

控制与决策

Control and Decision

混合攻击下直流微电网的FDI估计与模糊控制联合设计

解相朋, 杨馥伊, 魏聪, 葛辉, 岳东

引用本文:

解相朋, 杨馥伊, 魏聪, 葛辉, 岳东. 混合攻击下直流微电网的FDI估计与模糊控制联合设计[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2335–2345.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0173>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[分布式最小二乘估计中隐匿FDI攻击策略的设计](#)

Hidden FDI attack strategy for distributed least square estimation

控制与决策. 2021, 36(8): 1963–1969 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1688>

[基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 \$H_\infty\$ 控制](#)

Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087–1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

[工业信息物理系统安全风险动态表现分析量化评估模型](#)

Quantitative evaluation model for dynamic performance analysis of security risk in industrial cyber physics systems

控制与决策. 2021, 36(8): 1939–1946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1479>

[自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性](#)

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

[事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 \$H_\infty\$ 故障检测](#)

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

混合攻击下直流微电网的 FDI 估计与模糊控制联合设计

解相朋^{1,2†}, 杨馥伊¹, 魏聪¹, 葛辉², 岳东^{1,2}

(1. 南京邮电大学 碳中和先进技术研究院, 南京 210023;

2. 南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 南京 210023)

摘要: 研究基于 T-S 模糊模型的直流微电网 (DC-MG) 系统在拒绝服务 (DoS) 和虚假数据注入 (FDI) 混合攻击下的协同估计控制框架. 考虑网络化 T-S 模糊模型和并行分布补偿 (PDC) 模糊控制规则中的非均匀时间尺度, 建立 DC-MG 系统的 T-S 模型. 为了放宽现有的 DoS 攻击模型通常假定攻击的频率和持续时间均有限的要求, 在攻击信号的休眠和活跃期的已知范围内提出一种新的 DoS 攻击模型. 同时, 构造一个切换脉冲观测器来估计由外部动态系统产生的未知 FDI 攻击信号. 然后, 利用依赖于攻击参数的时变 Lyapunov 函数方法, 导出系统在混合攻击下的指数稳定性判据. 此外, 基于线性矩阵不等式给出了模糊控制器和 FDI 攻击观测器的联合设计方法. 最后, 通过案例研究验证了所提出理论结果的有效性.

关键词: T-S 模糊; 直流微电网; 拒绝服务攻击; 虚假数据注入攻击; 时变 Lyapunov 函数; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0173

引用格式: 解相朋, 杨馥伊, 魏聪, 等. 混合攻击下直流微电网的 FDI 估计与模糊控制联合设计 [J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2335-2345.

Joint design of FDI estimation and fuzzy control for DC microgrid under hybrid attacks

XIE Xiang-peng^{1,2†}, YANG Fu-yi¹, WEI Cong¹, GE Hui², YUE Dong^{1,2}

(1. Institute of Carbon Neutral Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper studies the cooperative estimation control framework of a DC microgrid (DC-MG) system based on a T-S fuzzy model under the hybrid attacks of denial of service (DoS) and false data injection (FDI). The T-S model of the DC-MG system is established considering the non-uniform time scale of parallel distributed compensation (PDC) fuzzy control rules and the networked T-S fuzzy model. In order to relax the requirement that existing DoS attack models usually assume that the attack frequency and duration are limited, a new DoS attack model is proposed within the known range of the sleep and active periods of the attack signal. At the same time, a switching pulse observer is constructed to estimate the unknown FDI attack signal generated by the external dynamic system. Then, using the time-varying Lyapunov function method depending on the attack parameters, the exponential stability criterion of the system under hybrid attacks is derived. In addition, a joint design method of the fuzzy controller and the FDI attack observer based on linear matrix inequality is presented. Finally, the effectiveness of the proposed theoretical results is verified by a case study.

Keywords: T-S fuzzy; DC microgrid; denial of service attack; false data injection attack; time-varying Lyapunov function; linear matrix inequality

0 引言

微电网作为一个综合电力框架, 是将分布式可再生能源发电产生的电力连接到电力系统的重要接口, 已成为传统电网的可行替代方案. 目前, 微电网的

研究已成为科学家们的研究热点^[1-2]. 根据供电方式的不同, 微电网可分为以下 3 类: DC-MG、交流微电网和交直流混合微电网. 然而, 与交流微电网和交直流混合微电网不同, DC-MG 系统不存在同步、谐波、无

收稿日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62022044).

责任编委: 孙秋野.

†通讯作者. E-mail: xiexiangpeng1953@163.com.

功率控制和频率控制等问题,已成为大多数科研人员的重点研究对象.

值得指出的是,在信息物理系统中用于数据传输的通信网络是开放的.这意味着,作为信息物理系统中的一个典型,非线性DC-MG系统极易受到恶意网络攻击.一般来说,常见的网络攻击包括拒绝服务(denial of service, DOS)攻击^[3-4]、虚假数据注入(false data injection, FDI)攻击^[5-6]、重放攻击^[7]等.其中DoS和FDI攻击被视为最具破坏性的网络攻击场景.具体而言,DoS攻击旨在损害测量信号和/或控制输入的可用性,从而导致数据包丢失.FDI攻击旨在操纵信息并将恶意数据注入系统的通信链路,以降低系统的控制性能.显然,两者都会降低受攻击系统的性能,甚至使系统不稳定.

近年来,为了提高DC-MG系统在FDI攻击下的韧性,已有诸多研究成果.文献[8]针对控制通讯信道受到FDI攻击的DC-MG系统母线电压波动问题提出了一种基于滑模控制方法的镇定策略.文献[9]研究了一类无界FDI攻击下的DC-MG电流分配和电压回复问题,提出了一种集FDI攻击检测和系统恢复于一体的控制方法.文献[10]提出了一种基于数据驱动的FDI攻击快速防御策略.然而,上述报告均没有考虑现实中存在多种攻击的场景,具有一定的局限性.

目前,很少有研究关注DC-MG在多种网络攻击下的稳定性和弹性问题.尽管在文献[11-12]中已经提出了一些能有效应对DoS和FDI混合攻击的重要措施,但仍存在一些局限性:1)所涉及的DoS攻击模型不通用,应用受限;2)并未聚焦于DoS攻击存在时的FDI攻击估计与攻击补偿;3)DoS和FDI攻击的参数未被包含于DoS弹性和FDI攻击补偿集成的控制器设计中.另一方面,在实际应用中,DC-MG具有高维非线性的特点,难以精确建模.T-S模糊系统^[13]正是因为能够建模非线性系统而被证明是模糊控制领域的一个有效模型.这引起了人们对T-S模糊控制的DC-MG系统的极大关注.例如,文献[14]基于T-S模糊模型和模型预测方案研究了用于DC-MG动态稳定网络化可控功率缓冲器的模糊模型预测控制综合问题.此外,文献[15]针对DC-MG的动态稳定性,提出了一种用于鲁棒非脆弱模糊控制的功率缓冲器综合方法.文献[16]针对具有多个恒功率负载(constant power load, CPL)的DC-MG系统,提出了一种基于T-S模糊模型的功率缓冲状态反馈控制器的改进设计方法.文献[17]提出了一种基于模糊逻辑控制器的孤岛微电网电压-频率控制方法.然而,对于

DC-MG系统,网络攻击下的模糊控制结果仍然相对缺乏,尤其是在DoS和FDI混合攻击下模糊依赖的控制器设计问题亟待解决.这是本文的研究动机.

受上述讨论的启发,本文旨在研究DoS和FDI混合攻击下非线性DC-MG T-S模糊系统的FDI攻击估计与模糊控制器设计.本文的主要工作如下:首先,针对DC-MG系统,采用一种新的DoS攻击模型,该模型只需预先知道DoS攻击的持续时间特征;其次,建立一个脉冲切换模糊系统模型,以在统一的框架中表征FDI攻击对执行器以及DoS攻击对通信网络的影响,并通过设计一些与DoS参数相关的辅助函数,引入时变Lyapunov函数分析技术,导出DC-MG系统的指数稳定性判据;最后,提出模糊控制器和FDI攻击观测器的联合设计方法,以保证受到混合攻击的DC-MG系统的指数稳定性.所提出的基于观测器的模糊控制策略可以自动估计和补偿未知的FDI攻击,同时减轻DoS和FDI攻击的不利影响,而对DoS和FDI攻击的频率以及FDI攻击信号的导数没有任何限制.

1 系统建模

考虑一个典型结构^[18]的DC-MG系统,其中包括发电机、储能装置、电力电子逆变装置、滤波器、负载等.相应的简化电路如图1所示.

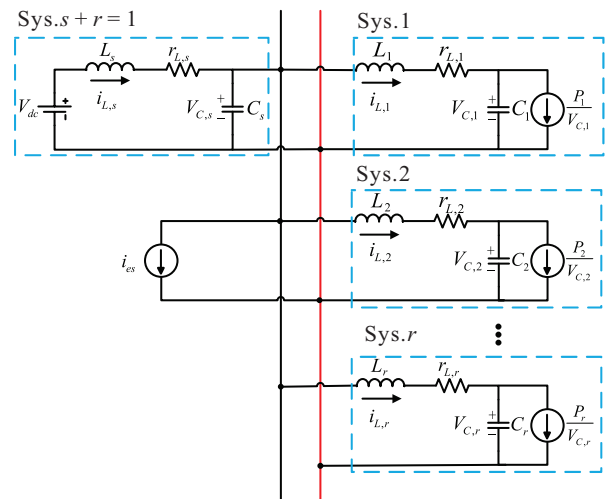


图1 DC-MG系统的简化电路

1.1 DC-MG系统模型

根据简化电路图,将整个DC-MG系统解耦为 $r+1$ 个子系统,即 r 个CPL系统和1个储能系统(energy storage system, ESS).其中第 j 个CPL的状态方程^[18]可以表示为

$$\dot{x}_j(t) = A_j x_j(t) + d_j h_j(x_j(t)) + A_{js} x_s(t). \quad (1)$$

其中

$$x_j(t) = [i_{L,j} \quad v_{C,j}]^T, \quad j = 1, 2, \dots, r, \quad s = r + 1,$$

$$A_j = \begin{bmatrix} -\frac{r_{L,j}}{L_j} & -\frac{1}{L_j} \\ \frac{1}{C_j} & 0 \end{bmatrix}, d_j = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_j} \end{bmatrix},$$

$$A_{js} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_j} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, h_j(x_j(t)) = \frac{P_j}{v_{C,j}};$$

$i_{L,j}$ 和 $v_{C,j}$ 分别表示第 j 个 CPL 中的电感电流和电容电压, $r_{L,j}$ 和 L_j 分别表示源变换器到第 j 个 CPL 的线路电阻和滤波器电感, C_j 表示第 j 个 CPL 的输入电容, P_j 表示第 j 个 CPL 的功率.

另外, ESS 的状态方程可以描述为

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + b_s V_{dc} + b_{es} i_{es}(t) + \sum_{j=1}^r A_{cn} x_j(t). \quad (2)$$

其中

$$x_s(t) = [i_{L,s} \ v_{C,s}]^T, s = r + 1,$$

$$A_s = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}, b_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{cn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}, b_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_s} \end{bmatrix};$$

$i_{L,s}$ 和 $v_{C,s}$ 分别表示 ESS 中的电感电流和电容电压, V_{dc} 表示直流电源, $i_{es}(t)$ 代表注入电流, r_s 和 L_s 分别表示 ESS 中的线路电阻和滤波器电感, C_s 表示源变换器的输出电容.

综合以上 r 个 CPL 子系统和 1 个 ESS 子系统, 整个 DC-MG 系统的非线性动力学方程可以描述为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + DH(x(t)) + B_{es} i_{es}(t) + B_s V_{dc}. \quad (3)$$

其中

$$x(t) = [x_1^T(t) \ x_2^T(t) \ \dots \ x_r^T(t) \ x_s^T(t)]^T,$$

$$H(x(t)) = [h_1(x_1(t)) \ h_2(x_2(t)) \ \dots \ h_r(x_r(t))]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 & A_{1s} \\ 0 & A_2 & \dots & 0 & A_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_r & A_{rs} \\ A_{cn} & A_{cn} & \dots & A_{cn} & A_s \end{bmatrix}, B_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_{es} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_r \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_s \end{bmatrix}.$$

采用坐标变换法将系统 (3) 的平衡点转移到原点, 非线性直流微电网系统模型^[14] 可以重新写为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + DH(\tilde{x}(t)) + B_{es} i_{es}(t). \quad (4)$$

其中: $\tilde{x}(t) = x(t) - x_0 = [\tilde{x}_1^T(t) \ \tilde{x}_2^T(t) \ \dots \ \tilde{x}_s^T(t)]^T$, $H(\tilde{x}(t)) = [h_1(\tilde{x}_1(t)) \ h_2(\tilde{x}_2(t)) \ \dots \ h_r(\tilde{x}_r(t))]^T$, x_0 表示直流微电网的平衡点, $v_{C0,j}$ 表示 $v_{C,j}$ 的平衡点,

$$h_j(\tilde{x}_j(t)) = \frac{P_j \tilde{v}_{C,j}}{v_{C0,j}(\tilde{v}_{C,j} + v_{C0,j})}. \quad (5)$$

1.2 T-S 模糊模型

由于 DC-MG 系统具有高维非线性的特点, 为了提高系统建模的精确性, 考虑采用 T-S 模糊控制. 为了推导 DC-MG 的 T-S 模糊模型, 采用扇区非线性方法. 在预定义的局部区域内, 通过等效 T-S 模型精确表示每个非线性. 对于第 j 个 CPL, 若用 $\tilde{\varepsilon}_{1,j}$ 和 $\tilde{\varepsilon}_{2,j}$ 表示一对正标量, 则可定义区域 $R_{j,\tilde{x}} = \{\tilde{x} | -\tilde{\varepsilon}_{1,j} \leq \tilde{i}_{L,j} \leq \tilde{\varepsilon}_{1,j}, -\tilde{\varepsilon}_{2,j} \leq \tilde{v}_{C,j} \leq \tilde{\varepsilon}_{2,j}\}$.

对于含单个 CPL (即 $r = 1$) 的 DC-MG 系统, 在局部区域 $R_{j,\tilde{x}}$ 中 $j = 1$ 的情况下, 非线性项 (5) 的上下扇区计算为 $U_{\min} \tilde{v}_{C,1} \leq h_1 \leq U_{\max} \tilde{v}_{C,1}$, 其中

$$\begin{cases} U_{\min} = \frac{1}{v_{C0,1}(\tilde{\varepsilon}_{2,1} + v_{C0,1})}, \\ U_{\max} = \frac{1}{v_{C0,1}(-\tilde{\varepsilon}_{2,1} + v_{C0,1})}. \end{cases}$$

基于扇区非线性方法, 考虑

$$\begin{cases} h_1 = M_1 U_{\min} \tilde{v}_{C,1} + M_2 U_{\max} \tilde{v}_{C,1}, \\ M_1 + M_2 = 1, \end{cases} \quad (6)$$

求解式 (6) 得到隶属函数

$$\begin{cases} M_1 = \frac{U_{\max} \tilde{v}_{C,1} - h_1}{(U_{\max} - U_{\min}) \tilde{v}_{C,1}}, \\ M_2 = \frac{h_1 - U_{\min} \tilde{v}_{C,1}}{(U_{\max} - U_{\min}) \tilde{v}_{C,1}}. \end{cases} \quad (7)$$

获得的具有单个 CPL 的直流微电网模糊 IF-THEN 规则的形式如下:

规则 1: 如果 $h_1/\tilde{v}_{C,1}$ 是 U_{\min} , 则 $\dot{\tilde{x}}(t) = A_1 \tilde{x}(t) + B_{es} i_{es}(t)$;

规则 2: 如果 $h_1/\tilde{v}_{C,1}$ 是 U_{\max} , 则 $\dot{\tilde{x}}(t) = A_2 \tilde{x}(t) + B_{es} i_{es}(t)$. 其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{C_1} & \frac{P_1 U_{\min}}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{1}{C_s} & 0 & \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{C_1} & \frac{P_1}{C_1}U_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{1}{C_s} & 0 & \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}$$

将式(6)代入(4),可得到等效T-S模糊模型为

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{p=1}^2 M_p \{A_p \hat{x}(t) + B_{es} i_{es}(t)\}. \quad (8)$$

由式(8)可以看出,模糊模型由非线性隶属函数 M_p 和线性状态空间表达式 $A_p \hat{x} + B_{es} i_{es}$ 组成, $p = 1, 2$.

基于T-S模糊模型和PDC方案,建议采用以下模糊控制器:

$$i_{es}(t) = \sum_{q=1}^2 M_q K_q \hat{x}(t), \quad (9)$$

其中 $K_q (q = 1, 2)$ 是控制增益矩阵.

注1 所谓PDC方法是T-S模型框架下控制器设计的一种典型方法^[19].然而,由于非线性DC-MG系统运用通信网络进行数据传输,T-S模型和PDC控制规则中的前提变量应具有不同的时间尺度,即它们是异步的.也就是说,一般的PDC方法不能被直接推广应用于DC-MG系统(4).为解决上述问题,巧妙构建同步前提是很有必要的.特别地,文献[20]中有该方法的详细讨论,此处省略.

1.3 DoS攻击与FDI攻击

本文考虑的混合攻击包括DoS攻击与FDI攻击.恶意攻击者对无线通信链路发起混合攻击,以阻断信号传输和篡改信号,如图2所示.

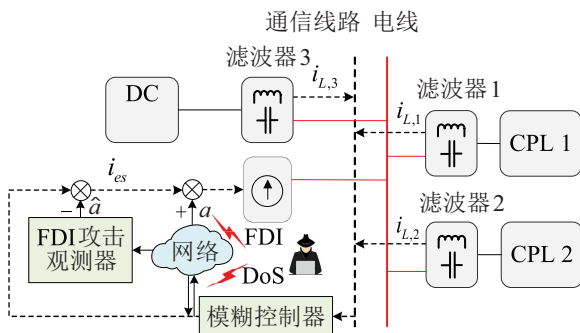


图2 DC-MG系统在混合攻击下的示意图

用 $a(t)$ 表示FDI攻击信号,基于T-S模糊的DC-MG系统模型可改写为

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{p=1}^2 M_p \{A_p \hat{x}(t) + B_{es}(i_{es}(t) + a(t))\}. \quad (10)$$

1.3.1 DoS攻击

针对DoS攻击,设计非周期性DoS攻击信号 $I_{DoS}(t)$ 的数学模型为

$$I_{DoS}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [m_n, m_n + h_n); \\ 1, & t \in [m_n + h_n, m_{n+1}). \end{cases} \quad (11)$$

其中 $n \in \mathbf{N}$ 表示DoS攻击关闭/开始的切换次数.令 $T_{1,n} \triangleq [m_n, m_n + h_n), T_{2,n} \triangleq [m_n + h_n, m_{n+1})$,其中 $0 < m_n < m_n + h_n < m_{n+1}$.时间域 $T_{1,n}$ 表示DoS攻击的休眠期,而时间域 $T_{2,n}$ 表示DoS攻击的活跃期.此外,定义 $T_n = T_{1,n} \cup T_{2,n}, b_n = m_{n+1} - m_n - h_n$ 以及DoS攻击关闭/开始的切换时刻

$$t_{i,n} = \begin{cases} m_n, & i = 1; \\ m_n + h_n, & i = 2. \end{cases}$$

对于DoS攻击休眠期的持续时间 h_n 和DoS攻击活跃期的持续时间 b_n ,满足以下假设.

假设1 对于能量有限的DoS攻击信号(11),存在4个正标量满足

$$h_{\min} \leq h_n \leq h_{\max}, b_{\min} \leq b_n \leq b_{\max}. \quad (12)$$

其中: $n \in \mathbf{N}, h_{\max}$ 和 h_{\min} 分别为休眠期长度的上下界, b_{\min} 和 b_{\max} 分别为活跃期长度的上下界.

注2 与文献[21]中所考虑的DoS攻击模型不同,本文没有限制DoS攻击的频率,只对DoS攻击休眠期和活跃期的持续时间进行了约束.因攻击者的能量预算是有限的,每次DoS攻击通常不会持续很长时间,所以 $h_n \rightarrow 0$ 和 $b_n \rightarrow \infty$ 的情况不会出现.另一方面,如果攻击休眠时间过长,则意味着长时间没有攻击,这不是本文的研究重点.换言之, $h_n \rightarrow \infty$ 和 $b_n \rightarrow 0$ 的情况不存在.进一步地,根据文献[22]中提出的辨识方法,可以估计出上述假设中的4个参数.因此,假设1是合理的.

1.3.2 FDI攻击

针对FDI攻击,假设未知攻击 $a(t)$ 由恶意攻击者按以下动力系统^[23-24]生成:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = C\xi(t), \\ a(t) = E\xi(t). \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\xi(t) \in \mathbf{R}^{2s \times 1}, C \in \mathbf{R}^{2s \times 2s}, E \in \mathbf{R}^{1 \times 2s}$ 是已知的常数矩阵.

注3 FDI攻击模型(13)比现有的一些模型^[8-12]更通用,因为周期性攻击、偏差攻击和谐波攻击均相当于其特例^[25].此外,攻击者可任意选取矩阵 C 和 E 来破坏控制信号.通常,为了防止被检测,矩阵 C 被选

择为Hurwitz矩阵,这使得注入的信号 $a(t)$ 不会趋近无穷大,可以达到攻击隐身的效果^[26].同时,随着攻击者变得越来越老练且足智多谋,假设攻击者可以访问所有底层系统信息.

1.4 FDI攻击观测器模型

根据文献[27],若 $\xi = \xi(t)$ 是初始条件为 $\xi(0) = \xi_0$ 的系统(13)的唯一解,则对于给定的矩阵 L ,由

$$m(t) = \begin{cases} \xi(t) - L\tilde{x}(t), & t \in T_{1,n}; \\ \xi(t), & t \in T_{2,n} \end{cases} \quad (14)$$

定义函数 $m = m(t)$ 是脉冲系统

$$\begin{cases} \dot{m}(t) = \sum_{p=1}^2 M_p \{ (C - LB_{es}E)m(t) + (CL - LA_p - LB_{es}EL)\tilde{x}(t) - LB_{es}i_{es}(t) \}, & t \in T_{1,n}; \\ \dot{m}(t) = Cm(t), & t \in T_{2,n}; \\ m(t_{1,n+1}) = m(t_{1,n+1}^-) - L\tilde{x}(t_{1,n+1}); \\ m(t_{2,n}) = m(t_{2,n}^-) + L\tilde{x}(t_{2,n}); \\ m(0) = m_0 \triangleq \xi_0 - L\tilde{x}_0 \end{cases} \quad (15)$$

的唯一解,式中 $t_{i,n}^-$ 表示 $t_{i,n}$ 的左逼近时刻.

反之,若 $m = m(t)$ 是系统(15)的唯一解,则由

$$\xi(t) = \begin{cases} m(t) + L\tilde{x}(t), & t \in T_{1,n}; \\ m(t), & t \in T_{2,n} \end{cases} \quad (16)$$

定义的 $\xi = \xi(t)$ 是初始条件为 $\xi(0) = \xi_0$ 的系统(13)的唯一解.

为了估计未知攻击信号 $a(t)$,设计以下跟踪攻击观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{m}}(t) = \sum_{p=1}^2 M_p \{ (C - LB_{es}E)\hat{m}(t) + (CL - LA_p - LB_{es}EL)\tilde{x}(t) - LB_{es}i_{es}(t) \}, & t \in T_{1,n}; \\ \dot{\hat{m}}(t) = C\hat{m}(t), & t \in T_{2,n}; \\ \hat{m}(t_{1,n+1}) = \hat{m}(t_{1,n+1}^-) - L\tilde{x}(t_{1,n+1}); \\ \hat{m}(t_{2,n}) = \hat{m}(t_{2,n}^-) + L\tilde{x}(t_{2,n}); \\ \hat{\xi}(t) = \begin{cases} \hat{m}(t) + L\tilde{x}(t), & t \in T_{1,n}; \\ \hat{m}(t), & t \in T_{2,n}. \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

此外,定义攻击观测误差 $e(t) = \xi(t) - \hat{\xi}(t)$.根据式(15)~(17)可得

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \begin{cases} (C - LB_{es}E)e(t), & t \in T_{1,n}; \\ Ce(t), & t \in T_{2,n}; \end{cases} \\ e(0) = e_0 \triangleq \xi(0) - \hat{\xi}(0). \end{cases} \quad (18)$$

1.5 基于混合攻击的DC-MG切换系统模型

针对混合攻击下的DC-MG,设计切换型模糊控制器

$$i_{es}(t) = \begin{cases} \sum_{q=1}^2 M_q K_q \tilde{x}(t) - E\hat{\xi}(t), & t \in T_{1,n}; \\ -E\hat{\xi}(t), & t \in T_{2,n}. \end{cases} \quad (19)$$

根据(10)、(13)、(18)和(19),可以得出基于T-S模糊的切换型系统模型

$$\dot{\tilde{x}}_e(t) = \bar{A}_i \tilde{x}_e(t), \quad t \in T_{i,n}, i = 1, 2. \quad (20)$$

其中

$$\tilde{x}_e(t) = \text{col}[\tilde{x}(t), e(t)],$$

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^2 M_p \left\{ A_p + \sum_{q=1}^2 M_q B_{es} K_q \right\} & B_{es} E \\ 0 & C - LB_{es} E \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_2 = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^2 M_p A_p & B_{es} E \\ 0 & C \end{bmatrix}.$$

此时,主要控制目标可以表述为:给定DoS攻击参数 $h_{\min}, h_{\max}, b_{\min}, b_{\max}$ 和FDI攻击信号 $a(t)$,设计一个使系统(20)实现指数稳定的FDI攻击观测器(17)和切换型模糊控制器(19).

为了清楚起见,给出以下关于指数稳定的定义.

定义1 对于 $\tilde{x}_0 \in \mathbf{R}$,如果存在两个正标量 α 和 β ,使得系统在任意 $t \geq 0$ 时满足 $\|\tilde{x}(t, 0, \xi_0)\| \leq \beta \|\tilde{x}_0\| e^{-\alpha t}$,则系统(20)可称为指数稳定.

2 主要结果

根据前面的讨论,在本节中提出混合攻击下非线性DC-MG系统(20)的指数稳定性准则.在此基础上,给出FDI攻击观测器增益 L 和切换型模糊控制器增益 K_q 的联合设计方法.在给出主要结果之前,需要定义以下时间辅助函数序列:

$$\tau_{0,n}(t) = \begin{cases} h_n, & t \in \bigcup_{n \in \mathbf{N}} T_{1,n}; \\ b_n, & t \in \bigcup_{n \in \mathbf{N}} T_{2,n}; \end{cases}$$

$$\tau_{1,n}(t) = \begin{cases} \frac{t - m_n}{h_n}, & t \in \bigcup_{n \in \mathbf{N}} T_{1,n}; \\ \frac{t - (m_n + h_n)}{b_n}, & t \in \bigcup_{n \in \mathbf{N}} T_{2,n}; \end{cases}$$

$$\tau_{2,n}(t) = 1 - \tau_{1,n}(t);$$

$$\xi_{i,n}(t) = \sigma_i^{\tau_{1,n}(t)}, \sigma_i > 0, i = 1, 2;$$

$$\mu_{1k} = \begin{cases} h_{\min}, & k = 1; \\ h_{\max}, & k = 2; \end{cases}$$

$$\mu_{2k} = \begin{cases} b_{\min}, & k = 1; \\ b_{\max}, & k = 2. \end{cases}$$

2.1 指数稳定性分析

定理1 对于给定的正标量 $\mu_{ik}(i, k = 1, 2), \sigma_i(i = 1, 2)$ 和矩阵 $K_q(q = 1, 2)$ 及 L , 如果存在适当维数的正定矩阵 $Q_{ij}(i, j = 1, 2)$ 满足以下线性矩阵不等式:

$$A_{1jk} + \begin{bmatrix} \Pi_{1j}^{pp} & Q_{1j} B_{es} E \\ * & \Omega_1 \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

$$A_{1jk} + \begin{bmatrix} \Pi_{1j}^{12} + \Pi_{1j}^{21} & Q_{1j} B_{es} E \\ * & \Omega_1 \end{bmatrix} < 0, \quad (22)$$

$$A_{2jk} + \begin{bmatrix} \Pi_{2j}^p & Q_{2j} B_{es} E \\ * & \Omega_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (23)$$

$$Q_{i2} \leq \sigma_{3-i} Q_{3-i,1}, \quad (24)$$

则系统(20)是指数稳定的. 其中

$$A_{ijk} = \frac{\ln \sigma_i}{\mu_{ik}} Q_{ij} + \frac{1}{\mu_{ik}} (Q_{i1} - Q_{i2}),$$

$$\Pi_{1j}^{pq} = Q_{1j} (A_p + B_{es} K_q) + (A_p + B_{es} K_q)^T Q_{1j},$$

$$\Pi_{2j}^p = Q_{2j} A_p + A_p^T Q_{2j},$$

$$\Omega_1 = (C - L B_{es} E)^T Q_{1j} + Q_{1j} (C - L B_{es} E),$$

$$\Omega_2 = C^T Q_{2j} + Q_{2j} C.$$

证明 首先, 根据式(21)~(23)可以得到: 对于 $i, j, k = 1, 2$, 存在一个足够小的正标量 α 满足以下不等式:

$$\tilde{\Delta}_{1jk} = \tilde{\Lambda}_{1jk} + \begin{bmatrix} \Pi_{1j}^{pp} & Q_{1j} B_{es} E \\ * & \Omega_1 \end{bmatrix} < 0, \quad (25)$$

$$\tilde{\nabla}_{1jk} = \tilde{\Lambda}_{1jk} + \begin{bmatrix} \Pi_{1j}^{12} + \Pi_{1j}^{21} & Q_{1j} B_{es} E \\ * & \Omega_1 \end{bmatrix} < 0, \quad (26)$$

$$\tilde{\Delta}_{2jk} = \tilde{\Lambda}_{2jk} + \begin{bmatrix} \Pi_{2j}^p & Q_{2j} B_{es} E \\ * & \Omega_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (27)$$

其中 $\tilde{\Lambda}_{ijk} = \left(\alpha + \frac{\ln \sigma_i}{\mu_{ik}}\right) Q_{ij} + \frac{1}{\mu_{ik}} (Q_{i1} - Q_{i2})$.

其次, 构建攻击参数相关的时变 Lyapunov 函数

$$V(t) = e^{\alpha t} f(t, \tilde{x}_e(t)), \quad t \in (t_{i,n}, t_{3-i,n+i-1}),$$

其中 $f(t, \tilde{x}_e) = \xi_{i,n}(t) \tilde{x}_e^T(t) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(t) Q_{ij} \tilde{x}_e(t), i = 1, 2$. 对 $V(t)$ 求导后可得

$$\dot{V}(t) = e^{\alpha t} \xi_{i,n}(t) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(t) \left\{ \tilde{x}_e^T(t) \left[\left(\alpha + \frac{\ln \sigma_i}{\tau_{0,n}}\right) Q_{ij} + \frac{1}{\tau_{0,n}} (Q_{i1} - Q_{i2}) + \tilde{A}_i^T Q_{ij} + Q_{ij} \tilde{A}_i \right] \tilde{x}_e(t) \right\}. \quad (28)$$

考虑以下两种情况:

- 1) 当 $0 < \sigma_i < 1, \ln \sigma_i < 0$ 时, 若 $t \in T_{1,n}$, 则有 $\frac{\ln \sigma_i}{h_n} \leq \frac{\ln \sigma_i}{h_{\max}}$; 若 $t \in T_{2,n}$, 则有 $\frac{\ln \sigma_i}{b_n} \leq \frac{\ln \sigma_i}{b_{\max}}$.
- 2) 当 $\sigma_i > 1, \ln \sigma_i > 0$ 时, 若 $t \in T_{1,n}$, 则有 $\frac{\ln \sigma_i}{h_n} \leq \frac{\ln \sigma_i}{h_{\min}}$; 若 $t \in T_{2,n}$, 则有 $\frac{\ln \sigma_i}{b_n} \leq \frac{\ln \sigma_i}{b_{\min}}$.

综上所述, 可以得到

$$\frac{\ln \sigma_i}{\tau_{0,n}} \leq \frac{\ln \sigma_i}{\mu_{ik}}, \quad k = 1, 2. \quad (29)$$

根据式(25)~(29), 当 $i = 1$ 时, 可以得出

$$\dot{V}(t) \leq e^{\alpha t} \xi_{i,n}(t) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(t) x_e^T(t) \star_1 x_e(t) < 0,$$

其中 $\star_1 = \sum_{p=1}^2 M_p^2 \tilde{\Delta}_{1jk} + M_1 M_2 \tilde{\nabla}_{1jk}$. 而当 $i = 2$ 时, 有

$$\dot{V}(t) \leq e^{\alpha t} \xi_{i,n}(t) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(t) x_e^T(t) \star_2 x_e(t) < 0,$$

其中 $\star_2 = \sum_{p=1}^2 M_p \tilde{\Delta}_{2jk}$. 因此, 当 $t \in [t_{i,n}, t_{3-i,n+i-1})$ 时, 有

$$f(t) \leq e^{-\alpha(t-t_{i,n})} f(t_{i,n}). \quad (30)$$

此外, 由式(24)可得

$$f(t_{i,n}) = \xi_{i,n}(t_{i,n}) \tilde{x}_e^T(t_{i,n}) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(t_{i,n}) Q_{ij} \tilde{x}_e(t_{i,n}) = \tilde{x}_e^T(t_{i,n}) Q_{i2} \tilde{x}_e(t_{i,n}) \leq f(t_{i,n}^-). \quad (31)$$

其中用到 $\tau_{1,n}(t_{i,n}) = 0, \tau_{1,n}(t_{i,n}^-) = 1$, 并且 $f(t_{i,n}^-) = \sigma_{3-i} \tilde{x}_e^T(t_{i,n}) Q_{3-i,1} \tilde{x}_e(t_{i,n})$.

由式(30)和(31), 有 $f(t) \leq f(0) e^{-\alpha t}$. 因此, 易推导出以下结论:

$$\xi_{i,n}(t) \lambda_1 \|\tilde{x}_e(t)\|^2 \leq$$

$$\begin{aligned} & \xi_{i,n}(t)\tilde{x}_e^T(t) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(t)Q_{ij}\tilde{x}_e(t) \leq \\ & \xi_{1,n}(t)\tilde{x}_e^T(0) \sum_{j=1}^2 \tau_{j,n}(0)Q_{1j}\tilde{x}_e(0)e^{-\alpha t} \leq \\ & \lambda_2\|\tilde{x}_e(0)\|^2e^{-\alpha t}. \end{aligned} \quad (32)$$

其中: λ_1 表示 Q_{ij} 的最小特征值, λ_2 表示 Q_{12} 的最大特征值.

最后, 因为 $\xi_{i,n}(t) = \sigma_i \tau_{1,n}(t)$, $\tau_{1,n}(t) < 1$, 所以

$$\xi_{i,n}(t) \geq \min\{\sigma_1, \sigma_2, 1\}. \quad (33)$$

结合式(32)和(33), 可以得到

$$\|\tilde{x}_e(t)\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1 \min\{\sigma_1, \sigma_2, 1\}}} \|\tilde{x}_e(0)\| e^{-\frac{\alpha}{2}t}.$$

因此, 系统(20)是指数稳定的. \square

2.2 模糊控制器与FDI攻击观测器的联合设计

定理2 当 $i, j, k \in \{1, 2\}$ 时, 对于给定的正标量 μ_{ik} 、 σ_i 、 ς_i 和 ϖ_j , 如果存在适当维数的正定矩阵 P_{ij} 、 X_i 和矩阵 P_0 、 \hat{K}_q 、 \hat{L} 满足以下线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{11k}^{pp} & \zeta^T Y_{11}^p \\ * & -\varpi_1(P_0 + P_0^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{12k}^{pp} & \zeta^T P_{12} & \zeta^T Y_{12}^p \\ * & -\mu_{1k}P_{11} & 0 \\ * & * & -\varpi_2(P_0 + P_0^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} G_{11k}^{pq} & \zeta^T Y_{11}^{pq} \\ * & -\varpi_1(P_0 + P_0^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} G_{12k}^{pq} & \zeta^T P_{12} & \zeta^T Y_{12}^{pq} \\ * & -\mu_{1k}P_{11} & 0 \\ * & * & -\varpi_2(P_0 + P_0^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (37)$$

$$\Psi_{21k}^p < 0, \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{22k}^p & \zeta^T P_{22} \\ * & -\mu_{2k}P_{21} \end{bmatrix} < 0, \quad (39)$$

$$P_{11} \leq \sigma_1 P_{22}, \quad P_{21} \leq \sigma_2 P_{12}, \quad (40)$$

$$X_2 \leq \sigma_1 X_1, \quad X_1 \leq \sigma_2 X_2. \quad (41)$$

其中

$$\zeta = [I \ 0], \quad \Psi_{1jk}^{pq} = \begin{bmatrix} \Xi_{1jk}^{pq} & B_{es}E \\ * & \Theta_{1k} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{2jk}^p = \begin{bmatrix} \Xi_{2jk}^p & B_{es}E \\ * & \Theta_{2k} \end{bmatrix}, \quad G_{1jk}^{pq} = \begin{bmatrix} \Gamma_{1jk}^{pq} & B_{es}E \\ * & \Theta_{1k} \end{bmatrix},$$

$$\Xi_{11k}^{pq} = \frac{\ln \sigma_1 + 1 - 2\varsigma_1}{\mu_{1k}} P_{11} + \frac{\varsigma_1^2}{\mu_{1k}} P_{12} + A_p P_{11} +$$

$$\begin{aligned} & P_{11}A_p^T + B_{es}\hat{K}_q + \hat{K}_q^T B_{es}^T, \\ \Xi_{12k}^{pq} &= \frac{\ln \sigma_1 - 1}{\mu_{1k}} P_{12} + A_p P_{12} + P_{12}A_p^T + \\ & B_{es}\hat{K}_q + \hat{K}_q^T B_{es}^T, \\ \Xi_{21k}^p &= \frac{\ln \sigma_2 + 1 - 2\varsigma_2}{\mu_{2k}} P_{21} + \frac{\varsigma_2^2}{\mu_{2k}} P_{22} + \\ & A_p P_{21} + P_{21}A_p^T, \\ \Xi_{22k}^p &= \frac{\ln \sigma_2 - 1}{\mu_{2k}} P_{22} + A_p P_{22} + P_{22}A_p^T, \\ \Gamma_{11k}^{pq} &= \frac{\ln \sigma_1 + 1 - 2\varsigma_1}{\mu_{1k}} P_{11} + \frac{\varsigma_1^2}{\mu_{1k}} P_{12} + \\ & \sum_{p=1}^2 \{A_p P_{11} + P_{11}A_p^T\} + \\ & \sum_{q=1}^2 \{B_{es}\hat{K}_q + \hat{K}_q^T B_{es}^T\}, \\ \Gamma_{12k}^{pq} &= \frac{\ln \sigma_1 - 1}{\mu_{1k}} P_{12} + \sum_{p=1}^2 \{A_p P_{12} + P_{12}A_p^T\} + \\ & \sum_{q=1}^2 \{B_{es}\hat{K}_q + \hat{K}_q^T B_{es}^T\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Theta_{1k} &= \frac{\ln \sigma_1}{\mu_{1k}} X_1 + (X_1 C - \hat{L} B_{es} E)^T + \\ & (X_1 C - \hat{L} B_{es} E), \\ \Theta_{2k} &= \frac{\ln \sigma_2}{\mu_{2k}} X_2 + C^T X_2^T + X_2 C, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{1j}^p &= P_{1j} - P_0^T + \varpi_j B_{es} \hat{K}_p, \\ Y_{1j}^{pq} &= P_{1j} - P_0^T + \varpi_j B_{es} (\hat{K}_1 + \hat{K}_2). \end{aligned}$$

则系统(20)是指数稳定的, 此时系统的模糊控制器增益矩阵为 $K_q = \hat{K}_q P_0^{-1}$, 而系统的FDI攻击观测器的增益 $L = X_1^{-1} \hat{L}$.

证明 首先, 定义 $Q_{ij} = \text{diag}\{P_{ij}^{-1}, X_i\}$, $J_{ij} = \text{diag}\{P_{ij}, I\}$, $\bar{J}_{ij} = \text{diag}\{Q_{ij}, I\}$, $i, j \in \{1, 2\}$.

然后, 当 $i = j = 1$ 时, 在不等式(21)两边同时左乘 J_{11} 和右乘 J_{11} 的转置, 并运用 Schur 补以及矩阵不等式 $-P_{11}P_{12}^{-1}P_{11} \leq -2\varsigma_1 P_{11} + \varsigma_1^2 P_{12}$, 得出 $\Psi_{11k}^{pp} < 0$. 类似地, 当 $i = 1, j = 2$ 时, 在不等式(21)两边同时左乘 J_{12} 和右乘 J_{12} 的转置, 运用同样的方法可得出 $\Psi_{12k}^{pp} < 0$.

接着, 对式(34)和(35)分别运用文献[28]中的引理1, 可以得到

$$\begin{bmatrix} \bar{\Sigma}_{1jk}^p + UP_0V + (UP_0V)^T & \Phi \\ * & -\varpi_j P_0 - \varpi_j P_0^T \end{bmatrix} < 0, \quad (42)$$

则

$$\bar{\Sigma}_{1jk}^p + UP_{1j}V + (UP_{1j}V)^T < 0, j = 1, 2. \quad (43)$$

其中

$$\Phi = ((P_{1j} - P_0)V)^T + U(\varpi_j P_0),$$

$$V = [I \ 0], U = [K_q^T B_{es}^T \ 0]^T,$$

$$\bar{\Sigma}_{1jk}^p = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1jk}^p & B_{es}E \\ * & \Theta_{1k} \end{bmatrix},$$

$$\bar{Z}_{1jk}^p = \frac{\ln \sigma_1}{\mu_{1k}} P_{1j} + \frac{1}{\mu_{1k}} P_{1j}(P_{11}^{-1} - P_{12}^{-1})P_{1j} + A_p P_{1j} + P_{1j} A_p^T.$$

在不等式(42)的左右两边分别左乘 \bar{J}_{1j} 和右乘 \bar{J}_{1j} 的转置,可以得到式(34)和(35),与(21)中 $i = 1$ 的不等式等价.

类似地,根据前面的推导,可以得出结论:不等式(36)和(37)与(22)中的不等式等价;不等式(38)和(39)保证了(23)中 $i = 2$ 时的不等式成立.同时,很容易看出式(40)和(41)等价于(24).

综上所述,定理2成立. \square

3 仿真

本节旨在验证所提出的模糊控制器与FDI攻击观测器的联合设计方法,应用于包含DoS和FDI混合攻击、建模为式(20)的非线性DC-MG系统的有效性.为方便计算,对只有一个CPL的情况进行仿真分析.本节中所有仿真模拟均在Matlab 2019b上完成.

3.1 混合攻击下单CPL DC-MG的仿真

表1中给出了单CPL DC-MG系统的所有相关电路参数.针对DoS攻击,令 $\mu_{11} = 0.1, \mu_{12} = 0.3, \mu_{21} = 0.1, \mu_{22} = 0.2$,由此随机生成一组DoS攻击间隔.而针对FDI攻击,根据生成FDI攻击信号 $a(t)$ 的系统(13),令矩阵 $C = -0.9I_{4 \times 4}, E = 0.01\text{rand}(1, 4)$.同时,令 $\sigma_1 = 1.2, \sigma_2 = 1.01, \varsigma_i = 1.2(i = 1, 2)$ 和 $\varpi_j = 0.1(j = 1, 2)$.

表1 相关电路参数

参数	值	参数	值
r_1	1.1 Ω	r_s	1.0 Ω
L_1	39.5 mH	L_s	17.0 mH
C_1	500 μF	C_s	550 μF
P_1	300 W	V_{dc}	200 V

通过定理2可以获得模糊控制器增益矩阵

$$K_1 = [0.1992 \ 0.0063 \ 0.0776 \ 0.0040],$$

$$K_2 = [0.2072 \ 0.0089 \ 0.0784 \ 0.0039].$$

FDI攻击观测器增益矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.0043 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0039 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0121 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0214 \end{bmatrix}.$$

选取系统初值 $\hat{x}_0 = [-0.003 \ 0.283 \ -0.28 \ 0.28]^T$,攻击估计误差初值 $e_0 = 10^{-3} \times [0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]$.任意选取初始条件 $\xi_0 = 10^{-3} \times [0.2 \ 0.2 \ -0.2 \ 0.2]$,设置仿真时间为5 s.此时,DC-MG系统在混合攻击下的电流和电压响应曲线分别如图3和图4所示,相应的控制输入曲线如图5所示.

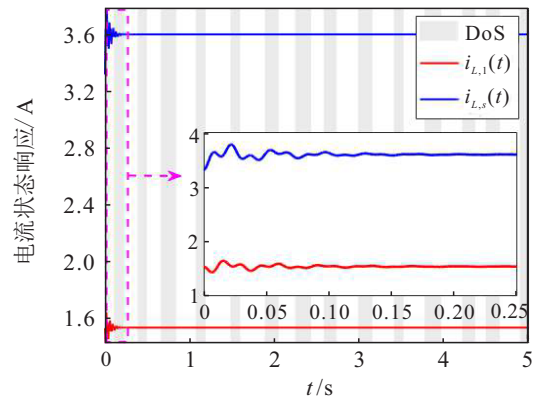


图3 混合攻击下的电流响应

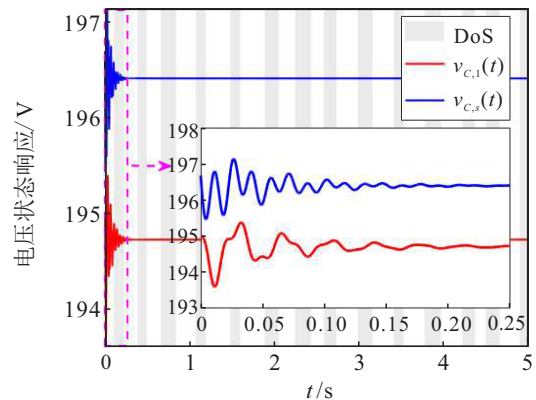


图4 混合攻击下的电压响应

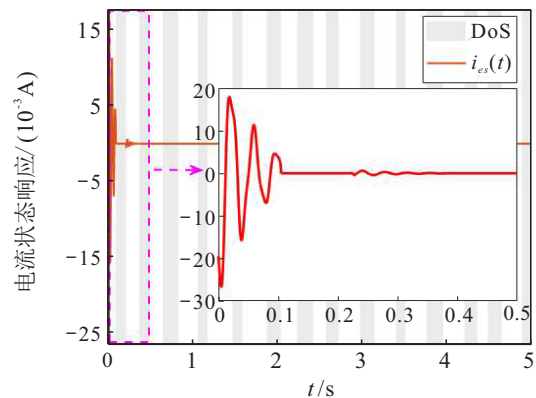


图5 混合攻击下的控制输入

根据图3和图4,可以观察到两个电感电流最终分别趋于1.541 A和3.588 A,而两个电容电压则最终分别趋于194.7 V和196.4 V. 因此,DC-MG系统在DoS和FDI混合攻击下仍然稳定. 此外,FDI攻击估计误差曲线如图6所示,表明了FDI攻击观测器的有效性.

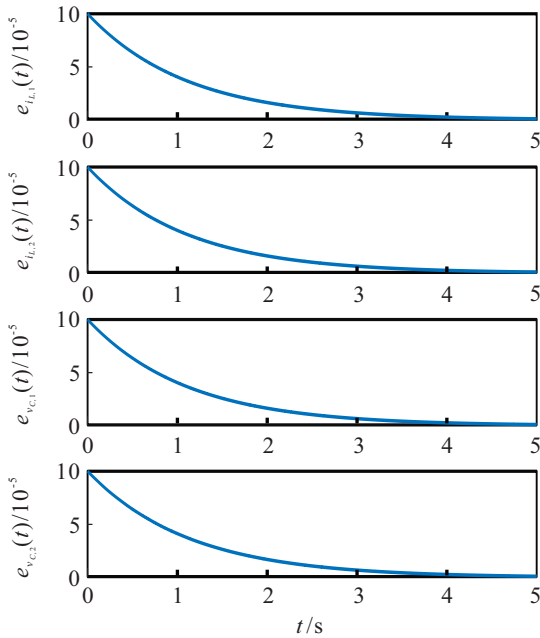


图6 FDI攻击估计误差

3.2 不同攻击情况的影响

考虑以下3种情况: 1) 既有DoS攻击又有FDI攻击; 2) 仅有FDI攻击; 3) 仅有DoS攻击. 图7表示控制输入 $i_{es}(t)$ 在上述3种情况下的对比. 可以发现,图7中红色实线上的控制输入值并不比蓝、绿色实线上的高,这也从侧面说明了所设计的控制器能有效应对DoS和FDI混合攻击的情况,且不需要加大控制输入量来达到目的.

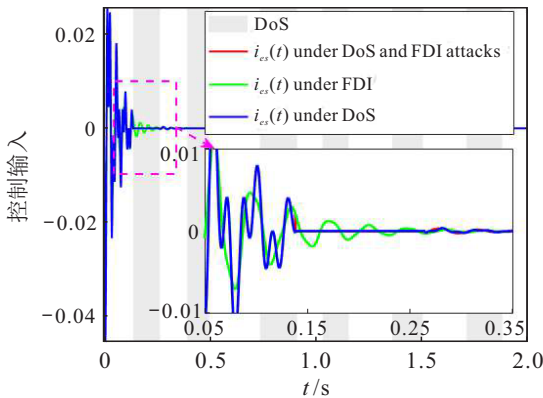


图7 不同情况下的控制输入曲线

另外,增加无攻击时系统在无控制情况下的曲线(用黑色实线表示),并分别以电流 $i_{L,1}$ 和电压 $v_{C,1}$ 为例研究不同攻击情况对系统的影响,见图8和图9. 可

以看出,红、蓝、绿色实线均比黑色实线的波动小,这意味着控制律的增加对系统的稳定起到了积极作用.

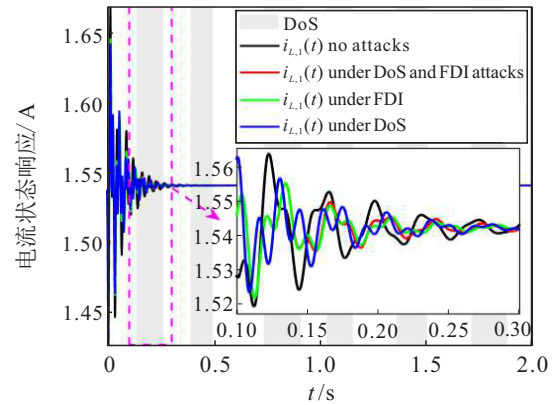


图8 不同情况下的 $i_{L,1}$

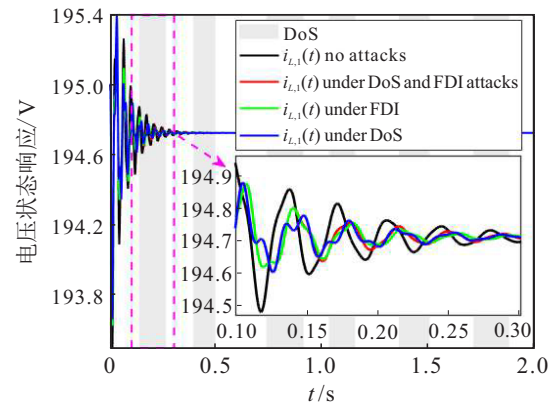


图9 不同情况下的 $v_{C,1}$

此外,在DoS攻击和FDI攻击均存在的时段,即图中灰色阴影区域,红色实线比蓝、绿色实线波动大,意味着DoS和FDI混合攻击比DoS和FDI分别单独攻击更能造成系统恶化,而所提出的联合设计方法能有效应对这种情况.

4 结论

本文研究了基于T-S模糊的DC-MG系统在混合攻击下的攻击估计与模糊控制器设计问题. FDI和DoS攻击都涉及,其中FDI攻击旨在破坏控制数据的完整性,而DoS攻击旨在阻断DC-MG系统中的通讯信道. 使用脉冲切换系统方法同时处理非周期DoS和未知FDI攻击. 利用依赖于攻击参数的时变Lyapunov函数技术,得到了DC-MG系统指数稳定的充分条件,并相应地设计了具有补偿函数的模糊控制器. 值得一提的是,所设计的控制器对FDI攻击的界限没有限制,并且不需要有关DoS频率的信息. 最后,案例研究验证了所提出的控制方法可以减轻DoS攻击的影响,同时可补偿DC-MG系统中FDI攻击的不利影响.

参考文献(References)

- [1] Wang R, Sun Q Y, Zhang H G, et al. Current edge-control strategy of multi-bus DC microgrids based on information-energy dual modulation[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2222.
- [2] Ji Y, Wang J H. Online optimal scheduling of a microgrid based on deep reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(7): 1675-1684.
- [3] 周林娜, 刘虹羽, 马磊, 等. 未知周期DoS攻击下奇异摄动信息物理系统 H_∞ 滤波设计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1): 123-132.
(Zhou L N, Liu H Y, Ma L, et al. Design of singularly perturbed cyber-physical systems H_∞ filter under unknown periodic DoS attack[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1): 123-132.)
- [4] 金丹, 吴麒, 陈博, 等. DoS攻击下信息物理系统的无模型 H_∞ 控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2565-2574.
(Jin D, Wu Q, Chen B, et al. Model-free H_∞ control for cyber-physical systems under DoS attacks[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(10): 2565-2574.)
- [5] Ji L H, Li H, Li H Q. Mean square bipartite consensus for multi-agent systems under false data injection attacks[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0621.
- [6] 孙子文, 洪涛. 基于多信道博弈的ICPS虚假注入攻击防御策略[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1357-1366.
(Sun Z W, Hong T. ICPS false injection attack defense strategy based on multi-channel game[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1357-1366.)
- [7] Zhang Z D, Wang Y Y, Xie L B. Replay attack detection method based on pseudo-periodic control signal coding[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1967.
- [8] 楼琦凯, 陈蓓, 丁劭, 等. 虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(12): 3207-3214.
(Lou Q K, Chen B, Ding M, et al. Sliding mode control of DC microgrid under false data injection attack[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(12): 3207-3214.)
- [9] 郭方洪, 郑祥康, 邓超, 等. 直流微电网无界虚假数据注入网络攻击检测与系统恢复方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(2): 146-153.
(Guo F H, Zheng X K, Deng C, et al. Network attack detection and system recovery method of unbounded false data injection in DC microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(2): 146-153.)
- [10] 杨奕贤, 郭力, 王洪达, 等. 基于数据驱动的直流微电网虚假数据注入攻击快速防御策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 145-151.
(Yang Y X, Guo L, Wang H D, et al. Fast defense strategy of false data injection attack in DC microgrid based on data-driven[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(5): 145-151.)
- [11] Liu X K, Wen C Y, Xu Q W, et al. Resilient control and analysis for DC microgrid system under DoS and impulsive FDI attacks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 3742-3754.
- [12] Wan Y, Long C, Deng R L, et al. Distributed event-based control for thermostatically controlled loads under hybrid cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(11): 5314-5327.
- [13] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, SMC-15(1): 116-132.
- [14] Vafamand N, Khooban M H, Dragievi T, et al. Networked fuzzy predictive control of power buffers for dynamic stabilization of DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 1356-1362.
- [15] Vafamand N, Khooban M H, Dragievi T, et al. Robust non-fragile fuzzy control of uncertain DC microgrids feeding constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(11): 11300-11308.
- [16] Mardani M M, Vafamand N, Khooban M H, et al. Design of quadratic D-stable fuzzy controller for DC microgrids with multiple CPLs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4805-4812.
- [17] Shafiee Roudbari E, Beheshti M T H, Rakhtala S M. Voltage and frequency regulation in an islanded microgrid with PEM fuel cell based on a fuzzy logic voltage control and adaptive droop control[J]. *IET Power Electronics*, 2020, 13(1): 78-85.
- [18] Kardan M A, Asemani M H, Khayatyan A, et al. Improved stabilization of nonlinear DC microgrids: Cubature Kalman filter approach[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 5104-5112.
- [19] Zare I, Setoodeh P, Asemani M H. Fault-tolerant tracking control of discrete-time T-S fuzzy systems with input constraint[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2022, 30(6): 1914-1928.
- [20] Peng C, Han Q L, Yue D. To transmit or not to transmit: A discrete event-triggered communication scheme for networked Takagi-Sugeno fuzzy systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, 21(1): 164-170.
- [21] Hu S L, Yuan P, Yue D, et al. Attack-resilient event-triggered controller design of DC microgrids under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(2): 699-710.
- [22] Foroush H S, Martínez S. On triggering control of single-input linear systems under pulse-width modulated DoS signals[J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2016, 54(6): 3084-3105.
- [23] Zhou Q, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Cross-layer distributed control strategy for cyber resilient

- microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3705-3717.
- [24] Chen X L, Hu S L, Li Y, et al. Co-estimation of state and FDI attacks and attack compensation control for multi-area load frequency control systems under FDI and DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2357-2368.
- [25] Gu Y P, Yu X, Guo K X, et al. Detection, estimation, and compensation of false data injection attack for UAVs[J]. Information Sciences, 2021, 546: 723-741.
- [26] Weng S X, Yue D, Dou C X. Secure distributed optimal frequency regulation of power grid with time-varying voltages under cyberattack[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(3): 894-909.
- [27] Ding K, Chen W H, Lu X M, et al. Disturbance observer-based control design for a class of nonlinear stochastic systems with periodically intermittent measurement[C]. The 36th Chinese Control Conference. Dalian, 2017: 2373-2378.
- [28] Chen W H, Zhong J C, Zheng W X. Delay-independent stabilization of a class of time-delay systems via periodically intermittent control[J]. Automatica, 2016, 71: 89-97.

作者简介

解相朋(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事模糊智能建模、控制和软测量等研究, E-mail: xiexiangpeng1953@163.com;

杨馥伊(1995—), 女, 博士生, 从事智能感知与自主控制的研究, E-mail: yangfy_1@163.com;

魏聪(1998—), 男, 硕士生, 从事控制理论与控制工程的研究, E-mail: zhuqiuniansi@outlook.com;

葛辉(1983—), 男, 副教授, 博士, 从事网络化控制系统的安全、稳定控制方法等研究, E-mail: gehuissl@njupt.edu.cn;

岳东(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化控制、智能电网优化控制等研究, E-mail: medongy@vip.163.com.



特邀专家 解相朋, 2000~2010年就读于东北大学, 先后获得工学学士和工学博士学位, 博士生导师为教育部长江学者特聘教授张化光老师. 现任南京邮电大学碳中和先进技术研究院教授/博士生导师、南京邮电大学物联网学院副院长, 入选国家优青, 江苏省杰青, 科睿唯安ESI高被引学者(2020~2022). 目前主要从事电力物联网技术、人工智能可解释性、自组织模糊系统差分隐私保护等方面研究工作, 发表权威IEEE汇刊和Automatica论文150余篇, SCI他引超6000次, ESI高被引论文20余篇, 获省部级科研奖励3项, 主持国家、省部级项目10余项. 担任中国自动化学会和中国人工智能学会多个专业委员会委员、两个SCI国际期刊编委.

专家寄语 “白山兮高高, 黑水兮滔滔”, 十年求学生涯给我烙下深深的东大印记, “自强不息, 知行合一”的校训则激励着我不断前行. 值此东北大学百年华诞之际, 衷心祝愿母校和引以为豪的控制科学与工程学科蒸蒸日上、再铸辉煌!