

基于事件触发和欺骗攻击的电力系统负荷频率控制

季博威, 张 笑, 严 沈, 顾 洲

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘 要: 随着网络化电力系统复杂程度越来越高,传统的控制方案很难满足实际需求,带宽受限、网络安全,以及执行器饱和等问题成为影响电力系统稳定性的重要因素。针对带宽资源受限问题,引入改进的事件触发机制以提高带宽资源的利用率;同时,构造欺骗攻击和执行器饱和下的电力系统新的数学模型;基于该系统模型,根据Lyapunov理论推导出电力系统稳定的充分条件,并利用线性矩阵不等式(LMI)技术,给出安全控制器的设计方案;最后,通过一个电力系统实例来说明所提方案的有效性。

关键词: 网络控制系统; 自适应事件触发机制; 网络攻击; 执行器饱和

中图分类号: TM761

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1672-6952.2022.04.014

Event-Triggered and Deception Attack-Based Load Frequency Control for Power Systems

Ji Bowei, Zhang Xiao, Yan Shen, Gu Zhou

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China)

Abstract: With the increasing complexity of networked power systems, traditional control schemes are difficult to meet the actual needs. Bandwidth constraints, network security and actuator saturation have become important factors affecting the stability of power systems. An improved event trigger mechanism was introduced to improve the utilization rate of bandwidth resources for the problem of bandwidth resource limitation, and a new mathematical model of power system under deception attack and actuator saturation was constructed. Based on this number model, the sufficient conditions for the asymptotic stability of the power system were obtained by Lyapunov theory, and the design scheme of the security controller was given by using linear matrix inequality technique. Finally, an example of power system was given to illustrate the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: Network control systems; Adaptive event triggering mechanism; Network attacks; Actuator saturation

负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)是电力系统的核心组成之一^[1]。频率作为衡量电力系统输出电能质量的重要指标,如果大幅波动将对电力系统中的发电设备和用电设备造成冲击,严重时导致电力系统设备瘫痪^[2]。发电机组输出功率和系统负荷共同决定系统的频率^[3]。传统的LFC技术通常采用专线通信方式传输数据,维护成本高,灵活性差^[4]。电力系统技术的进一步发展需要新的网络通信架构来支持控制过程日益增长的分散特性,这种需求使传统专用通信方式逐渐被开放网络取代^[5]。

然而,网络带宽、网络安全以及执行器饱和等问题仍然影响电力系统的稳定性。因此,电力系统负荷频率控制研究对网络化电力系统技术的发展具有重要意义。由于网络自身物理局限性,使带宽资源受限成为网络化电力系统的研究热点^[6]。近些年事件触发技术得到广泛应用,常见的事件触发有自触发、动态触发、离散触发等。文献[7]首次研究了一种与离散系统状态相关的事件触发机制,该触发机制主要通过判断事先

收稿日期:2022-06-11 **修回日期:**2022-07-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(6210021545)。

作者简介:季博威(1998-),男,硕士研究生,从事事件触发控制等方面研究;E-mail:13776623853@163.com。

通信联系人:顾洲(1973-),男,博士,教授,博士生导师,从事网络控制、分布式复杂动态系统控制等方面研究;E-mail:gzh1808@163.com。

的条件是否被满足以决定当下采样数据是否需要传输,结果表明该触发机制可有效缓解带宽压力。文献[8]提出了一种新的随机非线性网络串级控制系统的事件触发方案。文献[9]研究了基于神经网络的分散事件触发控制问题。文献[10]研究了具有混合触发机制和网络攻击的系统控制器设计问题。上述研究的确可以很好地缓解带宽压力问题,然而在实际复杂的网络化电力系统中触发阈值很难设定,因此如何开发一种阈值可动态调节的触发机制,进一步减少冗余信号的触发具有重要意义。

网络通信技术的引入使LFC电力系统在面对网络攻击时更加脆弱,常见的网络攻击主要包括拒绝服务(DoS)攻击和欺骗攻击。DoS攻击通过占用通信信道来影响控制信号的传输,从而降低系统的稳定性能;欺骗攻击是最难检测的网络攻击手段之一,主要通过篡改通信网络中真实数据的方式来破坏系统。文献[11]研究了一类随机线性系统的攻击调度问题。文献[12]研究了受欺骗攻击影响的基于混合驱动神经网络系统滤波器设计问题。因此,如何建立网络攻击相关的电力系统模型以及怎样设计有效的安全控制器是具有实际意义的问题。

控制信号的传输需要依赖一系列物理设备完成,物理器件的老化饱和问题不可避免。其中,执行器饱和问题成了影响电力系统运行的重要因素之一^[13]。文献[14]研究了基于驱动器饱和的网络级联控制系统的混合驱动控制问题。文献[15]研究了基于T-S模糊系统的输出反馈鲁棒稳定性问题。文献[16]将饱和问题与事件触发机制结合,设计了一种基于事件触发机制的输出反馈控制器,有效地抑制了执行器饱和对系统的影响。然而,将欺骗攻击和执行器饱和同时考虑到LFC电力系统有待进一步研究。

因此,本文重点研究了网络攻击和执行器饱和下LFC电力系统的安全控制器设计问题。首先,给出一个自适应事件触发方案以节约网络通信资源,缓解了带宽负担。其次,考虑网络安全和执行器饱和的影响,构造了欺骗攻击和执行器饱和相关的LFC电力系统模型。最后,基于该模型利用李雅普诺夫稳定理论分析LFC电力系统的稳定性,给出具有较小保守性的稳定准则,同时由线性矩阵不等式技术得到控制器设计的具体方案。

1 系统模型

1.1 系统描述

基于自适应事件触发机制的电力系统结构如图1所示。图中, $\Delta f(s)$ 为频率偏差; $\Delta H_v(s)$ 为调节阀位置偏差; $\Delta H_m(s)$ 为机械输出偏差; $\Delta H_d(s)$ 为负荷扰动偏差; M 为转动惯量; T_{ch} 为汽轮机时间常数; E 为发电机阻尼系数; T_g 为调速器时间常数; J 为速度下降系数; μ 为频率偏差因子; ACE 为频率偏差因子; u 为控制率; K_p 为控制器比例系数; K_i 为控制器积分系数; S 为拉普拉斯算子。

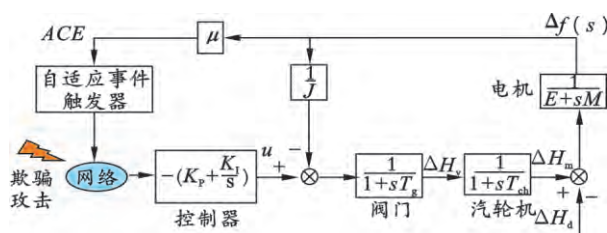


图1 基于自适应事件触发机制的电力系统结构

可推导出该电力系统模型:

$$\begin{cases} \Delta f(s) = \frac{\Delta H_m(s) - \Delta H_d(s)}{sM + E} \\ \Delta H_m(s) = \frac{\Delta H_v(s)}{1 + sT_{ch}} \\ \Delta H_v(s) = \frac{u(s) - \frac{1}{J}\Delta f(s)}{1 + sT_g} \\ ACE(s) = \mu\Delta f(s) \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行拉普拉斯逆变换,可得LFC电力系统动态模型:

$$\begin{cases} \Delta \dot{f}(t) = \frac{\Delta H_m(t) - \Delta H_d(t) - E \Delta f(t)}{M} \\ \Delta \dot{H}_m(t) = \frac{\Delta H_v(t) - \Delta H_m(t)}{T_{ch}} \\ \Delta \dot{H}_v(t) = \frac{u(t) - \frac{1}{J} \Delta f(t) - \Delta H_v(t)}{T_g} \end{cases} \quad (2)$$

式中, t 为关于时间的函数。

根据式(1)和式(2), 得出电力系统负荷频率控制状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + F\omega(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\hat{x}(t)$ 为包括频率偏差、机械输出偏差以及调节阀位置偏差状态, $\hat{x}(t) = [\Delta f(t) \ \Delta H_m(t) \ \Delta H_v(t)]^T$; $\hat{y}(t)$ 为系统的测量输出向量, $\hat{y}(t) = ACE(t)$; $u(t)$ 为该系统控制输入向量; $ACE(t) = \mu \Delta f(t)$; $\omega(t)$ 表示系统外

部扰动, $\omega(t) = \Delta H_d(t)$; A 、 B 、 C 、 F 分别为具有合适维度的实数矩阵, $A = \begin{bmatrix} -\frac{E}{M} & \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{ch}} & \frac{1}{T_{ch}} \\ -\frac{1}{RT_g} & 0 & -\frac{1}{T_g} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} \mu \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $F = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

1.2 自适应事件触发机制

为了节约带宽资源, 将事件触发通信方案与被控系统建立联系, 给出一个在统一框架下完整的电力系统闭环控制模型。电力系统负荷频率控制输出可以表示为:

$$u(t) = -K_P ACE(t) - K_I \int_0^t ACE(s) ds \quad (4)$$

将上述比例积分控制形式转化为输出反馈问题。重新定义新输出变量为: $y(t) = [ACE(t) \ \int_0^t ACE(s) ds]^T$ 。

定义 $K = [K_P \ K_I]$, 因此等式(4)可以被写为:

$$u(t) = -Ky(t) \quad (5)$$

当触发条件被满足时, 当前采样信号被传输到控制单元。为了在保障 LFC 电力系统性能的前提下尽可能节约带宽资源, 提高资源利用率, 提出一个自适应事件触发机制, 其触发条件为:

$$t_{k+1}h = t_kh + \min_{l \in N} \{lh | q^T(i_lh) \Phi q(i_lh) > \sigma(t) y^T(t_kh) \Phi y(t_kh)\} \quad (6)$$

式中, Φ 为正定对称矩阵; h 为采样周期; t_kh 为数据释放时刻; $\sigma(t) \in [0, 1]$ 。

$$q(i_lh) = y(i_lh) - y(t_kh) \quad (7)$$

式中, $q(i_lh)$ 为当前采样数据与最新被触发数据值之间的误差; $i_lh = lh + t_kh$, $l \in N$, $i_lh \in (t_k, t_{k+1}]$, $t_k > 0$ 且满足 $\{t_0, t_1, t_2, \dots\} \subset \{0, 1, 2, \dots\}$, 当采样数据满足条件(6)时, 该数据会通过网络被传输到控制单元。值得注意的是, $\sigma(t)$ 是一个与系统状态相关的函数, 即:

$$\sigma(t) = \alpha e^{-\tau \|y(i_lh)\|} \quad \alpha \in (0, 1) \quad (8)$$

式中, α 为自适应律的上界, $\tau > 0$ 。

触发方案(6)不同于常规固定阈值触发方案, 其可以根据当前系统状态和最新触发数据实时调整触发阈值, 进而根据系统实际情况调节控制信号的传输率。当系统采样状态抖动剧烈时, 事件触发机制将降低阈值以提高的信号传输率。相反, 当系统趋于稳定时, $\sigma(t)$ 将会调整为较大值以减少冗余控制信号的触发。

综合以上分析,经过自适应事件触发机制后的系统输出测量值可以表示为:

$$\mathbf{y}(t_k h) = \mathbf{y}(i_l h) - \mathbf{q}(i_l h) \quad (9)$$

欺骗攻击是网络攻击中最难预防的攻击手段之一,攻击者通过利用虚假信号篡改真实控制信号的方式威胁系统,给电力系统的维护带来困难。本文主要考虑网络通讯中可能存在的欺骗攻击。为了便于分析,引入伯努利变量 $\beta(t)$,该变量满足 $\mathbb{E}\{\beta(t)\} = \bar{\beta}$ 和 $\mathbb{E}\{[\beta(t) - \bar{\beta}]^2\} = \rho^2$,因此考虑欺骗攻击下的电力系统测量输出可以表示为:

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \beta(t)f[\mathbf{y}(t)] + [1 - \beta(t)]\mathbf{y}(t_k h) \quad (10)$$

式中,非线性函数 $f[\mathbf{y}(t)]$ 为欺骗攻击模型,并且满足:

$$\|f[\mathbf{y}(t)]\|^2 \leq \|G\mathbf{y}(t)\|^2 \quad (11)$$

式中, G 为具有适当维数的矩阵。

随机变量 $\beta(t) \in \{0, 1\}$,当 $\beta(t) = 1$ 时,真实的输出值完全被攻击信号取代;当 $\beta(t) = 0$ 时,真实测量输出值将被传输到控制单元。

因此,考虑网络攻击下的LFC电力系统测量输出可以表示为:

$$\tilde{\mathbf{u}}(t) = -K\hat{\mathbf{y}}(t) \quad (12)$$

为了便于描述执行器饱和现象,本文引入饱和函数,该函数被定义为:

$$\text{sat}(u) \triangleq \begin{cases} vu > v \\ u - v \leq u \leq v \\ -vu < -v \end{cases} \quad (13)$$

受执行器饱和影响下的系统输入可以表示为:

$$\text{sat}[\tilde{\mathbf{u}}(t)] = \tilde{\mathbf{u}}(t) - \mathbf{h}[\tilde{\mathbf{u}}(t)] \quad (14)$$

式中, $\mathbf{h}[\tilde{\mathbf{u}}(t)]$ 为死区非线性函数,同时存在 $\epsilon \in (0, 1)$ 满足以下不等式条件:

$$\epsilon \tilde{\mathbf{u}}^T(t) \tilde{\mathbf{u}}(t) \geq \mathbf{h}^T[\tilde{\mathbf{u}}(t)] \mathbf{h}[\tilde{\mathbf{u}}(t)] \quad (15)$$

结合式(13)–(14),LFC电力系统控制输入可以表示为:

$$\mathbf{u}(t) = -\beta(t)Kf[\mathbf{y}(t)] - [1 - \beta(t)]K\mathbf{C}x(i_l h) + [1 - \beta(t)]K\mathbf{q}(i_l h) - \mathbf{h}[\tilde{\mathbf{u}}(t)]$$

1.3 LFC电力系统闭环控制模型

由于事件触发条件的存在,当采样数据违反触发条件(16)时才被触发,假设该状态会被保持直到下一个数据被成功触发。为了便于分析,将区间 $\Pi = [t_k h + \eta_{t_k}, t_{k+1} h + \eta_{t_{k+1}})$ 划分为 $\tau + 1$ 个子区间,其中 η_{t_k} 表示数据传输过程中在 $t_k h$ 时刻产生的延时,显然 $\tau = t_{k+1} - t_k - 1$,整个区间(Π)可表示为:

$$\Pi = \bigcup_{l=0}^{\tau} \Pi_l \quad (16)$$

式中, $\Pi_l = [t_k h + lh + \vartheta, t_{k+1} h + lh + h + \vartheta)$, $\vartheta = \begin{cases} \eta_{t_k} & l = 0, 1, \dots, \tau - 1 \\ \eta_{t_{k+1}} & l = \tau \end{cases}$ 。

定义 $\eta(t) \triangleq t - i_l h$, 当 $t \in \Pi_l$ 时, $i_l h = t_k h + lh$, $0 \leq \eta_{t_k} \leq \eta(t) \leq \eta_M = \bar{\eta}$, 其中 $\eta_M = h + \max\{\eta_{t_k}, \eta_{t_{k+1}}\}$ 。因此,得出欺骗攻击和执行器饱和下的LFC电力系统模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) - [1 - \beta(t)]BK\mathbf{C}x[t - \eta(t)] + [1 - \beta(t)]BKx[t - \eta(t)] + F\omega(t) - BK\beta(t)f[\mathbf{y}(t)] - B\mathbf{h}[\mathbf{u}(t)] \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}x(t) \quad t \in \Pi_l \end{cases} \quad (17)$$

本文的主要目的是为欺骗攻击和执行器饱和影响下的LFC电力系统设计一个基于自适应事件触发机制的输出反馈控制器,同时满足当 $\omega(t) = 0$ 时,系统(17)是渐近稳定的;在初始状态下, $\omega(t) \in \mathcal{L}_2[0, +\infty)$ 及 $\gamma > 0$ 时, $\mathbb{E}\{\|\mathbf{y}(t)\|\} \leq \mathbb{E}\{\gamma\|\omega(t)\|\}$ 成立。

引理 1 假设存在 $0 < \eta(t) \leq \bar{\eta}$ 以及一个正定对称矩阵 $R \in \mathbb{R}$ 满足条件 $\begin{bmatrix} R & U^T \\ U & R \end{bmatrix} > 0$, 则有以下不等式

成立: $-\bar{\eta} \int_{t-\bar{\eta}}^t \dot{x}^T(v) R \dot{x}(v) dv \leq -\begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R & U^T \\ U & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \end{bmatrix}$, 其中 $\mathbf{h}_1 = x(t) - x[t - \eta(t)]$, $\mathbf{h}_2 = x[t - \eta(t)] -$

$x(t-\bar{\eta})$ 。

2 稳定性分析

根据 Lyapunov 理论得出 LFC 电力系统渐近稳定的充分条件, 为控制方案的设计提供重要前提。

定理 1 对于给定的正常数 $\bar{\eta}, \gamma, \alpha, \epsilon, \bar{\beta}, \rho$, 如果存在矩阵 $P > 0, P_2 > 0, R > 0, Q > 0, W > 0$ 以及适当维数矩阵 U 满足以下条件:

$$\begin{bmatrix} R & U^T \\ U & R \end{bmatrix} > 0 \quad (18)$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & * & * & * & * & * & * & * & * \\ \Xi_{21} & \Xi_{22} & * & * & * & * & * & * & * \\ \Xi_{31} & 0 & -\frac{1}{\epsilon} I & * & * & * & * & * & * \\ \Xi_{41} & -\bar{\eta}\bar{\beta}RBK & -\bar{\eta}RB & -R & * & * & * & * & * \\ \Xi_{51} & -\bar{\eta}\bar{\beta}WBK & -\bar{\eta}WB & 0 & -W & * & * & * & * \\ \Xi_{61} & \bar{\eta}\rho RBK & 0 & 0 & 0 & -R & * & * & * \\ \Xi_{71} & \bar{\eta}\rho WBK & 0 & 0 & 0 & 0 & -W & * & * \\ \Xi_{81} & \Xi_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi_{88} & * \\ \Xi_{91} & \Xi_{92} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

式中, I 为适当维数单位矩阵; $*$ 为基于李雅普诺夫方程推导得到的条件矩阵; $\Xi_{21} = [-\bar{\beta}K^T B^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; $\Xi_{22} = -P_2$; $\Xi_{31} = [-B^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; $\Xi_{41} = \bar{\eta}R\mathbf{T}_1$; $\Xi_{51} = \bar{\eta}W\mathbf{T}_1$; $\mathbf{T}_1 = [A \ (\bar{\beta}-1)BKC \ 0 \ (1-\bar{\beta})BK \ F]$; $\Xi_{61} = \bar{\eta}\rho R\mathbf{T}_2$; $\Xi_{71} = \bar{\eta}\rho W\mathbf{T}_2$; $\mathbf{T}_2 = [0 \ -BKC \ 0 \ BK \ 0]$; $\Xi_{81} = [0 \ KC \ 0 \ -K \ 0]$; $\Xi_{82} = -K$; $\Xi_{88} = -\frac{1}{\rho^2}I$; $\Xi_{91} = [0 \ (\bar{\beta}-1)KC \ 0 \ (1-\bar{\beta})K \ 0]$; $\Xi_{92} = -\bar{\beta}K$;

$$\Xi_{11} = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & * & * & * & * \\ (\bar{\beta}-1)C^T K^T B^T + R - U + \frac{\pi^2}{4}W & \Psi_{22} & * & * & * \\ U & R - U & -Q - R & * & * \\ (1-\bar{\beta})K^T B^T P & -\alpha\Phi C & 0 & -\Phi + \alpha\Phi & * \\ F^T P & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I_0 \end{bmatrix},$$

其中 $\Psi_{11} = \Psi_{11}^1 + \Psi_{11}^2$; $\Psi_{11}^1 = A^T + A + Q - R - \frac{\pi^2}{4}W$; $\Psi_{11}^2 = C^T C + C^T G_2^T G C$; $\Psi_{22} = U + U^T - 2R - \frac{\pi^2}{4}W + \alpha C^T \Phi C$ 。

则电力系统渐近稳定且具有范数界 γ 。

证明 构造 Lyapunov 函数为: $V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)$, 其中 $V_1(t) = x^T(t)Px(t) + \int_{t-\bar{\eta}}^t x^T(s)Qx(s)ds$, $V_2(t) = \bar{\eta} \int_{t-\bar{\eta}}^t \int_s^t \dot{x}^T(v)R\dot{x}(v)dvds$, $V_3(t) = \bar{\eta}^2 \int_{t-\eta(t)}^t \dot{x}^T(s)W\dot{x}(s)ds - \frac{\pi^2}{4} \int_{t-\eta(t)}^t \{x(s) - x[t-\eta(t)]\}^T W \{x(s) - x[t-\eta(t)]\} ds$ 。

对 $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$ 、 $V_3(t)$ 求导, 并且求数学期望可得:

$$\mathbb{E}\{\dot{V}_1(t)\} = 2x^T(t)\Lambda_1 + x^T(t)Qx(t) - x^T(t-\bar{\eta})Qx(t-\bar{\eta}) \quad (20)$$

$$\mathbb{E}\{\dot{V}_2(t)\} = \mathbb{E}\{\bar{\eta}^2 \dot{x}^T(t)R\dot{x}(t)\} - \bar{\eta} \int_{t-\bar{\eta}}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds \quad (21)$$

$$\mathbb{E}\{\dot{V}_3(t)\} = \mathbb{E}\{\bar{\eta}^2 \dot{x}^T(t)W\dot{x}(t)\} - \frac{\pi^2}{4} \{x(t) - x[t-\eta(t)]\}^T W \{x(t) - x[t-\eta(t)]\} \quad (22)$$

式中, $\mathbb{E}\{\bar{\eta}^2 \dot{x}^T(t)R\dot{x}(t)\} = \bar{\eta}^2 \Lambda_1^T R \Lambda_1 + \bar{\eta}^2 \rho^2 \Lambda_2^T R \Lambda_2$; $\mathbb{E}\{\bar{\eta}^2 \dot{x}^T(t)W\dot{x}(t)\} = \bar{\eta}^2 \Lambda_1^T W \Lambda_1 + \bar{\eta}^2 \rho^2 \Lambda_2^T W \Lambda_2$; $\Lambda_1 = Ax(t) - (1-\bar{\beta})BKCx[t-\eta(t)] + (1-\bar{\beta})BKe[t-\eta(t)] + F\omega(t) - \bar{\beta}BKf[y(t)] - B\tilde{h}[\tilde{u}(t)]$; $\Lambda_2 =$

$$BK e[t-\eta(t)]-BK C x[t-\eta(t)]+BK f[y(t)].$$

根据事件触发条件(16)可知存在下列不等式为:

$$\sigma(t) \mathbf{y}^T(t_k h) \Phi \mathbf{y}(t_k h) - e[t-\eta(t)] \Phi e[t-\eta(t)] \geq 0 \quad (23)$$

考虑欺骗攻击条件为:

$$\mathbf{y}^T(t) \mathbf{G}_2^T \mathbf{G} \mathbf{y}(t) - f^T[\mathbf{y}(t)] f[\mathbf{y}(t)] \geq 0 \quad (24)$$

由执行器饱和限制条件(15)可得:

$$\bar{\mathbf{u}}^T(t) \bar{\mathbf{u}}(t) - \bar{\mathbf{h}}^T[\bar{\mathbf{u}}(t)] \bar{\mathbf{h}}[\bar{\mathbf{u}}(t)] \geq 0 \quad (25)$$

式中, $\bar{\mathbf{u}}(t) = [\beta(t) - \bar{\beta}] B_1 + B_2$, 其中 $B_1 = K C x[t-\eta(t)] - K \varrho[t-\eta(t)] - K f[y(t)]$, $B_2 = -(1 - \bar{\beta}) K C x[t-\eta(t)] + (1 - \bar{\beta}) K \varrho[t-\eta(t)] - \bar{\beta} K f[y(t)]$ 。

根据上述分析可知:

$$\mathbb{E}\{\bar{\mathbf{u}}^T(t) \bar{\mathbf{u}}(t)\} = \rho^2 B_1^T B_1 + B_2^T B_2 \quad (26)$$

结合式(18)–(25), 使用 Jensen 不等式方法可以处理式(21)中的一重积分项 $-\bar{\eta} \int_{t-\bar{\eta}}^t \dot{x}^T(v) R \dot{x}(v) dv \leq -\begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R & U^T \\ U & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \end{bmatrix}$, 其中 $\ell_1 = x(t) - x[t-\eta(t)]$, $\ell_2 = x[t-\eta(t)] - x(t-\bar{\eta})$ 。

利用 Schur 补引理可以推导出如下结论:

$$\mathbb{E}\{\dot{V}(t)\} + \Omega(t) \leq \Psi^T(t) \Xi \Psi(t) \quad (27)$$

式中, $\Psi^T(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & x^T[t-\eta(t)] & x^T(t-\bar{\eta}) & \varrho^T[t-\eta(t)] & \omega^T(t) & f^T[y(t)] & \bar{\mathbf{h}}^T[\bar{\mathbf{u}}(t)] \end{bmatrix}$;

$\Omega(t) = \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t)$ 。

条件(18)和条件(19)是保证 $\Psi^T(t) \Xi \Psi(t) \leq 0$ 成立的充分条件, 因此有:

$$\mathbb{E}\{\dot{V}(t)\} + \Omega(t) < 0 \quad (28)$$

又因为 $\dot{V}(t)$ 在 t 上是连续的, 对 $\dot{V}(t)$ 从 0 到 $+\infty$ 进行积分计算可得:

$$\mathbb{E}\{V(+\infty)\} - V(0) + \int_0^{+\infty} \Omega(t) dt < 0 \quad (29)$$

因此, 在零初始条件下有 $\int_0^{+\infty} \mathbf{y}^T(t) \mathbf{y}(t) dt < \int_0^{+\infty} \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) dt$ 。

综上所述, 当 $\omega(t) \neq 0$ 时, 有 $\|\mathbf{y}(t)\| \leq \gamma \|\omega(t)\|$ 成立, 当 $\omega(t) = 0$ 时系统渐近稳定, 证明结束。

3 控制器设计

在定理 1 中, 给出了保证电力系统稳定性的充分条件, 本节中给出了执行器饱和以及网络攻击下电力系统输出反馈控制器设计方案。

定理 2 对于给定的正参数 γ 、 $\bar{\eta}$ 、 $\bar{\beta}$ 、 ρ 、 κ 、 α , 如果存在矩阵 $X > 0$ 、 $\tilde{Q} > 0$ 、 $\tilde{W} > 0$ 、 $\tilde{R} > 0$ 、 $L > 0$ 以及合适维数矩阵 $\tilde{U}$ 、 N , 使下列线性矩阵成立, 则该 LFC 电力系统具有范数界 γ 稳定性, 且该反馈控制器增益为 $K = NL^{-1}$ 。

$$CX = LC \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{R} & \tilde{U}^T \\ \tilde{U} & \tilde{R} \end{bmatrix} > 0 \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & * & * & * & * \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & * & * & * \\ \Theta_{31} & 0 & \Theta_{33} & * & * \\ \Theta_{41} & 0 & 0 & \Theta_{44} & * \\ \Theta_{51} & 0 & 0 & 0 & \Theta_{55} \end{bmatrix} < 0 \quad (32)$$

式中,

$$\Theta_{11} = \begin{bmatrix} \tilde{\Xi}_{11} & * & * & * & * & * & * \\ \tilde{\Xi}_{21} & \tilde{\Xi}_{22} & * & * & * & * & * \\ \tilde{U} & \tilde{R} - \tilde{U} & -\tilde{Q} - \tilde{R} & * & * & * & * \\ (1 - \bar{\beta})N^T B^T & -\alpha\tilde{\Phi}C & 0 & -\tilde{\Phi} + \alpha\tilde{\Phi} & * & * & * \\ F^T & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * \\ -\bar{\beta}N^T B^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -L & * \\ -B^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\epsilon}I \end{bmatrix}; \tilde{\Xi}_{11} = XA^T + AX + \tilde{Q} - \tilde{R} - \frac{\pi^2}{4}\tilde{W}; \tilde{\Xi}_{21} = (\bar{\beta} - 1)C^T N^T B^T + \tilde{R} - \tilde{U} + \frac{\pi^2}{4}\tilde{W}; \tilde{\Xi}_{22} = -2\tilde{R} + \tilde{U} + \tilde{U}^T - \frac{\pi^2}{4}\tilde{W} + \alpha C^T \tilde{\Phi} C; \Theta_{22} = \text{diag}\{\zeta_0^2 R - 2\zeta_0 X, \zeta_1^2 W - 2\zeta_1 X\}; \Theta_{21} = \begin{bmatrix} \bar{\eta}AX & -\bar{\eta}(1 - \bar{\beta})BNC & 0 & \bar{\eta}(1 - \bar{\beta})BN & \bar{\eta}F & -\bar{\eta}\bar{\beta}BN & -\bar{\eta}B \\ \bar{\eta}AX & -\bar{\eta}(1 - \bar{\beta})BNC & 0 & \bar{\eta}(1 - \bar{\beta})BN & \bar{\eta}F & -\bar{\eta}\bar{\beta}BN & -\bar{\eta}B \end{bmatrix}; \Theta_{31} = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\eta}\rho BNC & 0 & \bar{\eta}\rho BN & 0 & \bar{\eta}\rho BN & 0 \\ 0 & -\bar{\eta}\rho BNC & 0 & \bar{\eta}\rho BN & 0 & \bar{\eta}\rho BN & 0 \end{bmatrix}; \Theta_{33} = \text{diag}\{\zeta_2^2 R - 2\zeta_2 X, \zeta_3^2 W - 2\zeta_3 X\}; \Theta_{44} = \text{diag}\left\{-\frac{1}{\rho^2}I, -I\right\}; \Theta_{41} = \begin{bmatrix} 0 & NC & 0 & -N & 0 & -N & 0 \\ 0 & (\bar{\beta} - 1)NC & 0 & (1 - \bar{\beta})N & 0 & -\bar{\beta}N & 0 \end{bmatrix}; \Theta_{51} = \begin{bmatrix} GMC & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ MC & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \Theta_{55} = \text{diag}\{-L, -I\}。$$

则该 LFC 电力系统控制器增益可以由 $K = NL^{-1}$ 求得。

证明 定义 $X = P^{-1}$, $\tilde{U} = XUX$, $KL = N$, $\tilde{R} = XRX$, $L = P_2^{-1}$, $\tilde{Q} = XQX$, $\tilde{W} = XWX > 0$,

$\tilde{\Phi} = L\Phi L$ 。利用对角阵 $\{X, X\}$ 对式 (18) 左乘和右乘得到式 (31) 成立, 利用对角阵 $\{X, X, X, L, I, L, I, R^{-1}, W^{-1}, R^{-1}, W^{-1}, I, I\}$ 对式 (19) 进行左乘和右乘, 可得:

$$\tilde{\Xi} < 0 \quad (33)$$

式 (33) 中存在非线性项 $-R^{-1}$ 和 $-W^{-1}$, 此处使用以下方法将其线性化:

由于 $(\zeta_i \tilde{R} - X) \tilde{R}^{-1} (\zeta_i \tilde{R} - X) \geq 0$, 其中 $\zeta_i > 0$ 是给定的, 则有 $-X \tilde{R}^{-1} X \leq -2\zeta_i X + \zeta_i^2 \tilde{R}$, 又因 $\tilde{R} = XRX$, 所以 $-R^{-1} \leq -2\zeta_i X + \zeta_i^2 \tilde{R}$, 同理可得 $-W^{-1} \leq -2\zeta_i X + \zeta_i^2 \tilde{W}$ 。

通过上述方式处理非线性项, 并且利用 CX 和 N 分别代替 LC 和 KL 可得式 (32) 成立。

又由于条件 (30), 用 Schur 补引理得到其等价条件为:

$$\left\{ \begin{bmatrix} -\kappa I & (LC - CX)^T \\ (LC - CX) & -I \end{bmatrix} < 0 \right. \quad (34)$$

$$\left. \kappa \rightarrow 0 \right.$$

式中, κ 为一个接近 0 的正数。

综上所述, 最终通过条件式 (31)、式 (32) 和式 (34) 求解得到电力系统输出反馈控制器增益, 证毕。

4 系统仿真

通过案例 1 和案例 2 两种控制器设计方案对比, 说明本文提出的控制方案的可行性。该电力系统基本参数如表 1 所示^[31]。

假设非线性攻击函数为 $f[y(t)] = -\tanh[Gy(t)]$, 参数矩阵 $G = \text{diag}\{0.6 \ 0.8\}$, 此外选取扰动函数为:

$$\omega(t) = \begin{cases} 0.5\cos(0.1t) & 15 \leq t \leq 18 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

案例 1: 本案例设计控制器时考虑系统中执行器饱和以及欺骗攻击影响。仿真参数: $\epsilon = 0.12$, $\alpha = 0.05$, $\iota = 100$, $\zeta_0 = \zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = 0.01$, 采样周期 $h = 0.1$, $\bar{\eta} = 0.001$, $\kappa = 0.8$, H_∞ 性能指标 $\gamma = 11$ 。通过 MATLAB 线性矩阵工具箱, 求解电力系统输出反馈控制器参数 K 以及事件触发权重矩阵 Φ , $K =$

$$[0.1688 \ 2.3829], \Phi = \begin{bmatrix} 2.0224 & 2.0964 \\ 2.0964 & 33.3570 \end{bmatrix}。$$

表 1 系统模型参数

参数	数值
M	0.166 7
J	2.4
T_g	0.08
T_{ch}	0.3
μ	0.425
ε	0.008 3

案例 2: 在本控制器设计案例中, 欺骗攻击以及执行器饱和因素未被考虑。仿真参数: $\alpha=0.05, \iota=100, \zeta_0=\zeta_1=\zeta_2=\zeta_3=0.01, \kappa=0.8$, 采样周期 $h=0.1, H_\infty$ 性能指标 $\gamma=11$ 。可以利用 MATLAB 工具箱求解 K 及 Φ : $K=[0.224\ 2\ \ 1.348\ 6], \Phi=\begin{bmatrix} 1.265\ 8 & 3.147\ 1 \\ 3.147\ 1 & 40.806\ 0 \end{bmatrix}$ 。

电力系统的初始状态为 $x(0)=[-0.5, -0.7, 0.8, 0.6]^T$, 考虑的欺骗攻击数学期望为 $\bar{\beta}=0.3$ 。在考虑欺骗攻击和执行器饱和的情况下, 基于自适应事件触发机制的 LFC 电力系统状态响应如图 2 所示。从图 2 可以看出, 案例 1 系统在 25 s 之前达到了稳定状态, 而案例 2 系统趋于稳定时间明显增加。

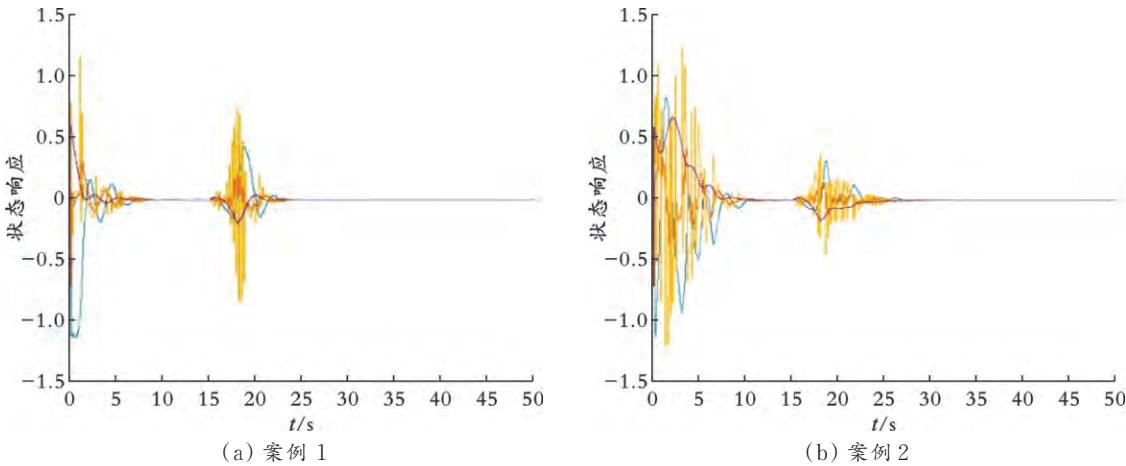


图 2 基于自适应事件触发机制的 LFC 电力系统状态响应

LFC 电力系统自适应律响应曲线如图 3 所示。从图 3(a)可以看出, 当采样信号在 0~5 s 波动较大时, 事件触发阈值被调整为较低值以提高控制信号的触发率; 当系统在 15~18 s 受到干扰时, 触发机制仍能保证高的触发率。从图 3(b)可以看出, 当系统在 15 s 受到干扰时, 触发阈值降到最低, 此时更多的控制信号被触发。

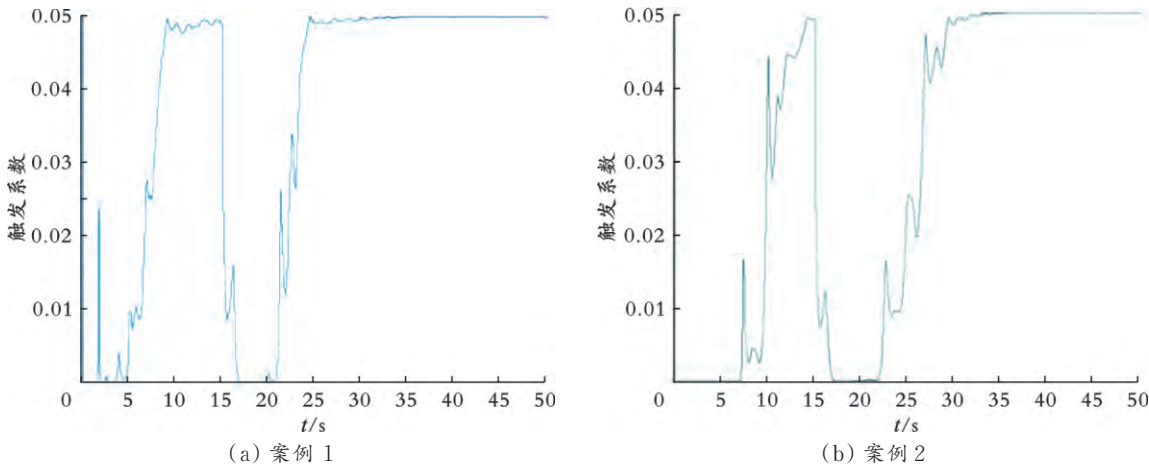


图 3 LFC 电力系统自适应律响应曲线

LFC电力系统的控制输入响应曲线如图4所示。图4中,红线表示受饱和影响的实际控制信号,蓝色表示未成功输入到执行器部分信号。信号传输的触发时刻和触发间隔时间如图5所示。从图5可以看出,其在0~10 s触发分布更加密集。仿真结果表明,本文设计的输出反馈控制器具有节省带宽资源的优点,而且可使系统更快地稳定;案例1设计方案的控制效果更优。

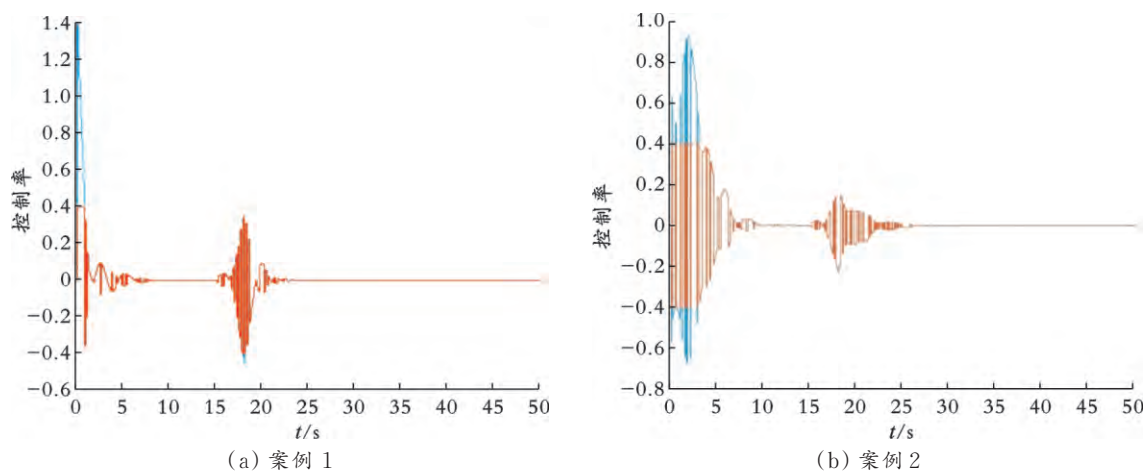


图4 LFC电力系统的控制输入响应曲线

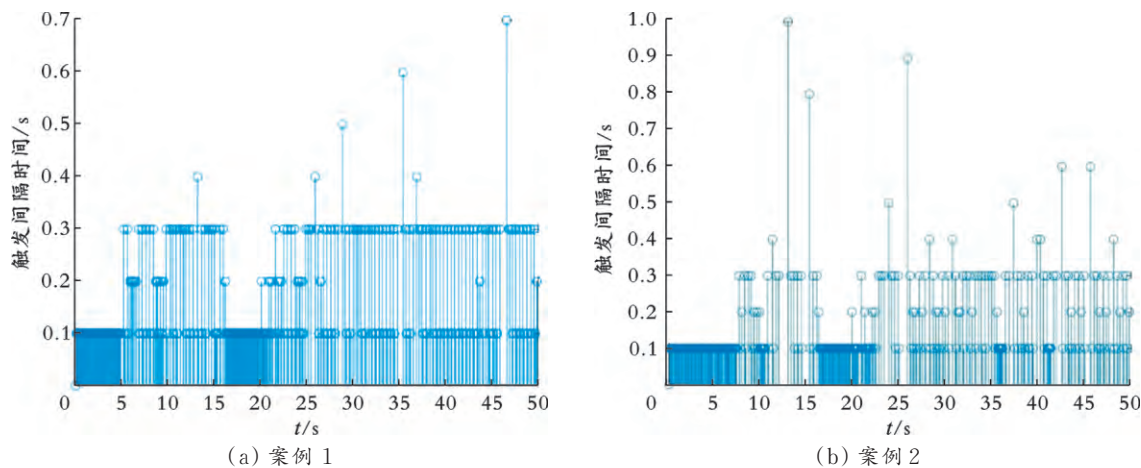


图5 信号传输的触发时刻和触发间隔时间

5 结 论

研究了受欺骗攻击和执行器饱和影响的LFC电力系统的控制器设计问题。为了缓解通信带宽负担,提出了改进后的自适应事件触发机制,可以随采样信号状态变化而自适应地调整通信网络中控制信号的传输率。考虑欺骗攻击和执行器饱和的影响,构造了对应的数学模型,并建立了欺骗攻击和执行器饱和相关的LFC电力系统模型。基于该模型分析其稳定性并在定理2中给出控制器设计方案。仿真结果表明,所提方案可减轻网络带宽负担,在欺骗攻击和执行器饱和的影响下可有效地保障LFC电力系统预期性能。

参 考 文 献

- [1] Tang Y, He H, Wen J, et al. Power system stability control for a wind farm based on adaptive dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(1):166-177.
- [2] Liu F, Li Y, Cao Y, et al. A two-layer active disturbance rejection controller design for load frequency control of interconnected power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4):3320-3321.
- [3] Ark D, Kanti S M, Pankhuri A, et al. Event-triggered adaptive integral higher-order sliding mode control for load frequency problems in multi-area power systems [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical

- Engineering, 2018, 43:137-152.
- [4] Wen S, Yu X, Zeng Z, et al. Event-triggering load frequency control for multiarea power systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2):1308-1317.
- [5] Gu Z, Shi P, Yue D, et al. Memory-based continuous event-triggered control for networked T-S fuzzy systems against cyber-attacks[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 39(10):3118-3129.
- [6] Sun X, Gu Z, Yang F, et al. Memory-event-trigger-based secure control of cloud-aided active suspension systems against deception attacks[J]. Information Sciences, 2020, 543:1-17.
- [7] Dong Y, Tian E, Han Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(2):475-481.
- [8] Gu Z, Zhang T, Yang F, et al. A novel event-triggered mechanism for networked cascade control system with stochastic nonlinearities and actuator failures[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(4):1955-1974.
- [9] Zha L, Tian E, Xie X, et al. Decentralized event-triggered H_∞ control for neural networks subject to cyber-attacks[J]. Information Sciences, 2018, 457:141-155.
- [10] Liu J, Wu Z G, D Yue, et al. Stabilization of networked control systems with hybrid-driven mechanism and probabilistic cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(2):943-953.
- [11] Ding D, Wei G, Zhang S, et al. On scheduling of deception attacks for discrete-time networked systems equipped with attack detectors[J]. Neurocomputing, 2017, 219:99-106.
- [12] Wu J C, Chen P, Jin Z, et al. Event-triggered finite-time H_∞ filtering for networked systems under deception attacks[J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(6):3792-3808.
- [13] Su X H, Liu Z, Lai G Y, et al. Direct adaptive compensation for actuator failures and dead-zone constraints in tracking control of uncertain nonlinear systems[J]. Information Sciences, 2017, 417:328-343.
- [14] Li L, Zou W, Fei S. Event-triggered synchronization of delayed neural networks with actuator saturation using quantized measurements[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(12):6433-6459.
- [15] Liu J, Gu Y, Xie X, et al. Hybrid-driven-based H_∞ control for networked cascade control systems with actuator saturations and stochastic cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12):2452-2463.
- [16] Yang W, Tong S. Output feedback robust stabilization of switched fuzzy systems with time-delay and actuator saturation [J]. Neurocomputing, 2015, 164:173-181.

(编辑 陈 雷)