引用格式:刘冠宇,刘永慧.非周期DoS攻击下多区域互联电力系统的负荷频率控制[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):23-31.
Citation: LIU Guanyu, LIU Yonghui. Load frequency control of multi-area interconnected power systems under aperiodic DoS attacks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):23-31.

非周期DoS攻击下多区域互联电力系统的负荷频率控制

刘冠宇[1],刘永慧[2]
(1.上海电机学院电气学院,上海 201306;2.上海第二工业大学智能制造与控制工程学院,上海 201209)

摘　要:基于事件触发机制,研究非周期拒绝服务攻击下多区域互联电力系统的负荷频率控制。首先,建立非周期拒绝服务攻击下多区域互联电力系统的数学模型;其次,设计切换状态观测器,分别估计非周期拒绝服务攻击的休眠期和活跃期下的系统状态;再次,为节省通信资源,在观测器—控制器通道引入事件触发机制,并基于状态观测器设计反馈控制器;最后,以三区域互联电力系统为例进行仿真验证,仿真结果表明所提出的控制方法能够有效抑制非周期拒绝服务攻击带来的不良影响。

关　键　词:多区域互联电力系统;非周期拒绝服务攻击;负荷频率控制;事件触发控制
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.003　　**中图分类号**:TM711　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0023-09

Load frequency control of multi-area interconnected power systems under aperiodic DoS attacks

LIU Guanyu[1], LIU Yonghui[2]
(1. Electrical Engineering College, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 2. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: Based on an event-triggered mechanism, load frequency control of multi-area interconnected power systems under aperiodic denial-of-service (DoS) attacks is studied. First, a mathematical model of the multi-area interconnected power system under aperiodic DoS attacks is established. Then, a switching state observer is designed to estimate the states during the hibernating and active periods of the aperiodic DoS attacks, respectively. To save communication resources, an event-triggered mechanism is introduced into the observer-controller channel. Moreover, based on the state observer, a feedback controller is designed. Finally, the three-area interconnected power system is taken as an example to make a simulation-based verification. The simulation results demonstrate that the proposed control method can restrain the adverse impact of the aperiodic DoS attacks effectively.

Key words: multi-area interconnected power system; aperiodic denial-of-service attack; load frequency control; event-triggered control

在现代电力系统中,电网正由大同步电网向多分区互联电网架构转变,电力供应的可靠性和稳定性已成为核心关注点[1]。由联络线连接几个电力系统组成的多区域互联电力系统,由于其能够整合不同系统之间的资源优势,解决负载的能源分配不平衡的问题,提高供电可靠性,受到了广泛的关注。然而,在多区域互联电力系统中,其结构的复杂性和区域的相互依赖性,使得系统更加脆弱,易受各种外部攻击和内部扰动的影响,进而导致电力系统的频率不稳定。因此,互联电力系统的负荷频率控

收稿日期:2024-11-21;**修回日期**:2025-04-22
基金项目:国家自然科学基金(61803253)
通信作者:刘永慧(1986—),女,副教授,博士,主要从事电力系统智能控制和切换系统等方面的研究;E-mail: liuyh@sspu.edu.cn.

制(load frequency control, LFC)至关重要[2-4]。

由于多区域互联电力系统采用网络通信,其面对的安全威胁不断增加。目前,针对多区域互联电力系统的网络攻击主要有两种:虚假数据注入攻击,即通过虚假数据来替换通信中的正常数据,破坏系统数据的完整性以及安全性[5-6];拒绝服务(denial-of-service, DoS)攻击,即通过阻断或延迟系统的信号传输,使系统的通信中断,进而影响信号传输,降低系统的性能。近年来,学者们对DoS攻击下电力系统的控制进行了广泛的研究[7-12]。针对DoS攻击下多区域互联电力系统的LFC,文献[7]限制DoS攻击的持续时间以及频率,设计了弹性控制器,保证闭环系统在恶意攻击下仍保持稳定。文献[8]针对测量信息通道遭受网络攻击的信息物理系统,研究了周期DoS攻击下系统的状态反馈和输出反馈控制。文献[9]提出了一种依赖攻击参数的时变Lyapunov函数,实现了系统的弹性LFC。文献[10]考虑了周期性DoS攻击下信息物理系统的输出反馈滑模控制。文献[11]采用自适应积分滑模控制,研究了DoS攻击下多区域电力系统的频率偏差控制。文献[12]提出了弹性事件触发LFC方法,通过建立切换模型和弹性事件触发机制,研究了信息物理电力系统在DoS攻击下的安全问题。文献[13]通过限制DoS攻击频率和持续时间,分析了DoS攻击下信息物理电力系统的输入状态稳定性。

随着电力系统自动化和信息化的迅速发展,传统的基于周期采样的控制策略对网络攻击具有局限性,而事件触发控制能够节省网络资源,因此受到了广泛关注[14-16]。文献[14]针对直流微电网在DoS攻击下的控制问题,设计了一种新型弹性攻击事件触发控制器;文献[15]则针对离散非线性多输入多输出系统,提出了一种基于事件触发的自适应容错控制方法;文献[16]进一步结合观测器设计,解决了DoS攻击下网络控制系统的鲁棒性问题。在此基础上,学者们将事件触发机制推广至多区域互联场景:文献[17]设计了自适应事件触发控制并引入PI控制器以实现LFC;文献[18]结合滑模控制与事件触发机制研究了互联系统的频率控制;文献[19]进一步提出了动态事件触发机制以增强系统鲁棒性。

然而,由于多区域互联电力系统的复杂性和非周期DoS攻击的不可预测性,传统控制方法在应对频率偏差时具有一定的局限性。非周期DoS攻击在不同的时间间隔内频繁变化,给控制器设计带来了挑战。基于以上分析,为解决非周期DoS攻击造成的多区域互联电力系统频率偏差问题,本文研究了基于事件触发机制的状态反馈控制。通过设计切换的状态观测器分别估计DoS攻击休眠期和活跃期的状态,并基于事件触发机制设计了反馈控制器,研究了系统的频率控制。

1 系统模型描述

1.1 多区域互联电力系统数学模型

多区域互联电力系统区域i的状态反馈LFC示意图如图1所示。图1中区域i的LFC系统的数学模型为

$$\begin{cases}\Delta\dot{f}_i(s)=\dfrac{1}{D_i+sM_i}\left(\Delta P_{\mathrm{m}i}(s)-\Delta P_{\mathrm{d}i}(s)-\Delta P_{\mathrm{tie}\text{-}i}(s)\right)\\ \Delta P_{\mathrm{tie}\text{-}i}(s)=\dfrac{2\pi}{s}\sum\limits_{j=1,j\neq i}^{n}T_{ij}\left(\Delta f_i(s)-\Delta f_j(s)\right)\\ \Delta P_{\mathrm{m}i}(s)=\dfrac{1}{1+sT_{\mathrm{ch}i}}\Delta P_{\mathrm{v}i}(s)\\ \Delta P_{\mathrm{v}i}(s)=\dfrac{1}{1+sT_{\mathrm{g}i}}\left(-u_i(s)-\dfrac{1}{R_i}\Delta f_i(s)\right)\\ A_{\mathrm{CE}i}(s)=\beta_i\Delta f_i(s)+\Delta P_{\mathrm{tie}\text{-}i}(s)\end{cases}\tag{1}$$

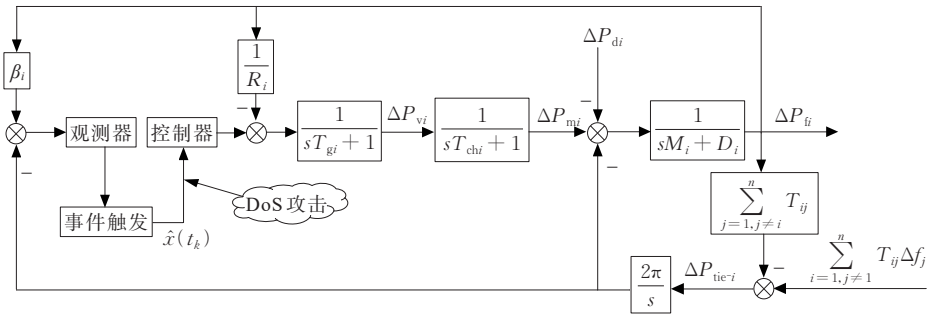

图1 DoS攻击下区域i的LFC示意图

Figure 1 LFC of i area under DoS attacks

式中，Δf_i 为区域频率偏差；ΔP_{mi} 为发电机的机械功率输出偏差；ΔP_{di} 为负荷扰动偏差；$\Delta P_{tie\text{-}i}$ 为联络线的功率交换；T_{ij} 为控制区域间联络线的同步系数；ΔP_{vi} 为控制阀门位置偏差；T_{gi} 为调速器时间常数；R_i 为速度跌落系数；A_{CEi} 为区域控制偏差；β_i 为频率偏差因子。

对式(1)进一步化简，区域 i 的数学模型为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_i(t)=\boldsymbol{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i(t)+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}_i(t)+\boldsymbol{F}_i w_i(t)-\\ \qquad\qquad \sum\limits_{j=1,i\neq j}^{n}\boldsymbol{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j(t)\\ \boldsymbol{y}_i(t)=\boldsymbol{C}_i\boldsymbol{x}_i(t)\end{cases}\tag{2}$$

其中，

$$\boldsymbol{x}_i(t)=\left[\Delta f_i(t),\Delta P_{mi}(t),\Delta P_{vi}(t),\int A_{CEi}(t),\Delta P_{tie\text{-}i}(t)\right]^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{y}_i(t)=\left[A_{CEi}(t),\int A_{CEi}(t)\right]^{\mathrm{T}},w_i(t)=\Delta P_{di}(t),$$

$$\boldsymbol{A}_{ii}=\begin{bmatrix}-\dfrac{D_i}{M_i} & \dfrac{1}{M_i} & 0 & 0 & -\dfrac{1}{M_i}\\ 0 & -\dfrac{1}{T_{chi}} & \dfrac{1}{T_{chi}} & 0 & 0\\ -\dfrac{1}{R_iT_{gi}} & 0 & -\dfrac{1}{T_{gi}} & 0 & 0\\ \beta_i & 0 & 0 & 0 & 1\\ 2\pi\sum\limits_{j=1,j\neq i}^{n}T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}_{ij}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_i=\begin{bmatrix}0 & 0 & \dfrac{1}{T_{gi}} & 0 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{C}_i=\begin{bmatrix}\beta_i & 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{F}_i=\begin{bmatrix}-\dfrac{1}{M_i} & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}。$$

因此，互联电力系统可表示为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{F}\boldsymbol{w}(t)\\ \boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t)\end{cases}\tag{3}$$

其中，

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

$\boldsymbol{B}=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{B}_1,\boldsymbol{B}_2,\cdots,\boldsymbol{B}_n\}$，$\boldsymbol{C}=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{C}_1,\boldsymbol{C}_2,\cdots,\boldsymbol{C}_n\}$，$\boldsymbol{F}=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{F}_1,\boldsymbol{F}_2,\cdots,\boldsymbol{F}_n\}$。

式中，$\boldsymbol{x}(t)$ 为系统状态变量；$\boldsymbol{A}$ 为状态矩阵；$\boldsymbol{B}$ 为系统输入矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为输出矩阵；$\boldsymbol{y}(t)$ 为系统输出；$\boldsymbol{F}$ 为外部扰动系数矩阵。

为便于后续的分析和设计，给出以下假设和引理。

假设 1[20]　扰动 $\boldsymbol{F}\boldsymbol{w}(t)$ 满足：

$$\|\boldsymbol{F}\boldsymbol{w}(t)\|\leqslant\boldsymbol{N}\|\boldsymbol{x}(t)\|$$

$$\boldsymbol{N}=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{N}_1,\boldsymbol{N}_2,\cdots,\boldsymbol{N}_n\}$$

$$\boldsymbol{N}_i=\begin{bmatrix}\mu & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu\end{bmatrix},i\in\{1,2,\cdots,n\},\mu>0。$$

引理 1[21]　对于任意的实矩阵 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 和适当维数的正矩阵 $\boldsymbol{Q}$，有

$$\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}+\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}\leqslant\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{U}+\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{V}$$

1.2　非周期 DoS 攻击模型

在开放式通信网络环境下，系统极易遭受 DoS 攻击。本文考虑 LFC 系统遭受的攻击为非周期 DoS 攻击。非周期 DoS 攻击信号如图 2 所示。可知，DoS 攻击的活跃期和休眠期交替出现，且满足：

$$S_{DoS}(t)=\begin{cases}0, & t\in\Xi_{1,n}\triangleq[g_n,g_n+T_{off,n})\\ 1, & t\in\Xi_{2,n}\triangleq[g_n+T_{off,n},g_{n+1})\end{cases}\tag{4}$$

其中，$S_{DoS}(t)=0$ 表示攻击处于休眠期，允许系统通信，$S_{DoS}(t)=1$ 表示攻击处于活跃期，数据无法传输。定义第 $n+1$ 次 DoS 攻击休眠期为 $\Xi_{1,n}$，活跃期为 $\Xi_{2,n}$。

总攻击周期为 $T_n=T_{on,n}+T_{off,n}$，其中 $T_{on,n}$ 和 $T_{off,n}$ 分别为活跃期和休眠期，分别满足：

$$T_{on,n}\in\left[T_{on}^{min},T_{on}^{max}\right]$$

$$T_{off,n}\in\left[T_{off}^{min},T_{off}^{max}\right]$$

其中，T_{on}^{min}、T_{on}^{max} 分别为 DoS 攻击最小和最大活跃期，T_{off}^{min}、T_{off}^{max} 分别为 DoS 攻击最小和最大休眠期。

注 1　在实际工程中，系统将在 DoS 攻击停止后恢复通信，因此 DoS 攻击的活跃期与休眠期交替出现。由于攻击者的能量有限，活跃期持续时间 $T_{on,n}$ 受到约束且满足 $T_{on,n}>0$。此外，攻击会反复发生，休眠期 $T_{off,n}$ 不会无限延长，且 $T_{off,n}>0$。

注 2　本文对 DoS 攻击的活跃期和休眠期的持续时间进行了定义，和已有的周期性 DoS 攻击以及

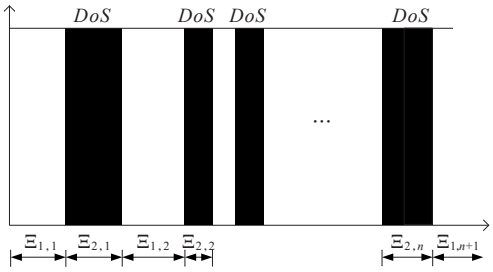

图 2 非周期DoS攻击信号示意图

Figure 2 Aperiodic DoS attack signals

约束攻击时间和攻击频率的非周期性DoS攻击相比，本文提出的非周期攻击更具一般性。

2 状态反馈控制器设计

2.1 切换状态观测器设计

多区域互联电力系统在非周期DoS攻击的活跃期和休眠期内表现出不同的动态特性。同时，在实际工程当中，由于监测技术和成本等因素，难以对系统状态$\boldsymbol{x}(t)$进行精确测量。因此，设计状态观测器为

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{L}(t)\big(\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\big)\\ \hat{\boldsymbol{y}}(t)=\boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}(t)\end{cases} \tag{5}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{x}}(t)$为观测状态；$\boldsymbol{L}(t)$为观测增益，且满足：

$$\boldsymbol{L}(t)=\begin{cases}\boldsymbol{L}_1, & t\in\Xi_{1,n}\\ \boldsymbol{L}_2, & t\in\Xi_{2,n}\end{cases} \tag{6}$$

2.2 事件触发条件设计

为降低系统的传输频率，减少资源的占用，在观测器-控制器通道引入事件触发机制，事件触发函数满足：

$$f(t)=\|\hat{\boldsymbol{e}}(t)\|-\varepsilon\|\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\| \tag{7}$$

其中，观测器采样误差$\hat{\boldsymbol{e}}(t)=\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\hat{\boldsymbol{x}}(t_k)$，即最近一次触发状态$\hat{\boldsymbol{x}}(t_k)$与当前采样状态$\hat{\boldsymbol{x}}(t)$的误差，$\varepsilon$为事件触发系数，满足$\varepsilon>0$。

当$f(t)>0$时，系统进行采样，并更新当前存储的状态，否则维持上一存储状态。

2.3 状态反馈控制设计

本文的控制目的是在非周期DoS攻击下，设计基于事件触发机制的状态反馈控制器，保证系统式(3)的稳定性。因此，本文设计的状态反馈控制为

$$\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t) \tag{8}$$

设计基于观测器式(8)的状态反馈控制器为

$$\boldsymbol{u}(t)=\begin{cases}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t), & t\in\Xi_{1,n}\\ 0, & t\in\Xi_{2,n}\end{cases} \tag{9}$$

将式(9)代入切换的观测器式(5)，即

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{L}_1\big(\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\big), & t\in\Xi_{1,n}\\ \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{L}_2\big(\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\big), & t\in\Xi_{2,n}\end{cases} \tag{10}$$

基于事件触发机制，得到切换的观测器为

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{L}_1\big(\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t_k)\big), & t\in\Xi_{1,n}\\ \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{L}_2\big(\boldsymbol{y}(t_k)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\big), & t\in\Xi_{2,n}\end{cases} \tag{11}$$

3.4 稳定性分析

3.4.1 DoS攻击休眠期稳定性分析

由式(11)得到观测器为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{L}_1\big(\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\big) \tag{12}$$

定义估计误差$\hat{\boldsymbol{e}}(t)=\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\hat{\boldsymbol{x}}(t_k)$，得系统状态方程和观测器分别为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{e}}(t)+\boldsymbol{F}\boldsymbol{w}(t) \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t)=&\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{e}}(t)+\\&\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{C}\big(\boldsymbol{e}(t)+\hat{\boldsymbol{e}}(t)\big)+(\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{C}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\hat{\boldsymbol{e}}(t)+\\&(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\hat{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{C}\boldsymbol{e}(t)\end{aligned} \tag{14}$$

定义观测误差$\boldsymbol{e}(t)=\boldsymbol{x}(t)-\hat{\boldsymbol{x}}(t)$，得到误差状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{C})\boldsymbol{e}(t)-\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{e}}(t)+\boldsymbol{F}\boldsymbol{w}(t) \tag{15}$$

下面对DoS攻击休眠期系统的稳定性进行分析。

定理 1 对于系统式(14)和系统式(15)，已知参数$\varepsilon>0$，若存在正定矩阵$\boldsymbol{X}>0$、$\boldsymbol{Q}_1>0$，矩阵$\boldsymbol{Y}$，$\boldsymbol{Z}_1$，参数$\delta_1>0$，$0<\delta_2<1$，$0<\delta_3<1$，$0<\delta_4<1$，$0<\delta_5<1$，且满足以下的线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMI)：

$$\delta_1\boldsymbol{I}-\boldsymbol{X}<0 \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix}\vartheta_4 & \boldsymbol{B}\boldsymbol{Y} & \sqrt{2}\,\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{C} & \sqrt{2}\,\boldsymbol{X}\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\\ * & -\delta_1\boldsymbol{X} & 0 & 0\\ * & * & -\delta_2\boldsymbol{I} & 0\\ * & * & * & -\delta_3\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0 \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix}\vartheta_5 & \boldsymbol{Z}_1\boldsymbol{C} & \boldsymbol{Q}_1\\ * & -\delta_4\boldsymbol{I} & 0\\ * & * & -\delta_5\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0 \tag{18}$$

其中，$\vartheta_4=\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}$，$\vartheta_5=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_1-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}_1{}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}_1\boldsymbol{A}-\boldsymbol{Z}_1\boldsymbol{C}$。

因此，闭环系统式(14)、(15)渐进稳定。

证明　设计Lyapunov函数，即

$$V_1(t)=\dot{\hat{x}}^{\mathrm{T}}(t)P_1\hat{x}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_1e(t) \tag{19}$$

其中，P_1、Q_1均为正定对称矩阵。

对式(19)求导：

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t)=&\\ &\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)(A+BK)^{\mathrm{T}}P_1\hat{x}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)(L_1C)^{\mathrm{T}}P_1\hat{x}(t)+\\ &\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)(L_1C-BK)^{\mathrm{T}}P_1\hat{x}(t)+\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_1(A+BK)\cdot\\ &\hat{x}(t)+\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_1L_1Ce(t)+\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_1(L_1C-BK)\cdot\\ &\hat{e}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)(A-L_1C)^{\mathrm{T}}Q_1e(t)-\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)(L_1C)^{\mathrm{T}}\cdot\\ &Q_1e(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_1(A-L_1C)e(t)-e^{\mathrm{T}}(t)Q_1L_1\cdot\\ &C\hat{e}(t)+\big(Fw(t)\big)^{\mathrm{T}}Q_1e(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_1Fw(t)\end{aligned} \tag{20}$$

由**引理1**可得：

$$\begin{aligned}&e^{\mathrm{T}}(t)(L_1C)^{\mathrm{T}}P_1\hat{x}(t)+\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_1L_1Ce(t)\leqslant\\ &\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_1L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}P_1\hat{x}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)e(t)\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}&\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)(L_1C-BK)^{\mathrm{T}}P_1\hat{x}(t)+\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_1(L_1C-\\ &BK)\hat{e}(t)\leqslant\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)\Big(P_1L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}P_1+\\ &P_1BK(BK)^{\mathrm{T}}P_1\Big)\hat{x}(t)+2\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)\hat{e}(t)\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}&\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)(-L_1C)^{\mathrm{T}}Q_1e(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_1(-L_1C)\hat{e}(t)\leqslant\\ &e^{\mathrm{T}}(t)Q_1L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}Q_1e(t)+\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)\hat{e}(t)\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}&\big(Fw(t)\big)^{\mathrm{T}}Q_1e(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_1Fw(t)\leqslant\\ &e^{\mathrm{T}}(t)Q_1Q_1e(t)+2e^{\mathrm{T}}(t)N^{\mathrm{T}}N\hat{e}(t)+\\ &2\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)N^{\mathrm{T}}N\hat{x}(t)\end{aligned} \tag{24}$$

由$\hat{e}(t)=\hat{x}(t)-\hat{x}(t_k)$可得：

$$\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)\hat{e}(t)\leqslant\varepsilon^2e^{\mathrm{T}}(t)C^{\mathrm{T}}Ce(t) \tag{25}$$

将式(21)～(25)代入式(20)得到：

$$\dot{V}_1(t)\leqslant\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)\Pi_1\hat{x}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)\Pi_2e(t) \tag{26}$$

其中，

$$\begin{aligned}\Pi_1=&A^{\mathrm{T}}P_1+K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P_1+P_1A+P_1\mathrm{BK}+2N^{\mathrm{T}}N+\\ &2P_1L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}P_1+P_1\mathrm{BK}(\mathrm{BK})^{\mathrm{T}}P_1,\\ \Pi_2=&A^{\mathrm{T}}Q_1-C^{\mathrm{T}}L_1{}^{\mathrm{T}}Q_1+Q_1A-Q_1L_1C+I+\\ &3\varepsilon^2C^{\mathrm{T}}C+Q_1L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}Q_1+Q_1Q_1+2N^{\mathrm{T}}N。\end{aligned}$$

当$\Pi_1<0$且$\Pi_2<0$时，系统在攻击休眠期内稳定。

对于$\Pi_1<0$，由Schur补性质可得：

$$\Gamma_1=\begin{bmatrix}\vartheta_1 & P_1BK\\ * & -I\end{bmatrix}<0 \tag{27}$$

其中，$\vartheta_1=A^{\mathrm{T}}P_1+K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P_1+P_1A+P_1BK+2N^{\mathrm{T}}N+2P_1L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}P_1$。

对式(27)左右同时乘以$\mathrm{diag}\{P^{-1},P^{-1}\}$，可得：

$$\Gamma_2=\begin{bmatrix}\vartheta_2 & \mathrm{BK}P_1{}^{-1}\\ * & -P_1{}^{-1}P_1{}^{-1}\end{bmatrix}<0$$

其中，$\vartheta_2=P_1{}^{-1}A^{\mathrm{T}}+P_1{}^{-1}K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}+AP_1{}^{-1}+BKP_1{}^{-1}+2L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}+2P_1{}^{-1}N^{\mathrm{T}}NP_1{}^{-1}$。

令$P^{-1}=X$，$KX=Y$，有

$$\Gamma_3=\begin{bmatrix}\vartheta_3 & BY\\ * & -XX\end{bmatrix}<0$$

其中，$\vartheta_3=XA^{\mathrm{T}}+Y^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}+AX+BY+2L_1C(L_1C)^{\mathrm{T}}+2XN^{\mathrm{T}}NX$。

由Schur补性质可知，$\Gamma_3<0$等价于：

$$\Gamma_4=\begin{bmatrix}\vartheta_4 & BY & \sqrt{2}L_1C & \sqrt{2}XN^{\mathrm{T}}\\ * & -XX & 0 & 0\\ * & * & -I & 0\\ * & * & * & -I\end{bmatrix}<0$$

其中，$\vartheta_4=XA^{\mathrm{T}}+Y^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}+AX+BY$。

令$\Gamma_4=\Gamma_5+\Gamma_6$，其中，

$$\Gamma_5=\begin{bmatrix}\vartheta_4 & BY & \sqrt{2}L_1C & \sqrt{2}XN^{\mathrm{T}}\\ * & -\delta_1X & 0 & 0\\ * & * & -\delta_2I & 0\\ * & * & * & -\delta_3I\end{bmatrix},$$

$$\Gamma_6=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ * & \delta_1X-XX & 0 & 0\\ * & * & (\delta_2-1)I & 0\\ * & * & * & (\delta_3-1)I\end{bmatrix}。$$

令$Q_1L_1=Z_1$。对于$\Pi_2<0$，由Schur补性质可得：$\Pi_2=\Gamma_7+\Gamma_8<0$

其中，

$$\Gamma_7=\begin{bmatrix}\vartheta_5 & Z_1C & Q_1\\ * & -\delta_4I & 0\\ * & * & -\delta_5I\end{bmatrix},$$

$$\Gamma_8=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ * & (\delta_4-1)I & 0\\ * & * & (\delta_5-1)I\end{bmatrix},$$

$$\vartheta_5=A^{\mathrm{T}}Q_1-C^{\mathrm{T}}Z_1{}^{\mathrm{T}}+Q_1A-Z_1C+I+3\varepsilon^2C^{\mathrm{T}}C+2N^{\mathrm{T}}N。$$

综上所述，$\dot{V}_1(t)<0$等价于$\delta_1I-X<0$，$\Gamma_5<0$，$\Gamma_7<0$，$0<\delta_k<1$，$k=\{2,3,4,5\}$。

3.4.2　DoS攻击活跃期稳定性分析

DoS攻击活跃期的观测器和误差方程分别为

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t)=&A\hat{x}(t)+L_2\big(y(t_k)-\hat{y}(t)\big)=\\ &A\hat{x}(t)-L_2C\hat{e}(t)\end{aligned} \tag{28}$$

$$\dot{e}(t)=Ae(t)+L_2C\hat{e}(t)+Fw(t) \tag{29}$$

下面分析DoS攻击活跃期系统的稳定性。

定理 2 对于闭环系统式(28)、(29),已知参数 $\varepsilon>0$,若存在正定矩阵 $P_2>0$ 和 $Q_2>0$,矩阵 Z_2 和 Z_3,参数 $0<\delta_6<1$,$0<\delta_7<1$,$0<\delta_8<1$,满足以下 LMI:

$$\begin{bmatrix} A^{\mathrm{T}}P_2+P_2A+2N^{\mathrm{T}}N & Z_2C \\ * & -\delta_6 I \end{bmatrix}<0 \tag{30}$$

$$\begin{bmatrix} \vartheta_6 & Z_3C & Q_2 \\ * & -\delta_7 I & 0 \\ * & * & -\delta_8 I \end{bmatrix}<0 \tag{31}$$

其中,$\vartheta_6=A^{\mathrm{T}}Q_2+Q_2A+2\varepsilon^2C^{\mathrm{T}}C+2N^{\mathrm{T}}N$,

那么系统式(28)、(29)渐进稳定。

证明 设计 Lyapunov 函数为

$$V_2(t)=\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_2\hat{x}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_2e(t) \tag{32}$$

对式(32)求导,可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t)=&\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)A^{\mathrm{T}}P_2\hat{x}(t)-\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)(L_2C)^{\mathrm{T}}P_2\hat{x}(t)+\\&\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_2A\hat{x}(t)-\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)P_2L_2C\hat{e}(t)+\\&e^{\mathrm{T}}(t)A^{\mathrm{T}}Q_2e(t)+\hat{e}^{\mathrm{T}}(t)(L_2C)^{\mathrm{T}}Q_2e(t)+\\&e^{\mathrm{T}}(t)Q_2Ae(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_2L_2C\hat{e}(t)+\\&\big(Fw(t)\big)^{\mathrm{T}}Q_2e(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Q_2Fw(t)\end{aligned} \tag{33}$$

由**引理 1** 以及 $\hat{e}(t)=\hat{x}(t)-\hat{x}(t_k)$,可得:

$$\dot{V}_2(t)\leqslant\hat{x}^{\mathrm{T}}(t)\Pi_3\hat{x}(t)+e^{\mathrm{T}}(t)\Pi_4e(t) \tag{34}$$

其中,

$$\Pi_3=A^{\mathrm{T}}P_2+P_2A+P_2L_2C(L_2C)^{\mathrm{T}}P_2+2N^{\mathrm{T}}N,$$

$$\Pi_4=A^{\mathrm{T}}Q_2+Q_2A+Q_2Q_2+2N^{\mathrm{T}}N+Q_2L_2C(L_2C)^{\mathrm{T}}Q_2+2\varepsilon^2C^{\mathrm{T}}C$$

当 $\Pi_3<0$ 且 $\Pi_4<0$ 时,系统式(28)稳定。

令 $P_2L_2=Z_2$,由 Schur 补可得:

$$\Gamma_9=\begin{bmatrix} A^{\mathrm{T}}P_2+P_2A+2N^{\mathrm{T}}N & Z_2C \\ * & -\delta_6 I \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ * & (\delta_6-1)I \end{bmatrix}<0$$

对于 $\Pi_4<0$,令 $Q_2L_2=Z_3$,由 Schur 补可得:

$$\Gamma_{10}=\begin{bmatrix} \vartheta_6 & Z_3C & Q_2 \\ * & -\delta_7 I & 0 \\ * & * & -\delta_8 I \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & (\delta_7-1)I & 0 \\ * & * & (\delta_8-1)I \end{bmatrix}<0$$

其中,$\vartheta_6=A^{\mathrm{T}}Q_2+Q_2A+2\varepsilon^2C^{\mathrm{T}}C+2N^{\mathrm{T}}N$。

3.4.3 切换稳定性分析

系统在 h_n 时刻由休眠期切换到活跃期,在 h_n+d_n 时刻由活跃期切回到休眠期,切换时满足:

$$V_1(h_n^{+})\leqslant\omega_2V_2(h_n^{-}) \tag{35}$$

$$V_2\big((h_n+d_n)^{+}\big)\leqslant\omega_1e^{(\alpha_1+\alpha_2)d_n}V_1\big((h_n+d_n)^{-}\big) \tag{36}$$

式中,ω_1、ω_2 为正实数;α_1 为休眠期的 Lyapunov 函数衰减速率;α_2 为活跃期的 Lyapunov 函数衰减速率;d_n 为活跃期驻留时间;$e^{(\alpha_1+\alpha_2)d_n}$ 为活跃期驻留时间的累积偏差。

休眠期内的 Lyapunov 函数递减,即

$$V_1(t)\leqslant e^{-\alpha_1(t-h_n)}V_1(h_n^{+}) \tag{37}$$

活跃期内的 Lyapunov 函数累积,即

$$V_2(t)\leqslant e^{\alpha_2(t-h_n-d_n)}V_2\big((h_n+d_n)^{+}\big) \tag{38}$$

经过 n 个周期切换后,由式(35)~(38)可得系统的全局稳定条件为

$$V(t)\leqslant\xi e^{-\beta t}V_1(0)$$

$$\xi=\max\left\{\omega_2e^{-\alpha_1d_{\min}},\omega_1^{-1}e^{(\alpha_1+\alpha_2)d_{\max}}\right\}$$

$$\beta=\frac{-\ln(\omega_1\omega_2)-(\alpha_1+\alpha_2)\bar{\tau}+\alpha_1d_{\min}-\alpha_2d_{\max}}{\Gamma}$$

其中,$V_1(0)$ 为系统的初始状态,$\bar{\tau}$ 为系统的平均驻留时间之和,Γ 为系统的驻留时间与切换周期的总和。

在任意一个休眠期内,$V_1(t)$ 满足:

$$V_1(t+\tau)\leqslant e^{-\alpha_1\tau}V_1(h_n^{+})$$

$$V_1(t+\tau_{\min})\leqslant\frac{1}{k_{\min}}V_1(h_n^{+})$$

因此,有

$$\tau_{\min}\geqslant\frac{1}{\alpha_1}\ln k_{\min}$$

同理,有

$$\tau_{\max}\leqslant\frac{1}{\alpha_1}\ln k_{\max}$$

$$d_{\min}\geqslant\frac{1}{\alpha_2}\ln\mu_{\min}$$

$$d_{\max}\leqslant\frac{1}{\alpha_2}\ln\mu_{\max}$$

其中,$\tau_{\min}$、$\tau_{\max}$ 和 $d_{\min}$、$d_{\max}$ 分别为休眠期驻留时间与活跃期驻留时间的最小值与最大值,k、μ 分别为休眠期衰减系数与活跃期增长系数。因此,切换时间 T 满足:

$$T\in\{T_{\min},T_{\max}\}$$

其中,$T_{\min}=\tau_{\min}+d_{\min}$,$T_{\max}=\tau_{\max}+d_{\max}$。

注 3 本文所设计的事件触发机制的触发间隔存在正下界,因此不存在 Zeno 现象。对于本文设计的事件触发机制式(7),已知参数 $\upsilon>0$ 和 $\nu>0$,若

最小触发间隔 $\Delta t_{\min}$ 满足：

$$\Delta t_{\min} \geqslant \frac{1}{\nu}\ln\left(\frac{\upsilon\|\boldsymbol{N}\|}{\upsilon\|\boldsymbol{N}\|-\varepsilon\nu\|\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\|}\right)>0 \quad (39)$$

那么事件触发机制式(7)不存在 Zeno 现象[22]。

注 4　由**假设 1** 和式(7)可得：

$$\|\hat{\boldsymbol{e}}(t)\|=\|\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\hat{\boldsymbol{x}}(t_k)\|\leqslant\int_{t_k}^{t}\|\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(\tau)\|\mathrm{d}\tau\leqslant \int_{t_k}^{t}\|\boldsymbol{N}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(\tau)\|\mathrm{d}\tau \quad (40)$$

当系统稳定时，存在参数 $\upsilon>0$ 和 $\nu>0$，有

$$\|\hat{\boldsymbol{x}}(t)\|\leqslant \upsilon \mathrm{e}^{-\nu t} \quad (41)$$

将式(41)代入式(40)可得：

$$\|\hat{\boldsymbol{e}}(t)\|=\|\hat{\boldsymbol{x}}(t)-\hat{\boldsymbol{x}}(t_k)\|\leqslant\frac{\upsilon\|\boldsymbol{N}\|}{\nu}\left(1-e^{-\nu(t-t_k)}\right)$$

当满足触发条件时，存在

$$\frac{\upsilon\|\boldsymbol{N}\|}{\nu}\left(1-\mathrm{e}^{-\nu\Delta t_{\min}}\right)\geqslant\varepsilon\|\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\| \quad (42)$$

其中，$\Delta t_{\min}=t_{k+1}-t_k$。进一步可得：

$$\Delta t_{\min} \geqslant \frac{1}{\nu}\ln\left(\frac{\upsilon\|\boldsymbol{N}\|}{\upsilon\|\boldsymbol{N}\|-\varepsilon\nu\|\boldsymbol{y}(t)-\hat{\boldsymbol{y}}(t)\|}\right)>0$$

因此，事件触发机制不存在 Zeno 现象。

3　仿真验证

为验证本文所提出控制方案的有效性，本文以 3 个区域互联的电力网络为例进行仿真。区域 1～3 的参数如表 1 所示，事件触发系数 $\varepsilon=0.4$，负荷扰动 $\Delta P_{\mathrm{d1}}=0.1$，$\Delta P_{\mathrm{d2}}=0.2$，$\Delta P_{\mathrm{d3}}=0.2$。假设区域 1 遭受非周期 DoS 攻击。

通过求解**定理 1** 和**定理 2** 得到：

$$\boldsymbol{K}_1=\left[0.341\,2\ \ 0.902\,2\ \ -0.901\,5\ \ 0.203\,3\ \ -0.300\,3\right]$$

$$\boldsymbol{K}_2=\left[0.423\,3\ \ 1.035\,8\ \ -0.833\,9\ \ 0.251\,3\ \ -0.262\,3\right]$$

$$\boldsymbol{K}_3=\left[0.439\,4\ \ 1.163\,3\ \ -0.815\,2\ \ 0.397\,4\ \ -0.228\,4\right]$$

因此，状态反馈控制器为

$$\boldsymbol{u}_1(t)=0.341\,2\Delta\hat{f}_1+0.902\,2\Delta\hat{P}_{\mathrm{m1}}-0.901\,5\Delta\hat{P}_{\mathrm{v1}}+0.203\,3\int A\hat{C}E_1-0.300\,3\Delta\hat{P}_{\mathrm{tie-1}}$$

$$\boldsymbol{u}_2(t)=0.423\,3\Delta\hat{f}_2+1.035\,8\Delta\hat{P}_{\mathrm{m2}}-0.833\,9\Delta\hat{P}_{\mathrm{v2}}+0.251\,3\int A\hat{C}E_2-0.262\,3\Delta\hat{P}_{\mathrm{tie-2}}(t)$$

$$\boldsymbol{u}_3(t)=0.439\,4\Delta\hat{f}_3+1.163\,3\Delta\hat{P}_{\mathrm{m3}}-0.815\,2\Delta\hat{P}_{\mathrm{v3}}+0.397\,4\int A\hat{C}E_3-0.228\,4\Delta\hat{P}_{\mathrm{tie-3}}$$

表 1　区域系统参数

Table 1　Parameters of area systems

区域	T_{chi}	T_{gi}	R_i	β_i	D_i	M_i	T_{ij}
1	0.350	0.08	5.00	0.40	0.02	0.30	0.20
2	0.352	0.08	5.00	0.40	0.01	0.30	0.20
3	0.360	0.08	5.00	0.40	0.02	0.30	0.22

系统仿真结果如图 3～9 所示。图 3 为非周期 DoS 攻击，图 4 为非周期 DoS 攻击下的控制输入 $\boldsymbol{u}(t)$，图 5～9 为状态 $\boldsymbol{x}(t)$，图 10 为事件触发时刻。

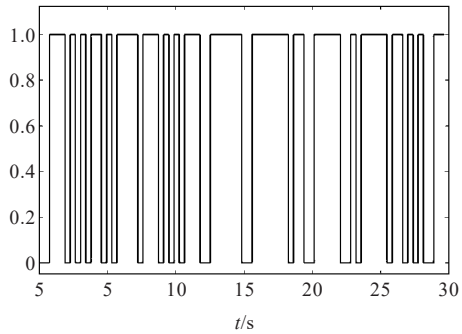

图 3　非周期 DoS 攻击信号

Figure 3　Aperiodic DoS attack signals

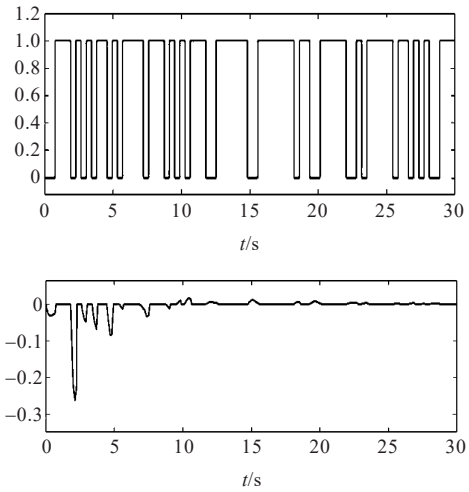

图 4　非周期 DoS 攻击下的控制 $\boldsymbol{u}(t)$

Figure 4　Control $\boldsymbol{u}(t)$ under aperiodic DoS attacks

由图 4 可知，在 DoS 攻击状态下，控制 $\boldsymbol{u}(t)$ 能够抑制 DoS 攻击造成的影响，在 15 s 时实现渐进稳定。

由图 5～9 可知，在控制 $\boldsymbol{u}(t)$ 的作用下，系统各个状态在 15 s 实现渐进稳定。因此，本文所设计的控制器能够有效抑制非周期 DoS 攻击对系统造成的影响，实现系统稳定。由图 10 可知，引入事件触发控制策略可以减少系统的通信次数，节省网络资源且不存在 Zeno 现象。

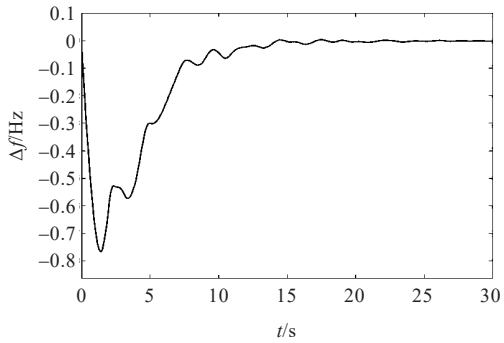

图 5 频率偏差

Figure 5 Frequency deviation

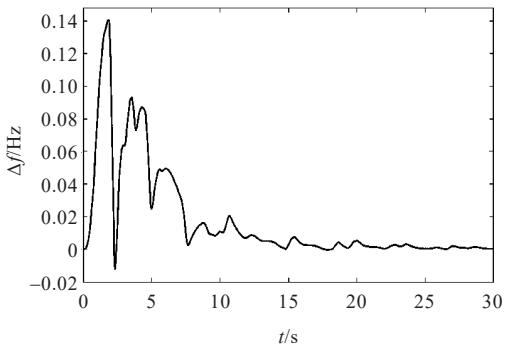

图 6 机械功率输出偏差

Figure 6 Output deviation of mechanical power

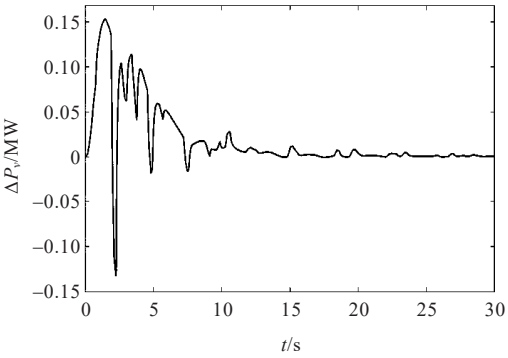

图 7 控制阀门位置偏差

Figure 7 Position deviation of control valve

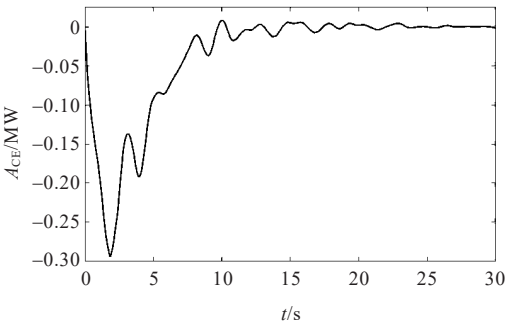

图 8 区域控制偏差

Figure 8 Area control deviation

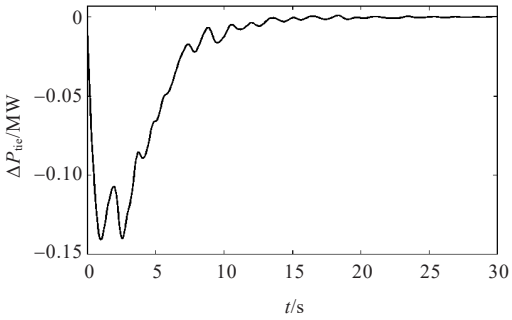

图 9 联络线功率偏差

Figure 9 Power deviation of tie-line

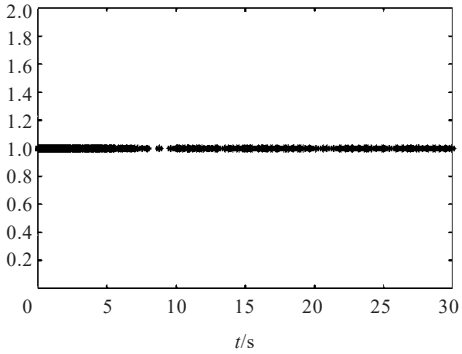

图 10 观测器—控制器通道的触发时刻

Figure 10 Triggered instants of observer-controller channel

4 结语

本文以多区域互联电力系统为研究对象，针对非周期DoS攻击造成的系统频率偏差问题，设计了状态反馈控制器。并基于攻击模型，设计了切换的状态观测器。通过引入事件触发机制，降低系统的通信次数，减少资源消耗。在状态反馈控制下，克服非周期DoS攻击的影响，保证了系统的渐进稳定。

参考文献：

[1] 卢艳杰，刘永慧．基于固定时间滑模的直流微电网系统电压控制[J]．电力科学与技术学报，2023，38(6): 159-166+236.
LU Yanjie, LIU Yonghui. Voltage control of direct-current microgrid system based on fixed-time sliding mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 159-166+236.

[2] 单瑞卿，盛阳，苏盛，等．考虑攻击方身份的电力监控系统网络安全风险分析[J]．电力科学与技术学报，2022，37(5): 3-16.
SHAN Ruiqing, SHENG Yang, SU Sheng, et al. Network security risk analysis of power monitoring system considering attacker's identity[J]. Journal of Electric

Power Science and Technology,2022,37(5): 3-16.

[3] WU T,LIU J,XUE L,et al.Fixed-time synchronization of multilayer complex networks under denial-of-service attacks[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,2023,70(9): 3519-3523.

[4] 周一辰,杨洋,李永刚,等.区域一致趋同的分布式负荷频率控制方法研究[J].智慧电力,2024(3): 80-86+124.
ZHOU Yichen, YANG Yang, LI Yonggang, et al. Distributed load frequency control method in a regionally consistent manner[J]. Smart Power, 2024(3): 80-86+124.

[5] 常梦言,刘永慧.虚假数据注入攻击下基于容积卡尔曼滤波的电力系统状态估计[J].电力科学与技术学报,2024,39(3): 10-18.
CHANG Mengyan, LIU Yonghui. Power system state estimation based on volume Kalman filter under false data injection attack[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(3): 10-18.

[6] ABAZARI A,ZADSAR M,GHAFOURI M,et al.A data mining/ANFIS and adaptive control for detection and mitigation of attacks on DC MGs[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2023,14(3): 2406-2422.

[7] 高强,杜子钰,吉月辉,等.拒绝服务攻击下互联多区域电网系统的弹性负载频率控制[J].电力建设,2023,44(4): 54-62.
GAO Qiang, DU Ziyu, JI Yuehui, et al. Resilient load frequency control for multi-area interconnected power system under denial-of-service attacks[J].Electric Power Construction,2023,44(4): 54-62.

[8] 汪慕峰,胥布工.DoS干扰攻击下的信息物理系统状态反馈稳定[J].控制与决策,2019,34(8): 1681-1687.
WANG Mufeng,XU Bugong.State feedback stabilization of cyber-physical system under DoS jamming attacks[J]. Control and Decision,2019,34(8): 1681-1687.

[9] HU S L, GE X H, LI Y, et al. Resilient load frequency control of multi-area power systems under DoS attacks [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security,2023,18: 936-947.

[10] 赵阳阳.周期性DoS攻击下的信息物理系统鲁棒滑模控制研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.
ZHAO Yangyang. Research on robust sliding mode control of cyber-physical systems under periodic DoS attacks[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology,2023.

[11] 万里.拒绝服务攻击下的多区域电力系统负荷频率控制研究[D].重庆: 西南大学,2023.
WAN Li. Research on load frequency control of multi-area power systems under denial-of-service attacks[D]. Chongqing: Southwest University,2023.

[12] LU K D, WU Z G. Resilient event-triggered load frequency control for cyber-physical power systems under DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2023,38(6): 5302-5313.

[13] LU A Y,YANG G H.Input-to-state stabilizing control for cyber-physical systems with multiple transmission channels under denial of service[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2018,63(6): 1813-1820.

[14] 马永胜,车伟伟,邓超.拒绝服务攻击下直流微电网的事件触发控制[J].控制理论与应用,2022,39(10): 1907-1914.
MA Yongsheng, CHE Weiwei, DENG Chao. Event-triggered control of DC microgrid under denial of service attack[J].Control Theory & Applications,2022,39 (10): 1907-1914.

[15] 王敏,黄龙旺,杨辰光.基于事件触发的离散MIMO系统自适应评判容错控制[J].自动化学报,2022,48(5): 1234-1245.
WANG Min, HUANG Longwang, YANG Chenguang. Event-triggered adaptive evaluation fault-tolerant control for discrete MIMO systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2022,48(5): 1234-1245.

[16] HUANG L,GUO J,LI B.Observer-based dynamic event-triggered robust H∞ control of networked control systems under DoS attacks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 145626-145637.

[17] WANG Y C,WANG Z Y,GAN J,et al.Switched observer-based adaptive event-triggered load frequency control for networked power systems under aperiodic DoS attacks[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2023,14(6): 4816-4826.

[18] QIAO S W,LIU X H,LIANG Y R,et al.Event-triggered sliding mode load frequency control of multiarea power systems under periodic denial-of-service attacks[J].IEEE Systems Journal,2023,17(2): 2803-2814.

[19] LIU G P, PARK J H, HUA C C, et al. Hybrid dynamic event-triggered load frequency control for power systems with unreliable transmission networks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2023,53(2): 806-817.

[20] VAFAMAND N, AREFI M M, ASEMANI M H, et al. Decentralized robust disturbance-observer based LFC of interconnected systems[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,69(5): 4814-4823.

[21 VAFAMAND N, AREFI M M, ASEMANI M H, et al. Decentralized robust disturbance-observer based LFC of interconnected systems[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2022,69(5): 4814-4823.

[22] 赵阳阳,陈志鹏,卢世堃.周期性拒绝服务攻击下基于状态观测器的事件触发滑模控制研究[J].信息技术与信息化,2023(8): 126-129.
ZHAO Yangyang, CHEN Zhipeng, LU Shikun. Research on event-triggered sliding mode control based on state observer under periodic denial of service attack[J]. Information Technology & Informatization, 2023(8): 126-129.