

网络攻击下考虑状态受限的微电网安全运行与控制

吴忠强, 程洪强

(燕山大学河北省工业计算机控制工程重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 攻击、干扰、不确定性通常存在于微电网中危害系统的安全运行. 为了解决此问题, 设计了一种带攻击补偿的电压控制器, 以减小或抵消攻击对系统稳定性的影响. 设计攻击观测器对微电网中受到的攻击进行观测; 利用多智能体一致性协议, 考虑全状态约束问题, 采用正切型障碍 Lyapunov 函数约束所设计的状态量, 使系统状态约束在预设范围内, 并实现无功功率分配. 采用自适应模糊系统对系统中一些参数的变化进行估计, 提高控制器的自适应能力. 仿真验证了控制器的有效性.

关键词: 微电网; 多智能体系统; 攻击; 障碍 Lyapunov 函数; 自适应模糊系统

基金项目: 河北省自然科学基金(No.F2020203014)

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)09-3240-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221092

Safe Operation and Control of Microgrid Considering State Constraints Under Network Attacks

WU Zhong-qiang, CHENG Hong-qiang

(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Attacks, disturbances, and uncertainty often exist in microgrids and endanger the safe operation of the system. To solve these problems, a voltage controller with attack compensation is designed to reduce or offset the impact of attack on system stability. The attack observer is designed to observe the attack in the microgrid. Using multi-agent consensus protocol and considering the problem of full state constraints, tangent barrier Lyapunov function is used to constrain the designed state variables, so that the system states are constraint within the preset range, and the reactive power sharing is realized. The adaptive fuzzy system is used to estimate the changes of some parameters in the system to improve the adaptive ability of the controller. The effectiveness of the controller is verified by simulation.

Key words: microgrid; multi-agent system; attack; barrier Lyapunov function; adaptive fuzzy system

Foundation Item(s): Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2020203014)

1 引言

微电网分为并网模式和孤岛模式, 在并网模式下, 电压和频率由大电网决定, 保障了供电的可靠性. 当大电网出现故障、线路损坏、大规模停电等情况时, 微电网可运行于孤岛模式. 运行于孤岛模式的微电网, 其内部负荷不会受大电网故障的影响. 微电网一般采用分层控制策略保证其稳定运行, 但是在微电网下垂控制下, 由于线路阻抗分布不均衡, 电压和频率会产生偏差^[1]. 对此, 许多研究者采用集中控制对下垂控制产生的电压和频率偏差进行补偿. 文献[2]提出了一种集中式二次电压和频率控制策略, 通过使用事件触发方法

来减少控制器更新的次数, 但是集中控制对单点故障的处理能力较弱, 会影响系统的动态性能. 与集中式方案相比, 分布式控制策略具有可靠性、弹性等特点. 微电网的分布式控制大多基于多智能体一致协议, 采用稀疏的通信网络在多个分布式电源(Distributed Generations, DG)之间交换物理信息(如电压、频率、有功和无功等), 以实现电压和频率的调节、有功和无功功率均分等目标^[3].

目前, 分布式控制主要集中在通信问题对微电网控制的影响上. 文献[4]提出一种基于事件触发的电压分布式协同控制, 可减少通信传输次数, 通过电压跟踪控制来提高无功功率分配, 但未考虑频率恢复以及有

功率分配问题. 文献[5]提出了一种分布式事件触发控制方案, 所提出的控制方案仅在事件触发时才需要邻居控制器之间的通信, 减少了通信负担, 但未考虑通信中断对系统的影响. 文献[6]研究了电压和频率受到约束的交流微电网二次控制问题, 设计了基于模型预测机制的自触发控制以降低通信成本. 文献[7]提出了一种新的具有约束变化率的全分布式算法, 通过对频率和电压的变化率进行约束, 保证电压和频率限制在给定范围内.

针对微电网分布式电压和频率控制中出现的确定性、扰动、噪声、故障等问题, 文献[8]提出一种离散分布式二次控制策略, 提高了系统的鲁棒性和控制精度, 同时确保准确的有功/无功功率分配. 文献[9]提出了一种新的分布式弹性二次控制, 采用平均一致性模型, 使孤岛交流微电网电压和频率恢复到参考值, 满足即插即用功能. 文献[10]为了解决参数扰动、噪声和不可测的变量问题, 提出一种基于扩展状态卡尔曼滤波器和快速终端滑模控制的分布式二次电压控制方法. 设计了干扰观测器估计扩展状态值和随机噪声. 文献[11~13]针对执行器或传感器故障时孤岛微电网电压和频率控制问题, 提出了一种新颖的弹性分布式自适应容错控制器, 以克服通信网络中传感器或执行器故障对系统的不利影响, 保证闭环系统的电压和频率同步.

由于分布式^[14]控制模式涉及较多控制决策和网络通信, 容易受到网络攻击的影响. 网络攻击被视为孤岛微电网的主要威胁之一, 攻击会影响系统的控制精度, 甚至破坏系统的稳定性. 攻击与故障的主要区别之一是攻击具有智能性^[15]. 虚假数据注入(False Data Injection, FDI)攻击是分布式控制系统最常见和最典型的攻击形式, 文献[16]提出了攻击下的孤岛微电网分布式二次协同控制协议, 研究了攻击对传感器/执行器、通信链路的影响, 通过设计基于信任的控制协议, 减轻攻击对通信链路和传感器/执行器的影响, 但只考虑了常值攻击对系统的影响. 文献[17]分析了常值攻击对孤岛微电网频率控制的不利影响, 提出了一种克服 FDI 攻击的微电网分布式协同控制算法, 但未考虑变量攻击以及攻击对电压稳定性的影响. 文献[18]提出了一种基于观测器的孤岛交流微电网弹性控制, 用于估计和补偿对传感器和执行器的 FDI 攻击, 提出的弹性控制依赖于分布式控制结构, 能将频率和电压恢复到参考值, 并使有功和无功功率按比例分配. 文献[19]针对未知无界 FDI 攻击, 设计了一种全分布式弹性控制方法, 防止恶意攻击, 保证系统最终一致有界且收敛, 并应用于孤岛微电网的频率和电压恢复上, 但方法过于复杂, 且未考虑通信中断以及即

插即用对系统的影响.

针对以上问题, 本文研究了受攻击时孤岛交流微电网分布式二次控制策略, 其主要贡献如下:

(1) 针对 FDI 攻击对微电网电压恢复的影响, 设计一种带攻击补偿的电压控制器减小或抵消攻击对系统的影响. 所设计的控制器在常值和非常值攻击下均能保持系统的稳定性.

(2) 考虑全状态约束问题, 采用正切型障碍 Lyapunov 函数(Tangent Barrier Lyapunov Function, BLF-Tan)约束所设计的状态变量, 使输出电压约束在预设的范围内.

(3) 对反馈线性化后得到的分布式电源模型, 采用自适应模糊系统对模型中一些参变量的变化进行估计, 以提高控制器的自适应能力.

2 预备知识

2.1 图论

微电网可以视为多智能体系统, 微电网中每个分布式电源通过稀疏通信网络彼此通信, 其通信拓扑可以用有向图表示. 设有有向图为 $G(V, E)$, 其中顶点集 $V = \{\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_n\}$, 边集 $E \subset V \times V$, \times 表示笛卡尔积. 定义 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为图 G 的加权邻接矩阵, 其中, a_{ij} 表示图 G 中边的权重系数. 如果顶点 j 可以从顶点 i 接收信息, 那么 $(\bar{v}_j, \bar{v}_i) \in E$, 此时权重系数 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 此外, 如果第 i 个节点可以访问领航者信息, 该节点被称为牵制节点, 其对应的边的增益 $r_i = 1$, 否则 $r_i = 0$. 在图中顶点的度是指与该顶点相连的边的个数, 对于有向图, 入度矩阵 D 与图拉普拉斯矩阵 L 为^[20]: $D = \text{diag}(\bar{d}_1, \dots, \bar{d}_N) \in \mathbf{R}^{N \times N}$, $L = D - A \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 其中, $\bar{d}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$.

2.2 相关引理

引理 1^[21] 考虑如下连续非线性系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}), \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \quad (1)$$

假设存在可微的正定函数 $V(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, 且存在常数 $\rho > 0, C \geq 0$, 有以下不等式成立:

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \leq -\rho V + C \quad (2)$$

则系统是渐近稳定的.

引理 2^[22] 以下不等式成立:

$$mn \leq \frac{1}{h} m^h + \frac{1}{l} n^l \quad (3)$$

式中 m, n, h 和 l 为正实数, 且满足 $\frac{1}{h} + \frac{1}{l} = 1$.

2.3 自适应模糊逻辑系统

自适应模糊逻辑系统(Adaptive Fuzzy Logic System, AFLS)能对系统所含有的非线性、未知扰动以及

部分参数进行逼近. $F(\mathbf{x})$ 的模糊逼近如下^[23]:

$$F(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{S}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$\text{式中, } \mathbf{S}(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{c=1}^i \xi_{F_c^{kj}}(x_c)}{\sum_{j=1}^M \prod_{c=1}^i \xi_{F_c^{kj}}(x_c)}, \xi_{F_c^{kj}}(x_c) = \gamma_c^{kj} \exp\left[-\frac{(x_c - \bar{x}_c^{kj})^2}{2(\bar{\theta}_c^{kj})^2}\right],$$

$\xi_{F_c^{kj}}$ 代表系统输入的隶属度函数, $\boldsymbol{\psi} = (\psi_1 \ \psi_2 \ \dots \ \psi_N)^T$ 是自适应可调参数向量, M 为模糊规则的总数, x_c 是模糊逻辑系统的输入. 根据万能逼近定理可得:

$$\sup_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} |F(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{S}(\mathbf{x})| \leq \vartheta, \forall \vartheta > 0 \quad (5)$$

式中, ϑ 是最小模糊逼近误差.

2.4 微电网中分布式电源大信号动态模型

微电网控制框图如图 1 所示, 图中包含通信层、物理层(电压源、逆变器、下垂控制等).

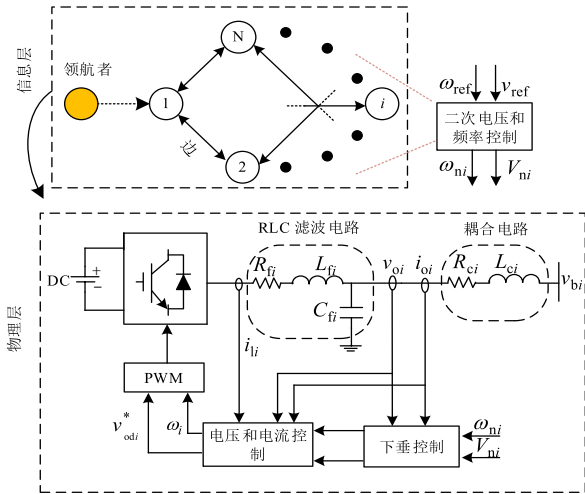


图 1 微电网分布式电源控制框图

图 1 中, v_{oi} , i_{oi} 分别为第 i 个 RLC 滤波电路的输出电压和电流; i_{li} 是第 i 个逆变器输出电流, v_{bi} 为第 i 个分布式电源母线电压, R_{fi} , L_{fi} , C_{fi} 为第 i 个 RLC 滤波器的电阻、电感、电容, R_{ci} , L_{ci} 为第 i 个耦合线路的电阻和电感, ω_i 为第 i 个下垂控制产生的角频率.

图 1 所示的微电网分布式电源大信号状态空间表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i)u_i \\ y_i &= \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{x}_i = [\phi_{di} \ \gamma_{di} \ P_i \ Q_i \ i_{ldi} \ i_{lqi} \ v_{odi} \ v_{oqi} \ i_{odi} \ i_{oqi}]^T$ 为状态, u_i 为输入, y_i 为输出, 各变量含义及 $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i)$, $\mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i)$ 和 $\mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i)$ 见文献[24, 25].

下垂控制方程如下^[26]:

$$\omega_i = \omega_{ni} - k_{P_i} P_i \quad (7)$$

$$v_{odi} = V_{ni} - k_{Q_i} Q_i \quad (8)$$

$$v_{oqi} = 0 \quad (9)$$

式中, k_{P_i} 和 k_{Q_i} 是频率和电压下垂控制系数, P_i 和 Q_i 可由式(10)和(11)得到:

$$P_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{odi} i_{odi} + v_{oqi} i_{oqi}) \quad (10)$$

$$Q_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{oqi} i_{odi} - v_{odi} i_{oqi}) \quad (11)$$

式中, ω_{ci} 是低通滤波截止频率.

由于下垂控制的电压和频率调节会产生偏差, 因此需对电压频率进行调节.

3 攻击下分布式电压控制器的设计

本节的主要目标是基于多智能体一致性方法, 采用正切型障碍 Lyapunov 函数和自适应动态面法设计控制律以实现: (1) 各 DG 的输出电压 v_{odi} 与参考电压 v_{ref} 一致、全状态受限和无功功率精确分配. (2) 对微电网系统反馈线性化后的一些参变量采用自适应模糊系统进行估计, 以提高控制器的自适应能力. (3) 考虑网络攻击对系统的影响, 设计攻击观测器对微电网受到的攻击进行观测, 然后将观测值引入控制器以补偿攻击对系统稳定性的影响.

3.1 攻击模型与观测器设计

对系统式(6)采用李导数反馈线性化得:

$$\dot{y}_{i,1} = y_{i,2} \quad (12)$$

$$\dot{y}_{i,2} = F_i(\mathbf{x}_i) + G_i(\mathbf{x}_i)u_i \quad (13)$$

式中, $y_{i,1} = y_i = v_{odi}$; $u_i = V_{ni}$; $G_i(\mathbf{x}_i) = L_{g_i} L_{f_i} h_i(\mathbf{x}_i) = \frac{\partial(L_{f_i} h_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i) = \frac{k_{P_{ci}} k_{P_{vi}} + 1}{C_{fi} L_{fi}}$; $F_i(\mathbf{x}_i) = L_{f_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i) = \frac{\partial(L_{f_i} h_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) = (-\omega_i^2 - \frac{k_{P_{ci}} k_{P_{vi}} + 1}{C_{fi} L_{fi}} - \frac{1}{C_{fi} L_{ci}}) v_{odi} - \frac{R_{fi} + k_{P_{ci}}}{C_{fi} L_{fi}} i_{ldi} + \frac{k_{P_{ci}} k_{L_{vi}}}{C_{fi} L_{fi}} \phi_{di} + \frac{R_{ci}}{C_{fi} L_{ci}} i_{odi} + \frac{2\omega_i - \omega_b}{C_{fi}} i_{lqi} + \frac{k_{L_{ci}} \gamma_{di}}{C_{fi} L_{fi}} - \frac{k_{P_{ci}} k_{P_{vi}} k_{Q_i}}{C_{fi} L_{fi}} Q_i + \frac{v_{bdi}}{C_{fi} L_{ci}} - \frac{2\omega_i}{C_{fi}} i_{oqi} + \frac{k_{P_{ci}}}{C_{fi} L_{fi}} H_i i_{odi}$, 其中, ω_b 是微电网额定频率; $k_{P_{ci}}$, $k_{P_{vi}}$, $k_{L_{ci}}$, $k_{L_{vi}}$ 分别表示电压和电流控制回路的比例、积分增益.

对 $F_i(\mathbf{x}_i)$ 采用自适应模糊系统进行估计如下:

$$F_i(\mathbf{x}_i) = \boldsymbol{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \vartheta_i \quad (14)$$

式中, 可调参数向量 $\boldsymbol{\psi}_i$ 、模糊基向量 $\mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i)$ 和估计误差 ϑ_i 的含义见 2.3 节, 是 2.3 节中相应各量的扩展, 即下标加 i , 表示对每个 $F_i(\mathbf{x}_i)$ 的逼近.

将式(14)代入式(13), 并考虑攻击对微电网系统的影响, 式(13)可改写为:

$$\dot{y}_{i,2} = \boldsymbol{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \vartheta_i + G_i(\mathbf{x}_i)u_i + \delta_{vi} \quad (15)$$

其中 δ_{vi} 是注入微电网电压控制的攻击信号, 可以使常值也可以是变量.

假设 1 式(15)中攻击 δ_{vi} 以及它的导数 $\dot{\delta}_{vi}$ 是有界的,且设 δ_{vi} 的界为 $\chi_i > 0$, 则有 $|\delta_{vi}| \leq \chi_i$.

针对系统式(15),设计攻击观测器为:

$$\dot{\hat{\delta}}_{vi} = \hat{w}_{vi} + \kappa_{vi} y_{i,2} \quad (16)$$

$$\dot{\hat{w}}_{vi} = -\kappa_{vi} (\hat{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + G_i(\mathbf{x}_i) u_i + \hat{\delta}_{vi}) \quad (17)$$

式中, \hat{w}_{vi} 是攻击观测器的状态, $\hat{\delta}_{vi}$ 是 δ_{vi} 的估计; $\hat{\psi}_i$ 是 ψ_i 的估计; κ_{vi} 是正常数.

根据式(16)和式(17)可得观测误差方程:

$$\dot{\tilde{\delta}}_{vi} = \tilde{\delta}_{vi} - \kappa_{vi} (\tilde{\delta}_{vi} + \tilde{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \mathcal{G}_i) \quad (18)$$

式中, $\tilde{\psi}_i = \psi_i - \hat{\psi}_i$, $\tilde{\delta}_{vi} = \delta_{vi} - \hat{\delta}_{vi}$.

与干扰和故障相比,攻击对控制器提出了更高的要求,因为它们都是随机的,不易被发现.本文基于多智能体系统,采用 BLF-Tan 设计一种自适应动态面控制器,从而保证闭环系统中的所有信号都有界,跟踪误差收敛于零.

3.2 电压控制器设计

采用自适应动态面法对控制器设计,利用一致性协议,分布式电源输出电压误差函数为:

$$e_{i,1} = \bar{d}_i (y_{i,1} - y_{j,1}) + r_i (y_{i,1} - y_0) + \bar{d}_i (k_{Q_i} Q_i - k_{Q_j} Q_j) \quad (19)$$

$$e_{i,2} = y_{i,2} - \lambda_{i,1} \quad (20)$$

式中, $y_0 = v_{ref}$, $\bar{d}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$, $r_i > 0$, $\lambda_{i,1}$ 是为了防止微分爆炸问题,避免对虚拟控制量反复求导,降低计算复杂度而引入的一阶滤波器输出.

设 $\eta_{i,1}$ 是一阶滤波器的输出误差,其表达式如下:

$$\eta_{i,1} = \lambda_{i,1} - \alpha_{i,1} \quad (21)$$

式中, $\alpha_{i,1}$ 是虚拟控制量,将在后文给出.

步骤 1 选择第 1 个 BLF-Tan 保证系统状态满足预先设定的约束:

$$V_{i,1} = \frac{p_{i1}^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_{i,1}^2}{2p_{i1}^2}\right) \quad (22)$$

式中, p_{i1} 为误差 $e_{i,1}$ 的边界值,满足 $|e_{i,1}| \leq p_{i1}$.

对式(22)求导并将式(19)~(21)代入得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,1} &= \sec^2\left(\frac{\pi e_{i,1}^2}{2p_{i1}^2}\right) e_{i,1} \dot{e}_{i,1} \\ &= b_{i,1} [(\bar{d}_i + r_i)(e_{i,2} + \eta_{i,1} + \alpha_{i,1}) - r_i \dot{y}_0 \\ &\quad - \bar{d}_i y_{j,2} + \bar{d}_i (k_{Q_i} \dot{Q}_i - k_{Q_j} \dot{Q}_j)] \end{aligned} \quad (23)$$

式中, $b_{i,1} = \sec^2\left(\frac{\pi e_{i,1}^2}{2p_{i1}^2}\right) e_{i,1}$.

根据引理 2,有:

$$(\bar{d}_i + r_i) b_{i,1} \eta_{i,1} \leq \frac{1}{2} (\bar{d}_i + r_i)^2 b_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \eta_{i,1}^2 \quad (24)$$

对式(24)整理得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,1} &\leq b_{i,1} [(\bar{d}_i + r_i)(e_{i,2} + \alpha_{i,1}) - \bar{d}_i y_{j,2} \\ &\quad + \bar{d}_i (k_{Q_i} \dot{Q}_i - k_{Q_j} \dot{Q}_j)] + \frac{1}{2} (\bar{d}_i + r_i)^2 b_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \eta_{i,1}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

取虚拟控制量 $\alpha_{i,1}$ 为:

$$\begin{aligned} \alpha_{i,1} &= -\frac{1}{2} (\bar{d}_i + r_i) b_{i,1} - \frac{1}{\bar{d}_i + r_i} [k_{i,1} b_{i,1} - \bar{d}_i y_{j,2}] \\ &\quad + \frac{1}{\bar{d}_i + r_i} \bar{d}_i (k_{Q_i} \dot{Q}_i - k_{Q_j} \dot{Q}_j) \end{aligned} \quad (26)$$

式中, $k_{i,1}$ 是正常数.

将式(26)代入式(25)得:

$$\dot{V}_{i,1} \leq (\bar{d}_i + r_i) b_{i,1} e_{i,2} - k_{i,1} b_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \eta_{i,1}^2 \quad (27)$$

虚拟控制信号 $\alpha_{i,1}$ 通过低通滤波器的时间常数为 $\tau_{i,1}$, $\tau_{i,1}$ 设计为^[27]:

$$\tau_{i,1} \dot{\lambda}_{i,1} + \lambda_{i,1} = \alpha_{i,1} \quad (28)$$

由式(21)和式(28)整理得:

$$\dot{\eta}_{i,1} = -\frac{\eta_{i,1}}{\tau_{i,1}} - \dot{\alpha}_{i,1} = -\frac{\eta_{i,1}}{\tau_{i,1}} + \varphi_{i,1} \quad (29)$$

步骤 2 选择第 2 个 BLF-Tan:

$$V_{i,2} = V_{i,1} + \frac{p_{i2}^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_{i,2}^2}{2p_{i2}^2}\right) + \frac{\tilde{\delta}_{vi}^2}{2} + \frac{1}{2} \eta_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\psi}_i^T \mathfrak{R}_i^{-1} \tilde{\psi}_i \quad (30)$$

式中, \mathfrak{R}_i 是正定矩阵, p_{i2} 为误差 $e_{i,2}$ 的边界值,满足 $|e_{i,2}| \leq p_{i2}$.

对式(30)求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,2} &= \dot{V}_{i,1} + \sec^2\left(\frac{\pi e_{i,2}^2}{2p_{i2}^2}\right) e_{i,2} \dot{e}_{i,2} + \tilde{\delta}_{vi} \dot{\delta}_{vi} + \eta_{i,1} \dot{\eta}_{i,1} + \tilde{\psi}_i^T \mathfrak{R}_i^{-1} \dot{\tilde{\psi}}_i \\ &= \dot{V}_{i,1} + \eta_{i,1} \left(-\frac{\eta_{i,1}}{\tau_{i,1}} + \varphi_{i,1}\right) - \tilde{\psi}_i^T \mathfrak{R}_i^{-1} \dot{\tilde{\psi}}_i \\ &\quad + b_{i,2} [G_i(\mathbf{x}_i) u_i + \psi_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \mathcal{G}_i + \tilde{\delta}_{vi} + \dot{\delta}_{vi} - \dot{\lambda}_{i,1}] \\ &\quad + \tilde{\delta}_{vi} [\dot{\delta}_{vi} - \kappa_{vi} \tilde{\delta}_{vi} - \kappa_{vi} (\tilde{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \mathcal{G}_i)] \end{aligned} \quad (31)$$

式中, $b_{i,2} = \sec^2\left(\frac{\pi e_{i,2}^2}{2p_{i2}^2}\right) e_{i,2}$.

根据引理 2 和假设 1 有:

$$\eta_{i,1} \varphi_{i,1} \leq \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \eta_{i,1}^2 \quad (32)$$

$$b_{i,2} (\mathcal{G}_i + \tilde{\delta}_{vi}) + \tilde{\delta}_{vi} \dot{\delta}_{vi} \leq b_{i,2}^2 + \tilde{\delta}_{vi}^2 + \frac{1}{2} \chi_i^2 + \frac{1}{2} \mathcal{G}_i^2 \quad (33)$$

$$\begin{aligned} &-\kappa_{vi} \tilde{\delta}_{vi} (\tilde{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \mathcal{G}_i) \\ &\leq \kappa_{vi} \left(\frac{\tilde{\delta}_{vi}}{\beta_{vi}}\right)^2 + \frac{1}{2} \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 \tilde{\psi}_i^T \tilde{\psi}_i \mathbf{S}_i^2(\mathbf{x}_i) + \frac{1}{2} \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 \mathcal{G}_i^2 \end{aligned} \quad (34)$$

式中, β_{vi} 是正常数.

将式(32)~(34)代入式(31)得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{i,2} \leq & \dot{V}_{i,1} + b_{i,2}[G_i(\mathbf{x}_i)u_i + \hat{\delta}_{vi} - \dot{\lambda}_{i,1}] \\
& + \eta_{i,1}^2 \left(-\frac{1}{\tau_{i,1}} + \frac{1}{2}\right) - \left(\kappa_{vi} - \frac{\kappa_{vi}}{\beta_{vi}^2} - 1\right) \delta_{vi}^2 \\
& + \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + b_{i,2}^2 - \tilde{\psi}_i^T \mathfrak{R}_i^{-1} \dot{\hat{\psi}}_i + b_{i,2} \psi_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) \\
& + \frac{1}{2} \chi_i^2 + \frac{1}{2} \vartheta_i^2 + \frac{1}{2} \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 [\tilde{\psi}_i^T \tilde{\psi}_i \mathbf{S}_i^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \vartheta_i^2]
\end{aligned} \quad (35)$$

设计控制器 u_i 和自适应律 $\dot{\hat{\psi}}_i$ 分别为:

$$\begin{aligned}
u_i = & G_i^{-1}(\mathbf{x}_i) [-k_{i,2} b_{i,2} - \hat{\delta}_{vi} + \dot{\lambda}_{i,1} - \hat{\psi}_i^T \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i)] \\
& - G_i^{-1}(\mathbf{x}_i) \left(b_{i,2} + \frac{b_{i,1} e_{i,2} (\bar{d}_i + r_i)}{b_{i,2}} \right)
\end{aligned} \quad (36)$$

$$\dot{\hat{\psi}}_i = \mathfrak{R}_i(\mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) b_{i,2} - \sigma_i \hat{\psi}_i) \quad (37)$$

式中, $k_{i,2}, \sigma_i$ 是正数.

通过式 (36) 和式 (37), 将式 (27) 代入式 (35) 整理得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{i,2} \leq & \dot{V}_{i,1} - k_{i,2} b_{i,2}^2 - \eta_{i,1}^2 \left(\frac{1}{\tau_{i,1}} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 \\
& - (\bar{d}_i + r_i) b_{i,1} e_{i,2} + \frac{1}{2} \chi_i^2 - \left(\kappa_{vi} - \frac{\kappa_{vi}}{\beta_{vi}^2} - 1\right) \delta_{vi}^2 \\
& + \sigma_i \tilde{\psi}_i^T \hat{\psi}_i + \frac{1}{2} \vartheta_i^2 + \frac{1}{2} \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 [\tilde{\psi}_i^T \tilde{\psi}_i \mathbf{S}_i^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \vartheta_i^2] \\
\leq & -k_{i,1} b_{i,1}^2 - k_{i,2} b_{i,2}^2 - \eta_{i,1}^2 \left(\frac{1}{\tau_{i,1}} - 1\right) + \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 \\
& - \left(\kappa_{vi} - \frac{\kappa_{vi}}{\beta_{vi}^2} - 1\right) \delta_{vi}^2 - \frac{\sigma_i}{2} \tilde{\psi}_i^T \tilde{\psi}_i + \frac{\sigma_i}{2} \psi_i^T \psi_i \\
& + \frac{1}{2} \chi_i^2 + \frac{1}{2} \vartheta_i^2 + \frac{1}{2} \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 [\tilde{\psi}_i^T \tilde{\psi}_i \mathbf{S}_i^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) + \vartheta_i^2]
\end{aligned} \quad (38)$$

对式 (38) 整理得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{i,2} \leq & -k_{i,1} b_{i,1}^2 - k_{i,2} b_{i,2}^2 - \eta_{i,1}^2 \left(\frac{1}{\tau_{i,1}} - 1\right) + \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 \\
& - \left(\kappa_{vi} - \frac{\kappa_{vi}}{\beta_{vi}^2} - 1\right) \delta_{vi}^2 + \frac{\sigma_i}{2} \psi_i^T \psi_i + \frac{1}{2} \chi_i^2 \\
& + \frac{\kappa_{vi} \beta_{vi}^2 + 1}{2} \vartheta_i^2 - \frac{\sigma_i - \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 \mathbf{S}_i^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i)}{2 \lambda_{\max}(\mathfrak{R}_i^{-1})} \tilde{\psi}_i^T \mathfrak{R}_i^{-1} \tilde{\psi}_i
\end{aligned} \quad (39)$$

式中, $\lambda_{\max}(\cdot)$ 表示矩阵的最大特征值.

对于式 (39), 要想使其稳定, 则 $\tau_{i,1}, \beta_{vi}, \kappa_{vi}, \sigma_i$ 应选择合适的参数值, 使得 $\frac{1}{\tau_{i,1}} - 1 > 0, \kappa_{vi} - \frac{\kappa_{vi}}{\beta_{vi}^2} - 1 > 0, \sigma_i - \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 \mathbf{S}_i^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i) > 0$.

设 $C_i = \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \frac{\sigma_i}{2} \psi_i^T \psi_i + \frac{1}{2} \chi_i^2 + \frac{\kappa_{vi} \beta_{vi}^2 + 1}{2} \vartheta_i^2$, 根据引理 1, 对式 (39) 整理得:

$$\dot{V}_{i,2} \leq -\rho_i' V_{i,2} + C_i \quad (40)$$

式中, 令 $\rho_i' = 2\rho_i$, 其中 $\rho_i = \min\{k_{i,1}, k_{i,2}, \kappa_{vi} - \frac{\kappa_{vi}}{\beta_{vi}^2} - 1, \frac{\sigma_i - \kappa_{vi} \beta_{vi}^2 \mathbf{S}_i^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{x}_i)}{2 \lambda_{\max}(\mathfrak{R}_i^{-1})}, \frac{1}{\tau_{i,1}} - 1\}$, 对式 (40) 积分得:

$$V_{i,2}(t) \leq e^{-\rho_i' t} V_{i,2}(0) + \frac{C_i}{\rho_i} (1 - e^{-\rho_i' t}) \leq V_{i,2}(0) + \frac{C_i}{\rho_i} \quad (41)$$

为了保证系统状态变量收敛到零附近区域, 并使极限界任意小, 合理调整设计参数 ρ_i, C_i . 所提出的攻击下全状态受限电压控制器框图如图 2 所示.

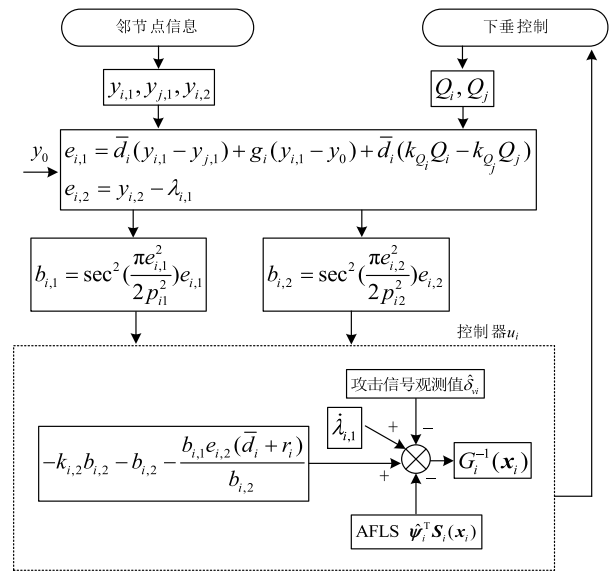


图 2 攻击下全状态受限自适应模糊二次电压控制框图

频率控制器的设计与电压设计类似, 鉴于篇幅原因省略.

4 仿真与结果分析

为了验证所提出的考虑攻击下全状态受限的自适应模糊二次电压/频率控制的有效性, 在 MATLAB/Sim Power Systems 软件环境下, 搭建每相电压为 380 V 频率为 50 Hz 的交流微电网^[28]. DG 单元之间的数据交换必须通过通信图来执行, 图 3 是分布式电源的通信拓扑图, 其中 DG1 接收来自虚拟领航者的参考消息, 当第 i 个分布式电源具有虚拟领航者的参考信息时, 增益 $r_i = 1$, 否则为零. 图 4 所示是交流微电网的简化通信链路框图, 该框图由 4 个基于分布式电源的逆变器、4 个负载、3 条通信线路以及 RL 线路组成.

表 1 提供了分布式电源模型、负载通信线路以及 RL 电路的一些参数.

电压控制器参数选择为: $\kappa_{vi} = 5, p_{i2} = 100, k_{i,1} = 60, k_{i,2} = 120, \tau_{i,1} = 0.01, R_i = 0.01, \sigma_i = 0.1, v_{ref} = 380 \text{ V}, i = 1, 2, 3, 4$. 频率控制器参考输入为: $\omega_{ref} = 50 \text{ Hz}$. 下垂系数为: $k_{p_1} = k_{p_2} = 6.25 \times 10^{-5}, k_{p_3} = k_{p_4} = 12.5 \times 10^{-5}, k_{Q_i} =$

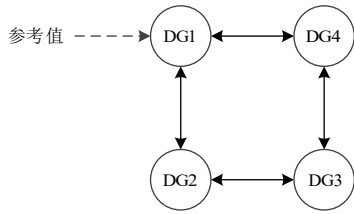


图3 分布式电源的通信拓扑图

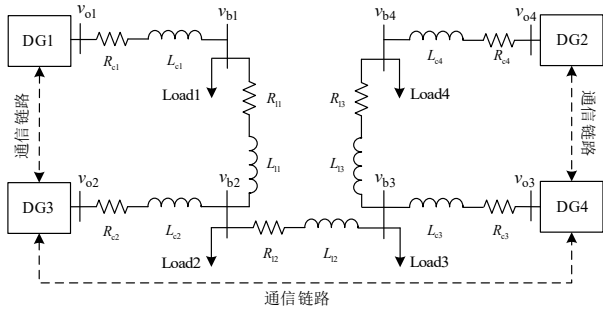


图4 交流微电网的简化通信链路框图

表1 分布式电源的模型参数

	DG1&DG2		DC3&DG4
	DGs	R_c	0.03 Ω
L_c		2.66 mH	2.66 mH
R_l		0.1 Ω	0.1 Ω
L_l		1.35 mH	1.35 mH
C_l		50 μF	50 μF
Lines		R_{li}	L_{li}
	Line1	0.23 Ω	314 μH
	Line2	0.35 Ω	1 847 μH
	Line3	0.23 Ω	314 μH
Loads		R_l	L_l
	Load 1	8 Ω	25.6 mH
	Load 2	18 Ω	32 mH
	Load 3	20 Ω	32 mH
	Load 4	20 Ω	58 mH

3.5×10^{-4} , $k_{Q_2} = 4 \times 10^{-4}$, $k_{Q_3} = k_{Q_4} = 4.5 \times 10^{-4}$. 在仿真中,为了更好的观测输出电压以及频率,取电压和频率的误差约束界值分别为: $p_{i1} = 15$, $k_{\omega_i} = 0.5$; 即满足: $-15 \text{ Hz} \leq e_{i,1} \leq 15 \text{ Hz}$, $-0.5 \text{ Hz} \leq e_{\omega_i} \leq 0.5 \text{ Hz}$, 其中, k_{ω_i} 为误差 e_{ω_i} 的边界值, 满足 $|e_{\omega_i}| \leq k_{\omega_i}$.

4.1 负载变化以及阻抗线路故障下的性能测试

仿真时间设置为 5 s, 当 $t=0.0 \text{ s}$ 时, 只有下垂控制; 当 $t=0.5 \text{ s}$ 时, 二次控制被激活, 所提出的控制器开始运行; 当 $t=1.0 \text{ s}$ 时, 负载 2 增大 50%; 当 $t=2.0 \text{ s}$ 时, 负载 2 恢复至原始值; 当 $t=3.5 \text{ s}$ 时, Line3 断开; 当 $t=4.0 \text{ s}$ 时, Line3 重新连接. 考虑模型含有 10% 的随机扰动, 所提

出的电压和频率控制的仿真结果如图 5 所示.

图 5(a) 和 (b) 是未考虑攻击状态下的微电网输出电压和频率, 0.5 s 前只有下垂控制, 此时电压频率稳定但没有达到参考输入值, 0.5 s 后在所提出的控制方案下, 输出电压和频率与参考输入实现一致且稳定. 当系统处于负载变化情况下, 输出电压和频率分别在 0.4 s 和 0.3 s 恢复至原来值. DG4 的输出电压和频率在阻抗线路故障时, 只服务于负载 4, 而 DG1、DG2 和 DG3 均摊微电网中的总负载, 系统保持稳定且输出电压和频率未超过预设的受限值, 即 $365 \text{ V} \leq v_{odi} \leq 395 \text{ V}$, $49.5 \text{ Hz} \leq \omega_i \leq 50.5 \text{ Hz}$. 图 5(c) 和 (d) 是输出电压跟踪误差和所提出自适应频率控制跟踪误差, 从图可知, 系统电压和频率, 以及有功功率和无功功率状态变量收敛到零附近区域并保持稳定, 输出跟踪误差始终在 $-15 \text{ V} \leq e_{i,1} \leq 15 \text{ V}$, $-0.5 \text{ Hz} \leq e_{\omega_i} \leq 0.5 \text{ Hz}$ 内, 满足状态约束要求. 图 5(e)~图 5(h) 是有功功率和无功功率以及它们的功率比, 在下垂系数给定条件下, 0.5 s 前, 有功功率能实现较好的分配, 在所提出控制方案下, 有功功率和无功功率都能实现精确的分配. 本文采用的控制方案无论是在负载变化还是在通信中断条件下, 仍然能保证系统稳定运行.

4.2 即插即用下的性能测试

当 $t=1.0 \text{ s}$ 时, 负载 2 增大 50%; 当 $t=2.0 \text{ s}$ 时, 负载 2 减小 50%; 当 $t=3.5 \text{ s}$ 时, DG3 断开; 当 $t=4.0 \text{ s}$ 时, DG4 重新连接. 其他参数设置与 4.1 节相同, 所提出的电压和频率控制的仿真结果如图 6 和图 7 所示, 图 8 是文献[5]未采用状态受限的仿真结果, 用以比较.

如图 6(a) 和 (b), 电压和频率始终在 $365 \text{ V} \leq v_{odi} \leq 395 \text{ V}$, $49.5 \text{ Hz} \leq \omega_i \leq 50.5 \text{ Hz}$ 内, 即使在即插即用或者大扰动条件下系统仍然具有良好的鲁棒性. 在负载增加或者减小时, 系统在短时间内稳定地调节频率、电压, 使电压和频率恢复至参考值. 因此, 实现了微电网即插即用的功能. 为了更好的体现所提出的电压全状态受限和频率状态受限控制协议, 将约束界值调整到 $360 \text{ V} \leq v_{odi} \leq 400 \text{ V}$, $49 \text{ Hz} \leq \omega_i \leq 51 \text{ Hz}$, 仿真结果如图 7(a) 和 (b) 所示, 电压和频率在受限范围内, 输出跟踪误差始终在 $-20 \text{ V} \leq e_{i,1} \leq 20 \text{ V}$, $-1 \text{ Hz} \leq e_{\omega_i} \leq 1 \text{ Hz}$ 内, 满足所提出控制方案的状态约束性能. 图 8 是文献[5]采用的方法在即插即用或者大扰动条件下的性能, 从图 8 可以看出, 电压和频率在即插即用或者大扰动情况下, 系统波动变化较大, 电压与参考值最大相差 28 V, 频率与参考值最大相差 3.9 Hz. 这可能会严重影响电网的稳定运行. 而本文采用的控制方案无论是在参数变化、即插即用还是在大扰动以及不同受限范围条件下, 仍然能保证系统稳定运行.

4.3 常值攻击下的性能测试

当 $t=1 \text{ s}$ 时, 负载 2 增大 50%; 当 $t=2 \text{ s}$ 时, 负载 3 减

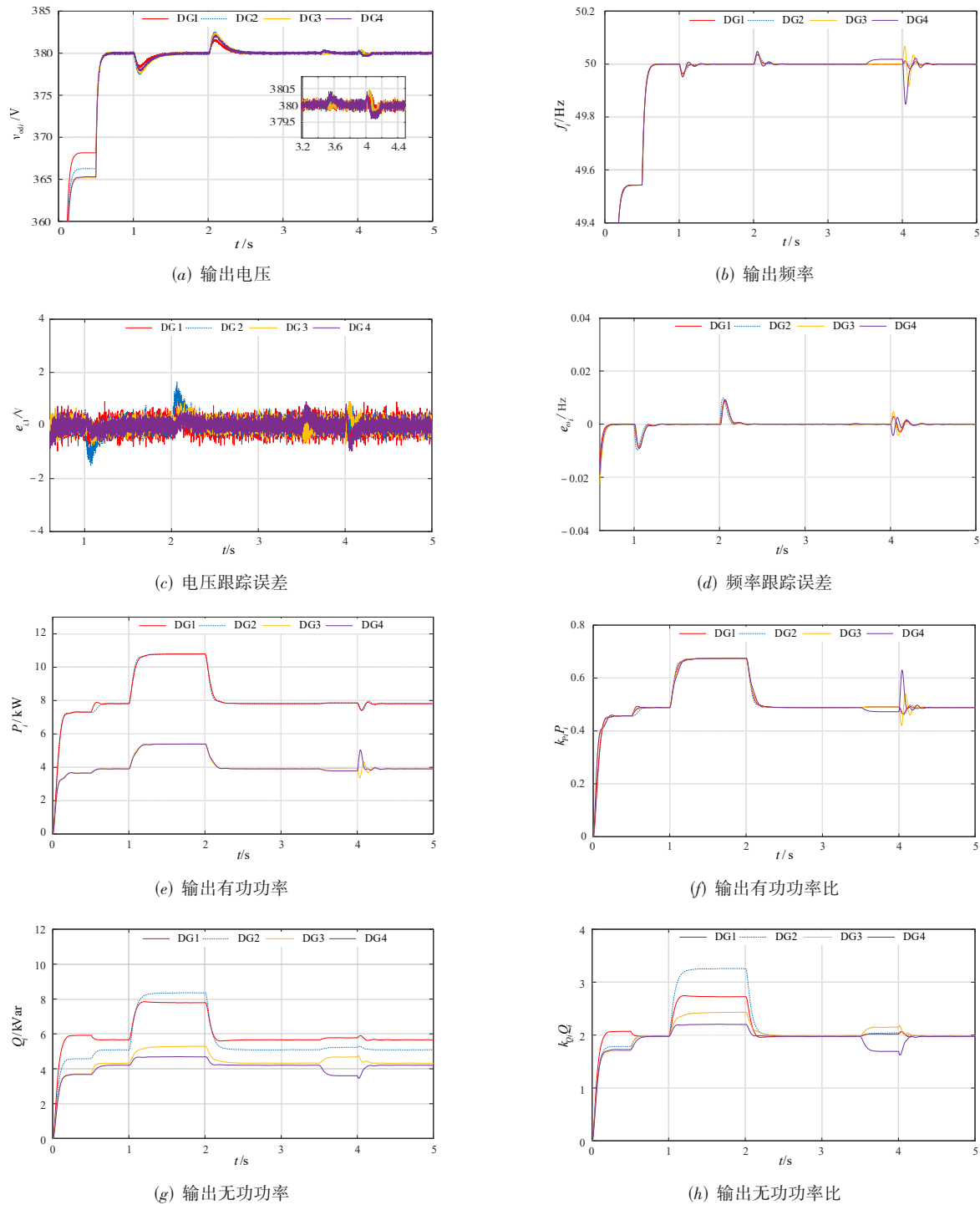
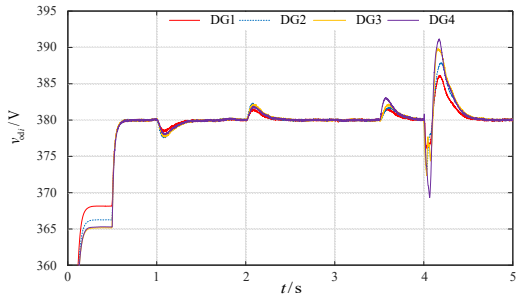


图5 所提出的控制方案仿真结果

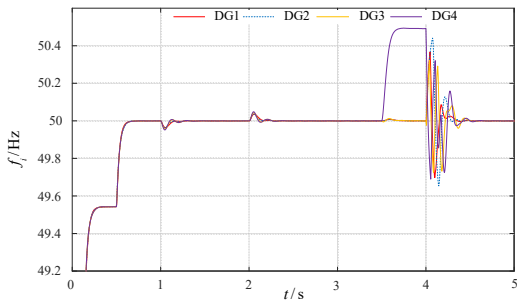
小30%;当 $t=3$ s时,对电压和频率模型分别加入常值为0.8和0.3的攻击.其他参数设置与4.1节相同,所提控制方案的仿真结果如图9所示,为显示所提控制器的优越性,与文献[16]采用的控制方法相比较,其结果如图10所示.

从图9中可以看出,当 $t=3$ s时,微电网遭遇攻击,

所设计的攻击观测器可对常值攻击进行补偿,使电压和频率快速稳定并恢复到参考值,电压变化在0.2 V左右,在攻击作用下频率最大变化仅为0.02 Hz,并在0.2 s左右恢复至50 Hz,系统一直保持稳定.由图10可知,文献[16]所提出的方法,虽然在常值攻击下输出电压和频率还能实现一致,但已经与标称值产生偏离,电

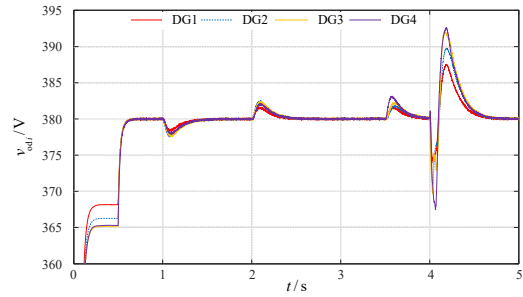


(a) 输出电压

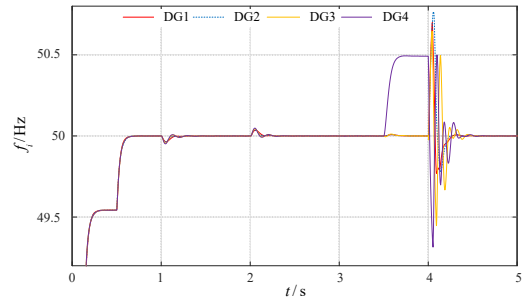


(b) 输出频率

图6 误差界值分别为 $p_{i1} = 15, k_{\omega_i} = 0.5$ 的性能

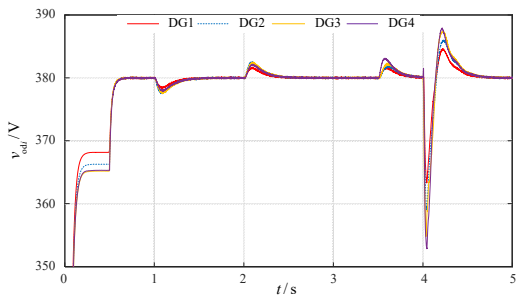


(a) 输出电压

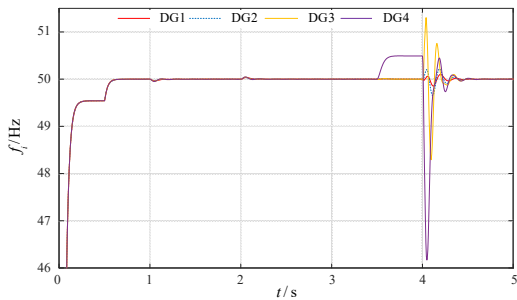


(b) 输出频率

图7 误差界值分别为 $p_{i1} = 20, k_{\omega_i} = 1$ 的性能

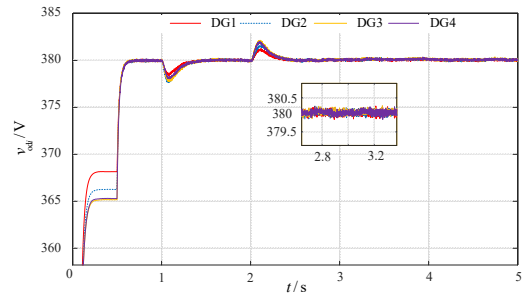


(a) 输出电压

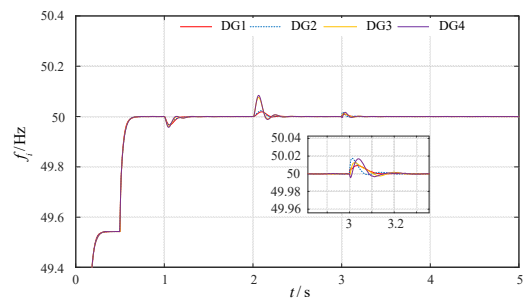


(b) 输出频率

图8 文献[5]中的即插即用下性能



(a) 输出电压



(b) 输出频率

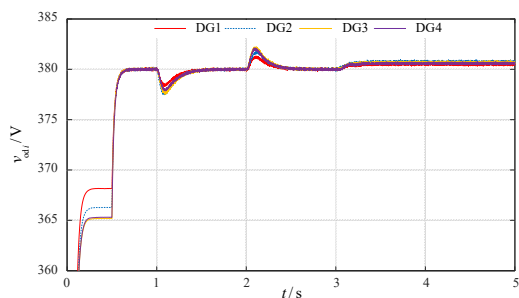
图9 常值攻击下所提控制器的性能

压与标称值一直相差 0.3 V, 频率偏离标称值 0.3 Hz, 系统长时间在这种环境下运行, 可能对系统稳定性造成影响. 因此, 本文提出的方法有效地抑制攻击对系统的影响且无论是在攻击或没有攻击状况下, 系统都

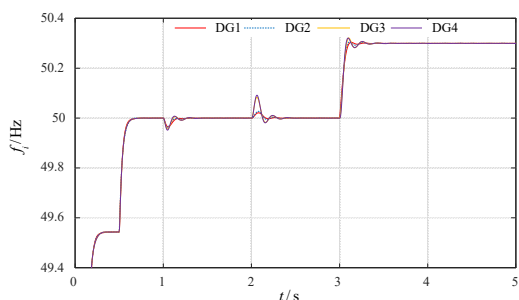
具有良好的稳定性、鲁棒性且输出电压和频率均在受限范围内.

4.4 非常值攻击下的性能测试

当 $t=1$ s 时, 负载 2 增大 50%; 当 $t=2$ s 时, 负载 3 减



(a) 输出电压

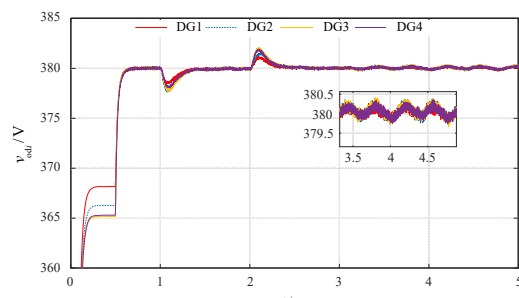


(b) 输出频率

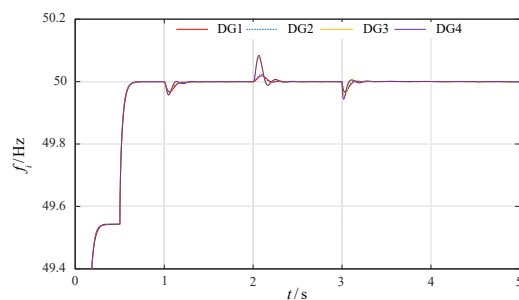
图10 文献[16]的方法在常值攻击下的性能

小30%;当 $t=3\text{ s}$ 时,向所设计的电压控制器和频率控制器分别加入 $\delta_{vm}=1.2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.5\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 的攻击.其他参数设置与4.1相同,所提出的控制协议的仿真结果如图11所示.图12是攻击为 $\delta_{vm}=0.5+2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.25+0.8\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 的仿真结果,在此情况下,文献[12]采用方法的仿真结果如图13所示.

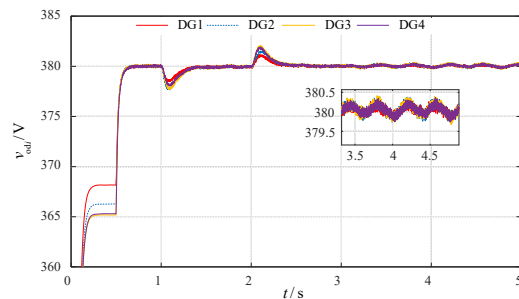
从图11(a)中可以看出,当 $t=3\text{ s}$ 时,微电网遭遇变量攻击,所提出的电压控制器在 $\delta_{vm}=1.2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.5\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 攻击下仍然能收敛到参考值附近的区域,偏差值为0.3 V,虽然不能消除攻击对系统的影响,但从图中可以看出,所设计的控制器能很好减弱攻击,系统能稳定运行.图11(b)可知,所提出的频率状态受限控制可以在约0.2 s时间内抵消攻击,使输出频率快速稳定并恢复到50 Hz,满足所设计的控制目标.图12是在攻击大小为 $\delta_{vm}=0.5+2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.25+0.8\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 下的结果,与图11相比,虽然攻击范围更广、更大,更具代表性,但所提出的方法仍能减弱或消除攻击,使系统在偏差可接受的范围内持续稳定.采用文献[12]方法的仿真结果如图13(a)所示.虽然在攻击作用下,电压能实现一致,但是电压与参考值偏差最大相差为2 V,系统一直处于较大的波动中,所提出的方法未能消除攻击.从图13(b)可知,文献[12]提出的方法在攻击作用下,频率已经偏离参考值,频率与参考值偏差最大为1.3 Hz,输出频率不稳定,系统稳



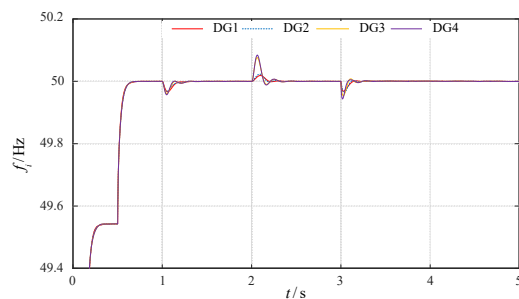
(a) 输出电压



(b) 输出频率

图11 在攻击为 $\delta_{vm}=1.2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.5\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 的仿真结果

(a) 输出电压



(b) 输出频率

图12 在攻击为 $\delta_{vm}=0.5+2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.25+0.8\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 的仿真结果

定性差,不能满足控制目标.因此由图11~图13可知,本文所提出的状态受限控制器能较好的减弱或抵消攻击对系统的影响,满足预期设计目标.

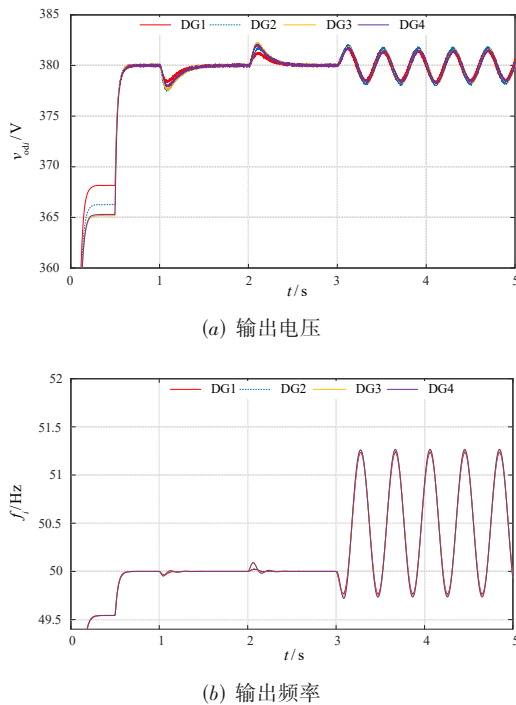


图13 文献[12]在 $\delta_{vm}=0.5+2\sin(16t)$, $\delta_{om}=0.25+0.8\sin(3.14t)$, $m=1, 2$ 攻击下的控制方法的性能

5 结论

考虑到交流微电网系统可能存在攻击的情况,提出了一种基于攻击补偿的分布式全状态受限自适应二次控制方法,将电压和频率恢复到参考值.设计了攻击观测器对微电网攻击进行观测,减弱甚至抵消攻击对系统的影响.采用BLF-Tan使输出电压和频率约束在受限范围内,并实现无功功率和有功功率分配问题,以及采用自适应模糊系统对模型中的参数不确定、未知变量进行模糊逼近,提高了控制器自适应能力.仿真表明,所提出的控制方法无论是负载变化和阻抗线路故障还是常值攻击和变量攻击下,电压和频率都能与参考输入实现一致,且系统满足状态受限性能,有功功率和无功功率能实现精确分配.与已有的一些成果相比,仿真验证了本文所提出控制器的有效性.

参考文献

- [1] MAHMOOD H, MICHAELSON D, JIANG J. Reactive power sharing in islanded microgrids using adaptive voltage droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3052-3060.
- [2] QIAN T, LIU Y, ZHANG W H, et al. Event-triggered updating method in centralized and distributed secondary controls for islanded microgrid restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1387-1395.
- [3] 周建萍,张健,茅大钧,等.孤岛微电网的分布式有限时间事件触发二次协调控制[J].电力自动化设备,2021,41(11): 127-132.
ZHOU J P, ZHANG J, MAO D J, et al. Distributed finite-time event-triggered secondary coordinated control of islanded microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 127-132. (in Chinese)
- [4] 张占强,窦春霞,岳东,等.考虑通信时延的事件触发电压分布式协同控制[J].中国电机工程学报,2020,40(17): 5426-5435.
ZHANG Z Q, DOU C X, YUE D, et al. Event-triggered voltage distributed cooperative control with communication delay [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5426-5435. (in Chinese)
- [5] WANG Y, NGUYEN T L, XU Y, et al. Cyber-physical design and implementation of distributed event-triggered secondary control in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5631-5642.
- [6] DONG X G, GAN J Q, WU H, et al. Self-triggered model predictive control of AC microgrids with physical and communication state constraints[J]. Energies, 2022, 15(3): 1170.
- [7] ZHANG C Y, DOU X B, ZHANG Z, et al. Inertia-enhanced distributed voltage and frequency control of low-inertia microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4270-4280.
- [8] XU Y L, GUO Q L, SUN H B, et al. Distributed discrete robust secondary cooperative control for islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3620-3629.
- [9] DEHKORDI N M, BAGHAEE H R, SADATI N, et al. Distributed noise-resilient secondary voltage and frequency control for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3780-3790.
- [10] GE P D, ZHU Y, GREEN T C, et al. Resilient secondary voltage control of islanded microgrids: An ESKBF-based distributed fast terminal sliding mode control approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1059-1070.
- [11] MAHDIAN D N, ZEINOLABEDIN M S. Distributed resilient adaptive control of islanded microgrids under sensor/actuator faults[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(3): 2699-2708.
- [12] LI X L, XU Q W, BLAABJERG F. Adaptive resilient secondary control for islanded AC microgrids with sensor faults [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5239-5248.
- [13] AFSHARI A, KARRARIM, BAGHAEE H R, et al. Distrib-

- uted fault-tolerant voltage/frequency synchronization in autonomous AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 3774-3789.
- [14] 于建立, 吴传斌, 冷赫, 等. 基于磁场分布特性的接地网故障诊断研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(3): 598-607.
YU J L, WU C B, LENG H, et al. Research on fault diagnosis of grounding grid based on magnetic field distribution characteristics[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(3): 598-607. (in Chinese)
- [15] 周奕涛, 张斌, 刘自豪. 基于多模态深度神经网络的应用层 DDoS 攻击检测模型[J]. *电子学报*, 2022, 50(2): 508-512.
ZHOU Y T, ZHANG B, LIU Z H. Application layer DDoS detection model based on multimodal deep learning neural network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(2): 508-512. (in Chinese)
- [16] ABHINAV S, MODARES H, LEWIS F L, et al. Synchrony in networked microgrids under attacks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6731-6741.
- [17] 陈郁林, 齐冬莲, 李真鸣, 等. 虚假数据注入攻击下的微电网分布式协同控制[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5): 97-103.
CHEN Y L, QI D L, LI Z M, et al. Distributed cooperative control of microgrid under false data injection attacks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5): 97-103. (in Chinese)
- [18] SHI M X, CHEN X, 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.
- [19] ZUO S, YUE D. Resilient containment of multigroup systems against unknown unbounded FDI attacks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(3): 2864-2873.
- [20] 饶宁, 许华, 蒋磊, 等. 基于多智能体深度强化学习的分布式协同干扰功率分配算法[J]. *电子学报*, 2022, 50(6): 1319-1330.
RAO N, XU H, JIANG L, et al. Allocation algorithm of distributed cooperative jamming power based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(6): 1319-1330. (in Chinese)
- [21] WANG F, CHEN B, LIU X P, et al. Finite-time adaptive fuzzy tracking control design for nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(3): 1207-1216.
- [22] ZHANG H G, LIU Y, WANG Y C. Observer-based finite-time adaptive fuzzy control for nontriangular nonlinear systems with full-state constraints[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(3): 1110-1120.
- [23] LIU Y, ZHANG H G, WANG Y C, et al. Adaptive fuzzy control for nonstrict-feedback systems under asymmetric time-varying full state constraints without feasibility condition[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(5): 976-985.
- [24] HU W Q, WU Z J, LV X X, et al. Robust secondary frequency control for virtual synchronous machine-based microgrid cluster using equivalent modeling[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 2879-2889.
- [25] NAVAS-FONSECA A, BURGOS-MELLADO C, GOMEZ J S, et al. Distributed predictive secondary control for imbalance sharing in AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 20-37.
- [26] ALGHAMDI S, SCHIFFER J, FRIDMAN E. Synthesizing sparse and delay-robust distributed secondary frequency controllers for microgrids[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(2): 691-703.
- [27] LI Y M, LI K W, TONG S C. Finite-time adaptive fuzzy output feedback dynamic surface control for MIMO nonstrict feedback systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(1): 96-110.
- [28] LOU G N, GU W, WANG J H, et al. Optimal design for distributed secondary voltage control in islanded microgrids: Communication topology and controller[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 968-981.

作者简介



吴忠强 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电系统的控制与优化.
E-mail: mewzq@163.com



程洪强 男, 1996年生, 四川乐山人, 硕士生, 研究方向为微电网控制.
E-mail: chqxi123@163.com