

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221459

蓄意流量攻击下基于确定网络演算的互联电网 自适应负荷频率控制策略

张亚健¹, 彭晨¹, 许东², 杨挺³, 郑敏¹

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 蓄意流量攻击通过抢占有限的网络带宽降低正常数据流的时效性。对于网络化负荷频率控制(load frequency control, LFC), 流量攻击将造成稳定裕度下降、频率偏差幅度上升甚至越限事故。现有控制方案一般采用单一且固定的控制器保证最大攻击强度下的渐进稳定性, 存在设计约束多、保守性大的缺点。因此提出了一种跟随攻击强度自适应调整控制器增益的 LFC 策略。首先, 基于确定性网络演算, 得到了无攻击场景下数据流传输延时上边界, 并预设了一系列表征不同攻击强度的传输延时范围。其次, 通过构造 Lyapunov 泛函, 推导了针对每个攻击强度的控制器设计准则。最后, 基于切换控制理论, 确定了所提自适应方案所能容忍的最大攻击强度变化频率。仿真表明, 与现有控制方案相比, 所提方法的频率偏差幅度可下降 12.60%, 区域控制误差的绝对值误差积分可下降 10.85%。
关键词: 负荷频率控制; 自适应控制; 确定网络演算; 电力信息物理系统; 流量攻击

Deterministic networked calculus-based adaptive load frequency control in interconnected power systems considering malicious traffic attacks

ZHANG Yajian¹, PENG Chen¹, XU Dong², YANG Ting³, ZHENG Min¹

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Xuji Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Malicious traffic attacks can reduce the timeliness of normal data flows by seizing the limited bandwidth. For networked load frequency control (LFC), traffic attacks will cause stability margin decline, frequency deviation rise or even over-limitation accidents. In most existing control schemes, a single and fixed controller is used to ensure asymptotic stability under maximum attack intensity. This has disadvantages such as many design constraints and great conservatism. A novel LFC strategy is proposed to adaptively adjust the controller gain according to attack intensity. First, based on deterministic network calculus, the upper data transmission delay bound in a no-attack scenario is obtained. Then a series of transmission delay ranges representing different attack intensities are preset. Second, by constructing a Lyapunov function, controller design criteria for each attack intensity are derived. Finally, in a switched control framework, the maximum attack switching frequency that the proposed adaptive scheme can tolerate is derived. Simulation results show that compared with the existing schemes, the frequency deviation amplitude with the proposed method can be reduced by 12.60%, and the integral of the absolute error of the area control error can be decreased by 10.85%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62103254).

Key words: load frequency control; adaptive control; deterministic network calculus; cyber physical system; traffic attack

0 引言

在电力系统中, 有功功率的供需不平衡将造成

频率偏离额定值^[1]。为避免持续性频率偏差对电力系统安全经济运行的不利影响, 电力控制中心一般通过负荷频率控制(load frequency control, LFC)实时调节发电机组的有功功率出力, 实现在允许频率偏差范围内的功率供需平衡^[2]。

随着电网复杂程度和互联规模的上升, 控制中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62103254); 国网江苏省电力有限公司科技项目资助(J2021203)

心需要利用通信网络收集发电机组的运行状态并下达控制指令^[3-4]。然而, 通信网络的应用不可避免地带来不确定延时和网络攻击问题^[5-6]。特别地, 流量攻击作为一类针对数据时效性的网络攻击方式, 通过操纵大量僵尸主机向网络中注入无效数据包抢占有限的带宽资源, 导致正常数据包的传输延时显著增大^[7-8]。对 LFC 系统而言, 流量攻击造成的信息交互迟滞可能导致频率偏差阻尼性能下降甚至失稳的风险。2015 年乌克兰停电事件中, 黑客除了施放“Black Energy”病毒恶意操纵关键电力设备外, 还利用网络协议漏洞向通信系统发起高强度流量攻击, 导致控制中心丧失对电力系统的监控能力^[9]。中国信通院统计表明, 流量攻击在工业互联网恶意网络行为中的占比高达 60.9%以上^[10]。此外, 由于应用软件、通信协议的迭代更新, 仅通过物理隔离、流量监测、防火墙拦截等常规手段无法完全防范黑客的蓄意入侵。因此, 提升 LFC 系统在蓄意流量攻击下的容错运行能力无疑具有极其重要的理论研究价值与实际工程意义。

现有流量攻击下的 LFC 策略一般采用单一且固定的控制器以保障最大攻击强度下的闭环稳定性。文献[11]提出基于滑模的 LFC 方案, 控制参数以保障最大传输延时下的渐进稳定性而设计。文献[12-13]将网络化 LFC 系统描述为以实际延时作为跳变决策变量的子系统集合。但控制器需要保障不同延时范围间跳变时的闭环稳定, 设计约束多而保守性较大。文献[14-15]提出基于事件触发的 LFC 策略, 仅当频率偏差达到预设触发条件后, 才触发状态量与控制指令交互。文献[16]提出自适应事件触发 LFC 方案, 在频率偏差得到抑制后, 自适应提高触发阈值以避免冗余传输。但事件触发器和控制器位于网络两侧无法同步更新, 故控制增益仍然保持不变。此外, 事件触发控制以牺牲动态性能为代价来节约网络资源, 但持续的频率偏差可能带来联络线功率振荡、线路损耗等问题, 危及电网安全。

尽管固定控制器的方案简单且易于实现, 但由于需要同时保证正常和流量攻击下的闭环稳定性, 往往牺牲了低攻击强度下的控制性能。反之, 若控制参数随着攻击强度灵活调整, 则可在降低设计约束的同时显著提升 LFC 系统在低攻击强度下的控制性能。文献[17]设计了基于在线模型辨识的自适应 LFC 方案, 但额外引入的辨识延时和误差可能造成辨识参数与当前系统运行状态不匹配。文献[18-19]提出了基于深度强化学习的 LFC 策略。通过对历史运行数据的离线预学习来构建发电机输出功

率指令的更新规则。然而, 样本规模对训练效果的影响十分明显, 且大量人工选择的参数造成深度强化学习控制方法的解释性较差。此外, 现有自适应控制方案较少将网络攻击因素考虑在内。

基于上述分析, 本文设计了一种根据流量攻击强度自适应调整控制器参数的 LFC 方案。首先, 基于确定网络演算(deterministic network calculus, DNC)推导了正常无流量攻击下的传输延时边界, 进而预设一系列表征流量攻击强度的延时范围。随后, 通过构造 Lyapunov 泛函, 得到了任意攻击强度下的控制器参数设计准则, 从而构建了控制器库。最后, 在切换控制理论架构下, 得到了在不同攻击强度间变化时所提自适应控制方案可承受的最大切换频率。

1 自适应 LFC 系统架构

网络化 LFC 系统如图 1 所示。LFC 系统中, 安装在发电厂和变电站的同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)采集发电机运行状态、电网频率、联络线功率等数据, 通过广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)传输到控制中心。控制中心则根据最新到达的数据包调整各发电机组的有功出力。根据 IEEE C37.118.2 标准, PMU 数据帧中包含时间戳字段, 故实际传输延时可由控制中心本地时钟计算得到^[20]。LFC 系统的动力学模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1^T(t), \mathbf{x}_2^T(t), \dots, \mathbf{x}_n^T(t), \dots, \mathbf{x}_N^T(t)]^T$, $\mathbf{x}_n(t) = [\Delta f_n, \Delta P_{ic_n}, \Delta P_{mn}, \Delta P_{vn}, \int \delta_n^T]^T$; $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_{nl}]_{N \times N}$, $\mathbf{B} = \text{diag}\{\mathbf{B}_n\}$, $\mathbf{E} = \text{diag}\{\mathbf{E}_n\}$, $\mathbf{C} = \text{diag}\{\mathbf{C}_n\}$, $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)]^T$,

$$\mathbf{A}_{nn} = \begin{bmatrix} -\frac{D_n}{M_n} & -\frac{1}{M_n} & \frac{1}{M_n} & 0 & 0 \\ 2\pi \sum_{l=1, l \neq n}^N L_{nl} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{vn}} & \frac{1}{T_{vn}} & 0 \\ -\frac{1}{T_{gn} R_n} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{gn}} & 0 \\ \beta_n & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{nl, l \neq n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2\pi L_{nl} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{gn}} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_n = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_n} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{C}_n = \begin{bmatrix} \beta_n & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

其中: Δf_n 为频率偏差; ΔP_{mn} 为区域 n 内发电机输出机械功率; ΔP_{vn} 为发电机调速器阀门开度; $\delta_n = \beta_n \Delta f_n + \Delta P_{tie_n}$ 为区域控制误差(area control error, ACE); β_n 为频偏因子; ΔP_{tie_n} 为联络线功率波动; D_n 和 M_n 分别为同步发电机阻尼系数和转动惯量; T_{un} 和 T_{gn} 分别为汽轮机和调速器时间常数; R_n 为发电机下垂系数; L_{nl} 为区域 n 、 l 间的联络线同步系数; $u_n(t)$ 为区域 n 的控制指令; $w(t) = [\Delta P_{d1}, \Delta P_{d2}, \dots, \Delta P_{dN}]^T$ 为负荷波动。

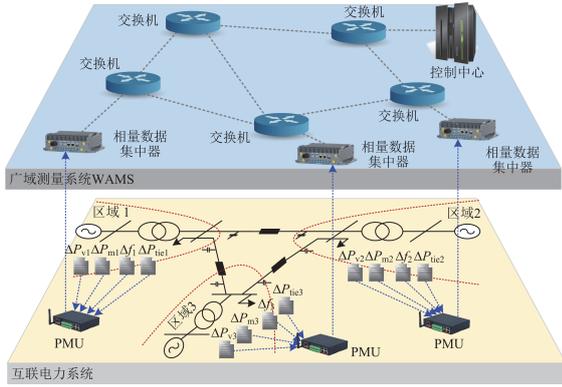


图1 网络化LFC系统

Fig. 1 Networked LFC system

由于控制中心必须接收到所有区域的状态量后才会更新控制指令, 因此设实际传输延时为 $\tau(t)$, 显然 $\tau(t) \leq \max\{\tau_n\}$ ($n=1, 2, \dots, N$), 其中 τ_n 为第 n 个区域与控制中心间的延时边界。为降低设计保守度并提升低流量攻击强度下的控制性能, 所提自适应方案中, 预设了一系列代表攻击强度的延时范围, 即

$$\begin{cases} \text{正常场景} & \leftrightarrow \tau(t) \in (0, \bar{\tau}_0] \\ \text{攻击强度1} & \leftrightarrow \tau(t) \in (\bar{\tau}_0, k_1 \bar{\tau}_0] \\ & \vdots \\ \text{攻击强度H} & \leftrightarrow \tau(t) \in (k_{H-1} \bar{\tau}_0, k_H \bar{\tau}_0] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{\tau}_0$ 为正常场景下的延时上界; k_1, \dots, k_H 为攻击强度系数, $1 < k_1 < \dots < k_H$ 。

设LFC采用状态反馈控制, 即第 h 个攻击强度下的控制指令 $u(t) = K_h x(t - \tau(t))$, 其中 $h=1, 2, \dots, H+1$, K_h 为控制增益。故LFC系统的闭环动态特性满足式(3)。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BK_h x(t - \tau(t)) + Ew(t) \quad (3)$$

显然, 针对上述的 $H+1$ 个运行场景, 所提自适应方案中包含了 $H+1$ 个针对性的控制器增益。然而即便每个控制器都能保证相应攻击强度下LFC系统的闭环稳定, 但攻击强度频繁变化仍然可能造成

LFC系统的状态轨迹趋于发散^[21]。因此, 所提自适应方案对流量攻击强度的变化频率存在容许上限。该容许上限也是判定当前是否进行控制器增益更新的判据。设LFC系统初始工作在攻击强度 h 下, 此时若 $\tau(t) \in (\underline{\tau}_{h'}, \bar{\tau}_{h'})$ 且 $f_{hh'} \leq f_{hh'}^{\max}$, 则控制器增益由 K_h 切换为 $K_{h'}$ 。其中, $\{h, h'\} \subseteq \{1, 2, \dots, H+1\}$ 且 $h \neq h'$, $(\underline{\tau}_{h'}, \bar{\tau}_{h'}) \in \{(0, \bar{\tau}_0], (\bar{\tau}_0, k_1 \bar{\tau}_0], \dots, (k_{H-1} \bar{\tau}_0, k_H \bar{\tau}_0)\}$, $f_{hh'}$ 、 $f_{hh'}^{\max}$ 分别为LFC系统在第 h 和第 h' 个攻击强度间的实际切换频率和所允许的最大切换频率。

对于 $H+1$ 个运行场景, 控制器的更新判据数量为 $C_{H+1}^2 = H(H+1)/2$ 个。当控制中心感知到攻击强度发生变化时, 首先判定攻击强度的变化是否小于最大容许频率。若满足切换逻辑, 则通过查表方法找到最匹配的控制器选项; 否则将发出告警信息并触发紧急操作指令, 如甩负荷、切机或切换备用通信链路等^[20-21]。尽管查表法会引入额外的延时, 但其时间复杂度为 $O(\log_2 n)$ 。考虑到控制中心一般具有充沛的计算资源, 其查表延时可忽略不计。

2 正常无攻击场景下的传输延上边界

根据第1节, 正常场景下的延时边界是预设攻击强度以及设计相应控制器的重要依据。现有基于排队论的延时估计方法无法保证流入和流出交换机的数据流时间累积量均服从泊松分布, 仅能将整个WAMS网络视为整体进行分析, 从而存在估计误差^[12]。反之, DNC理论则从流量累积上界的角度对传输行为进行刻画, 为精确分析数据流在交换机间的转发过程提供了严格的数学工具。因此, 本节利用DNC理论计算无攻击场景下传输延时的边界。

2.1 传输延时环节分析

为避免数据包在不同交换机间无休止转发, 一般规定了数据包的最大转发跳数限制以供交换机进行路由查找。如图2所示, 设最大转发跳数为 G , 从而数据包传输延时主要包含如下3个环节。

1) 串行延时 τ_{serial} (serial delay): 数据帧从第一个比特开始传输到最后一个比特传输完成所需时间, 即

$$\tau_{\text{serial}} = \sum_{g=1}^G \frac{l_{\text{LFC}}}{c_g^{\text{LFC}}} \quad (4)$$

式中: l_{LFC} 为包含LFC状态的数据帧长度; c_g^{LFC} 为第 g 个交换机为LFC数据帧提供的转发带宽。

2) 传播延时 $\tau_{\text{propagation}}$ (propagation delay): 数据帧在物理介质中传输的延时, 即

$$\tau_{\text{propagation}} = \frac{L_{\text{trans}}}{s_0} \quad (5)$$

式中: L_{trans} 为 PMU 至控制中心间的通信链路长度; s_0 为数据包在通信介质中的传播速度。

3) 排队延时 τ_{queuing} (queuing delay): 数据包在交换机排队等待转发的延时。其大小与当前到达交换机的数据量和到达速率正相关, 是数据包传输延时的不确定性的根本来源^[13]。排队延时的最大值出现在所有数据流以最大生成速率同时到达交换机的情形, 故而在确定的上界, 该上界记为 $\bar{\tau}_{\text{queuing}}$ 。因此有

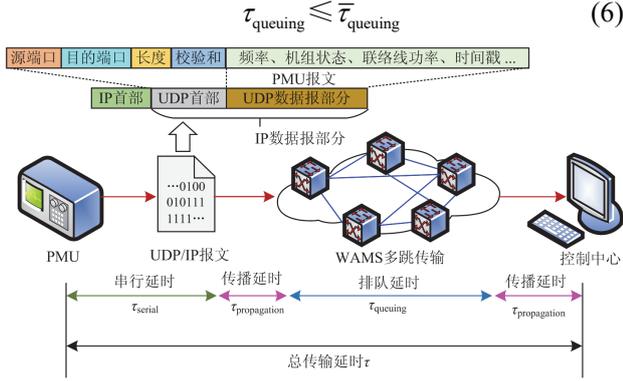


图 2 多跳传输延时分析

Fig. 2 Delay analysis in multi-hop transmission process

从而传输延时的上边界可由式(7)计算。

$$\bar{\tau}_0 = \tau_{\text{serial}} + \tau_{\text{propagation}} + \bar{\tau}_{\text{queuing}} \quad (7)$$

根据式(4)一式(7), 决定延时的上边界的参数主要为 c_g^{LFC} 和 $\bar{\tau}_{\text{queuing}}$ 。下面基于 DNC 理论给出计算过程。

2.2 延时边界关键参数计算

设经过第 g 个交换机转发的数据流数量为 Q_g 。 t 时刻到达该交换机的第 q 条数据流的数据量(记为 $\alpha_{q,g}(t)$)满足式(8)。

$$\alpha_{q,g}(t) = \sigma_{q,g} + \rho_{q,g} t \quad (8)$$

式中: $\sigma_{q,g}$ 为数据包尺寸; $\rho_{q,g}$ 对应的生成速率。显然, 到达交换机的总数据量(记为 $\alpha_{\Sigma,g}(t)$)满足可加性, 即 $\alpha_{\Sigma,g}(t) = \sum_{q=1}^{Q_g} \alpha_{q,g}(t)$ 。

“存储-转发”工作方式下, 交换机缓存完整的数据包并检查无误后才将该数据包发送至下一个交换机。故交换机流出的数据量(记为 $\beta_g(t)$), 即交换机为所有数据流提供的转发能力可描述为

$$\beta_g(t) = c_g(t - T_g)^+ = \begin{cases} 0, & 0 < t < T_g \\ c_g(t - T_g), & t > T_g \end{cases} \quad (9)$$

式中: c_g 为交换机为所有数据流提供的转发带宽; T_g 为与交换机缓存容量相关的固有缓存延时。显然, 交换机为任意数据流(q_0)提供的转发能力满足式(10)。

$$\beta_{q_0,g}(t) = c_{q_0,g}(t - T_{q_0,g})^+ = \beta_g(t) - \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \alpha_{p,g}(t) = \left(c_g - \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \rho_{p,g} \right) \left(t - \frac{c_g T_g + \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \sigma_{p,g}}{c_g - \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \rho_{p,g}} \right)^+ \quad (10)$$

设 q_0 为所要考察的 LFC 数据流序号。式(10)表明, 第 g 个交换机为该数据流提供的转发带宽 $c_g^{\text{LFC}} = c_{q_0,g}$ 。而经过 G 跳转发后, WAMS 为该数据流提供的转发能力(记为 $\beta_{\text{eq},q_0}(t)$), 可以根据等效服务定理^[13]计算。

$$\beta_{\text{eq},q_0}(t) = c_{\text{eq},q_0}(t - T_{\text{eq},q_0})^+ = \min(c_{q_0,g})(t - \sum_{g=1}^G T_{q_0,g})^+ \quad (11)$$

进一步根据排队延时上边界定理^[12], $\bar{\tau}_{\text{queuing}}$ 可由式(12)来计算。

$$\bar{\tau}_{\text{queuing}} = \sum_{g=1}^G \frac{c_g T_g + \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \sigma_{p,g}}{c_g - \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \rho_{p,g}} + \frac{\sigma_{q_0}}{\min_{g=1,2,\dots,G} \left(c_g - \sum_{p=1, p \neq q_0}^{Q_g} \rho_{p,g} \right)} \quad (12)$$

3 控制器设计准则与可承受攻击切换频率

控制器库中的每个选项都需要保证 LFC 系统在相应攻击强度下的稳定。此外, 过于频繁的攻击强度变化同样可能导致 LFC 系统状态轨迹趋于发散。因此本节讨论控制器的设计和切换准则。

3.1 控制器设计准则

显然, 控制器增益 K_h 需要满足如下设计要求。

1) 外部功率扰动 $w(t) = \mathbf{0}$ 时, K_h 需要保证闭环 LFC 系统(3)在流量攻击强度 h , 即延时范围 $(\underline{\tau}_h, \bar{\tau}_h) \in \{(0, \bar{\tau}_0), (\bar{\tau}_0, k_1 \bar{\tau}_0), \dots, (k_{H-1} \bar{\tau}_0, k_H \bar{\tau}_0)\}$ 下稳定。

2) 当 $w(t) \neq \mathbf{0}$ 时, K_h 需要保证对功率扰动具有 H_∞ 阻尼性能, 即 $\|y(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2$, γ 为衰减系数。

基于 Lyapunov 理论, 首先推导了如下判据。

定理 1 给定攻击强度 h 及标量 $\lambda, \gamma, \rho > 0$, 若存在适维矩阵 K_h, X_h 以及对称矩阵 $P_h, Q_{1h}, Q_{2h}, W_{1h}, W_{2h}$, 使得式(13)一式(15)成立, 则闭环 LFC 系统是指稳定的且对外部功率扰动具有 γ - H_∞ 扰动衰减性能。其中 λ 为指数衰减速率。

$$P_h, Q_{1h}, Q_{2h}, W_{1h}, W_{2h} > \mathbf{0} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} W_{2h} & X_h \\ X_h^T & W_{2h} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & \mathbf{0} & \Pi_{15} & \Pi_{16} & \Pi_{17} \\ * & \Pi_{22} & \Pi_{23} & \Pi_{24} & \mathbf{0} & \Pi_{26} & \mathbf{0} \\ * & * & \Pi_{33} & \Pi_{34} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ * & * & * & \Pi_{44} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ * & * & * & * & \Pi_{55} & \Pi_{56} & \mathbf{0} \\ * & * & * & * & * & \Pi_{66} & \mathbf{0} \\ * & * & * & * & * & * & \Pi_{77} \end{bmatrix} \leq \mathbf{0} \quad (15)$$

式中: $\Pi_{11} = A^T P_h + P_h A + \lambda P_h + Q_{1h} + Q_{2h} - \zeta_h W_{1h}$,
 $\Pi_{12} = \Pi_{26}^T = P_h B K_h$, $\Pi_{13} = \zeta_h W_{1h}$, $\Pi_{15} = \Pi_{15}^T = P_h E$,
 $\Pi_{16} = A^T P_h$, $\Pi_{17} = C^T$, $\Pi_{22} = -\bar{\zeta}_h (2W_{2h} - X_h^T - X_h)$,
 $\Pi_{23} = \Pi_{23}^T = \bar{\zeta}_h (W_{2h} - X_h^T)$,
 $\Pi_{33} = -e^{-\lambda \tau_h} Q_{1h} - \zeta_h W_{1h} - \bar{\zeta}_h W_{2h}$,
 $\Pi_{44} = -e^{-\lambda \tau_h} Q_{2h} - \bar{\zeta}_h W_{2h}$, $\Pi_{55} = -\gamma^2 I$,
 $\Pi_{66} = \rho^2 (\tau_h^2 W_{1h} + \Delta \tau_h^2 W_{2h}) - 2\rho P_h$, $\Pi_{77} = -I$,
 $\Delta \tau_h = \bar{\tau}_h - \tau_h$, $\zeta_h = \frac{\lambda \tau_h}{e^{\lambda \tau_h} - 1}$, $\bar{\zeta}_h = \frac{\lambda \Delta \tau_h}{e^{\lambda \bar{\tau}_h} - e^{\lambda \tau_h}}$, $\mathbf{0}$ 为
 适维零矩阵, “*”表示关于主对角线对称的转置矩阵。

证明: 见附录 A。

式(15)中, 未知矩阵 K_h 和 P_h 之间的乘性关系导致其本质上为双线性矩阵不等式(Bilinear matrix inequality, BLMI)从而难以直接求解。因此, 基于合同变换, 定义 $A_h = P_h^{-1}$, $\Gamma_h = K_h A_h$, $\tilde{X}_h = A_h X_h A_h$, 对式(14)左右乘 $\text{diag}\{A_h, A_h\}$, 并对式(15)左右乘 $\text{diag}\{A_h, A_h, A_h, A_h, I, A_h, I\}$, 定理 1 可等价转化为如下具有线性矩阵不等式(Linear matrix inequality, LMI)形式的定理。

定理 2 给定攻击强度 h 及标量 $\lambda, \gamma, \rho > 0$, 若存在矩阵 \tilde{X}_h, Γ_h 及对称矩阵 $A_h, \tilde{Q}_{1h}, \tilde{Q}_{2h}, \tilde{W}_{1h}, \tilde{W}_{2h}$, 使得不等式(16)–(18)成立, 则闭环 LFC 系统是指数稳定的且具有 γ - H_∞ 性能。控制器增益满足 $K_h = \Gamma_h A_h^{-1}$ 。

$$\tilde{X}_h, \tilde{Q}_{1h}, \tilde{Q}_{2h}, \tilde{W}_{1h}, \tilde{W}_{2h} > \mathbf{0} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{W}_{2h} & \tilde{X}_h \\ \tilde{X}_h^T & \tilde{W}_{2h} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_{11} & \tilde{\Pi}_{12} & \tilde{\Pi}_{13} & \mathbf{0} & \tilde{\Pi}_{15} & \tilde{\Pi}_{16} & \tilde{\Pi}_{17} \\ * & \tilde{\Pi}_{22} & \tilde{\Pi}_{23} & \tilde{\Pi}_{24} & \mathbf{0} & \tilde{\Pi}_{26} & \mathbf{0} \\ * & * & \tilde{\Pi}_{33} & \tilde{\Pi}_{34} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ * & * & * & \tilde{\Pi}_{44} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ * & * & * & * & \tilde{\Pi}_{55} & \tilde{\Pi}_{56} & \mathbf{0} \\ * & * & * & * & * & \tilde{\Pi}_{66} & \mathbf{0} \\ * & * & * & * & * & * & \tilde{\Pi}_{77} \end{bmatrix} \leq \mathbf{0} \quad (18)$$

式中: $\tilde{\Pi}_{11} = A_h A^T + A A_h + \lambda A_h + \tilde{Q}_{1g} + \tilde{Q}_{2g} - \zeta_h \tilde{W}_{1h}$,
 $\tilde{\Pi}_{12} = \tilde{\Pi}_{26}^T = B \Gamma_h$, $\tilde{\Pi}_{13} = \zeta_h \tilde{W}_{1h}$, $\tilde{\Pi}_{15} = \tilde{\Pi}_{15}^T = E$,
 $\tilde{\Pi}_{16} = A_h A^T$, $\tilde{\Pi}_{17} = A_h C^T$,
 $\tilde{\Pi}_{22} = -\bar{\zeta}_h (2\tilde{W}_{2h} - \tilde{X}_h^T - \tilde{X}_h)$,
 $\tilde{\Pi}_{23} = \tilde{\Pi}_{24}^T = \bar{\zeta}_h (\tilde{W}_{2h} - \tilde{X}_h^T)$,
 $\tilde{\Pi}_{33} = -e^{-\lambda \tau_h} \tilde{Q}_{1h} - \zeta_h \tilde{W}_{1h} - \bar{\zeta}_h \tilde{W}_{2h}$, $\tilde{\Pi}_{34} = \bar{\zeta}_h \tilde{X}_h$,
 $\tilde{\Pi}_{44} = -e^{-\lambda \tau_h} \tilde{Q}_{2h} - \bar{\zeta}_h \tilde{W}_{2h}$, $\tilde{\Pi}_{55} = -\gamma^2 I$,
 $\tilde{\Pi}_{66} = \rho^2 (\tau_h^2 \tilde{W}_{1h} + \Delta \tau_h^2 \tilde{W}_{2h}) - 2\rho A_h$, $\tilde{\Pi}_{77} = -I$ 。

3.2 最大容忍攻击切换频率

根据定理 2 可得到对应于预设攻击强度的控制器集合 $\{K_h\} (h=1, 2, \dots, H+1)$ 。然而, 频繁的攻击强度变化可能导致 LFC 系统状态轨迹趋于发散。因此, 所提自适应方案对攻击强度的变化频率存在容忍上限。本小节严格证明了如下定理。

定理 3 对于给定标量 $\gamma > 0$, 闭环 LFC 系统在流量攻击强度 h, h' 间变化时是指数稳定的, 若存在标量 $\mu_{hh'}, \mu_{h'h} \geq 1$ 以及矩阵 $\{K_h, P_h, Q_{1h}, Q_{2h}, W_{1h}, W_{2h}\}, \{K_{h'}, P_{h'}, Q_{1h'}, Q_{2h'}, W_{1h'}, W_{2h'}\}$ 满足不等式(13)–(15)以及(19)、(20), 且闭环 LFC 系统在攻击强度 h, h' 之间切换的最大容许频率为 $f_{hh'}^{\max} = 2\lambda / \ln(\mu_{hh'} \mu_{h'h})$ 。

$$\{P_{h'}, Q_{1h'}, Q_{2h'}, W_{1h'}, W_{2h'}\} \leq \mu_{hh'} \{P_h, Q_{1h}, Q_{2h}, W_{1h}, W_{2h}\} \quad (19)$$

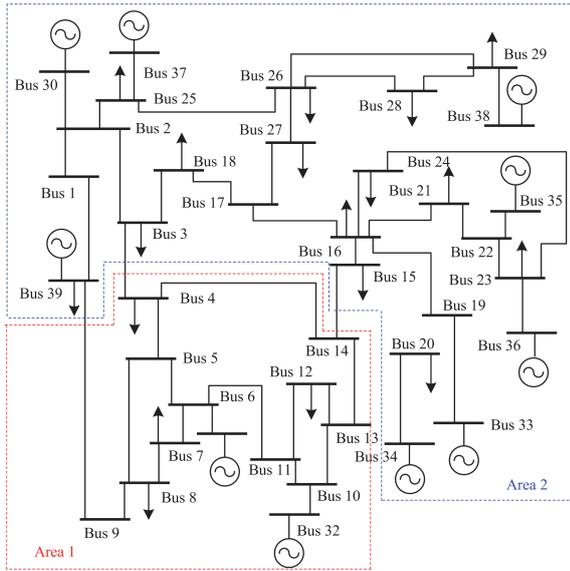
$$\{P_h, Q_{1h}, Q_{2h}, W_{1h}, W_{2h}\} \leq \mu_{h'h} \{P_{h'}, Q_{1h'}, Q_{2h'}, W_{1h'}, W_{2h'}\} \quad (20)$$

证明: 见附录 B。

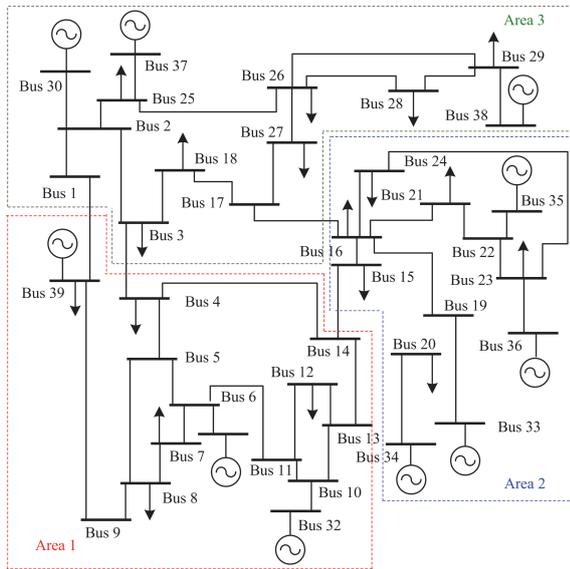
注意, 预设的 $H+1$ 个场景包含了正常无攻击情形。因此所提自适应方案能够同时保证 LFC 系统在正常与攻击场景下的稳定性。此外, 由于每个控制器设计是相互独立的, 与传统固定控制增益方案相比, 所提方法的设计保守度得到了有效的降低。

4 算例结果与讨论

本节使用如图 3 所示的两区域^[22]和三区域^[23]互联 LFC 系统进行仿真分析。其中, WAMS 采用 UDP/IP 协议以保证传输时效性。设完整的 PMU 数据帧包含 PMU 报文(54 Bytes)、以太网帧头与帧尾(各 18 Bytes)、UDP/IP 头部(分别为 8 和 20 Bytes)。此外, PMU 以 100 帧/s 的频率向控制中心发送报文, 故正常生成速率为 10 000 Bps。仿真参数见表 1—表 3。



(a) 两区域



(b) 三区域

图 3 IEEE 39 节点 LFC 系统

Fig. 3 LFC systems in IEEE 39-bus system

表 1 WAMS 仿真参数

Table 1 Simulation parameters in WAMS

σ /Bytes	ρ /Bps	c_g /Mbps	T_g /ms	L_{trans} /km	$s_0/(m \cdot s^{-1})$
100	10 000	100	37.44	500	2×10^8

表 2 两区域 LFC 系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of two-area LFC systems

区域	T_{lg}/s	T_{gn}/s	R_n	β_n	D_n	M_n
1	0.3	0.03	2.4	0.0045	0.0083	0.1667
2	0.3	0.03	2.4	0.0045	0.0083	0.1667

$L_{12} = L_{21} = 0.25$ (p.u./rad)

表 3 三区域 LFC 系统仿真参数

Table 3 Simulation parameters of three-area LFC systems

区域	T_{lg}/s	T_{gn}/s	R_n	β_n	D_n	M_n
1	0.30	0.37	0.05	41.0	1.0	10
2	0.17	0.40	0.05	81.5	1.5	12
3	0.20	0.35	0.05	61.8	1.8	12

$L_{12} = L_{21} = 0.2, L_{13} = L_{31} = 0.12, L_{32} = L_{23} = 0.25$ (p.u./rad)

4.1 流量攻击下的 WAMS 传输性能

不失一般性, 设每个区域采用相同的网络参数, 除 LFC 数据流外, 每个交换机节点传输的其他正常数据流的数量为 10。相应的数据包尺寸和生成速率与表 1 中相同。在 OPNET 环境下搭建如图 4 所示的多跳传输网络仿真模型。图 5 示出了不同最大传输跳数($G = 5, 10, 15, 20$)下, 所考察的 LFC 相关 PMU 数据流理论传输延时上界。

从图 5 可知, 最大仿真延时与理论边界间的误差率分别为 0.88%、2.08%、2.94%、1.64%。同样可以观察到所有数据包的传输延时均小于理论边界。仿真结果表明, 所提延时边界计算方法可以准确反映正常数据流在多跳传输过程中的边界动态行为, 且依据所提出理论延时边界设计的控制器可以镇定所有实际传输延时小于该理论值的场景。

4.2 流量攻击下的控制性能

4.2.1 两区域互联 LFC 系统

为评估所提方法的控制性能, 本节采用滑模控制^[11]、事件触发控制^[23]和在线模型辨识控制^[17]作为对比方法。其中, 滑模控制和事件触发控制采用固定控制器增益的方法, 在线模型辨识控制则属于自适应控制方案。设负荷波动如图 6 所示, 最大允许传输跳数 G 为 8, 并预设如下 3 个攻击场景。

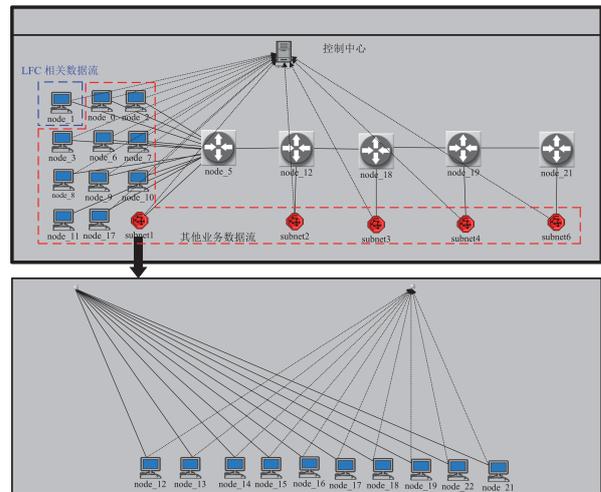


图 4 多跳传输网络仿真模型

Fig. 4 Simulation model of multi-hop transmission network

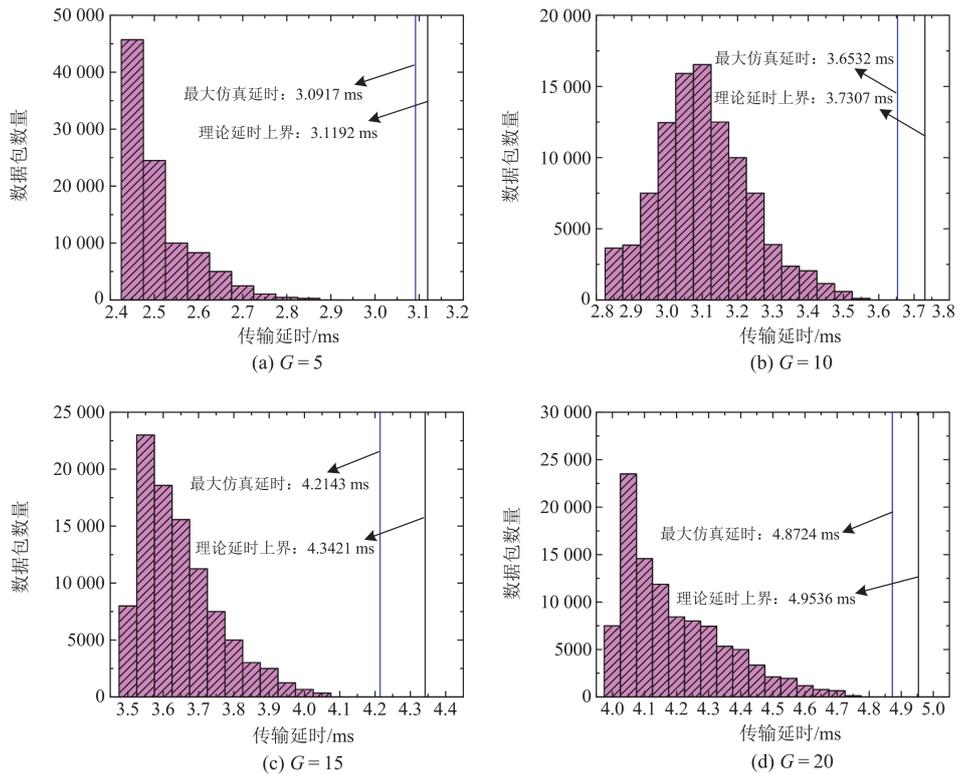


图 5 不同传输跳数下的理论及仿真结果

Fig. 5 Theoretical and simulated results of different transmission hops

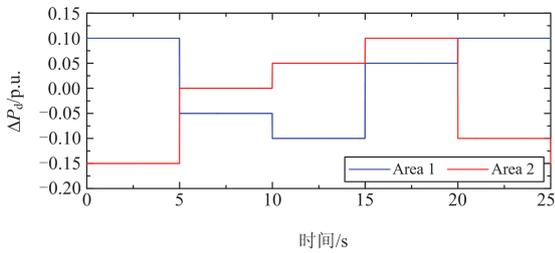


图 6 两个区域内的负荷波动

Fig. 6 Load fluctuations in two areas

正常无攻击场景：依据第 3 节分析，正常数据流的理论延时边界为(0, 3.4861) ms；

低攻击强度场景：延时上边界为正常场景的 4

倍，此时延时范围为(3.4861, 13.9444) ms；

高攻击强度场景：延时上边界为正常场景的 6 倍，此时延时范围为(13.9444, 20.9166) ms。

攻击强度通过随机改变注入网络中的异常数据流数量和注入速率实现。实际传输延时如图 7 所示。设 $\lambda = 7.5$ 、 $\rho = 100$ 、 $\gamma = 10$ ，对应于每个攻击强度的控制器增益和最大允许切换频率由表 4 给出。图 8(a)—图 8(c)为不同控制方法下各区域的频率、联络线功率和区域控制误差。图 8(d)给出了相应的绝对值误差积分平均指标(integral of absolute error, IAE)，其反映了控制策略的动、静态综合性能，即性能指标越低，LFC 系统具有更好的阻尼和瞬态响应。

表 4 控制增益与最大容许攻击强度切换频率(两区域系统)

Table 4 Controller gains and maximal allowable attack intensity switching frequency in two-area systems

攻击强度	控制器增益 (K_i)
正常场景	$K_1 = [-42.936, -506.719, -24.147, -3.552, -5306.175, 22.024, -476.610, 7.836, 0.313, -5143.479; 22.024, -477.288, 7.836, 0.313, -5142.910, -42.934, -507.395, -24.146, -3.552, -5305.601]$
低强度	$K_2 = [-33.027, -2212.261, -19.293, -2.913, -5609.483, 12.399, -2192.645, 3.815, -0.073, -5498.448; 12.399, -2202.463, 3.815, -0.073, -5498.539, -33.027, -2222.080, -19.293, -2.913, -5609.575]$
高强度	$K_3 = [-37.762, 5536.369, -22.489, -3.408, -8335.398, 7.752, 5555.894, 0.722, -0.565, -8224.531; 7.752, 5553.863; 0.722, -0.565, -8224.529, -37.762, 5534.337, -22.489, -3.408, -8335.396]$
允许切换频率/Hz	$f_{12}^{\max} = f_{21}^{\max} = 0.8069, f_{13}^{\max} = f_{31}^{\max} = 0.8759, f_{23}^{\max} = f_{32}^{\max} = 2.2119$

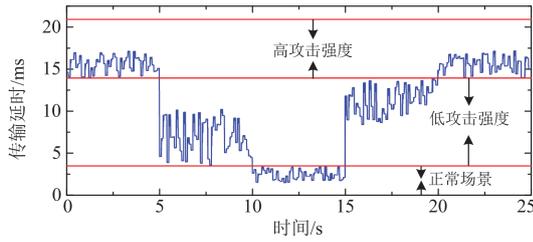


图 7 两个区域内的传输延时

Fig. 7 Transmission delays in two areas

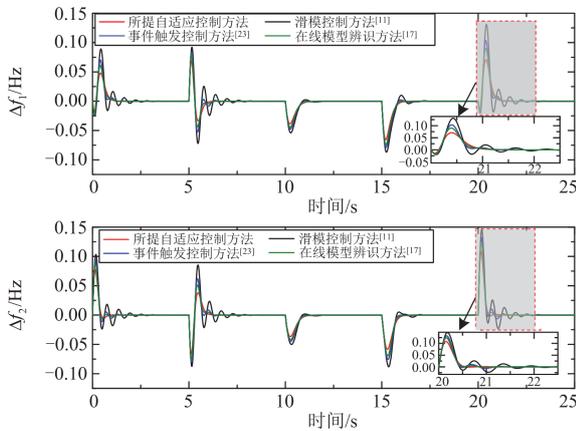
根据图 8, 相较于滑模控制^[11]、事件触发控制^[23]和在线模型辨识^[17], 本文所提方法的频率偏差、联络线功率波动以及 ACE 的幅度均得到了显著的降低, 分别低于上述 3 种方法 12.60%、11.57% 和 11.55% 以上。而波动方差上, 本文所提方法与另外 3 种方法相比分别减小了 22.61%、13.80%、13.79% 以上。这表明应用本文所提方法的频率偏差振荡幅度更小。对于频率偏差、联络线功率波动以及 ACE 的平均 IAE 指标, 所提方法的性能指标较之于上述 3 种方法分别下降了 9.72%、6.97% 和 6.97% 以上。仿真结果反映出所提自适应方法对于外部功率扰动引起的频率偏差具有更低的振荡幅度、更快的衰减速度。这是由于所提方法对正常和低攻击强度场景分别设计了针对性的控制器, 且避免了在线辨识方案引入的额外辨识误差和辨识耗时。因此所提自适应方法对随机时变的流量攻击具有更强的运行弹性与灵活性。

4.2.2 三区域互联 LFC 系统

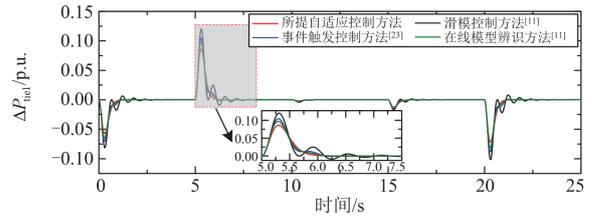
进一步在三区域互联系统中测试所提方法在更多区域互联和更多攻击强度变化时的通用性与可行性。预设如下 5 个运行场景。

正常场景: 依据第 3 节分析, 正常数据流的理论延时边界为(0, 3.4861) ms;

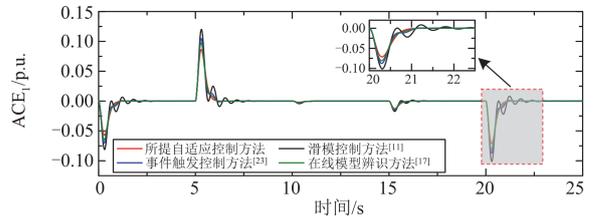
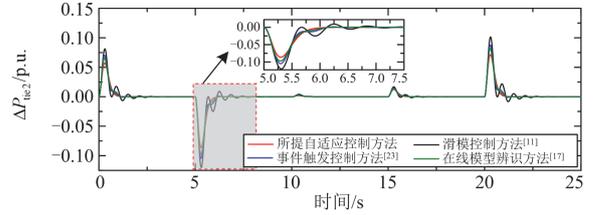
攻击强度 1: 延时上边界为正常场景的 2 倍, 此时延时范围为(3.4861, 6.9722) ms;



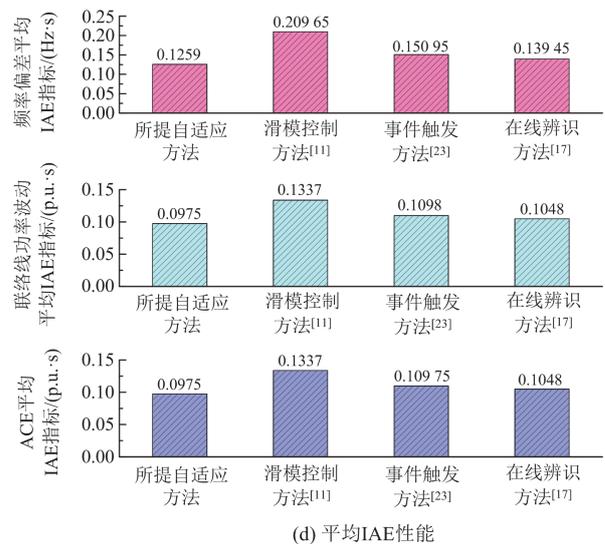
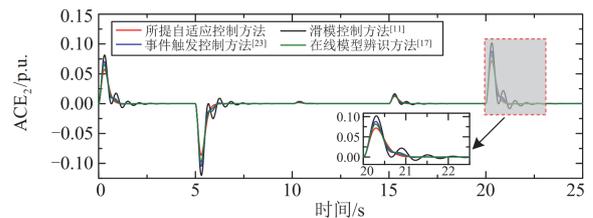
(a) 频率偏差



(b) 联络线功率波动



(c) ACE



(d) 平均 IAE 性能

图 8 不同控制策略的动态响应及平均 IAE 性能 (两区域 LFC 系统)

Fig. 8 Dynamic responses and average IAE performances with different control strategies (two-area LFC systems)

攻击强度 2: 延时上边界为正常场景的 4 倍, 此时延时范围为(6.9722, 13.9444] ms;

攻击强度 3: 延时上边界为正常场景的 6 倍, 此时延时范围为(13.9444, 20.9166] ms;

攻击强度 4: 延时上边界为正常场景的 8 倍, 此时延时范围为(20.9166, 27.8888) ms。

表 5 控制器增益与最大容许攻击强度切换频率(三区域系统)

Table 5 Controller gains and maximal allowable attack intensity switching frequency in three-area systems

攻击强度	控制器增益 (K_h)
正常场景	$K_1 = [-7277.909, 77035.251, -81.570, -17.464, -6379.131, 1020.406, -51069.743, 5.478, 1.197, 2521.187, 196.071, -26562.348, 1.155, 0.220, 658.035; 998.302, -33270.962, 8.278, 1.145, 3190.524, -6939.270, 67516.628, -50.686, -19.273, -3810.441, 821.508, -34142.078, 4.841, 0.944, 2667.011; 165.948, -17059.102, 1.373, 0.184, 750.787, 700.670, -33927.248, 3.763, 0.824, 1944.310, -5729.440, 50841.532, -47.013, -15.917, -3276.555]$
攻击强度 1	$K_2 = [-17542.048, 810458.552, -155.081, -25.990, -57559.342, 4780.576, -256663.272, 23.949, 4.735, 13441.624, 4862.167, -432770.544, 26.679, 4.738, 20120.538; 4857.751, -179878.401, 37.206, 4.309, 19627.496, -11642.517, 438549.692, -71.211, -22.121, -22137.073, 3945.224, -178069.108, 21.414, 3.645, 16041.701; 4233.165, -291324.843, 32.634, 3.899, 20238.803, 3315.993, -161012.181, 16.447, 3.204, 12190.462, -11319.180, 561829.313, -74.685, -19.763, -29672.586]$
攻击强度 2	$K_3 = [-18550.412, 821337.830, -162.813, -26.802, -61540.427, 5192.163, -322391.400, 26.091, 5.240, 14553.366, 5187.022, -503701.169, 28.578, 5.095, 21279.869; 5259.241, -218875.690, 40.058, 4.743, 21129.727, -11927.049, 436737.787, -72.855, -22.589, -23123.895, 4043.793, -200172.859, 22.010, 3.723, 16359.474; 4475.770, -340794.294, 34.453, 4.254, 21136.873, 3476.560, -203468.221, 17.430, 3.397, 12643.002, -11596.025, 547915.310, -76.404, -20.101, -30858.573]$
攻击强度 3	$K_4 = [-16825.041, 695621.125, -150.791, -25.376, -52397.141, 4741.901, -291564.701, 23.701, 4.614, 13378.974, 4298.134, -406756.085, 24.066, 4.368, 16786.608; 4782.121, -206529.070, 36.277, 4.205, 19247.828, -11162.750, 378746.693, -69.147, -21.675, -20265.600, 3508.780, -169501.520, 19.122, 3.223, 13826.715; 3666.064, -268639.638, 28.836, 3.656, 16486.994, 3019.624, -172268.165, 15.145, 2.932, 10590.716, -10463.585, 441902.489, -70.764, -19.200, -25072.012]$
攻击强度 4	$K_5 = [-14859.187, 560148.526, -136.498, -23.658, -42596.974, 4366.331, -260649.215, 21.976, 4.290, 12211.141, 3104.246, -301573.111, 17.551, 3.194, 11845.546; 4268.814, -179244.434, 32.587, 3.785, 16737.878, -10464.703, 330799.624, -65.997, -21.237, -17731.389, 3172.339, -149316.153, 17.482, 2.953, 12144.619; 2605.745, -192256.822, 20.748, 2.644, 11450.253, 2740.073, -151282.433, 13.902, 2.704, 9135.081, -9157.219, 344383.481, -63.634, -17.967, -19809.990]$
容许切换频率/Hz	$f_{12}^{\max} = f_{21}^{\max} = 0.779, f_{13}^{\max} = f_{31}^{\max} = 0.910, f_{14}^{\max} = f_{41}^{\max} = 1.002, f_{15}^{\max} = f_{51}^{\max} = 0.0217, f_{23}^{\max} = f_{32}^{\max} = 2.349, f_{24}^{\max} = f_{42}^{\max} = 1.280, f_{25}^{\max} = f_{52}^{\max} = 0.0217, f_{34}^{\max} = f_{43}^{\max} = 2.349, f_{35}^{\max} = f_{53}^{\max} = 0.0218, f_{45}^{\max} = f_{54}^{\max} = 0.0218$

设 $\lambda = 7.5$ 、 $\rho = 100$ 、 $\gamma = 10$, 从而表 5 给出了预设控制器增益和最大容许攻击强度切换频率。各区域的负荷波动和传输延时分别如图 9、图 10 所示。图 11 则示出了不同控制方法下每个区域的频率、联络线功率、区域控制误差以及相应的 IAE 平均指标。

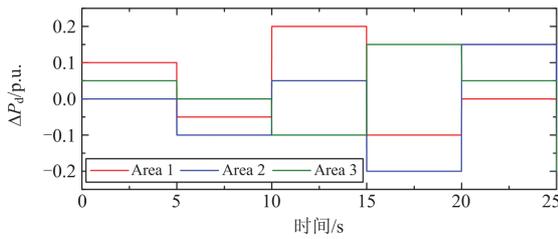


图 9 三区域内的负荷波动
Fig. 9 Load fluctuations in three areas

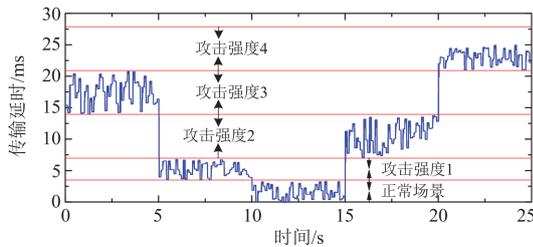
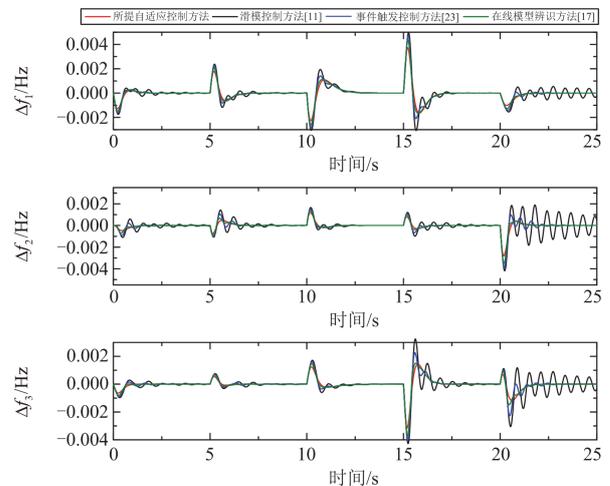


图 10 三区域内的传输延时
Fig. 10 Transmission delays in three areas

根据图 11, 可得到类似于 4.2.1 节两区域算例的结论。所提方法的频率偏差、联络线功率及 ACE 幅度是 4 种方法中最小的。计算上述 3 个物理量的波动方差, 所提方法相较于滑模控制方法^[11]、事件



(a) 频率偏差

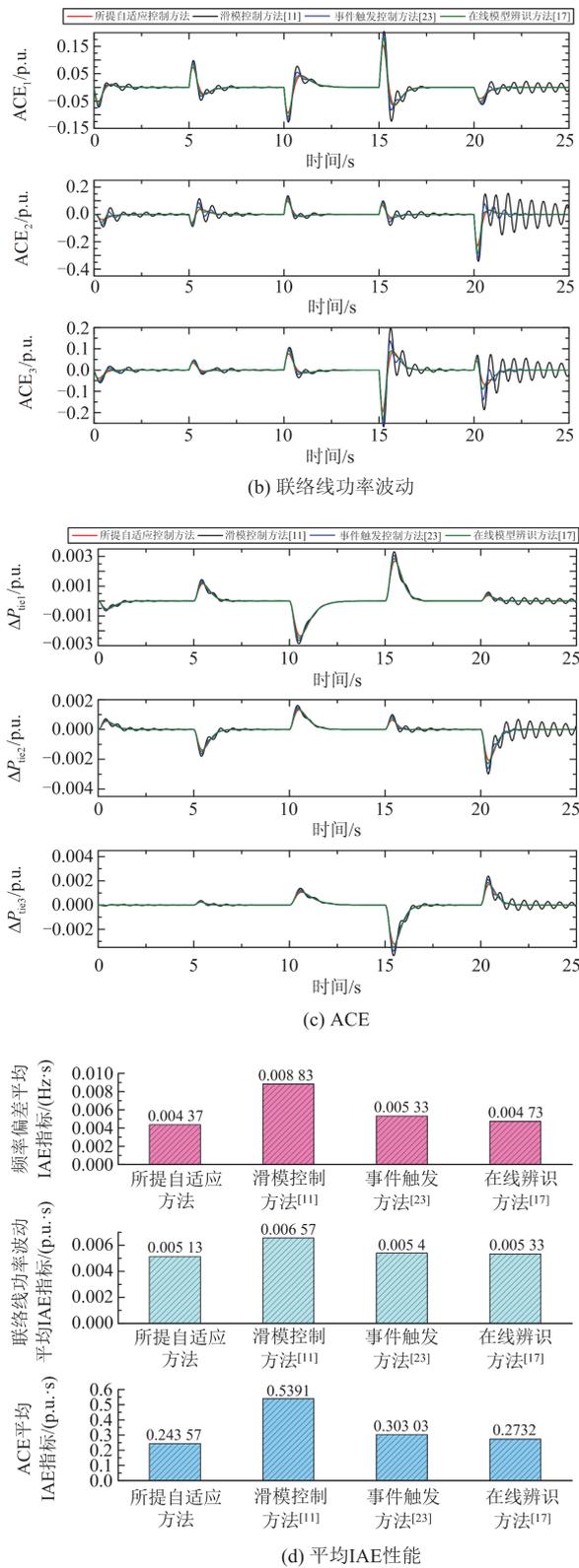


图 11 不同控制策略的动态响应及平均 IAE 性能 (三区 LFC 系统)

Fig. 11 Dynamic responses and average IAE performances with different control strategies (three-area LFC systems)

触发控制方法^[23]和在线模型辨识方法^[17]可分别减小 18.17%、6.72%以及 19.90%以上, 而 3 个物理量的平均 IAE 性能指标分别下降了 7.61%、3.75%和 10.85%。仿真结果进一步表明所提方法在应对流量攻击时具有更低的振荡幅度和更快的恢复速度。

5 结论

针对蓄意流量攻击下的互联电网频率稳定性问题, 提出一种根据攻击强度自适应调节控制器增益的 LFC 方案。与现有固定控制器增益的方法相比, 所提方法有效提升了 LFC 系统在低攻击强度下的控制性能。基于 DNC 理论建立的正常场景延时边界计算模型准确反映了数据流在多跳传输过程中的边界行为, 从而为预设不同的攻击强度并设计相应的控制器库提供准确的设计依据。而基于切换控制理论推导的最大容忍攻击切换频率则确保了流量攻击随机变化时的闭环稳定性。但需要指出的是, 无论是否发生流量攻击, 所提方法需要始终占据通信网络。因此, 未来将进一步研究自适应事件触发 LFC 方案以降低对网络带宽的依赖度。

附录 A

定理 1 证明

构造如下 Lyapunov 泛函

$$V_h(t) = V_{1h}(t) + V_{2h}(t) + V_{3h}(t) + V_{4h}(t) + V_{5h}(t)$$

式中

$$V_{1h}(t) = \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P}_h \mathbf{x}(t),$$

$$V_{2h}(t) = \int_{t-\bar{\tau}_h}^t \mathbf{x}^T(s) e^{\lambda(s-t)} \mathbf{Q}_{1h} \mathbf{x}(s) ds,$$

$$V_{3h}(t) = \int_{t-\bar{\tau}_h}^t \mathbf{x}^T(s) e^{\lambda(s-t)} \mathbf{Q}_{2h} \mathbf{x}(s) ds,$$

$$V_{4h}(t) = \underline{\tau}_h \int_{-\bar{\tau}_h}^0 \int_{t+r}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) e^{\lambda(s-t)} \mathbf{W}_{1h} \dot{\mathbf{x}}(s) ds dt,$$

$$V_{5h}(t) = \Delta \tau_h \int_{-\bar{\tau}_h}^0 \int_{t+r}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) e^{\lambda(s-t)} \mathbf{W}_{2h} \dot{\mathbf{x}}(s) ds dt.$$

其微分为

$$\dot{V}_h(t) = \dot{V}_{1h}(t) + \dot{V}_{2h}(t) + \dot{V}_{3h}(t) + \dot{V}_{4h}(t) + \dot{V}_{5h}(t)$$

利用 Schur 补引理和凸组合不等式^[24], 在 $\mathbf{w}(t) = \mathbf{0}$ 时 $\dot{V}_h(t) \leq \dot{V}_h(t) + \lambda V_h(t) \leq 0$ 成立的充分条件为不等式(15)成立。而当 $\mathbf{w}(t) \neq \mathbf{0}$ 时, 有

$$V_h(+\infty) - V_h(0) \leq \int_0^{+\infty} [-\mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) + \gamma^2 \mathbf{w}^T(t) \mathbf{w}(t)] dt$$

即

$$\int_0^{+\infty} \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) dt \leq \int_0^{+\infty} \gamma^2 \mathbf{w}^T(t) \mathbf{w}(t) dt \Leftrightarrow$$

$$\|\mathbf{y}(t)\|_2 \leq \gamma \|\mathbf{w}(t)\|_2$$

从而 LFC 系统满足对 $\mathbf{w}(t)$ 的 γ - H_∞ 衰减性能。

附录 B

定理 3 证明

设在 $[t_0, t]$ 内攻击强度在 $\{h, h'\}$ 之间变化了 k 次, k 与切换频率 $f_{hh'}$ 间满足 $k \leq \lfloor f_{hh'}(t-t_0) \rfloor \leq f_{hh'}(t-t_0)$ 。从而攻击强度的切换存在如下两种情形。

1) 情形 1: t_0 时刻和 t 时刻的流量攻击强度相同。此时, k 为偶数。由于 LFC 系统的状态轨迹在攻击强度变化瞬间无法瞬变。不失一般性, 不妨设 $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ 为切换瞬间, t_0 时刻和 t 时刻的流量攻击强度为 h 。根据式(19)、式(20), 以及定理 2, 有

$$\begin{aligned} V_h(t)|_{t \in [t_k, t]} &\leq e^{-\lambda(t-t_k)} V_h(t_k)|_{t \in [t_k, t]} \leq \\ &\mu_{h'h} e^{-\lambda(t-t_k)} V_{h'}(t_k)|_{t \in [t_k, t]} \leq \\ &\mu_{h'h} e^{-\lambda(t-t_k)} e^{-\lambda(t_k-t_{k-1})} V_{h'}(t_{k-1})|_{t \in [t_{k-1}, t_k]} \leq \\ &\mu_{hh'} \mu_{h'h} e^{-\lambda(t-t_k)} e^{-\lambda(t_k-t_{k-1})} V_h(t_{k-1})|_{t \in [t_{k-1}, t_k]} \leq \\ &\vdots \\ &(\mu_{hh'})^{\frac{k}{2}} (\mu_{h'h'})^{\frac{k}{2}} e^{-\lambda(t-t_0)} V_h(t_0)|_{t \in [t_0, t_1]} \leq \\ &(\mu_{hh'})^{\frac{f_{hh'}(t-t_0)}{2}} (\mu_{h'h'})^{\frac{f_{hh'}(t-t_0)}{2}} e^{-\lambda(t-t_0)} V_h(t_0)|_{t \in [t_0, t_1]} = \\ &e^{\frac{f_{hh'}(t-t_0)}{2} \ln \mu_{hh'} \mu_{h'h} - \lambda(t-t_0)} V_h(t_0)|_{t \in [t_0, t_1]} \end{aligned}$$

仅当 $f_{hh'} \leq 2\lambda/\ln \mu_{hh'} \mu_{h'h}$ 时, 闭环 LFC 系统在流量攻击强度变化时的状态轨迹是下降的。

2) 情形 2: t_0 时刻和 t 时刻的流量攻击强度不同。此时, k 为奇数。不妨设 t_0 时刻和 t 时刻的流量攻击强度分别为 h' 和 h 。类似于情形 1 分析, 有

$$\begin{aligned} V_h(t)|_{t \in [t_k, t]} &\leq (\mu_{hh'})^{\frac{k-1}{2}} (\mu_{h'h})^{\frac{k+1}{2}} e^{-\lambda(t-t_0)} V_h(t_0)|_{t \in [t_0, t_1]} \leq \\ &\sqrt{\frac{\mu_{h'h}}{\mu_{hh'}}} (\mu_{hh'})^{\frac{f_{hh'}(t-t_0)}{2}} (\mu_{h'h})^{\frac{f_{hh'}(t-t_0)}{2}} e^{-\lambda(t-t_0)} V_h(t_0)|_{t \in [t_0, t_1]} = \\ &\sqrt{\frac{\mu_{h'h}}{\mu_{hh'}}} e^{\frac{f_{hh'}(t-t_0)}{2} \ln \mu_{hh'} \mu_{h'h} - \lambda(t-t_0)} V_h(t_0)|_{t \in [t_0, t_1]} \end{aligned}$$

同样地, 仅当 $f_{hh'} \leq 2\lambda/\ln \mu_{hh'} \mu_{h'h}$ 时, 闭环 LFC 系统在流量攻击强度变化时的状态轨迹是下降的。

因此, 所提自适应 LFC 系统最大容忍攻击强度切换频率为 $2\lambda/\ln \mu_{hh'} \mu_{h'h}$ 。

参考文献

[1] 杨德健, 许益恩, 高洪超, 等. 计及转速平滑恢复的双馈风电机组自适应频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 172-179.
YANG Dejian, XU Yien, GAO Hongchao, et al. Self-adaptive frequency control scheme of a doubly-fed induction generator with smooth rotor speed recovery[J].

Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 172-179.
[2] 陈雪梅, 陆超, 韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 1-9.
CHEN Xuemei, LU Chao, HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 1-9.
[3] 周一辰, 覃露, 李永刚. 基于多求和不等式输出反馈 Lyapunov 判据的时变时滞电力系统二次调频控制[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3247-3258.
ZHOU Yichen, QIN Lu, LI Yonggang. Secondary frequency modulation control of power system with time-varying delay based on Lyapunov criterion of multi-summation inequality output feedback[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3247-3258.
[4] PRADHAN S K, DAS D K. H_∞ load frequency control design based on delay discretization approach for interconnected power systems with time delay[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1468-1477.
[5] 朱炳铨, 郭逸豪, 郭创新, 等. 信息失效威胁下的电力信息物理系统安全评估与防御研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 178-187.
ZHU Bingquan, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A survey of the security assessment and security defense of a cyber physical power system under cyber failure threat[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 178-187.
[6] 杨杰, 郭逸豪, 郭创新, 等. 考虑模型与数据双重驱动的电力信息物理系统动态安全防护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 176-187.
YANG Jie, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A review of dynamic security protection on a cyber physical power system considering model and data driving[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 176-187.
[7] 李泽科, 陈泽文, 王春艳, 等. 电力监控系统的网络安全威胁溯源技术研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 166-172.
LI Zeke, CHEN Zewen, WANG Chunyan, et al. Network security threat tracing technology of power monitoring system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 166-172.
[8] YANG T, LIU Y, LI W. Attack and defense methods in cyber-physical power system[J]. IET Energy Systems Integration, 2022, 4: 159-170.
[9] 刘念, 余星火, 张建华. 网络协同攻击: 乌克兰停电事件的推演与启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 144-147.

- LIU Nian, YU Xinghuo, ZHANG Jianhua. Coordinated cyber-attack: inference and thinking of incident on Ukrainian power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 144-147.
- [10] 工业互联网产业联盟: 中国工业互联网安全态势报告(2020年)[EB/OL]. <http://www.aii-alliance.org/index.php/index/c319/n2700.html>.
- [11] 米阳, 徐怡雯, 时帅, 等. 新型时滞可再生电力系统集成模型的滑模负荷频率控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3953-3963.
- MI Yang, XU Yiwen, SHI Shuai, et al. Sliding mode load frequency control design for the novel integrated model of time-delay renewable power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3953-3963.
- [12] YANG T, ZHANG Y, LI W, et al. Decentralized networked load frequency control in interconnected power systems based on stochastic jump system theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4427-4439.
- [13] ZHANG Y, PENG C, XIE S, et al. Deterministic network calculus-based H_∞ load frequency control of multiarea power systems under malicious DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1542-1554.
- [14] 关燕鹏, 李晓宁, 贾新春. 含可再生能源的多区域电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 64-71.
- GUAN Yanpeng, LI Xiaoning, JIA Xinchun. Load frequency control of multi-area power systems with renewable energy[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(7): 64-71.
- [15] 周一辰, 覃露, 李永刚, 等. 基于事件触发控制的时滞电力系统负荷频率控制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 236-243.
- ZHOU Yichen, QIN Lu, LI Yonggang, et al. Load frequency control of power system with time-delay based on event-triggered control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 236-243.
- [16] LU K D, ZENG G Q, LUO X, et al. An adaptive resilient load frequency controller for smart grids with DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(5): 4689-4699.
- [17] WANG X, WANG Y, LIU Y. Dynamic load frequency control for high-penetration wind power considering wind turbine fatigue load[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 117: 1-11.
- [18] 梁煜东, 陈峦, 张国洲, 等. 基于深度强化学习的多能互补发电系统负荷频率控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1768-1779.
- LIANG Yudong, CHEN Luan, ZHANG Guozhou, et al. Load frequency control strategy of hybrid power generation system: a deep reinforcement learning-based approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1768-1779.
- [19] LI J, YU T, ZHANG X. Coordinated load frequency control of multi-area integrated energy system using multi-agent deep reinforcement learning[J]. Applied Energy, 2022, 306: 1-21.
- [20] 王路平, 李浩志, 谢小荣. 提高短期频率稳定性的紧急需求响应分散协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3462-3470.
- WANG Luping, LI Haozhi, XIE Xiaorong. A decentralized and coordinated control of emergency demand response to improve short-term frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3462-3470.
- [21] TAO T, ROY S, BALDI S. Stable adaptation in multi-area load frequency control under dynamically-changing topologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 2946-2956.
- [22] SHANG-GUAN X, HE Y, ZHANG C, et al. Sampled-data based discrete and fast load frequency control for power systems with wind power[J]. Applied Energy, 2020, 259: 1-11.
- [23] PENG C, LI J, FEI M. Resilient event-triggering H_∞ load frequency control for multi-area power systems with energy-limited DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Power System, 2018, 32(5): 4110-4118.
- [24] PARK P, KO J W, JEONG C. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2011, 47(1): 235-238.
-
- 收稿日期: 2022-09-11; 修回日期: 2022-12-07
- 作者简介:
- 张亚健(1991—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力信息物理系统安全控制; E-mail: zhang_ya_jian@shu.edu.cn
- 彭晨(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为网络化控制系统。E-mail: c.peng@shu.edu.cn
- (编辑 魏小丽)