

基于固定时间一致性算法的孤岛微电网 分布式容错二次控制策略

陆瑶¹, 王杰¹, 王子强¹, 李鹏瀚², 姚钢¹, 刘辉³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710049; 3. 上海动力储能电池系统工程技术有限公司, 上海 200241)

摘要:随着微电网信息侧和物理侧的耦合日益紧密, 软件密集型控制器和电力电子设备的大规模应用增加了微电网遭受攻击和故障的可能性, 从而影响微电网的稳定运行。为此, 针对孤岛交流微电网控制通道中潜在的执行器故障和传感器故障, 提出了一种基于固定时间一致性算法的分布式容错二次控制策略。首先, 建立了同时计及执行器故障和传感器故障的下垂控制模型。其次, 分别设计了上层分布式一致性控制算法和下层本地容错控制算法, 分析了控制器对未知故障的抑制机理, 从理论上证明了所提分布式容错二次控制策略的固定时间收敛特性, 并进一步观测了传感器故障信号的波形。最后, 算例仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 孤岛微电网; 分布式容错控制; 执行器故障; 传感器故障; 固定时间一致性

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202205016

0 引言

微电网是解决分布式可再生能源消纳问题的有效途径, 分为并网和孤岛2种运行模式^[1]。孤岛模式下的微电网与主电网断开, 完全依靠分布式电源DG (Distributed Generation)、储能装置和可控负荷的协同控制来保证区域内的负荷需求, 目前广泛应用于航空、汽车、船舶以及大电网无法覆盖的偏远地区^[2]。

由于失去主电网的支撑, 孤岛微电网动态特性易受扰动影响, 通常采用分层控制结构在不同时间尺度上进行多目标控制^[3]。一次控制层基于下垂控制策略, 通过本地控制器快速响应, 是一种有差调节。为提高控制精度, 引入二次控制层以消除一次控制产生的频率、电压偏差和功率分配误差^[4]。分布式二次控制利用稀疏通信网络实现各DG的协同控制, 相比于通信网络复杂的集中式二次控制和无法实现全局协调的分散式二次控制, 具有通信成本低、可靠性强、扩展性好等优点, 是目前应用较广的二次控制方式^[5]。

信息物理系统的可靠性是微电网分布式二次控制的基础。随着微电网信息侧和物理侧的深度融合, 软件密集型控制器和电力电子设备的大规模应用增加了微电网遭受攻击和故障的可能性^[6]。由于微电网信息物理系统的特殊性, 攻击者在窃取信息

获取经济利益之外, 更注重引起更大规模的故障和扰动, 从而造成电力供应中断等大型事故^[7]。控制系统中执行器、传感器等重要结构便可能遭受攻击, 引发严重故障。执行器故障和传感器故障分别干扰控制器的输出指令和输入信息, 导致控制目标无法实现, 严重破坏孤岛微电网的稳定运行及安全可靠^[8]。因此研究有效抵御执行器故障和传感器故障的分布式二次控制策略具有重要意义。

针对微电网控制通道中潜在的执行器故障和传感器故障, 已有部分文献提出了分布式容错二次控制策略, 以保证微电网在故障条件下仍能在可容许的性能范围内运行^[9-14]。根据容错控制理论, 执行器和传感器故障模型包括部分失效故障项和偏置故障项, 前者表示系统控制策略的失效程度, 后者表示系统控制通道被注入的错误数据或遭受的扰动^[9]。文献[9-12]忽略部分失效故障项, 仅针对偏置故障项对微电网容错二次控制问题进行研究。文献[9]同时考虑执行器故障和传感器故障, 在所提自适应一致性策略的作用下, 实现了孤岛交流微电网频率和电压的恢复。文献[10]基于微电网反馈线性化模型, 设计了一种分布式 H_∞ 控制算法补偿执行器故障和传感器故障。文献[11]针对孤岛微电网中执行器和传感器所受到的错误数据注入攻击, 提出了一种基于局部信息观测器的分布式二次控制算法。文献[12]将执行器故障看成扰动项, 提出了一种基于自适应积分滑模的分布式控制策略以实现未知扰动的动态补偿。然而, 在实际微电网控制系统中, 部分失效故障项不能忽略, 当该项数值较小时, 控制策略几乎完全失效。针对这个问题, 文献[13]共同考虑了执行器故障的部分失效故障项和偏置故障项, 提

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2022-03-14

在线出版日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077135)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077135)

出了一种基于滑模控制的容错二次控制算法。文献[14]在时变通信拓扑下,提出了一种容错一致性算法补偿微电网执行器部分失效故障和偏置故障。但文献[13-14]均未考虑传感器故障对孤岛交流微电网二次控制的影响。因此,同时讨论执行器故障和传感器故障,且在故障模型中综合考虑部分失效故障和偏置故障的孤岛交流微电网容错二次控制问题值得被进一步研究。

此外,随着微电网规模的扩大,收敛性能成为控制算法实用性的一个重要指标^[15]。近年来,微电网分布式二次控制所采用的一致性算法从渐近一致性、有限时间一致性发展到固定时间一致性。有限时间一致性算法具有较快的收敛速度^[15],但其收敛时间上限与系统初始状态有关,在实际应用中由于无法提前获取微电网的初始状态而存在局限性^[16]。固定时间一致性算法的优势在于收敛时间上限与初始状态无关,目前在微电网分布式二次控制领域已有一定的应用。文献[17]提出了一种基于滑模控制的固定时间一致性控制算法实现微电网电压的恢复和无功功率的准确分配。文献[18]针对直流微电网,提出了一种基于动态平均一致性的分布式固定时间二次控制方案。在微电网分布式容错二次控制领域,以文献[9-14]为代表的容错二次控制策略均为有限时间收敛,当微电网初始状态或故障扰动未知时,难以满足收敛时间的要求。而固定时间收敛加快了收敛速度,提高了微电网的电能质量。因此,基于固定时间一致性的微电网容错二次控制策略也应被进一步研究。

针对孤岛交流微电网控制通道中潜在的执行器故障和传感器故障,本文提出了一种基于分层结构的分布式固定时间容错二次控制策略。该策略考虑部分失效故障项和偏置故障项对执行器故障进行建模,无需提前获取故障信息,通过设计上层分布式一致性控制算法和下层本地容错控制算法,有效避免了单个DG故障在微电网的传播,在故障条件下实现了频率、电压的恢复和功率按照容量的精确分配;设计观测器对传感器故障信号进行波形观测,有利于后续故障处理方案的生成;具有固定时间收敛特性,保证了收敛时间上界与微电网初始状态无关。理论分析和仿真实验均验证了所提控制策略的有效性。

1 微电网分布式容错二次控制建模

1.1 通信网络图论基本知识

基于多智能体分布式一致性理论,孤岛交流微电网中的每个DG可视作一个智能体,为通信网络中的一个节点。 N 个节点构成的通信拓扑图可用有向图 $G=(V_c, E_c, A_c)$ 表示。其中节点集 $V_c=(1,$

$2, \dots, N)^T$; 边集 $E_c \subset V_c \times V_c^T$; 拓扑连接矩阵 $A_c=(a_{ij})_{N \times N}$, $a_{ij} \in \mathbf{R}$, 如果信息能从节点 i 传递到节点 j , 则 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。节点 i 的相邻节点集合表示为 $N_i^+ = \{j \in V_c | (j, i) \in E_c\}$ 。Laplacian 矩阵表示为 $L = \Delta - A$, 其中 $\Delta = \text{diag}(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$, $\Delta_i = \sum_{j \in N_i^+} a_{ij}$ 。若通信拓扑图

G 中的任意节点 i 都能找到一条路径到达节点 j , 则该拓扑图为连通图。在通信网络设置虚拟领导节点, 则该节点与 N 个跟随节点进行信息交互的连接矩阵可以表示为 $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_N)$, 如果节点 i 可以接收到虚拟领导节点的信息, 则 $b_i > 0$, 否则 $b_i = 0$ 。本文假设孤岛交流微电网的通信拓扑图为连通图。

1.2 分布式容错二次控制架构和目标

基于三相电压型逆变器的孤岛交流微电网分层控制结构如图1所示, 直流侧并联了一个滤波电容以输出稳定的电压, 交流侧经 LCL 滤波器和输出连接阻抗 $R_{ci} + jX_{ci}$ 接至微电网。三相电压信号 v_{oi}^{abc} 、电流信号 i_{oi}^{abc} 经过功率控制环得到电压参考信号 v_{oi}^{dq*} 输入电压控制环, 然后得到电流参考信号 i_{oi}^{dq*} , 与电感电流 i_{Li}^{dq} 共同参与电流内环控制, 最后生成脉冲宽度调制信号驱动逆变器。

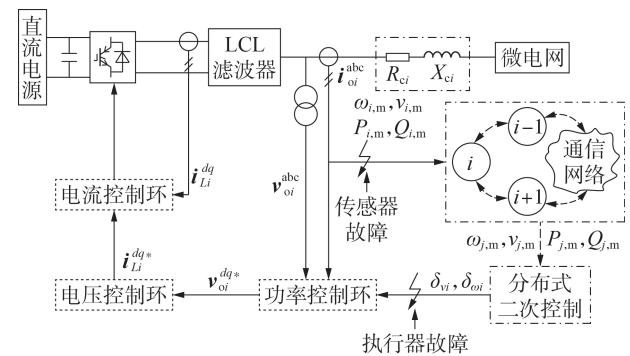


图1 孤岛交流微电网分层控制结构

Fig.1 Hierarchical control of islanded AC microgrid

以孤岛交流微电网中第 i 个 DG (DG_i) 为例, 动态下垂特性表达式为:

$$\begin{cases} \omega_i^* = \omega_0 - m_{P_i}(P_i - P_0) \\ v_i^* = v_0 - m_{Q_i}(Q_i - Q_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_0 和 v_0 分别为 DG_i 逆变器输出的角频率和电压幅值的额定值; P_0 和 Q_0 分别为 DG_i 逆变器输出的有功功率和无功功率的额定值; ω_i^* 和 v_i^* 分别为 DG_i 逆变器输出的角频率和电压幅值的参考值; P_i 和 Q_i 分别为 DG_i 逆变器输出的有功功率和无功功率; m_{P_i} 和 m_{Q_i} 分别为有功和无功功率的下垂系数。

下垂控制是一种有差调节, 存在电压和频率的偏差, 因此需要二次控制实现准确的电压和频率跟

踪,并按照容量进行功率分配。为实现这一目标,在下垂控制表达式(1)中加入二次控制修正项:

$$\begin{cases} \omega_i^* = \omega_0 - m_{P_i} P_i + m_{P_i} \hat{P}_i + \delta_{\omega i} \\ v_i^* = v_0 - m_{Q_i} Q_i + m_{Q_i} \hat{Q}_i + \delta_{v i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\hat{P}_i$ 和 $\hat{Q}_i$ 分别为有功功率和无功功率的估计值,具体表达式将在2.1.2节中给出; $\delta_{\omega i}$ 和 $\delta_{v i}$ 为二次控制得到的修正项。对式(2)两边求导,可得:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i^* = \dot{\delta}_{\omega i} - m_{P_i} \dot{P}_i + m_{P_i} \dot{\hat{P}}_i = u_{\omega i} \\ \dot{v}_i^* = \dot{\delta}_{v i} - m_{Q_i} \dot{Q}_i + m_{Q_i} \dot{\hat{Q}}_i = u_{v i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_{\omega i}$ 和 $u_{v i}$ 为二次控制的虚拟控制输入。

定义有功功率比例 $\chi_{P_i} = m_{P_i} P_i$ 和无功功率比例 $\chi_{Q_i} = m_{Q_i} Q_i$ 。为实现微电网实际功率对功率估计值的跟踪,定义有功控制输入 u_{P_i} 和无功控制输入 u_{Q_i} 分别满足:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\chi}}_{P_i} = u_{P_i} \\ \dot{\tilde{\chi}}_{Q_i} = u_{Q_i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\tilde{\chi}_{P_i} = \chi_{P_i} - \hat{\chi}_{P_i}$, $\tilde{\chi}_{Q_i} = \chi_{Q_i} - \hat{\chi}_{Q_i}$ 为功率跟踪误差; $\hat{\chi}_{P_i} = m_{P_i} \hat{P}_i$, $\hat{\chi}_{Q_i} = m_{Q_i} \hat{Q}_i$ 为功率比例估计。

随着微电网软件密集型控制器和电力电子设备的大规模应用,控制通道中潜在的执行器故障和传感器故障发生概率增加,给二次控制带来挑战。执行器故障发生在微电网软件密集型控制器向实际物理系统输入控制指令的过程。若同时考虑部分失效故障项和偏置故障项,执行器故障模型表示为:

$$\begin{cases} u_{\omega i}^F = \rho_{\omega i} u_{\omega i} + \phi_{\omega i}, & u_{P_i}^F = \rho_{P_i} u_{P_i} + \phi_{P_i} \\ u_{v i}^F = \rho_{v i} u_{v i} + \phi_{v i}, & u_{Q_i}^F = \rho_{Q_i} u_{Q_i} + \phi_{Q_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_{\omega i}^F$, $u_{v i}^F$, $u_{P_i}^F$, $u_{Q_i}^F$ 为发生执行器故障后的控制输入; $\rho_{\omega i}$, $\rho_{v i}$, ρ_{P_i} , $\rho_{Q_i} \in [0, 1]$ 为部分失效故障因子项,表示控制输入的失效程度; $\phi_{\omega i}$, $\phi_{v i}$, ϕ_{P_i} , ϕ_{Q_i} 为偏置故障项。

传感器故障发生在传感器对实际物理系统采样并向控制器传递信号的过程,对测量或传输物理量注入干扰,破坏控制器输入信息的可靠性。发生传感器故障后的测量物理量模型表示为:

$$\begin{cases} \omega_{i, m} = \omega_i + \phi_{\omega i, m}, & P_{i, m} = P_i + \phi_{P_i, m} \\ v_{i, m} = v_i + \phi_{v i, m}, & Q_{i, m} = Q_i + \phi_{Q_i, m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_i 和 v_i 分别为DG_i逆变器输出角频率和电压幅值; $\omega_{i, m}$, $v_{i, m}$, $P_{i, m}$, $Q_{i, m}$ 为发生传感器故障后的测量物理量; $\phi_{\omega i, m}$, $\phi_{v i, m}$, $\phi_{P_i, m}$, $\phi_{Q_i, m}$ 为偏置故障项。

根据实际微电网故障信息未知的特点,给出如下假设:上述执行器故障和传感器故障的部分控制失效故障因子、偏置故障及其导数均有界,但该界限大小未知。综合上述讨论,共同考虑执行器故障和传感器故障,将式(4)代入式(3),并对式(3)积分,得到孤岛交流微电网二次控制修正项如下:

$$\begin{cases} \delta_{\omega i} = \int u_{\omega i}^F dt + \int u_{P_i}^F dt \\ \delta_{v i} = \int u_{v i}^F dt + \int u_{Q_i}^F dt \end{cases} \quad (7)$$

式中: t 为时间。因此,如图1所示,本文设计的分布式二次控制在接收未知执行器发出的故障信号后,通过积分得到二次控制修正项,输入功率控制环。为保证故障存在情况下微电网二次控制的性能,本文设计的分布式容错二次控制框架分为2层:上层将设计固定时间一致收敛的分布式电压、角频率、有功功率和无功功率的控制器,实现对电压幅值和角频率额定值的跟踪,以及有功功率和无功功率比例的一致性分配,并有效应对负荷变化;基于上层的分布式控制结果,下层将设计本地容错二次控制算法,无需提前获取故障信息,在固定时间内保证 ω_i^* 和 v_i^* 跟踪上层角频率和电压幅值的估计值, χ_{P_i} 和 χ_{Q_i} 跟踪上层有功功率比例和无功功率比例的一致性结果。

上述控制目标在固定时间内收敛,意味着存在 $0 < \varepsilon_{\hat{\omega}}, \varepsilon_{\hat{v}}, \varepsilon_{\hat{P}}, \varepsilon_{\hat{Q}}, \varepsilon_{\omega}, \varepsilon_v, \varepsilon_P, \varepsilon_Q \ll 1$,使以下不等式成立:

$$\begin{cases} |\hat{\omega}_i - \omega_0| \leq \varepsilon_{\hat{\omega}} & \forall t \geq T_{\hat{\omega}}, & |\hat{\chi}_{P_i} - \bar{\chi}_P| \leq \varepsilon_{\hat{P}} & \forall t \geq T_{\hat{P}} \\ |\hat{v}_i - v_0| \leq \varepsilon_{\hat{v}} & \forall t \geq T_{\hat{v}}, & |\hat{\chi}_{Q_i} - \bar{\chi}_Q| \leq \varepsilon_{\hat{Q}} & \forall t \geq T_{\hat{Q}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} |\omega_i^* - \hat{\omega}_i| \leq \varepsilon_{\omega} & \forall t \geq T_{\omega}, & |\chi_{P_i} - \hat{\chi}_{P_i}| \leq \varepsilon_P & \forall t \geq T_{P_i} \\ |v_i^* - \hat{v}_i| \leq \varepsilon_v & \forall t \geq T_v, & |\chi_{Q_i} - \hat{\chi}_{Q_i}| \leq \varepsilon_Q & \forall t \geq T_{Q_i} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{\omega}_i$ 和 $\hat{v}_i$ 分别为DG_i角频率和电压的估计值; $\bar{\chi}_P$ 和 $\bar{\chi}_Q$ 分别为有功功率比例和无功功率比例的平均值; $T_{\hat{\omega}}, T_{\hat{v}}, T_{\hat{P}}, T_{\hat{Q}}, T_{\omega}, T_v, T_{P_i}, T_{Q_i}$ 为固定收敛时间。

2 基于分层结构的分布式固定时间容错二次控制

基于分层结构的分布式固定时间容错二次控制策略包含上层的分布式一致性控制和下层的本地容错控制。该结构能够有效避免单个DG的故障在通信网络中的传播,将故障的影响范围限定在本地。

2.1 上层分布式一致性控制器

上层虚拟系统基于稀疏的通信网络与相邻DG进行信息交流。该层包含角频率、电压、功率的分布式一致性控制器。

首先给出固定时间控制相关引理用于后续定理的证明。引理1^[19]:如果存在一个函数 $V(x(t))$,满足不等式 $\dot{V}(x(t)) \leq -\alpha V^p - \beta V^q + l$,其中 $\alpha > 0, \beta > 0, l > 0, 0 < p < 1, q > 1$,则 $x(t)$ 在固定时间 T_f 内收敛于残差集:

$$\left\{ \lim_{t \rightarrow T_f} x(t) \mid V(x(t)) \leq \min \left\{ l^{\frac{1}{p}} (\alpha - \theta \alpha)^{-\frac{1}{p}}, l^{\frac{1}{q}} (\beta - \theta \beta)^{-\frac{1}{q}} \right\} \right\} \quad (10)$$

式中: $0 < \theta < 1$ 。固定时间 T_f 满足:

$$T_f \leq T_{f \max} = \left[\alpha \theta (1-p) \right]^{-1} + \left[\beta \theta (q-1) \right]^{-1} \quad (11)$$

式中: $T_{\max}$ 为 T_i 的上限值。

2.1.1 角频率和电压的分布式控制器

以 DG_i 为例, 根据引理 1, 设计角频率分布式控制器如下:

$$\dot{\hat{\omega}}_i = l_{1\omega} \text{sig}(e_{\hat{\omega}_i})^{p_\omega} + l_{2\omega} \text{sig}(e_{\hat{\omega}_i})^{q_\omega} \quad (12)$$

式中: $e_{\hat{\omega}_i} = \sum_{j=1}^N [a_{ij}(\hat{\omega}_j - \hat{\omega}_i) + b_i(\omega_0 - \hat{\omega}_i)]$ 为角频率分布式控制跟踪误差; $\text{sig}(x)^k = |x|^k \text{sgn}(x)$, $k, x \in \mathbf{R}$, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $l_{1\omega}, l_{2\omega} > 0$; $0 < p_\omega < 1$; $q_\omega > 1$ 。

定理 1: 定理 1 的证明过程见附录 A。式 (12) 所示角频率分布式控制器的估计值 $\hat{\omega}_i$ 能够在固定时间 $T_{\hat{\omega}_i}$ 内以完全分布的方式跟踪角频率额定参考值 ω_0 。其中固定时间 $T_{\hat{\omega}_i}$ 满足:

$$T_{\hat{\omega}_i} \leq T_{\hat{\omega}_i, \max} = \left[2^{\frac{p_\omega-1}{2}} l_{1\omega} \lambda_{\min}(\mathbf{K}) (1-p_\omega) \right]^{-1} + \left[2^{\frac{q_\omega-1}{2}} l_{2\omega} \lambda_{\min}(\mathbf{K}) (q_\omega-1) \right]^{-1} \quad (13)$$

式中: $T_{\hat{\omega}_i, \max}$ 为 $T_{\hat{\omega}_i}$ 的上限值; $\lambda_{\min}(\mathbf{K})$ 为矩阵 $\mathbf{K}$ 的最小特征值, $\mathbf{K} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$ 。由固定时间 $T_{\hat{\omega}_i}$ 表达式可知, 在通信网络拓扑不变的前提下, 主要影响控制性能的参数是 $l_{1\omega}$ 和 $l_{2\omega}$, 选取较大的 $l_{1\omega}$ 和 $l_{2\omega}$ 可以提高角频率估计值跟踪额定值的速度, 但随之也放大了 $\text{sig}(x)^k$ 函数带来的抖振。

电压分布式控制器可以类比式 (12) 所示角频率分布式控制器进行设计。

2.1.2 有功功率和无功功率的分布式控制器

为实现有功功率比例的一致性控制, 并有效应对负荷变化, 设计 DG_i 的有功功率分布式控制器如下:

$$\dot{\hat{\chi}}_{P_i} = \varepsilon_{1P} s_{P_i} + l_{1P} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(\hat{\chi}_{P_j} - \hat{\chi}_{P_i})^{\frac{p'_P}{q'_P}} + l_{2P} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(\hat{\chi}_{P_j} - \hat{\chi}_{P_i})^{2-\frac{p'_P}{q'_P}} \quad (14)$$

$$\dot{s}_{P_i} = l_{1s} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(s_{P_j} - s_{P_i})^{\frac{p'_s}{q'_s}} + l_{2s} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(s_{P_j} - s_{P_i})^{2-\frac{p'_s}{q'_s}} +$$

$$k_{P_s} \sum_{j=1}^N a_{ij} (s_{P_j} - s_{P_i}) + \varepsilon_{2P} \left(\Delta P_{Li} \delta(t - t_p) - \frac{\Delta \hat{\chi}_{P_i}}{m_{P_i}} \right) \quad (15)$$

式中: s_{P_i} 为观测负荷变化的虚拟变量, $s_{P_i}(0) = 0$; $0 < p' < 1$, $q' > 1$; $l_{1P}, l_{2P} > 0$; $0 < \varepsilon_{1P}, \varepsilon_{2P} \ll 1$; $k_{P_s} \geq \frac{(l_{1P}^2 + l_{2P}^2) \varepsilon_{2P}^2}{2m_{P_i, \min}^2}$,

$m_{P_i, \min}$ 为 m_{P_i} 的最小值; ΔP_{Li} 为 t_p 时刻 DG_i 对应的本地负荷变化量, 只参与 DG_i 的控制, 由本地智能电表基础建设 AMI (Advanced Metering Infrastructure) 获取; $\delta(t - t_p)$ 为冲激函数; $\Delta \hat{\chi}_{P_i} = \hat{\chi}_{P_i} - \hat{\chi}_{P_i}(t_p)$; $l_{1s}, l_{2s} > 0$ 。

定理 2: 定理 2 的证明过程见附录 B。式 (14)、

(15) 所示有功功率分布式控制器能够在固定时间 $T_{\hat{P}_i}$ 内以完全分布式的方式实现虚拟有功功率比例 $\hat{\chi}_{P_i}$ 的一致性, 且有效应对负荷变化。其中固定时间 $T_{\hat{P}_i}$ 满足:

$$T_{\hat{P}_i} \leq T_{\hat{P}_i, \max} = q' \left[2^{p'-1} l_{1, \min} K_1^{\frac{p'+q'}{2q'}} (q'-p') \right]^{-1} + q' \left[2^{\frac{q'-p'}{2q'}} l_{2, \min} N^{\frac{p'-q'}{q'}} K_2^{\frac{3q'-p'}{2q'}} (q'-p') \right]^{-1} \quad (16)$$

式中: $T_{\hat{P}_i, \max}$ 为 $T_{\hat{P}_i}$ 的上限值; $l_{1, \min} = \min\{l_{1P}, l_{1s}\}$, $l_{2, \min} = \min\{l_{2P}, l_{2s}\}$; 由附录 B 引理 B1 可知, K_1 和 K_2 分别为 Laplacian 矩阵 $\hat{\mathbf{L}}_1 = (a_{ij}^{2q'/(p'+q')}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 和 $\hat{\mathbf{L}}_2 = (a_{ij}^{2q'/(3q'-p')}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 的最小非零特征值。

上层有功功率分布式控制器引入了虚拟变量 s_{P_i} , 保证了系统对负荷变化的鲁棒性。同时, 该功率控制器具有固定时间收敛特性, 在通信网络拓扑不变的前提下, 影响固定时间上限 $T_{\hat{P}_i, \max}$ 的参数主要是 $l_{1, \min}$ 和 $l_{2, \min}$ 。

同理, 上层无功功率分布式控制器可以类比有功功率分布式控制器进行设计。

2.2 下层本地容错二次控制策略

基于上层的分布式控制结果, 本节将在执行器故障和传感器故障共同存在条件下, 设计角频率、电压、有功功率和无功功率的本地容错二次控制策略跟踪上层。

为实现本地频率容错二次控制, 定义角频率跟踪误差 $e_{\omega i} = \omega_i^* - \hat{\omega}_i$, 对 $e_{\omega i}$ 求导得:

$$\dot{e}_{\omega i} = \rho_{\omega i} u_{\omega i} + \psi_{\omega i} \quad (17)$$

式中: $\rho_{\omega i}$ 为控制失效因子, 满足 $\rho_{\omega i} \geq \underline{\rho}_{\omega i} > 0$, $\underline{\rho}_{\omega i}$ 为其下限值; $\psi_{\omega i} = \phi_{\omega i} - \dot{\hat{\omega}}_i$, 满足 $|\psi_{\omega i}| \leq \bar{\psi}_{\omega i} \in \mathbf{R}^+$, $\bar{\psi}_{\omega i}$ 为其绝对值的上限值。

设计 DG_i 的角频率容错二次控制为:

$$u_{\omega i} = -\frac{e_{\omega i} \hat{\kappa}_{\omega i}^2 \bar{u}_{\omega i}^2}{\sqrt{e_{\omega i}^2 \hat{\kappa}_{\omega i}^2 \bar{u}_{\omega i}^2 + \varepsilon_{\omega}^2}} \quad (18)$$

式中: $\hat{\kappa}_{\omega i}$ 为 $\kappa_{\omega i}$ 的估计值, $\kappa_{\omega i} = 1/\underline{\rho}_{\omega i}$; $\varepsilon_{\omega} > 0$; 辅助变量 $\bar{u}_{\omega i}$ 设计为式 (19)。

$$\bar{u}_{\omega i} = m_{1\omega} |e_{\omega i}|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(e_{\omega i}) + m_{2\omega} e_{\omega i}^3 + \frac{\hat{\psi}_{\omega i} e_{\omega i}}{\sqrt{e_{\omega i}^2 + \varepsilon_{\omega}^2}} \quad (19)$$

式中: $\hat{\psi}_{\omega i}$ 为 $\bar{\psi}_{\omega i}$ 的估计值; $m_{1\omega}, m_{2\omega} > 0$ 。

为实现对执行器故障相关项 $\kappa_{\omega i}$ 、 $\bar{\psi}_{\omega i}$ 和传感器故障 $\phi_{\omega i, m}$ 的自适应控制, 设计相应补偿器如下:

$$\dot{\hat{\kappa}}_{\omega i} = -\sigma_{\kappa_{\omega i}} \left(\hat{\kappa}_{\omega i} + \frac{\hat{\kappa}_{\omega i}^3}{n_{\kappa_{\omega i}}} \right) + n_{\kappa_{\omega i}} e_{\omega i} \bar{u}_{\omega i} \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\psi}}_{\omega i} = -\sigma_{\psi_{\omega i}} \left(\hat{\psi}_{\omega i} + \frac{\hat{\psi}_{\omega i}^3}{n_{\psi_{\omega i}}} \right) + n_{\psi_{\omega i}} \frac{e_{\omega i}^2}{\sqrt{e_{\omega i}^2 + \varepsilon_{\omega}^2}} \quad (21)$$

$$\dot{\hat{\phi}}_{\omega i, m} = \sigma_{\omega, m} \left(e_{\omega i, m}^{\frac{1}{3}} + e_{\omega i, m}^3 + e_{\omega i, m} \right) \quad (22)$$

式中: $\hat{\phi}_{\omega i, m}$ 为 $\phi_{\omega i, m}$ 的估计值; 频率测量值的跟踪误差 $e_{\omega i, m} = \omega_{i, m} - (\omega_i^* + \hat{\phi}_{\omega i, m})$; $\sigma_{\kappa_{\omega}}, n_{\kappa_{\omega}}, \sigma_{\psi_{\omega}}, n_{\psi_{\omega}} > 0$; $\sigma_{\omega, m} > 2$ 。

定理 3: 定理 3 的证明过程见附录 C。式 (18) — (22) 所示频率容错二次控制能够使频率本地跟踪误差 $\lim_{t \rightarrow T_{\omega f}} e_{\omega i} \in \Omega_{\omega i}$ 和传感器故障估计误差 $\lim_{t \rightarrow T_{\omega f \phi}} \tilde{\phi}_{\omega i, m} = \lim_{t \rightarrow T_{\omega f \phi}} \left\{ \phi_{\omega i, m} - \hat{\phi}_{\omega i, m} \right\} \in \Omega_{\omega i, \phi}$ 。存在如下约束条件:

$$T_{\omega f} \leq T_{\omega f, \max} = 8m_{1\omega, \min}^{-1} + 2m_{2\omega, \min}^{-1} \quad (23)$$

$$\Omega_{\omega i} = \left\{ e_{\omega i} \mid |e_{\omega i}| \leq \sqrt{2 \min \left\{ \left(2c_{\omega} m_{1\omega, \min} \right)^{-\frac{4}{3}}, \left(2c_{\omega} m_{2\omega, \min} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\}} \right\} \quad (24)$$

$$T_{\omega f \phi} \leq T_{\omega f \phi, \max} = 3 \left(2^{\frac{1}{3}} \sigma_{\omega, m}^{-1} \right) + 2^{-1} \sigma_{\omega, m}^{-1} \quad (25)$$

$$\Omega_{\omega i, \phi} = \left\{ \tilde{\phi}_{\omega i, m} \mid |\tilde{\phi}_{\omega i, m}| \leq \min \left\{ \left| \dot{\phi}_{\omega i, m} \right|^{\frac{3}{2}} \sigma_{\omega, m}^{-\frac{3}{4}}, \left| \dot{\phi}_{\omega i, m} \right|^{\frac{1}{2}} \sigma_{\omega, m}^{-\frac{1}{4}} \right\} \right\} \quad (26)$$

式中: $T_{\omega f \phi, \max}$ 为 $T_{\omega f \phi}$ 的上限值; $m_{1\omega, \min} = \min \left\{ 2^{\frac{3}{4}} m_{1\omega}, \right.$

$$\left. \sigma_{\kappa_{\omega}, 1} \rho_{\omega i}^{\frac{4}{3}}, \sigma_{\psi_{\omega}, 1} \right\}, m_{2\omega, \min} = \min \left\{ \frac{4m_{2\omega}}{3}, \frac{\sigma_{\kappa_{\omega}, 2} \rho_{\omega i}^{\frac{1}{2}} (4 - 9\tau_{\kappa_{\omega}}^{\frac{4}{3}})}{3}, \right.$$

$$\left. \frac{\sigma_{\psi_{\omega}, 2} (4 - 9\tau_{\psi_{\omega}}^{\frac{4}{3}})}{3} \right\}; \sigma_{\kappa_{\omega}, 1}, \sigma_{\kappa_{\omega}, 2}, \sigma_{\psi_{\omega}, 1}, \sigma_{\psi_{\omega}, 2} \geq 0 \text{ 为辅助分析}$$

的变量; $0 < \tau_{\kappa_{\omega}}, \tau_{\psi_{\omega}} < (2/3)^{3/2}$; $c_{\omega} = \varepsilon_{\omega} \rho_{\omega i} + \varepsilon_{\omega} \bar{\psi}_{\omega i} + c_{\omega 1} + c_{\omega 2}$, $c_{\omega 1}$ 和 $c_{\omega 2}$ 的表达式见附录 C。

电压、有功功率和无功率的本地容错二次控制律与频率控制律形式类似, 可分别定义电压跟踪误差 $e_{vi} = v_i^* - \hat{v}_i$, 有功功率跟踪误差 $e_{\chi_{Pi}} = \chi_{Pi} - \hat{\chi}_{Pi}$, 无功功率跟踪误差 $e_{\chi_{Qi}} = \chi_{Qi} - \hat{\chi}_{Qi}$ 进行设计。

分析式 (18) — (22) 所示本地容错二次控制律可知, 各部分承担不同的功能: 式 (19) 的前两项用于实现固定时间收敛特性; 式 (20) 和式 (21) 分别实现对执行器故障部分失效故障项和偏置故障项的自适应补偿; 式 (22) 实现对传感器故障信号波形的观测。

综合上层分布式控制和下层本地容错控制, 本文提出的分布式固定时间容错二次控制策略如图 2 所示。该策略能在固定时间 T 内实现控制目标, 固定时间 T 满足:

$$T \leq T_1 + T_2 \quad (27)$$

式中: $T_1 = \max \left\{ T_{\omega f, \max}, T_{\chi f, \max}, T_{\dot{P} f, \max}, T_{\dot{Q} f, \max} \right\}$, $T_2 = \max \left\{ T_{\omega f \phi, \max}, T_{\chi f \phi, \max}, T_{\dot{P} f \phi, \max}, T_{\dot{Q} f \phi, \max} \right\}$ 。

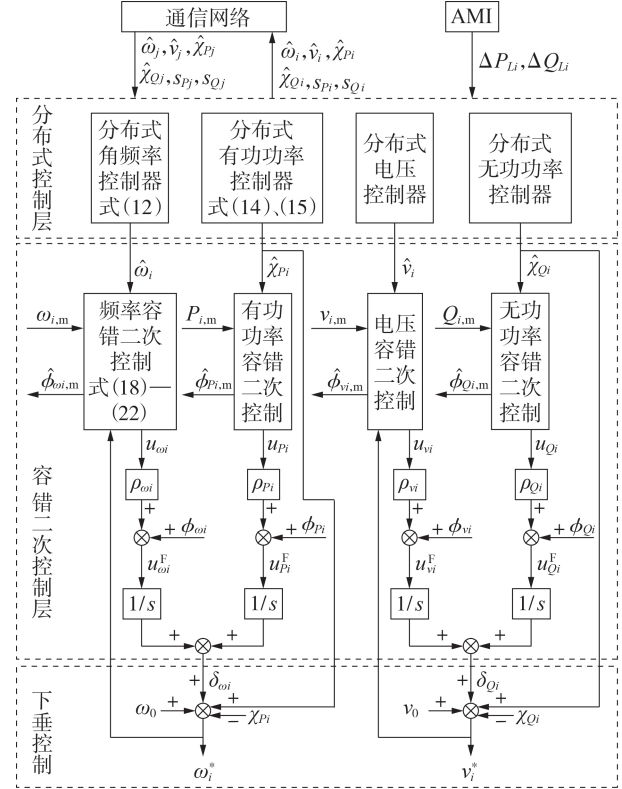


图 2 分布式固定时间容错二次控制策略图

Fig.2 Diagram of distributed fixed-time fault-tolerant secondary control strategy

相比于传统分布式二次控制方法和现有分布式容错二次控制方法, 本文所提策略优势如下:

1) 相较于文献[9-12]忽略了执行器部分失效故障、文献[12-14]未考虑传感器故障, 本文考虑的故障更加全面, 且无需提前获取故障信息, 即能够实现不同故障的自适应控制;

2) 相较于文献[9-14]在有限时间内的容错控制, 本文所提策略具有固定时间收敛特性, 加快了收敛速度, 且收敛时间上限仅与控制器参数有关, 更具有实际意义, 提高了微电网的电能质量;

3) 相较于文献[9-10]无法在负荷变化情况下保证功率一致性, 且未对传感器故障信号进行观测, 本文所提策略对负荷变化有良好的鲁棒性, 并实现了对传感器故障信号的有效观测;

4) 相较于未考虑故障情况的分布式固定时间二次控制策略(如文献[17-18]), 本文考虑了故障等非理想运行环境下的分布式二次控制策略, 并分析证明了所提策略控制下的微电网系统稳定性。

3 算例分析

为了验证所提分布式固定时间容错二次控制策略的有效性, 在 MATLAB / Simulink 平台对附录 D 图 D1 所示的 5 机孤岛交流微电网系统进行仿真测试。该微电网系统额定角频率和额定电压分别为

$100\pi \text{ rad/s}$ 和 380 V , 各单元具体参数见附录 D 表 D1。设微电网中只有 DG_1 能获取参考信号。

设置所提分布式固定时间容错控制器的参数如附录 D 表 D2 所示, 在以下实验场景进行分析验证。

场景 1: 二次控制。当 $t \in [0, 1) \text{ s}$ 时微电网处于下垂控制状态, 在 1 s 时启动二次控制策略。

场景 2: 故障测试。当 $t \in [6, 8) \text{ s}$ 时 DG_1 发生执行器故障; 当 $t \in [9, 11) \text{ s}$ 时 DG_5 发生传感器故障; 当 $t \in [12, 27) \text{ s}$ 时, DG_5 发生执行器故障和传感器故障。故障参数如附录 D 表 D3 所示。

场景 3: 负荷变化。15 s 时增加 $12 + j10 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 负荷 2; 18 s 时切除负荷 1。

场景 4: DG 投切。21 s 时切除 DG_2 ; 24 s 时重新投运 DG_2 。

3.1 算例 1: 无故障情况下二次控制验证

本算例在场景 1、3、4 下进行了仿真测试, 验证了无故障情况下本文所提控制策略的有效性, 系统动态响应如附录 D 图 D2 所示。

当 $t \in [0, 1) \text{ s}$ 时微电网在下垂控制作用下运行, 角频率和电压实际值均与额定值存在偏差, 功率无法精确按比例分配。1 s 时启动所提容错二次控制策略, 各 DG 角频率实际值准确跟踪额定值, 电压实际值与额定值的最大偏差从 5.15 V 减小为 0.18 V , 有功功率和无功功率实际值均按照容量精确分配。由于线路阻抗的影响, 电压的准确恢复和无功功率的精确分配无法同时实现。算例保证了无功合理分配的性能, 但电压实际值与额定值存在可容许的偏差。另外, 在负荷变化和 DG 投切的对应时间点, 角频率和电压均能恢复到额定值, 功率均能重新实现一致性分配。

根据本算例测试结果, 本文所提控制策略能够在无故障情况下实现微电网二次控制目标, 不仅对负荷变化有较好的鲁棒性, 还具有 DG 即插即用的特点。

3.2 算例 2: 故障情况下所提策略性能

本算例在场景 1—4 下进行了仿真测试, 验证了故障情况下本文所提控制策略的有效性, 系统动态响应如图 3 所示。

当 $t \in [6, 8) \text{ s}$ 时 DG_1 发生了执行器故障, 其他 DG 未受故障影响, DG_1 角频率和电压的实际值分别以 $0.008\pi \text{ rad/s}$ 和 0.015 V 左右的幅度在额定值附近波动, 有功功率比例和无功功率比例实际值分别以 0.0015 和 0.02 的幅度在一致性结果附近波动。在 $t \in [9, 11) \text{ s}$ 时 DG_5 发生了传感器故障, 所有 DG 的二次控制性能均未受到影响。在 $t \in [12, 27) \text{ s}$ 时 DG_5 发生了执行器故障和传感器故障, 其他 DG 同样未受故障影响, DG_5 角频率、电压以及功率比例的波动很

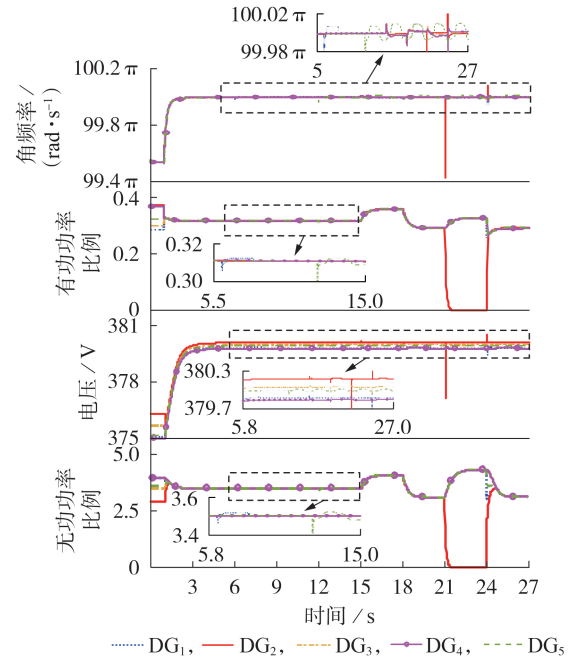


图 3 故障情况下所提策略性能

Fig.3 Performance of proposed strategy under fault conditions

小, 均在容许范围内。另外, 在 DG_5 发生执行器故障和传感器故障情况下, 微电网对负荷变化和 DG 投切事件仍具有良好的鲁棒性。

对比算例 1 的测试结果, 本文所提控制策略能够有效避免单个 DG 的故障在通信网络的传播, 在单独的执行器故障、单独的传感器故障以及执行器和传感器同时发生故障的情况下, 均能保证二次控制性能和对负荷变化、DG 投切等大扰动事件的鲁棒性。

3.3 算例 3: 对比现有控制策略

本算例对文献[5]提出的传统分布式二次控制策略、文献[11]提出的容错二次控制策略和文献[20]提出的集中式二次控制策略在场景 1—4 下进行了仿真测试, 得到系统动态响应如附录 D 图 D3 所示。

在文献[5]所提策略作用下, 各 DG 角频率和有功功率比例实际值在故障存在时均出现大幅振荡, 角频率偏差远大于 $\pi \text{ rad/s}$ 的允许值。在文献[11]所提控制策略作用下, 单个 DG 的故障能够限定在本地, 但故障 DG 角频率和有功功率比例的波动远大于本文所提策略, 且在 DG 投切等大扰动事件发生时, 角频率偏差存在超出容许波动值的可能性。在文献[20]所提策略作用下, 仅故障 DG 角频率的实际值出现大幅振荡, 角频率偏差远大于 $\pi \text{ rad/s}$; 所有 DG 的有功功率比例均受到故障干扰, 出现大幅振荡。

为使控制策略的性能对比结果更加直观, 引入

角频率性能指标 $\eta_{\omega} = \sum_{i=1}^N |\omega_i - \omega_0|$ 和有功功率性能指

标 $\eta_p = \sum_{i=1}^N |\chi_{Pi} - \chi_{P, \text{norm}}|$, $\chi_{P, \text{norm}}$ 为无故障情况对应时间

段的有功比例一致性值。在场景 1—4 下,4 种控制策略性能指标如附录 D 图 D4 所示。对比可知,本文所提策略在故障情况下的控制性能更优。

3.4 算例 4:观测传感器故障信号波形

本算例验证本文所提控制策略对传感器故障信号波形的观测能力。分别在算例 2、3 的仿真测试结果中读取本文所提策略和文献[11]所提策略观测到的传感器故障信号波形,并对比实际传感器故障波形,如附录 D 图 D5 所示。结果表明本文所提控制策略能够有效估计传感器故障信号,并且比文献[11]所提策略更准确地逼近实际传感器故障波形,有利于后续故障严重程度的判断和处理方案的制定。

3.5 算例 5:固定时间收敛特性验证

本算例验证本文所提控制策略的固定时间收敛特性。分别对本文所提固定时间收敛算法和文献[5]所提有限时间收敛算法在 3 种不同的电压初始状态下进行了仿真测试,结果如图 4 所示。

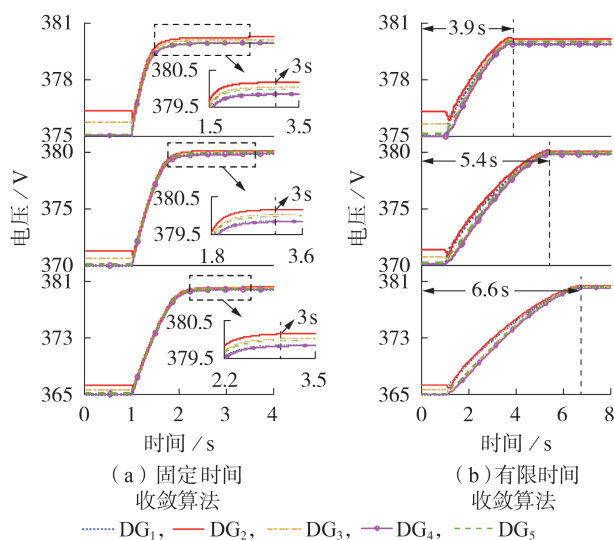


图 4 不同控制算法的收敛时间

Fig.4 Convergence time of different control algorithms

在不同的电压初始状态下,本文所提策略的收敛时间均在 3 s 左右,而文献[5]所提策略的收敛时间则受电压初始状态影响,差距较大。由此可见,固定时间收敛不受初始状态影响,相较于有限时间收敛,降低了保守性,收敛时间更快,性能更优。同时,本文所提分布式容错控制策略的固定时间收敛特性得到了验证。在该特性下既可以根据控制参数计算固定收敛时间上界,又可以在有控制时间要求的情况下反推控制参数以达到控制目标。

4 结论

为应对孤岛交流微电网控制通道中潜在的执行器故障和传感器故障,本文提出了一种基于分层结构的分布式固定时间容错二次控制策略。理论分析和仿真实验都验证了该策略在故障信息未知的情况下,能够有效避免故障在通信网络的传播,在故障条件下实现了频率电压的恢复和功率按照容量的精确分配,并且有效观测传感器故障信号波形。与现有控制策略相比,本文所提分布式固定时间容错二次控制策略不仅能在故障情况下对负荷变化和 DG 投切保持良好的鲁棒性,还具有固定时间收敛特性,其收敛时间与微电网初始状态无关。

除了本文讨论的执行器故障和传感器故障,通信延时和通信故障等非理想通信网络情况下的分布式容错二次控制也是未来研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

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 Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 许伟,肖湘宁. 基于模式转换的独立微电网实时运行控制[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊1):282-291.
XU Wei, XIAO Xiangning. Real-time operational control of stand-alone microgrid based on mode switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement 1): 282-291.
- [3] 米阳,常俊飞,时帅,等. 基于数据驱动的孤岛直流微电网二次控制[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):92-98.
MI Yang, CHANG Junfei, SHI Shuai, et al. Data-driven based secondary control for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 92-98.
- [4] 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.
- [5] ZUO S, DAVOUDI A, SONG Y, et al. Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10):5988-5997.
- [6] 杨奕贤,郭力,王洪达,等. 基于数据驱动的直流微电网虚假数据注入攻击快速防御策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):145-151.
YANG Yixian, GUO Li, WANG Hongda, et al. Fast defense strategy of false data injection attack in DC microgrid based on data-driven[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 145-151.
- [7] 王琦,李梦雅,汤奕,等. 电力信息物理系统网络攻击与防御研究综述:(一)建模与评估[J]. 电力系统自动化,2019,43(9):9-21.
WANG Qi, LI Mengya, TANG Yi, et al. A review on research of cyber-attacks and defense in cyber physical power systems Part one modelling and evaluation[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2019, 43(9): 9-21.
- [8] 金小峥, 原忠虎, 李彦平. 主动容错控制理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 2-3.
- [9] DEHKORDI N M, MOUSSAVI S Z. Distributed resilient adaptive control of islanded microgrids under sensor/actuator faults[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2699-2708.
- [10] AFSHARI A, KARRARI M, BAGHAEE H R, et al. Distributed fault-tolerant voltage/frequency synchronization in autonomous AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3774-3789.
- [11] SHI Mengxuan, CHEN Xia, SHAHIDEHPOUR M, et al. Observer-based resilient integrated distributed control against cyberattacks on sensors and actuators in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1953-1963.
- [12] 马良, 许刚, 谈元鹏. 考虑扰动影响的微电网分布式自适应控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 146-156.
- MA Liang, XU Gang, TAN Yuanpeng. Distributed adaptive control strategy for microgrids considering disturbance effects[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 146-156.
- [13] SHAHAB M A, MOZAFARI B, SOLEYMANI S, et al. Distributed consensus-based fault tolerant control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 37-47.
- [14] AFSHARI A, KARRARI M, BAGHAEE H R, et al. Cooperative fault-tolerant control of microgrids under switching communication topology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 1866-1879.
- [15] 刘忠, 杨陈, 蒋玮, 等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 61-69.
- LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69.
- [16] 刘洋, 井元伟, 刘晓平, 等. 非线性系统有限时间控制研究综述[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 1-12.
- LIU Yang, JING Yuanwei, LIU Xiaoping, et al. Survey on finite-time control for nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(1): 1-12.
- [17] MOHAMED G, MOHAMED H, FOUAD G. Fixed-time distributed voltage and reactive power compensation of islanded microgrids using sliding-mode and multi-agent consensus design[J/OL]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. [2021-11-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/972538>.
- [18] YUAN Qifan, WANG Yanwu, LIU Xiaokang, et al. Distributed fixed-time secondary control for DC microgrid via dynamic average consensus[J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Energy. [2021-11-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9419789>.
- [19] POLYAKOV A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [20] 顾伟, 楼冠男, 柳伟. 微电网分布式控制理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 126-130.

作者简介:



陆瑶

陆瑶(1996—),女,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: daisybb@sjtu.edu.cn);

王杰(1960—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为复杂电力系统非线性控制、自适应控制、鲁棒控制、电力系统稳定分析等(E-mail: jiewangxh@sjtu.edu.cn);

王子强(1995—),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定控制、微电网优化与控制等(E-mail: 1102638965@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Distributed fault-tolerant secondary control strategy for islanded microgrid based on fixed-time consensus algorithm

LU Yao¹, WANG Jie¹, WANG Ziqiang¹, LI Penghan², YAO Gang¹, LIU Hui³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiao Tong University, Ministry of Education, Shanghai 200240, China;

2. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710049, China;

3. Shanghai Power & Energy Storage Battery System Engineering Tech Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: With the increasingly close coupling between the cyber layer and the physical layer of microgrid, the large-scale application of software-intensive controllers and power electronic devices increases the possibility of attacks and faults of the microgrid, thereby affecting the stable operation of the microgrid. For the potential actuator faults and sensor faults in the control channel of the islanded AC microgrid, a distributed fault-tolerant secondary control strategy based on fixed-time consensus algorithm is proposed. Firstly, a droop control model considering both actuator faults and sensor faults is established. Secondly, distributed consensus control algorithms and fault-tolerant control algorithms are designed in the upper layer and lower layer respectively. The mitigating mechanism of the controllers for the unknown faults is analyzed, and the fixed-time convergence characteristics of the proposed strategy are theoretically proved. Furthermore, the signal of sensor faults is estimated. Finally, the simulation example verifies the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: islanded microgrid; distributed fault-tolerant control; actuator faults; sensor faults; fixed-time consensus

附录 A

定义角频率跟踪误差 $\tilde{\omega}_i = \hat{\omega}_i - \omega_{ref}$ ，对 $\tilde{\omega}_i$ 求导并代入式(12)可得：

$$\dot{\tilde{\omega}} = -l_{1\omega} \text{sig}(\mathbf{K}\tilde{\omega})^{p_\omega} - l_{2\omega} \text{sig}(\mathbf{K}\tilde{\omega})^{q_\omega} \quad (\text{A1})$$

式中： $\mathbf{e}_{\tilde{\omega}} = (e_{\tilde{\omega}1}, e_{\tilde{\omega}2}, \dots, e_{\tilde{\omega}N})^T = -\mathbf{K}\tilde{\omega}$ ， $\mathbf{K}$ 为系数矩阵； $\tilde{\omega} = (\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_N)^T$ 。

考虑 Lyapunov 函数 $V_1 = 0.5\tilde{\omega}^T \tilde{\omega}$ ，则：

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \tilde{\omega}^T \dot{\tilde{\omega}} = \tilde{\omega}^T \left(-l_{1\omega} \text{sig}(\mathbf{K}\tilde{\omega})^{p_\omega} - l_{2\omega} \text{sig}(\mathbf{K}\tilde{\omega})^{q_\omega} \right) \\ &\leq -l_{1\omega} \lambda_{\min}^{p_\omega}(\mathbf{K}) \left| \tilde{\omega}^T \tilde{\omega} \right|^{\frac{p_\omega+1}{2}} - l_{2\omega} \lambda_{\min}^{q_\omega}(\mathbf{K}) \left| \tilde{\omega}^T \tilde{\omega} \right|^{\frac{q_\omega+1}{2}} \\ &\leq -2^{\frac{p_\omega+1}{2}} l_{1\omega} \lambda_{\min}^{p_\omega}(\mathbf{K}) (V_1)^{\frac{p_\omega+1}{2}} - 2^{\frac{q_\omega+1}{2}} l_{2\omega} \lambda_{\min}^{q_\omega}(\mathbf{K}) (V_1)^{\frac{q_\omega+1}{2}} \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

根据引理 1， $\mathbf{e}_{\tilde{\omega}}$ 在固定时间 $T_{\tilde{\omega}f}$ 内收敛于 0，固定时间 $T_{\tilde{\omega}f}$ 满足式(13)。定理 1 得证。

附录 B

首先给出引理 B1—B3。

引理 B1：若 K 是无向图 Laplacian 矩阵 $\hat{\mathbf{L}} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 的最小非零特征值，不等式 $\mathbf{x}^T \hat{\mathbf{L}} \mathbf{x} \geq K \mathbf{x}^T \mathbf{x}$ 成立。

引理 B2：若 $x_1, x_2, \dots, x_N > 0$ ，则 $\sum_{i=1}^N x_i^p \geq \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^p$ ， $0 < p \leq 1$ ； $N^{1-q} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^q \leq \sum_{i=1}^N x_i^q \leq \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^q$ ， $q > 1$ 。

引理 B3：对于无向图 Laplacian 矩阵 $\hat{\mathbf{L}} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ ，任意向量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \in \mathbf{R}^N$ ，等式 $\mathbf{x}^T \hat{\mathbf{L}} \mathbf{x} = \sum_{i,j=1}^N \frac{p_i a_{ij} (x_i - x_j)^2}{2}$ 成立， $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_N)^T$ 是无向图的权重向量。

定理 2 证明过程如下：

定义有功功率估计误差 $e_{\hat{\chi}_{p_i}} = \hat{\chi}_{p_i} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{\chi}_{p_j}$ 和虚拟变量误差 $e_{s_{p_i}} = s_{p_i} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_{p_j}$ 。

考虑 Lyapunov 函数：

$$V_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_{\hat{\chi}_{p_i}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}}^2 \quad (\text{B1})$$

对式(B1)求导，并代入式(14)和(15)，可得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \sum_{i=1}^N e_{\hat{\chi}_{p_i}} \dot{e}_{\hat{\chi}_{p_i}} + \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}} \dot{e}_{s_{p_i}} \\ &= \sum_{i=1}^N e_{\hat{\chi}_{p_i}} \left(\varepsilon_{1P} e_{s_{p_i}} + l_{1P} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(e_{\hat{\chi}_{p_j}} - e_{\hat{\chi}_{p_i}})^{\frac{p'}{q'}} \right) + \sum_{i=1}^N e_{\hat{\chi}_{p_i}} l_{2P} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(e_{\hat{\chi}_{p_j}} - e_{\hat{\chi}_{p_i}})^{2-\frac{p'}{q'}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}} l_{1S} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(e_{s_{p_j}} - e_{s_{p_i}})^{\frac{p'}{q'}} + \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}} l_{2S} \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(e_{s_{p_j}} - e_{s_{p_i}})^{2-\frac{p'}{q'}} - \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}} \varepsilon_{2P} \frac{\Delta \dot{\chi}_{p_i}}{m_{p_i}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}} k_{pS} \sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{s_{p_j}} - e_{s_{p_i}}) + \sum_{i=1}^N e_{s_{p_i}} \varepsilon_{2P} \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} \frac{\Delta \dot{\chi}_{p_j}}{m_{p_j}} \end{aligned} \quad (\text{B2})$$

根据引理 B2，以及控制器参数关系不等式 $k_{pS} \geq (l_{1P}^2 + l_{2P}^2) \varepsilon_{2P}^2 / (2m_{pi, \min}^2)$ ，式(B2)可以转化为：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &< -\frac{l_{1P}}{2} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\frac{2q'}{p'+q'}} |e_{\hat{\chi}_{p_i}} - e_{\hat{\chi}_{p_j}}|^2 \right)^{\frac{p'+q'}{2q'}} - \frac{l_{2P}}{2} N^{\frac{p'-q'}{q'}} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\frac{2q'}{3q'-p'}} |e_{\hat{\chi}_{p_i}} - e_{\hat{\chi}_{p_j}}|^2 \right)^{\frac{3q'-p'}{2q'}} - \\ &\quad \frac{l_{1S}}{2} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\frac{2q'}{p'+q'}} |e_{s_{p_i}} - e_{s_{p_j}}|^2 \right)^{\frac{p'+q'}{2q'}} - \frac{l_{2S}}{2} N^{\frac{p'-q'}{q'}} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^{\frac{2q'}{3q'-p'}} |e_{s_{p_i}} - e_{s_{p_j}}|^2 \right)^{\frac{3q'-p'}{2q'}} \end{aligned} \quad (\text{B3})$$

定义 $l_{1,\min} = \min\{l_{1p}, l_{1s}\}$ 和 $l_{2,\min} = \min\{l_{2p}, l_{2s}\}$ 。根据引理 B3, 存在 Laplacian 矩阵 $\hat{\mathbf{L}}_1 = (a_{ij}^{2q'/(p'+q')}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 和 $\hat{\mathbf{L}}_2 = (a_{ij}^{2q'/(3q'-p')}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 使:

$$\dot{V}_2 < -\frac{l_{1,\min}}{2} \left(2\mathbf{e}_{\hat{\chi}_p}^T \hat{\mathbf{L}}_1 \mathbf{e}_{\hat{\chi}_p} + 2\mathbf{e}_{s_p}^T \hat{\mathbf{L}}_1 \mathbf{e}_{s_p} \right)^{\frac{p'+q'}{2q'}} - \frac{l_{2,\min}}{2} N^{\frac{p'-q'}{q'}} 2^{\frac{p'-q'}{2q'}} \left(2\mathbf{e}_{\hat{\chi}_p}^T \hat{\mathbf{L}}_2 \mathbf{e}_{\hat{\chi}_p} + 2\mathbf{e}_{s_p}^T \hat{\mathbf{L}}_2 \mathbf{e}_{s_p} \right)^{\frac{3q'-p'}{2q'}} \quad (\text{B4})$$

进一步根据引理 B1, 存在 K_1 和 K_2 分别为 Laplacian 矩阵 $\hat{\mathbf{L}}_1$ 和 $\hat{\mathbf{L}}_2$ 的最小非零特征值, 代入式(B4)可得

$$\dot{V}_2 < -2^{p'} l_{1,\min} K_1^{\frac{p'+q'}{2q'}} V_2^{\frac{p'+q'}{2q'}} - 2^{\frac{3q'-p'}{2q'}} l_{2,\min} N^{\frac{p'-q'}{q'}} K_2^{\frac{3q'-p'}{2q'}} V_2^{\frac{3q'-p'}{2q'}} \quad (\text{B5})$$

由引理 1 可知, $\mathbf{e}_{\hat{\chi}_p}$ 和 $\mathbf{e}_{s_p}$ 在固定时间 $T_{\hat{p}f}$ 内收敛于 0, 固定时间 $T_{\hat{p}f}$ 满足式(16)。

另外, 对式(15)左右先求和, 有:

$$\sum_{i=1}^N \dot{s}_{p_i} = l_{1s} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(s_{p_j} - s_{p_i})^{\frac{p'}{q'}} + l_{2s} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \text{sig}(s_{p_j} - s_{p_i})^{2-\frac{p'}{q'}} + k_{ps} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} (s_{p_j} - s_{p_i}) + \varepsilon_{2p} \sum_{i=1}^N \left(\Delta P_{Li} \delta(t - t_p) - \frac{\Delta \dot{\chi}_{p_i}}{m_{p_i}} \right) \quad (\text{B6})$$

再对(B6)左右积分有 $\sum_{i=1}^N \{ \Delta P_{Li} \varepsilon(t - t_p) - \Delta \hat{\chi}_{p_i} / m_{p_i} \} = 0$, 即负荷平衡。

定理 2 得证。

附录 C

首先给出引理 C1。

引理 C1: 对于任意常数 $\varepsilon > 0$, 任意变量 $z \in \mathbf{R}$ 始终满足不等式 $0 < |z| - z^2 / \sqrt{z^2 + \varepsilon^2} < \varepsilon$ 。

定理 3 证明过程如下:

首先证明关于频率跟踪误差 e_{oi} 的相关结论。

考虑 Lyapunov 函数:

$$V_3 = \frac{1}{2} e_{oi}^2 + \frac{1}{2n_{\kappa_{\omega}}} \rho_{oi} \tilde{\kappa}_{oi}^2 + \frac{1}{2n_{\psi_{\omega}}} \tilde{\psi}_{oi}^2 \quad (\text{C1})$$

对式(C1)求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & e_{oi} \dot{e}_{oi} + \frac{1}{n_{\kappa_{\omega}}} \rho_{oi} \tilde{\kappa}_{oi} \dot{\tilde{\kappa}}_{oi} + \frac{1}{n_{\psi_{\omega}}} \tilde{\psi}_{oi} \dot{\tilde{\psi}}_{oi} = \\ & \rho_{oi} e_{oi} u_{oi} + e_{oi} \psi_{oi} - \frac{1}{n_{\kappa_{\omega}}} \rho_{oi} \sigma_{\kappa_{\omega}} \tilde{\kappa}_{oi} \left(\hat{\kappa}_{oi} + \frac{\hat{\kappa}_{oi}^3}{n_{\kappa_{\omega}}} \right) + \rho_{oi} e_{oi} \bar{u}_{oi} \tilde{\kappa}_{oi} - \frac{1}{n_{\psi_{\omega}}} \sigma_{\psi_{\omega}} \tilde{\psi}_{oi} \left(\hat{\psi}_{oi} + \frac{\hat{\psi}_{oi}^3}{n_{\psi_{\omega}}} \right) + \frac{e_{oi}^2 \tilde{\psi}_{oi}}{\sqrt{e_{oi}^2 + \varepsilon_{\omega}^2}} \end{aligned} \quad (\text{C2})$$

根据引理 C1, 可得以下不等关系:

$$\rho_{oi} e_{oi} u_{oi} \leq -\frac{\rho_{oi} e_{oi}^2 \hat{\kappa}_{oi}^2 \bar{u}_{oi}^2}{\sqrt{e_{oi}^2 \hat{\kappa}_{oi}^2 \bar{u}_{oi}^2 + \varepsilon_{\omega}^2}} < \varepsilon_{\omega} \rho_{oi} - e_{oi} \rho_{oi} \hat{\kappa}_{oi} \bar{u}_{oi} \quad (\text{C3})$$

$$e_{oi} \psi_{oi} \leq |e_{oi}| \bar{\psi}_{oi} < \varepsilon_{\omega} \bar{\psi}_{oi} + \frac{e_{oi}^2 \bar{\psi}_{oi}}{\sqrt{e_{oi}^2 + \varepsilon_{\omega}^2}} \quad (\text{C4})$$

$$-\frac{1}{n_{\kappa_{\omega}}} \sigma_{\kappa_{\omega}} \tilde{\kappa}_{oi} \left(\hat{\kappa}_{oi} + \frac{\hat{\kappa}_{oi}^3}{n_{\kappa_{\omega}}} \right) \leq -\sigma_{\kappa_{\omega},1} \left(\frac{\tilde{\kappa}_{oi}^2}{2n_{\kappa_{\omega}}} \right)^{\frac{3}{4}} - \sigma_{\kappa_{\omega},2} \left(4 - 9\tau_{\kappa_{\omega}}^{4/3} \right) \left(\frac{\tilde{\kappa}_{oi}^2}{2n_{\kappa_{\omega}}} \right)^2 + c_{\omega 1} \quad (\text{C5})$$

$$-\frac{1}{n_{\psi_{\omega}}} \sigma_{\psi_{\omega}} \tilde{\psi}_{oi} \left(\hat{\psi}_{oi} + \frac{\hat{\psi}_{oi}^3}{n_{\psi_{\omega}}} \right) \leq -\sigma_{\psi_{\omega},1} \left(\frac{\tilde{\psi}_{oi}^2}{2n_{\psi_{\omega}}} \right)^{\frac{3}{4}} - \sigma_{\psi_{\omega},2} \left(4 - 9\tau_{\psi_{\omega}}^{4/3} \right) \left(\frac{\tilde{\psi}_{oi}^2}{2n_{\psi_{\omega}}} \right)^2 + c_{\omega 2} \quad (\text{C6})$$

式中: $c_{\omega 1} = \sigma_{\omega \kappa}^4 / 4 \sigma_{\kappa}^3 + \sigma_{\omega \kappa} / 32 n_{\omega} + 3 \sigma_{\omega \kappa}^4 / 4 \sigma_{\kappa}^3 + \sigma_{\omega \kappa}^4 / 4 \sigma_{\kappa}^3$, $c_{\omega 2} = \sigma_{\omega \psi}^4 / 4 \sigma_{\psi}^3 + \sigma_{\omega \psi}^4 / 4 \sigma_{\psi}^3 + 3 \sigma_{\omega \psi}^4 / 4 \sigma_{\psi}^3 + \sigma_{\omega \psi}^4 / 12 n_{\omega}^2$; $\sigma_{\kappa_{\omega},1}, \sigma_{\kappa_{\omega},2}, \sigma_{\psi_{\omega},1}, \sigma_{\psi_{\omega},2} \geq 0$ 为辅助分析的参数; $0 < \tau_{\kappa_{\omega}}, \tau_{\psi_{\omega}} < (2/3)^{3/2}$ 。

将式(C3)–(C6)代入式(C2), 得到:

$$\dot{V}_3 < -m_{1\omega, \min} V_3^{\frac{3}{4}} - m_{2\omega, \min} V_3^2 + c_\omega \quad (C7)$$

由引理 1 可知, 频率跟踪误差 $e_{\omega i}$ 在固定时间 $T_{\omega f}$ 内收敛到 0 附近的小邻域 $\Omega_{\omega i}$ 内。固定时间 $T_{\omega f}$ 满足式(23), 小邻域 $\Omega_{\omega i}$ 满足式(24)。

然后证明关于传感器故障估计误差 $\tilde{\phi}_{\omega i, m}$ 的相关结论。

定义 $\tilde{e}_{\omega i} = \omega_i - \omega_i^*$ 和 $\tilde{\phi}_{\omega i, m} = \phi_{\omega i, m} - \hat{\phi}_{\omega i, m}$, 则 $e_{\omega i, m} = \tilde{e}_{\omega i} + \tilde{\phi}_{\omega i, m}$ 。考虑 Lyapunov 函数 $V_4 = 0.5\tilde{\phi}_{\omega i, m}^2$, 则:

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= \tilde{\phi}_{\omega i, m} \left(\dot{\phi}_{\omega i, m} - \dot{\hat{\phi}}_{\omega i, m} \right) \\ &\leq -\sigma_{\omega, m} \tilde{\phi}_{\omega i, m}^{\frac{4}{3}} - \sigma_{\omega, m} \tilde{\phi}_{\omega i, m}^4 - (\sigma_{\omega, m} - 2) \tilde{\phi}_{\omega i, m}^2 + \frac{1}{2} \sigma_{\omega, m}^2 \tilde{e}_{\omega i}^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{2} \sigma_{\omega, m}^2 \tilde{e}_{\omega i}^6 + \frac{1}{2} \sigma_{\omega, m}^2 \tilde{e}_{\omega i}^2 + \frac{1}{2} \dot{\phi}_{\omega, m}^2 \end{aligned} \quad (C8)$$

由于逆变器的快速响应特性, 在稳态时可认为 $\omega_i = \omega_i^*$ 和 $v_i = v_i^*$ 成立, 且 $\sigma_{\omega, m} > 2$ 。式(C8)可以表示为:

$$\dot{V}_4 \leq -2^{\frac{2}{3}} \sigma_{\omega, m} V_4^{\frac{2}{3}} - 4\sigma_{\omega, m} V_4^2 + \frac{1}{2} \dot{\phi}_{\omega, m}^2 \quad (C9)$$

由引理 1 可知, 传感器故障估计误差 $\tilde{\phi}_{\omega i, m}$ 在固定时间 $T_{\omega f \phi}$ 内收敛到 0 附近的小邻域 $\Omega_{\omega i, \phi}$ 内。固定时间 $T_{\omega f \phi}$ 满足式(25), 小邻域 $\Omega_{\omega i, \phi}$ 满足式(26)。定理 3 得证。

附录 D

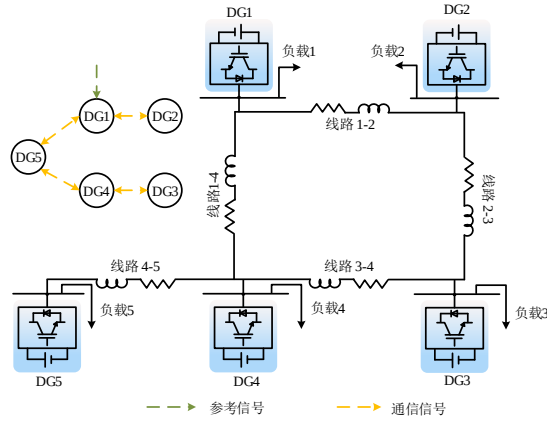


图 D1 5 机孤岛交流微电网系统

Fig.D1 Islanded AC microgrid system with 5 DGs

表 D1 五机孤岛交流微电网系统参数

Table D1 Parameters of islanded AC microgrid system with 5 DGs

系统	参数				
	V_{DC}/V	m_p	n_Q	有功负载/kV	无功负载/kVar
DG ₁	800	1.0×10^{-5}	3×10^{-4}	20	17
DG ₂	800	3.0×10^{-5}	2×10^{-4}	19	10
DG ₃	800	1.5×10^{-5}	4×10^{-4}	18	15
DG ₄	800	2.5×10^{-5}	2.5×10^{-4}	17	12
DG ₅	800	2.0×10^{-5}	3.5×10^{-4}	16	10
LC 滤波器	R	0.01 Ω			
	L	6×10^{-4} H			
	C	1.5×10^{-3} F			
线路	Line 1-2&3-4&1-4			0.02 Ω + 0.6 mH	
	Line 2-3&4-5			0.03 Ω + 0.6 mH	

表 D2 控制器参数

Table D2 Parameters of controllers

参数符号	数值	参数符号	数值
p_ω	1/3	q_ω	5/3
p'	1/2	q'	3/2
$l_{1\omega}, l_{2\omega}$	50	l_{1v}, l_{2v}	20
l_{1p}, l_{2p}	15	l_{1Q}, l_{2Q}	10
l_{1s}, l_{2s}	15	$l_{1s'}, l_{2s'}$	10
k_{ps}	1	k_{qs}	1
ε_{1p}	0.05	ε_{1Q}	0.05
ε_{2p}	6×10^{-7}	ε_{2Q}	1×10^{-5}
$\varepsilon_\omega, \varepsilon_p$	0.05	$\varepsilon_v, \varepsilon_Q$	0.05
$m_{1\omega}, m_{2\omega}$	50	m_{1v}, m_{2v}	30
m_{1p}, m_{2p}	300	m_{1Q}, m_{2Q}	20
$\sigma_{\kappa_\omega}, \sigma_{\psi_\omega}, \sigma_{\kappa_v}, \sigma_{\psi_v}$	2	$\sigma_{\kappa_p}, \sigma_{\psi_p}, \sigma_{\kappa_Q}, \sigma_{\psi_Q}$	2
$n_{\kappa_\omega}, n_{\psi_\omega}, n_{\kappa_v}, n_{\psi_v}$	100	$n_{\kappa_p}, n_{\psi_p}, n_{\kappa_Q}, n_{\psi_Q}$	100

表 D3 故障参数

Table D3 Parameters of faults

时段	参数符号	故障函数
[6,8) s	$\rho_{\omega 1}, \rho_{v 1}, \rho_{p 1}, \rho_{Q 1}$	0.8
	$\phi_{\omega 1}, \phi_{p 1}$	$2 \sin t$
	$\phi_{v 1}, \phi_{Q 1}$	$5 \sin t$
[9,11) s	$\phi_{\omega 5, m}, \phi_{v 5, m}, \phi_{p 5, m}, \phi_{Q 5, m}$	$\sin(2t - 18)$
[12,27) s	$\rho_{\omega 5}, \rho_{v 5}, \rho_{p 5}, \rho_{Q 5}$	0.7
	$\phi_{\omega 5}, \phi_{p 5}$	$2 \sin 2t$
	$\phi_{v 5}, \phi_{Q 5}$	$5 \sin 2t$
[12,24) s	$\phi_{\omega 5, m}, \phi_{v 5, m}, \phi_{p 5, m}, \phi_{Q 5, m}$	$2 \sin(t - 12)$
[24,27) s	$\phi_{\omega 5, m}, \phi_{v 5, m}, \phi_{p 5, m}, \phi_{Q 5, m}$	$t - 24$

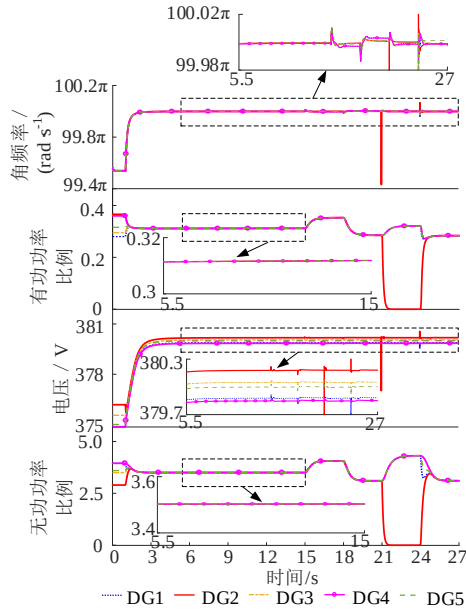


图 D2 无故障情况下所提策略性能

Fig.D2 Performance of proposed strategy without fault condition

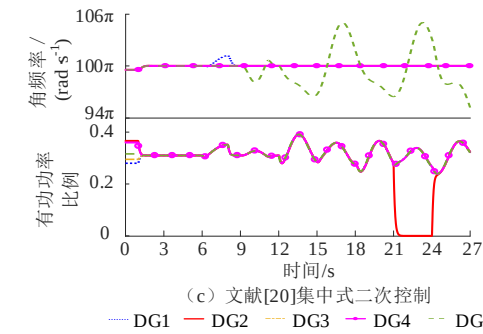
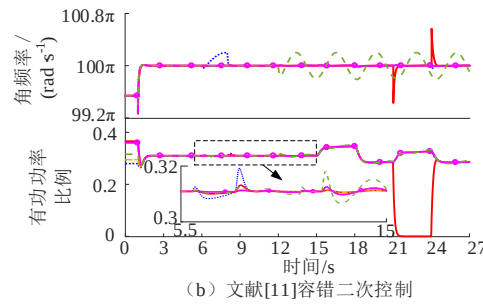
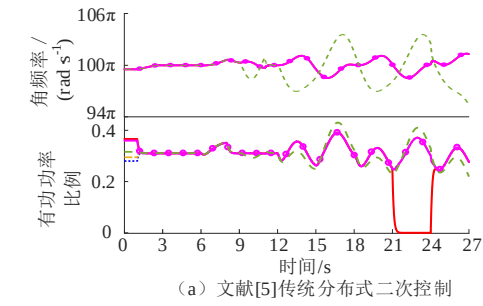


图 D3 故障情况下现有控制策略性能

Fig.D3 Performance of existing control strategy under fault conditions

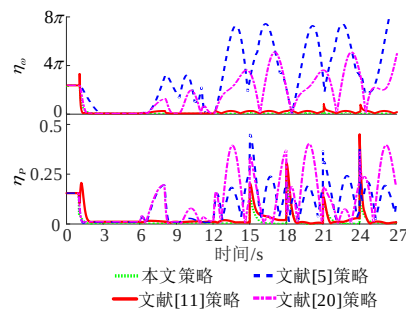


图 D4 故障情况下 4 种控制策略性能指标

Fig.D4 Performance indexes of four control strategies under fault conditions

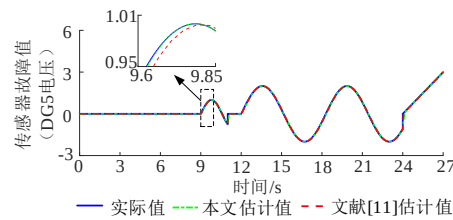


图 D5 对传感器故障信号的估计

Fig.D5 Estimation of sensor fault signals