_{\omega i}|^{\alpha_{\omega i}} \right) l_{ij} \left[\beta_{\omega j} (|y_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} + |E_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (A5)$$

进一步地， dV_ω/dt 可写成：

$$\begin{aligned} \dot{V}_\omega &\leq -\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \left(\beta_{\omega i} |y_{\omega i}|^{\alpha_{\omega i}} \right) l_{ij} \left[\beta_{\omega j} (|y_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} + |E_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}}) \right] \leq \\ &= -\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \left(\beta_{\omega i} |y_{\omega i}|^{\alpha_{\omega i}} \right) l_{ij} \left[\beta_{\omega j} (1 + k_{\omega j}^{\alpha_{\omega i}}) |y_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} \right] \leq \\ &= -\left(\beta_{\omega i} |y_{\omega i}|^{\alpha_{\omega i}} \right)^T L (1 + K_\omega) \left(\beta_{\omega j} |y_{\omega j}|^{\alpha_{\omega j}} \right) \end{aligned} \quad (A6)$$

式中： $K_\omega = [k_{\omega 1}^{\alpha_{\omega 1}}, \dots, k_{\omega N}^{\alpha_{\omega N}}]$ 。

令 $M = L(1 + K_\omega)$ ， $P = \frac{1}{2}(M + M^T)$ 且

$A = \{\delta \in \mathbf{R} : \delta^T \delta = 1 \cap \delta = \beta_\omega |\zeta|^{\alpha_\omega}, \zeta \perp 1\}$ 。则有：

$$\frac{(\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})^T M (\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})}{(\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})^T (\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})} \geq \min_{\delta \in \Lambda} \delta^T P \delta \quad k_{\omega i} > 0 \quad (A7)$$

$$\text{定义 } \mathcal{E} = -\frac{dV_\omega(t)}{dt} \frac{2\alpha_\omega}{V_\omega(t)^{1+\alpha_\omega}}, \text{ 则有:}$$

$$\mathcal{E} \geq \frac{k_\omega (\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})^T (\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})}{V_\omega(t)^{1+\alpha_\omega}} \geq \frac{k_\omega (\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})^T (\beta_\omega |y_\omega|^{\alpha_\omega})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_{\omega i}}{1 + \alpha_{\omega i}} |y_{\omega i}|^{1 + \alpha_{\omega i}} \right)^{\frac{2\alpha_{\omega i}}{1 + \alpha_{\omega i}}}} \geq \quad (A8)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{k_\omega \sum_{i=1}^n \beta_{\omega i}^2 |y_{\omega i}|^{2\alpha_{\omega i}}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_{\omega i}}{1 + \alpha_{\omega i}} |y_{\omega i}|^{1 + \alpha_{\omega i}} \right)^{\frac{2\alpha_{\omega i}}{1 + \alpha_{\omega i}}}} \\ &\text{令 } k' = \frac{k_\omega' \|\beta_\omega\|^2}{\left(\frac{\|\beta_\omega\|}{1 + \|\alpha_\omega\|} \right)^{\frac{2\|\alpha_\omega\|}{1 + \|\alpha_\omega\|}}}, \text{ 则有:} \end{aligned}$$

$$\frac{dV_\omega}{dt} \leq -k_\omega' V_\omega(t)^{\frac{2\alpha_\omega}{1 + \alpha_\omega}} \quad (A9)$$

引理 1 有限时间李雅普诺夫稳定性：考虑 1 个连续系统 $\dot{x} = y(x)$ 且 $y(0) = 0$ ，假定存在 1 个正定函数

$V(x): [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ ，则 $T(x_0) \leq \frac{1}{c(1-\alpha)} V(x_0)^{1-\alpha}$ ，使得

在有限时间内， $V(x)$ 达到 0，其中 $c > 0$ ， $0 < \alpha < 1$ 。

由引理 1 可求 $V_\omega(t) \rightarrow 0$ 的有限时间 $T_{\bar{f}}(t)$ 为：

$$T_{\bar{f}} = \frac{(1 + \alpha_{\omega i}) V_\omega(0)^{\frac{1 - \alpha_\omega}{1 + \alpha_\omega}}}{k_\omega' (1 - \alpha_\omega)} \quad (A10)$$

则角频率恢复时间 T_f 为：

$$T_f = \max\{T_{\bar{f}} | i = 0, 1, \dots, n\} \quad (A11)$$

对于有功功率，类似角频率同理可证。

$$T_{pi} = \frac{(1 + \alpha_{pi}) V_p(0)^{\frac{1 - \alpha_p}{1 + \alpha_p}}}{k_p' (1 - \alpha_p)} \quad (A12)$$

$$k_p' = \frac{k \|\beta_p\|^2}{\left(\frac{\|\beta_p\|}{1 + \|\alpha_p\|} \right)^{\frac{2\|\alpha_p\|}{1 + \|\alpha_p\|}}} \quad (A13)$$

则有功功率恢复时间 T_p 为：

$$T_p = \max\{T_{pi} | i = 0, 1, \dots, n\} \quad (A14)$$

$$\dot{\mathbf{V}}(t) \leq -k_\omega' \mathbf{V}_\omega(t)^{\frac{2\alpha_\omega}{1+\alpha_\omega}} - k_p' \mathbf{V}_p(t)^{\frac{2\alpha_p}{1+\alpha_p}} \quad (A15)$$

角频率恢复和有功功率的比例分配的有限时间

T_F 为:

$$T_F = \max\{T_f, T_p\} \quad (A16)$$

附录 B

证明: 定义 $\varphi_i(t) = \frac{|\mathbf{E}_i(t)|}{|\mathbf{y}_i(t)|}$ 。

由式(20)–(22)有:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_i &= \frac{|\mathbf{E}_i(t)' \mathbf{y}_i(t)| + |\mathbf{E}_i(t)| |\mathbf{y}_i(t)'|}{|\mathbf{y}_i(t)|^2} \leq \\ &= \frac{|\mathbf{E}_i(t)' \mathbf{y}_i(t)|}{|\mathbf{y}_i(t)|} + \frac{|\mathbf{E}_i(t)| |\mathbf{y}_i(t)'|}{|\mathbf{y}_i(t)|^2} \leq \end{aligned} \quad (B1)$$

$$\begin{aligned} &2k_i \frac{|\mathbf{y}_i(t)'|}{|\mathbf{y}_i(t)|} \leq \\ &2k_i \beta_i \left(\frac{|\mathbf{E}_i(t)|}{|\mathbf{y}_i(t)|} + 1 \right) \lambda_{\max}(\mathbf{L} + \mathbf{D}) \end{aligned}$$

进一步地, 可得:

$$\varphi_i'(t) = \mu_i (\varphi_i(t) + 1) \quad (B2)$$

$$\varphi_i(t_i, 0) = e^{\mu_i t_i} - 1 \quad (B3)$$

式中: $\mu_i = 2k_i \lambda_{\max}(\mathbf{L} + \mathbf{D})$ 。在初始条件 $\varphi_i(0, 0) = 0$

下, 结合式(22)得:

$$\tau_i \geq \frac{1}{\mu_i} \ln(k_i + 1) \geq \frac{\ln(k_i + 1)}{2k_i \lambda_{\max}(\mathbf{L} + \mathbf{D})} \quad (B4)$$

附录 C

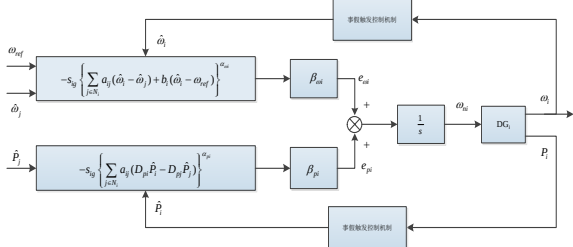


图 C1 分布式有限时间事件触发电角频率二次协调控制框图

Fig.C1 Block diagram of distributed finite-time event-triggered angular frequency secondary coordinated control

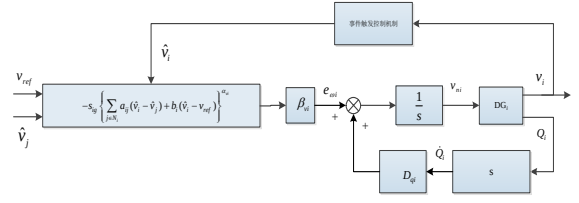


图 C2 分布式有限时间事件触发电压二次协调控制框图

Fig.C2 Block diagram of distributed finite-time event-triggered voltage secondary coordinated control

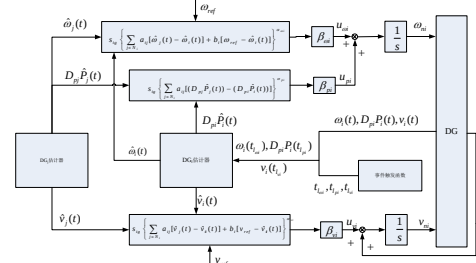
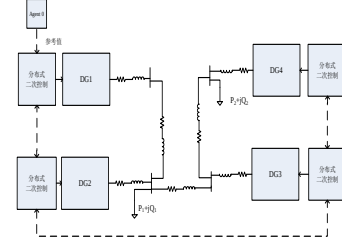
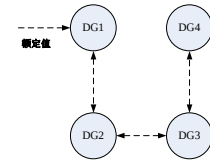


图 C3 分布式有限时间事件触发电二次协调控制框图

Fig.C3 Block diagram of distributed finite-time event-triggered secondary coordinated control



(a) 孤岛微电网



(b) DG 的通信拓扑

图 C4 孤岛微电网测试系统

Fig.C4 Test system of isolated island microgrid

表 C1 孤岛微电网系统 DG 参数值

Table C1 DG Parameters of isolated island microgrid system

参数	DG ₁	DG ₂	DG ₃	DG ₄
D_{pi}	9.4×10^{-5}	1.25×10^{-5}	1.25×10^{-5}	9.4×10^{-5}
D_{qi}	1.3×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}
R_f/Ω	0.01	0.01	0.1	0.1
L_f/mH	13.5	13.5	1.35	1.35
$C_f/\mu\text{F}$	50	50	0.03	0.03
R_c/Ω	0.03	0.03	0.03	0.03
L_c/mH	0.35	0.35	0.35	0.35
k_{PV}	0.1	0.1	0.05	0.05
k_{IV}	420	420	390	390
k_{PC}	15	15	10.5	10.5
k_{IC}	20 000	20 000	16 000	16 000

表 C2 孤岛微电网系统线路参数值

Table C2 Line parameters of isolated island microgrid system

线路	参数	数值
Line 1	R_{l1}/Ω	0.23
	$L_{l1}/\mu\text{H}$	318
Line 2	R_{l2}/Ω	0.35
	$L_{l2}/\mu\text{H}$	1847
Line 3	R_{l3}/Ω	0.23
	$L_{l3}/\mu\text{H}$	318

表 C3 孤岛微电网系统负载参数值

Table C3 Load parameters of isolated island microgrid system

时间/s	负载 1	负载 2
0~7	120 kW+100 kvar	120 kW+100 kvar
7~10	100 kW+80 kvar	160 kW+200 kvar

附录 D

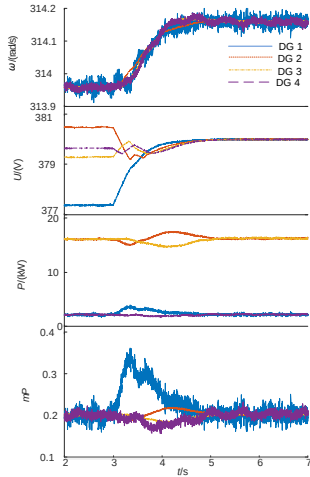


图 D1 分布式有限时间事件触发控制输出波形
Fig.D1 Output waveforms under distributed finite-time event-triggered control

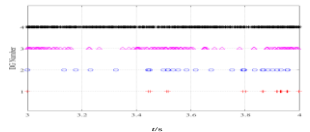


图 D2 角频率事件触发时刻
Fig.D2 Event-triggered time of angular frequency

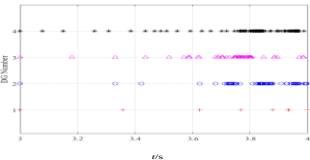


图 D3 电压事件触发时刻
Fig.D3 Event-triggered time of voltage

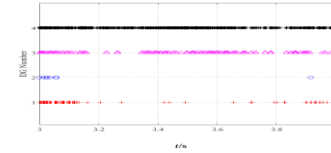


图 D4 有功功率事件触发时刻
Fig.D4 Event-triggered time of active power
表 D1 传统二次协调控制与所提控制下通信次数对比
Table D1 Comparison of communication times between traditional secondary coordinated control and proposed control

DG	物理量	通信次数	
		传统控制	所提控制
DG ₁	角频率	20 000	2 124
	电压	20 000	64
	有功功率	20 000	920
DG ₂	角频率	20 000	54
	电压	20 000	58
	有功功率	20 000	102
DG ₃	角频率	20 000	71
	电压	20 000	66
	有功功率	20 000	29
DG ₄	角频率	20 000	1 021
	电压	20 000	6
	有功功率	20 000	259

表 D2 所提控制平均通信时间间隔
Table D2 Average communication time interval under proposed control

DG	平均通信时间间隔/ μs		
	角频率控制器	电压控制器	有功功率控制器
DG ₁	471	15 625	1 087
DG ₂	18 519	17 241	9 804
DG ₃	14 085	15 152	34 483
DG ₄	979	166 667	3 861

注：仿真是在采样时间为 $50 \mu\text{s}$ 下进行的，可知传统二次控制的平均通信时间间隔为 $50 \mu\text{s}$ ，

附录 E

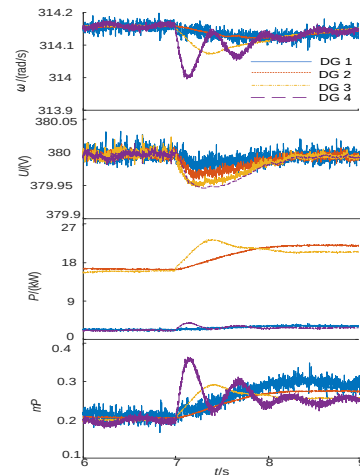


图 E1 所提控制下负荷响应波形
Fig.E1 Load response waveform under proposed control