



基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波器设计

刘金良^{1,2*}, 顾媛媛¹, 费树岷³

1. 南京财经大学信息工程学院, 南京 210023

2. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 南京 210023

3. 东南大学自动化学院, 南京 210096

* 通信作者. E-mail: liujinliang@vip.163.com

收稿日期: 2018-06-01; 接受日期: 2018-06-20; 网络出版日期: 2018-10-09

国家自然科学基金(批准号: 61403185)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20171481)、江苏省属高校自然科学研究重大项目(批准号: 15KJA120001)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)资助

摘要 本文研究了基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波器设计问题. 为了节约网络传输带宽资源, 本文引入事件触发机制降低负荷频率控制电力系统测量输出的传输量. 考虑网络环境下随机网络攻击的影响, 建立基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波误差模型. 基于此滤波误差模型, 利用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术分别给出了负荷频率控制电力系统均方渐近稳定的充分性条件和 H_∞ 滤波器设计方法, 最后通过仿真算例验证本文所提 H_∞ 滤波器设计方法的有效性.

关键词 电力系统, 事件触发, 网络攻击, H_∞ 滤波, 网络化控制系统

1 引言

电力系统是国民经济生活的基础, 对它的研究一直是学术界和工业界的热点. 近年来, 随着科学技术的飞速发展和新能源的开发, 电力系统伴随着能源转型出现了许多新特征: 可再生能源的比例不断增加, 形成了多能互补的综合电力系统^[1]; 大量的电力电子设备应用, 促成了信息物理融合的智能电力系统^[2]. 然而, 这些新特征在提高电力系统运行效率的同时, 也给电力系统的稳定控制和安全运行带来了一些问题. 在电力系统的运行过程中, 电力系统的频率是评估电能质量的一个重要参数, 因为它会随着发电机组输出功率与负荷需求功率之间的平衡程度而变化. 一旦电力系统频率变化远远偏离额定值, 并且超过规定的标准偏移量时, 电力系统将无法保证电能质量, 甚至无法满足社会生产生活需要. 因此, 以维持电力系统频率稳定为目的^[3]的负荷频率控制成为了保障电力系统有效运行的重要措

引用格式: 刘金良, 顾媛媛, 费树岷. 基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波器设计. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1348–1363, doi: 10.1360/N112018-00074
Liu J L, Gu Y Y, Fei S M. Event-based H_∞ filter design for load-frequency control systems under cyber-attacks (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1348–1363, doi: 10.1360/N112018-00074

施^[4]之一. 传统的负荷频率控制电力系统采用专用的通信线路传输系统测量值和控制信息. 如今, 随着计算机、通信和控制技术的融合发展, 开放的通信网络逐渐被应用于各种电力市场的信息传输, 促进了电力系统信息的深度交互和整合. 许多学者针对开放网络环境下的电力系统负荷频率控制进行了广泛研究^[5~7]. Jiang等^[5]考虑电力系统通信网络中的时滞, 将基于PI (proportional-integral) 控制器的单区域负荷频率控制问题建模成时滞线性系统, 研究了电力系统的稳定性. 此外, Zhang等^[6]还扩展了文献[5]中的研究, 考虑了基于PID (proportional-integral-derivative) 控制器的多区域负荷频率控制问题, 将其转化为多时滞的线性系统模型, 并研究电力系统稳定性. Peng等^[7]注意到时滞区间的概率分布特性, 进一步研究了时滞分布依赖的电力系统负荷频率控制的鲁棒稳定性, 并设计了PI控制器.

网络环境下的电力系统除了受网络通信时延的影响, 还受有限网络带宽的约束. 在降低网络通信负载方面, 以周期采样方式进行数据传输的时间触发机制较早被提出并应用, 因为该机制简单易实现, 而且能够保证控制系统在恶劣网络环境下的正常性能. 然而, 当系统处于平衡状态时, 系统的输出变化不大, 此时采用时间触发机制周期性地传输数据仍然会使通信网络存在大量冗余信息, 浪费网络带宽资源. 为了克服时间触发机制的缺点, 不少学者提出了可以减少控制任务执行次数、节约计算和通信成本^[8]的事件触发机制. 例如, 目前研究颇为广泛的是由文献[9]提出的事件触发机制, 这种事件触发机制的实现不需要复杂的硬件设施, 只需要对系统状态的离散时刻进行检测, 当上一传输时刻的信号与当前的采集信号不满足一定的触发条件时才再次释放数据到网络中传输, 以有效地降低网络传输量, 减缓网络数据传输压力. 大量的学者基于此类事件触发机制^[9]研究了电力系统的稳定和控制问题. 例如, 为了减轻电力系统中网络传输的压力, 文献[10]基于事件触发机制针对多地区互联的电力系统提出了一种新的滑模控制方案. 文献[11]基于多智能体系统提出了一种事件触发的混合控制方案用来解决发电系统的能源供给和安全性问题. 基于事件触发机制, 文献[12]研究了多区域电力系统下的 H_∞ 负载频率控制稳定性问题, 并且考虑了资源受限下的拒绝服务攻击的影响.

此外, 随着网络在电力系统中的覆盖范围日益增广, 电力系统的网络安全问题也不容忽视. 尤其是当电力系统受到网络攻击时, 可能会引起大规模的停电停产, 影响人们的生产生活, 造成严重的经济损失, 甚至引发社会混乱. 网络攻击已经成为影响网络安全的重要因素之一, 在众多的网络攻击类型中, 欺骗攻击最难探测和预防, 源于这类攻击可以伪装成接收端已经“授权”的数据, 通过将带有威胁的数据注入到正常的数据传输中, 以达到窃取、篡改甚至摧毁接收端信息的目的, 破坏系统的稳定性. 目前大量的研究是基于欺骗攻击进行的, 例如, 文献[13]研究了一类非线性不确定系统下的滤波器安全问题, 并且综合考虑了随机欺骗攻击和丢包的影响. 文献[14]基于一类具有Kalman滤波功能的离散网络化系统, 从攻击者角度研究了欺骗攻击的攻击方案. 在不妨碍系统操作的情况下, 文献[15]提出了一种能够在微电网逆变控制器中主动检测欺骗攻击的方法. 文献[16]考虑乘性噪声、未知干扰, 以及欺骗攻击的影响, 研究了传感器网络分布式滤波问题.

值得注意的是, 新一代电力系统中大量电力电子设备的互联应用, 使得各类信号易受噪声和谐波干扰, 从而影响数据传输质量和系统性能. 滤波作为信号处理和工程领域中基本研究问题之一受到了广泛关注. 滤波问题的焦点在于如何使用含有噪声的系统测量值估计系统状态信息^[17]. 因此, 为了获得准确的系统信息, 保障系统稳定安全运行, 研究网络环境下电力系统的滤波问题具有重要现实意义. 从控制系统的设计角度考虑, 滤波器的设计常可分为两类, 即 H_∞ 滤波器和Kalman滤波器. 当系统外部噪声统计特征未知时, H_∞ 滤波器相比于Kalman滤波器能得到更好的滤波效果. 近年来, 网络化系统的 H_∞ 滤波问题已经被广泛研究. 例如, 文献[18]针对一类基于T-S模糊模型的网络化控制系统设计了可靠的 H_∞ 滤波器. 文献[19]研究了一类受限于时滞、丢包和传感器饱和的非线性网络化系统的 H_∞ 滤波器设计问题.

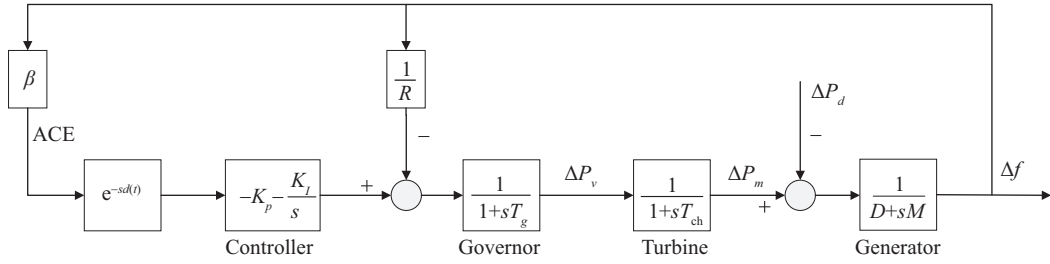


图 1 负荷频率控制单区域电力系统

Figure 1 The scheme of one-area LFC (load frequency control) system

基于上述研究热点, 本文将针对负荷频率控制的单区域电力系统, 研究网络资源受限和随机网络攻击下的 H_∞ 滤波器设计问题. 首先, 引入事件触发机制对负荷频率控制电力系统的测量输出信号进行筛选, 降低传输数据量, 节约网络带宽资源. 其次, 考虑随机网络攻击的影响, 建立基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波误差模型. 基于此滤波误差模型, 利用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术分别给出负荷频率控制电力系统均方渐近稳定的充分性条件和 H_∞ 滤波器设计方法. 最后通过仿真算例验证本文所提 H_∞ 滤波器设计方法的有效性.

2 系统模型

考虑图 1 所示的负荷频率控制单区域电力系统, 其状态方程可表示为^[7]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_\omega\omega(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Delta f(t) \\ \Delta P_m(t) \\ \Delta P_v(t) \\ \int_0^t ACE(s)ds \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{ch}} & \frac{1}{T_{ch}} & 0 \\ -\frac{1}{RT_g} & 0 & -\frac{1}{T_g} & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_\omega = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} ACE(t) \\ \int_0^t ACE(s)ds \end{bmatrix}, \quad \omega(t) = \Delta P_d(t), \quad ACE(t) = \beta\Delta f(t)$$

表示区域控制偏差 (area control error, ACE), $\Delta f(t)$ 表示频率偏差, $\Delta P_m(t)$ 表示机械输出偏差, $\Delta P_v(t)$ 表示调节阀位置偏差, $\Delta P_d(t)$ 表示负荷扰动偏差, D 表示发电机阻尼系数, M 表示发电机转动惯量, T_g 表示调速器时间常数, T_{ch} 表示汽轮机时间常数, R 表示调速器的速度跌落系数, β 表示频率偏差因子.

如图 1 所示, 此负荷频率控制单区域电力系统采用的是比例积分控制器 (PI 控制器):

$$u(t) = -K_P ACE(t) - K_I \int_0^t ACE(s)ds, \quad (2)$$

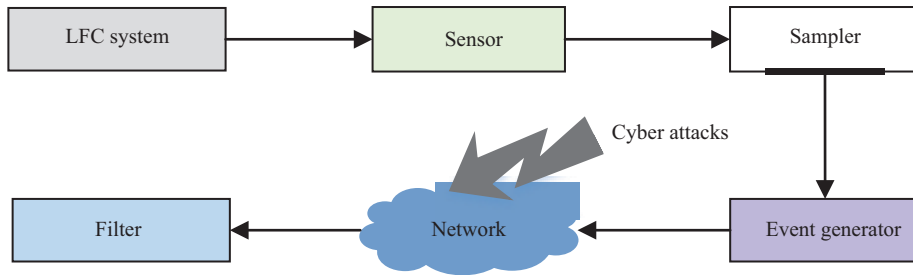


图 2 (网络版彩图) 基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波器设计流程图
 Figure 2 (Color online) The structure of event-based H_∞ filter design for LFC systems with cyber-attacks

其中, K_P 和 K_I 分别是 PI 控制器的比例增益和积分增益. 注意到负荷频率控制中的测量信息往往通过网络从远程遥控装置传输给控制器^[20], 这势必会产生通信延迟, 如图 1 中指数模块 $e^{-sd(t)}$ 所示. 定义 $K \triangleq [K_P \ K_I]$, 控制器 (2) 可进一步表示为

$$u(t) = -Ky(t - d(t)), \tag{3}$$

其中, $d(t)$ 是可变函数, 表示系统通信时滞, 并且满足约束 $0 < d(t) \leq d_M$, d_M 为一个常数, 表示时滞上界.

因此, 结合式 (1) 和 (3), 负荷频率控制单区域电力系统的动力学方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) - BK Cx(t - d(t)) + B_\omega \omega(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \tag{4}$$

注1 由式 (1)~(4) 可知, 此负荷频率控制电力系统可以看做网络环境下普通静态输出反馈控制器设计问题. 注意到, 文献 [5, 7] 已经分别研究了系统 (4) 的稳定性和 PI 控制器设计问题. 本文将在文献 [7] 的基础上, 对负荷频率控制电力系统 (4) 进一步研究其滤波器设计问题.

如图 2 所示, 本文的目的是针对负荷频率控制单区域电力系统 (4), 研究基于事件触发和网络攻击下的 H_∞ 滤波器设计问题. 测定系统 (4) 的待估计信号 $z(t) = Lx(t)$ (L 是具有合适维数的系数矩阵) 的情况下, 考虑如下的滤波器系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f \hat{y}(t), \\ z_f(t) = C_f x_f(t), \end{cases} \tag{5}$$

其中, $x_f(t)$ 是滤波器的状态估计; $z_f(t)$ 是对 $z(t)$ 的估计信号; $\hat{y}(t)$ 是滤波器的真实输入; A_f, B_f 和 C_f 是待求解的具有合适维数的滤波器系数矩阵.

本文假定传感器和采样器是时间驱动的, 采样周期固定为 h , 则采样时刻序列可以表示为 $\{lh : l = 0, 1, 2, \dots\}$. 为了降低网络通信量, 节省网络资源, 引入事件触发机制决定当前采样数据是否被释放传输. 具体地, 当采集的数据满足预先定义的事件触发条件时, 该数据将被丢弃不被传输; 否则, 只有当采集的数据不满足预设的事件触发条件时才释放采样数据. 本文考虑的事件触发条件如下^[9]:

$$\left[y(t_l h) - y(i_l^j h) \right]^T \Omega \left[y(t_l h) - y(i_l^j h) \right] \leq \sigma y^T(i_l^j h) \Omega y(i_l^j h), \tag{6}$$

其中参数 $\sigma \in [0, 1)$, Ω 是合适维数的正定矩阵; $t_l h$ 表示最近的数据传输时刻, $i_l^j h = t_l h + j h$ 表示当前的采样时刻, 因此 $y(t_l h)$ 和 $y(i_l^j h)$ 分别表示最近被传输的数据和当前采样的数据.

注2 从式 (6) 中的事件触发条件可以看出: 本文的数据采样是在离散的时刻 lh ($l = 0, 1, 2, \dots$) 发生的, 所考虑的事件触发机制可确保相邻的数据释放间隔至少为一个采样周期 h , 从而可以有效地避免 Zeno 现象.

网络的存在使得网络诱导时滞不可避免. 本文利用文献 [9] 中的方法, 定义第 $t_l h$ 传输时刻产生的相应网络诱导时滞为 τ_l , 下面将分两种情况讨论网络诱导时滞的影响.

情况1 当 $t_l h + h + \bar{\tau} \geq t_{l+1} h + \tau_{l+1}$ 时, 其中 $\bar{\tau} = \max\{\tau_l\}$, 定义如下时变函数:

$$\tau(t) = t - t_l h, \quad t \in [t_l h + \tau_l, t_{l+1} h + \tau_{l+1}), \quad (7)$$

则 $\tau(t)$ 满足 $0 < \tau_l \leq \tau(t) \leq (t_{l+1} - t_l)h + \tau_{l+1} \leq h + \bar{\tau}$, $t \in [t_l h + \tau_l, t_{l+1} h + \tau_{l+1})$.

情况2 当 $t_l h + h + \bar{\tau} < t_{l+1} h + \tau_{l+1}$ 时, 为了方便表述, 可以分 3 类区间讨论相邻两次到达滤波器的时间间隔, 即 $[t_l h + \tau_l, t_{l+1} h + \tau_{l+1}) = [t_l h + \tau_l, t_l h + h + \bar{\tau}) \cup [t_l h + jh + \bar{\tau}, t_l h + jh + h + \bar{\tau}) \cup [t_l h + l_M h + \bar{\tau}, t_{l+1} h + \tau_{l+1})$, 其中 $j = 1, 2, \dots, l_M - 1$, l_M 是正整数, 注意 $\tau_l \leq \bar{\tau}$ 可以保证该正整数的存在. 定义时变函数:

$$\tau(t) = \begin{cases} t - t_l h, & t \in [t_l h + \tau_l, t_l h + h + \bar{\tau}); \\ t - t_l h - jh, & t \in [t_l h + jh + \bar{\tau}, t_l h + jh + h + \bar{\tau}), \quad j = 1, 2, \dots, l_M - 1; \\ t - t_l h - l_M h, & t \in [t_l h + l_M h + \bar{\tau}, t_{l+1} h + \tau_{l+1}), \end{cases} \quad (8)$$

则由式 (8) 可知 $0 < \tau_l \leq \tau(t) \leq h + \bar{\tau} \triangleq \tau_M$, $t \in [i_l^j h + \tau_{i_l^j}, i_l^j h + h + \tau_{i_l^j+1})$, τ_M 是一个常数, 表示采样数据传输的时滞上界.

结合以上两种情况的讨论, 定义最近传输数据与当前采样数据间的误差为 $e_l(t) = y(t_l h) - y(i_l^j h)$. 具体地, 当情况 1 发生时, 给定 $e_l(t) = 0$; 当情况 2 发生时, 按如下方式给定 $e_l(t)$:

$$e_l(t) = \begin{cases} 0, & t \in [t_l h + \tau_l, t_l h + h + \bar{\tau}); \\ y(t_l h) - y(t_l h + jh), & t \in [t_l h + jh + \bar{\tau}, t_l h + jh + h + \bar{\tau}), \quad j = 1, 2, \dots, l_M - 1; \\ y(t_l h) - y(t_l h + l_M h), & t \in [t_l h + l_M h + \bar{\tau}, t_{l+1} h + \tau_{l+1}). \end{cases} \quad (9)$$

因此, 最近被传输的数据可以表示为

$$y(t_l h) = y(i_l^j h) + y(t_l h) - y(i_l^j h) = Cx(t - \tau(t)) + e_l(t). \quad (10)$$

考虑到网络攻击者往往通过破坏系统测量输出或者控制输入信号实现对系统的欺骗攻击^[21], 为了提高攻击成功率, 攻击者往往事先能够获取系统的测量输出信息^[22], 并将该信息改造成具有欺骗性的恶意攻击信号. 本文假定攻击者事先能够获取系统待传输信号, 并且将攻击信号伪装成与系统测量输出相关的非线性函数, 即 $h(y(t))$, 该非线性函数满足假设 1 的约束.

此外, 网络攻击的发生具有随机性^[23], 本文引入 Bernoulli 随机变量 $\alpha(t) \in \{0, 1\}$ 描述随机网络攻击是否发生. 为了方便讨论, 本文将在给定网络攻击发生概率的前提下, 讨论网络攻击的影响, 即假定随机变量 $\alpha(t)$ 满足如下统计特性: 期望 $E\{\alpha(t)\} = \bar{\alpha}$, 方差 $E\{(\alpha(t) - \bar{\alpha})^2\} = \mu^2$.

因此, 滤波器的真实输入表示为

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) &= \alpha(t)h(y(t - \theta(t))) + (1 - \alpha(t))y(t_l h) \\ &= \alpha(t)h(y(t - \theta(t))) + (1 - \alpha(t))Cx(t - \tau(t)) + (1 - \alpha(t))e_l(t), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\theta(t)$ 表示攻击发生时攻击信号被网络传输产生的时滞.

注3 由式 (11) 可知, 当随机变量 $\alpha(t) = 1$ 时, 式 (11) 变为 $\hat{y}(t) = h(y(t - \theta(t)))$, 此时表示滤波器接收了恶意的攻击信号. 当 $\alpha(t) = 0$ 时, 式 (11) 变为 $\hat{y}(t) = Cx(t - \tau(t)) + e_l(t)$, 此时滤波器的输入为正常的系统测量输出信号.

注4 值得注意的是, 本文考虑的网络攻击是一种欺骗攻击. 一旦网络攻击发生, 攻击信号将完全替代原始传输信号, 并通过网络传输送达滤波器. 因此, 网络攻击信号同样地会受网络传输时滞的影响. 本文假定式 (11) 中网络攻击信号的网络传输时滞 $\theta(t)$ 满足 $0 < \theta(t) \leq \theta_M$, θ_M 是一个常数, 代表网络攻击信号的时滞上界.

结合式 (10) 和 (11), 滤波器系统 (5) 可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + \alpha(t) B_f h(y(t - \theta(t))) + (1 - \alpha(t)) B_f C x(t - \tau(t)) + (1 - \alpha(t)) B_f e_l(t), \\ z_f(t) = C_f x_f(t). \end{cases} \quad (12)$$

定义 $\xi(t) = [x^T(t) \ x_f^T(t)]^T$ 和估计误差为 $\tilde{z}(t) = z(t) - z_f(t)$, 结合式 (4) 和 (12) 可得增广的滤波误差系统为

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = \bar{A}_f \xi(t) + \bar{B} E \xi(t - d(t)) + (1 - \alpha(t)) \bar{B}_{fc} E \xi(t - \tau(t)) + \alpha(t) \bar{B}_f h(\bar{C} \xi(t - \theta(t))) \\ \quad + (1 - \alpha(t)) \bar{B}_f e_l(t) + \bar{B}_\omega \omega(t), \\ \tilde{z}(t) = \bar{C}_f \xi(t), \end{cases} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} \bar{A}_f &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_f \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} -BKC \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{fc} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f C \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_\omega &= \begin{bmatrix} B_\omega \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E = [I \ 0], \quad \bar{C}_f = [L \ -C_f], \quad \bar{C} = [C \ 0]. \end{aligned}$$

为了得到本文的结论, 给出如下假设、定义和引理.

假设1 ([24]) 具有欺骗性的攻击信号 $h(y(t))$ 是一个与系统测量输出相关的非线性函数, 该函数满足如下约束条件:

$$\|h(y(t))\|^2 \leq \|Hy(t)\|^2, \quad (14)$$

其中 H 表示非线性函数上界的常数矩阵, $\|\cdot\|$ 表示 Euclid 范数.

定义1 ([25]) 系统 (13) 是均方渐近稳定的, 如果 $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta(\varepsilon) > 0$ 使得当初始值 $\phi(t)$ 满足 $\sup_{-\tau_M < t \leq 0} E\{\|\phi(t)\|^2\} < \delta(t)$ 时, 系统 (13) 的解 $\xi(t)$ 满足 $E\{\|\xi(t)\|^2\} < \varepsilon, t > 0$ 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} E\{\|\xi(t)\|^2\} = 0$, 其中 E 表示数学期望.

引理1 ([26]) 对于给定的正数 τ_M , 若时变函数 $\tau(t)$ 满足 $\tau(t) \in (0, \tau_M]$, 则对于一个向量值函数 $\dot{\xi}(t) : (0, \tau_M] \rightarrow \mathbb{R}^n$, 存在常数矩阵 $R = R^T \in \mathbb{R}^{n \times n}, S \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 并且 $\begin{bmatrix} R & * \\ S & R \end{bmatrix} \geq 0$, 使得下面的不等式成立:

$$-\tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{\xi}^T(s) R \dot{\xi}(s) ds \leq \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t - \tau(t)) \\ \xi(t - \tau_M) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R & * & * \\ R + S & -2R - S - S^T & * \\ -S & R + S & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t - \tau(t)) \\ \xi(t - \tau_M) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

3 主要结论

本节将利用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术, 在考虑事件触发和网络攻击的情况下, 对滤波误差系统 (13) 进行稳定性分析, 滤波器参数矩阵 A_f, B_f, C_f 将由定理 2 给出.

定理1 对于给定的网络攻击发生概率期望 $\bar{\alpha}$, 时滞上界 d_M, τ_M, θ_M , 事件触发标量参数 σ , 采样周期 h , PI 控制器增益 K , 矩阵 H , 滤波器参数矩阵 A_f, B_f, C_f 和 H_∞ 性能指标 γ , 如果存在正定矩阵 $P, Q_1, Q_2, Q_3, R_1, R_2, R_3, \Omega$, 合适维数的自由权矩阵 M, N 和 V , 使得如下矩阵不等式成立:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 & * & * \\ \Phi_2 & \Phi_3 & * \\ \Phi_4 & \Phi_5 & \Phi_6 \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 & * \\ M & R_1 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} R_2 & * \\ N & R_2 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} R_3 & * \\ V & R_3 \end{bmatrix} \geq 0, \quad (17)$$

其中

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & * & * & * & * & * & * \\ \Phi_{12} & -2R_1 - M - M^T & * & * & * & * & * \\ -M & R_1 + M & -Q_1 - R_1 & * & * & * & * \\ \Phi_{13} & 0 & 0 & \Phi_{14} & * & * & * \\ -N & 0 & 0 & R_2 + N & -Q_2 - R_2 & * & * \\ R_3 + V & 0 & 0 & 0 & 0 & -2R_3 - V - V^T & * \\ -V & 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 + V & -Q_3 - R_3 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{11} = P\bar{A}_f + \bar{A}_f^T P + Q_1 + Q_2 + Q_3 - R_1 - R_2 - R_3, \quad \Phi_{12} = E^T \bar{B}^T P + R_1 + M,$$

$$\Phi_{13} = (1 - \bar{\alpha})E^T \bar{B}_{fc}^T P + R_2 + N, \quad \Phi_{14} = -2R_2 - N - N^T + \sigma \bar{C}^T \Omega \bar{C},$$

$$\Phi_3 = \text{diag}\{-\Omega, -\bar{\alpha}I, -\gamma^2 I, -I, -I\},$$

$$\Phi_6 = \text{diag}\{-PR_1^{-1}P, -PR_2^{-1}P, -PR_3^{-1}P, -PR_1^{-1}P, -PR_2^{-1}P, -PR_3^{-1}P\},$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} (1 - \bar{\alpha})\bar{B}_f^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\alpha}\bar{B}_f^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{B}_\omega^T P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{\bar{\alpha}}H\bar{C} & 0 \\ \bar{C}_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_5 = \begin{bmatrix} d_M(1 - \bar{\alpha})P\bar{B}_f & d_M\bar{\alpha}P\bar{B}_f & d_MP\bar{B}_\omega & 0 & 0 \\ \tau_M(1 - \bar{\alpha})P\bar{B}_f & \tau_M\bar{\alpha}P\bar{B}_f & \tau_MP\bar{B}_\omega & 0 & 0 \\ \theta_M(1 - \bar{\alpha})P\bar{B}_f & \theta_M\bar{\alpha}P\bar{B}_f & \theta_MP\bar{B}_\omega & 0 & 0 \\ -d_M\mu P\bar{B}_f & d_M\mu P\bar{B}_f & 0 & 0 & 0 \\ -\tau_M\mu P\bar{B}_f & \tau_M\mu P\bar{B}_f & 0 & 0 & 0 \\ -\theta_M\mu P\bar{B}_f & \theta_M\mu P\bar{B}_f & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_4 = \begin{bmatrix} d_M P \bar{A}_f & d_M P \bar{B} E & 0 & d_M (1 - \bar{\alpha}) P \bar{B}_{fc} E & 0 & 0 & 0 \\ \tau_M P \bar{A}_f & \tau_M P \bar{B} E & 0 & \tau_M (1 - \bar{\alpha}) P \bar{B}_{fc} E & 0 & 0 & 0 \\ \theta_M P \bar{A}_f & \theta_M P \bar{B} E & 0 & \theta_M (1 - \bar{\alpha}) P \bar{B}_{fc} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_M \mu P \bar{B}_{fc} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\tau_M \mu P \bar{B}_{fc} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\theta_M \mu P \bar{B}_{fc} E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

则系统 (13) 均方渐近稳定.

证明 构造如下形式的 Lyapunov 泛函:

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t), \tag{18}$$

其中 $V_1(t) = \xi^T(t) P \xi(t)$, $V_2(t) = \int_{t-d_M}^t \xi^T(s) Q_1 \xi(s) ds + \int_{t-\tau_M}^t \xi^T(s) Q_2 \xi(s) ds + \int_{t-\theta_M}^t \xi^T(s) Q_3 \xi(s) ds$, $V_3(t) = d_M \int_{t-d_M}^t \int_s^t \xi^T(v) R_1 \dot{\xi}(v) dv ds + \tau_M \int_{t-\tau_M}^t \int_s^t \xi^T(v) R_2 \dot{\xi}(v) dv ds + \theta_M \int_{t-\theta_M}^t \int_s^t \xi^T(v) R_3 \dot{\xi}(v) dv ds$.

则 $V_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$) 沿系统 (13) 求导并对其取数学期望得

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}_1(t)\} &= 2\xi^T(t) P [\bar{A}_f \xi(t) + \bar{B} E \xi(t-d(t)) + (1-\bar{\alpha}) \bar{B}_{fc} E \xi(t-\tau(t)) + \bar{\alpha} \bar{B}_f h(\bar{C} \xi(t-\theta(t))) \\ &\quad + (1-\bar{\alpha}) \bar{B}_f e_l(t) + \bar{B}_\omega \omega(t)], \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}_2(t)\} &= \xi^T(t) (Q_1 + Q_2 + Q_3) \xi(t) - \xi^T(t-d_M) Q_1 \xi(t-d_M) - \xi^T(t-\tau_M) Q_2 \xi(t-\tau_M) \\ &\quad - \xi^T(t-\theta_M) Q_3 \xi(t-\theta_M), \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} E\{\dot{V}_3(t)\} &= E\{\xi^T(t) (d_M^2 R_1 + \tau_M^2 R_2 + \theta_M^2 R_3) \dot{\xi}(t)\} - d_M \int_{t-d_M}^t \xi^T(s) R_1 \dot{\xi}(s) ds \\ &\quad - \tau_M \int_{t-\tau_M}^t \xi^T(s) R_2 \dot{\xi}(s) ds - \theta_M \int_{t-\theta_M}^t \xi^T(s) R_3 \dot{\xi}(s) ds. \end{aligned} \tag{21}$$

根据引理 1, 有

$$-d_M \int_{t-d_M}^t \xi^T(s) R_1 \dot{\xi}(s) ds \leq \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t-d(t)) \\ \xi(t-d_M) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_1 & * & * \\ R_1 + M & -2R_1 - M - M^T & * \\ -M & R_1 + M & -R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t-d(t)) \\ \xi(t-d_M) \end{bmatrix}, \tag{22}$$

$$-\tau_M \int_{t-\tau_M}^t \xi^T(s) R_2 \dot{\xi}(s) ds \leq \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t-\tau(t)) \\ \xi(t-\tau_M) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_2 & * & * \\ R_2 + N & -2R_2 - N - N^T & * \\ -N & R_2 + N & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t-\tau(t)) \\ \xi(t-\tau_M) \end{bmatrix}, \tag{23}$$

$$-\theta_M \int_{t-\theta_M}^t \xi^T(s) R_3 \dot{\xi}(s) ds \leq \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t-\theta(t)) \\ \xi(t-\theta_M) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_3 & * & * \\ R_3 + V & -2R_3 - V - V^T & * \\ -V & R_3 + V & -R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi(t-\theta(t)) \\ \xi(t-\theta_M) \end{bmatrix}, \tag{24}$$

其中 R_1, M, R_2, N, R_3, V 满足

$$\begin{bmatrix} R_1 & * \\ M & R_1 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} R_2 & * \\ N & R_2 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} R_3 & * \\ V & R_3 \end{bmatrix} \geq 0.$$

注意到 $\dot{\xi}(t) = \mathcal{A} + (\alpha(t) - \bar{\alpha})\mathcal{B}$, 其中 $\mathcal{A} = \bar{A}_f\xi(t) + \bar{B}E\xi(t - d(t)) + (1 - \bar{\alpha})\bar{B}_{fc}E\xi(t - \tau(t)) + (1 - \bar{\alpha})\bar{B}_f e_l(t) + \bar{\alpha}\bar{B}_f h(\bar{C}\xi(t - \theta(t)))$, $\mathcal{B} = -\bar{B}_{fc}E\xi(t - \tau(t)) - \bar{B}_f e_l(t) + \bar{B}_f h(\bar{C}\xi(t - \tau(t)))$. 又 $E\{\alpha(t)\} = \bar{\alpha}$, $E\{(\alpha(t) - \bar{\alpha})\} = 0$, $E\{(\alpha(t) - \bar{\alpha})^2\} = \mu^2$, 因此,

$$E\{\dot{\xi}^T(t)(d_M^2 R_1 + \tau_M^2 R_2 + \theta_M^2 R_3)\dot{\xi}(t)\} = \mathcal{A}^T \hat{R} \mathcal{A} + \mu^2 \mathcal{B}^T \hat{R} \mathcal{B}, \quad (25)$$

其中 $\hat{R} = d_M^2 R_1 + \tau_M^2 R_2 + \theta_M^2 R_3$.

考虑事件触发条件 (6), 可得如下不等式:

$$\sigma \xi^T(t - \tau(t)) \bar{C}^T \Omega \bar{C} \xi(t - \tau(t)) - e_l^T(t) \Omega e_l(t) \geq 0. \quad (26)$$

考虑网络攻击信号的约束 (14), 特别地, 当网络攻击发生时, 攻击信号伪装成正常信号被传输, 同样会受网络诱导时滞的影响. 因此, 可以进一步得到如下约束条件:

$$\bar{\alpha} \xi^T(t - \theta(t)) \bar{C}^T H^T H \bar{C} \xi(t - \theta(t)) - \bar{\alpha} h^T(\bar{C}\xi(t - \theta(t))) h(\bar{C}\xi(t - \theta(t))) \geq 0. \quad (27)$$

结合式 (19)~(27) 并应用 Schur 补引理, 有

$$E\{\dot{V}(t)\} - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) + z^T(t) z(t) < \zeta^T(t) \Phi \zeta(t), \quad (28)$$

其中, $\zeta^T(t) = [\xi^T(t), \xi^T(t - d(t)), \xi^T(t - d_M), \xi^T(t - \tau(t)), \xi^T(t - \tau_M), \xi^T(t - \theta(t)), \xi^T(t - \theta_M), e_l^T(t), h^T(y(t - \theta(t))), \omega^T(t)]$. 进一步地, 式 (16) 和 (17) 是

$$E\{\dot{V}(t)\} - \gamma^2 \omega^T(t) \omega(t) + z^T(t) z(t) < 0 \quad (29)$$

成立的充分条件.

当 $\omega(t) = 0$ 时, 从式 (16) 和 (29) 可知: 存在一个正数 λ 使得 $E\{\dot{V}(t)\} \leq -\lambda E\{\|\xi(t)\|^2\} < 0$. 又注意到 $V(t) > 0$, 从而可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} E\{\|\xi(t)\|^2\} = 0$. 于是由定义 1 可知系统 (13) 均方渐近稳定.

当 $\omega(t)$ 不为零时, 式 (29) 两边同时对 t 从 0 到 ∞ 进行积分, 可得

$$V(t)|_{t \rightarrow \infty} - V(0) - \gamma^2 \int_0^\infty \omega^T(t) \omega(t) dt + \int_0^\infty z^T(t) z(t) dt < 0. \quad (30)$$

于是, 在零初始条件下, 可得 $\int_0^\infty z^T(t) z(t) dt < \gamma^2 \int_0^\infty \omega^T(t) \omega(t) dt$. 从而说明系统 (13) 是满足 H_∞ 性能约束的均方渐近稳定.

综上所述, 定理 1 得证.

基于定理 1 和 2 将针对负荷频率控制电力系统, 考虑事件触发传输机制和随机网络攻击影响下, 式 (5) 中滤波器参数 A_f, B_f 和 C_f 的设计方法.

定理 2 对于给定的网络攻击发生概率期望 $\bar{\alpha}$, 时滞上界 d_M, τ_M, θ_M , 事件触发标量参数 σ , PI 控制器增益 K , 矩阵 H , 标量 $\epsilon_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$), 采样周期 h , 如果存在正定矩阵 $P_1, \bar{P}_3, \hat{Q}_1, \hat{Q}_2, \hat{Q}_3, \hat{R}_1$,

$\hat{R}_2, \hat{R}_3, \hat{\Omega}$, 合适维数矩阵 $\tilde{A}_f, \tilde{B}_f, \tilde{C}_f, \hat{M}, \hat{N}$ 和 \hat{V} , 使得以下线性矩阵不等式成立:

$$\hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \hat{\Phi}_1 & * & * \\ \hat{\Phi}_2 & \hat{\Phi}_3 & * \\ \hat{\Phi}_4 & \hat{\Phi}_5 & \hat{\Phi}_6 \end{bmatrix} < 0, \tag{31}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_1 & * \\ \hat{M} & \hat{R}_1 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} \hat{R}_2 & * \\ \hat{N} & \hat{R}_2 \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} \hat{R}_3 & * \\ \hat{V} & \hat{R}_3 \end{bmatrix} \geq 0, \tag{32}$$

$$P_1 - \bar{P}_3 > 0, \tag{33}$$

其中,

$$\hat{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \hat{\Phi}_{11} & * & * & * & * & * & * \\ \hat{\Phi}_{12} & -2\hat{R}_1 - \hat{M} - \hat{M}^T & * & * & * & * & * \\ -\hat{M} & \hat{R}_1 + \hat{M} & -\hat{Q}_1 - \hat{R}_1 & * & * & * & * \\ \hat{\Phi}_{13} & 0 & 0 & \hat{\Phi}_{14} & * & * & * \\ -\hat{N} & 0 & 0 & \hat{R}_2 + \hat{N} - \hat{Q}_2 - \hat{R}_2 & * & * & * \\ \hat{R}_3 + \hat{V} & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\hat{R}_3 - \hat{V} - \hat{V}^T & * \\ -\hat{V} & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{R}_3 + \hat{V} & -\hat{Q}_3 - \hat{R}_3 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\Phi}_{11} = \phi_1 + \phi_1^T + \hat{Q}_1 + \hat{Q}_2 + \hat{Q}_3 - \hat{R}_1 - \hat{R}_2 - \hat{R}_3, \quad \hat{\Phi}_{12} = \phi_2^T + \hat{R}_1 + \hat{M}, \quad \hat{\Phi}_{13} = (1 - \bar{\alpha})\phi_3^T + \hat{R}_2 + \hat{N},$$

$$\hat{\Phi}_{14} = -2\hat{R}_2 - \hat{N} - \hat{N}^T + \sigma\phi_4, \quad \phi_1 = \begin{bmatrix} P_1 A & \tilde{A}_f \\ \bar{P}_3 A & \tilde{A}_f \end{bmatrix}, \quad \phi_2 = \begin{bmatrix} -P_1 B K C & 0 \\ -\bar{P}_3 B K C & 0 \end{bmatrix}, \quad \phi_3 = \begin{bmatrix} \tilde{B}_f C & 0 \\ \tilde{B}_f C & 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\Phi}_6 = \text{diag}\{-2\epsilon_1\phi_9 + \epsilon_1^2\hat{R}_1, -2\epsilon_2\phi_9 + \epsilon_2^2\hat{R}_2, -2\epsilon_3\phi_9 + \epsilon_3^2\hat{R}_3, -2\epsilon_1\phi_9 + \epsilon_1^2\hat{R}_1, -2\epsilon_2\phi_9 + \epsilon_2^2\hat{R}_2, -2\epsilon_3\phi_9 + \epsilon_3^2\hat{R}_3\},$$

$$\hat{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} (1 - \bar{\alpha})\phi_5^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\alpha}\phi_5^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_6^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{\bar{\alpha}}\phi_8 & 0 \\ \phi_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\Phi}_5 = \begin{bmatrix} d_M(1 - \bar{\alpha})\phi_5 & d_M\bar{\alpha}\phi_5 & d_M\phi_6 & 0 & 0 \\ \tau_M(1 - \bar{\alpha})\phi_5 & \tau_M\bar{\alpha}\phi_5 & \tau_M\phi_6 & 0 & 0 \\ \theta_M(1 - \bar{\alpha})\phi_5 & \theta_M\bar{\alpha}\phi_5 & \theta_M\phi_6 & 0 & 0 \\ -d_M\mu\phi_5 & d_M\mu\phi_5 & 0 & 0 & 0 \\ -\tau_M\mu\phi_5 & \tau_M\mu\phi_5 & 0 & 0 & 0 \\ -\theta_M\mu\phi_5 & \theta_M\mu\phi_5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\Phi}_4 = \begin{bmatrix} d_M\phi_1 & d_M\phi_2 & 0 & d_M(1 - \bar{\alpha})\phi_3 & 0 & 0 & 0 \\ \tau_M\phi_1 & \tau_M\phi_2 & 0 & \tau_M(1 - \bar{\alpha})\phi_3 & 0 & 0 & 0 \\ \theta_M\phi_1 & \theta_M\phi_2 & 0 & \theta_M(1 - \bar{\alpha})\phi_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_M\mu\phi_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\tau_M\mu\phi_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\theta_M\mu\phi_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \phi_4 = \begin{bmatrix} C^T \Omega C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \phi_5 = \begin{bmatrix} \tilde{B}_f \\ \tilde{B}_f \end{bmatrix}, \quad \phi_6 = \begin{bmatrix} P_1 B_\omega \\ \bar{P}_3 B_\omega \end{bmatrix},$$

$$\phi_9 = \begin{bmatrix} P_1 & \bar{P}_3 \\ \bar{P}_3 & P_3 \end{bmatrix}, \phi_7 = [L \quad -\tilde{C}_f], \phi_8 = [HC \quad 0], \mu = \sqrt{\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})},$$

其他参数的定义同定理 1, 则系统 (13) 均方渐近稳定. 并且如果上述条件存在可行解, 滤波器的参数可以表示为

$$\begin{cases} A_f = \tilde{A}_f \bar{P}_3^{-1}, \\ B_f = \tilde{B}_f, \\ C_f = \tilde{C}_f \bar{P}_3^{-1}. \end{cases} \quad (34)$$

证明 对于任意矩阵 $R_i > 0, P > 0$ 和标量 ϵ_i , 由

$$(R_i - \epsilon_i^{-1}P)R_i^{-1}(R_i - \epsilon_i^{-1}P) \geq 0, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (35)$$

可知

$$-PR_i^{-1}P \leq -2\epsilon_i P + \epsilon_i^2 R_i. \quad (36)$$

于是, 使用 $-2\epsilon_i P + \epsilon_i^2 R_i$ ($i = 1, 2, 3$) 替换定理 1 中 Φ_6 的 $-PR_i^{-1}P$ ($i = 1, 2, 3$), 可得

$$\tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & * & * \\ \Phi_2 & \Phi_3 & * \\ \Phi_4 & \Phi_5 & \tilde{\Phi}_6 \end{bmatrix}, \quad (37)$$

其中

$$\tilde{\Phi}_6 = \text{diag}\{-2\epsilon_1 P + \epsilon_1^2 R_1, -2\epsilon_2 P + \epsilon_2^2 R_2, -2\epsilon_3 P + \epsilon_3^2 R_3, -2\epsilon_1 P + \epsilon_1^2 R_1, -2\epsilon_2 P + \epsilon_2^2 R_2, -2\epsilon_3 P + \epsilon_3^2 R_3\}.$$

因为 \bar{P}_3 是正定矩阵, 所以存在 P_2 和 $P_3 > 0$ 使得 $\bar{P}_3 = P_2^T P_3^{-1} P_2$. 定义 $P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2^T \\ 0 & P_3 \end{bmatrix}$, 由 Schur 补引理可知, $P > 0$ 等价于 $P_1 - \bar{P}_3 > 0$.

定义 $J = \begin{bmatrix} I & \\ 0 & P_2^T P_3^{-1} \end{bmatrix}$, $\Gamma = \text{diag}\{\underbrace{J, \dots, J}_7, \underbrace{I, \dots, I}_5, \underbrace{J, \dots, J}_6\}$, 对不等式 (17) 左乘 J , 右乘 J^T ; 对不等式 (37) 左乘 Γ , 右乘 Γ^T , 并定义 $\hat{R}_i = JR_i J^T$ ($i = 1, 2, 3$), $\hat{M} = JM J^T$, $\hat{N} = JN J^T$, $\hat{V} = JV J^T$, $\hat{Q}_i = JQ_i J^T$ ($i = 1, 2, 3$) 和变量

$$\begin{cases} \tilde{A}_f = \hat{A}_f \bar{P}_3, \hat{A}_f = P_2^T A_f P_2^{-T}, \\ \tilde{B}_f = P_2^T B_f, \\ \tilde{C}_f = \hat{C}_f \bar{P}_3, \hat{C}_f = C_f P_2^{-T}, \end{cases} \quad (38)$$

则定理 2 中的式 (31)~(33) 与定理 1 中的式 (16) 和 (17) 等价, 所以系统 (13) 均方渐近稳定.

下面将证明在 $\tilde{A}_f, \tilde{B}_f, \tilde{C}_f$ 和 \bar{P}_3 有可行解的情况下, 滤波器系统 (5) 的系数矩阵可以由式 (34) 得到.

类似于文献 [27] 中的分析, 由式 (38) 中的定义可知: 滤波器参数 A_f, B_f 和 C_f 可分别使用 $P_2^{-T} \hat{A}_f P_2^T, P_2^{-T} \tilde{B}_f$ 和 $\hat{C}_f P_2^T$ 表示, 即滤波器系统 (5) 为

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = P_2^{-T} \hat{A}_f P_2^T x_f(t) + P_2^{-T} \tilde{B}_f \hat{y}(t), \\ z_f(t) = \hat{C}_f P_2^T x_f(t). \end{cases} \quad (39)$$

进一步地, 定义 $\hat{x}(t) = P_2^T x_f(t)$, 则式 (39) 可以表示成

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}_f \hat{x}(t) + \hat{B}_f \hat{y}(t), \\ z_f(t) = \hat{C}_f \hat{x}(t). \end{cases} \quad (40)$$

因此, 可以使用 \hat{A}_f, \hat{B}_f 和 \hat{C}_f 分别表示滤波器的参数. 再由式 (38) 中的定义, 可以得到定理 2 中的式 (34), 进而实现滤波器的设计.

综上所述, 定理 2 得证.

注5 在定理 2 的滤波器设计中, 控制器增益 K 是事先给定的, 其设计算法可以参考文献 [7]. 本文是在文献 [7] 设计负荷频率控制电力系统的 PI 控制器基础上, 进一步对负荷频率控制电力系统设计了 H_∞ 滤波器.

4 仿真算例

为了验证本文滤波器设计方法的有效性, 下面给出具体的电力系统仿真算例.

假设负荷频率控制电力系统 (1) 的参数^[7] 如下: $T_{ch} = 0.3, T_g = 0.1, R = 0.05, D = 1.0, \beta = 21, M = 10$. 则由系统 (1) 可知

$$A = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & -3.3333 & 3.3333 & 0 \\ -200 & 0 & -10 & 0 \\ 21 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix}, B_\omega = \begin{bmatrix} -0.1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 21 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

取文献 [7] 中获得的 PI 控制器增益 $K = [0.0054 \ 0.0740]$, 系统时滞上界 $d_M = 0.6050$, H_∞ 性能指标 $\gamma = 10$.

假定式 (14) 中网络攻击信号 $h(y(t)) = \begin{bmatrix} \tanh(0.12y_1(t)) \\ \tanh(0.08y_2(t)) \end{bmatrix}$, 则易知 $H = \text{diag}\{0.12, 0.08\}$ 时满足假设 1.

进一步地, 给定采样周期 $h = 0.1$ s, 网络诱导时滞上界 $\tau_M = 0.5, \theta_M = 0.3$, 事件触发参数 $\sigma = 0.2$, 网络攻击发生概率期望 $\bar{\alpha} = 0.1, \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 1, L = [1 \ 0 \ 1 \ 0]$,

$$\omega(t) = \begin{cases} 0.1, & t \in [0, 5); \\ 0, & t \in [5, 80). \end{cases}$$

基于定理 2, 使用 Matlab 中的 LMI 工具箱求解线性矩阵不等式 (31)~(33), 并结合式 (34), 可得滤波器系统 (5) 的系数矩阵和事件触发参数矩阵如下:

$$A_f = \begin{bmatrix} -0.3391 & 0.0401 & -5.3053 & 0.5447 \\ -0.9153 & -1.1129 & 176.4938 & -18.3203 \\ -0.0220 & -0.0115 & 2.6720 & -0.3196 \\ -0.1458 & -0.1106 & 29.6227 & -3.4764 \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} -0.9448 & 0.0430 \\ 0.1296 & -0.0336 \\ 0.0881 & -0.0878 \\ -0.0231 & -0.7616 \end{bmatrix},$$

$$C_f = [-0.0016 \ -0.0006 \ 0.1762 \ -0.0183], \Omega = \begin{bmatrix} 3.4915 & -0.8264 \\ -0.8264 & 47.6900 \end{bmatrix}.$$

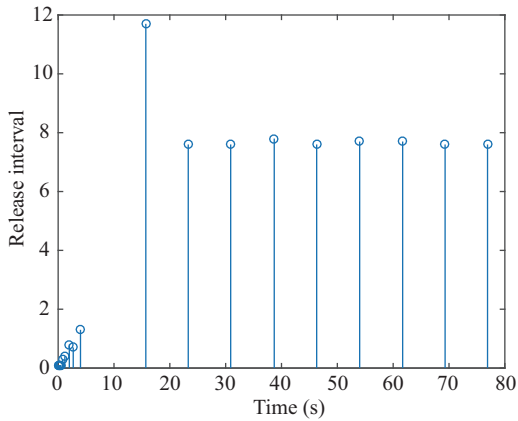


图 3 (网络版彩图) 事件触发机制下采样数据释放间隔图
Figure 3 (Color online) The release instants and intervals under event-triggered scheme

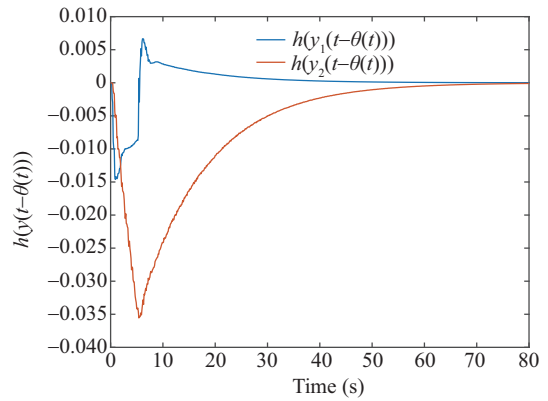


图 4 (网络版彩图) 网络攻击信号 $h(y(h - \theta(t)))$ 的响应曲线

Figure 4 (Color online) The response of cyber attacks signals $h(y(h - \theta(t)))$

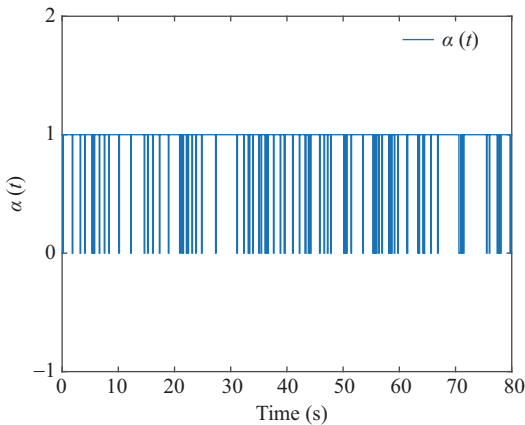


图 5 (网络版彩图) 网络攻击发生期望 $\bar{\alpha} = 0.1$ 时 $\alpha(t)$ 的 Bernoulli 序列

Figure 5 (Color online) The Bernoulli sequence of $\alpha(t)$ when the occurring expectation of cyber attacks is given $\bar{\alpha} = 0.1$

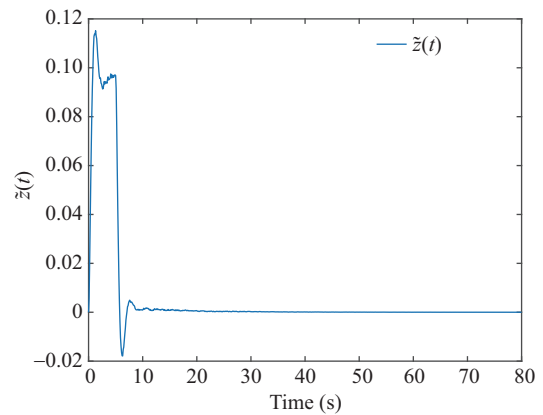


图 6 (网络版彩图) 滤波误差系统 (13) 估计误差 $\tilde{z}(t)$ 的响应曲线

Figure 6 (Color online) The response of estimation error $\tilde{z}(t)$ for filtering error system (13)

基于上述参数, 在系统和滤波器都为零初始状态时, 考虑事件触发和随机网络攻击的发生, 可得图 3~6 的仿真曲线图. 图 3 给出了事件触发机制下采样数据传输时刻和相邻两次传输时间间隔分布图; 图 4 刻画了网络攻击信号 $h(y(t - \theta(t)))$ 的响应曲线; 图 5 给出了描述网络攻击发生的随机变量 $\alpha(t)$ 在期望值 $\bar{\alpha} = 0.1$ 情况下的 Bernoulli 分布; 图 6 刻画了在图 3 事件触发机制和图 4 网络攻击以图 5 随机发生影响下滤波估计误差 $\tilde{z}(t)$ 的响应曲线.

从图 3 描述的事件触发机制下采样数据传输时刻和相邻两次传输时间间隔图可以看出, 在系统刚开始受到干扰时数据传输比较集中, 在系统稳定后相邻两次传输时间间隔较大, 显著地降低了采样数据的传输次数, 节约了网络带宽资源. 通过图 6 的仿真曲线图可以看出, 滤波误差状态可以在较短的

时间内趋于稳定, 这表明所设计滤波器的有效性.

5 结论

本文针对一类负荷频率控制电力系统, 研究网络环境下的 H_∞ 滤波器设计问题. 为了降低系统测量输出的传输量, 节约网络带宽资源, 引入事件触发机制对系统测量输出信号进行传输控制. 同时考虑随机网络攻击对数据传输过程的影响, 建立了基于事件触发和网络攻击的负荷频率控制电力系统 H_∞ 滤波误差模型. 基于此滤波误差模型, 利用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术分别给出了负荷频率控制电力系统均方渐近稳定的充分性条件和 H_∞ 滤波器设计方法. 最后仿真算例验证了本文所提 H_∞ 滤波器设计方法的有效性.

参考文献

- Martinez-Mares A, Fuerte-Esquivel C R. A robust optimization approach for the interdependency analysis of integrated energy systems considering wind power uncertainty. *IEEE Trans Power Syst*, 2013, 28: 3964–3976
- Deng S, Zhou A H, Yue D, et al. Distributed intrusion detection based on hybrid gene expression programming and cloud computing in a cyber physical power system. *IET Control Theory Appl*, 2017, 11: 1822–1829
- Ma M M, Zhang C Y, Liu X J, et al. Distributed model predictive load frequency control of the multi-area power system after deregulation. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 5129–5139
- Zhang Y, Liu X J. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems. *Control Theory Appl*, 2016, 33: 621–630 [张怡, 刘向杰. 互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制. *控制理论与应用*, 2016, 33: 621–630]
- Jiang L, Yao W, Wu Q H, et al. Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays. *IEEE Trans Power Syst*, 2012, 27: 932–941
- Zhang C K, Jiang L, Wu Q H, et al. Further results on delay-dependent stability of multi-area load frequency control. *IEEE Trans Power Syst*, 2013, 28: 4465–4474
- Peng C, Zhang J. Delay-distribution-dependent load frequency control of power systems with probabilistic interval delays. *IEEE Trans Power Syst*, 2016, 31: 3309–3317
- Liu J L, Tang J, Fei S M. Event-based state estimation for delayed neural network systems with quantization. *Sci Sin Inform*, 2016, 46: 1555–1568 [刘金良, 汤佳, 费树岷. 基于事件触发和量化的时滞神经网络系统状态估计. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46: 1555–1568]
- Yue D, Tian E, Han Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Trans Autom Control*, 2013, 58: 475–481
- Su X, Liu X, Song Y D. Event-triggered sliding-mode control for multi-area power systems. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 6732–6741
- Dou C X, Yue D, Guerrero J M. Multiagent system-based event-triggered hybrid controls for high-security hybrid energy generation systems. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 13: 584–594
- Peng C, Li J C, Fei M R. Resilient event-triggering H_∞ load frequency control for multi-area power systems with energy-limited DoS attacks. *IEEE Trans Power Syst*, 2017, 32: 4110–4118
- Yuan H H, Xia Y Q. Secure filtering for stochastic non-linear systems under multiple missing measurements and deception attacks. *IET Control Theory Appl*, 2018, 12: 515–523
- Ding D R, Wei G L, Zhang S J, et al. On scheduling of deception attacks for discrete-time networked systems equipped with attack detectors. *Neurocomputing*, 2017, 219: 99–106
- Li Y, Zhang P, Zhang L, et al. Active synchronous detection of deception attacks in microgrid control systems. *IEEE Trans Smart Grid*, 2017, 8: 373–375
- Ma L F, Wang Z D, Han Q L, et al. Variance-constrained distributed filtering for time-varying systems with multiplicative noises and deception attacks over sensor networks. *IEEE Sens J*, 2017, 17: 2279–2288

- 17 Luo Y Q, Wang Z D, Wei G L, et al. Robust H_∞ filtering for a class of two-dimensional uncertain fuzzy systems with randomly occurring mixed delays. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2017, 25: 70–83
- 18 Tian E G, Yue D. Reliable H_∞ filter design for T-S fuzzy model-based networked control systems with random sensor failure. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2013, 23: 15–32
- 19 Yan H C, Qian F F, Yang F W, et al. H_∞ filtering for nonlinear networked systems with randomly occurring distributed delays, missing measurements and sensor saturation. *Inf Sci*, 2016, 370: 772–782
- 20 Liu S, Liu P X. Distributed model-based control and scheduling for load frequency regulation of smart grids over limited bandwidth networks. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 1814–1823
- 21 Song Y D, Ao W, Wen C Y. Adaptive cyber-physical system attack detection and reconstruction with application to power systems. *IET Control Theory Appl*, 2016, 10: 1458–1468
- 22 An L, Yang G H. Improved adaptive resilient control against sensor and actuator attacks. *Inf Sci*, 2018, 423: 145–156
- 23 Ding D R, Wang Z D, Ho D W C, et al. Observer-based event-triggering consensus control for multiagent systems with lossy sensors and cyber-attacks. *IEEE Trans Cybern*, 2017, 47: 1936–1947
- 24 Liu J L, Xia J L, Tian E G, et al. Hybrid-driven-based H_∞ filter design for neural networks subject to deception attacks. *Appl Math Comput*, 2018, 320: 158–174
- 25 Gao H J, Meng X Y, Chen T W. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization. *IEEE Trans Autom Control*, 2008, 53: 2142–2148
- 26 Ge X H, Han Q L. Distributed event-triggered H_∞ filtering over sensor networks with communication delays. *Inf Sci*, 2015, 291: 128–142
- 27 Lin C, Wang Q G, Lee T H, et al. H_∞ filter design for nonlinear systems with time-delay through T-S fuzzy model approach. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2008, 16: 739–746

Event-based H_∞ filter design for load-frequency control systems under cyber-attacks

Jinliang LIU^{1,2*}, Yuanyuan GU¹ & Shumin FEI³

1. *College of Information Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;*

2. *Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China;*

3. *School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China*

* Corresponding author. E-mail: liujinliang@vip.163.com

Abstract This work investigated the design of an event-based H_∞ filter for a class of load-frequency control systems under cyber-attacks. An event-triggered communication scheme was introduced to save the resources of limited network bandwidth by reducing the measurement output transmitted from the load-frequency control system. This model was established for the power systems by considering the stochastic cyber-attacks that exist during the transmission process. Sufficient conditions that guaranteed the stability of the load-frequency control system were obtained with Lyapunov stability theory on the basis of the established model. The design approach of H_∞ filter was established by utilizing the linear matrix inequality technique. Finally, an application of the proposed approach was demonstrated.

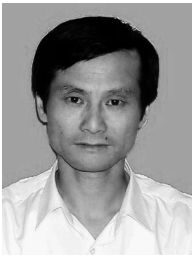
Keywords power system, event-triggered scheme, cyber-attacks, H_∞ filtering, networked control systems



Jinliang LIU received his Ph.D. degree from the School of Information Science and Technology at Donghua University. From December 2013 to June 2016, he worked as a postdoctoral research associate at the School of Automation, Southeast University, Nanjing, China. From October 2016 to October 2017, he worked as a visiting researcher/scholar with the Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong. From November 2017 to January 2018, he worked as a visiting scholar at the Department of Electrical Engineering, Yeungnam University, South Korea. He is currently working as an associate professor at the Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing, China. His main research interests are networked control systems, complex dynamical networks, T-S fuzzy systems, and time delay systems.



Yuanyuan GU was born in Jiangsu Province, China, in 1994. She received her B.S. degree from Xuzhou Medical University in 2016. She is currently pursuing an M.S. degree at the College of Information Engineering, Nanjing University of Finance and Economics. Her research interests include networked control systems, power systems, and time delay systems.



Shumin FEI received his Ph.D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1995. From 1995 to 1997, he was a postdoctoral research fellow at the Southeast University. Currently, he is working as a professor and doctoral advisor at the School of Automation, Southeast University. His research interests include nonlinear systems, stability theory of delayed systems, and complex systems.