

引用格式:刘永慧,卢艳杰.网络攻击下直流微电网系统的事件触发滑模控制[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):212-221.

Citation: LIU Yonghui, LU Yanjie. Event-triggered sliding mode control of direct-current microgrid system under network attack[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 212-221.

网络攻击下直流微电网系统的事件触发滑模控制

刘永慧¹, 卢艳杰²

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

摘要:采用基于事件触发的固定时间滑模控制方法,研究了虚假数据注入攻击下直流微电网系统的直流母线电压控制。首先,建立虚假数据注入攻击下直流微电网系统的数学模型;其次,为节省网络资源,在传感器-观测器通道和观测器-控制器通道引入事件触发机制;然后,考虑系统恒功率负载扰动和虚假数据注入攻击引起的系统电流难以准确测量的问题,构造了状态观测器,并设计基于观测器的固定时间滑模控制器,得到系统收敛的时间上界;最后,以含有2个恒功率负载和1个储能单元的直流微电网系统为例进行仿真。仿真结果表明,所提控制方法能够有效抑制恒功率负载扰动和虚假数据注入攻击对直流母线电压造成的影响,同时还能有效节省网络资源。

关键词:直流微电网系统;虚假数据注入攻击;恒功率负载;事件触发;固定时间滑模控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.022 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2024)06-0212-10

Event-triggered sliding mode control of direct-current microgrid system under network attack

LIU Yonghui¹, LU Yanjie²

(1. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper studies the direct-current bus voltage control of direct-current microgrid systems under false data injection attacks based on event-triggered fixed-time sliding mode control. Firstly, the mathematical model of the direct-current microgrid system under false data injection attacks is established. Secondly, to save network resources, event-triggered mechanisms are introduced in the sensor-to-observer channel and observer-to-controller channel. Thirdly, since the system current is difficult to be accurately measured due to the constant power load disturbance and false data injection attack, a state observer is designed. A fixed-time sliding mode controller based on the observer is designed, and the upper bound of the system convergence time is obtained. Finally, a direct-current microgrid system with two constant power loads and an energy storage unit is taken as an example for simulation. The results that the proposed control method can effectively resist the influence of constant power load disturbances and false data injection attacks on the direct-current bus voltage and save network resources effectively.

Key words: direct-current microgrid system; false data injection attack; constant power load; event triggering; fixed-time sliding mode control

随着分布式发电技术的发展,直流微电网系统因其能量转换效率高、运行方式灵活等特点,逐渐成为未来电力系统的重要组成部分,直流微电网系统的稳定性研究引起了广泛的关注^[1]。虽然直流微

电网系统能够接纳各种交直流负载,但是大部分负载为恒功率负载(constant power load, CPL),CPL具有负增量阻抗特性,会增加直流微电网系统的非线性,降低系统的阻尼性能,导致直流母线电压不

收稿日期:2023-11-07;修回日期:2024-05-10

基金项目:国家自然科学基金(61803253)

通信作者:卢艳杰(1998—),女,硕士研究生,主要从事电力系统及其自动化研究;E-mail: luyanjie_1998@163.com

稳定^[2]。另外,为充分利用可再生能源,直流微电网系统的各组成部分较分散,引入通信网络可提高系统的效率和灵活性^[3]。然而,由于通信网络的连通性和开放性,网络节点易遭受网络攻击,信号通过网络进行传输时会遭受恶意破坏,导致直流母线电压偏离额定电压^[4-5]。因此,研究网络攻击下的直流微电网系统的电压控制问题很有必要。

虚假数据注入攻击(false data injection, FDI)会对直流微电网系统的运行数据进行恶意篡改,具有较强的灵活性和隐蔽性,将对直流微电网系统的电压稳定造成严重影响^[6-9]。以FDI下的直流微电网系统为研究对象,文献[6]提出了一种自适应模型预测控制方法在线识别FDI。文献[7]提出了一种基于融合容积卡尔曼滤波的方法,实现对直流微电网系统中FDI的检测。在此基础上,文献[8]提出了基于深度学习算法的FDI检测方法,检测并修正虚假数据。为保证受到FDI的直流微电网系统的指数稳定性,文献[10]提出了模糊控制器和FDI观测器的联合设计方法。针对无界FDI下的直流微电网系统,文献[11]提出了一种弹性控制策略,实现了FDI下系统的电压恢复和电流分配。在此基础上,文献[12]进一步研究了控制输入通道存在未知无界攻击时的直流微电网协同二次控制。

滑模控制对存在外界干扰的非线性系统具有强鲁棒性,因此,学者们开始采用滑模控制研究FDI下系统的稳定性^[13-14]。文献[15]考虑存在不确定性攻击和外部干扰的马尔可夫跳变系统,设计了一种新的滑模控制器,使系统状态轨迹在给定的时间间隔内趋近指定的滑模面。文献[16]考虑存在FDI和外部干扰的信息物理系统,提出了积分滑模控制方法,补偿FDI和外部干扰对系统性能的影响。近年来,学者们逐渐将滑模控制方法应用到FDI下的直流微电网系统中^[17-19]。为解决FDI下直流微电网系统的母线电压波动问题,文献[17]提出了一种基于滑模控制的镇定方法。为抑制FDI对直流微电网系统电压的影响,文献[18]基于分布式滑模观测器,设计了分布式共识算法以检测FDI。为实现FDI和未知扰动影响下直流微电网的安全控制,文献[19]设计了一种高阶滑模观测器。

由于网络资源有限,当系统进行大量的信号传输时可能会出现通信延迟现象,而且网络节点之间的通信可能会消耗大量的能量。为节约能源、提高网络资源利用率,学者们提出了事件触发机制^[20-22]。

文献[23]提出了一种基于事件触发的能量管理策略,缓解光伏发电间歇性造成的系统功率失衡,同时减少了系统运算负担。为节省通信资源,文献[24]提出了基于状态控制宽度的事件触发控制器。考虑通信状态变化导致的系统失稳,文献[25]提出了一种基于事件触发的分布式控制方法,减少了分布式控制器的能量损耗。考虑虚拟电阻导致的系统电压偏差和功率失衡,文献[26]结合事件触发机制,提出了一种协调控制方法,通过设定触发函数的阈值,减少了系统通信次数。针对受到服务攻击的直流微电网系统,文献[27]提出了基于状态观测器的事件触发控制器设计方法,实现了直流微电网系统状态的估计和控制。然而,上述工作没有考虑FDI恶意篡改系统信息对直流母线电压稳定的影响,而且以上工作只能保证系统的渐近稳定。为进一步提高系统控制性能,本文将采用基于事件触发的固定时间滑模控制方法对FDI下直流微电网系统的电压控制展开研究。

基于以上分析,为解决CPL和FDI造成的直流微电网系统电压波动,本文提出一种基于事件触发机制的固定时间滑模控制方法。首先,在传感器-观测器通道和观测器-控制器通道分别设计事件触发函数;其次,基于事件触发机制,构造了状态观测器,并设计基于观测器的积分滑模面,构造固定时间滑模控制器,抑制系统CPL和FDI引起的直流母线电压波动;然后,采用固定时间控制方法对稳定性进行分析,并得到系统收敛的时间上界;最后,以含有2个CPL和1个储能单元的直流微电网系统为例进行仿真,验证本文设计方法的有效性。

1 系统模型描述

1.1 直流微电网系统数学模型

直流微电网系统由大量的分布式可再生能源发电电源、储能装置和负载组成。受到外界环境影响,可再生能源发电具有不稳定性,无法直接为负载供电。储能装置能够吸收或者释放电能,具有稳定母线电压的作用。系统中大部分负载通过电力电子变换器与直流母线并联,由于电力电子变换器的输入功率不受电压的影响,将负载和电力电子变换器视为一个整体,其对外表现出恒功率特性,可将负载和电力电子变换器整体等效为CPL。因此,直流微电网系统可解耦成 n 个CPL和1个储能单元,系统的电路图如图1所示。

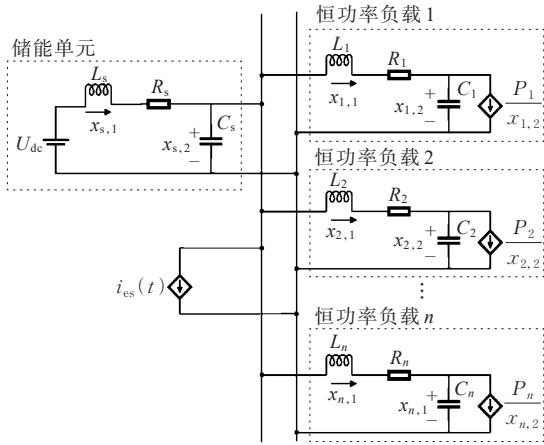


图1 直流微电网系统的电路图

Figure 1 Circuit of direct-current microgrid system

根据基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可得第 \$j\$ 个 (\$j \in \{1, 2, \dots, n\}\$) CPL 的回路电压和节点电流方程为

$$\begin{aligned} L_j \frac{dx_{j,1}(t)}{dt} + R_j x_{j,1}(t) + x_{j,2}(t) - x_{s,2}(t) &= 0 \\ C_j \frac{dx_{j,2}(t)}{dt} + \frac{P_j}{x_{j,2}(t)} - x_{j,1}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \$L_j\$、\$R_j\$ 和 \$C_j\$ 分别为第 \$j\$ 个 CPL 中的电感、电阻和电容; 状态变量 \$x_{j,1}(t)\$ 和 \$x_{j,2}(t)\$ 分别为第 \$j\$ 个 CPL 中的电感电流和电容电压; \$x_{s,2}(t)\$ 为储能单元中的电容电压; \$P_j\$ 为第 \$j\$ 个 CPL 的功率。

由式(1)得第 \$j\$ 个 CPL 的系统模型为

$$\begin{aligned} \frac{dx_j(t)}{dt} &= A_j x_j(t) + d_j h_j(x_j(t)) + A_{js} x_s(t) \\ y_j(t) &= C_j x_j(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, 状态变量 \$x_j(t) = [x_{j,1}(t), x_{j,2}(t)]^T\$, \$A_j =

$$\begin{bmatrix} -\frac{R_j}{L_j} & -\frac{1}{L_j} \\ \frac{1}{C_j} & 0 \end{bmatrix}, \quad d_j = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_j} \end{bmatrix}, \quad A_{js} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_j} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_j =$$

\$\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}\$, 非线性函数 \$h_j(x_j(t)) = -\frac{P_j}{x_{j,2}(t)}\$ 为第 \$j\$ 个

CPL 电流波动引起的电压扰动。

根据基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可得储能单元的回路电压和节点电流方程为

$$\begin{aligned} L_s \frac{dx_{s,1}(t)}{dt} + R_s x_{s,1}(t) + x_{s,2}(t) - U_{dc} &= 0 \\ C_s \frac{dx_{s,2}(t)}{dt} - x_{s,1}(t) + i_{es}(t) + \sum_{j=1}^n x_{j,1}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \$L_s\$、\$R_s\$ 分别为储能单元的电感和电阻; 状态变量 \$x_{s,1}(t)\$ 为储能单元中的电感电流; \$U_{dc}\$ 为直流母线

的电压值; \$C_s\$ 为储能单元的电容; \$i_{es}(t)\$ 为储能电流。

由式(3)可得储能单元的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \frac{dx_s(t)}{dt} = A_s x_s(t) + b_s U_{dc} + b_{es} i_{es}(t) + \\ \sum_{j=1}^n A_{cn} x_j(t) \\ y_s(t) = C_s x_s(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中, \$x_s(t) = [x_{s,1}(t), x_{s,2}(t)]^T\$, \$A_s = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}\$,

$$b_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad b_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_s} \end{bmatrix}, \quad A_{cn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}, \quad C_s = [0 \ 1]。$$

由式(2)、(4)可得 CPL 和储能单元共同作用下的直流微电网系统模型。利用坐标变换, 将增广系统的平衡点平移至原点, 以 \$i_{es}(t)\$ 为控制输入, 系统的状态空间表达式化简为

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{x}(t)}{dt} &= A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) + D\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \\ \tilde{y}(t) &= C\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, \$j \in \{1, 2, \dots, n\}\$, \$\tilde{x}(t) = [\tilde{x}_1^T(t), \tilde{x}_2^T(t), \dots, \tilde{x}_n^T(t), \tilde{x}_s^T(t)]^T\$, \$\tilde{x}_j(t) = [\tilde{x}_{j,1}(t), \tilde{x}_{j,2}(t)]^T\$, \$\tilde{x}_s(t) = [\tilde{x}_{s,1}(t), \tilde{x}_{s,2}(t)]^T\$, \$\tilde{y}(t) = [\tilde{y}_1^T(t), \tilde{y}_2^T(t), \dots, \tilde{y}_n^T(t), \tilde{y}_s^T(t)]^T\$, \$\tilde{y}_n(t)\$ 为第 \$n\$ 个 CPL 的输出 \$C_n \tilde{x}_n(t)\$, \$\tilde{y}_s(t)\$ 为储能单元的输出 \$C_s \tilde{x}_s(t)\$, \$A =

$$\begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & A_{1s} \\ 0 & A_2 & \dots & A_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & A_j & \dots & A_{js} \\ A_{cn} & A_{cn} & \dots & A_s \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_s \end{bmatrix}。$$

$$\tilde{H}(\tilde{x}(t)) = [\tilde{h}_1^T(\tilde{x}(t)), \tilde{h}_2^T(\tilde{x}(t)), \dots, \tilde{h}_n^T(\tilde{x}(t))]^T,$$

且有

$$\tilde{h}_j(\tilde{x}_j(t)) = -\frac{P_j \tilde{x}_{j,2}(t)}{x_{j20}(\tilde{x}_{j,2}(t) + x_{j20})} \quad (6)$$

式中, \$x_{j20}\$ 为原增广系统的状态 \$x_{j,2}(t)\$ 的平衡点; \$\tilde{x}_{j,2}(t) = x_{j,2}(t) - x_{j20}\$ 为新坐标下的电容电压。

式(5)中非线性项 \$\tilde{H}(\tilde{x}(t))\$ 满足:

$$\tilde{H}^T(\tilde{x}(t))\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \leq \mu^2 \tilde{x}^T(t) F^T F \tilde{x}(t) \quad (7)$$

式中, μ 为大于 0 的实数, 表示 $\tilde{H}^T(\tilde{x}(t))\tilde{H}(\tilde{x}(t))$

$$\text{存在上限。} F = \begin{bmatrix} F_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F_n & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

1.2 FDI 下直流微电网系统数学模型

假设控制器在执行器通道受到 FDI, 攻击者采集系统的状态信息, 根据收集的数据生成一个攻击信号, 并将其注入到系统中, 则执行器接收的控制输入为

$$\tilde{u}(t) = u(t) + W\phi(\tilde{x}(t), t) \quad (8)$$

式中, $u(t)$ 为所设计的控制输入; $W\phi(\tilde{x}(t), t)$ 为攻击信号; W 为攻击的注入模式, $\phi(\tilde{x}(t), t)$ 为攻击者使用的系统信息, 假设攻击信号的范数存在约束上界 $\|W\phi(\tilde{x}(t), t)\| \leq \|T\tilde{x}(t)\|$, T 为实矩阵。

将实际控制信号式(8)代入式(5), 得到 FDI 下的系统为

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A\tilde{x}(t) + B(u(t) + W\phi(\tilde{x}(t), t)) + D\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \\ \tilde{y}(t) = C\tilde{x}(t) \end{cases} \quad (9)$$

由式(7)可得非线性项 $\tilde{H}(\tilde{x}(t))$ 满足 $\|\tilde{H}(\tilde{x}(t))\| \leq \|L\tilde{x}(t)\|$, 其中矩阵参数 $L = \begin{bmatrix} 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

为方便分析, 给出以下 3 个引理。

引理 1 如果存在一个连续径向有界函数 $V(x): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}_+ \cup \{0\}$ 满足:

$$\frac{dV(x)}{dx} \leq -\alpha V^p(x) - \beta V^q(x)$$

其中, $\alpha > 0, \beta > 0, 0 < p < 1, q > 1$, 则称系统为全局固定时间稳定, 其收敛时间满足:

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\alpha(1-p)} + \frac{1}{\beta(1-q)}$$

引理 2^[16] 对于任意的实矩阵 U, V 和适当维数的正矩阵 Q , 有

$$U^T V + V^T U \leq U^T Q U + V^T Q^{-1} V$$

引理 3 假设 E, H 和 $F(t)$ 是具有适当维数的实矩阵, 且 $F(t)$ 满足 $F^T(t)F(t) \leq I$, 则对于任意 $a > 0$, 有

$$EF(t)H + H^T F^T(t)E^T \leq a^{-1}EE^T + aH^T H$$

2 主要结论

本文首先根据式(9)设计状态观测器, 然后构造基于观测器的滑模控制器, 最后采用固定时间收敛理论分析滑模面的可达性, 并分析滑动模态的稳定性。

2.1 事件触发条件设计

为降低系统的信号传输频率, 在传感器-观测器通道和观测器-控制器通道分别引入事件触发机制进行采样。

在传感器-观测器通道, 选取事件触发函数:

$$f_1(t) = \|\tilde{e}(t)\| - \epsilon \|\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)\| \quad (10)$$

式中, 输出误差 $\tilde{e}(t) = \tilde{y}(t) - \hat{y}(t_s)$ 为最近一次触发时刻 t_s 的系统输出 $\tilde{y}(t_s)$ 与当前采样时刻 t 的系统输出 $\tilde{y}(t)$ 的误差; ϵ 为给定的正标量; $\hat{y}(t)$ 为观测器输出。只有满足 $f_1(t) > 0$ 时才进行信号通信, 否则维持前一次触发时刻的输出信号。

注 1 在 t_s 时刻, 事件被触发, 此时系统输出 $\tilde{y}(t_s)$ 被更新, 有 $\tilde{e}(t) = 0$, 又因 $\epsilon \geq 0$, 所以有 $f_1(t) \leq 0$ 。当 $t \in (t_s, t_{s+1})$ 时, 有 $f_1(t) \leq 0$ 。在 t_{s+1} 时刻, 事件再次被触发, 并重复上述过程, 因此事件触发函数 $f_1(t) \leq 0$ 成立。

在观测器-控制器通道, 选取事件触发函数:

$$f_2(t) = \|\hat{e}(t)\| - \theta \|\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)\| \quad (11)$$

式中, 状态误差 $\hat{e}(t) = \hat{x}(t) - \hat{x}(t_k)$ 为最近一次触发时刻 t_k 的状态 $\hat{x}(t_k)$ 与当前采样时刻的状态 $\hat{x}(t)$ 的误差, $\theta > 0$ 是一个阈值。只有满足触发条件 $f_2(t) > 0$ 才进行采样, 否则维持前一次触发时刻的控制信号。

注 2 在 t_k 时刻, 事件被触发, 此时控制器中的状态值得到更新, 有 $\hat{e}(t) = 0$, 又因 $\theta \|\tilde{y}(t) - \hat{y}(t)\| \geq 0$, 所以有 $f_2(t) \leq 0$ 。当 $t \in (t_k, t_{k+1})$ 时, 有 $f_2(t) \leq 0$ 。在 t_{k+1} 时刻, 事件再次被触发, 并重复上述过程, 因此事件触发函数 $f_2(t) \leq 0$ 成立。

2.2 可达性分析

随着直流微电网系统规模的不断扩大, 系统中会加入越来越多的发电单元和用电设备, 然而, 由于可再生能源发电存在不确定性和 CPL 的负阻抗性, 难以对电流进行准确测量, 因此对式(9)设计如下的状态观测器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + O(\tilde{y}(t_s) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\hat{x}(t)$ 为观测器状态; $\hat{y}(t)$ 为观测器输出; O 为观测器增益矩阵。

对于FDI下的直流微电网系统, 基于事件触发滑模控制的系统如图2所示。

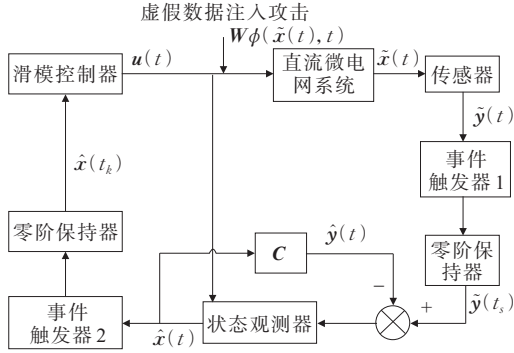


图2 FDI下直流微电网系统的事件触发控制系统

Figure 2 Event-triggered control system of direct-current microgrid system under FDI

首先,分析滑模面的可达性。基于观测器式(12)设计如下积分型滑模面:

$$S(t) = M\hat{x}(t) - M \int_0^t (A - BK)\hat{x}(\tau) d\tau \quad (13)$$

式中, M 为待选取的常量矩阵, 满足 $MB \neq 0$; K 为待设计的控制增益。

定义误差变量 $e(t) = \tilde{x}(t) - \hat{x}(t)$, 对式(13)求导得:

$$\frac{dS(t)}{dt} = MBu(t) + MO(\tilde{y}(t_s) - \hat{y}(t)) + MBK\hat{x}(t) \quad (14)$$

为使系统状态在固定时间内到达滑模面, 设计如下的滑模趋近律:

$$\frac{ds}{dt} = -\alpha(S(t))^p - \beta(S(t))^q - \gamma \operatorname{sgn}(S(t)) \quad (15)$$

式中, 参数 α, β, γ, p 和 q 均为大于零的常数, 且满足 $p < 1, q > 1$ 。

由式(12)、(14)、(15)可得滑模控制律为

$$u(t) = (MB)^{-1} [-MBK\hat{x}(t) - MO(\tilde{y}(t_s) - \hat{y}(t)) - \hat{y}(t) - \alpha(S(t))^p - \beta(S(t))^q - \gamma \operatorname{sgn}(S(t))] \quad (16)$$

定理1 对于观测器系统式(12), 设计滑模函数式(13)并满足 $MB \neq 0$, 设计控制律式(16), 则

式(9)的状态轨迹在固定时间 $T_{\max} = \frac{1}{\alpha(1-p)} +$

$\frac{1}{\beta(q-1)}$ 内收敛到滑模面。

证明: 选取如下的 Lyapunov 函数:

$$V(t) = S^T(t)S(t) \quad (17)$$

对式(17)求导, 并将式(14)、(16)代入可得:

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &\leq -2\alpha\|S(t)\|^{p+1} - 2\beta\|S(t)\|^{q+1} - \\ &2\gamma|S(t)| \leq -2\alpha(V(t))^{\frac{p+1}{2}} - 2\beta(V(t))^{\frac{q+1}{2}} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $0 < \frac{p+1}{2} < 1, \frac{q+1}{2} > 1$, 由引理1可得满足固定时间收敛的条件, 且系统收敛时间的上界满足:

$$T < T_{\max} = \frac{1}{\alpha(1-p)} + \frac{1}{\beta(q-1)} \quad (19)$$

注3 由式(19)可知, 系统的收敛时间上界 T_{\max} 仅与滑模控制器中的参数 α, β, γ, p 和 q 有关。 α, β 和 q 的取值越大, p 的取值越小, 系统的收敛时间越短, 但 α 和 β 的取值越大, 系统的超调量会越大, 因此, 控制参数 α, β, p 和 q 的取值应根据系统控制性能来决定。

2.3 稳定性分析

当系统状态到达滑模面上时有

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 \quad (20)$$

基于事件触发机制式(11)可得等效控制 $u_{\text{eq}}(t)$ 为

$$u_{\text{eq}}(t) = (MB)^{-1} [-MBK\hat{x}(t_k) - MO(\tilde{y}(t_s) - \hat{y}(t))] \quad (21)$$

将式(21)代入式(12)可得滑动模态如下:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= A\hat{x}(t) - BK\hat{x}(t_k) = \\ &(A - BK)\hat{x}(t) + BK\hat{e}(t) \end{aligned} \quad (22)$$

由式(9)、(12)可得误差方程为

$$\begin{aligned} \frac{de(t)}{dt} &= (A - OC)e(t) + O\tilde{e}(t) + \\ &BW\phi(\tilde{x}(t), t) + D\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \end{aligned} \quad (23)$$

由式(22)、(23)可得增广系统为

$$\begin{aligned} \frac{dz(t)}{dt} &= \begin{pmatrix} A - BK & 0 \\ 0 & A - OC \end{pmatrix} z(t) + \begin{pmatrix} BK \\ 0 \end{pmatrix} \hat{e}(t) + \\ &\begin{pmatrix} 0 \\ O \end{pmatrix} \tilde{e}(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ BW\phi(\tilde{x}(t), t) + D\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $z(t) = [\hat{x}^T(t) \ e^T(t)]^T$ 。

定理2 对于式(24), 已知参数 $\epsilon > 0$ 和 $\theta > 0$ 时, 若存在正定矩阵 $X > 0$ 和 $Q > 0$, 矩阵 Y 和 Z , 参数 $a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$ 和 $\delta > 0$, 满足如下的线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI):

$$\delta I - X < 0 \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_4 & BY & \sqrt{2} XT^T & \sqrt{2} XL^T \\ * & -\delta X & 0 & 0 \\ * & * & -a_2^{-1}I & 0 \\ * & * & * & -a_3^{-1}I \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_5 & Z & QB & QD \\ * & -a_1I & 0 & 0 \\ * & * & -a_2I & 0 \\ * & * & * & -a_3I \end{bmatrix} < 0 \quad (27)$$

式中, * 表示对称矩阵的对称部分; $\mathbf{E}_4 = XA^T - Y^T B^T + AX - BY$; $\mathbf{E}_5 = A^T Q - C^T Z^T + QA - ZC + a_1 \epsilon^2 C^T C + \theta^2 C^T C + 2a_2 T^T T + 2a_3 L^T L$ 。那么系统式(24)渐近稳定。

证明: 选取如下的 Lyapunov 函数:

$$V(t) = z^T(t)Uz(t) \quad (28)$$

式中, $U = \text{diag}\{P, Q\}$, P 和 Q 均为正定对称矩阵。

对式(28)求导可得:

$$\begin{aligned} & dV(t)/dt = \\ & \hat{x}^T(t)(A - BK)^T P \hat{x}(t) + \hat{e}^T(t)(BK)^T P \hat{x}(t) + \\ & e^T(t)(A - OC)^T Q e(t) + \tilde{e}^T(t)O^T Q e(t) + \\ & (BW\phi(\tilde{x}(t), t))^T Q e(t) + (D\tilde{H}\tilde{x}(t))^T Q e(t) + \\ & \hat{x}^T(t)P(A - BK)\hat{x}(t) + \hat{x}^T(t)PBK\hat{e}(t) + \\ & e^T(t)Q(A - OC)e(t) + e^T(t)QO\tilde{e}(t) + \\ & e^T(t)QBW\phi(\tilde{x}(t), t) + e^T(t)QD\tilde{H}(\tilde{x}(t)) \end{aligned} \quad (29)$$

由引理 2 和引理 3 可得:

$$\begin{aligned} & \hat{e}^T(t)(BK)^T P \hat{x}(t) + \hat{x}^T(t)PBK\hat{e}(t) \leq \\ & \hat{x}^T(t)PBK(PBK)^T \hat{x}(t) + \hat{e}^T(t)\hat{e}(t) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \tilde{e}^T(t)O^T Q e(t) + e^T(t)QO\tilde{e}(t) \leq \\ & a_1^{-1}e^T(t)QO(QO)^T e(t) + a_1\tilde{e}^T(t)\tilde{e}(t) \\ & (BW\phi(\tilde{x}(t), t))^T Q e(t) + e^T(t)QBW\phi(\tilde{x}(t), t) \leq \\ & a_2^{-1}e^T(t)QB(QB)^T e(t) + a_2\tilde{x}^T(t)T^T T\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & (D\tilde{H}\tilde{x}(t))^T Q e(t) + e^T(t)QD\tilde{H}\tilde{x}(t) \leq \\ & a_3^{-1}e^T(t)QD(QD)^T e(t) + a_3\tilde{x}^T(t)L^T L\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (32)$$

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

$$\begin{aligned} & \tilde{x}^T(t)T^T T\tilde{x}(t) = \\ & (\hat{x}(t) + e(t))^T T^T T(\hat{x}(t) + e(t)) \leq \\ & 2\hat{x}^T(t)T^T T\hat{x}(t) + 2e^T(t)T^T T e(t) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} & \tilde{x}^T(t)L^T L\tilde{x}(t) = \\ & (\hat{x}(t) + e(t))^T L^T L(\hat{x}(t) + e(t)) \leq \\ & 2\hat{x}^T(t)L^T L\hat{x}(t) + 2e^T(t)L^T L e(t) \end{aligned} \quad (34)$$

考虑(10)、(11), 将式(30)~(35)代入式(29),

可得:

$$\begin{aligned} & \frac{dV(t)}{dt} \leq \hat{x}^T(t)(A^T P - (BK)^T P + PA - PBK + \\ & PBK(PBK)^T + 2a_2 T^T T + 2a_3 L^T L)\hat{x}(t) + \\ & e^T(t)(A^T Q - (OC)^T Q + QA - QOC + \\ & a_1^{-1}QO(QO)^T + a_2^{-1}QB(QB)^T + \\ & a_3^{-1}QD(QD)^T + a_1 \epsilon^2 C^T C + \theta^2 C^T C + \\ & 2a_2 T^T T + 2a_3 L^T L)e(t) \end{aligned} \quad (35)$$

式(36)等价于:

$$\frac{dV(t)}{dt} \leq z^T(t)\Pi z(t) \quad (36)$$

式中, $\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_1 & 0 \\ 0 & \Pi_2 \end{bmatrix}$, $\Pi_1 = A^T P - (BK)^T P + PA - PBK + PBK(PBK)^T + 2a_2 T^T T + 2a_3 L^T L$, $\Pi_2 = A^T Q - (OC)^T Q + QA - QOC + a_1^{-1}QO(QO)^T + a_2^{-1}QB(QB)^T + a_3^{-1}QD(QD)^T + a_1 \epsilon^2 C^T C + \theta^2 C^T C + 2a_2 T^T T + 2a_3 L^T L$ 。根据系统渐近稳定判据可得, 当 $\Pi < 0$, 即 $\Pi_1 < 0$ 且 $\Pi_2 < 0$ 时, 系统式(24)渐近稳定。

接下来通过一个矩阵的形式来对不等式 $\Pi_1 < 0$ 和 $\Pi_2 < 0$ 进行判定。对于 $\Pi_1 < 0$, 由 Schur 补性质可得:

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 & PBK \\ * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (37)$$

式中, $\mathbf{E}_1 = A^T P - (BK)^T P - PBK + 2a_2 T^T T + PA + 2a_3 L^T L$ 。

对不等式 $\Gamma_1 < 0$ 左右同时乘 $\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}\}$ 得

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_2 & BKP^{-1} \\ * & -P^{-1}P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (38)$$

式中, $\mathbf{E}_2 = P^{-1}A^T - P^{-1}K^T B^T + AP^{-1} + 2a_2 P^{-1}T^T \cdot TP^{-1} - BKP^{-1} + 2a_3 P^{-1}L^T LP^{-1}$ 。

Γ_2 可被写为 $\Gamma_3 + \Gamma_4$, 其中

$$\Gamma_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_2 & BKP^{-1} \\ * & -\delta P^{-1} \end{bmatrix}, \Gamma_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ * & \delta P^{-1} - P^{-1}P^{-1} \end{bmatrix}$$

若 $\Gamma_3 < 0$ 和 $\delta P^{-1} - P^{-1}P^{-1} < 0$ 成立, 则确保 $\Gamma_2 < 0$ 。另外, $\delta P^{-1} - P^{-1}P^{-1} < 0$ 等价于 $\delta I - P^{-1} < 0$ 。

对于 $\Gamma_3 < 0$, 令 $X = P^{-1}$, $Y = KX$ 得到

$$\Gamma_5 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & BY \\ * & -\delta X \end{bmatrix} < 0 \quad (39)$$

式中, $\mathbf{E}_3 = XA^T - Y^T B^T + AX + 2a_2 XT^T TX - BY + 2a_3 XL^T LX$ 。

由 Schur 补性质可得 $\Gamma_5 < 0$ 等价于

$$\Gamma_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_4 & BY & \sqrt{2} XT^T & \sqrt{2} XL^T \\ * & -\delta X & 0 & 0 \\ * & * & -a_2^{-1}I & 0 \\ * & * & * & -a_3^{-1}I \end{bmatrix} < 0 \quad (40)$$

式中, $\mathbf{E}_4 = XA^T - Y^T B^T + AX - BY$ 。

令 $Z=QO$ 可得 $\Pi_2=A^T Q-C^T Z^T+QA-ZC+a_1^{-1}ZZ^T+a_2^{-1}QB(QB)^T+a_3^{-1}QD(QD)^T+a_1\epsilon^2C^T C+\theta^2C^T C+2a_2T^T T+2a_3L^T L$ 。

由 Schur 补性质可得 $\Pi_2<0$ 等价于

$$\Gamma_7=\begin{bmatrix} \Xi_5 & Z & QB & QD \\ * & -a_1I & 0 & 0 \\ * & * & -a_2I & 0 \\ * & * & * & -a_3I \end{bmatrix}<0 \quad (42)$$

式中, $\Xi_5=A^T Q-C^T Z^T+QA-ZC+a_1\epsilon^2C^T C+\theta^2C^T C+2a_2T^T T+2a_3L^T L$ 。

注4 根据式(9)的系统矩阵 A 和输入矩阵 B , 利用 LMI 可求解出满足约束条件式(25)~(27)的控制增益 K 和观测器增益 O 。控制器增益为 $K=YX^{-1}$, 观测器增益为 $O=Q^{-1}Z$ 。

3 仿真验证

本文以含有2个CPL和1个储能单元的直流微电网系统作为仿真对象,在存在FDI和不存在FDI这2种情况下,分别设计事件触发滑模控制器进行仿真实验。

图1中的直流微电网系统的参数如表1所示,仿真参数 $\mu=0.01$,事件触发阈值为 $\epsilon=0.86$, $\theta=0.41$,系统初始状态为 $\tilde{x}(0)=[1.5 \ -1 \ 1.5 \ 2 \ 2 \ 1]^T$,原系统的平衡点为 $x_{120}=200\text{ V}$, $x_{220}=200\text{ V}$,观测器初始状态为 $\hat{x}(0)=[-1 \ 0.7 \ 3.5 \ 4 \ 1 \ 2]^T$ 。

表1 直流微电网系统的参数

Table 1 Parameters of direct-current microgrid system

R_s/Ω	L_s/mH	C_s/mF	U_{dc}/V	R_1/Ω	L_1/mH
0.6	39.5	1 100	220	0.8	39.5
C_1/mF	P_1/W	R_2/Ω	L_2/mH	C_2/mF	P_2/W
50	300	0.8	39.5	50	400

首先考虑不存在FDI的直流微电网系统,设计事件触发滑模控制器。根据条件 $MB \neq 0$ 选取滑模面参数矩阵 $M=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2.1]$,通过求解不等式(27)~(29),得到控制器增益 $K=[-0.0585 \ -0.0714 \ -0.0585 \ -0.0714 \ 0.1165 \ -0.2653]$,常数 $a_1=4.94$, $a_2=0.89$, $a_3=0.74$ 和 $\delta=0.4$,观测器增益为

$$O=\begin{bmatrix} -21.1625 & 0.9129 & -1.6067 \\ 59.5163 & 0.4608 & 8.1037 \\ 0.9129 & -21.1625 & -1.6067 \\ 0.4608 & 59.5163 & 8.1037 \\ -2.7390 & -2.7390 & -5.2755 \\ 0.0080 & 0.0080 & 0.1136 \end{bmatrix}$$

选取控制器参数 $\alpha=1$, $\beta=1$, $\gamma=0.01$, $p=0.8$, $q=1.6$,则收敛时间上界 $T_{\max}=7.5\text{ s}$,根据控制

器增益 K 可得固定时间滑模控制器。

接下来考虑存在FDI的情况,FDI信号为 $W\phi(\tilde{x}(t),t)=\tilde{x}(t)\sin(t)$ 。选取滑模面参数矩阵 $M=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2.1]$,通过求解不等式(27)~(29),得到 $a_1=4.89$, $a_2=0.89$, $a_3=0.74$, $\delta=0.5$,控制增益 $K=[-0.0102 \ -0.0289 \ -0.0102 \ -0.0289 \ 0.0021 \ -0.4385]$,观测器增益为

$$O=\begin{bmatrix} -19.8448 & 0.7442 & 0.3933 \\ 86.9533 & -1.1843 & 0.5753 \\ 0.7442 & -19.8448 & 0.3933 \\ -1.1843 & 86.9533 & 0.5753 \\ -2.9827 & -2.9827 & -3.4973 \\ 1.1346 & 1.1346 & 2.1940 \end{bmatrix}$$

选取控制器参数 $\alpha=1$, $\beta=1$, $\gamma=0.01$, $p=0.8$, $q=1.6$,由引理1得到系统收敛时间的上界为 $T_{\max}=7.5\text{ s}$ 。由式(16)得固定时间滑模控制器。

将上述2种控制器分别引入不存在FDI和存在FDI的直流微电网系统,并对仿真结果进行对比分析。在状态观测器和滑模控制器的作用下,系统的观测轨迹 $\hat{x}(t)$ 、误差轨迹 $e(t)$ 、滑模面 $S(t)$ 和控制输入 $u(t)$ 如图3~6所示, $\hat{x}_{1,1}$ 、 $\hat{x}_{1,2}$ 分别为第1个CPL中的电感电流观测值、电容电压观测值; $\hat{x}_{2,1}$ 、 $\hat{x}_{2,2}$ 分别为第2个CPL中的电感电流观测值、电容电压观测值; $\hat{x}_{s,1}$ 、 $\hat{x}_{s,2}$ 分别为储能单元中的电感电流观测值、电容电压观测值; $\hat{e}_{1,1}$ 、 $\hat{e}_{1,2}$ 分别为第1个CPL中的电感电流观测误差、电容电压观测误差; $\hat{e}_{2,1}$ 、 $\hat{e}_{2,2}$ 分别为第2个CPL中的电感电流观测误差、电容电压观测误差; $\hat{e}_{s,1}$ 、 $\hat{e}_{s,2}$ 分别为储能单元中的电感电流观测误差、电容电压观测误差。传感器-观测器通道和观测器-控制器通道的事件触发时刻分别如图7、8所示。

由图3可见,在固定时间滑模控制器作用下,无FDI的直流微电网系统观测轨迹 $\hat{x}(t)$ 在3s时实现稳定,FDI下的直流微电网系统观测轨迹 $\hat{x}(t)$ 在4s时实现稳定。说明在FDI的影响下,直流微电网系统的动态响应变差,但是在事件触发滑模控制器作用下,直流微电网系统仍然能够实现稳定。

由图4可见,无FDI的直流微电网系统的观测误差轨迹 $e(t)$ 在3s时收敛到0,FDI下的直流微电网系统的观测误差轨迹 $e(t)$ 在4s时收敛到0。结合图3、4可知,本文所设计的状态观测器能够实现直流微电网系统状态的估计。

由图5可见,无FDI时,滑模面函数 $S(t)$ 在3s时收敛到0,有FDI时,滑模面函数 $S(t)$ 在4s时收敛到0,而且系统状态在收敛时间上界 $T_{\max}=7.5\text{ s}$ 内趋近到滑模面并且后续一直保持在滑模面上。

由图 6 可知,无 FDI 时,滑模控制器 $u(t)$ 在 3 s 时收敛到 0,有 FDI 时,滑模控制器 $u(t)$ 在 4 s 时收敛到 0,结合图 3~5 可知,此时系统状态也实现稳定。可见本文所设计的滑模控制器能够抑制 CPL

扰动和 FDI 造成的系统电压不稳定。

图 7、8 分别为传感器-观测器通道和观测器-控制器通道的事件触发时刻。可见,引入事件触发策略可以减少系统的通信频率,节省网络资源。

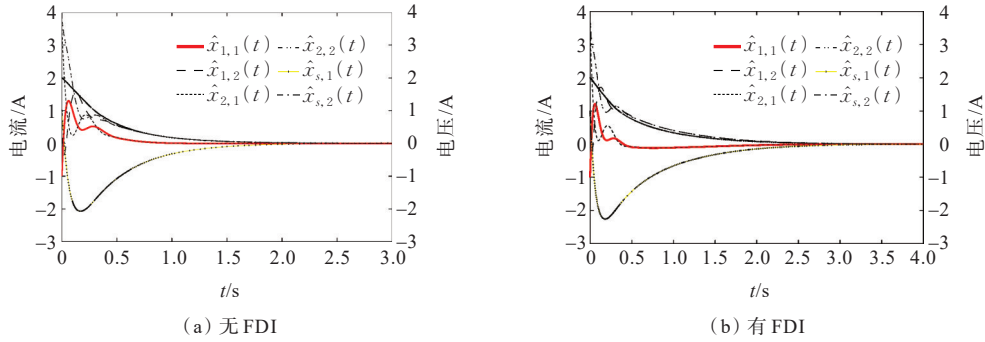


图 3 直流微电网系统观测轨迹

Figure 3 Observation trajectories of direct-current microgrid system

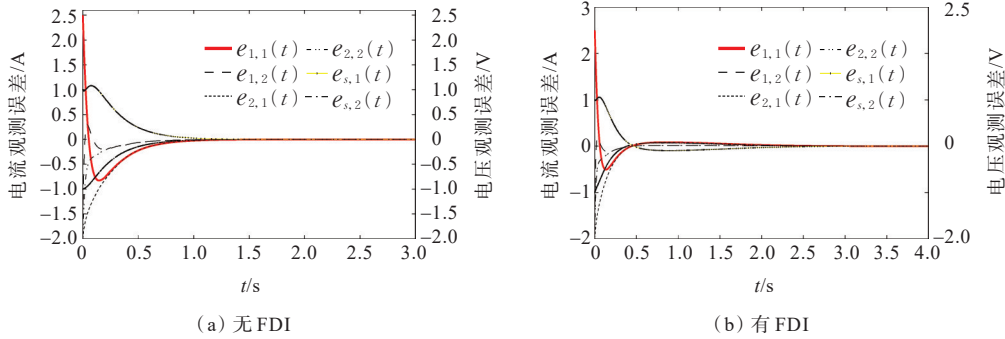


图 4 直流微电网系统的误差轨迹

Figure 4 Error trajectories of direct-current microgrid system

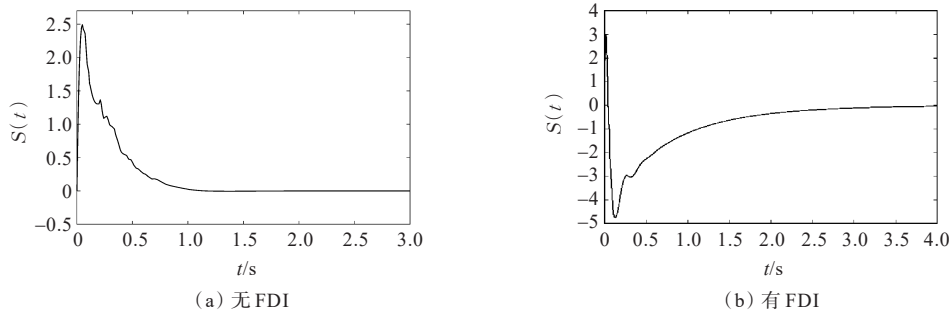


图 5 滑模面 $S(t)$

Figure 5 Sliding surface $S(t)$

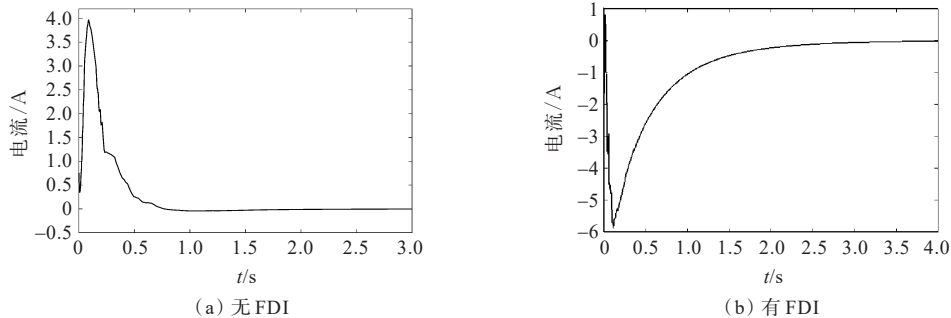


图 6 控制输入

Figure 6 Control input

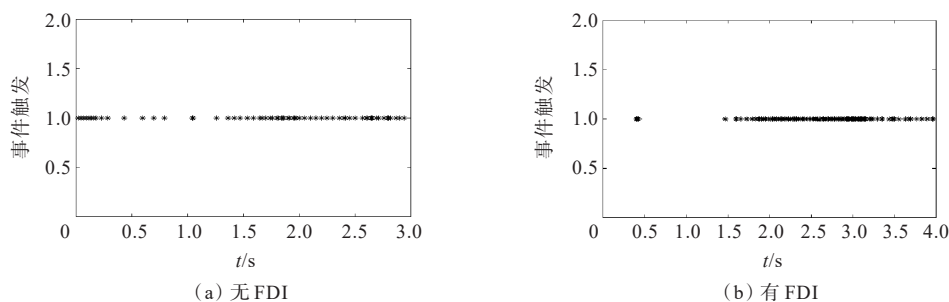


图7 传感器-观测器通道事件触发时刻

Figure 7 Triggering instants of sensor-to-observer channel

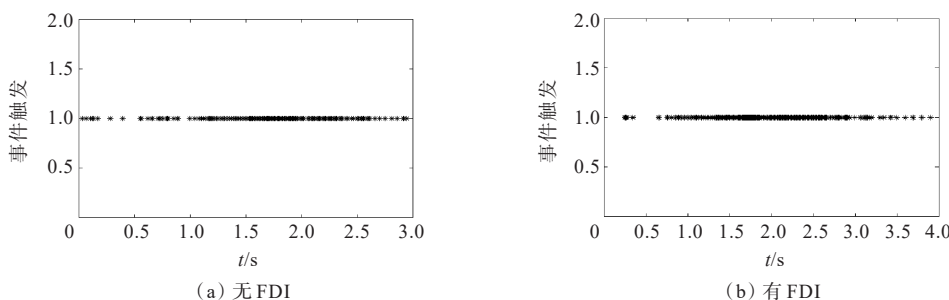


图8 观测器-控制器通道事件触发时刻

Figure 8 Triggering instants of observer-to-controller channel

4 结语

本文以直流微电网系统为研究对象,针对系统中CPL扰动和FDI造成的母线电压波动问题,提出了一种基于事件触发机制的固定时间滑模控制方法。本方法通过引入事件触发机制减少了通信频率,并设计了状态观测器以及基于观测器的固定时间滑模控制器,克服了CPL扰动和FDI的影响,使系统在固定时间内达到稳定。

参考文献:

- [1] 李俊洁,刘毅力,沈志雨,等.一种适用于直流微网的电流差动保护[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):55-63. LI Jiaojie, LIU Yili, SHEN Zhiyu, et al. Research on a current differential protection suitable for DC microgrid [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(1):55-63.
- [2] MAGALDI G L, SERRA F M, DE ANGELO C H, et al. Voltage regulation of an isolated DC microgrid with a constant power load: a passivity-based control design[J]. Electronics, 2021,10(17):2085.
- [3] SINGH N, ELAMVAZUTHI I, NALLAGOWNDEN P, et al. Routing based multi-agent system for network reliability in the smart microgrid[J]. Sensors, 2020,20(10):2992.
- [4] 单瑞卿,盛阳,苏盛,等.考虑攻击方身份的电力监控系统网络安全风险分析[J].电力科学与技术学报,2022,37(5):3-16. SHAN Ruiqing, SHENG Yang, SU Sheng, et al. Risk

- analysis of power system cyber security considering identity of malicious adversaries[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(5):3-16.
- [5] WU T, LIU J, XUE L, et al. Fixed-time synchronization of multilayer complex networks under denial-of-service attacks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023,70(9):3519-3523.
- [6] 张露元,许寅,吴翔宇,等.抵御虚假数据注入攻击的交流微电网分布式韧性控制[J].电力系统自动化,2023,47(8):44-52. ZHANG Luyuan, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Distributed resilient control of AC microgrid against false data injection attacks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(8):44-52.
- [7] 张佳伟,张江南,吴坡,等.基于融合容积卡尔曼滤波的直流微电网虚假数据检测[J].智慧电力,2024,52(3):87-93. ZHANG Jiawei, ZHANG Jiangnan, WU Po, et al. False data detection in DC microgrids based on fusion of cubature Kalman filters[J]. Smart Power, 2024,52(3):87-93.
- [8] 陶磊,罗萍萍,林济铿.基于深度学习的直流微电网虚假数据注入攻击二阶段检测方法[J].中国电力,2024,57(9):11-19. TAO Lei, LUO Pingping, LIN Jikeng. Two-stage detection method for DC micro grid false data injection attack based on deep learning[J]. Electric Power, 2024,57(9):11-19.
- [9] 谢云云,严欣腾,燕子敖,等.面向交直流混联电网的虚假数据注入攻击策略优化[J].电力工程技术,2023,42(4):94-101. XIE Yunyun, YAN Xinteng, YAN Zi'ao, et al. Strategy optimization of false data injection attack on AC-DC

- hybrid systems[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2023,42(4):94-101.
- [10] 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.
XIE Xiangpeng, YANG Fuyi, WEI Cong, et al. Joint design of FDI estimation and fuzzy control for DC microgrid under hybrid attacks[J].*Control and Decision*, 2023,38(8):2335-2345.
- [11] 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 Fanghong, ZHENG Xiangkang, DENG Chao, et al. Detection and system recovery method against unbounded false data injection network attack on DC microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023,47(2):146-153.
- [12] ZUO S, ALTUN T, LEWIS F L, et al. Distributed resilient secondary control of DC microgrids against unbounded attacks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 3850-3859.
- [13] 赖琛,郑柏超,陈志鹏,等.虚假数据注入攻击下基于扩张观测器的滑模控制研究[J].*南京信息工程大学学报(自然科学版)*,2023,15(4):468-477.
LAI Chen, ZHENG Bochao, CHEN Zhipeng, et al. Sliding mode control based on extended observer against false data injection attack[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2023,15(4):468-477.
- [14] 薛艳梅,任雯,郑柏超.基于滑模控制方法的信息物理系统的安全控制[J].*计算机仿真*,2022,39(5):249-254.
XUE Yanmei, REN Wen, ZHENG Bochao. Security control of cyber-physical systems based on sliding mode control approach[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(5): 249-254.
- [15] CAO Z R, NIU Y G, SONG J. Finite-time sliding-mode control of Markovian jump cyber-physical systems against randomly occurring injection attacks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020,65(3):1264-1271.
- [16] LYU S Y, JIN X Z, DING L J, et al. Adaptive sliding-mode control of a class of disturbed cyber-physical systems against actuator attacks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2021,96:107492.
- [17] LIN W S, ZHANG B, YAO D Y, et al. Adaptive neural sliding mode control of Markov jump systems subject to malicious attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021,51(12):7870-7881.
- [18] LI J, YANG D F, GAO Y C, et al. An adaptive sliding-mode resilient control strategy in smart grid under mixed attacks[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2021, 15(15):1971-1986.
- [19] 楼琦凯,陈蓓,丁勳,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 Qikai, CHEN Bei, DING Meng, et al. Sliding mode control of DC microgrid under false data injection attack[J]. *Control and Decision*, 2022,37(12):3207-3214.
- [20] BARZEGARI Y, ZAREI J, RAZAVI-FAR R, et al. Resilient consensus control design for DC microgrids against false data injection attacks using a distributed bank of sliding mode observers[J]. *Sensors*, 2022,22(7):2644.
- [21] CECILIA A, SAHOO S, DRAGIČEVIĆ T, et al. Detection and mitigation of false data in cooperative DC microgrids with unknown constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021,36(8):9565-9577.
- [22] 赵峰,甘延奇,陈小强,等.MMC变流器的无差拍电流预测控制器研究与设计[J].*高压电器*,2023,59(3):123-131.
ZHAO Feng, GAN Yanqi, CHEN Xiaoqiang, et al. Research and design of deadbeat current predictive controller for MMC converters[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(3): 123-131.
- [23] 王本斐,张荣辉,冯国栋,等.基于事件触发的直流微电网无差拍预测控制[J].*自动化学报*,2024,50(3):475-485.
WANG Benfei, ZHANG Ronghui, FENG Guodong, et al. Event-triggered deadbeat predictive control for DC microgrid[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024,50(3):475-485.
- [24] 刘永忠,刘斌,谢周腾.直流微电网在事件触发非周期间歇控制下的镇定[J/OL].*控制理论与应用*,1-9[2024-04-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240301.0851.008.html>.
LIU Yongzhong, LIU Bin, XIE Zhouteng. Stabilization of DC microgrid under event-triggered aperiodic intermittent control[J/OL]. *Control Theory & Applications*. 1-9[2024-04-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240301.0851.008.html>.
- [25] 赵海祺,卢开诚,董树锋,等.考虑通信状态变化的直流微电网分布式事件驱动优化调度[J].*电力系统自动化*, 2023,47(20):33-41.
ZHAO Haiqi, LU Kaicheng, DONG Shufeng, et al. Distributed event-triggered optimal scheduling for DC microgrids considering communication status change[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023,47(20):33-41.
- [26] 郭伟,赵洪山.基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J].*电工技术学报*,2020,35(5):1140-1151.
GUO Wei, ZHAO Hongshan. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(5):1140-1151.
- [27] 马永胜,车伟伟,邓超.拒绝服务攻击下直流微电网的事件触发控制[J].*控制理论与应用*,2022,39(10):1907-1914.
MA Yongsheng, CHE Weiwei, DENG Chao. Event-triggered control of DC microgrids with DoS attacks[J]. *Control Theory & Applications*, 2022,39(10):1907-1914.