

控制与决策

Control and Decision

欺骗攻击下多区域电力系统的事件驱动量化负荷频率控制

雒春林, 王婷一, 闫晶晶

引用本文:

雒春林, 王婷一, 闫晶晶. 欺骗攻击下多区域电力系统的事件驱动量化负荷频率控制[J]. *控制与决策*, 2026, 41(6): 1601-1613.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.1141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于观测器的网络化多智能体预测控制

Observer-based networked multi-agent predictive control

控制与决策. 2021, 36(9): 2290-2296 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1801>

基于移动传感器/执行器网络的时滞分布参数系统镇定控制

Stabilization control for a class of distributed parameter systems with time-delay based on mobile sensor and actuator networks

控制与决策. 2021, 36(8): 1955-1962 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1309>

基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability

控制与决策. 2021, 36(6): 1407-1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069-1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

具有不确定丢包率和时变采样周期的Delta算子系统故障检测

Fault detection for delta operator systems with uncertain packet dropout rate and time-varying sampling periods

控制与决策. 2021, 36(5): 1101-1109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1154>

欺骗攻击下多区域电力系统的事件驱动量化负荷频率控制

雒春林¹, 王婷一², 闫晶晶^{2†}

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 河南工业大学 电气工程学院, 郑州 450001)

摘要: 在多区域互联电力系统中, 负荷波动易引发有功功率失衡, 需要通过调度指令 (如机组投入/退出调频队列) 动态调整发电机组出力. 此时, 不同发电组合的运行模式切换可由多模态切换系统刻画. 由于调度指令通常经由通信网络传输, 该过程易遭受欺骗攻击, 导致频率越限甚至机组误动作. 为解决这一问题, 提出欺骗攻击下的事件驱动量化负荷频率控制策略. 首先, 采用稀疏矩阵重构方法对子发电区域模型进行降维, 在保证分布式系统能控性和能观性的基础上, 建立多区域切换电力系统模型; 然后, 考虑欺骗攻击与发电模式切换的协同影响设计事件驱动传输机制, 同时, 证明存在既无攻击也无切换发生的连续时间段, 并利用该时段重构状态变量; 接着, 通过引入辅助序列构造迭代量化规则, 确保量化器始终不饱和; 最后, 从最优攻击视角出发, 给出保证多区域切换互联电网负荷频率控制系统 (LFCS) 指数稳定和实用稳定的充分条件. 仿真结果表明, 所提出方案能够在欺骗攻击下维持 LFCS 可靠运行.

关键词: 负荷频率控制; 切换电力系统; 网络欺骗攻击; 事件驱动传输; 数据量化; 稀疏矩阵重构

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1141

引用格式: 雒春林, 王婷一, 闫晶晶. 欺骗攻击下多区域电力系统的事件驱动量化负荷频率控制 [J]. 控制与决策, 2026, 41(6): 1601-1613.

Event-triggered quantized load frequency control of multi-area power systems under deception attacks

LUO Chun-lin¹, WANG Ting-yi², YAN Jing-jing^{2†}

(1. Xuji Electric Corporation Limited, Xuchang 461000, China; 2. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In a multi-regional interconnected power system, load fluctuations are prone to cause active power imbalances, which require dynamic adjustment of generator output through dispatch commands (e.g., units entering or exiting frequency regulation queues). During this process, the switching of operation modes among different generation portfolios can be modeled as a multi-mode switched system. Since dispatch commands are usually transmitted via communication networks, the process is vulnerable to deception attacks, which can result in frequency excursions and even unit malfunctions. To address this issue, this paper proposes an event-triggered quantized load frequency control strategy resilient to deception attacks. First, a sparse matrix reconstruction method is used to reduce the dimensionality of sub-system models while preserving the controllability and observability of the distributed system, thereby establishing a switched multi-area power system model. Second, an event-triggered transmission mechanism is designed by considering the coupled effects of deception attacks and generation mode switching. Meanwhile, it is proven that there exists a continuous time window during which no attacks or mode switching occur, and this interval is utilized for state reconstruction. By introducing auxiliary sequences to construct iterative quantization rules, quantizer non-saturation is guaranteed at all times. Finally, from the perspective of optimal attack, sufficient conditions are derived to ensure exponential stability and practical stability of the load frequency control system (LFCS) in a switched multi-area interconnected power grid. Simulation results show that the proposed scheme can maintain reliable LFCS operation under deception attacks.

Keywords: load frequency control; switched power systems; cyber deception attacks; event-triggered transmission; data quantization; sparse matrix reconstruction

收稿日期: 2025-11-03; 录用日期: 2026-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773154); 河南省高校科技创新人才支持计划项目 (24HASTIT039).

责任编辑: 马大中.

†通信作者. E-mail: yanjingjing2009@163.com.

0 引言

随着电力需求持续增长,多区域互联供电系统成为保障能源安全和经济调度的关键基础设施。LFCS 是保障多区域电力系统安全稳定运行的关键技术,其通过调节发电功率来维持系统频率和区域间联络线功率在允许范围内^[1-3]。然而,由于电力系统会不可避免地遭受恶意网络攻击,致使调度控制端收到空数据 (DoS 攻击) 或错误数据 (欺骗攻击),给系统稳定运行带来极大风险^[4]。此外,考虑到合理的数据量化编码策略可有效减小编码误差,而合理的传输机制可调整网络带宽占用量,保证数据传输的及时性和可靠性,本文针对多区域电力互联供电系统的负荷频率控制问题开展研究,综合考虑数据量化、驱动传输和网络欺骗攻击的影响,设计事件驱动量化负荷频率控制方案,旨在保障电力系统安全稳定运行的前提下,节约网络资源占用量。

近年来,多区域电力系统 LFCS 的网络攻击问题备受关注。针对 DoS 攻击,文献 [5] 通过设计基于采样特性的离散负荷频率控制策略增强了系统的弹性防御能力;为解决对抗性攻击的威胁,文献 [6] 结合强化学习与单调神经网络,提升了系统的稳定性和鲁棒性;文献 [7] 设计了基于观测器的反馈控制器来应对概率网络攻击;文献 [8] 提出了切换攻击模型和弹性事件驱动方案,建立了 LFCS 的均方指数稳定判据;针对 LFCS 的虚假数据注入 (FDI) 和 DoS 攻击,文献 [9] 开发了动态记忆事件驱动方案和基于观测器的负荷频率控制新方法,有效提高了频率控制性能;文献 [10] 设计了补偿控制策略以降低 FDI 及负载偏差对于系统状态估计精度和稳定运行带来的影响。

近期关于欺骗攻击下 LFCS 的安全控制的代表性研究包括:文献 [11] 采用模糊逻辑规则描述未知的欺骗攻击,采用隐式半马尔可夫模型描述异步机制,确保了系统的均方有界稳定性;文献 [12] 研究欺骗攻击时的网络化 LFC 问题,开发了新的自适应事件驱动方案,实现了通信资源与控制性能间的权衡。然而,上述文献均未涉及量化编码问题。有效的量化编码策略能够有效降低通信负担,但是对欺骗攻击下的系统稳定性分析提出了新的挑战,亟待深入研究。

为增加网络资源利用率,电力系统 LFCS 的事件驱动传输问题也受到了广泛关注。学者们通过融合人工鱼群和粒子群算法^[13],结合历史信号数据^[14],加入指数衰减项和状态模拟项^[15]等方式,设计了数

据驱动传输策略,降低了多区域电力系统的信息传输频率。本文将电力系统 LFCS 建模为切换系统,充分利用切换信息、攻击状况、驱动误差、最大步长等信息设置事件驱动传输策略,以尽可能地最小化切换和攻击对于电力系统 LFCS 性能的影响。

部分学者采用切换控制理论对网络攻击下的 LFCS 进行研究,取得了一定的成果。文献 [16] 根据混合攻击发生情况建立了多区域电力系统切换模型,推导出事件驱动负荷频率安全控制器的设计准则;文献 [17] 采用切换系统的概念将循环协议纳入 LFCS 的负荷频率控制过程,有效地降低了电力系统性能损失;文献 [18] 采用了一种类似切换的事件驱动机制以弥补 DoS 攻击导致数据丢失的影响。可见,现有结果多基于攻击发生情况或传输协议将 LFCS 建模为切换系统。本文将从发电机组根据调度指令投入或退出调频队列而导致系统动态模型切换这一新的角度对多区域 LFCS 进行切换系统建模。事实上,通过将发电机组的调频状态 (投入或退出) 定义为离散事件,将调度指令驱动调频状态变化的过程描述为系统模态的切换,从而构建系统矩阵随调频状态组合变化的动态切换模型。

综上所述,本文将以多区域切换电力系统 LFCS 建模为基础,综合考虑网络欺骗攻击对于系统性能的影响,设计事件驱动传输机制和量化编码控制策略,保障 LFCS 的稳定性。主要创新点如下:

1) 系统模型改进方面:从发电机组根据调度指令投入或退出调频队列从而导致系统模型切换这一新的角度对 LFCS 进行切换系统建模,通过稀疏矩阵重构方法对子发电区域模型进行降维以保障子系统的可控性和可观性。

2) 量化规则设计方面:引入序列 $\rho_e, \xi_e \in (0, 1)$ 刻画量化边界的动态演化,构建驱动时刻与非驱动时刻量化边界的函数递推关系,从理论上严格保证任意时刻量化器的非饱和性。

3) 稳定性分析方面:从最优攻击视角出发,揭示攻击连续发生为最恶劣场景的数学本质。将量化误差和攻击影响统一于李雅普诺夫分析框架,给出系统在欺骗攻击下保持指数稳定和实用稳定的充分条件。

1 问题描述

1.1 多区域切换电力系统的 LFC 模型

多区域电力互联供电系统包含 M 个发电区域,其中区域 i 的 LFCS 框架如图 1 所示。图 1 中参数的意义如表 1 所示。

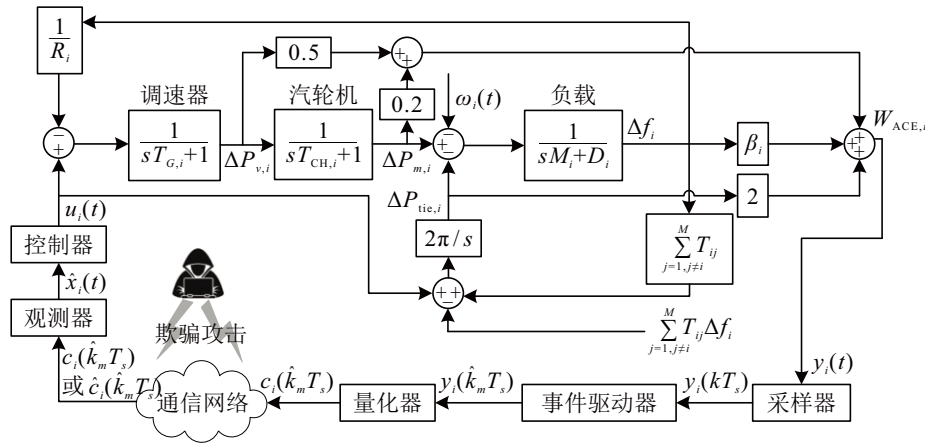


图1 区域*i*的LFCS框图

表1 图1中参数的意义

参数	意义	参数	意义
R_i	跌落系数	$\Delta P_{v,i}$	阀门位置偏差
$T_{G,i}$	调速器时间常数	$\Delta P_{m,i}$	机械输出功率偏差
$T_{CH,i}$	汽轮机时间常数	Δf_i	频率偏差
M_i	发电机旋转惯量	$\Delta P_{tie,i}$	联络线功率偏差
D_i	阻尼系数	T_s	采样周期
β_i	频率偏差系数	kT_s	第 <i>k</i> 个采样时刻
T_{ij}	联络线同步系数	$\hat{k}_m T_s$	第 <i>m</i> 个驱动时刻
$W_{ACE,i}$	区域控制误差		

区域*i*的状态空间模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_{ii}x_i(t) + B_i u_i(t) + E_i \omega_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^M A_{ij} x_j(t), \\ y_i(t) &= C_i x_i(t). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x_i(t) = [\Delta f_i, \Delta P_{m,i}, \Delta P_{v,i}, \Delta P_{tie,i}]^T \in \mathbb{R}^4$, $y_i(t) = W_{ACE,i} \in \mathbb{R}$, $u_i(t) \in \mathbb{R}$, $\omega_i(t) \in \mathbb{R}$ 分别为区域*i*的状态向量、输出向量、输入向量和扰动向量, \mathbb{R} 为实数集. 系统矩阵定义如下所示:

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i} & \frac{1}{M_i} & 0 & -\frac{1}{M_i} \\ 0 & -\frac{1}{T_{CH,i}} & \frac{1}{T_{CH,i}} & 0 \\ -\frac{1}{R_i T_{G,i}} & 0 & -\frac{1}{T_{G,i}} & 0 \\ 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i \neq j;$$

$$B_i = \left[0, 0, \frac{1}{T_{G,i}}, 1\right]^T; \quad C_i = [\beta_i \quad 0.2 \quad 0.5 \quad 2];$$

$$E_i = \left[-\frac{1}{M_i}, 0, 0, 0\right]^T;$$

$$T_{ij} = T_{ji}, \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, M\}.$$

注1 本文采用稀疏矩阵重构方法对文献 [2] 和文献 [19] 中的发电区域*i*的状态空间模型进行降维, 通过去掉状态向量和输出向量中的分量 $\int W_{ACE,i}$, 消除了矩阵 A_{ii} 的全 0 列和 B_i 阵的最后一个 0 行, 并对系统框架进行了改进 (如图 1 所示), 其主要目的是为了保障假设 3 成立. 事实上, 若令 $A = [A_{ijd}]_{M \times M}$, $B = \text{diag}[B_{1d}, B_{2d}, \dots, B_{Md}]$ (其中 A_{ijd} , B_{id} 由式 (2) 定义), 则易验证: 文献 [2] 和文献 [19] 中分布式电力系统 (A, B) 的可控性矩阵 $U = (B, AB, \dots, A^{5M-1}B)$ (此时子系统维数为 5) 满足 $\sum_{m=1}^M U_{5m} = 0_{1 \times 5M}$ (其中 U_{5m} 表示 U 的第 5*m* 行, $0_{i \times j}$ 为 i 行 j 列的全 0 矩阵), 即 U 不满秩, 意味着系统 (A, B) 不可控. 对于所提出改进系统 (此时子系统维数为 4), 可验证 $\sum_{m=1}^M U_{4m} = [2, 0_{1 \times (4M-1)}]$ 且 U 满秩, 此时, 系统 (A, B) 可控. 同理可验证可观性.

设采样周期为 T_s , 系统 (1) 可离散化为

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_{iid}x_i(k) + B_{id}u_i(k) + E_{id}\omega_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^M A_{ijd}x_j(k); \\ y_i(k) &= C_{id}x_i(k), \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 0}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} x_i(k) &\triangleq x_i(kT_s), \quad u_i(k) \triangleq u_i(kT_s), \\ \omega_i(k) &\triangleq \omega_i(kT_s), \quad x_j(k) \triangleq x_j(kT_s), \\ y_i(k) &\triangleq y_i(kT_s), \quad A_{iid} = e^{A_{ii}T_s}, \\ B_{id} &= \int_0^{T_s} e^{A_{ii}\zeta} B_i d\zeta, \quad C_{id} = C_i, \\ E_{id} &= \int_0^{T_s} e^{A_{ii}\zeta} E_i d\zeta, \quad A_{ijd} = \int_0^{T_s} e^{A_{ii}\zeta} A_{ij} d\zeta. \end{aligned}$$

为简化描述, 将第 k 个采样时刻简称为第 k 个时刻.

令

$$\begin{aligned} x(k) &= [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T \in \mathbb{R}^{4M}, \\ u(k) &= [u_1(k), u_2(k), \dots, u_M(k)]^T \in \mathbb{R}^M, \\ \omega(k) &= [\omega_1(k), \omega_2(k), \dots, \omega_M(k)]^T \in \mathbb{R}^M, \\ y(k) &= [y_1(k), y_2(k), \dots, y_M(k)]^T \in \mathbb{R}^M, \\ A &= [A_{ijd}]_{M \times M}, \quad B = \text{diag}[B_{1d}, B_{2d}, \dots, B_{Md}], \\ E &= \text{diag}[E_{1d}, E_{2d}, \dots, E_{Md}], \\ C &= \text{diag}[C_{1d}, C_{2d}, \dots, C_{Md}], \end{aligned}$$

则 M 个区域电力互联供电系统可建模为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + E\omega(k), \\ y(k) &= Cx(k), \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 0}. \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 欺骗攻击和事件驱动传输机制

本文考虑的欺骗攻击, 特指对网络传输数据的恶意篡改. 其破坏机理主要体现在两个层面: 1) 攻击者可篡改表征系统运行模式的模态信号, 致使控制器所辨识的系统模态与实际运行模态失配, 从而诱发闭环系统失稳; 2) 攻击者亦可在信号量化环节实施欺骗, 将真实量化值篡改为同一量化区间内的其他数值, 从而扩大量化误差, 渐近削弱系统动态性能. 采用二进制变量 θ_k 描述欺骗攻击发生情况: 若第 k 个时刻发生攻击, 则记 $\theta_k = 1$; 否则, 记 $\theta_k = 0$.

假设 1^[8] 存在标量 $\varsigma_d \geq 0$ 和 $\nu_d \in [0, 1]$, 使得

$$H(0, k) \leq \varsigma_d + \nu_d k, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1}.$$

其中: $H(0, k) = \sum_{i=0}^{k-1} \theta_k$ 为区间 $[0, k]$ 内发生攻击的总次数, $\mathbb{Z}^{\geq j}$ 为大于或等于 j 的整数集合.

假设 2^[8] 存在标量 $\varsigma_f \geq 0$ 和 $\nu_f \in [0, 0.5]$, 使得

$$P(0, k) \leq \varsigma_f + \nu_f k, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1},$$

其中 $P(0, k)$ 为区间 $[0, k]$ 内发起攻击的总次数, 即 θ_k 从0变为1的总次数.

采用如下事件驱动机制确定驱动传输时刻 \hat{k}_m ($\forall m \in \mathbb{Z}^{\geq 1}$):

$$\hat{k}_{m+1} = \left\{ \begin{aligned} & \text{i) } k = \bar{k}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}^{\geq 1}; \\ & \text{ii) } \theta_{k-1} = 1, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1}; \\ & \text{iii) } \|y(k) - y(\hat{k}_m)\|_{\infty} > \varphi F_{R, \hat{k}_m}^y; \\ & \text{iv) } k - \hat{k}_m = z. \end{aligned} \right\}.$$

其中: 驱动条件 i) 表示在系统模态切换时刻驱动, 由式 (5) 定义. 驱动条件 ii) 表示若上一时刻受到欺骗攻击, 则在当前时刻驱动. 驱动条件 iii) 表示若驱动误差足够大, 则驱动传输. 这里: $\varphi > 0$ 称为驱动误差系数; F_{R, \hat{k}_m}^y 为量化区域的半边长度, 由式 (7) 定义.

驱动条件 iv) 表示驱动时刻间隔不大于 $z \in \mathbb{Z}^{\geq 1}$.

1.3 基于观测器的量化控制规则

对于任意 $k \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1})$, 设计基于观测器的量化控制规则为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + (1 - \theta_{\hat{k}_m})L(c(\hat{k}_m) - \hat{y}(k)) + \theta_{\hat{k}_m}L(\hat{c}(\hat{k}_m) - \hat{y}(k)), \\ u(k) &= -K\hat{x}(k), \quad \hat{y}(k) = C\hat{x}(k). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\hat{x}(k)$ 和 $\hat{y}(k)$ 分别为多区域电力互联供电系统的观测器的状态向量和输出向量, $c(\hat{k}_m)$ 和 $\hat{c}(\hat{k}_m)$ 分别为 \hat{k}_m 时刻 $y(\hat{k}_m)$ 的真实量化值和欺骗攻击作用下被篡改的量化值, K 和 L 分别为待设计的反馈矩阵和观测矩阵. 为降低欺骗攻击被检测概率, 假定 $\hat{c}(\hat{k}_m)$ 为 \hat{k}_m 时刻定义的量化区域内的其他量化值.

令 $\vartheta(k) = [x(k); x(k) - \hat{x}(k)]$, 由式 (2) 和 (3), 可得到

$$\begin{aligned} \vartheta(k+1) &= \begin{cases} \hat{A}\vartheta(k) + \bar{L}(y(k) - \hat{c}(\hat{k}_m)) + \bar{E}\omega(k), \\ \theta_{\hat{k}_m} = 1; \\ \hat{A}\vartheta(k) + \bar{L}(y(k) - c(\hat{k}_m)) + \bar{E}\omega(k), \\ \theta_{\hat{k}_m} = 0. \end{cases} \\ y(k) &= \bar{C}\vartheta(k). \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{A} &= \begin{bmatrix} A - BK & BK \\ 0_{4M \times 4M} & A - LC \end{bmatrix}, \\ \bar{L} &= \begin{bmatrix} 0_{4M \times M} \\ L \end{bmatrix}, \quad \bar{E} = \begin{bmatrix} E \\ E \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \quad 0_{M \times 4M}]. \end{aligned}$$

在多区域电力系统运行中, 发电机组根据调度指令的投切会改变系统动态参数. 当第 \tilde{j} 个区域的发电机组因转入备用或检修等原因退出调频运行时, 该区域对系统频率的支撑能力下降, 区域间的同步能力减弱, 表现为联络线同步系数 T_{ij}, T_{ji} 显著减小, 记为 $\tilde{T}_{ij}, \tilde{T}_{ji}$, 此时矩阵 \hat{A} 呈现切换特性. 因此, 在考虑调度指令情况下, 系统 (4) 可建模为如下切换系统:

$$\begin{aligned} \vartheta(k+1) &= \begin{cases} \hat{A}_{\alpha\beta}^{gj} \vartheta(k) + L_{\beta}^{gj}(y(k) - \hat{c}(\hat{k}_m)) + M_{\alpha}\omega(k), & \theta_{\hat{k}_m} = 1; \\ A_{\alpha}^{aq} \vartheta(k) + L_{\alpha}^{aq}(y(k) - c(\hat{k}_m)) + M_{\alpha}\omega(k), & \theta_{\hat{k}_m} = 0. \end{cases} \\ y(k) &= C_{\alpha}^{aq} \vartheta(k). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{A}_{\alpha\beta}^{gj} &= \begin{bmatrix} A_{\alpha} - B_{\alpha}K_{\beta} & B_{\alpha}K_{\beta} \\ 0_{4M \times 4M} & A_{\alpha} - L_{\beta}C_{\alpha} \end{bmatrix}, \\ L_{\beta}^{gj} &= \begin{bmatrix} 0_{4M \times M} \\ L_{\beta} \end{bmatrix}, \\ A_{\alpha}^{aq} &= \begin{bmatrix} A_{\alpha} - B_{\alpha}K_{\alpha} & B_{\alpha}K_{\alpha} \\ 0_{4M \times 4M} & A_{\alpha} - L_{\alpha}C_{\alpha} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$M_\alpha = \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\alpha \end{bmatrix},$$

$$L_\alpha^{aq} = \begin{bmatrix} 0_{4M \times M} \\ L_\alpha \end{bmatrix}, C_\alpha^{aq} = [C_\alpha \quad 0_{M \times 4M}],$$

且 $\alpha = \sigma(k) \in \Pi = \{1, 2, \dots, 2^M - 1\}$ 为系统的模态, $\beta = \sigma_c(k) = \sigma_c(\hat{k}_m) \in \Pi$ 为控制器的模态.

注 2 系统模态切换的诱因为部分子系统在参与或退出调频间转化. 事实上, 若第 j 个子系统从参与调频状态转换为退出调频状态, 则 A_{ii} 、 A_{ij} 和 A_{ji} 中的元素 T_{ij} 和 T_{ji} 将跳变为 \tilde{T}_{ij} 和 \tilde{T}_{ji} , 从而诱发系统 (5) 发生模态切换. 此外, 由于 A_α 取值不同, 为保证系统稳定, 需要设计不同的反馈矩阵 K_α .

由驱动条件 i) 和 ii) 可知: 若 $\theta_{\hat{k}_m} = 0$, 则 $\beta = \alpha$; 否则, 在欺骗攻击影响下, 通过网络传输的系统模态 α 可能会被篡改, 从而出现控制器模态不能与系统模态匹配的情况, 即 $\beta \neq \alpha$.

由注 1 可知, 下述假设 3 成立.

假设 3 对于 $\forall \alpha \in \Pi$, (A_α, B_α) 是可控的, 且 (A_α, C_α) 是可观的, 即存在矩阵 K_α 和 L_α , 使得 $A_\alpha - B_\alpha K_\alpha$ 和 $A_\alpha - L_\alpha C_\alpha$ 是 Schur 稳定的.

假设 4 存在标量 $\tau_a > 0$ 和 $N_0 > 0$, 使得

$$N_\sigma(k_0, k) \leq N_0 + \frac{k - k_0}{\tau_a}, \quad \forall k \geq k_0 \geq 0,$$

其中 $N_\sigma(k_0, k)$ 为区间 $(k_0, k]$ 内的模态切换次数.

假设 5 扰动向量 $\omega(k)$ 是有界的, 即存在 $\varpi > 0$, 使得 $\|\omega(k)\|_\infty \leq \varpi (\forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 0})$.

引理 1^[20] 对于任意 Schur 稳定矩阵 \tilde{A} , 总存在可逆矩阵 \tilde{R} , 使得 $\|\tilde{R}\tilde{A}\tilde{R}^{-1}\|_\infty < 1$.

由假设 3, 对于 $\forall \alpha \in \Pi$, 存在 K_α 和 L_α , 使得 A_α^{aq} 是 Schur 稳定的. 故存在可逆矩阵 R_α , 使得 $\|R_\alpha A_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1}\|_\infty < 1$.

令 $\vartheta_R(k) = R_\alpha \vartheta(k)$, 由式 (5), 可得到

$$\vartheta_R(k+1) = \begin{cases} R_\alpha \hat{A}_{\alpha\beta}^{gj} R_\alpha^{-1} \vartheta_R(k) + R_\alpha L_\beta^{gj} (y(k) - \hat{c}(\hat{k}_m)) + R_\alpha M_\alpha \omega(k), \\ \theta_{\hat{k}_m} = 1; \\ R_\alpha A_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1} \vartheta_R(k) + R_\alpha L_\alpha^{aq} (y(k) - c(\hat{k}_m)) + R_\alpha M_\alpha \omega(k), \\ \theta_{\hat{k}_m} = 0. \end{cases}$$

$$y(k) = C_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1} \vartheta_R(k). \quad (6)$$

1.4 量化规则

设初始状态 $x(0)$ 未知. 若存在驱动时刻 \hat{k}_{h_0} 和量化区域半边长度 $F_{\hat{k}_{h_0}}^x$, 使得 $\|x(\hat{k}_{h_0})\|_\infty \leq F_{\hat{k}_{h_0}}^x$ (\hat{k}_{h_0} 的存在性将在后文第 2 节验证), 则令 $\hat{x}(k) = 0 (\forall k$

$\in [0, \hat{k}_{h_0})$), 有

$$\|\vartheta_R(\hat{k}_{h_0})\|_\infty \leq \max_{\alpha \in \Pi} \|R_\alpha\|_\infty F_{\hat{k}_{h_0}}^x \triangleq F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x.$$

将在后文第 3 节建立边界序列 $F_{R, k}^x (\forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1})$, 使得 $\|\vartheta_R(k)\|_\infty \leq F_{R, k}^x$, 从而有

$$\|y(k)\|_\infty \leq \max_{\alpha \in \Pi} \|C_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1}\|_\infty F_{R, k}^x \triangleq F_{R, k}^y. \quad (7)$$

在驱动时刻 \hat{k}_m , 量化器将量化区域

$$\{y(\hat{k}_m) \in R^M : \|y(\hat{k}_m)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_m}^y\}$$

划分为 S^M 个超盒子, 每个维度平均分为 S 份, S 称为量化器的量化级数. 将 $y(\hat{k}_m)$ 所在超盒子的中心作为其量化值 $c(\hat{k}_m)$, 有

$$\|y(\hat{k}_m) - c(\hat{k}_m)\|_\infty \leq \frac{1}{S} F_{R, \hat{k}_m}^y,$$

$$\|y(\hat{k}_m) - \hat{c}(\hat{k}_m)\|_\infty \leq \frac{2S-1}{2S} F_{R, \hat{k}_m}^y.$$

1.5 主要目的

定义 1^[21] 1) 若存在常数 $\Lambda, \Gamma > 0, \lambda \in (0, 1)$, 函数 $G, J : [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$, 使得

$$\|x(k)\|_\infty \leq \Lambda \lambda^{k-G(\|x(0)\|_\infty)} J(\|x(0)\|_\infty) + \Gamma \varpi$$

对于任意 $k \in \mathbb{Z}^{\geq G(\|x(0)\|_\infty)}$ 成立, 则称闭环系统 (6) 是指数收敛的.

2) 对于给定的 $\varepsilon, \Gamma > 0$, 若存在常数 $\bar{h} > 0$, 使得

$$\|x(0)\|_\infty < \bar{h}, \quad \varpi < \bar{h} \Rightarrow \|x(k)\|_\infty < \varepsilon + \Gamma \varpi, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1},$$

则称闭环系统 (6) 是实用稳定的.

本文的主要目的是设计有界序列 $F_{R, k}^x (\forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1})$, 使得闭环系统 (6) 达到指数收敛和实用稳定性.

2 欺骗攻击影响下初始状态边界的选取

本节的目标是在欺骗攻击影响下找到初始的量化区域半边长度 $F_{\hat{k}_{h_0}}^x$, 使得 $\|x(\hat{k}_{h_0})\|_\infty \leq F_{\hat{k}_{h_0}}^x$. 在本阶段, 令 $\hat{x}(k) = 0_{4M}, u(k) = 0_M$, 且在每个时刻均驱动直至找到 $F_{\hat{k}_{h_0}}^x$. 此时, 系统 (5) 可简化为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_\alpha x(k) + E_\alpha \omega(k), \\ y(k) &= C_\alpha x(k), \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\alpha = \sigma(k) \in \Pi$. 考虑到 (A_α, C_α) 是可观测的, 令 ψ_α 为其可观性指数, 则

$$W_\alpha = \begin{bmatrix} C_\alpha \\ C_\alpha A_\alpha \\ \vdots \\ C_\alpha A_\alpha^{\psi_\alpha - 1} \end{bmatrix}$$

列满秩, 其中可观性指数 ψ_α 可通过逐个验证 $r_1 =$

$\text{rank}[C], r_2 = \text{rank}[C^T, (CA)^T]^T, \dots, r_\ell = \text{rank}[C^T, (CA)^T, \dots, (CA^{\ell-1})^T]^T$, 并令 ψ_α 为满足 $r_\ell = 4M$ 的最小 ℓ 来获得.

为了实现状态重构, 下面验证存在连续时间序列 $\{k_1, k_2, \dots, k_{\psi_\alpha}\}$ 未发生攻击和切换.

引理 2 存在有限时间 τ , 使得 $\|y(k)\|_\infty \leq F_k^y$ ($\forall k \geq \tau$).

证明 令 $\Upsilon = \max_{\alpha \in \Pi} \|A_\alpha\|_\infty, E = \max_{\alpha \in \Pi} \|E_\alpha\|_\infty$. 对于任意给定的常数 $\kappa > 1$ 和 F_0^x , 定义

$$F_0^y = \max_{\alpha \in \Pi} \|C_\alpha\|_\infty F_0^x > 0,$$

$$F_k^y = \max_{\alpha \in \Pi} \|C_\alpha\|_\infty \left((\kappa \Upsilon)^k F_0^x + \sum_{i=0}^{k-1} (\kappa \Upsilon)^i E \varpi \right).$$

考虑到 $u(k) = 0$, F_k^y 的增长速度大于 $\|y(k)\|_\infty$ 的增长速度, 必存在 τ , 使得 $\|y(k)\|_\infty \leq F_k^y$ ($\forall k \geq \tau$) 成立. \square

引理 3^[22] 若以下条件成立, 则存在连续时间序列 $\{k_1, k_2, \dots, k_{\psi_\alpha}\} \subset [\bar{k}, k_f + 1]$ 未发生攻击和切换:

1) 对于任意 $\tau_0 \in (0, \tau_a)$, 均存在 $\mu \in \mathbb{Z}^{\geq 1}$, 使得

$$\mu > \frac{\tau_a}{\tau_a - \tau_0} \left(N_0 - \frac{\tau_0}{\tau_a} \right);$$

2) ν_d 和 ν_f 满足 $\nu_d < 1 - (\psi_\alpha - 1)\nu_f$, 令 k_f 为满足

$$k_f \leq \frac{\varsigma_d + (\varsigma_f + 1)(\psi_\alpha - 1)}{1 - \nu_d - (\psi_\alpha - 1)\nu_f}$$

的最小正整数;

3) τ_a 和 ψ_α 满足

$$\frac{\varsigma_d + (\varsigma_f + 1)(\psi_\alpha - 1)}{1 - \nu_d - (\psi_\alpha - 1)\nu_f} + 1 \leq \bar{k} + \tau_a - 1,$$

其中 $\bar{k} \in [\tau, \tau + (\mu - 1)\tau_0]$.

引理 3 中条件的判定算法如下: 首先, 条件 1) 总可以通过取足够大的 μ 来满足. 其次, 对于给定的 ν_d, ν_f 和 ψ_α , 可直接验证 $\nu_d < 1 - (\psi_\alpha - 1)\nu_f$ 是否成立, 并根据定义求出 k_f . 最后, 将条件 2) 的结果代入条件 3) 的左边, 与右边比较, 验证 \bar{k} 是否存在.

在引理 3 中, 条件 1) 通过限制 N_0 足够小而 τ_a 足够大, 以保证系统存在一段不包含任何模态切换的连续运行区间. 条件 2) 则要求欺骗攻击存在持续休眠时段, 以确保控制器能够连续接收到至少 ψ_α 个未经篡改的量化信号. 条件 3) 综合条件 1) 和条件 2) 的约束, 确保能够找到一个时间窗口, 在该窗口内既无系统模态切换, 也无攻击信号注入, 从而为状态重构和量化规则初始化提供必要的完整性条件.

组合引理 2 和引理 3, 由 F_k^y 关于 k 单调递增, 可得到

$$\| [ly(k_1), y(k_2), \dots, y(k_{\psi_\alpha})]^T \|_\infty \leq F_{k_{\psi_\alpha}}^y.$$

令 W_α 的伪逆为 $W_\alpha^\dagger = (W_\alpha^T W_\alpha)^{-1} W_\alpha^T$, 有

$$x(k_1) =$$

$$W_\alpha^\dagger [y(k_1), y(k_2), \dots, y(k_{\psi_\alpha})]^T - W_\alpha^\dagger \times$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ C_\alpha E_\alpha \omega(k_1) \\ \vdots \\ C_\alpha \sum_{i=1}^{\psi_\alpha-1} A_\alpha^{\psi_\alpha-1-i} E_\alpha \omega(k_i) \end{bmatrix}.$$

从而可得到

$$\|x(k_{\psi_\alpha} + 1)\|_\infty \leq$$

$$\Upsilon^{\psi_\alpha} \|x(k_1)\|_\infty + \sum_{i=0}^{\psi_\alpha-1} \Upsilon^i E \varpi \leq$$

$$\Upsilon^{\psi_\alpha} \|W_\alpha^\dagger\|_\infty F_{k_{\psi_\alpha}}^y +$$

$$\left(\Upsilon^{\psi_\alpha} \|W_\alpha^\dagger\|_\infty \|C_\alpha\|_\infty \sum_{i=0}^{\psi_\alpha-2} \Upsilon^i + \sum_{i=0}^{\psi_\alpha-1} \Upsilon^i \right) E \varpi \triangleq$$

$$F_{k_{\psi_\alpha}+1}^x.$$

令 $\hat{k}_{h_0} = k_{\psi_\alpha} + 1$, 则 $\|x(\hat{k}_{h_0})\|_\infty \leq F_{\hat{k}_{h_0}}^x$. 由 $\hat{x}(\hat{k}_{h_0}) = 0_{4M}$, 有

$$\|\vartheta_R(\hat{k}_{h_0})\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x. \quad (9)$$

3 状态边界迭代规则设计

若驱动时刻 \hat{k}_m ($\forall m \in \mathbb{Z}^{\geq 1}$) 未发生攻击, 即 $\theta(\hat{k}_m) = 0$, 则对于 $\forall \hat{k}_m + \ell \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1})$ ($m \in \mathbb{Z}^{> h_0}$), 令

$$F_{R, \hat{k}_m + \ell + 1}^x = \begin{cases} \rho_0 F_{R, \hat{k}_m + \ell}^x + \chi \varpi, & \ell = 0; \\ \rho_\ell F_{R, \hat{k}_m + \ell}^x + \chi \varpi \xi_\ell, & \ell \neq 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\rho_0 = \Delta + \Delta; \quad \chi = \max_{\alpha \in \Pi} \|R_\alpha M_\alpha\|;$$

$$\rho_\ell = \Delta + \frac{\Delta}{\Delta^\ell + \Delta \sum_{i=0}^{\ell-1} \Delta^{\ell-i-1}}, \quad \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1};$$

$$\xi_\ell = \Delta^\ell + (1 - \rho_\ell) \sum_{i=0}^{\ell-1} \Delta^{\ell-i-1}, \quad \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1};$$

$$\Delta = \max_{\alpha \in \Pi} \|R_\alpha A_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1}\|_\infty < 1;$$

$$\Delta = \max_{\alpha \in \Pi} \|R_\alpha L_\alpha^{aq}\|_\infty \|C_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1}\|_\infty (\varphi + 1/S).$$

且 φ 为驱动条件 3) 中设定的驱动误差系数. 在式 (10) 中, 本文引入两个序列 ρ_ℓ ($\xi_\ell \in (0, 1)$) 来设计动态的量化规则, 构建驱动时刻与非驱动时刻量化边界的函数递推关系, 此为本文的主要创新之一.

引理 4 若 φ 足够小且 S 充分大, 使得 $\rho_0 < 1$, 则序列 $\{\rho_\ell, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 0}\}$ 单调递增且极限为 1. 此外, 序列 $\{\xi_\ell, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1}\}$ 满足 $0 < \xi_\ell < 1$.

证明 首先, 对 $\Delta^\ell + \Delta \sum_{i=0}^{\ell-1} \Delta^{\ell-i-1} = \Delta^\ell + \Delta \frac{1-\Delta^\ell}{1-\Delta}$ 关于 ℓ 求导, 有

$$\frac{d}{d\ell} \left(\Delta^\ell + \Delta \frac{1-\Delta^\ell}{1-\Delta} \right) = \Delta^\ell \ln \Delta \left(1 - \frac{\Delta}{1-\Delta} \right).$$

由于 $\delta < 1$, 若 $\rho_0 = \delta + \Delta < 1$, 则有 $\delta^\ell \ln \delta \left(1 - \frac{\Delta}{1-\delta} \right) < 0$, 即 $\delta^\ell + \Delta \frac{1-\delta^\ell}{1-\delta}$ 关于 ℓ 单调递减, 且 $\{\rho_\ell, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1}\}$ 关于 ℓ 单调递增. 此外, 由 $\delta + \Delta < 1$, 易见 $\rho_0 < \rho_1$. 故 $\{\rho_\ell, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1}\}$ 关于 ℓ 单调递增, 且极限为

$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} \rho_\ell = \Delta + \frac{\Delta}{\Delta^\ell + \Delta \frac{1-\Delta^\ell}{1-\Delta}} = 1,$$

故 $0 < \rho_\ell \leq 1 (\forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 0})$. 此外, $\{\xi_\ell, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1}\}$ 满足

$$\xi_\ell = \delta^\ell + (1 - \rho_\ell) \sum_{i=0}^{\ell-1} \delta^{\ell-i-1} > \delta^\ell > 0,$$

$$\xi_\ell < \delta^\ell + (1 - \rho_1) \frac{1 - \delta^\ell}{1 - \delta} =$$

$$1 - \frac{\Delta}{\delta + \Delta} \frac{1 - \delta^\ell}{1 - \delta} < 1, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 1}.$$

引理 4 得证. \square

若驱动时刻 $\hat{k}_m (\forall m \in \mathbb{Z}^{\geq 1})$ 发生攻击, 即 $\theta(\hat{k}_m) = 1$, 则由驱动条件 2) 可知, $\hat{k}_m + 1 = \hat{k}_{m+1}$, 即区间 $[\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1})$ 内只有一个时刻 \hat{k}_m . 令

$$F_{R, \hat{k}_{m+1}}^x = \rho_a F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \varpi. \quad (11)$$

其中

$$\rho_a = \hat{\delta} + \hat{\Delta}, \quad \hat{\delta} = \max_{\alpha \neq \beta \in \Pi} \|R_\alpha \hat{A}_{\alpha\beta}^{gj} R_\alpha^{-1}\|_\infty,$$

$$\hat{\Delta} = \max_{\alpha \neq \beta \in \Pi} \|R_\alpha L_\beta^{gj}\|_\infty \|C_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1}\|_\infty (\varphi + 1 - 1/(2S)).$$

显然, 量化规则 (10) 和 (11) 的参数可基于系统参数、驱动参数和量化级数直接计算出来, 其选取规则是为了保证下文式 (14) 和 (15) 成立, 从而保证系统的指数收敛性.

4 稳定性分析

4.1 指数收敛性

定理 1 若假设 1 ~ 假设 5 成立, 且假设 1 中的 ν_d 和驱动条件 iv) 中的 z 满足

$$\left(\frac{\rho_a}{\rho_0^{1/z}} \right)^{\nu_d} \rho_0^{1/z} < 1, \quad (12)$$

则在量化机制 (10) 和 (11) 下, 闭环系统 (6) 指数收敛.

注 3 条件 (12) 未显含模态切换的影响, 这源于量化规则 (11) 的设计: 无论攻击发生时系统模态

是否切换, 均视为攻击导致模态失配. 实际上, 若攻击时刻未发生切换, 则攻击仅篡改量化值而不引起模态不匹配, 此时, ρ_a 可取为更紧的界

$$\rho_a = \delta + \max_{\alpha \in \Pi} \|R_\alpha L_\alpha^{aq}\|_\infty \|C_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1}\|_\infty (\varphi + 1 - 1/(2S)).$$

可见, 降低切换频率有助于缩小量化区域. 为简化稳定性分析, 文中未区分攻击时模态切换与否, 但是这将保守地扩大量化区域.

下面给出定理 1 的证明.

证明 step 1: 若 $\theta(\hat{k}_m) = 0$, 验证对于任意 $\hat{k}_m + \ell \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}) (\forall m \in \mathbb{Z}^{> h_0})$, 则有

$$F_{R, \hat{k}_m + \ell}^x = \left(\delta^\ell + \Delta \sum_{i=0}^{\ell-1} \delta^{\ell-i-1} \right) F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \sum_{i=0}^{\ell-1} \delta^{\ell-i-1} \varpi. \quad (13)$$

事实上, 若 $\ell = 1$, 则式 (13) 等价于

$$F_{R, \hat{k}_m + 1}^x = (\delta + \Delta) F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \varpi = \rho_0 F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \varpi.$$

由式 (10) 可见, 上式显然成立.

假设式 (13) 在时刻 $\hat{k}_m + \hat{\ell} \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1} - 1)$ 成立, 即

$$F_{R, \hat{k}_m + \hat{\ell}}^x = \left(\delta^{\hat{\ell}} + \Delta \sum_{i=0}^{\hat{\ell}-1} \delta^{\hat{\ell}-i-1} \right) F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \sum_{i=0}^{\hat{\ell}-1} \delta^{\hat{\ell}-i-1} \varpi,$$

则有

$$F_{R, \hat{k}_m + \hat{\ell} + 1}^x = \rho_\ell F_{R, \hat{k}_m + \hat{\ell}}^x + \chi \varpi \xi_\ell = \left(\delta^{\hat{\ell} + 1} + \Delta \sum_{i=0}^{\hat{\ell}} \delta^{\hat{\ell}-i} \right) F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \sum_{i=0}^{\hat{\ell}} \delta^{\hat{\ell}-i} \varpi.$$

由归纳法可得, 对于任意 $\hat{k}_m + \ell \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1})$, 式 (13) 成立.

step 2: 若 $\theta(\hat{k}_m) = 0 (\forall m \in \mathbb{Z}^{> h_0})$, 则建立 $F_{R, \hat{k}_m + \ell}$ 与 $\vartheta_R(\hat{k}_m + \ell) (\forall \hat{k}_m + \ell \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}), \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 0})$ 的关系式为

$$\begin{aligned} \|\vartheta_R(\hat{k}_m + \ell)\|_\infty &\leq \\ &\left(\delta^\ell + \Delta \sum_{i=0}^{\ell-1} \delta^{\ell-i} \right) F_{R, \hat{k}_m}^x + \chi \sum_{i=0}^{\ell-1} \delta^{\ell-i} \varpi = \\ &F_{R, \hat{k}_m + \ell}^x. \end{aligned} \quad (14)$$

由式 (9), 有 $\|\vartheta_R(\hat{k}_{h_0})\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x$. 令 $\sigma(\hat{k}_{h_0}) = \alpha$, 可得到

$$\begin{aligned} \|\vartheta_R(\hat{k}_{h_0} + \ell + 1)\|_\infty &= \\ &\|R_\alpha A_\alpha^{aq} R_\alpha^{-1} \vartheta_R(\hat{k}_{h_0} + \ell) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & R_\alpha L_\alpha^{a_q}(y(\hat{k}_{h_0} + \ell) - c(\hat{k}_{h_0})) + R_\alpha M_\alpha \omega(\hat{k}_{h_0}) \|\infty \leq \\
 & (\delta^{\ell+1} + \Delta \sum_{i=0}^{\ell} \delta^{\ell-i}) F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x + \chi \sum_{i=0}^{\ell} \delta^{\ell-i} \varpi = \\
 & F_{R, \hat{k}_{h_0} + \ell + 1}^x, \quad \forall \hat{k}_{h_0} + \ell \in [\hat{k}_{h_0}, \hat{k}_{h_0+1}]. \quad (15)
 \end{aligned}$$

特别地, 在 \hat{k}_{h_0+1} 时刻, 有

$$\begin{aligned}
 & \|\vartheta_R(\hat{k}_{h_0+1})\|_\infty \leq \\
 & (\delta^{\hat{k}_{h_0+1} - \hat{k}_{h_0}} + \Delta \sum_{i=0}^{\hat{k}_{h_0+1} - \hat{k}_{h_0} - 1} \delta^{\hat{k}_{h_0+1} - \hat{k}_{h_0} - 1 - i}) F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x.
 \end{aligned}$$

类似于式 (15) 的分析可得, 式 (14) 对于 $\forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 0}$ 成立.

step 3: 若 $\theta(\hat{k}_m) = 1 (\forall m \in \mathbb{Z}^{> h_0})$, 则 $\hat{k}_{m+1} = \hat{k}_m + 1$. 对于任意 $\ell \in \{0, 1\}$, 建立 $F_{R, \hat{k}_m + \ell}$ 与 $\vartheta_R(\hat{k}_m + \ell)$ 间的关系式, 即

$$\|\vartheta_R(\hat{k}_m + \ell)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_m + \ell}^x, \quad \forall \hat{k}_m + \ell \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}]. \quad (16)$$

令 \hat{k}_p 为首个发生攻击的驱动时刻. 若 $\hat{k}_p = \hat{k}_{h_0}$, 则由式 (9), 可得到 $\|\vartheta_R(\hat{k}_p)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_p}^x$; 若 $\hat{k}_p = \hat{k}_{m+1}$ 满足 $\theta(\hat{k}_m) = 0$, 则由式 (14), 可得到 $\|\vartheta_R(\hat{k}_p)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_p}^x$ 依然成立. 故有

$$\begin{aligned}
 & \|\vartheta_R(\hat{k}_p + 1)\|_\infty = \\
 & \|R_\alpha \hat{A}_{\alpha\beta}^{g_j} R_\alpha^{-1} \vartheta_R(\hat{k}_p) + R_\alpha L_\beta^{g_j}(y(\hat{k}_p) - \hat{c}(\hat{k}_p)) + \\
 & R_\alpha M_\alpha \omega(\hat{k}_p)\|_\infty \leq \\
 & \max_{\Pi \alpha \neq \beta \in \Pi} \{\|R_\alpha \hat{A}_{\alpha\beta}^{g_j} R_\alpha^{-1}\|_\infty + \|R_\alpha L_\beta^{g_j}\|_\infty \|C_{\alpha}^{a_q} R_\alpha^{-1}\|_\infty \times \\
 & (\varphi + 1 - 1/2S)\} F_{R, \hat{k}_p}^x + \max_{\alpha \in \Pi} \|R_\alpha M_\alpha\|_\infty \varpi \leq \\
 & (\hat{\delta} + \hat{\Delta}) F_{R, \hat{k}_p}^x + \chi \varpi = F_{R, \hat{k}_p+1}^x. \quad (17)
 \end{aligned}$$

令 \hat{k}_q 为任一发生攻击的驱动时刻. 同理, 若 $\hat{k}_q = \hat{k}_{h_0}$, 则由式 (9), 可得到 $\|\vartheta_R(\hat{k}_q)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_q}^x$; 若 $\hat{k}_q = \hat{k}_{m+1}$ 且 $\theta(\hat{k}_m) = 0$, 则由式 (14), 可得到 $\|\vartheta_R(\hat{k}_q)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_q}^x$; 若 $\hat{k}_q = \hat{k}_{m+1}$ 且 $\theta(\hat{k}_m) = 1$, 则由式 (17), 可得到 $\|\vartheta_R(\hat{k}_q)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_q}^x$.

类似于式 (17) 的分析, 式 (16) 成立.

综合 step 2 和 step 3, 对于 $\forall m \in \mathbb{Z}^{> h_0}$, 有

$$\|\vartheta_R(\hat{k}_m + \ell)\|_\infty \leq F_{R, \hat{k}_m + \ell}^x, \quad \forall \hat{k}_m + \ell \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}],$$

即 $\|x(k)\|_\infty \leq \|\vartheta_R(k)\|_\infty \leq F_{R, k}^x (\forall k \in \mathbb{Z}^{> \hat{k}_{h_0}})$.

step 4: 验证区间 $[\hat{k}_{h_0}, k)$ 内的最佳攻击效果为所有攻击连续发生.

由驱动条件 iv) 可知, 区间 $[\hat{k}_{h_0}, k)$ 内至少发生 $\lfloor (k - \hat{k}_{h_0})/z \rfloor + 1$ 次驱动. 若区间 $[\hat{k}_j, \hat{k}_j + z) (\forall j \in \mathbb{Z}^{> h_0})$ 内发生一次攻击, 则由

$$\begin{aligned}
 & F_{R, \hat{k}_j+z}^x \leq \\
 & \begin{cases} \rho_a \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-2} F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j) = 1; \\ \rho_0^2 \rho_a \rho_1 \cdots \rho_{z-3} F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j + 1) = 1; \\ \rho_0^2 \rho_0^2 \rho_a \cdots \rho_{z-4} F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j + 2) = 1; \\ \vdots \\ \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-1} F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j + z - 1) = 1 \\ \rho_a \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-2} F_{R, \hat{k}_j}^x \end{cases} \leq
 \end{aligned}$$

可知, 最佳攻击效果对应于 $\theta(\hat{k}_j) = 1$.

若相邻两个区间 $[\hat{k}_j, \hat{k}_j + z)$ 和 $[\hat{k}_{j+1}, \hat{k}_{j+1} + z)$ ($\forall j \in \mathbb{Z}^{> h_0}$) 内发生两次攻击, 其中 $\hat{k}_{j+1} = \hat{k}_j + z$, 且两次攻击发生在不同的区间, 则 $F_{R, \hat{k}_j+1+z}^x \leq (\rho_a \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-2})^2 F_{R, \hat{k}_j}^x$; 若两次攻击发生在同一区间且 $\theta(\hat{k}_j) = 1$, 则有

$$\begin{aligned}
 & F_{R, \hat{k}_j+1+z}^x \leq \\
 & \begin{cases} \rho_a^2 \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-3} \prod_{i=0}^{z-1} \rho_i F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j + 1) = 1; \\ \rho_a^2 \rho_0^2 \rho_1 \cdots \rho_{z-4} \prod_{i=0}^{z-1} \rho_i F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j + 2) = 1; \\ \vdots \\ \rho_a \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-2} \prod_{i=0}^{z-1} \rho_i F_{R, \hat{k}_j}^x, & \theta(\hat{k}_j + N - 1) = 1 \\ \rho_a^2 \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-3} \prod_{i=0}^{z-1} \rho_i F_{R, \hat{k}_j}^x. \end{cases} \leq
 \end{aligned}$$

根据 $\{\rho_\ell, \forall \ell \in \mathbb{Z}^{\geq 0}\}$ 单调递增, 可得到

$$(\rho_a \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-2})^2 \leq \rho_a^2 \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_{z-3} \prod_{i=0}^{z-1} \rho_i.$$

故而, $[\hat{k}_j, \hat{k}_j + z)$ 和 $[\hat{k}_{j+1}, \hat{k}_{j+1} + z)$ 内发生两次攻击的最佳攻击效果为 $\theta(\hat{k}_j) = 1, \theta(\hat{k}_j + 1) = 1$.

类似分析可得, 区间 $[\hat{k}_{h_0}, k)$ 内的最佳攻击效果为所有攻击连续发生.

step 5: 对于任意 $k \in \mathbb{Z}^{\geq G(\|x(0)\|_\infty)}$, 验证

$$\|x(k)\|_\infty \leq \Lambda \lambda^{k-G(\|x(0)\|_\infty)} J(\|x(0)\|_\infty) + \Gamma \varpi,$$

即闭环系统 (6) 是指数收敛的.

情况 1 若对于 $\hat{k}_m + \eta \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}) (\forall m \in \mathbb{Z}^{> h_0})$, 均有 $F_{R, \hat{k}_m + \eta}^x > (\gamma(1 - \rho_0))^{-1} \chi \varpi$, 其中 γ 满足

$$\begin{aligned}
 & \partial_1 = \rho_0 + \gamma(1 - \rho_0) < 1, \\
 & \partial_{2\eta} = \rho_\eta + \gamma(1 - \rho_0) \xi_\eta < 1,
 \end{aligned}$$

则有

$$F_{R, \hat{k}_m + \eta + 1}^x = \begin{cases} \partial_1 F_{R, \hat{k}_m + \eta}^x, & \eta = 0, \theta(\hat{k}_m) = 0; \\ \partial_{2\eta} F_{R, \hat{k}_m + \eta}^x, & \eta \neq 0, \theta(\hat{k}_m) = 0; \\ \partial_3 F_{R, \hat{k}_m + \eta}^x, & \eta = 0, \theta(\hat{k}_m) = 1. \end{cases}$$

其中 $\partial_3 = \hat{\rho}_0 + \gamma(1 - \rho_0) > 1$.

下面分析 $F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x$ 与 $F_{R, k}^x$ 间关系式. 由上述 step 4, 不失一般性, 假设攻击发生在区间 $[\hat{k}_{h_0}, k)$ 的前 $H(0, k)$ 个时刻, 则由 $\rho_{z-1} < 1$, 可得到

$$\begin{aligned} F_{R, k}^x &\leq \rho_0^{\lfloor \frac{k - \hat{k}_{h_0} - H(\hat{k}_{h_0}, k) + 1}{z} \rfloor} \rho_a^{H(\hat{k}_{h_0}, k)} \rho_{z-1}^o F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x \leq \\ &\rho_0^{\frac{k - \hat{k}_{h_0} - H(\hat{k}_{h_0}, k) + 1}{z} - 1} \rho_a^{H(\hat{k}_{h_0}, k)} F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x \leq \\ &\rho_0^{\frac{1}{z} - 1} \left(\frac{\rho_a}{\rho_0^{1/z}} \right)^{\varsigma_d} \left\{ \left(\frac{\rho_a}{\rho_0^{1/z}} \right)^{\nu_d} \rho_0^{1/z} \right\}^{k - \hat{k}_{h_0}} F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x \triangleq \\ &\Lambda \lambda^{k - \hat{k}_{h_0}} F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{> \hat{k}_{h_0}}, \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$o = k - \hat{k}_{h_0} - H(\hat{k}_{h_0}, k) - \left\lfloor \frac{k - \hat{k}_{h_0} - H(\hat{k}_{h_0}, k) + 1}{z} \right\rfloor.$$

由于 \hat{k}_{h_0} 仅与 $x(0)$ 相关, 存在函数 $G: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{Z}^{\geq 0}$ 和 $J: [0, \infty) \rightarrow (0, \infty)$, 使得

$$\hat{k}_{h_0} = G(\|x(0)\|_\infty), \quad F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x = J(\|x(0)\|_\infty). \quad (19)$$

式 (12) 意味着 $\lambda < 1$, 组合式 (18) 和 (19), 有

$$\begin{aligned} F_{R, k}^x &\leq \Lambda \lambda^{k - G(\|x(0)\|_\infty)} J(\|x(0)\|_\infty), \\ &\quad \forall k \in \mathbb{Z}^{> G(\|x(0)\|_\infty)}. \end{aligned} \quad (20)$$

情况 2 若存在 $\hat{k}_m + \tilde{\eta} \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}) (\forall m \in \mathbb{Z}^{\geq h_0})$ 使得 $F_{R, \hat{k}_m + \tilde{\eta}}^x \leq (\gamma(1 - \rho_0))^{-1} \chi \varpi$, 令

$$\begin{aligned} k^* &= \max_{\tilde{\eta}} \{ \tilde{\eta} | F_{R, \hat{k}_m + \tilde{\eta}}^x \leq (\gamma(1 - \rho_0))^{-1} \chi \varpi, \\ &\quad \hat{k}_m + \tilde{\eta} \in [\hat{k}_m, \hat{k}_{m+1}) \}, \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} F_{R, \hat{k}_m + k^* + 1}^x &\leq \hat{\rho}_0 F_{R, \hat{k}_m + k^*}^x + \chi \varpi \leq \\ &\left(\frac{\hat{\rho}_0}{\gamma(1 - \rho_0)} + 1 \right) \chi \varpi \triangleq \\ &\Gamma_d \varpi, \end{aligned}$$

且

$$\begin{aligned} F_{R, k}^x &\leq \Lambda \lambda^{k - \hat{k}_m - k^* - 1} F_{R, \hat{k}_m + k^* + 1}^x < \\ &\Lambda \Gamma_d \varpi \triangleq \Gamma \varpi. \end{aligned} \quad (21)$$

组合 $\|x(k)\|_\infty \leq F_{R, k}^x (\forall k \in \mathbb{Z}^{> \hat{k}_{h_0}})$, 式 (20) 和 (21), 有

$$\begin{aligned} \|x(k)\|_\infty &\leq \Lambda \lambda^{k - G(\|x(0)\|_\infty)} J(\|x(0)\|_\infty) + \\ &\Gamma \varpi \triangleq X(k, x(0)). \end{aligned} \quad (22)$$

对于 $\forall k \in \mathbb{Z}^{> G(\|x(0)\|_\infty)}$ 成立. \square

4.2 实用稳定性

定理 2 若 \bar{h} 满足

$$\left(A_{\max}^{k_1} + \sum_{i=0}^{k_1-1} A_{\max}^i E_{\max} \right) \bar{h} < \min \left\{ \frac{\underline{E}}{C_{\max} S}, \varepsilon \right\}. \quad (23)$$

其中: $A_{\max} = \max_{\alpha \in \Pi} \|A_\alpha\|$; $E_{\max} = \max_{\alpha \in \Pi} \|E_\alpha\|$; $C_{\max} = \max_{\alpha \in \Pi} \|C_\alpha\|$; \underline{E} 满足 $F_{R, k}^y \geq \underline{E} (\forall k \in \mathbb{Z}^{\leq k_1})$; k_1 为使得 $\Lambda \lambda^{k - G(\|x(0)\|_\infty)} \bar{\phi} \leq \varepsilon$ 成立的最小时刻, $\bar{\phi}$ 为满足 $J(\|x(0)\|_\infty) < \bar{\phi}$ 的任意实数. 则系统 (6) 实用稳定, 即

$$\begin{aligned} \|x(0)\|_\infty &< \bar{h}, \quad \varpi < \bar{h} \Rightarrow \|x(k)\|_\infty < \varepsilon + \Gamma \varpi, \\ &\quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1}. \end{aligned}$$

证明 step 1: 由第 2 节的分析可知: \hat{k}_{h_0} 为一个有限值, 故存在 $\bar{\phi} > 0$, 使得

$$F_{R, \hat{k}_{h_0}}^x \leq J(\|x(0)\|_\infty) < \bar{\phi}.$$

step 2: 考虑到 $\lambda < 1$, 由式 (23) 可得到, 对于给定的 $\varepsilon > 0$, 存在时刻 k_1 , 使得

$$\begin{aligned} \|x(k)\|_\infty &\leq \\ &\Lambda \lambda^{k - G(\|x(0)\|_\infty)} \bar{\phi} + \Gamma \varpi \leq \\ &\varepsilon + \Gamma \varpi, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^{\geq k_1}. \end{aligned}$$

step 3: 由 $F_{R, k}^x$ 的更新规则, 存在 $\underline{E} > 0$, 使得

$$F_{R, k}^x \geq \underline{E} (\forall k \in \mathbb{Z}^{\leq k_1}).$$

若 \bar{h} 满足

$$C_{\max} \left(A_{\max}^{k_1} + \sum_{i=0}^{k_1-1} A_{\max}^i E_{\max} \right) \bar{h} < \frac{\|C_\alpha^{aq} R^{-1}\|_\infty^{k_1} \underline{E}}{S},$$

则 $\|y(k)\|_\infty \leq \underline{E}/S$, 即有 $c(k) = 0_{2M} (\forall k \in \mathbb{Z}^{\leq k_1})$.

考虑到 $\hat{x}(k) = 0_{4M}, u(k) = 0_M (\forall k \in \mathbb{Z}^{\leq \hat{k}_{h_0}})$, 由控制规则 (3) 迭代可得到 $\hat{x}(k) = 0_{4M}, u(k) = 0_M (\forall k \in \mathbb{Z}^{\leq k_1})$. 因此, 若 $\|x(0)\|_\infty < \bar{h}, \varpi < \bar{h}$ 且 $\left(A_{\max}^{k_1} + \sum_{i=0}^{k_1-1} A_{\max}^i E_{\max} \right) \bar{h} < \varepsilon$, 则有

$$\begin{aligned} \|x(k)\|_\infty &\leq \varepsilon (\forall k \in \mathbb{Z}^{\leq k_1}). \end{aligned}$$

综合 step 2 和 step 3 可得, 闭环系统 (6) 是实用稳定的. \square

5 仿真验证

为验证所提出方法的有效性, 考虑包含 $M = 4$ 个发电区域的切换电力系统的 LFC 模型 (6), 其离散化采样周期为 $T_s = 0.25$ s. 显然 $\alpha \in \Pi = \{1, 2, \dots, 15\}$, α 取值对应的参与调频的发电区域情况如表 2 所示.

系统参数如表 3 所示^[2]. 参与调频和退出调频情况下的联络线同步系数分别为 $T_{ij} = T_{ji} = 0.55$ 和 $\tilde{T}_{ij} = \tilde{T}_{ji} = 0.15 (\forall i \neq j, i, j \in \{1, 2, 3, 4\})$.

表2 不同系统模态对应的参与调频的发电区域情况

α	参与调频的发电区域
1	区域1
2	区域2
3	区域3
4	区域4
5	区域1和区域2
6	区域1和区域3
7	区域1和区域4
8	区域2和区域3
9	区域2和区域4
10	区域3和区域4
11	区域1~区域3
12	区域1、区域2和区域4
13	区域1、区域3和区域4
14	区域2~区域4
15	区域1~区域4

表3 系统参数

区域编号	M_i	D_i	β_i	$T_{G,i}$	$T_{CH,i}$	R_i
1	12	1.5	41.5	0.4	0.17	0.05
2	12	1.8	61.8	0.35	0.2	0.05
3	12	1.5	41.5	0.4	0.17	0.05
4	12	1.8	61.8	0.35	0.2	0.05

设初始时刻4个区域均参加调频,即 $\sigma(0) = 15$,之后以均匀概率切换至其他调频模态且切换周期为15 min. 设每次切换只能改变一个发电区域参与调频的状态,随机生成系统模态 $\sigma(k)$.

由注1,对于任意 $\sigma(k) \in \Pi$,可通过极点配置法解得反馈矩阵 $K_{\sigma(k)} \in \mathbb{R}^{4 \times 16}$ 和观测矩阵 $L_{\sigma(k)} \in \mathbb{R}^{16 \times 4}$.为方便起见,设置各模态配置反馈矩阵的极点均为

$$[0.1367 \ 0.1982 \ 0.2445 \ 0.1871 \ 0.1605 \ 0.3085 \ 0.3698 \ 0.5487 \ 0.7568 \ 0.7439 \ 0.7218 \ 0.7237 \ 0.9032 \ 0.9369 \ 0.9318 \ 0.9151],$$

配置观测矩阵的极点均为

$$[0.0251 \ 0.0524 \ 0.0010 \ 0.9500 \ 0.8461 \ 0.8041 \ 0.8546 \ 0.2549 \ 0.2690 \ 0.6793 \ 0.5788 \ 0.6156 \ 0.5074 \ 0.5118 \ 0.4176 \ 0.3403],$$

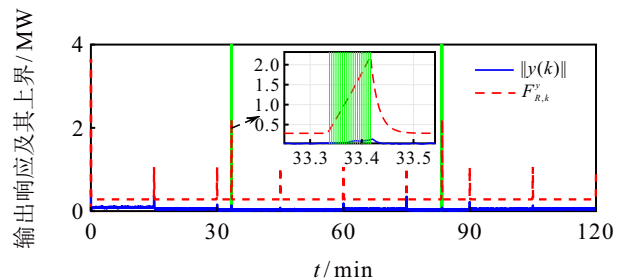
故可唯一确定 $K_{\sigma(k)}$ 和 $L_{\sigma(k)}$.

令 $x(0) = 0.01 \times 1_{16 \times 1}$ (其中 $1_{16 \times 1}$ 表示16行1列的全1矩阵), $\kappa = 1.05$, $v_d = 0.01$, $F_0^x = 0.02$, $\varpi = 0.02$, $\omega(0) = 0.02 \times 1_{4 \times 1}$ 且 $\omega(k)(\forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 1})$ 为随机生成的满足假设5的4维向量,可得引理2中的 τ 可取为2.由于子系统(15)的可观性指数为 $\psi_{12} =$

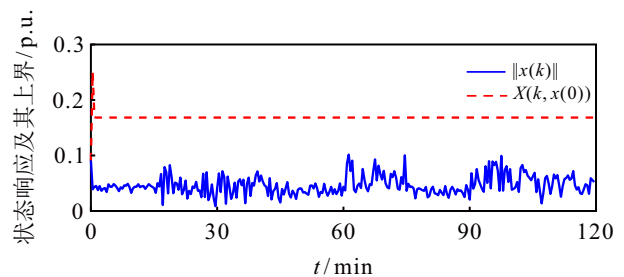
4,不失一般性,设 $\{k_1, k_2, k_3, k_4\} = \{3, 4, 5, 6\}$,则 $\hat{k}_{h_0} = 7$ 且 $F_{\hat{k}_{h_0}}^x$ 可取为0.035.设网络带宽可提供的量化参数 $S = 2^{15}$,取驱动条件中的参数为 $\varphi = 0.02$, $z = 20$,则定理1中的稳定条件(12)成立.

由式(10)和(11)迭代求取 $F_{R,k}^x$,由式(7)求取 $F_{R,k}^y$.根据量化规则得到量化值 $c(\hat{k}_m)$ 和 $\hat{c}(\hat{k}_m)$,由式(6)可得到 $\vartheta_R(k)$ 和 $y(k)$,从而得到 $x(k)$.

图2为切换电力系统LFCS的状态响应和输出响应边界.图2(a)中,绿色竖线表示欺骗攻击发生的时刻.可见,攻击会导致系统状态呈现发散趋势,需要增大 $F_{R,k}^y$ 以保证量化器的不饱和性.此外,图2(a)显示所设计量化规则可保证 $\|y(k)\|_{\infty} \leq F_{R,k}^y(\forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 7})$ 成立,即量化器在任意 $k \in \mathbb{Z}^{\geq 7}$ 时刻均不饱和,因此,总能得到驱动时刻的量化值 $c(\hat{k}_m)$ 和 $\hat{c}(\hat{k}_m)$.由图2(b)可见,式(23)对于 $\forall k \in \mathbb{Z}^{\geq 7}$ 成立.



(a) 量化器的不饱和性



(b) 定理2的有效性

图2 切换电力系统LFCS的状态响应和输出响应边界

图3为系统的频率偏差,图4为系统的联络线功率偏差.图3和图4中的红色实线显示系统(6)在量化控制规则(3)下是稳定的.值得一提的是:在随机有界扰动影响下, $x(k)$ 只能收敛至有界区域内,并不能收敛至0.此外,本文还讨论了死区非线性环节的影响.设置调节死区为 ± 0.015 Hz,则系统的状态曲线如图3和图4中蓝色虚线所示.可见,加入死区非线性环节会导致系统曲线的震荡幅度有微弱的增大,但是这并未破坏系统的有界稳定性,验证了所提出控制策略对非线性环节与随机扰动的双重鲁棒性.

对比:将所提出量化编码规则与文献[15]进行对比.针对文献[15]中的仿真示例(其为一个3维的单发电区域),设攻击发生时刻如图5中的绿线所示,

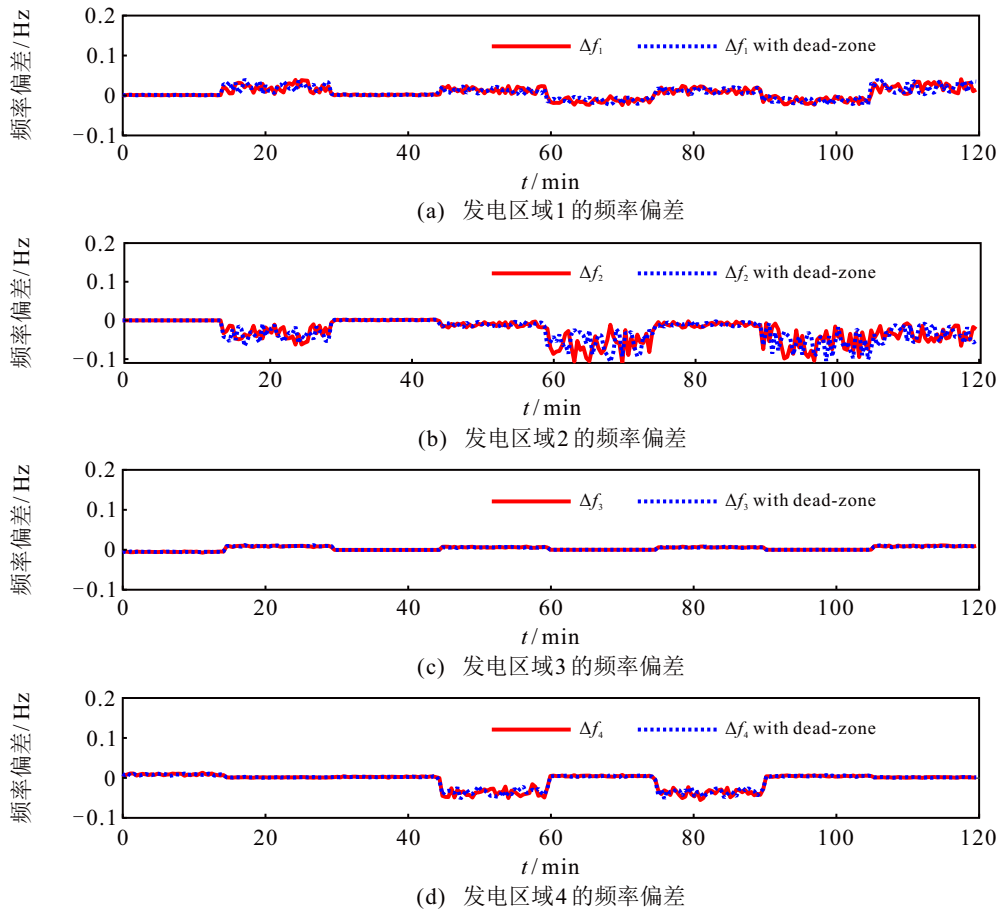


图3 系统的频率偏差

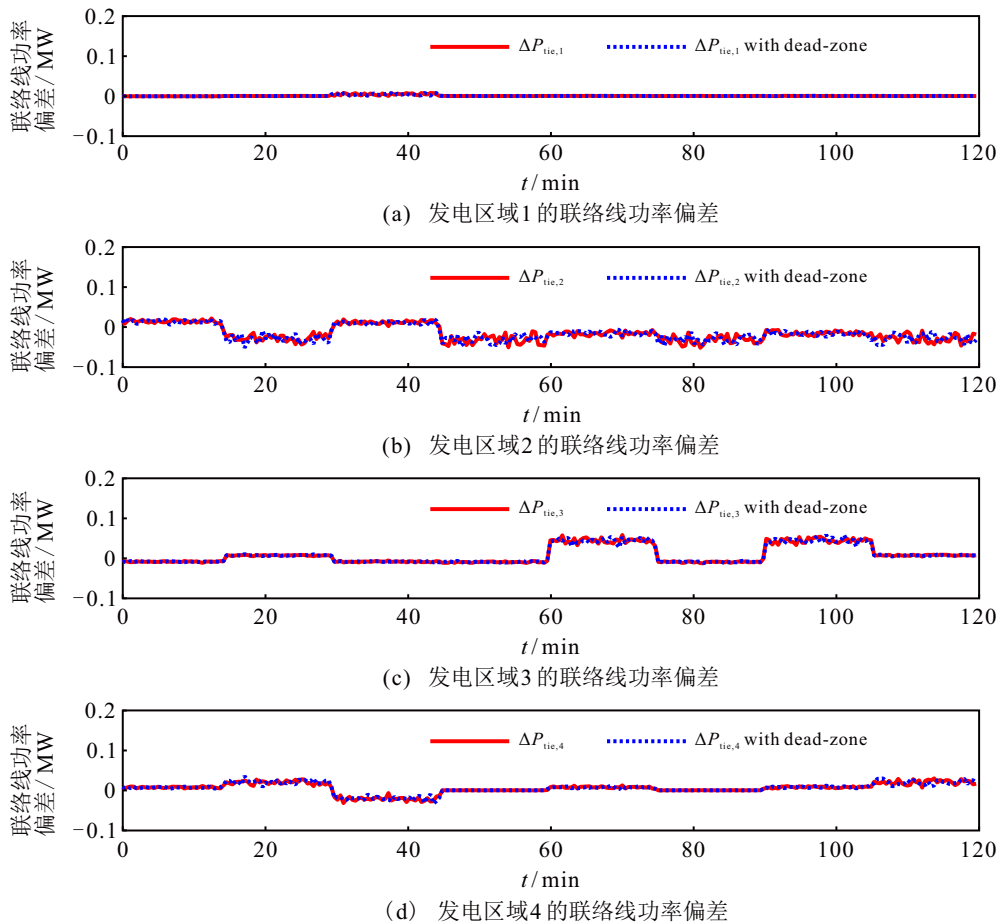


图4 系统的联络线功率偏差

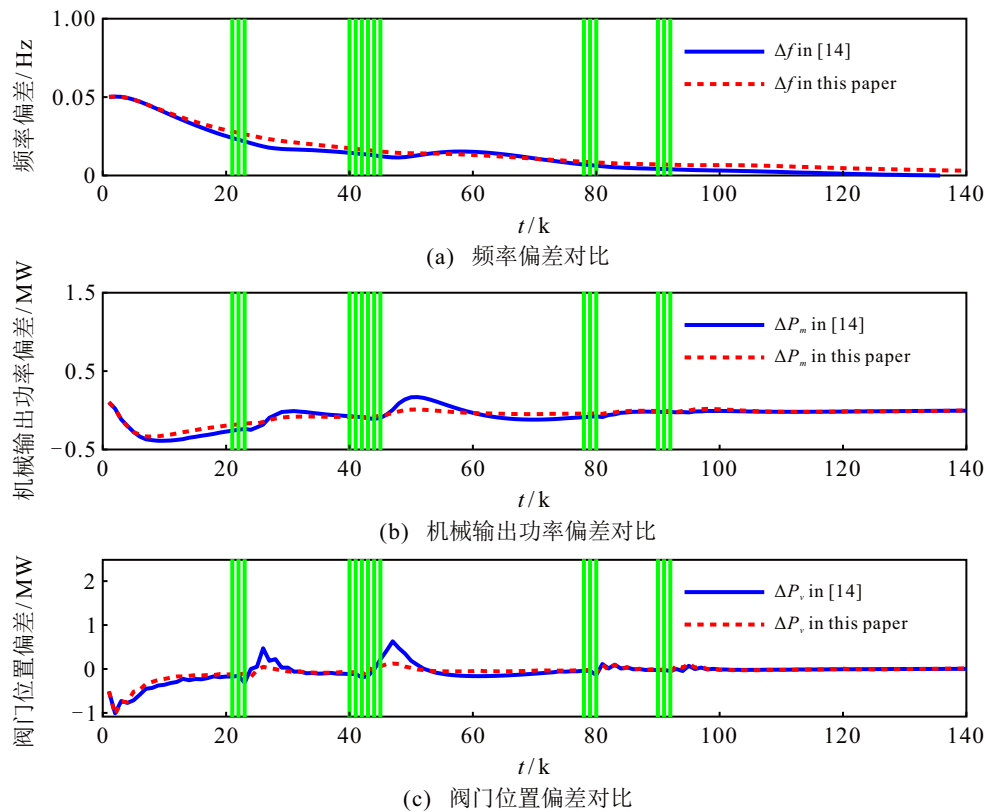


图5 攻击影响下本文与文献 [15] 的状态对比

则攻击影响下本文和文献 [15] 的系统状态如图 5 所示。可见,攻击会导致系统发生抖动且所提出算法的抗攻击性能要优于文献 [15]。

6 结论

本文从发电机组根据调度指令投入或退出调频队列从而改变系统动态模型这一新的角度出发对 LFCS 进行了切换系统建模,通过稀疏矩阵重构方法降维和框架改进保障了该系统的可控性和可观测性。充分考虑欺骗攻击状况,本文提出了新颖的事件驱动传输机制和基于两个序列的信号量化编码规则,并设计了基于观测器的事件驱动量化控制器。依据最佳攻击效果分析,得到了保障 LFCS 在网络欺骗攻击影响下指数收敛和实用稳定的充分性条件。

然而,本文在以下方面存在局限性:为简化分析,忽略了攻击时刻未发生模态切换的情况,这会增大量化区域和量化误差;事件驱动传输条件的参数可设置为自适应调整,有望在保障系统稳定的前提下进一步减小驱动次数。未来将进一步改进事件驱动机制和量化编码规则以提高 LFCS 的收敛速度。此外,本文未涉及欺骗攻击检测算法。联合设计检测算法,分析其成功率对于量化编码规则的影响也是未来着重研究的方向。

参考文献 (References)

[1] 曾一明,卜旭辉,尹艳玲. 电力市场下含风电电力系统

数据驱动负荷频率弹性控制[J]. 可再生能源, 2025, 43(5): 673-680.

(Zeng Y M, Bu X H, Yin Y L. Data-driven load frequency control for multi-area interconnected power system with wind penetration under power market[J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(5): 673-680.)

[2] 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 Y P, Li X N, Jia X C. Load frequency control of multi-area power system with renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 64-71.)

[3] 马苗苗, 崔婧, 李钰梅, 等. 风电介入下的多区域互联电力系统分布式经济模型预测负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1557-1565.

(Ma M M, Cui J, Li Y M, et al. Distributed economic model predictive load frequency control for the multi-area interconnected power system with wind power integration[J]. Control and Decision, 2024, 39(5): 1557-1565.)

[4] 张逸为, 许德智, 杨玮林, 等. 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1069-1077.

(Zhang Y W, Xu D Z, Yang W L, et al. Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1069-1077.)

[5] 刘星月, 田永强, 施开波, 等. 计及 DoS 攻击和通信时滞的电力系统负荷频率控制[J]. 工程科学与技术,

- 2024, 56(3): 249-258.
(Liu X Y, Tian Y Q, Shi K B, et al. Load frequency control in power systems accounting for DoS attacks and communication delays[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(3): 249-258.)
- [6] Liu X H, Jiao Q M, Qiao S W, et al. A hybrid monotonic neural network approach for multi-area power system load frequency control against FGSM attack[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(8): 3780-3784.
- [7] Ge Y X, Liu G B, Zhao G S, et al. Observer-based H_∞ load frequency control for networked power systems with limited communications and probabilistic cyber attacks[J]. *Energies*, 2022, 15(12): 4234.
- [8] 陈沛, 吕腾, 王美刚. 切换网络攻击下异构多区域电力系统的负荷频率控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(12): 140-148.
(Chen P, Lv T, Wang M G. Load frequency control of heterogeneous multi-area power systems under switching cyber attacks[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(12): 140-148.)
- [9] Wu L, Liu F, Wang Y L, et al. Event-triggered observer-based load frequency control for cyber-physical power systems with electric vehicles under hybrid attacks[J]. *Control Engineering Practice*, 2025, 165: 106600.
- [10] 翁世清, 翁品迪, 周京, 等. FDI 攻击下互联电力系统的分布式安全状态估计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1935-1941.
(Weng S Q, Weng P D, Zhou J, et al. Distributed secure state estimation for interconnected power systems under FDI[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(7): 1935-1941.)
- [11] Qi W H, Sha M X, Zong G D, et al. Adaptive fuzzy control of networked hidden stochastic switching power systems under cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2025, 55(7): 3182-3192.
- [12] Zhang X, Yang F, Sun X. Resilient adaptive event-triggered load frequency control of network-based power systems against deception attacks[J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 7047.
- [13] 孙冉, 王建波, 郭泓佐, 等. 基于改进事件触发机制的电力系统负荷频率控制[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(11): 75-86.
(Sun R, Wang J B, Guo H Z, et al. Load frequency control of power systems based on improved event-triggering scheme[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(11): 75-86.)
- [14] 刘世良, 裴生雷. 基于一种改进型事件触发传输机制的网络欺骗性攻击下的电力系统负荷频率控制[J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2023, 42(3): 365-372.
(Liu S L, Pei S L. Power system load frequency control under network deceptive attacks based on an improved event-triggered transmission mechanism[J]. *Journal of South-Central Minzu University: Natural Science Edition*, 2023, 42(3): 365-372.)
- [15] 丁三波, 张康, 杨飞生, 等. 基于动态量化的电力系统事件触发负荷频率控制[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2023, 57(7): 1460-1469.
(Ding S B, Zhang K, Yang F S, et al. Event-triggered load frequency control for power system based on dynamic quantization[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2023, 57(7): 1460-1469.)
- [16] 丁瑞森, 杨飞生, 付远超, 等. 混合攻击下基于带宽感知型事件触发机制的负荷频率控制[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(12): 2828-2840.
(Ding R S, Yang F S, Fu Y C, et al. Load frequency control based on bandwidth-aware event-triggering mechanism under hybrid attacks[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2024, 54(12): 2828-2840.)
- [17] Du X Y, Liu G B, Zhang H, et al. Security load frequency control of networked power systems via round-robin protocol under denial of service attacks[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2024, 361(16): 107155.
- [18] Shen H, Wang D J, Park J H, et al. Switching-like event-triggered sliding mode load frequency control for networked power systems under energy-limited DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 54(3): 1589-1598.
- [19] Zhang C K, Jiang L, Wu Q H, et al. Further results on delay-dependent stability of multi-area load frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4465-4474.
- [20] Wakaiki M, Cetinkaya A, Ishii H. Stabilization of networked control systems under DoS attacks and output quantization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(8): 3560-3575.
- [21] Yang G S, Liberzon D. Feedback stabilization of switched linear systems with unknown disturbances under data-rate constraints[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(7): 2107-2122.
- [22] Yan J J, Shi L X, Xia Y Q, et al. Quantized output feedback control for switched systems with DoS attacks and event-triggered sampling[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2022, 359(16): 8522-8538.

作者简介

雒春林 (1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统分析与设计, E-mail: 383915879@qq.com;

王婷一 (2001-), 女, 硕士生, 主要研究方向为多区域电力系统负荷频率控制, E-mail: 1326261688@qq.com;

闫晶晶 (1985-), 女, 博士, 主要研究方向为切换系统、量化编码控制及网络化控制, E-mail: yanjingjing2009@163.com.