

网络攻击下信息物理融合电力系统的弹性事件触发控制

杨飞生^{1,2} 汪璟¹ 潘泉¹ 康沛沛¹

摘要 本文将电动汽车 (Electric vehicles, EVs) 引入到典型的信息物理系统 (Cyber-physical systems, CPS) 智能电网中, 采用负荷频率控制 (Load frequency control, LFC) 方法, 能够快速抑制系统扰动所引发的频率变化. 在考虑拒绝服务 (Denial-of-Service, DoS) 攻击的情况下, 提出了一种弹性事件触发机制, 使系统能够容忍攻击所造成的数据丢失. 与此同时, PI 型静态输出反馈控制器的输入按需更新, 减少了通信负担. 对于建立的闭环时滞系统模型, 构造新型李亚普诺夫泛函, 对系统进行稳定性分析, 推导出系统所能承受的最大 DoS 攻击持续时间, 并对控制器增益和弹性事件触发矩阵进行协同设计. 最后, 通过多域电力系统仿真, 验证了所提出方法的有效性.

关键词 负荷频率控制, 弹性事件触发机制, DoS 攻击, 信息物理系统

引用格式 杨飞生, 汪璟, 潘泉, 康沛沛. 网络攻击下信息物理融合电力系统的弹性事件触发控制. 自动化学报, 2019, 45(1): 110–119

DOI 10.16383/j.aas.c180388

Resilient Event-triggered Control of Grid Cyber-physical Systems Against Cyber Attack

YANG Fei-Sheng^{1,2} WANG Jing¹ PAN Quan¹ KANG Pei-Pei¹

Abstract In this paper, the electric vehicles (EVs) are integrated into the smart grid, a class of representative cyber-physical systems (CPS), and can participate into the load frequency control (LFC) to promptly suppress the variations of system disturbances. In the case of denial-of-service (DoS) attacks, a resilient event-triggering scheme is proposed to allow the system to tolerate data loss caused by the attacks. At the same time, the PI-type static output feedback controller input is updated only when necessary so that the communication burden is reduced. For the established closed-loop time-delay system model, the new Lyapunov functional is constructed to analyze the stability and derive the maximum DoS attack duration, meanwhile the controller gain and the resilient event-triggering matrix are jointly designed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through multi-area power system simulation.

Key words Load frequency control (LFC), resilient event-triggered scheme, denial-of-service (DoS) attack, cyber-physical systems (CPS)

Citation Yang Fei-Sheng, Wang Jing, Pan Quan, Kang Pei-Pei. Resilient event-triggered control of grid cyber-physical systems against cyber attack. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 110–119

信息物理融合系统 (Cyber-physical systems,

CPS) 作为一种新型智能系统应运而生, 它是一类集成计算、网络和物理实体的复杂系统, 将三者进行有机融合与深度协作, 从而达到对大型物理系统与信息系统的实时感知, 动态控制和信息服务等^[1], 典型 CPS 包括工控系统^[2]、供水网络^[3] 等. 智能电网从总体上可以视为由信息网和电力网这两个相互依存的网络构成的一个复合网络, 也是一个典型的 CPS^[4]. 同步相量测量装置 (Phasor measurement units, PMUs)、广域测量系统 (Wide-area measurement systems, WAMS)、变电站自动化等技术为智能电网的实现提供了坚实的基础, 但同时也增加了智能电网对信息资源的依赖. 一旦信息网出错或崩溃, 电力网一般很难保持正常运行. 这也为电力系统安全稳定运行带来了新的问题^[5]: 首先, 随着 PMUs 布点的增多, 调度数据网中传送的 PMUs 数据的比例将会越来越大, PMUs 长

收稿日期 2018-06-07 录用日期 2018-10-21
Manuscript received June 7, 2018; accepted October 21, 2018
国家自然科学基金 (61403311), 中国博士后科学基金 (2018M643661), 陕西省自然科学基金 (2018JQ6033), 西北工业大学青年教师国际名校访学支持计划项目, 西北工业大学研究生创新创业种子基金 (ZZ2018151) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61403311), China Postdoctoral Science Foundation (2018M643661), Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program (2018JQ6033), Top International University Visiting Program for Outstanding Young Scholars of Northwestern Polytechnical University, the Seed Foundation of Innovation and Creation for Graduate Students in Northwestern Polytechnical University (ZZ2018151)

本文责任编辑 邓方
Recommended by Associate Editor DENG Fang
1. 西北工业大学自动化学院信息物理系统控制与安全研究所 西安 710072 2. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室 西安 710049

1. Institute of Control, Privacy and Security for CPS, School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 2. MOE Key Laboratory for Intelligent Networks and Network Security (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049

期不间断且高刷新频率的传送导致海量的状态和控制信息等在通信网络上传送, 可能会产生网络拥塞, 影响数据实时传送; 其次, 与电力的物理系统相比, 信息系统对恶意攻击具有更明显的脆弱性. 由于通信网络的开放性, 会导致电力系统面临各种类型网络攻击, 造成失稳甚至毁坏. 如 2015 年 12 月 23 日乌克兰电网遭受协同攻击导致近 8 万用户家庭突发停电事故, 这次事故被认为是第一起由于网络攻击直接导致停电事故的案例.

针对上述问题, 已有一些学者进行了相关的研究^[5-10]. 文献 [6] 首次将事件触发机制引入多域电力系统负荷频率控制 (Load frequency control, LFC) 中, 有效减少了数据传输量; 文献 [8] 提出了一种弹性事件触发机制, 应用于多域电力系统 LFC 当中, 在考虑网络攻击的情况下保证电力系统的稳定性, 并减少了传输的数据量; 文献 [9] 提出一种针对电力系统状态估计的错误数据注入攻击防御与检测机制, 从保护和检测两方面入手; 基于保护的防御, 主要是识别和保护关键的传感器, 使系统更能抵御攻击; 基于检测的防御, 设计了基于空间和基于时间的检测方案, 以准确识别数据注入攻击. 文献 [10] 介绍了 DoS 攻击下电网的 LFC 方法, 通过将电力系统建模为切换系统, 检测 DoS (Denial-of-service, DoS) 攻击的存在, 以双域电力系统为例, 分析了系统性能问题. 由于电动汽车 (Electric vehicles, EVs) 具有良好的环境特征, 如温室气体排放量少, 噪声污染低等, 并且可用于提高电力系统的可靠性和灵活性^[11]. 本文将 EVs 引入智能电网中, 与负荷频率控制相结合, 快速抑制系统扰动所引发的频率变化. 在考虑 DoS 攻击的情况下, 对电力 CPS 进行稳定性分析, 并对事件触发机制和控制器进行联合设计, 从而达到理想的控制效果.

1 系统模型

在本文中, 假设存在大量可用的 EVs, 即存在足够的电能储备以达到协助传统电力单元实现负荷频率调节的目的, 控制中心通过聚合器对 EVs 进行集中管理, 聚合器将分散的各 EVs 的信息和状态收集起来, 发送给控制中心.

由于 EVs 的接入, LFC 系统中产生了新的时变时延. 本文假设所有的同步电机都有再热热涡轮机, 为了便于说明, 对于电力 CPS, 我们将每个域的 M 个 EVs 等效为一个, 控制器的输出按比例分配给 EVs 和再热电机, 其中 α_{i0}, α_{i1} 表示分配比例. 如图 1 所示, 不考虑弹性事件触发机制和网络环境下, 包含 EVs 的电力 CPS 动态模型可以描述为^[12]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B_0\mathbf{u}(t) + \\ \quad \sum_{i=1}^n \hat{B}_i\mathbf{u}(t - \tau_i(t)) + F\Delta P_d(t) \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1^T(t) \ \mathbf{x}_2^T(t) \ \cdots \ \mathbf{x}_n^T(t)]^T$$

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{y}_1^T(t) \ \mathbf{y}_2^T(t) \ \cdots \ \mathbf{y}_n^T(t)]^T$$

$$\mathbf{u}(t) = [\mathbf{u}_1^T(t) \ \mathbf{u}_2^T(t) \ \cdots \ \mathbf{u}_n^T(t)]^T$$

$$\Delta P_d(t) = [\Delta P_{d1} \ \Delta P_{d2} \ \cdots \ \Delta P_{dn}]^T$$

$$\mathbf{y}_i(t) = [ACE_i \int ACE_i dt]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

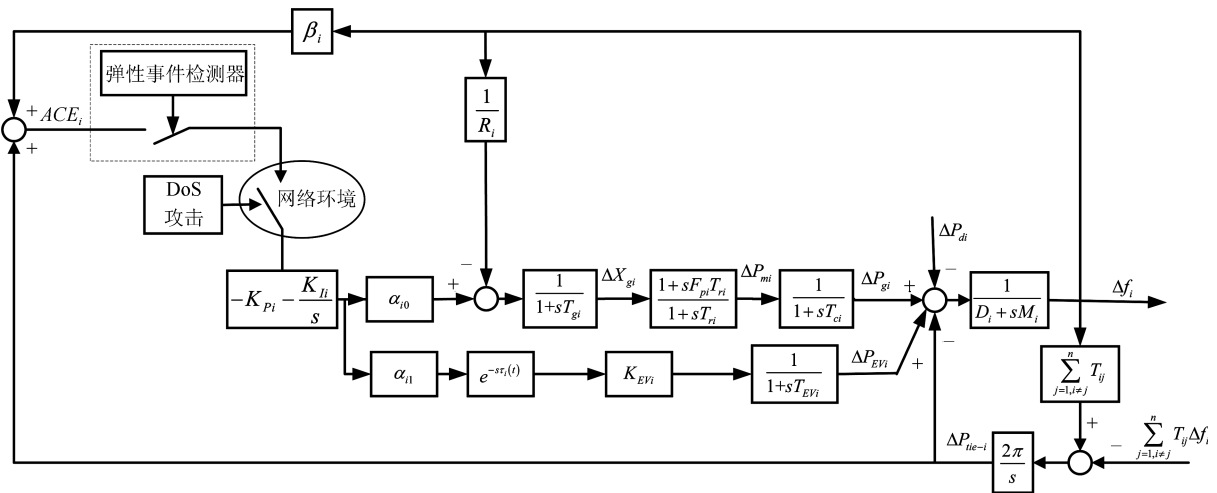


图 1 基于弹性事件触发机制的电力 CPS 负载频率控制模型

Fig. 1 Grid CPS LFC model with a resilient event-triggered scheme

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i} & \frac{1}{M_i} & 0 & 0 & \frac{1}{M_i} & -\frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{ci}} & \frac{1}{T_{ci}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{F_{pi}}{R_i T_{gi}} & 0 & -\frac{1}{T_{ri}} & \frac{T_{gi} - F_{pi} T_{ri}}{T_{ri} T_{gi}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_i T_{gi}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{EVi}} & 0 & 0 \\ 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_i(t) = [\Delta f_i \ \Delta P_{gi} \ \Delta P_{mi} \ \Delta X_{gi} \ \Delta P_{EVi} \ \Delta P_{tie-i} \int ACE_i dt]^T$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} B_{011} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_{022} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{0nn} \end{bmatrix}$$

$$C = \text{diag}\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$$

$$B_{0ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{F_{pi}\alpha_{i0}}{T_{gi}} & \frac{\alpha_{i0}}{T_{gi}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_i = \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \text{diag}\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$$

$$F_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\hat{B}_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & B_{iii} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{iii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{EVi}\alpha_{i1}}{T_{EVi}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -2\pi T_{ij} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad T_{ij} = T_{ji}$$

表 1 带 EVs 电力 CPS 负载频率控制模型参数
($i = 1, 2, \dots, n$)

Table 1 Parameters of power CPS LFC model including EV aggregators ($i = 1, 2, \dots, n$)

参数符号 Parameter notations	物理含义 Physical meanings
M_i	惯性常数 Inertia constant
D_i	负载阻尼常数 Load-damping constant
T_{gi}	调速器时间常数 Time constant of governor
T_{ci}	涡轮机时间常数 Time constant of turbine
T_{ri}	再热时间常数 Time constant of reheat
F_{pi}	总涡轮功率分数 Fraction of total turbine power
R_i	转速 Speed droop
β_i	频率偏差系数 Frequency bias factor
K_{EVi}	电池系数 Battery coefficient
T_{EVi}	电池时间常数 Time constant of battery
T_{ij}	联络线同步系数 Synchronizing coefficient of tie-line
Δf_i	频率偏差 Deviation of frequency
ΔP_{tie-i}	联络线的功率交换 Power transfer of tie-line

表 1 给出了系统中具体的符号意义. 每个区域 i 的 ACE (Area control error) 信号定义为频率偏差

与区域之间联络线电力交换之和:

$$ACE_i = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tie-i}$$

假设传输线路为无损传输, 电力 CPS 控制各区域之间的联络线功率交换满足 $\sum_{i=1}^n \Delta P_{tie-i} = 0$.

PI 型 LFC 可以写成

$$\mathbf{u}(t) = -K\mathbf{y}(t) \quad (2)$$

其中, $K = \text{diag}\{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, $K_i = [K_{P_i} K_{I_i}]$, K_{P_i} , K_{I_i} 分别为比例增益和积分增益.

注 1^[13]. EVs 参与负载频率控制可分为两种模式, SOC (State of charge) 可控模式和 SOC 空闲模式. SOC 空闲模式, 即 EV 从电网中消耗电能或释放电能不考虑 EV 电池的充电状态, 此时第 m 辆 EV 的增益 $K_{E_m} = \bar{K}_e$, 其中 $\bar{K}_e = 1$. 而 SOC 可控模式中由于 EV 使用者的需要, 第 m 辆 EV 参与负载频率控制时需要考虑 SOC, 因此通过 SOC 计算和当前 SOC 的值可以获得 EV 的增益 $K_{E_m} = \bar{K}_e - \bar{K}_e g_m(t)$, 其中 $g_m(t) = (\frac{\text{SOC}_m - \text{SOC}_{\text{low}(\text{high}),m}}{\text{SOC}_{\text{max}(\text{min}),m} - \text{SOC}_{\text{low}(\text{high}),m}})^{v_m}$, v_m 表示电池的设计规格, $\text{SOC}_{\text{low}(\text{high})}$ 为低(高)电池 SOC, $\text{SOC}_{\text{max}(\text{min})}$ 为最大(最小)电池 SOC. 假设在 t 时刻, 区域 i 中有 M_e 辆 EVs 参与 LFC, 其中 M_{e_1} 表示处于 SOC 空闲模式的 EVs, $M_{e_2} = M_e - M_{e_1}$ 表示处于 SOC 可控模式的 EVs, 则区域 i 总的 EVs 增益 $K_{EV_i} = \sum_{m=1}^{M_e} \frac{K_{E_m}}{M_e} = \frac{M_{e_1}}{M_e} \bar{K}_e + \frac{1}{M_e} \bar{K}_e (M_{e_2} - \sum_{m=M_{e_1}+1}^{M_e} g_m(t))$.

2 事件触发通信机制

2.1 传统事件触发机制

早期事件触发机制是所谓的连续事件触发, 需要特殊硬件对状态进行连续监测. 此外, 在触发机制设计中, 必须确保任意两个事件触发时刻之间的最小时间间隔严格大于零, 如果最小事件间隔时间为零, 就会出现无限事件发生在有限时间内的奇诺 (Zeno) 现象^[14]. 为了解决这两个问题, 文献 [15] 提出一种基于采样数据的离散型事件触发机制:

$$[\mathbf{x}(t_k + jh) - \mathbf{x}(t_k)]^T \Omega [\mathbf{x}(t_k + jh) - \mathbf{x}(t_k)] \leq \sigma \mathbf{x}^T(t_k) \Omega \mathbf{x}(t_k), j \in \mathbf{N} \quad (3)$$

当上述条件违背时, 传感器将采样数据传输给控制器. 其中 t_k 为事件触发时刻, $\Omega > 0$ 为触发矩阵, $\sigma \in (0, 1)$ 为触发参数, h 为采样周期. 该触发机制可以保证最小事件间隔 $T_{etc} \geq h$, 避免出现 Zeno 现象, 并且不需要特殊硬件对状态进行连续监测.

2.2 弹性事件触发机制

本文假设 DoS 攻击的能量是有限的, 即 DoS 攻

击的持续时间是有限的, 当 DoS 攻击发生时通信中断. DoS 攻击的发生将直接导致通信信道上正在传输的数据丢失, 因此并不是所有事件触发时刻的状态都能成功传输到控制器侧. 假设 DoS 攻击发生时, 连续丢包量为 τ_M , 那么 DoS 攻击的持续时间 $\tau_{\text{dos}} \leq \tau_M T_{etc}$, 为了简单起见, 取 $\tau_{\text{dos}} \leq \tau_M h$. 此时, 传统事件触发机制 (3) 将不能直接用于判断采样数据传输与否. 为了消除 DoS 攻击所产生的影响, 提出下列弹性事件触发机制:

$$[\mathbf{x}(r_k + jh) - \mathbf{x}(r_k)]^T \Omega [\mathbf{x}(r_k + jh) - \mathbf{x}(r_k)] \leq \sigma_r \mathbf{x}^T(r_k) \Omega \mathbf{x}(r_k), j \in \mathbf{N} \quad (4)$$

σ_r 为事件触发参数. 通常, $\sigma_r < \sigma$, 也就是说弹性事件触发机制将会产生更多的触发状态用以消除 DoS 攻击对系统所造成的影响. 此时, 将存在三个时刻, 采样时刻 kh , 触发时刻 r_k 和成功传输到控制器侧的时刻 t_k . 令 $S_0 = \{0, h, 2h, 3h, \dots, jh\}$, $j \in \mathbf{N}$, $S_1 = \{0, r_1, r_2, r_3, \dots, r_k\}$, $r_k/h \in \mathbf{N}$, $S_2 = \{0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_k\}$, $t_k/h \in \mathbf{N}$, 则 $S_2 \subseteq S_1 \subseteq S_0$. 当 $\sigma_r = \sigma$ 时, 意味着没有 DoS 攻击发生. 下文将推导出系统所能容忍的 DoS 攻击最大持续时间.

此时控制器输入 $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t_k)$, $t \in [t_k + d_{\tau_k}, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}})$, d_{τ_k} 表示传感器到控制器的传输时延, 最大值为 \bar{d}_τ , 此时系统 (1) 可以表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t_k) + F\Delta P_d(t) \quad (5)$$

其中, $B = B_0 + \sum_{i=1}^n \hat{B}_i$. 利用文献 [15] 中提出的时滞模型方法对系统进行稳定性分析和控制器设计.

定义

$$d(t) = \begin{cases} t - t_k, t \in I_1 \\ t - t_k - lh, t \in I_2^l, l = 1, 2, \dots, m_k - 1 \\ t - t_k - m_k h, t \in I_3 \end{cases}$$

其中, $I_1 = [t_k + d_{\tau_k}, t_k + h + \bar{d}_\tau)$, $I_2^l = [t_k + lh + \bar{d}_\tau, t_k + lh + h + \bar{d}_\tau)$, $I_2 = \cup_{l=1}^{m_k-1} I_2^l$, 和 $I_3 = [t_k + m_k h + \bar{d}_\tau, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}})$. $[t_k + d_{\tau_k}, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}}) = I_1 \cup I_2 \cup I_3$.

因此, 可以得到 $0 \leq d(t) < \bar{d}$, 其中 $\bar{d} = h + \bar{d}_\tau$. 对于 $\forall t \in [t_k + d_{\tau_k}, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}})$, 我们定义

$$\mathbf{e}(t) = \begin{cases} 0, & t \in I_1 \\ \mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}(t_k + lh), & t \in I_2^l \\ \mathbf{x}(t_k) - \mathbf{x}(t_k + m_k h), & t \in I_3 \end{cases}$$

结合 $d(t)$ 和 $\mathbf{e}(t)$ 定义, 当 $t \in [t_k + d_{\tau_k}, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}})$ 时, 系统 (5) 可以变形为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) - BKC(\mathbf{e}(t) + \mathbf{x}(t - d(t))) + F\Delta P_d(t) \quad (6)$$

本文的主要目的是在 DoS 攻击的情况下研究电力系统的稳定性、设计弹性事件触发机制和控制器联合求解方案,同时系统还满足如下条件:

1) 当负载干扰为零时(即 $\Delta P_d = 0$),电力系统在 DoS 攻击下是渐近稳定的;

2) 当系统的初值为零时,对于任意非零 $\Delta P_d \in L_2[0, \infty)$,有 $\|\mathbf{y}(t)\|_2 \leq \gamma \|\Delta P_d\|_2$,其中 γ 是给定的 H_∞ 性能.

3 主要结果

引理 1^[16]. 令矩阵 R_1, R_2 为正定矩阵,标量 $a \in (0, 1)$,以及向量 $\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2 \in \mathbf{R}^m$,那么对于任意矩阵 $Y_1, Y_2 \in \mathbf{R}^{m \times m}$,下列不等式成立:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{a} \boldsymbol{\omega}_1^T R_1 \boldsymbol{\omega}_1 + \frac{1}{1-a} \boldsymbol{\omega}_2^T R_2 \boldsymbol{\omega}_2 \geq \\ & \boldsymbol{\omega}_1^T [R_1 + (1-a)(R_1 - Y_1 R_2^{-1} Y_1^T)] \boldsymbol{\omega}_1 + \\ & \boldsymbol{\omega}_2^T [R_2 + a(R_2 - Y_2^T R_1^{-1} Y_2)] \boldsymbol{\omega}_2 + \\ & 2 \boldsymbol{\omega}_1^T [a Y_1 + (1-a) Y_2] \boldsymbol{\omega}_2 \end{aligned}$$

本节对基于事件触发机制的电力 CPS 进行稳定性分析,选择 Lyapunov-Krasovskii 泛函为

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)$$

$$V_1(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}^T(s) ds \end{bmatrix} \times U \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}(s) ds \end{bmatrix}$$

$$V_2(t) = \int_{t-\bar{d}}^t \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \bar{d}\mathbf{x}^T(s) \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \bar{d}\mathbf{x}(s) \end{bmatrix} ds$$

$$V_3(t) = \bar{d} \int_{t-\bar{d}}^t \int_v^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds dv$$

其中, U, Q 对称, $R > 0$. 应用 Jensen 不等式,

$$\begin{aligned} V_2(t) & \geq \frac{1}{\bar{d}} \int_{t-\bar{d}}^t \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \bar{d}\mathbf{x}(s) \end{bmatrix}^T ds \times \\ & Q \int_{t-\bar{d}}^t \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \bar{d}\mathbf{x}(s) \end{bmatrix} ds = \\ & \bar{d} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}(s) ds \end{bmatrix}^T \times \\ & Q \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}(s) ds \end{bmatrix} \end{aligned}$$

从而得到:

$$V(t) \geq \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}^T(s) ds \end{bmatrix} (U + \bar{d}Q) \times \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}(s) ds \end{bmatrix} + \bar{d} \int_{t-\bar{d}}^t \int_v^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds dv$$

由上式,当矩阵 U 和 Q 满足 $U + \bar{d}Q > 0, V(t) > 0$,此时并不需要 U, Q 和 R 都正定. 对 $V(t)$ 进行求导,

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) & = 2 \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \int_{t-\bar{d}}^t \mathbf{x}^T(s) ds \end{bmatrix} U \times \\ & \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t-\bar{d}) \end{bmatrix} \\ \dot{V}_2(t) & = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \bar{d}\mathbf{x}^T(t) \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \bar{d}\mathbf{x}(t) \end{bmatrix} - \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \bar{d}\mathbf{x}^T(t-\bar{d}) \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \bar{d}\mathbf{x}(t-\bar{d}) \end{bmatrix} + \\ & 2 \int_{t-\bar{d}}^t \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T(t) & \bar{d}\mathbf{x}^T(s) \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ 0 \end{bmatrix} ds \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(t) & = \bar{d}^2 \dot{\mathbf{x}}^T(t) R \dot{\mathbf{x}}(t) - \bar{d} \int_{t-d(t)}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds - \\ & \bar{d} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds \end{aligned}$$

3.1 不考虑 DoS 攻击情况下的 H_∞ 性能分析

为了便于描述,定义 $\boldsymbol{\xi}_1 := \text{col}\{\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t-d(t)), \mathbf{x}(t-\bar{d}), \frac{1}{d(t)} \int_{t-d(t)}^t \mathbf{x}(s) ds, \frac{1}{\bar{d}-d(t)} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} \mathbf{x}(s) ds, \frac{1}{d^2(t)} \int_{t-d(t)}^t (t-s)\mathbf{x}(s) ds, \frac{1}{(\bar{d}-d(t))^2} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} (t-d(t)-s)\mathbf{x}(s) ds, \mathbf{e}(t), \Delta P_d(t)\}$.

应用文献 [17] 中的 Lemma 1,

$$\begin{aligned} & \bar{d} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds \geq \frac{1}{a} (\Gamma_1 \boldsymbol{\xi}_1(t))^T \hat{R} (\Gamma_1 \boldsymbol{\xi}_1(t)) \\ & \bar{d} \int_{t-d(t)}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds \geq \frac{1}{1-a} (\Gamma_2 \boldsymbol{\xi}_1(t))^T \hat{R} (\Gamma_2 \boldsymbol{\xi}_1(t)) \\ & \Gamma_1 := \text{col}\{e_2 - e_3, e_2 + e_3 - 2e_5, e_2 - e_3 - 6e_5 + 12e_7\} \\ & \Gamma_2 := \text{col}\{e_1 - e_2, e_1 + e_2 - 2e_4, e_1 - e_2 - 6e_4 + 12e_6\} \\ & \hat{R} = \text{diag}\{R, 3R, 5R\} \end{aligned}$$

其中, $a = \frac{\bar{d}-d(t)}{\bar{d}}$. 进一步应用引理 1,可以得到:

$$\begin{aligned} & \bar{d} \int_{t-d(t)}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds + \\ & \bar{d} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} \dot{\mathbf{x}}^T(s) R \dot{\mathbf{x}}(s) ds \geq \\ & \boldsymbol{\xi}_1^T(t) [(2-a)\Gamma_1^T \hat{R} \Gamma_1 + (1+a)\Gamma_2^T \hat{R} \Gamma_2 + \\ & \text{Sym}\{\Gamma_1^T [aY_1 + (1-a)Y_2] \Gamma_2\} - \Pi_2] \boldsymbol{\xi}_1(t) \\ \Pi_2 &= a\Gamma_2^T Y_2^T \hat{R}^{-1} Y_2 \Gamma_2 + (1-a)\Gamma_1^T Y_1 \hat{R}^{-1} Y_1^T \Gamma_1 \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \boldsymbol{\xi}_1^T(t) (\Pi_1 + \Pi_2) \boldsymbol{\xi}_1(t) \\ \Pi_1 &:= \ell_1^T Q \ell_1 - \ell_2^T Q \ell_2 + \bar{d}^2 \ell_0^T R \ell_0 - \\ & (2-a)\Gamma_1^T \hat{R} \Gamma_1 - (1+a)\Gamma_2^T \hat{R} \Gamma_2 + \\ & \text{Sym}\{\ell_3^T U \ell_4 + \bar{d} \ell_4^T Q \ell_5 - \\ & \Gamma_1^T [aY_1 + (1-a)Y_2] \Gamma_2\} \\ \ell_0 &:= Ae_1 - BKC(e_2 + e_8) + Fe_9 \\ \ell_1 &:= \text{col}\{e_1, \bar{d}e_1\}, \ell_2 = \text{col}\{e_1, \bar{d}e_3\} \\ \ell_3 &:= \text{col}\{\ell_0, e_1 - e_3\} \\ \ell_4 &:= \text{col}\{e_1, d(t)e_4 + (\bar{d} - d(t))e_5\} \\ \ell_5 &:= \text{col}\{\ell_0, 0\} \end{aligned}$$

结合传统事件触发机制 (3), 对于 $t \in [t_k + d_{\tau_k}, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}})$, 我们可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \boldsymbol{\xi}_1^T(t) (\hat{\Pi}_1 + \Pi_2) \boldsymbol{\xi}_1(t) - \\ & \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) + \gamma^2 \Delta P_d^T(t) \Delta P_d(t) \\ \hat{\Pi}_1 &= \Pi_1 + \sigma(e_2 + e_8)^T \Omega (e_2 + e_8) - e_8^T \Omega e_8 + \\ & e_1^T C^T C e_1 - \gamma^2 e_9^T e_9 \end{aligned}$$

使用 Schur 补, 可以得到当存在 $R > 0$, 对称矩阵 U, Q , 实矩阵 Y_1, Y_2 以及标量 \bar{d} , 满足 $U + \bar{d}Q > 0$, 并且 LMIs (7) 和 (8) 成立时, 系统 (6) 渐近稳定.

$$\begin{bmatrix} \hat{\Pi}_1 & \Gamma_2^T Y_2^T \\ * & -\hat{R} \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\Pi}_1 & \Gamma_1^T Y_1 \\ * & -\hat{R} \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

同时, 当 LMIs (7) 和 (8) 成立时, 我们可以得到:

$$\dot{V}(t) \leq -\mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) + \gamma^2 \Delta P_d^T(t) \Delta P_d(t)$$

因为 $\mathbf{x}(t)$ 在 t 上连续, 所以 $\dot{V}(t)$ 在 t 上也连续. 因

此对不等式两边同时从 0 到 ∞ 对 t 进行积分, 可得:

$$V(\infty) - V(0) \leq \int_0^\infty [-\mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) + \gamma^2 \Delta P_d^T(t) \Delta P_d(t)] ds$$

从而在零初始条件下,

$$\int_0^\infty [-\mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) + \gamma^2 \Delta P_d^T(t) \Delta P_d(t)] ds \geq 0$$

即, 对任意非零 $\Delta P_d(t) \in L_2[0, +\infty)$ 以及给定的 γ , $\|\mathbf{y}(t)\|_2 \leq \gamma \|\Delta P_d\|_2$. 在 $\Delta P_d(t) = 0$ 的情况下, 存在 $\varepsilon > 0$ 使得 $\mathbf{x}(t) \neq 0$ 时, $\dot{V}(t) \leq -\varepsilon \|\mathbf{x}(t)\|_2$. 因此, 系统 (6) 渐近稳定并具 H_∞ 范数界.

3.2 考虑 DoS 攻击情况下的 H_∞ 稳定性分析

本节将在 DoS 攻击发生时, 基于弹性事件触发机制 (4) 对系统进行稳定性分析, 找出弹性触发参数 σ_r 以及所能容忍的最大 DoS 攻击持续时间.

定理 1. 对于给定的标量 $\sigma > 0$, $\bar{d} > 0$, $\gamma > 0$, 当存在实矩阵 $R > 0$, $\Omega > 0$, 对称矩阵 Q, U 满足 $U + \bar{d}Q > 0$, 实矩阵 Y_1, Y_2 以及给定的控制器增益矩阵 K 使得 LMIs (7) 和 (8) 成立, 那么在弹性事件触发机制 (4) 下, 系统 (1) 渐近稳定, 并且 σ_r 满足:

$$\sigma_r \leq (\tau_M^{M+1} \sqrt{\sigma} + 1 - 1)^2 \quad (9)$$

同时, 当 σ_r 已知的情况下, 由式 (10) 可以得到系统所能容忍的最大 DoS 攻击持续时间

$$\tau_{\text{dos}} \leq \tau_M h \leq \lceil \lceil \log_{1+\sqrt{\sigma_r}}(1 + \sqrt{\sigma}) \rceil \rceil h \quad (10)$$

其中, $\lfloor * \rfloor$ 表示向下取整.

证明. 为了符号表示方便, 我们假设在两次成功传输时刻的区间 $[t_k, t_{k+1})$ 存在 τ_M 个由于 DoS 攻击所造成的未成功传输但是触发的状态 $\mathbf{x}(r_j)$, 其中 $t_k = r_0 < r_1 < r_2 < \dots < r_{\tau_M} < r_{\tau_M+1} = t_{k+1}$.

因此, 区间 $[t_k, t_{k+1})$ 可以分为多个小区间 $[r_j, r_{j+1}), j \in \{0, 1, 2, \dots, \tau_M\}$.

$$\begin{aligned} |\mathbf{e}(t)| &= |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_k)| \leq \\ & \sum_{p=0}^{j-1} |\mathbf{x}(r_{p+1}) - \mathbf{x}(r_p)| + |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(r_j)| \end{aligned}$$

其中, $t \in [r_j, r_{j+1}), t = r_j + lh, l \in \mathbf{N}$. 应用弹性事件触发机制 (4),

$$|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(r_j)| \leq \sqrt{\sigma_r} |\mathbf{x}(r_j)|$$

$$|\mathbf{x}(r_{p+1}) - \mathbf{x}(r_p)| \leq \sqrt{\sigma_r} |\mathbf{x}(r_p)|$$

因此

$$|\mathbf{e}(t)| = |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_k)| = \sum_{p=0}^j \sqrt{\sigma_r} |\mathbf{x}(r_p)|$$

又由 $|\mathbf{x}(r_{p+1}) - \mathbf{x}(r_p)| \leq \sqrt{\sigma_r} |\mathbf{x}(r_p)|$ 可以得到 $|\mathbf{x}(r_{p+1})| \leq (1 + \sqrt{\sigma_r}) |\mathbf{x}(r_p)|$, 进一步可得,

$$|\mathbf{x}(r_{p+1})| \leq (1 + \sqrt{\sigma_r})^{p+1} |\mathbf{x}(t_k)|, \\ p = 0, 1, \dots, j-1$$

所以

$$|\mathbf{e}(t)| = |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_k)| \leq \\ \sum_{p=0}^j \sqrt{\sigma_r} (1 + \sqrt{\sigma_r})^p |\mathbf{x}(t_k)| \leq \\ ((1 + \sqrt{\sigma_r})^{\tau_M+1} - 1) |\mathbf{x}(t_k)| \quad (11)$$

由于 $t \in [r_j, r_{j+1})$, 数据包没有成功传输, 因此,

$$|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_k)| \leq \sqrt{\sigma} |\mathbf{x}(t_k)| \quad (12)$$

结合式 (11) 和 (12) 即可以得到定理 1. \square

3.3 弹性事件触发机制和负载频率控制器协同设计

本节将在第 3.1 节和第 3.2 节稳定性分析的基础上, 对弹性事件触发矩阵和控制器进行联合设计, 从而达到理想的控制效果.

定理 2. 对于给定的参数 $\gamma > 0, \bar{d} > 0$, 在弹性事件触发通信机制 (4) 情况下, 存在正定矩阵 R, Ω , 对称矩阵 Q, U 满足 $U + \bar{d}Q > 0$, 以及实矩阵 P, Y_1 和 Y_2 使得下列不等式成立, 此时系统 (1) 渐近稳定, H_∞ 控制器增益 $K = K_c(CP)^+$:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_1 & \Gamma_2^T Y_2^T \\ * & -\hat{R} \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_1 & \Gamma_1^T Y_1 \\ * & -\hat{R} \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

其中

$$\tilde{\Pi}_1 := \ell_1^T Q \ell_1 - \ell_2^T Q \ell_2 + \bar{d}^2 e_8^T R e_8 - \gamma^2 e_{10}^T e_{10} - \\ (1+a)\Gamma_2^T \hat{R} \Gamma_2 + \text{Sym}\{\tilde{\ell}_3^T U \ell_4 + \bar{d} \ell_4^T Q \tilde{\ell}_5 - \\ \Gamma_1^T [aY_1 + (1-a)Y_2] \Gamma_2 - (e_1 + e_8)^T [P e_8 - \\ A P e_1 + B K_c (e_9 + e_2) - F e_{10}]\} - e_9^T \Omega e_9 + \\ \sigma_r (e_2 + e_9)^T \Omega (e_2 + e_9) + e_1^T (CP)^T C P e_1 - \\ (2-a)\Gamma_1^T \hat{R} \Gamma_1$$

$$\tilde{\ell}_3 = \text{col}\{e_8, e_1 - e_3\}, \tilde{\ell}_5 = \text{col}\{e_8, 0\}$$

证明. 选择非奇异实矩阵 $P^{[18]}$, 令 $\mathbf{x}(t) = P\mathbf{z}(t)$. 则 $\mathbf{u}(t) = -K C \mathbf{x}(t) = -K C P \mathbf{z}(t) = -K_c \mathbf{z}(t)$, $K_c = K C P$, 当 $t \in [t_k + d_{\tau_k}, t_{k+1} + d_{\tau_{k+1}})$ 系统 (1) 变形为

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = P^{-1} A P \mathbf{z}(t) - P^{-1} B K_c \mathbf{z}(t_k) + \\ P^{-1} F \Delta P_d(t) \quad (15)$$

与第 2 节中相似, 对 $d(t)$ 和 $\mathbf{e}_z(t)$ 进行定义, 其中 $d(t)$ 的定义与第 3 节中相同.

$$\mathbf{e}_z(t) = \begin{cases} 0, & t \in I_1 \\ \mathbf{z}(t_k) - \mathbf{z}(t_k + lh), & t \in I_2^l \\ \mathbf{z}(t_k) - \mathbf{z}(t_k + m_k h), & t \in I_3 \end{cases}$$

则系统 (1) 可以进一步变形为

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = P^{-1} A P \mathbf{z}(t) - P^{-1} B K_c (\mathbf{e}_z(t) + \\ \mathbf{z}(t - d(t))) + P^{-1} F \Delta P_d(t) \quad (16)$$

本节基于状态 \mathbf{z} 选择与之前相同的 Lyapunov-Krasovskii 泛函以及相同的证明方法, 不同的是在第 2.1 节中控制器增益 K 是预先给出的, 而定理 2 中可以同时求出控制器增益 K 以及事件触发矩阵. 定义 $\boldsymbol{\xi}_2 := \text{col}\{\mathbf{z}(t), \mathbf{z}(t - d(t)), \mathbf{z}(t - \bar{d}), \frac{1}{d(t)} \int_{t-d(t)}^t \mathbf{z}(s) ds, \frac{1}{\bar{d}-d(t)} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} \mathbf{z}(s) ds, \frac{1}{d^2(t)} \int_{t-d(t)}^t (t-s) \mathbf{z}(s) ds, \frac{1}{(\bar{d}-d(t))^2} \int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)} (t-d(t)-s) \mathbf{z}(s) ds, \dot{\mathbf{z}}(t), \mathbf{e}_z(t), \Delta P_d(t)\}$.

从而, 可得到

$$\dot{V}(t) \leq \boldsymbol{\xi}_2^T (\tilde{\Pi}_1 + \Pi_2) \boldsymbol{\xi}_2$$

$$\tilde{\Pi}_1 := \ell_1^T Q \ell_1 - \ell_2^T Q \ell_2 + \bar{d}^2 e_8^T R e_8 - (2-a)\Gamma_1^T \hat{R} \Gamma_1 - \\ (1+a)\Gamma_2^T \hat{R} \Gamma_2 + \text{Sym}\{\tilde{\ell}_3^T U \ell_4 + \bar{d} \ell_4^T Q \tilde{\ell}_5 - \\ \Gamma_1^T [aY_1 + (1-a)Y_2] \Gamma_2\} - e_9^T \Omega e_9 - \gamma^2 e_{10}^T e_{10} + \\ \sigma_r (e_2 + e_9)^T \Omega (e_2 + e_9) + e_1^T (CP)^T C P e_1$$

此外

$$-2[\mathbf{z}(t) + \dot{\mathbf{z}}(t)]^T [P \dot{\mathbf{z}}(t) - A P \mathbf{z}(t) + B K_c \times \\ (\mathbf{z}(t - d(t)) + \mathbf{e}_z(t)) - F \Delta P_d(t)] = 0$$

因此可以得到: $\dot{V}(t) \leq \boldsymbol{\xi}_2^T (\tilde{\Pi}_1 + \Pi_2) \boldsymbol{\xi}_2$, 使用 Schur 补即可得到式 (13) 和 (14). \square

4 仿真案例

本节我们将第 3 节中的相关结论应用于三域 LFC 控制系统中, 验证所提出的弹性事件触发机制的有效性, 联合求出控制器增益 K 和事件触发矩阵. 弹性事件触发通信机制与三域电力系统 LFC 的统一框架如图 1 所示, 其中的相关参数^[19] 见表 2.

表 2 带 EVs 三域 LFC 模型参数 ($i = 1, 2, 3$)

Table 2 Parameters of three-area LFC model including EV aggregators ($i = 1, 2, 3$)

参数	取值
M_i	10
D_i	1.0
T_{g_i}	0.1
T_{c_i}	0.3
T_{r_i}	10
F_{p_i}	0.05
R_i	0.05
β_i	21
K_{EV_i}	1
T_{EV_i}	1
T_{ij}	0.026

令 $h = 0.01$, 控制器增益 $K_{P_i} = 0.2, K_{I_i} = 0.2, i = 1, 2, 3$, 分配比例 $\alpha_0 = 0.9, \alpha_1 = 0.1$. 如表 3 所示, 给定 σ 和 σ_r , 基于定理 1 我们可以得到 DoS 攻击最大持续时间 τ_{dos} 的值. 从中可以看出弹性事件触发机制可以容许 DoS 攻击所造成的数据包丢失, 当攻击持续时间小于 τ_{dos} 时, 系统保持稳定. 此外, 当给定 σ 和 τ_M 时, 也可以求出 σ_r 的值. 从表 3 可以看出, σ_r 越大, τ_{dos} 越小, 这是因为 σ_r 越大, 信道上传输的数据量越小, 从而在保证系统稳定的情况下, 所能允许的 DoS 攻击造成的数据丢失量越

小, 因此系统所能承受的最大攻击持续时间越小. 当 $\sigma = \sigma_r = 0.01$ 时, 系统触发次数为 389 次, 而根据文献 [7-8] 所提方法可以得到触发次数分别为 398 次和 457 次, 因此可以看出本文所提方法可以得到更少的触发次数, 有利于节约通信资源.

表 3 给定不同的 σ 和 σ_r , 最大连续丢包量 τ_M 和攻击持续时间 τ_{dos} 的值

σ	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
σ_r	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.05
τ_M	2	1	4	2	5	3	2
τ_{dos}	0.02	0.01	0.04	0.02	0.05	0.03	0.02

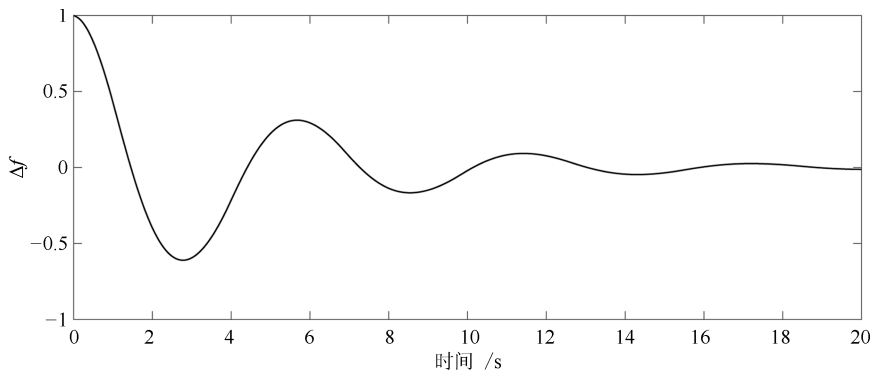
基于定理 2, 给定 $\sigma_r = 0.01$ 时, 使用 Matlab/LMI 工具箱, 可以同时得到控制器增益和弹性事件触发矩阵如下:

$$K = \begin{bmatrix} 2.38 & -0.06 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.38 & -0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.38 & -0.06 \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \text{diag}\{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3\}$$

此时, 系统的响应曲线如图 2 所示, 由图中可以看出系统处于稳定状态.

$$\Omega_i = \begin{bmatrix} 3.64 & -172.49 & -11.01 & 85.51 & 20.83 & -35.07 & -2.18 \\ -172.49 & 34113.53 & -477.46 & -13091.96 & -15595.51 & -2455.89 & 133.46 \\ -11.01 & -477.46 & 2559.74 & 40074.27 & -171.10 & 339.19 & -5.25 \\ 85.51 & -13091.96 & 40074.27 & 992118.76 & -1436 & -215.22 & -11.12 \\ 20.83 & -15595.51 & -171.10 & -1436 & 8599 & 2037.21 & -25.42 \\ -35.07 & -2455.89 & 339.19 & -215.22 & 2037.21 & 1125.41 & -2.55 \\ -2.18 & 133.46 & -5.25 & -11.12 & -25.42 & -2.55 & 7.96 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3$$



(a) 频率变化曲线
(a) Frequency variation curve

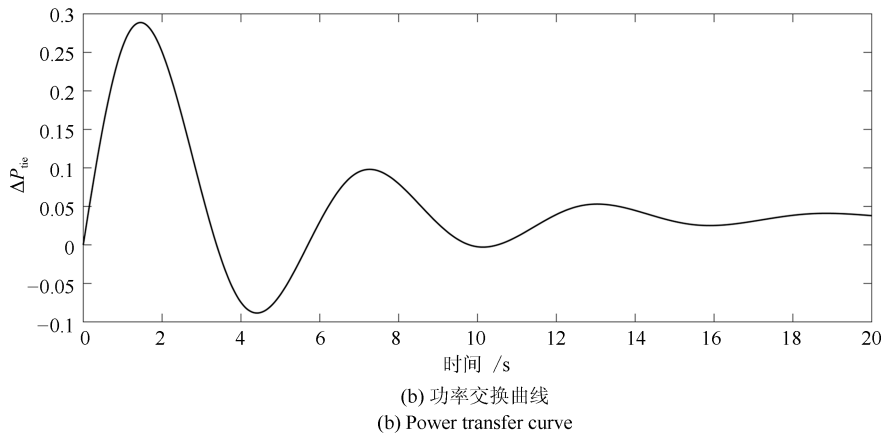


图2 系统变化频率曲线和功率交换曲线

Fig. 2 The curve of frequency variation and power transfer

5 结论

本文将电动汽车引入电力 CPS 中, 提出了一种弹性事件触发机制, 能够容忍 DoS 攻击所造成的数据包丢失, 并给出了系统所能承受的最大 DoS 攻击持续时间. 构建新型 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 对系统进行稳定性分析, 并联合求出弹性控制器增益和事件触发矩阵. 所得到的时滞依赖稳定性条件中, 矩阵 U , Q 只需要对称即可, 放松了对其正定性的要求. 由于所提出的弹性事件触发通信机制, 在保证电力 CPS 稳定的情况下, LFC 控制器输入只在需要的时候进行更新, 并可以消除 DoS 攻击对系统稳定性所造成的不利影响. 最后, 通过三域电力系统仿真, 验证了所提出方法的有效性.

References

- 1 Wang Zhong-Jie, Xie Lu-Lu. Cyber-physical systems: a survey. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1157–1166
(王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述. *自动化学报*, 2011, **37**(10): 1157–1166)
- 2 Liang Yao, Feng Dong-Qin, Xu Shan-Shan, Chen Si-Yuan, Gao Meng-Zhou. Feasibility analysis of encrypted transmission on security of industrial control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(3): 434–442
(梁耀, 冯冬芹, 徐珊珊, 陈思媛, 高梦州. 加密传输在工控系统安全中的可行性研究. *自动化学报*, 2018, **44**(3): 434–442)
- 3 Wei Y S, Li S Y. Water supply networks as cyberphysical systems and controllability analysis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, **2**(3): 313–319
- 4 He H, Yan J. Cyber-physical attacks and defences in the smart grid: a survey. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, 2017, **1**(1): 13–27
- 5 Mo Y, Kim H J, Brancik K, Dickinson D, Lee H, Perrig A, et al. Cyber-physical security of a smart grid infrastructure. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1): 195–209
- 6 Wen S, Yu X, Zeng Z, Wang J. Event-triggering load frequency control for multi-area power systems with communication delays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(2): 1308–1317
- 7 Peng C, Zhang J, Yan H. Adaptive event-triggering H_∞ load frequency control for network-based power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **65**(2): 1685–1694
- 8 Peng C, Li J, Fei M. Resilient event-triggering H_∞ load frequency control for multi-area power systems with energy-limited DoS attacks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, **32**(5): 4110–4118
- 9 Yang Q Y, Yang J, Yu W, An D, Zhang N, Zhao W. On false data-injection attacks against power system state estimation: modeling and countermeasures. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, **25**(3): 717–729
- 10 Liu S C, Liu X P, El Saddik A. Denial-of-Service (dos) attacks on load frequency control in smart grids. In: *Proceedings of the 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. Washington, USA: IEEE, 2013. 1–6
- 11 Pham T N, Trinh H, Le V H. Integration of electric vehicles for load frequency output feedback H_∞ control of smart grids. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2016, **10**(13): 3341–3352
- 12 Ko K S, Dan K S. The effect of EV aggregators with time-varying delays on the stability of a load frequency control system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, **33**(1): 669–680
- 13 Pham T N, Nahavandi S, Le V H, Trinh H, Wong K P. Static output feedback frequency stabilization of time-delay power systems with coordinated electric vehicles state of charge control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, **32**(5): 3862–3874
- 14 Yang Fei-Sheng, Wang Jing, Pan Quan. A survey of networked event-triggered control. *Control and Decision*, 2018, **33**(6): 969–977
(杨飞生, 汪璟, 潘泉. 基于事件触发机制的网络控制研究综述. *控制与决策*, 2018, **33**(6): 969–977)
- 15 Yue D, Tian E, Han Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Transaction Automatic Control*, 2013, **58**(2): 475–481

- 16 Zhang X M, Han Q L, Seuret A. An improved reciprocally convex inequality and an augmented Lyapunov–Krasovskii functional for stability of linear systems with time-varying delay. *Automatica*, 2017, **84**: 221–226
- 17 Liu K, Seuret A, Xia Y. Stability analysis of systems with time-varying delays via the second-order Bessel-Legendre inequality. *Automatica*, 2017, **76**: 138–142
- 18 Zhang X M, Han Q L. Event-triggered H_∞ control for a class of nonlinear networked control systems using novel integral inequalities. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2017, **27**(4): 679–700
- 19 Pham T N, Trinh H, Le V H. Load frequency control of power systems with electric vehicles and diverse transmission links using distributed functional observers. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **7**(1): 238–252



杨飞生 西北工业大学控制科学与工程和网络空间安全学科副教授. 主要研究方向为时滞系统稳定性分析, 信息物理系统智能控制与网络安全. 本文通信作者. E-mail: yangfeisheng@nwpu.edu.cn
(**YANG Fei-Sheng** Associate professor of control science and engineering, cyber-security, Northwestern Poly-

technical University. His research interest covers stability analysis of time-delay systems, intelligent control, and network security of CPS. Corresponding author of this paper.)



汪 璟 西北工业大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为信息物理系统, 事件触发机制.

E-mail: wang-jing@mail.nwpu.edu.cn
(**WANG Jing** Master student at the School of Automation, Northwestern Polytechnical University. Her research interest covers cyber-physical systems and event-triggered mechanism.)



潘 泉 西北工业大学自动化学院教授. 主要研究方向为信息融合与工控安全.

E-mail: quanpan@mail.nwpu.edu.cn
(**PAN Quan** Professor at the School of Automation, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers information fusion and security of industrial control systems.)



康沛沛 西北工业大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为 CPS 控制与安全.

E-mail: kangpeipei@mail.nwpu.edu.cn
(**KANG Pei-Pei** Master student at the School of Automation, Northwestern Polytechnical University. Her research interest covers control and security of CPS.)