

动态事件触发下直流微电网分布式二次控制

孟范伟¹, 邵源政¹, 张煜¹, 庞爱平²

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 针对孤岛直流微电网中二次控制问题, 以含有多个分布式电源的直流微电网为研究对象, 提出了一种基于动态事件触发机制的分布式二次控制策略. 在分布式二次控制的基础上, 对每个分布式电源的输出平均电压和比例电流分别设计动态事件触发条件, 不但减小了由下垂增益引起的直流母线电压和标称值的偏差, 而且维持了电流分配精度, 并大大节约了通信资源、减少了通信冗余. 设计的事件触发条件包含一个动态项, 事件触发阈值会随着动态项改变而改变, 有效地减少了控制器的更新频率. 通过 Lyapunov 稳定理论证明了事件触发机制的可行性, 并证明了不存在 Zeno 行为. 最后, 利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型, 验证了控制策略的有效性.

关键词: 直流微电网; 分布式二次控制; 动态事件触发机制; 通信冗余; 电压调节; 电流分配

中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)06-0016-10

Distributed Secondary Control for DC Microgrid Under Dynamic Event Trigger

MENG Fan-wei¹, TAI Yuan-zheng¹, ZHANG Yu¹, PANG Ai-ping²

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China. Corresponding author: TAI Yuan-zheng, E-mail: 2272290@stu.neu.edu.cn)

Abstract: Aiming at the secondary control issues in islanded DC microgrids, a distributed secondary control strategy based on a dynamic event-triggered mechanism is proposed for DC microgrid containing multiple distributed generators. Building upon distributed secondary control, dynamic event-triggered conditions are designed for both the output average voltage and proportional current of each DG. This approach not only mitigates deviations between DC bus voltage and the nominal value caused by droop gains but also maintains current sharing accuracy while significantly conserving communication resources and reducing redundancy. The designed event-triggered conditions incorporate a dynamic term that adaptively adjusts event-triggered thresholds, effectively decreasing controller update frequency. The feasibility of this event-triggered mechanism is rigorously proven through Lyapunov stability theory, with the absence of Zeno behavior being guaranteed. Finally, a simulation model developed in MATLAB/Simulink validates the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: DC microgrid; distributed secondary control; dynamic event-triggered mechanism; communication redundancy; voltage adjustment; current distribution

随着化石能源的枯竭以及生态环境的恶化, 光伏、风电等可再生能源已经渗透到现有的电力系统中, 以满足日益增长的能源需求, 电力系统的压力也与日俱增. 因此, 微电网作为一种集中分布式电源、储能单元和负载的小型电力系统受

到了广泛关注^[1]. 微电网可分为直流微电网、交流微电网和交直流混合微电网. 由于光伏、风电等分布式电源(distributed generators, DG)均具有直流特征, 通过DC-DC变换器将DG组成直流微电网, 对能源的利用更加高效^[2]. 另外, 直流微电

网与交流微电网相比,无需整流和逆变等复杂的工序,并且不存在谐波等问题,因此,直流微电网具有更好的稳定性、更高的效率等优点^[3].微电网有两种运行模式:孤岛模式和并网模式^[4].当微电网处于并网模式时,需要与电网相连,但一些偏远地区缺少电网的支撑,可以组建孤岛型微电网.当微电网处于孤岛模式时,需要对内部的能量、电压和电流进行控制.在此模式下,为保证每个DG稳定运行,通常采取分层控制.分层控制一般可以分为一次控制、二次控制和三次控制^[5-6].在直流微电网中,一次控制采取下垂控制来完成初步的电流分配和电压调节.通过下垂控制可实现电流的精确分配,但无法将直流母线电压调节至电压标称值,并且下垂增益越大,直流母线电压与标称值之间的差值也就越大^[7-8],因此,引入二次控制来弥补下垂控制的不足.在二次控制的作用下,直流母线电压可调节至标称值^[9].在直流微电网控制中,二次控制一直是研究的重点.文献^[10]提出了一种二次控制策略,通过将电压误差信号送入一个PI控制器,再通过中央控制器将PI控制器的输出信号传递给所有DG.中央控制器的存在,会导致该二次控制策略存在单点故障并且只适用于小型的微电网^[11].为解决这一问题,分布式二次控制策略被广泛应用.文献^[12]在每个DG中设计了一个电压调节器,对输出电压进行调节,电压调节器通过将电压估计值与标称电压作比较得到一个补偿项来调整DG的输出电压;与此同时,为保证每个DG输出电流仍按照特定的比例分配,设计了电流调节器将DG输出的电流与其邻域DG的输出电流作比较,产生另一个补偿项来保证输出电流的比例分配.为减少通信负担,文献^[7]提出了一种基于牵制增益的二次控制策略,通过引用牵制增益的思想,将直流母线电压传递给特定的DG,大大减少了微电网的通信负担.然而,传统的分布式二次控制策略中DG之间通常采用时间触发通信方式,信息的采样与通信均存在固定的周期,微电网中会存在通信冗余,造成控制器的使用寿命缩短^[13].事件触发控制作为一种非周期的通信方式可以大大减小系统的通信冗余,减少网络拥塞^[14-15].

事件触发控制采用非周期的通信方式,只有当事件触发条件满足信息传递时,控制器的输出信号更新^[16-17].通过使用事件触发控制,系统在通

信延时、测量误差等非理想状况下也具备很强的鲁棒性^[18].近年来,事件触发控制被大量应用在微电网系统中以提高微电网的经济性和可靠性^[19-20].文献^[19]在文献^[7]的基础上,对二次控制信号与直流母线电压设置事件触发条件,只需离散的直流母线电压信号和离散的二次控制信号,在保证微电网稳定运行的前提下大大减少了计算和通信负担.文献^[20]对二次控制信号设置事件触发条件,将离散的二次控制信号与连续的二次控制信号作差后与事件触发阈值作比较来判断信号是否更新,同样可以减少通信冗余.上述事件触发控制虽然可有效减少不必要的信息传递,但均为静态事件触发控制,一般的静态事件触发控制会存在过度触发现象且无法避免Zeno行为(在有限时间内触发无限次)的发生.因此,为了进一步减小微电网系统通信负担,动态事件触发机制被大量应用^[17].与静态事件触发机制不同,动态事件触发条件的阈值不再是一个固定的值,而是根据系统内部变量动态地调整^[21].目前,动态触发机制已经被广泛应用在微电网、智能交通等领域以进一步减少通信冗余、避免Zeno行为^[22].

鉴于此,本文提出了一种基于动态触发机制的直流微电网分布式二次控制策略,实现了直流微电网电流分配和电压调节2个控制目标.本文主要贡献如下:

- 1) 设计动态事件触发机制,减少计算和通信负担.
- 2) 同时兼顾直流微电网电压调节和电流分配两个控制目标.

本文所提出的二次控制策略是完全分布式的,不存在中央控制器且相邻DG之间存在通信链路,每个DG只需要与其邻域的DG完成信息传递,因此该方法不存在单点故障且可实现即插即用.通过Lyapunov方法证明了在本文所提出动态事件触发控制机制下微电网系统的稳定性,并证明了不存在Zeno行为.最后,通过MATLAB/Simulink进行了仿真验证,证明了该方法的有效性.

1 直流微电网分层协调控制

1.1 一次控制

图1为直流微电网一次控制框图,在一次控制中,包括电流控制回路、电压控制回路和下垂

控制.通过下垂控制的作用,可得到第 i 个 DG (DG_i) 的输出参考电压:

$$V_i^{\text{ref}} = V^{\text{ref}} - d_i I_i^{\circ} \quad (1)$$

式中: V^{ref} 表示标称电压; d_i 和 I_i° 分别表示 DG_i 的下垂增益和输出电流.

通过电压、电流双闭环控制的作用, DG_i 的输出电压 V_i° 可以快速达到其参考电压 V_i^{ref} .

$$V_i^{\circ} = V_i^{\text{ref}}. \quad (2)$$

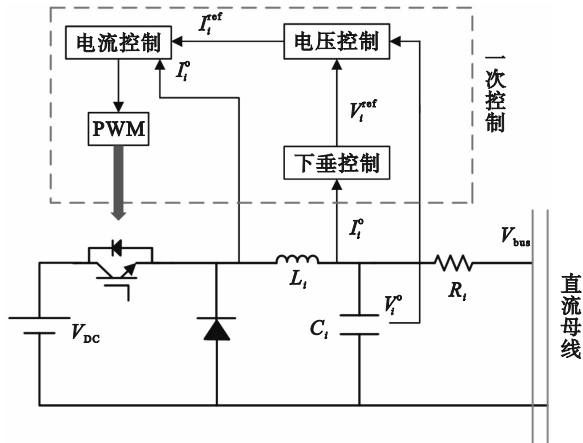


图1 直流微电网一次控制框图

Fig. 1 Primary control block diagram of DC microgrid

当多个分布式电源并联时,直流母线电压 V_{bus} 可表示为

$$V_{\text{bus}} = V_i^{\circ} - R_i I_i^{\circ}. \quad (3)$$

式中, R_i 表示 DG_i 的线路阻抗,由于线路阻抗极小,故 V_i° 与 V_{bus} 近似相等.

结合式(1)~式(3)可得

$$V_{\text{bus}} = V^{\text{ref}} - (R_i + d_i) I_i^{\circ}. \quad (4)$$

每个 DG 对应的 V^{ref} 和 V_{bus} 都是相同的,故 DG_i 和 DG_j 的输出电流满足

$$(R_i + d_i) I_i^{\circ} = (R_j + d_j) I_j^{\circ}. \quad (5)$$

式中: I_j° 和 d_j 分别表示 DG_j 的输出电流和下垂增益; R_j 表示 DG_j 的线路阻抗.

由式(5)可知, DG 的输出电流与下垂增益和线路阻抗之和成反比:

$$\frac{I_i^{\circ}}{I_j^{\circ}} = \frac{R_j + d_j}{R_i + d_i}. \quad (6)$$

一般地, d_i 远远大于 R_i , 故输出电流可近似与下垂增益成反比:

$$\frac{I_i^{\circ}}{I_j^{\circ}} = \frac{d_j}{d_i}. \quad (7)$$

综上所述,一次控制可以实现 DG 输出电流的精确分配,但一次控制无法同时兼顾 2 个控制目标.由式(4)可知,由于下垂增益的存在,会使

直流母线电压和电压标称值之间存在差值 $(R_i + d_i) I_i^{\circ}$, 并且下垂增益越大此差值越大. 因此,通常在直流微电网中引入二次控制策略来弥补下垂控制的不足.

1.2 预备知识

将微电网系统看作一个无向图 $G = (v, E, A)$, 每个 DG 看作一个节点, 则节点集 $v = (v_1, v_2, \dots, v_N)$, N 表示节点总数; 边集 $E = v \times v$; 邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$. 当节点 v_i 与节点 v_j 能够相互通信时, $a_{ij} = a_{ji} = 1$, 否则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$, a_{ii} 总是为 0. 定义 $B = \text{diag}\{b_i\}$ 为度矩阵, 其中 $b_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}$, $L = B - A$ 为拉普拉斯矩阵.

1.3 二次控制

考虑到直流微电网的 2 个控制目标, 引入平均电压调节模块和比例电流调节模块来弥补下垂控制的不足. 二次控制策略如图 2 所示, 仅存在邻域 DG 信息的交换, 故该控制策略为完全分布式的.

由式(4)可知, 由于下垂增益和线路阻抗的存在, 母线电压会小于标称电压. 为削弱下垂增益和线路阻抗带来的影响, 使 DG 输出电压的平均值等于标称电压, 定义平均电压调节单元^[12]为

$$V_i^{\text{avg}} = V_i^{\circ} + \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{\text{avg}} - V_i^{\text{avg}}) dt. \quad (8)$$

式中: V_i^{avg} 表示 DG_i 的输出电压平均值, 可用来替代 V_i° ; N_i 表示 DG_i 的邻域; a_{ij} 表示邻接矩阵中的元素.

将平均电压观测值与电压标称值作差, 经过积分器的作用可得到第一个补偿项 \mathcal{G}_i^V :

$$\mathcal{G}_i^V = \int (V^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}) dt. \quad (9)$$

在二次控制的作用下不仅要使直流母线电压恢复至标称值, 还要维持如式(7)所示的电流分配率, 故引入比例电流调节单元为

$$v_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j I_j^{\circ} - d_i I_i^{\circ}). \quad (10)$$

在比例电流调节单元和积分器的作用下, 得到另一个补偿项 \mathcal{G}_i^I :

$$\mathcal{G}_i^I = \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j I_j^{\circ} - d_i I_i^{\circ}) dt. \quad (11)$$

将 2 个补偿项相加得到最终的补偿项 \mathcal{G}_i :

$$\mathcal{G}_i = \mathcal{G}_i^V + \mathcal{G}_i^I. \quad (12)$$

将 \mathcal{G}_i 送入一次控制中, V_{bus} 可重新表示为

$$V_{\text{bus}} = V^{\text{ref}} - (R_i + d_i) I_i^{\circ} + \mathcal{G}_i. \quad (13)$$

结合式(3)与式(13)可得

$$V_i^o = V^{\text{ref}} - d_i I_i^o + \vartheta_i, \quad (14)$$

对式(14)求导可得

$$\dot{V}_i^o = \dot{\vartheta}_i - d_i \dot{I}_i^o. \quad (15)$$

由图 2 可知:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_i^o &= V^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}, \\ d_i \dot{I}_i^o &= \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j I_j^o - d_i I_i^o). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

对式(8)求导可得

$$\dot{V}_i^o = \dot{V}_i^{\text{avg}} - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{\text{avg}} - V_i^{\text{avg}}). \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_i^{\text{avg}} &= \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{\text{avg}} - V_i^{\text{avg}}) + (V^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}), \\ d_i \dot{I}_i^o &= \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j I_j^o - d_i I_i^o). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

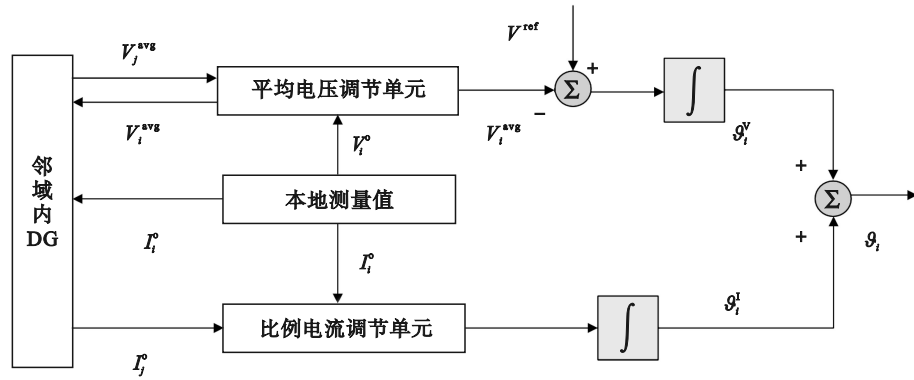


图 2 直流微电网分布式二次控制
Fig. 2 Distributed secondary control of DC microgrid

2 动态事件触发机制设计

本文所用的事件触发机制如图 3 所示,在图

2 的基础上分别对平均电压调节单元和比例电流调节单元的输出使用事件触发机制.图 3 中事件触发条件 1,2 分别表示电压调节单元和电流调节单元所对应的事件触发条件.

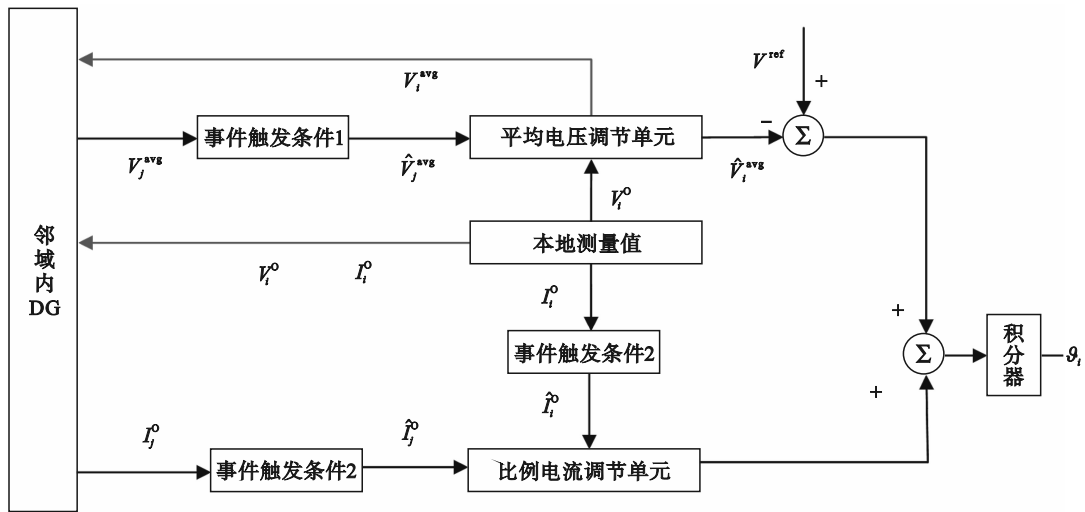


图 3 基于动态事件触发机制的直流微电网分布式二次控制
Fig. 3 Distributed secondary control for DC microgrid based on dynamic event-triggered mechanism

2.1 平均电压调节单元输出事件触发机制设计

为减小通信负担和计算负担,本文在分布式二次控制的基础上引入动态事件触发机制来判断信息是否传递.定义 t_k^V 为 DG_i 平均电压调节单元的第 k 个触发时刻, DG_i 的平均电压调节单元的所有触发序列为 $t_0^V, t_1^V, t_2^V, \dots$, 触发条件如式(19)所示:

$$t_{(k+1)_i}^V = \min \left\{ t \in \mathbf{R} \left| \left(\mu_i^V |e_i^V(t)|^2 - \frac{\gamma_i^V}{4} |e_i^V(t)|^2 \right) > m_i^V \eta_i^V(t), t > t_k^V \right. \right\}. \quad (19)$$

式中: $\mu_i^V > 0, m_i^V > 0, \gamma_i^V \in (0, 1), t_0^V = 0$. 其他变量定义为

$$\varepsilon_i^V(t) = \hat{V}_i^{\text{avg}}(t) - V_i^{\text{avg}}(t), \quad (20)$$

$$e_i^V(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{V}_j^{\text{avg}}(t) - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) + (V^{\text{ref}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)). \quad (21)$$

其中,

$$\hat{V}_i^{\text{avg}}(t) = V_i^o + \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{V}_j^{\text{avg}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}) dt = V_i^{\text{avg}}(t_k^V). \quad (22)$$

在 $\eta_i^V(0) > 0$ 的前提下, η_i^V 由式(23)决定:

$$\frac{d}{dt} \eta_i^V(t) = -\beta_i^V \eta_i^V(t) - \mu_i^V |\varepsilon_i^V(t)|^2 + \frac{\gamma_i^V}{4} |e_i^V(t)|^2. \quad (23)$$

式中, $\beta_i^V > 0$.

$\eta_i^V(t)$ 表示式(19)中的动态项,要求其满足式(23).在动态项 $\eta_i^V(t)$ 的作用下可有效避免 Zeno 行为的发生.如无该动态项,则式(19)变为静态事件触发机制,静态事件触发条件如式(24)所示.静态事件触发机制和动态事件触发机制的区别为静态事件触发机制的阈值为一个固定的常数,而动态事件触发机制的阈值是一个可以根据内部变量动态调整的值,故静态事件触发机制可看作动态事件触发机制的一个特例,但式(24)所对应的静态事件触发机制无法避免 Zeno 行为的发生.

$$t_{(k+1)_i}^V =$$

$$\min \left\{ t \in \mathbf{R} \left| \mu_i^V |\varepsilon_i^V(t)|^2 - \frac{\gamma_i^V}{4} |e_i^V(t)|^2 > 0, t > t_k^V \right. \right\}. \quad (24)$$

定义辅助变量 $u_i^V = V_i^{\text{avg}}$, 由式(18)可知:

$$u_i^V = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_j^{\text{avg}} - V_i^{\text{avg}}) + (V^{\text{ref}} - V_i^{\text{avg}}). \quad (25)$$

经过事件触发机制的作用, u_i^V 可重新表示为

$$u_i^V = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{V}_j^{\text{avg}}(t) - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) + (V^{\text{ref}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)). \quad (26)$$

定理 1 假设微电网系统构成的无向图 \mathbf{G} 是连通的,则在动态事件触发条件(式(19))的作用下,每个 DG 的输出平均电压都可调节至标称值,同时不会发生 Zeno 行为.

证明 定义平均电压估计误差为

$$\delta_i^V(t) = V_i^{\text{avg}}(t) - V^{\text{ref}}. \quad (27)$$

在事件触发机制的作用下,式(27)可写为

$$\hat{\delta}_i^V(t) = \hat{V}_i^{\text{avg}}(t) - V^{\text{ref}}. \quad (28)$$

结合式(20),式(27)和式(28)可得

$$\begin{aligned} \dot{W}(t) &= -\varepsilon^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\hat{\delta}(t)-\varepsilon(t)) - (\hat{\delta}(t)-\varepsilon(t))^T(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\hat{\delta}(t)-\varepsilon(t)) = \\ &= -(\varepsilon(t)-\hat{\delta}(t))^T(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\varepsilon(t)-\hat{\delta}(t)) + \varepsilon^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\varepsilon(t)-\hat{\delta}(t)) = \\ &= \hat{\delta}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\varepsilon(t)-\hat{\delta}(t)) - \hat{\delta}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})\hat{\delta}(t) + \hat{\delta}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})\varepsilon(t) = \\ &= -\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \left(\frac{1}{2} \left((\hat{V}_j^{\text{avg}}(t) - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) + (V^{\text{ref}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) \right)^2 - \varepsilon_i(t) \left((\hat{V}_j^{\text{avg}}(t) - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) + (V^{\text{ref}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) \right) \right) \leq \end{aligned}$$

$$\varepsilon_i^V(t) + \delta_i^V(t) = \hat{\delta}_i^V(t). \quad (29)$$

将式(28)和式(29)代入式(21)中可得

$$e_i^V(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left((\varepsilon_j^V(t) + \delta_j^V(t)) - (\varepsilon_i^V(t) + \delta_i^V(t)) \right) + (\varepsilon_i^V(t) + \delta_i^V(t)). \quad (30)$$

结合式(21),式(26),式(27)和式(30)可得

$$\dot{\delta}_i^V(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left((\varepsilon_j^V(t) + \delta_j^V(t)) - (\varepsilon_i^V(t) + \delta_i^V(t)) \right) + (\varepsilon_i^V(t) + \delta_i^V(t)). \quad (31)$$

定义以下向量:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{e}^V(t) &= [\varepsilon_1^V(t), \varepsilon_2^V(t), \dots, \varepsilon_N^V(t)]^T, \\ \boldsymbol{\delta}^V(t) &= [\delta_1^V(t), \delta_2^V(t), \dots, \delta_N^V(t)]^T, \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}^V(t) &= [\hat{\delta}_1^V(t), \hat{\delta}_2^V(t), \dots, \hat{\delta}_N^V(t)]^T, \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}^V(t) &= [\hat{\delta}_1^V(t), \hat{\delta}_2^V(t), \dots, \hat{\delta}_N^V(t)]^T, \\ \boldsymbol{\varepsilon}^V(t) &= [\varepsilon_1^V(t), \varepsilon_2^V(t), \dots, \varepsilon_N^V(t)]^T. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

由式(30)和式(32)可得

$$\mathbf{e}^V(t) = -(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\boldsymbol{\varepsilon}^V(t) + \boldsymbol{\delta}^V(t)). \quad (33)$$

式中: \mathbf{L} 为微电网系统的拉普拉斯矩阵; \mathbf{D} 为单位矩阵,

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{1, 1, \dots, 1\} \in \mathbf{R}^{N \times N}. \quad (34)$$

同样地,可得到

$$\hat{\boldsymbol{\delta}}^V(t) = -(\mathbf{L}+\mathbf{D})(\boldsymbol{\varepsilon}^V(t) + \boldsymbol{\delta}^V(t)). \quad (35)$$

首先考虑静态事件触发机制(式(24)),为便于后续推导,省略变量的上标.选取静态事件触发机制下的 Lyapunov 函数为

$$W(t) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}^T(t) \boldsymbol{\delta}(t). \quad (36)$$

对 Lyapunov 函数求导得

$$\dot{W}(t) = \boldsymbol{\delta}^T(t) \dot{\boldsymbol{\delta}}(t). \quad (37)$$

将式(35)代入式(37)得

$$\begin{aligned} \dot{W}(t) &= -\boldsymbol{\delta}^T(t) \left((\mathbf{L}+\mathbf{D})(\boldsymbol{\varepsilon}(t) + \boldsymbol{\delta}(t)) \right) = \\ &= -\boldsymbol{\delta}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})\boldsymbol{\varepsilon}(t) - \boldsymbol{\delta}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})\boldsymbol{\delta}(t) = \\ &= -\boldsymbol{\varepsilon}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})\boldsymbol{\delta}(t) - \boldsymbol{\delta}^T(t)(\mathbf{L}+\mathbf{D})\boldsymbol{\delta}(t). \end{aligned} \quad (38)$$

将式(29)代入式(38)得

$$\begin{aligned}
& - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \left(\frac{1}{2} \left((\hat{V}_j^{\text{avg}}(t) - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) + (V^{\text{ref}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) \right)^2 - (\varepsilon_i(t))^2 - \frac{1}{4} \left((\hat{V}_j^{\text{avg}}(t) - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) + (V^{\text{ref}} - \hat{V}_i^{\text{avg}}(t)) \right)^2 \right) = \\
& - \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{4} (e_i(t))^2 - \mu_i (\varepsilon_i(t))^2 \right). \tag{39}
\end{aligned}$$

式中, $\mu_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$.

选取动态事件触发条件(式(19))下的 Lyapunov 函数为

$$W_1(t) = W(t) + \sum_{i=1}^N \eta_i(t). \tag{40}$$

根据事件触发条件式(19),在触发条件满足时,信号更新.在非触发时刻,满足:

$$\left(\mu_i |\varepsilon_i(t)|^2 - \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2 \right) \leq m_i \eta_i(t). \tag{41}$$

即

$$\eta_i(t) \geq \frac{1}{m_i} \left(\mu_i |\varepsilon_i(t)|^2 - \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2 \right). \tag{42}$$

结合式(42)和式(23)得

$$\begin{aligned}
\dot{W}_1(t) & \leq - \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{4} (e_i(t))^2 - \mu_i (\varepsilon_i(t))^2 \right] + \sum_{i=1}^N \left\{ -\beta_i \eta_i(t) - \left[\mu_i |\varepsilon_i(t)|^2 - \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2 \right] \right\} = \\
& - \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{4} (1 - \gamma_i) |e_i(t)|^2 + \beta_i \eta_i(t) \right]. \tag{46}
\end{aligned}$$

由于 $\gamma_i \in (0, 1)$, $\beta_i > 0$, $|e_i(t)|^2 > 0$, $\eta_i(t) > 0$, 因此,

$$\dot{W}_1(t) < 0. \tag{47}$$

根据 Lyapunov 稳定分析理论可知, $W_1(t)$ 全局渐进稳定,在动态事件触发机制的作用下,每个分布式电源的输出平均电压均可调节至标称电压.由于输出平均电压与输出电压近似相等,而输出电压又与 V_{bus} 近似相等,故 V_{bus} 也基本被调节至标称值.

接下来证明该动态事件触发机制不存在 Zeno 现象.

由于微电网系统是稳定的,故存在正常数 ζ , 使得 $u_i(t) \leq \zeta$, $\forall t > 0$, 在区间 $t \in [t_k, t_{\{k+1\}_i})$ 内对 $|\varepsilon_i(t)|$ 微分得

$$\begin{aligned}
\left| \frac{d}{dt} |\varepsilon_i(t)| \right| & \leq \left| \frac{d}{dt} \varepsilon_i(t) \right| = \left| \frac{d}{dt} (\hat{V}_i^{\text{avg}}(t) - V_i^{\text{avg}}(t)) \right| = \\
& \left| \dot{V}_i^{\text{avg}}(t) \right| = |u_i(t)| \leq \zeta. \tag{48}
\end{aligned}$$

$$t_{\{k+1\}_i}^1 = \min \left\{ t \in \mathbf{R} \left| \left(\mu_i^1 |\varepsilon_i^1(t)|^2 - \frac{\gamma_i^1}{4} |e_i^1(t)|^2 \right) > m_i^1 \eta_i^1(t), t > t_k^1 \right. \right\}. \tag{53}$$

式中: t_k^1 表示 DG_i 比例电流调节单元输出的第 k 个触发时刻; $\mu_i^1 > 0$, $m_i^1 > 0$, $\gamma_i^1 \in (0, 1)$. 其他变量分别定义为

$$\varepsilon_i^1(t) = d_i \hat{I}_i^o(t) - d_i I_i^o(t), \tag{54}$$

$$\frac{d}{dt} \eta_i(t) \geq -\beta_i \eta_i(t) - \frac{1}{m_i} \eta_i(t) = -\left(\beta_i + \frac{1}{m_i} \right) \eta_i(t). \tag{43}$$

由式(43)可得

$$\eta_i(t) \geq \eta_i(0) \exp \left(-\left(\beta_i + \frac{1}{m_i} \right) t \right) > 0. \tag{44}$$

对式(40)求导得

$$\begin{aligned}
\dot{W}_1(t) & = \dot{W}(t) + \sum_{i=1}^N \dot{\eta}_i(t) = \\
& \dot{W}(t) + \sum_{i=1}^N \left\{ -\beta_i \eta_i(t) - \left[\mu_i |\varepsilon_i(t)|^2 - \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2 \right] \right\}. \tag{45}
\end{aligned}$$

将式(39)代入式(45)得

结合微分中值定理可得,当 $t \in [t_k, t_{\{k+1\}_i})$ 时,有

$$|\varepsilon_i(t)| \leq \zeta (t - t_k). \tag{49}$$

考虑事件触发条件:

$$\mu_i |\varepsilon_i(t)|^2 > m_i \eta_i(t) + \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2, \tag{50}$$

式(50)可写为

$$|\varepsilon_i(t)| > \sqrt{\frac{1}{\mu_i} \left(m_i \eta_i(t) + \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2 \right)}. \tag{51}$$

结合式(49),式(51)可得,当 $t \in [t_k, t_{\{k+1\}_i})$ 时,有

$$t - t_k > \frac{1}{\zeta} \sqrt{\frac{1}{\mu_i} \left(m_i \eta_i(t) + \frac{\gamma_i}{4} |e_i(t)|^2 \right)} > 0. \tag{52}$$

因此,存在 $t_{\{k+1\}_i} - t_k > 0$, 因此本文所设计的动态事件触发机制不存在 Zeno 现象.

2.2 比例电流调节单元输出事件触发机制设计
设计比例电流调节单元的动态事件触发条件为

$$e_i^1(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j \hat{I}_j^o(t) - d_i \hat{I}_i^o(t)), \tag{55}$$

$$d_i \hat{I}_i^o(t) = d_i I_i^o(t_k^1). \tag{56}$$

$\eta_i^1(t)$ 表示动态项,在 $\eta_i^1(0) > 0$ 的前提下,由下列微分方程决定:

$$\frac{d}{dt} \eta_i^l(t) = -\beta_i^l \eta_i^l(t) - \left(\mu_i^l |\varepsilon_i^l(t)|^2 - \frac{\gamma_i^l}{4} |e_i^l(t)|^2 \right). \quad (57)$$

式中, $\beta_i^l > 0$.

定义中间变量 $u_i^l = d_i I_i^o$, 由式(18)可知:

$$u_i^l(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j I_j^o(t) - d_i I_i^o(t)). \quad (58)$$

在事件触发机制的作用下, 式(58)可写为

$$u_i^l(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (d_j \hat{I}_j^o(t) - d_i \hat{I}_i^o(t)). \quad (59)$$

定理 2 假设微电网系统构成的无向图 G 是连通的, 则在动态事件触发条件(式(53))的作用

下, 每个分布式电源的输出电流和下垂增益成反比, 同时不会发生 Zeno 行为.

比例电流调节单元事件触发机制的证明过程与平均电压调节单元类似, 此处省略.

3 仿真分析

为验证本文所提出控制策略的可行性, 利用 MATLAB/Simulink 建立了如图 4 所示的微电网系统. 该系统包含 3 个 DG, 其中 DG_1 和 DG_2 为常规电源, DG_3 为备用电源.

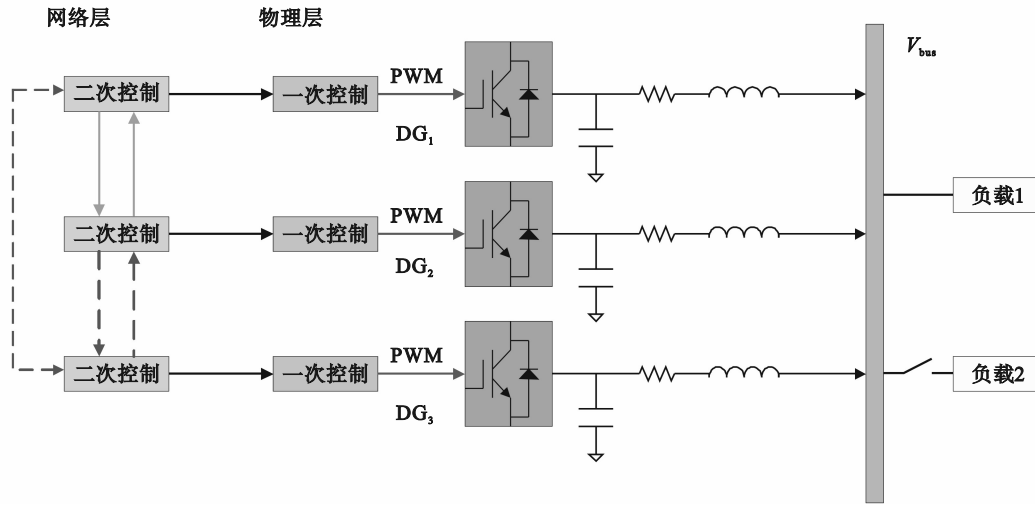


图 4 直流微电网系统结构

Fig. 4 System structure of DC microgrid

本文模拟孤岛微电网的主要仿真参数如表 1 所示, 3 个 DG 选取相同的参数.

表 1 微电网仿真参数^[7]

Table 1 Simulation parameters of microgrid^[7]

参数	数值
输入电压/V	100
输出电压标称值/V	48
开关频率/kHz	1.25
滤波电容/ μ F	2 200
滤波电感/mH	10
电压环比例系数	4
电压环积分系数	800
电流环比例系数	5
电流环积分系数	110
线路阻抗/ Ω	0.01

本文设置下垂增益 $d_1 = d_2 = d_3 = 3$, 在负载变化和备用电源插拔 2 种工况下验证所提出的

控制策略. 首先验证仅存在下垂控制时 DG 的输出电压和电流, 图 5 和图 6 分别表示仅存在下垂控制时电压和电流波形. 如图 6 所示, 在下垂控制的作用下, 可实现各个 DG 输出电流的比例分配 ($I_1^o : I_2^o : I_3^o = 1 : 1 : 1$). 如图 5 所示, 仅在下垂控制的作用下, 直流母线电压无法恢复至标称值.

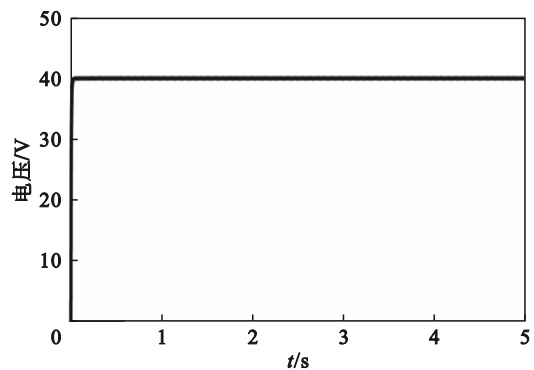


图 5 下垂控制作用下 DG 的直流母线电压

Fig. 5 DC bus voltage of DG under droop control

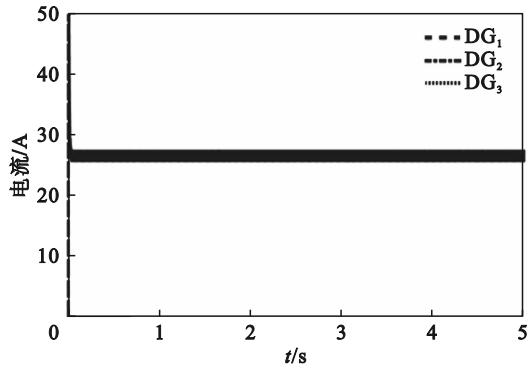


图6 下垂控制作用下DG的输出电流

Fig. 6 Output current of DG under droop control

接下来验证负载变化时控制策略的有效性,仿真持续3 s, $t=0$ s时,负载电阻 $R_{L1}=5\ \Omega$ 接入电路并启动二次控制策略; $t=1$ s时,另一负载电阻 $R_{L2}=5\ \Omega$ 并入电路; $t=2$ s时, R_{L2} 从电路中断开. 图7和图8分别表示负载变化时DG的输出电压和电流,图9和图10分别表示 DG_1 的平均电压和比例电流所对应的触发次数. 如图7所示,在 $t=0$ s时启动二次控制策略,各个DG的输出电压和母线电压很快恢复至标称值,同样在 $t=1, 2$ s时,电压在经过一个小波动后均能恢复至标称值;如图8所示,各个DG的输出电流在负载发生变化时均能在经过一个小波动后稳定并保证按照比例分配.

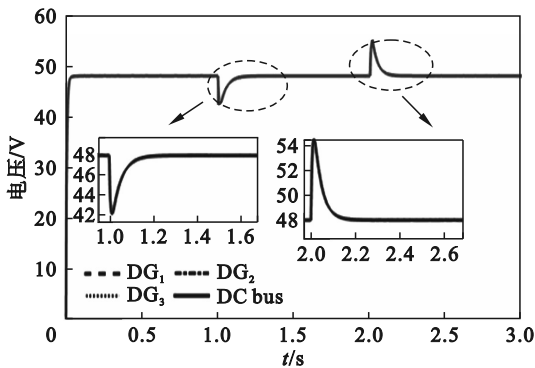


图7 负载变化时DG的输出电压

Fig. 7 Output voltage of DG when the load changes

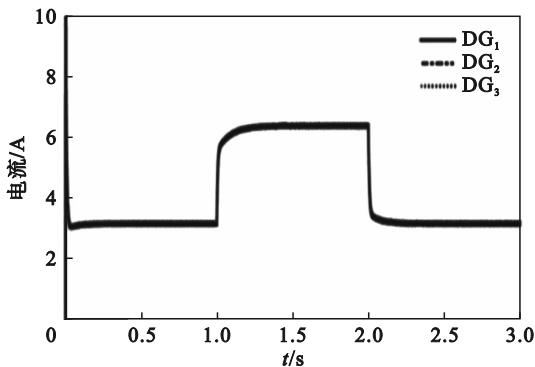


图8 负载变化时DG的输出电流

Fig. 8 Output current of DG when the load changes

图9和图10中,1为有通信,0为无通信.若图中数值为1,则代表满足动态事件触发(式(19)或式(23)),通信发生,触发一次;若数值为0则代表不满足动态事件触发条件,没有通信发生,没有触发.由图9和图10可观察到,只有在仿真刚开始微电网未稳定时和负载切换时有较多通信,其余时间几乎没有通信,表明事件触发条件(式(19))或(式(23))很少得到满足,即很少通信,故当采用式(19)和式(23)事件触发条件时,微电网的通信负担和计算负担将会大大减少.

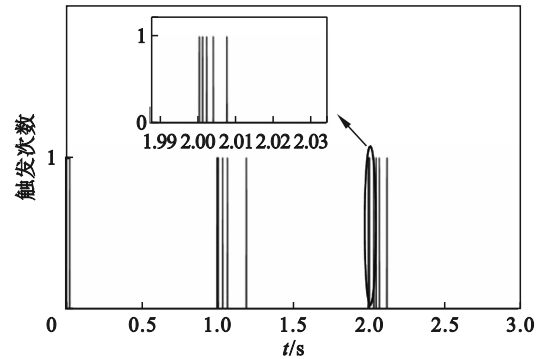


图9 负载变化时平均电压控制的触发次数

Fig. 9 Trigger times of average voltage control when the load changes

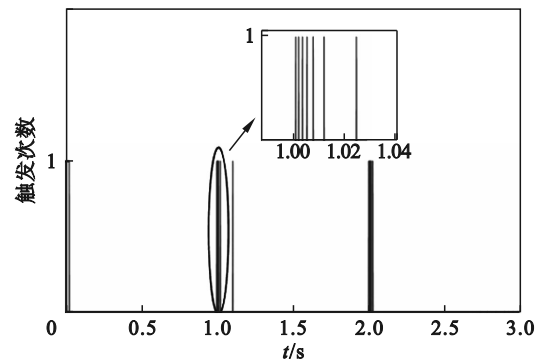


图10 负载变化时比例电流控制的触发次数

Fig. 10 Trigger times of proportional current control when the load changes

最后验证备用电源插拔时控制策略的有效性,开始时启用二次控制策略, DG_1 和 DG_2 接入电路; $t=1$ s时 DG_3 接入电路; $t=2$ s时 DG_3 从电路中移除. 图11和图12表示当 DG_3 插拔时DG的输出电压和输出电流. 如图11所示, $t=0$ s时启动二次控制策略, DG_1 和 DG_2 的输出电压和母线电压均能恢复至标称值;当 $t=1$ s时, DG_3 接入电路,各个DG的输出电压和母线电压均在经过一个小波动后恢复至标称值;当 $t=2$ s时, DG_3 从电路中移除,电压在经

过波动后均能恢复至标称值.如图 12 所示,在 $t=0\sim 1$ s 时, DG_1 和 DG_2 的输出电流按照比例分配,当 DG_3 接入电路后,三者输出电流同样能按照比例分配, DG_3 从电路中移除后,剩余 2 个 DG 输出电流还是按照比例分配.由图 11 和图 12 可知,二次控制策略可实现分布式电源的即插即用.

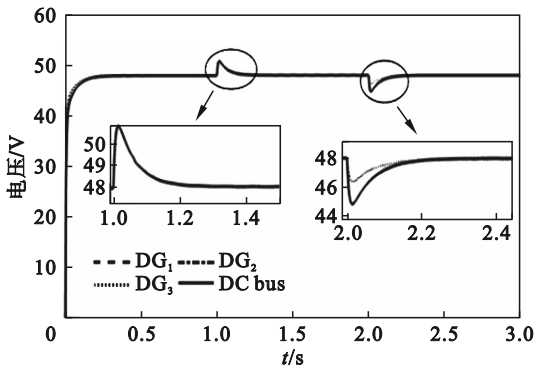


图 11 备用电源插拔时 DG 的输出电压

Fig. 11 Output voltage of the DGs when the back-up DG is plugged in and out

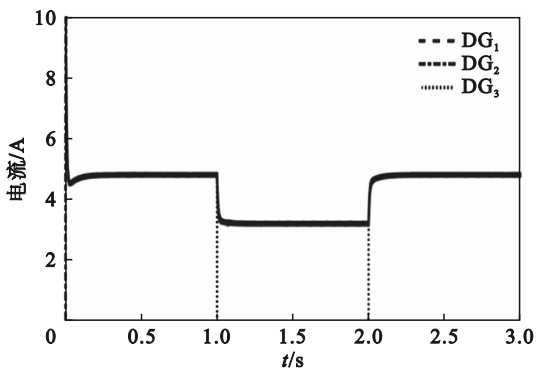


图 12 备用电源插拔时 DGs 的输出电流

Fig. 12 Output current of the DGs when the back-up DG is plugged in and out

图 13 和图 14 表示 DG_1 的平均电压和比例电流所对应的触发次数.由图 13 和图 14 可知,在动态事件触发的作用下大大节约了通信资源.

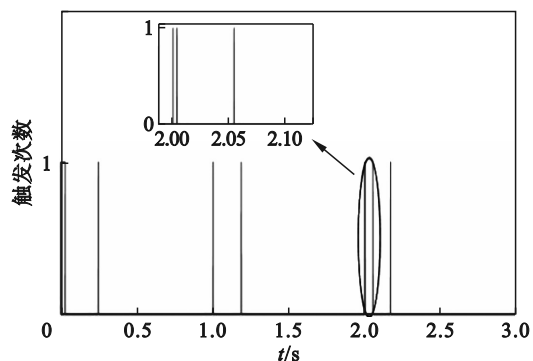


图 13 备用电源插拔时平均电压控制的触发次数

Fig. 13 Trigger times of average voltage control when the back-up DG is plugged in and out

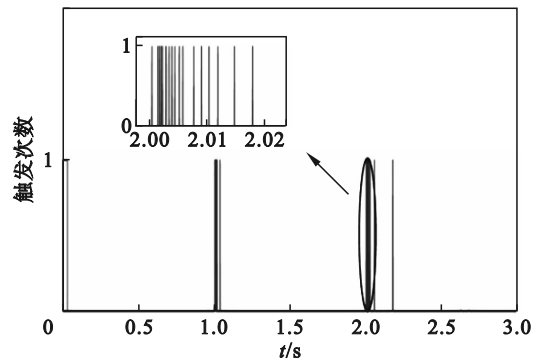


图 14 备用电源插拔时比例电流控制的触发次数

Fig. 14 Trigger times of proportional current control when the back-up DG is plugged in and out

4 结 语

本文以孤岛直流微电网为研究对象,设计了一种具备动态事件触发机制的分布式二次控制策略,弥补了一次控制的不足,减小了直流母线电压与标称电压之间的偏差,同时维持了电流分配精度.与静态事件触发控制相比,动态事件触发条件的阈值不再是一个固定的常数,由于动态项的存在使得通信冗余进一步减少,不存在 Zeno 行为.仿真结果表明,在动态事件触发控制策略的作用下,直流母线电压在负载变化和备用电源插拔两种工况下均能恢复至标称值,并且电流分配精度不受影响,而且该策略的触发次数较少,计算和通信负担较小.

参考文献:

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
(Yang Xin-fa, Su Jian, Lyu Zhi-peng, et al. Overview on microgrid technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57-70.)
- [2] 张勇军,刘子文,宋伟伟,等.直流配电系统的组网技术及其应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):39-49.
(Zhang Yong-jun, Liu Zi-wen, Song Wei-wei, et al. Networking technology and its application of DC distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(23): 39-49.)
- [3] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
(Li Xia-lin, Guo Li, Wang Cheng-shan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 2-17.)
- [4] Bidram A, Davoudi A, Lewis F L. A multiobjective distributed control framework for islanded AC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(3): 1785-1798.
- [5] Cintuglu M H, Mohammed O A, Akkaya K, et al. A survey on smart grid cyber-physical system testbeds [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 446-464.

