

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250016

基于事件触发预设时间一致性的孤岛微电网电压二次控制

贾浩洋^{1,2}, 李斌^{1,2}, 胡丹丹³, 王浩^{1,2}, 高康佳^{1,2}

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省智能装备直驱技术与控制国际联合实验室(河南理工大学), 河南 焦作 454003; 3. 国网河南省电力公司焦作供电公司, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对现阶段以虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)为基础的孤岛微电网电压二次控制中存在对连续通信依赖度高、计算收敛上界与实际收敛时间差异较大的问题, 提出了一种结合事件触发机制的预设时间一致性算法。首先, 根据状态误差超限设计事件触发机制, 使各逆变器仅需与相邻逆变器进行少量间断通信, 即可在用户设定时间内实现电压无差恢复和无功功率按容量分配。然后, 从理论上分析了所提方法的收敛性, 并排除了芝诺行为出现的可能。最后, 搭建孤岛微电网测试系统进行仿真实验, 结果表明系统可在设定时间内完成收敛。且相比连续通信方案, 在几乎不影响恢复性能的前提下, 通信次数减少超过 99%, 显著提升了微电网的效率与灵活性。

关键词: 孤岛微电网; 虚拟同步发电机; 事件触发; 预设时间一致性; 电压二次控制

Preset-time consensus-based secondary voltage control for islanded microgrids using event-triggered mechanisms

JIA Haoyang^{1,2}, LI Bin^{1,2}, HU Dandan³, WANG Hao^{1,2}, GAO Kangjia^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment (Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454003, China; 3. Jiaozuo Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: For islanded microgrids using virtual synchronous generator-based secondary voltage control, existing approaches depend heavily on continuous communication and exhibit a significant gap between the theoretical convergence upper bound and the actual convergence time. To address these issues, this paper proposes a preset-time consensus algorithm enhanced with an event-triggered mechanism. First, an event-triggered strategy is designed based on state error thresholds, enabling each inverter to communicate intermittently and only with its neighbors. This achieves voltage restoration without deviation and reactive power sharing according to inverter rating within a user-specified time. Then, the convergence of the proposed method is theoretically analyzed, and the possibility of Zeno behavior is excluded. Finally, a simulation platform of an islanded microgrid is built and the test results show that the system converges within the preset time. Compared with continuous communication schemes, the proposed method reduces communication events by more than 99% with almost no loss in recovery performance, significantly improving the efficiency and flexibility of microgrid control.

This work is supported by the Science and Technology Research Project of Henan Province (No. 242102241056).

Key words: islanded microgrid; virtual synchronous generator; event-triggered control; preset-time consensus; secondary voltage control

0 引言

随着新能源的发展, 孤岛微电网逐渐受到广泛关

注, 其主要由分布式电源(distributed generator, DG)、储能、负载、能量管理与通信监控系统组成^[1-2]。传统下垂控制的 DG 虽具备较强的可控性和灵活性, 但因缺乏惯性和阻尼, 难以适应高比例可再生能源的接入^[3-5]。为此, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制被提出^[6-8], 通过模拟同步发电

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(242102241056); 河南省高等学校重点科研项目资助(25B470003)

机特性, 增强系统惯性与阻尼, 有效弥补传统控制的不足。

微电网的分层控制是一种高效的管理策略, 已被广泛应用于实际系统^[9]。由于一次控制无法实现无差调节, 面对较大负荷波动时, 难以满足设备对电能质量的要求^[10]。二次控制则可实现无差控制和功率均分, 弥补一次控制的不足^[11]。

相比依赖 SVG、并联电容器等外部设备的电压二次控制, 利用 DG 自身的无功储备更为经济高效, 避免了对外部设备的依赖。按通信方式二次控制可分为集中式、分散式和分布式 3 类。1) 集中式控制依赖微电网中央控制器(microgrid central controller, MGCC)统一调度, 一旦 MGCC 或通信链路发生故障, 可能引发系统瘫痪^[12]; 2) 分散式控制虽无需通信, 但缺乏全局协调能力; 3) 分布式控制则兼具两者优势, 仅需相邻 DG 间的信息交换, 即可实现全局一致性控制。

目前, 基于一致性算法的分布式二次控制研究主要聚焦于系统收敛速度的提升, 该指标直接影响微电网的运行性能与稳定性。文献[13]通过反馈线性化方法, 将二次调频与调压问题转化为一阶跟踪问题, 简化了基本一致性算法在孤岛微电网中的应用设计; 文献[14]则在一致性算法基础上引入滑模控制, 提高了系统收敛速度和鲁棒性。然而, 基本一致性算法的系统收敛时间趋于无穷, 难以满足快速恢复的需求。为实现系统在有限时间内收敛, 文献[15-16]引入有限时间一致性算法, 但其收敛时间受系统初始状态影响较大, 难以精确确定。文献[17-18]进一步提出固定时间一致性控制, 使收敛速度不依赖于初始状态, 但估算的收敛时间上界与实际存在较大偏差, 且系统参数变化会影响收敛时间。针对上述问题, 有学者提出预设时间一致性算法, 通过时变函数调节控制增益, 可以实现由用户自主设置收敛时间。文献[19]所提算法在预设时间到达时刻的控制增益趋于无穷, 文献[20]虽作改进, 控制效果却在预设时间后失效。相比之下, 本文采用的预设时间一致性算法既具备有限控制增益, 又能在整个控制过程中持续有效。

上述二次控制算法普遍采用连续通信方案, 易导致通信冗余、资源浪费和设备能耗增加。而在实际应用中, 许多孤岛微电网采用如 ZigBee、LoRa、NB-IoT 等低功耗无线通信技术, 受限于带宽, 难以支持高频率、全时段的数据交互。事件触发机制在保障控制精度和系统稳定性的同时, 显著减少不必要的通信^[21], 既缓解了带宽压力, 又有效过滤冗余信息。文献[22]将事件触发机制与一致性算法结合,

应用于孤岛微电网电压二次控制, 但未排除可能出现的芝诺行为^[23], 即在有限时间内触发无限次事件。文献[24]通过人为设定最小事件触发间隔以避免芝诺行为, 但该方式在控制器需更高触发频率的场景下, 可能导致控制精度下降, 甚至无法完成控制任务。文献[25]则通过改进事件触发函数并通过理论证明排除了芝诺行为出现的可能, 但所用为基本一致性算法, 且仅适用于固定拓扑, 缺乏即插即用性能的验证。

针对现有研究中的不足, 本文设计了一种基于事件触发机制的预设时间一致性算法, 并将其应用于孤岛微电网的电压二次控制。建模过程中引入虚拟阻抗环节, 用以达成微电网有功功率与无功功率的解耦。相较传统方案, 所提算法通过预设时间一致性控制实现电压在用户设定时间内无误差恢复, 克服了收敛时间难以确定的问题, 并能根据容量合理分配无功功率, 满足高精度控制需求。此外, 事件触发机制的引入显著减少了各 DG 间的通信频率, 缓解了系统通信压力。本文通过理论分析证明了所提控制策略的收敛性与稳定性, 并有效排除了芝诺行为。仿真与实验结果进一步验证了所提方法的可行性与有效性。

1 VSG 的一次控制

VSG 控制是通过一定的控制策略使逆变电源具有同步发电机的特性, 其控制过程如图 1 所示。其中: U_{dc} 为直流电压源; R 、 L 、 C 共同构成 LC 滤波器, 用于改善输出电压质量, 抑制谐波; u_o 为电容电压; i_o 为 VSG 输出电流; Z_{line} 为线路阻抗。

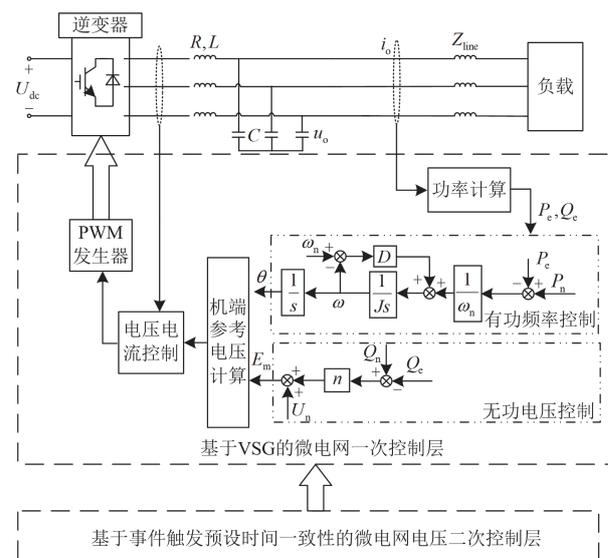


图 1 孤岛微电网控制模型

Fig. 1 Control model of islanded microgrid

将测量到的电压电流经功率计算得到逆变电源的输出功率,再通过 VSG 的有功频率和无功电压控制部分,得到参考电压的幅值和相角,经电压电流双环控制后生成 PWM 信号,实现对逆变器的控制。

VSG 的有功频率控制部分的数学表达为^[26]

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_n}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_n) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

VSG 的无功电压控制部分的数学表达为^[26]

$$E_m = U_n + n(Q_n - Q_e) \quad (2)$$

式中: J 为虚拟转动惯量; P_n 为逆变电源有功指令值; P_e 为输出有功功率; D 为阻尼系数; ω 、 ω_n 分别为电气角速度和额定角速度; θ 为 VSG 功角; E_m 为电压参考值; U_n 为 VSG 空载电动势; n 为无功下垂系数; Q_n 为无功指令值; Q_e 为逆变电源无功输出值。

逆变器功率传输模型如图 2 所示,其中线路阻抗 $Z_{line} = R_L + jX_L$, VSG 输出功率为 $S = P + jQ$,其中 P 、 Q 计算表达式为

$$P = \frac{E_1[R_L(E_1 - E_2 \cos \gamma) + E_2 X_L \sin \gamma]}{R_L^2 + X_L^2} \quad (3)$$

$$Q = \frac{E_1[X_L(E_1 - E_2 \cos \gamma) - E_2 R_L \sin \gamma]}{R_L^2 + X_L^2} \quad (4)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为线路首、末端电压; γ 为功角差。

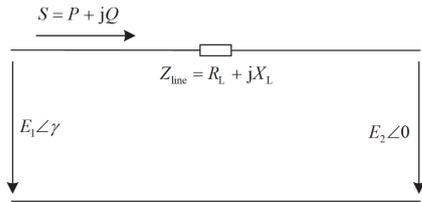


图 2 功率传输模型

Fig. 2 Power transmission model

在低压微电网中,由于 R_L/X_L 较大,有功和无功耦合较强,影响下垂特性,削弱电压二次控制效果。因此可引入虚拟阻抗加以改善,如图 3 所示,其中 X_v 为虚拟阻抗。

由于功角差 γ 通常较小, $\cos \gamma \approx 1$, 当 $(X_L + X_v) = X \gg R_L$ 时,式(3)和式(4)可以简化为

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \gamma \quad (5)$$

$$Q = \frac{E_1(E_1 - E_2)}{X} \quad (6)$$

式中: X 为经过虚拟阻抗补偿后的线路电抗。

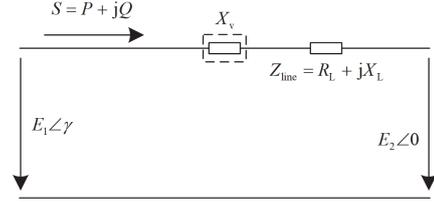


图 3 加入虚拟阻抗后的功率传输模型

Fig. 3 Power transmission model with added virtual impedance

由式(5)和式(6)可知,此时 P 取决于功角差, Q 取决于电压,解决了低压微电网中的功率耦合问题。

仅在 VSG 控制的作用下,本质上只是加入了阻尼和惯量的下垂控制,在面对负荷波动时不能将电压维持在额定值^[24],要确保微网电压在面对负荷波动能维持在额定值就需要加入二次控制进行补偿。

2 VSG 的电压二次控制

2.1 图论基础

将由 N 台 DG 组成的通信网络建模为一个无向图 G , $G = (V, E, A)$, 每台 DG 视为一个节点,其中 V 表示 G 的通信节点集合, $V = \{1, 2, \dots, N\}$, E 表示通信链路的边集, $E \subseteq V \cdot V$, A 为 G 的邻接矩阵, $A = [a_{ij}]_{N \times N}$, 如果两个节点之间有通信则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$; 定义节点 i 的入邻域集 N_i 为与节点 i 有通信的所有节点的集合, $N_i = \{j \in V \mid (j, i) \in E\}$; 度矩阵 D 是一个对角矩阵, $D = \text{diag}\{d_i\} \in R^{N \times N}$, 对角元素 $d_i = |N_i|$, 其中 $|N_i|$ 为与节点 i 有通信链路的节点的个数。 L 为无向图 G 的拉普拉斯矩阵, $L = D - A$ 。

2.2 预设时间一致性

由于固定时间一致性方案所能估算出的收敛上界与实际的收敛时间之间存在较大差异,对于控制精度要求较高的场景来说这是非常不利的,因此引入预设时间一致性来解决这一问题^[27]。

通过在一致性算法中引入一个时变的时间尺度函数,来使被控制系统能够在预设时间内完成收敛,文献[28]的时间尺度函数 $\varphi(t)$ 的设计原则如下。

- 1) $\varphi(t)$ 在区间 $(0, +\infty)$ 内始终保持大于 0;
- 2) $\varphi(t)$ 是一个连续不减的函数,并且 $\varphi(0) = 0$, $\varphi(T) = 1$, $T \in (0, +\infty)$, T 为可由用户设定的恢复时间;
- 3) $\hat{\varphi}(0) = \hat{\varphi}(T) = 0$, 上标 “^” 表示求导符号;
- 4) 当 $t \in (0, +\infty)$ 时, $\varphi(t) = 1$, $\hat{\varphi}(t) = 0$ 。

基于上述规则设计出来的时间尺度函数为

$$\varphi(t) = \begin{cases} \frac{10}{T^6}t^6 - \frac{24}{T^5}t^5 + \frac{15}{T^4}t^4, & 0 \leq t < T \\ 1, & t \geq T \end{cases} \quad (7)$$

本文考虑 N 台 DG 同时运行, 第 i 个 DG 的动力学模型为

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), i \in V \quad (8)$$

式中: $x_i(t)$ 表示第 i 台 DG 的状态; $u_i(t)$ 表示控制输入, 具体如式(9)所示。

$$u_i(t) = - \left[\frac{\hat{\varphi}(t)}{2\lambda_2(\mathbf{L})(1-\varphi(t)+\delta)} + 1 \right] \cdot \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \right] \quad (9)$$

式中: N_i 为与节点 i 相邻的节点; δ 为控制增益参数, $0 < \delta \ll 1$; $\lambda_2(\mathbf{L})$ 为拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 的第二小特征值。

2.3 事件触发机制

基于事件触发机制的一致性控制器采用非均匀采样: 当电压或无功功率波动较大时, 提高采样频率; 当系统平稳时, 降低采样频率。控制器通过事件触发函数判断系统误差, 若满足条件则更新状态, 否则保持不变, 直到下一次触发。

在本文中 “~” 来表示最近更新的系统状态, 定义 $\tilde{x}_i(t) = x_i(t_l^i)$, $t \in [t_l^i, t_{l+1}^i)$, 其中 t_l^i 为第 i 台 DG 状态变量的第 l 个触发时刻。控制输入 $u_i(t)$ 在事件触发机制的作用下变为式(10)。

$$u_i(t) = - \left[\frac{\hat{\varphi}(t)}{2\lambda_2(\mathbf{L})(1-\varphi(t)+\delta)} + 1 \right] \cdot \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij}(\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t)) \right), t \in [t_l^i, t_{l+1}^i) \quad (10)$$

式中: $\tilde{x}_j(t)$ 为第 j 台 DG 在 $t \in [t_l^i, t_{l+1}^i)$ 时最新采样的状态变量。

为构造事件触发函数, 定义第 i 个 DG 的状态误差 $e_i(t)$ 如式(11)所示。

$$e_i(t) = \tilde{x}_i(t) - x_i(t) \quad (11)$$

进而, 将第 i 个 DG 的事件触发条件描述为

$$t_{l+1}^i = \inf\{t \in [t_l^i, \infty) | f_i(t) \geq 0\} \quad (12)$$

式中: \inf 表示在区间内满足事件触发条件的最小时间; $f_i(t)$ 为事件触发函数^[29]。

$$f_i(t) = e_i^2(t) - \frac{\sigma_i a(1-a|N_i|)}{|N_i|} \cdot \left[\sum_{j \in N_i} (\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t))^2 \right] \quad (13)$$

式中: σ_i 为事件触发判定系数, $\sigma_i \in (0, 1)$, 在范围内取值越大触发次数越少, 但波形质量略有下降; a 为控制参数, $a \in (0, 1/|N_i|)$ 。

2.4 电压二次控制策略

传统 VSG 控制在负荷波动或线路变化时, 因输出功率与指令值不匹配, 难以稳定电压。因此, 需要对 VSG 算法进行改进, 在无功环路中引入二次控制分量修正指令值, 改进后第 i 台 DG 无功电压控制部分为

$$E_{mi}(t) = U_{ni}(t) + n_i(Q_{ni}(t) - Q_{ci}(t)) + \xi_i \quad (14)$$

式中: $E_{mi}(t)$ 为第 i 台 DG 的输出电压参考; $U_{ni}(t)$ 、 $Q_{ni}(t)$ 分别为第 i 台 DG 的额定电压和额定无功功率; $Q_{ci}(t)$ 、 n_i 分别为第 i 台 DG 的输出无功功率和下垂系数; ξ_i 为电压二次控制分量。

由于电压二次控制包含电压无差恢复和无功精确分配。因此电压二次控制分量由两部分组成。

$$\xi_i = k \int [u_{Ui}(t) + u_{qi}(t)] dt \quad (15)$$

式中: k 为恢复系数; $u_{Ui}(t)$ 为电压恢复部分; $u_{qi}(t)$ 为无功分配部分。

其中电压恢复部分的控制输入 $u_{Ui}(t)$ 可以表示为

$$u_{Ui}(t) = - \left[\frac{\hat{\varphi}(t)}{2\lambda_2(\mathbf{L})(1-\varphi(t)+\delta)} + 1 \right] \cdot \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij}(\tilde{U}_i(t) - \tilde{U}_j(t)) + b_i(\tilde{U}_i(t) - U_{ref}) \right] \quad (16)$$

式中: $\tilde{U}_i(t)$ 、 $\tilde{U}_j(t)$ 分别为第 i 、 j 台 DG 的电压; U_{ref} 为电压参考值, 由虚拟分布式电源 DG0 作为领导者提供; b_i 为 DG _{i} 和领导者的连接关系, 如果有连接则 $b_i = 1$, 否则 $b_i = 0$ 。对应事件触发函数 $f_{Ui}(t)$ 为

$$f_{Ui}(t) = \left[e_{Ui}^2(t) - \frac{\sigma_i a(1-a|N_i|)}{|N_i|} \cdot \left[\sum_{j \in N_i} (a_{ij}(\tilde{U}_i(t) - \tilde{U}_j(t)) + b_i(\tilde{U}_i(t) - U_{ref}))^2 \right] \right] \quad (17)$$

式中: $e_{Ui}(t)$ 为电压状态误差, $e_{Ui}(t) = \tilde{U}_i(t) - U_i(t)$; 当 $f_{Ui}(t) \geq 0$ 时, 对应的状态变量更新一次。

无功功率精确分配控制输入 $u_{qi}(t)$ 为

$$u_{qi}(t) = - \left[\frac{\hat{\varphi}(t)}{2\lambda_2(\mathbf{L})(1-\varphi(t)+\delta)} + 1 \right] \cdot \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij}(n_i \tilde{Q}_{ci}(t) - n_j \tilde{Q}_{cj}(t)) \right] \quad (18)$$

对应事件触发函数为

$$f_{qi}(t) = e_{qi}^2(t) - \frac{\sigma_i a(1-a|N_i|)}{|N_i|} \cdot \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij}(n_i \tilde{Q}_{ci}(t) - n_j \tilde{Q}_{cj}(t))^2 \right] \quad (19)$$

式中: $e_{qi}(t)$ 为无功功率状态误差, $e_{qi}(t) = n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)$; 当 $f_{qi}(t) \geq 0$ 时, 对应的状态变量更新一次。

VSG 的下垂系数与其无功容量成反比。

$$n_1 Q_{n1}(t) = n_2 Q_{n2}(t) = \dots = n_N Q_{nN}(t) \quad (20)$$

如果输出无功要实现精确分配满足式(21), 则输出的无功和下垂系数同样满足式(22)。

$$\frac{Q_{e1}(t)}{Q_{n1}(t)} = \frac{Q_{e2}(t)}{Q_{n2}(t)} = \dots = \frac{Q_{eN}(t)}{Q_{nN}(t)} \quad (21)$$

$$n_1 Q_{e1}(t) = n_2 Q_{e2}(t) = \dots = n_N Q_{eN}(t) \quad (22)$$

综上, 二次电压控制器控制框图如图 4 所示。

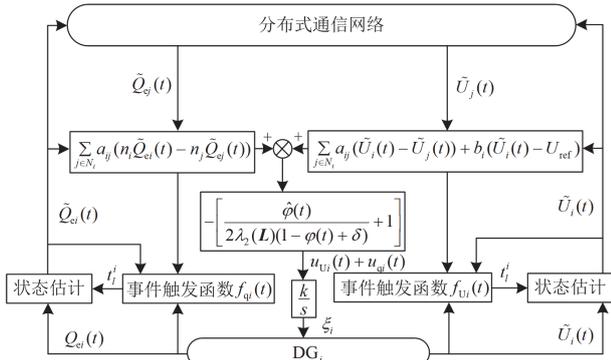


图 4 事件触发下的预设时间一致性二次电压控制框图

Fig. 4 Control block diagram of the preset time consistency secondary voltage controller under event triggered

3 可行性分析

3.1 收敛性分析

本节将对式(14)提出的控制策略进行收敛性分析, 以确保系统各状态变量能在预设时间内达成一致收敛。

定义 1^[28]: 对于一阶线性系统, 任意初始状态 $\tilde{x}_i(0)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 如果微电网系统够满足式(23), 则称事件触发预设时间一致性收敛, 即微电网系统完成电压二次控制。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} |\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t)| = H \\ |\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t)| \leq H, \forall t > T \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} |\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t)| = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: H 为可以调整期望水平的正常数。

引理 1: 对于无向连通图, 式(24)成立。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T \mathbf{L} \mathbf{x} &\geq \lambda_2(\mathbf{L}) \mathbf{x}^T \mathbf{x} \\ \mathbf{x}^T (\mathbf{L}^2) \mathbf{x} &\leq \lambda_N(\mathbf{L}^2) \mathbf{x}^T \mathbf{x} \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $\lambda_N(\mathbf{L}^2)$ 为拉普拉斯矩阵平方的最大特征值; \mathbf{x} 为 $\tilde{x}_i(t)$ 的矩阵形式。

引理 2^[28]: 令 $\hat{\varphi}(t)/[\lambda_2(\mathbf{L})(1-\varphi(t)+\delta)] = \eta$, 式

(11)用矩阵可表示为

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_i(t) = -(\eta + 1) \mathbf{L} \mathbf{x} \quad (25)$$

将式(25)两边进行积分变换得到

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(0) \left[1 - \frac{\varphi(t)}{1 + \delta} \right] \quad (26)$$

式中: $\mathbf{x}(0)$ 为初始状态列向量; 由于 $\varphi(T) = 1$, $0 < \delta \ll 1$, 因此在预设时间 T 时, $\mathbf{x}(T) = \mathbf{x}(0)[\delta/(1+\delta)] \approx 0$, 可以实现预设时间内的近似收敛。

定理 1^[28]: 根据定义 1 和引理 1、2 可以得出, 当式(18)满足式(27)时微电网系统完成无功功率按容量分配。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} |n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)| \leq (N-1) \sqrt{\frac{2\delta}{\lambda_2(\mathbf{L})(1+\delta)}} V(0) \\ |n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)| \leq (N-1) \sqrt{\frac{2\delta}{\lambda_2(\mathbf{L})(1+\delta)}} V(0), \forall t > T \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} |n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)| = 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $V(0)$ 为李雅普诺夫函数在初始时刻的取值。

对定理 1 进行证明如下。

考虑李雅普诺夫函数 $V(t) = [(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \cdot \mathbf{L}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})]/2$, 对李雅普诺夫函数两边求导, 结合引理 1 得到

$$\begin{aligned} \hat{V}(t) &= \frac{1}{2} (\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) \leq -\frac{\eta}{2} (\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}^2(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) \leq \\ &-\frac{\eta}{2} \frac{\lambda_2(\mathbf{L})}{\lambda_N(\mathbf{L}^2)} (\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) \leq -\frac{\eta}{2} (\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) = \\ &-\eta V(t) = -\frac{\hat{\varphi}(t)}{1-\varphi(t)+\delta} V(t) \end{aligned} \quad (28)$$

式中: \mathbf{n} 为 VSG 的下垂系数向量; $\tilde{\mathbf{Q}}$ 为 VSG 的无功输出向量。

由引理 2 可得 $V(t) \leq [\delta/(1+\delta)]V(0)$, 再联立引理 1 得

$$V(t) = \frac{1}{2} (\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) \geq \frac{1}{2} \lambda_2(\mathbf{L})(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T (\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) \quad (29)$$

根据矩阵知识移相计算得

$$\lim_{t \rightarrow T} |\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}| \sqrt{\frac{2}{\lambda_2(\mathbf{L})}} V(t) \leq \sqrt{\frac{2\delta}{\lambda_2(\mathbf{L})(1+\delta)}} V(0) \quad (30)$$

在到达预设时间 T 时收敛至式(31)。

$$\lim_{t \rightarrow T} |n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)| \leq (N-1) \sqrt{\frac{2\delta}{\lambda_2(\mathbf{L})(1+\delta)}} V(0) \quad (31)$$

式(31)中 δ 取值极小, 因此可以保证无功功率分配的效果。

本文设计的控制器在整个控制过程中均有效,

当 $t > T$, $\eta = 0$ 时:

$$\hat{V}(t) = -\frac{\eta+1}{2}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}^2(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) = -\frac{1}{2}(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}})^T \mathbf{L}^2(\mathbf{n}\tilde{\mathbf{Q}}) \leq 0 \quad (32)$$

式(32)表明 $V(t)$ 是一个单调不增函数, 当 $t > T$ 时有

$$|n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)| \leq (N-1) \sqrt{\frac{2\delta}{\lambda_2(\mathbf{L})(1+\delta)}} V(0), \forall t > T \quad (33)$$

各台 DG 的无功出力在时间无穷大时满足式(34), 表明该控制策略在整个控制过程中都有效。

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |n_i \tilde{Q}_{ei}(t) - n_j \tilde{Q}_{ej}(t)| = 0 \quad (34)$$

式(16)设计的电压恢复控制部分带有领导者, 对其证明:

考虑李雅普诺夫函数 $V(t) = (\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x})/2$, 其中 \mathbf{P} 为正实数对称矩阵, \mathbf{x} 为电压状态矩阵。两边求导得

$$\hat{V}(t) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}} = -\frac{(\eta+1)}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{P}(\mathbf{L} + \mathbf{E}) \mathbf{x} \quad (35)$$

式中: \mathbf{E} 为单位矩阵; $\mathbf{P}(\mathbf{L} + \mathbf{E}) > 0$ (正定); 由李雅普诺夫稳定性第二判据^[23] $V(t) > 0$, $\hat{V}(t) < 0$, 因此系统(式(16))渐近稳定, 使电压恢复至额定值。

3.2 芝诺行为的排除

本节将对于事件触发机制进行芝诺行为排除证明, 证明任意相邻的两台 DG 进行两次通信的时间间隔存在一个正的下界, 从而不会出现在有限时间内出现无限次通信的情况。

定理 2^[29]: 考虑一个一阶线性系统, 其控制输入为式(10), 事件触发条件由式(12)给出, 且通信图连通。则各 DG 的两次事件触发之间都存在一定的时间间隔, 不会连续触发。

接下来对定理 2 进行证明。

将 $e_i^2(t)$ 求导得

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} e_i^2(t) &= 2e_i(t) \dot{e}_i(t) = 2e_i(t) z_i(t_i^j) \leq \\ &2|e_i(t) z_i(t_i^j)| \leq c e_i^2(t) + \frac{1}{c} z_i^2(t_i^j) \end{aligned} \quad (36)$$

式中: c 为缩放参数 $c > 0$, $z_i(t_i^j) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t))$ 。

考虑微分方程

$$\hat{\phi}_i = c \phi_i + \frac{1}{c} z_i^2(t_i^j) \quad (37)$$

初始条件为: $\phi_i(t_i) = e_i^2(t_i) = 0$, 可以得到

$$e_i^2(t) \leq \phi_i(t) = \frac{1}{c} \int_{t_i}^t e^{c(t-\tau)} z_i^2(\tau) d\tau, t \in [t_i, t_{i+1}) \quad (38)$$

第 i 台 DG 的最小触发时间间隔, 可以通过求解满足 $\phi_i(t) > \chi_i z_i^2(t_i^j)$ 的最小时间 t_{\min} 得到, 其中 $\chi_i = \frac{\sigma_i a(1-a|N_i|)}{|N_i|} > 0$ 。

在这里分析两种情况。

1) 在上一个更新时刻 t_i^j 处 $z_i^2(t_i^j) \neq 0$ 时, 由式(36)可知, 由于 $z_i^2(t_i^j) > 0$, 则 $\phi_i(t)$ 从 0 增长到 $\chi_i z_i^2(t_i^j)$ 需要的时间 $t_{\min} > 0$ 。

2) 在上一个更新时刻 t_i^j 处 $z_i^2(t_i^j) = 0$ 时, 此时对于任意 $t \in [t_i^j, t_i^j)$, $t_i^j < t_i^j$, 有 $\phi_i(t) = 0$, 由式(36)可知, 该时段内 DG_{*i*} 不满足事件触发条件。当 DG_{*i*} 从它的邻居接收到更新的状态变量时, $z_i(t_i^j) \neq 0$, 此时回到情况 1), 即误差需要一段正的时间才能从 0 增长到 $\chi_i z_i^2(t_i^j)$, 定理 2 得证。

4 控制策略的验证

4.1 仿真验证

为验证所提控制策略, 使用 MATLAB/Simulink 平台搭建了如图 5 所示的 4 台 DG 并联运行系统, 负载均为阻感性负载。微电网模型中引入了一个虚拟分布式电源 DG0 作为领导者, 其中 DG1 能够接收来自领导者的参考信息, 即 $b_1 = 1$ 。系统参数如表 1 所示。

在加入虚拟阻抗进行功率解耦时, 虚拟阻抗的取值对于功率解耦有效性至关重要, 当取值过小时, 解耦效果不佳, 取值过大会恶化功率解耦性能, 加剧电网无功功率不足。本文虚拟阻抗取值参考文献[30], 仿真验证一、二、三中均有虚拟阻抗。

由图 5 得拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

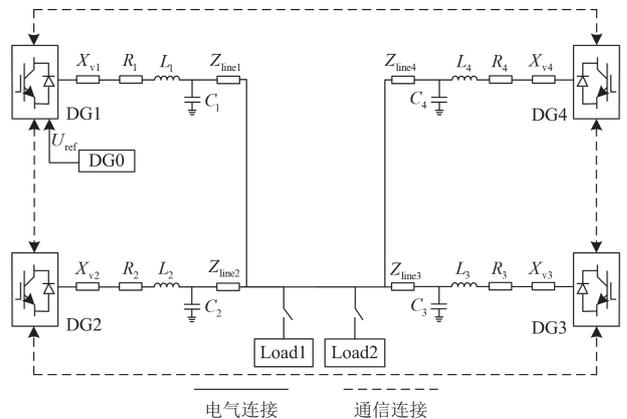


图 5 孤岛微电网仿真测试系统

Fig. 5 Isolated microgrid simulation test system

表 1 孤岛微电网测试系统参数

Table 1 Island microgrid test system parameters

参数	数值	参数	数值
R_i/Ω	0.1	U_{dc}/V	700
L_i/mH	2	U_{ref}/V	311
$C_i/\mu F$	150	f_n/Hz	50
$J/(kg/m^2)$	2	D	10
k	16	σ_i	0.5
N_i	2	a	0.2
Z_{line1}/Ω	$0.25 + j0.03$	Z_{line3}/Ω	$0.25 + j0.03$
Z_{line2}/Ω	$0.25 + j0.03$	Z_{line4}/Ω	$0.25 + j0.03$
X_{v1}/mH	3	X_{v3}/mH	3
X_{v2}/mH	3	X_{v4}/mH	3
Load1	10 kW + 3 kvar	Load2	10 kW + 3 kvar

仿真验证一：验证二次控制和事件触发能力。

本次仿真测试分为 3 种工况：未采用电压二次控制、采用预设时间一致性的电压二次控制以及采用事件触发预设时间一致性的电压二次控制。在这 3 种情况下 4 台 DG 的额定无功容量分别为 1000、1000、500、500 var；DG1 和 DG2 的下垂系数为 2.5×10^{-4} ，DG3 和 DG4 的下垂系数为 5×10^{-4} 。Load1 全程接入测试系统，Load2 仅在 2~4 s 接入测试系统，系统恢复时间设置为 0.4 s，仿真时间为 6 s。

不同控制方案下各 DG 的输出电压曲线仿真结果如图 6 所示，不同控制方案下各 DG 的无功功率输出曲线如图 7 所示。在 0~2 s 以及 4~6 s 期间，负载容量等于额定容量。在不加入二次控制时，系统电压也可以稳定在额定值，同时无功功率也按照 2:2:1:1 的比例进行分配。

当负载在 2~4 s 增加时，系统输出的无功功率无法满足负载的无功需求，在未采用电压二次控制

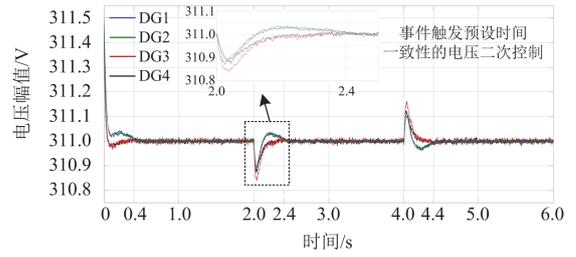
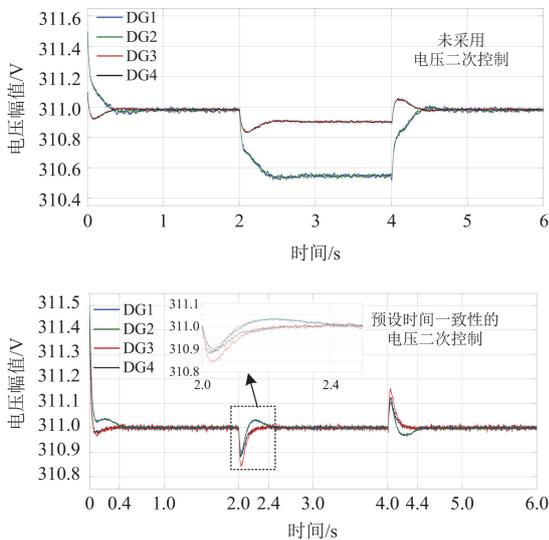


图 6 不同控制方案下各 DG 输出电压曲线

Fig. 6 Output voltage curves of each DG under different control schemes

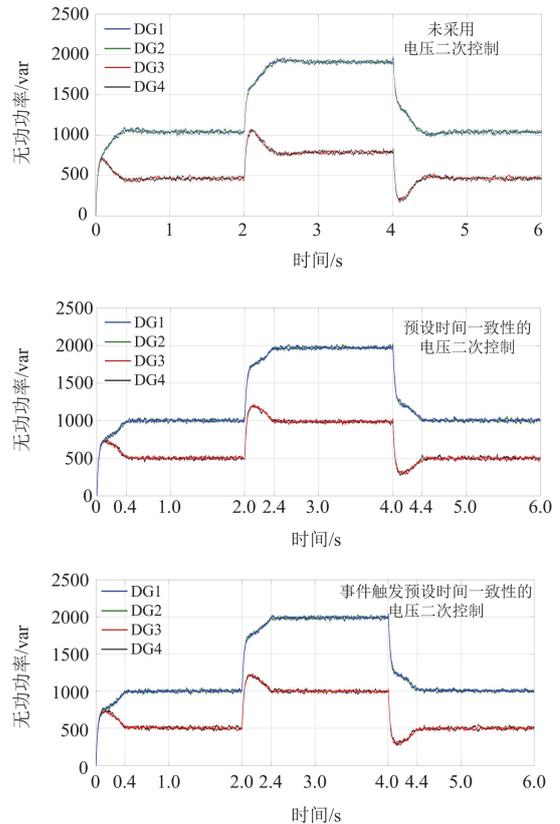


图 7 不同控制方案下各 DG 无功功率输出曲线

Fig. 7 Reactive power output curve of each DG under different control schemes

时，DG1 和 DG2、DG3 和 DG4 电压分别稳定在 310.9 V 和 310.53 V，没有恢复至额定值，增加的无功出力由于没有按照容量比进行分配。在相同的工况下，当预设时间一致性的电压二次控制和事件触发预设时间一致性的电压二次控制加入后，分布式电源会根据负载需要对参考值进行补偿，并且各台 DG 增加的无功出力也按照 2:2:1:1 进行分配，因此可以实现二次电压控制，最终使电压在预设的 0.4 s 内稳定在额定值 311 V。

在加入预设时间一致性的电压二次控制和事件

触发预设时间一致性的电压二次控制后, 各台 DG 可以及时调节输出无功功率以匹配负载所需无功功率, 补偿偏差电压, 使孤岛微电网系统可以在设定时间之前恢复到额定电压, 同时各逆变器所承担的补偿无功功率也都按容量进行分配。在加入事件触发预设时间一致性的电压二次控制后, 相比于预设时间一致性的电压二次控制由原本的连续触发方案变为了间断触发方案, 最终所呈现的输出曲线相比于连续通信方案波动略大。不过, 从整体控制效果来看, 事件触发的预设时间一致性电压二次控制, 在电压恢复速度、功率分配完成时间及控制准确度上, 与未加入事件触发的预设时间一致性电压二次控制几乎一致。因此, 事件触发的预设时间一致性电压二次控制是一种良好的控制策略。

图 8 给出了加入 Load2 后 1 s 内各个 DG 的事件触发情况示意图, 其中当纵坐标数值为 1 时表示触发, 为 0 则不触发。可以看出在达到预设时间后触发次数相比于达到预设时间之前的触发次数有所减少。

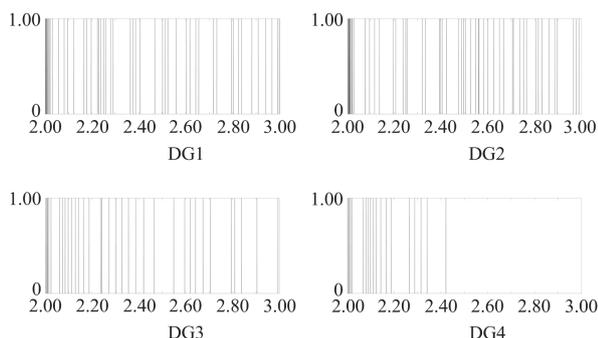


图 8 事件触发图

Fig. 8 Event trigger diagram

接下来对事件触发机制在降低通信压力方面进行定量分析。仿真设置为相同的采样时间, 分别对预设时间一致性, 事件触发预设时间一致性的电压二次控制进行仿真。在预设时间一致性的电压二次控制下, 每次系统采样视为一次通信。图 9 展示了各个 DG 的通信情况。在预设时间一致性的电压二次控制下, 6 s 内状态信息更新了 120 000 次。加入事件触发预设时间一致性的电压二次控制后, 每触发一次算作一次通信, 即使是触发次数最多的 DG1, 也仅触发了 285 次, 通信压力减少了 99% 以上。由此可见, 事件触发预设时间一致性的电压二次控制仅依赖部分状态信息即可完成控制目标, 从而显著降低了通信次数。

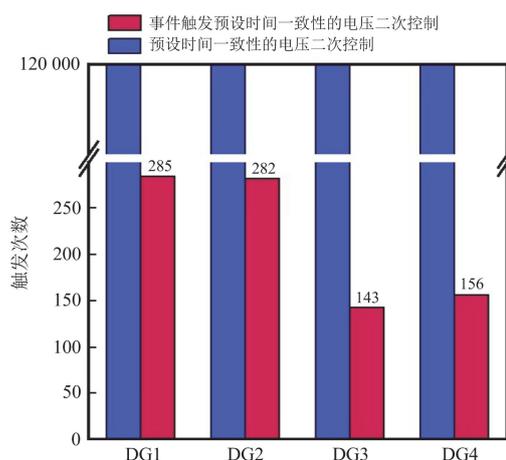


图 9 各 DG 不同控制方案下触发次数

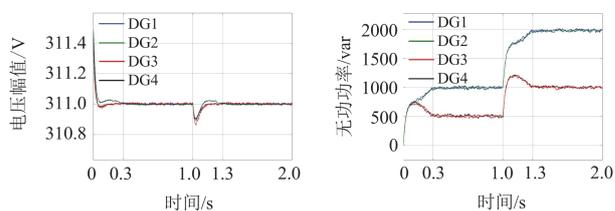
Fig. 9 Trigger times of each DG under different control schemes

仿真验证二: 对定时能力进行验证。

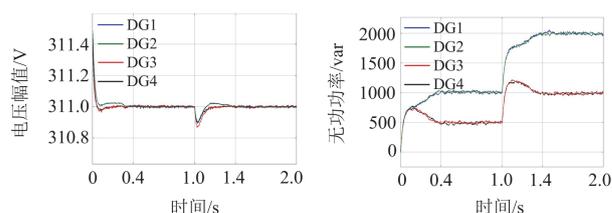
本次仿真测试各台 DG 参数与仿真验证一相同。Load1 全程接入测试系统, Load2 在 1 s 时接入测试系统, 系统恢复时间分别设置为 0.3 s、0.4 s、和 0.5 s, 仿真时间为 2 s。

仿真结果如图 10 所示, 3 次仿真均在预设时间内达到了电压二次控制目标。表 2 为 3 次仿真中各台 DG 的触发次数, 可以看出在不同预设时间情况下各台 DG 的触发次数波动最大的是 DG2 和 DG4(波动值为 9 次), 波动最小的是 DG1(波动次数仅为 4 次), 因此不同预设时间对于各台 DG 触发次数的影响不显著, 与仿真验证一中得到的结果相同的是, DG1 和 DG2 容量为 DG3 和 DG4 的两倍, 各台 DG 触发次数也约为两倍关系, 说明负载大小对于事件触发次数有较大的影响。

仿真验证三: 预设时间一致性与固定时间一致性电压二次控制的对比。



(a) 定时 0.3 s 输出波形



(b) 定时 0.4 s 输出波形

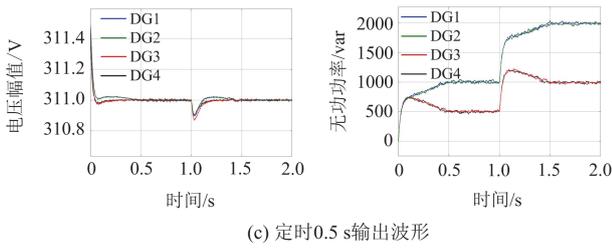


图 10 不同恢复时间下二次控制输出波形
Fig. 10 Secondary control output waveform under different recovery time

表 2 不同恢复时间下各台 DG 触发次数
Table 2 Trigger times of each DG under different recovery time

恢复时间/s	各台 DG 触发次数			
	DG1	DG2	DG3	DG4
0.3	103	109	63	59
0.4	107	105	66	67
0.5	104	100	69	58

本次仿真测试各台 DG 参数与仿真验证一相同。Load1 全程接入测试系统，Load2 在 2 s 时接入测试系统，预设时间一致性的电压二次控制预设时间设定为 0.4 s，仿真时间为 2 s。

固定时间一致性表达式为

$$u_i = \alpha \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) \right)^r + \beta \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) \right)^k \quad (40)$$

式中： α 、 β 为控制增益，取值为正常数； r 、 t 、 k 和 l 为控制参数，取值为正奇数，并且满足 $r > t$ ， $k > l$ 。固定时间一致性的收敛上界 T_{\max} 为

$$T_{\max} = \frac{1}{\lambda_2(L)} \left(\frac{N^{r-t}}{\alpha} \frac{t}{r-t} + \frac{1}{\beta} \frac{k}{k-l} \right) \quad (41)$$

本次仿真测试中固定时间一致性和预设时间一致性采取相同的事件触发机制，有关于固定时间一致性的相关参数如表 3 所示，其余参数均与预设时间一致性方案相同。

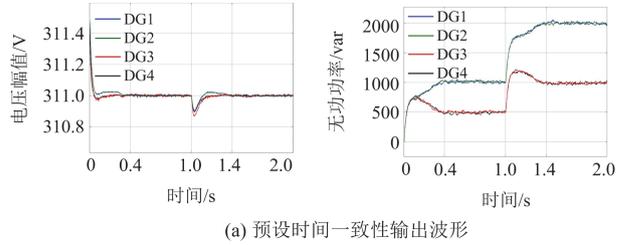
表 3 固定时间一致性相关参数

Table 3 Fixed time consistency related parameters

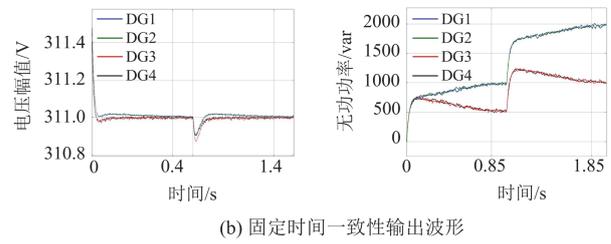
参数	数值	参数	数值
α	3	β	2
r	9	t	7
k	11	l	9

不同控制策略下电压二次控制的仿真结果如图 11 所示，两种控制策略最终都使电压恢复到了额定

值并完成了无功功率按容量分配的目标。固定时间一致性的计算收敛上界为 2.019 s，但实际上其电压恢复时间为 0.8 s，无功功率按容量分配的时间为 0.85 s，其实际恢复时间与计算收敛上界的时间相差较大，这给工程实际应有带来了不便。而预设时间一致性方案则在设定的 0.4 s 内完成了收敛。



(a) 预设时间一致性输出波形



(b) 固定时间一致性输出波形

图 11 不同控制策略下二次控制输出波形

Fig. 11 Secondary control output waveform under different control strategies

本次仿真两种控制策略的触发次数对比如表 4 所示，可以看出在相同的事件触发控制策略下，与固定时间一致性方案相比，预设时间一致性方案的触发次数存在一定差异。其中，差别最大的为 DG1 和 DG3，触发次数相差 14 次；差别最小的为 DG4，触发次数仅相差 4 次，总体来看预设时间一致性触发次数略大，但在恢复性能的大幅提升下，两种控制方案的触发次数并没有显著差异。

表 4 不同控制策略下各台 DG 触发次数

Table 4 Trigger times of each DG under different control strategies

控制策略	各台 DG 触发次数/次			
	DG1	DG2	DG3	DG4
预设时间	107	105	66	67
固定时间	93	97	52	63

仿真验证四：验证功率解耦有效性。

本次仿真测试使用一台额定功率为 1000 W + 1000 var 的 DG 进行测试。用于测试上述 3 个仿真验证中所加入的虚拟阻抗是否达到了功率解耦的作用。线路阻抗和虚拟阻抗与上述实验保持一致，load1 为 1000 W + 1000 var；load2 为 500 W。load1 全程参与，load2 在 1 s 时加入，仿真时长为 2 s。

仿真结果如图 12 所示，可以看出未加入虚拟阻

抗时由于功率耦合情况存在, 导致有功功率的波动使电压产生了跌落情况, 而加入虚拟阻抗后在 1 s 时的有功功率突增并未对电压造成明显影响。

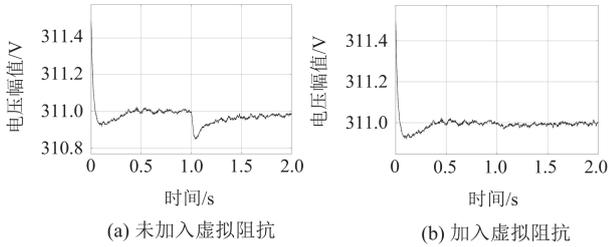


图 12 功率解耦效果图

Fig. 12 Diagram of power decoupling effect

4.2 实验验证

本次实验使用 TMS320F28335 控制器完成采样信号和控制信号的交互, 通过示波器对波形进行观测。本次实验平台由 3 台 DG 并联组成, 实验现场如图 13 所示, 将对所提控制策略即插即用性能以及通信故障情况下控制策略的稳定性进行验证。

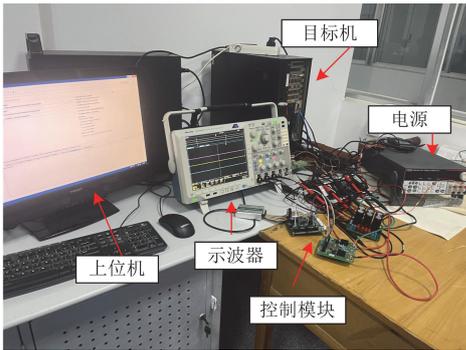


图 13 实验现场图

Fig. 13 Diagram of experimental scene

本次实验 3 台 DG 无功容量分别为 1000、1000、2000 var。DG1 和 DG2 的下垂系数均为 5×10^{-4} , DG3 的下垂系数为 2.5×10^{-4} 。本次实验通信拓扑变化如图 14 所示。具体运行情况为: 在系统稳定运行后, 1 s 时 DG3 由于故障退出运行, 此时负载无功功率仅由 DG1 和 DG2 承担, 3 s 时 DG3 再次并入孤岛微电网系统, 4 s 时 DG1 和 DG2 之间断开通信连接。二次控制恢复时间设定为 0.4 s, 实验总时间为 5 s。

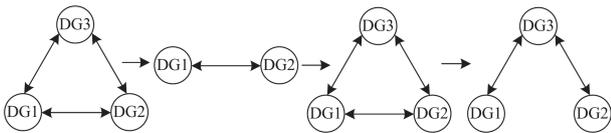


图 14 通信拓扑变化图

Fig. 14 Diagram of communication topology change

根据图 15 的实验结果, 在 DG3 因故障退出孤岛微电网系统后, 其输出无功功率跌落为 0 重新加入后, 各台 DG 都能在预设时间内按照容量分配负载所需无功, 输出电压也可稳定在额定值。4 s 时 DG1 和 DG2 失去通信连接, 系统无功以及电压仅发生微小波动, 孤岛微电网系统中各 DG 在连通情况下不会影响系统正常运行。

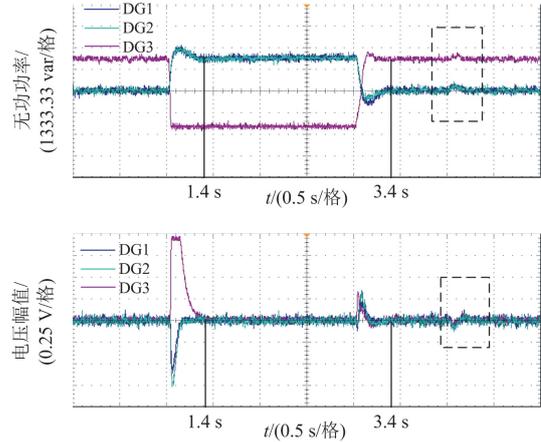


图 15 实验结果图

Fig. 15 Experimental results

5 结论

本文提出了一种基于事件触发预设时间一致性的孤岛微电网电压二次控制方法, 通过仿真和实验验证得到, 相比于固定时间一致性方案, 预设时间一致性具有更好的收敛性能且收敛时间确定。事件触发机制的加入, 在几乎不影响预设时间一致性算法性能的基础上, 能够显著减小各台 DG 之间的通信次数, 减少 99% 以上的通信压力, 使分布式的二次电压控制网络不再依赖高频通信网络。当系统中有 DG 退出以及加入运行或部分通信网络断开但整体通信网络仍然构成连通图时, 本文所提控制策略仍然能够稳定运行。本文从理论上分析了所提控制策略的收敛性, 并排除了芝诺行为出现的可能性。

本文仅考虑了孤岛微电网通信系统稳定情况下的运行问题, 对于通信系统可能出现的通信时延、丢包以及故障问题并未考虑。对于特殊用途下的孤岛微电网系统可能受到的 DoS 网络攻击也未考虑, 下一步将在这两个方面进行进一步研究。

参考文献

[1] 陈春, 万金金, 曹一家, 等. 极端条件下多源配电网主动孤岛研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 1-11.

CHEN Chun, WAN Jinjin, CAO Yijia, et al. Review and outlook on active islanding of multi-source distribution

- networks under extreme conditions[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(5): 1-11.
- [2] 宋昕一, 徐永海, 袁敞, 等. 孤岛直流微电网的多储能 SOC 稳定均衡控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 49-59.
SONG Xinyi, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. Multi-storage SOC stabilization and equalization control strategy for islanded DC microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 49-59.
- [3] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(19): 144-154.
JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 144-154.
- [4] 刘辉, 罗薇, 苏懿, 等. 计及 ROCOF 与转子动能的风电机组自适应下垂控制策略[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 161-169.
LIU Hui, LUO Wei, SU Yi, et al. Adaptive droop control strategy for wind turbines based on ROCOF and rotor kinetic energy[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 161-169.
- [5] 张小莲, 孙啊传, 郝思鹏, 等. 风电场参与电网调频的多机协同控制策略[J]. *发电技术*, 2024, 45(3): 448-457.
ZHANG Xiaolian, SUN Achuan, HAO Sipeng, et al. Multi-machine cooperative control strategy of wind farm participating in power grid frequency modulation[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(3): 448-457.
- [6] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 336-349.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 336-349.
- [7] 陈智勇, 董新伟, 李传辉, 等. 基于相位与幅值补偿的虚拟同步发电机低电压穿越控制[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 42-51.
CHEN Zhiyong, DONG Xinwei, LI Chuanhui, et al. Low voltage ride-through control of virtual synchronous generator based on phase and amplitude compensation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 42-51.
- [8] 张英敏, 张婉欣, 李保宏, 等. 基于光储联合系统的电网分段恢复策略[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 26-35.
ZHANG Yingmin, ZHANG Wanxin, LI Baohong, et al. Segmentation restoration strategy of power grid based on combined optical storage system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 26-35.
- [9] ZHANG Mingyue, HAN Yang, LIU Yuxiang, et al. Multi-timescale modeling and dynamic stability analysis for sustainable microgrids: state-of-the-art and perspectives[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(3): 1-35.
- [10] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [11] HU Jiefeng, SHAN Yinghao, CHENG K W, et al. Overview of power converter control in microgrids-challenges, advances, and future trends[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(8): 9907-9922.
- [12] 王自力, 陈燕东, 李雪萍, 等. 孤岛微电网多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(7): 12-23.
WANG Zili, CHEN Yandong, LI Xueping, et al. Coordinated control strategy for frequency deviation-free regulation of multiple VSGs in an island microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(7): 12-23.
- [13] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2013, 7(8): 822-831.
- [14] LIU Jiayi, LI Jiaqi, SONG Huihui, et al. Nonlinear secondary voltage control of islanded microgrid via distributed consistency[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(4): 1964-1972.
- [15] MOHIUDDIN S M, QI Junjian. Optimal distributed control of AC microgrids with coordinated voltage regulation and reactive power sharing[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1789-1800.
- [16] LU Xiaoping, YU Xinghuo, LAI Jingang, et al. A novel distributed secondary coordination control approach for islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(4): 2726-2740.
- [17] 曹晓, 李泽, 崔国增. 孤岛微电网固定时间分布式鲁棒二次控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 143-153.
CAO Xiao, LI Ze, CUI Guozeng. Distributed robust fixed-time secondary control of islanded microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 143-153.
- [18] NI Junkang, CAO Hui, LIU Xinghua, et al. Fixed-time leader-follower consensus based secondary voltage control for microgrid under directed communication graph[C] // 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), July 15-19, 2021, Xining, China: 566-571.
- [19] CAI Yong, XIE Guangming, LIU Huiyang. Reaching

- consensus at a preset time: single-integrator dynamics case[C] // Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, July 25-27, 2012, Hefei, China: 6220-6225.
- [20] NING Boda, HAN Qinglong, ZUO Zongyu, et al. Fixed-time and prescribed-time consensus control of multiagent systems and its applications: a survey of recent trends and methodologies[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 19(2): 1121-1135.
- [21] LIAN Zhijie, DENG Chao, WEN Changyun, et al. Distributed event-triggered control for frequency restoration and active power allocation in microgrids with varying communication time delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(9): 8367-8378.
- [22] 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.
- [23] CHEN Xia, HAO Fei, RAHMANI A. Asynchronous decentralised event-triggered control of multi-agent systems[J]. International Journal of Control, 2014, 87(10): 2130-2139.
- [24] 于永进, 吴健鹏, 孙国强, 等. 基于固定时间一致性算法的孤岛微电网事件触发二次频率控制[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 112-120.
YU Yongjin, WU Jianpeng, SUN Guoqiang, et al. Event-triggered secondary frequency control based on fixed-time consensus algorithm for islanded microgrid[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 43(2): 112-120.
- [25] QIAN Tong, LIU Yang, ZHANG Wenhui, et al. Event-triggered updating method in centralized and distributed secondary controls for islanded microgrid restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 1387-1395.
- [26] 李斌, 周林, 余希瑞, 等. 基于改进虚拟同步发电机算法的微网逆变器二次调频方案[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2680-2687.
LI Bin, ZHOU Lin, YU Xirui, et al. Secondary frequency regulation for microgrid inverters based on improving virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2680-2687.
- [27] XU Chengjie, XU Haichuan, SU Housheng, et al. Disturbance-observer based consensus of linear multi-agent systems with exogenous disturbance under intermittent communication[J]. Neurocomputing, 2020, 404: 26-33.
- [28] NING Boda, HAN Qinglong, ZUO Zongyu. Practical fixed-time consensus for integrator-type multi-agent systems: a time base generator approach[J]. Automatica, 2019, 105: 406-414.
- [29] GARCIA E, CAO Yongcan, YU Han, et al. Decentralised event-triggered cooperative control with limited communication[J]. International Journal of Control, 2013, 86(9): 1479-1488.
- [30] 刘欣, 郭志博, 贾焦心, 等. 基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4130-4146.
LIU Xin, GUO Zhibo, JIA Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146.

收稿日期: 2025-01-06; 修回日期: 2025-05-14

作者简介:

贾浩洋(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网分布式控制与稳定运行; E-mail: jjhhhaaz@163.com

李斌(1987—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网发电、微电网构架与控制。E-mail: libin@hpu.edu.com

(编辑 张颖)