

文章编号: 1005-0523(2026)04-0085-12



基于改进滑模观测器的高速列车牵引整流器 传感器故障容错控制

谭 畅^{1,2}, 李煜刚^{1,2}, 冷江涛¹, 汤明睿¹

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 华东交通大学江西省先进控制与优化重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 为降低高速列车运行过程中牵引整流器传感器突发故障造成的影响, 文章提出一种基于改进滑模观测器的传感器故障容错控制方法, 以实现传感器故障的快速诊断与容错控制。首先, 通过分析两电平牵引整流器拓扑结构, 建立其包含未知扰动的数学模型; 其次, 提出一种基于自适应滑模观测器的传感器故障诊断策略, 通过线性矩阵不等式(LMI)方法设计滑模观测器, 并应用自适应律在线修正滑模鲁棒项增益, 得到电压与电流估计信号, 将其与传感器采样信号构建残差信号, 通过与设定的阈值比较实现在线故障诊断; 然后, 通过引入新型滑模指数趋近律, 设计电压外环滑模容错控制器和电流内环容错控制器; 最后, 基于 Simulink 平台搭建大功率牵引整流器模型进行仿真验证。仿真结果表明, 文章所设计的容错方法能够在 0.020 s 内诊断出系统发生的传感器故障, 并在 0.050 s 内实现补偿, 观测器状态估计误差小于 1%, 电压外环容错控制器在负载突变工况下调节时间缩短至 0.035 s。文章所提方法有效提高了系统动态响应性能, 增强了系统可靠性, 对高速列车安全运行控制具有一定参考价值。

关键词: 高速列车牵引整流器; 自适应滑模观测器; 故障诊断; 容错控制

中图分类号: U224

文献标志码: A

本文引用格式: 谭畅, 李煜刚, 冷江涛, 等. 基于改进滑模观测器的高速列车牵引整流器传感器故障容错控制[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(4): 85-96.

An Improved Sliding Mode Observer Based Fault-Tolerant Control Scheme for High-Speed Train Traction Rectifiers with Sensor Faults

Tan Chang^{1,2}, Li Yugang^{1,2}, Leng Jiangtao¹, Tang Mingrui¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To mitigate the impact of sudden sensor faults in traction rectifiers during high-speed train operation, this paper proposes a sensor fault-tolerant control method based on an improved sliding mode observer, which achieves rapid sensor fault diagnosis and fault-tolerant control. Firstly, the topological structure of a two-level traction rectifier is analyzed to establish its mathematical model with unknown disturbances. Subsequently, a novel sensor fault diagnosis strategy employing an adaptive sliding mode observer is developed. The sliding mode observer is designed using linear matrix inequality (LMI) methods, and the sliding mode robust term gain

收稿日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(62003138); 江西省自然科学基金项目(20242BAB25087); 江西省 2023 年度研究生创新专项资金项目(YC2023-S512)

is adjusted online via adaptive laws to obtain voltage and current estimation signals. Residual signals are constructed by comparing these estimated signals with sensor-sampled data, enabling online fault diagnosis through threshold comparison. Furthermore, a voltage outer-loop sliding mode fault-tolerant controller is designed by introducing a novel sliding mode exponential reaching law, complemented by a current inner-loop fault-tolerant controller to enhance system robustness. Finally, a high-power traction rectifier model was constructed on the Simulink platform for simulation verification in this study. The simulation results demonstrate that the proposed fault-tolerant method can diagnose sensor faults within 0.020 s and implement compensation within 0.050 s, with observer state estimation error maintained below 1%. The voltage outer-loop fault-tolerant controller achieves a reduced settling time of 0.035 s under load transient conditions. The proposed methodology effectively enhances system dynamic response performance and operational reliability, providing valuable insights for safety-critical control of high-speed trains.

Key words: traction rectifier for high-speed trains; adaptive sliding mode observer; fault diagnosis; fault-tolerant control

Citation format: Tan Chang, Li Yugang, Leng Jiangtao, et al. An improved sliding mode observer based fault-tolerant control scheme for high-speed train traction rectifiers with sensor faults[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(4): 85–96.

随着我国高速列车运营里程和运行时速的提升,高速列车动力核心——交流牵引传动系统的安全问题受到广泛关注^[1-2]。作为该系统最前端的电力电子设备,牵引整流器长期处于高频电磁扰动、机械振动等严苛环境中,易出现传感器接插件松动、信号传输线缆断裂等机械故障,对高速列车运行构成极大的安全隐患。因此,针对牵引整流器进行传感器故障容错研究具有重要工程意义。

在牵引整流器传感器故障诊断领域,现有方法分为基于数据驱动和基于机理模型两类。其中,基于机理模型的观测器法应用最为广泛^[3]。Jadoon等^[4]提出一种基于线性矩阵不等式(LMI)优化的状态观测器与鲁棒扰动估计方法,可实时区分传感器开路故障与外部扰动,但未考虑实际系统中参数漂移的影响,后续研究可引入自适应机制动态补偿不确定性。Zhang等^[5]通过设计基于自适应滑模观测器的残差生成机制和动态阈值区间,有效区分非线性参数化的多传感器故障模式,但是故障函数需要依赖先验知识手动构造,对未知故障泛化能力不足。Yu等^[6]通过构建整流器模型生成电流残差,并基于残差分析设计诊断函数,无需额外硬件条件即可实现故障定位与类型识别,但诊断函数基于多阈值逻辑,结构复杂且依赖精确参数标定。总体而言,现有方法能实现传感器故障诊断,但模型依赖性强、数据需求高且阈值设计复杂,可结合自适应

动态算法与智能算法优化阈值策略以提升复杂工况下的诊断精度。

在容错控制方面,现有研究成果多集中在主动容错控制方法。已有学者基于观测器实现牵引整流器传感器故障的快速检测与信号重构,有效提升了牵引整流器系统的容错能力^[7-9]。此外,传统比例-积分(PI)控制器易受到系统参数摄动扰动,对高速列车安全运行有一定影响^[10]。因此,在实现“容错”目标时,增强控制系统的鲁棒性具有实际意义。近年来,不少学者将非线性控制方法,如自抗扰控制、滑模控制等,应用到牵引整流器控制中。刘爽^[11]用滑模控制器代替传统PI控制器,通过优化网侧整流器的控制策略,抑制网侧低频振荡。王浩宇^[12]提出一种基于滑模观测器的动车组网侧整流器滑模控制策略,解决了滑模控制器在负载突变时鲁棒性不足的问题,提升了车网耦合系统在多工况运行下的直流电压抗扰动能力。综上所述,现有牵引整流器容错控制方法通过重构控制器输入或融合非线性控制策略,显著提升了故障隔离速度与系统鲁棒性,但仍面临滑模抖振等挑战,可进一步结合多模态观测器与动态优化算法,兼顾系统动态响应速度与稳态控制精度。

本文以高速列车两电平牵引整流器为研究对象,提出一种基于自适应滑模观测器的传感器故障容错方法,实现对突发传感器故障的补偿。

1 问题提出

为设计高速列车牵引整流器传感器故障容错控制方法,本节首先建立牵引整流器的数学模型,并阐述本文的控制问题。

1.1 牵引整流器数学模型

高速列车牵引整流器是一种单相脉冲宽度调制(PWM)整流器,主要有两电平、三电平两种结构。鉴于两电平结构相对三电平结构更简单,制造成本与维护成本更低,且在牵引传动领域应用更为广泛,本文以两电平牵引整流器为研究对象。

为方便建立牵引整流器数学模型,本节将双重化牵引整流器结构单重化,结构如图1所示。图1中, $f_1 \sim f_4$ 表示整流器的开关器件绝缘栅双极性晶体管(IGBT); $g_1 \sim g_4$ 为反并联二极管,与IGBT一起组成a、b相两相桥臂; L_1 和 C_1 分别为整流器直流侧滤波电感与滤波电容; C_0 为整流器直流侧支撑电容,用于稳压。

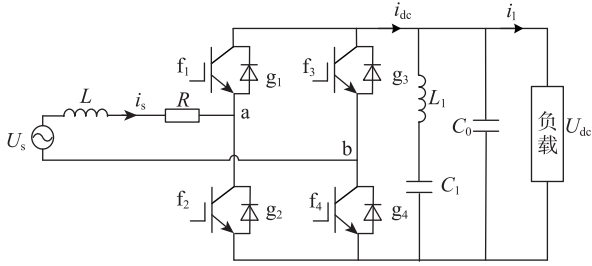


图1 牵引整流器拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of traction rectifier

首先定义a相桥臂和b相桥臂的开关函数分别为 S_a 与 S_b , 表达式为

$$\begin{cases} S_a = \begin{cases} 1, & f_1 \text{ 或 } g_1 \text{ 导通} \\ 0, & f_2 \text{ 或 } g_2 \text{ 导通} \end{cases} \\ S_b = \begin{cases} 1, & f_3 \text{ 或 } g_3 \text{ 导通} \\ 0, & f_4 \text{ 或 } g_4 \text{ 导通} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

根据基尔霍夫电压与电流定律,依据图1建立牵引整流器网侧与直流侧的数学模型,表达式为

$$\begin{cases} U_s = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + U_{ab} \\ i_{dc} = i_l + i_c \\ i_c = C_2 \frac{dU_{dc}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{ab} 为整流器输入电压; i_c 为直流侧电容电流; C_2 为工频 50 Hz 条件下直流侧支撑电容 C_0 支路与

$L_1 C_1$ 滤波支路的并联等效电容; U_s, i_s 分别为牵引整流器网侧电压,网侧电流值; L, R 分别为等效于牵引变压器二次侧的漏电感和漏电阻; U_{dc}, i_{dc} 分别为整流桥直流侧输出电压与输出电流; i_l 为负载电流。

此外,牵引整流器网侧输入端电压 U_{ab} 取值有 $U_{dc}, 0, -U_{dc}$ 三种电平,且开关函数 $S_a S_b$ 有效开关组合有 00、01、10、11 四种^[8]。 U_{ab}, i_{dc} 表达式为

$$\begin{cases} U_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ i_{dc} = (S_a - S_b)i_s \end{cases} \quad (3)$$

将含有开关函数的式(1)和式(3)代入整流器模型方程式(2),可得牵引整流器数学模型的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}d(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}(t) = [i_s U_{dc}]^T$, $\mathbf{x}(t)$ 为系统状态向量,上方加点为一阶导数; $\mathbf{u}(t) = [U_s i_l]^T$, $\mathbf{u}(t)$ 为系统输入向量; $d(t)$ 为整流器系统所受未知扰动; $\mathbf{A}$ 为状态矩阵; $\mathbf{B}$ 为输入矩阵; $\mathbf{C}$ 为输出矩阵; $\mathbf{E}$ 为扰动矩阵。表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{S_0}{L} \\ \frac{S_0}{C_2} & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

式中: $S_0 = S_a - S_b$, S_0 为等效开关函数。当牵引整流器采用单极性调制时,等效开关函数 S_0 可取 1、0、-1。

式(4)建立的牵引整流器系统数学模型为本文的研究对象。若电压、电流传感器出现卡死或显著漂移等故障,将导致系统反馈信息失真,控制器无法获取准确状态量,致使牵引整流器系统控制性能恶化,影响系统平稳运行。因此,需对其展开传感器故障容错控制研究,本文提出的控制问题如下。

1.2 控制问题

本文的控制目标:针对牵引整流器数学模型(4),采用滑模控制理论,设计基于自适应滑模观测器的传感器故障容错控制方法,使其在存在突发传感器故障的工况下仍能稳定安全地运行。

为实现以上控制目标,本文的整体设计方案如图2所示,主要包括牵引整流器主电路模块、自适应

于0的正数; e_y 为观测误差; 滑模面选为 $s_o = Fe_y$ 。

定义状态误差为 $e = x - \hat{x}$, 观测误差为 $e_y = y - \hat{y}$, 由式(4)和式(8)可得

$$\begin{cases} \dot{e} = (A - G_1 C)e + Ed - v \\ e_y = Cx - C\hat{x} = Ce \end{cases} \quad (10)$$

令 $\hat{\rho}$ 的自适应律算法为

$$\dot{\hat{\rho}} = \lambda |s_o| \quad (11)$$

式中: λ 为自适应律常数。

为确保滑模观测器的动态性能与鲁棒性, 需合理设计线性反馈增益矩阵 G_1 。本文基于文献[15], 采用舒尔补引理, 结合式(6)、式(7), 将 G_1 的设计方法转化为求解线性矩阵不等式约束优化问题。

$$\begin{aligned} & \min \bar{\sigma} \\ & \text{s.t.:} \begin{cases} P > I \\ PA + HC + (PA + HC)^T < 0 \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{(E^T P - FC)^T} & E^T P - FC \\ E^T P - FC & \frac{\partial I}{\partial I} \end{bmatrix} > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\min \bar{\sigma}$ 为最小化目标函数; H 为变量矩阵。

不等式(12)为线性矩阵不等式约束方程, 滑模观测器线性反馈增益矩阵 G_1 为

$$G_1 = -P^{-1}H \quad (13)$$

完成自适应滑模观测器设计后, 需要通过严格的稳定性分析验证其理论可行性。以下通过定理1分析并证明观测器系统的稳定性。

定理1 对于满足假设1~假设3的观测器式(8), 应用自适应律式(11), 可以实现观测误差全局渐近稳定, 且误差最终收敛至零。

证明 令 V 为李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\lambda} \tilde{\rho}^T \tilde{\rho} \quad (14)$$

式中: $\tilde{\rho} = \rho - \hat{\rho}$ 为自适应估计误差, ρ 为滑模鲁棒增益理论上界。

定义 $V_1 = \frac{1}{2} e^T P e$ 和 $V_2 = \frac{1}{2\lambda} \tilde{\rho}^T \tilde{\rho}$, 对 V_1 求导后可得

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} \dot{e}^T P e + \frac{1}{2} e^T P \dot{e} \quad (15)$$

代入式(10)后, 得到式(16)

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & \frac{1}{2} [(A - G_1 C)e + Ed - v]^T P e + \\ & \frac{1}{2} e^T P [(A - G_1 C)e + Ed - v] \end{aligned} \quad (16)$$

定义 $A_0 = A - G_1 C$, 得到

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} e^T (A_0^T P + P A_0) e + e^T P E (d - v) \quad (17)$$

代入式(6)和式(7)可知

$$\dot{V}_1 = -\frac{1}{2} e^T Q e + s_o^T (d - v) \quad (18)$$

对 V_2 求导可得

$$\dot{V}_2 = -\frac{1}{\lambda} (\rho - \hat{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} \quad (19)$$

对李雅普诺夫函数 V 求导后可得

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e + s_o^T [d - \rho_0 \operatorname{sgn} s_o - \hat{\rho} \operatorname{sgn} s_o] - \frac{1}{\lambda} (\rho - \hat{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} \quad (20)$$

进一步整理可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T Q e + s_o^T d - s_o^T \rho_0 \operatorname{sgn} s_o - s_o^T \rho \operatorname{sgn} s_o + \\ & s_o^T (\rho - \hat{\rho})^T \operatorname{sgn} s_o - \frac{1}{\lambda} (\rho - \hat{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} \\ = & -\frac{1}{2} e^T Q e + s_o^T [d - \rho_0 \operatorname{sgn} s_o - \rho \operatorname{sgn} s_o] + \\ & s_o^T (\rho - \hat{\rho})^T \operatorname{sgn} s_o - \frac{1}{\lambda} (\rho - \hat{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} \end{aligned} \quad (21)$$

将式(11)代入式(21)

$$\begin{aligned} & s_o^T [d - \rho_0 \operatorname{sgn} s_o - \rho \operatorname{sgn} s_o] \\ & \leq |s_o| |d| - |s_o| \rho_0 - |s_o| \rho \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & s_o^T (\rho - \hat{\rho})^T \operatorname{sgn} s_o - \frac{1}{\lambda} (\rho - \hat{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} \\ & = |s_o| (\rho - \hat{\rho})^T - \frac{1}{\lambda} (\rho - \hat{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

由于 $\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e < 0$ 且 $V > 0$, 根据李雅普诺夫稳定性理论, 该观测器误差系统是全局渐近稳定的, 因此定理1成立。

3 故障诊断算法设计

定义残差 r_{is} 和 r_{udc} 用于进行故障诊断

$$\begin{cases} r_{is} = |i_s - \hat{i}_s| \\ r_{udc} = |U_{dc} - \hat{U}_{dc}| \end{cases} \quad (24)$$

式中: r_{is} 为网侧电流残差; $\hat{i}_s$ 为观测器估计电流信号; r_{udc} 为直流侧输出电压残差; $\hat{U}_{dc}$ 为观测器估计电压信号。受不确定性因素影响, 系统正常运行工况下, 残差虽不为0, 但会保持相对较低的水平; 当其中一个传感器发生故障时, 残差相较于系统正常运行工况会发生大幅度跳变, 系统故障容错单元可针对残差变化实时进行检测与隔离。

考虑到牵引整流器的性能参数与运行环境, 本文采用如下阈值计算公式

$$\begin{cases} T_1 = h_1(r_{ism} + \eta) \\ T_2 = h_2(r_{udcm} + \eta) \end{cases} \quad (25)$$

式中: T_1 为电流故障诊断阈值, T_2 为电压故障诊断阈值; h_1 和 h_2 均为设计参数, 且二者均属于区间 $[2, 3]$, 确保诊断可靠性; r_{ism} 和 r_{udcm} 是系统正常运行工况下 r_{is} 和 r_{udc} 的峰值; η 为经量化的噪声扰动信号。

基于上文的残差与阈值, 对每个采样点的残差与阈值进行比较, 电流传感器故障判断信号 σ_i 与电压传感器故障判断信号 σ_u 分别为

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, r_{is} > T_1 \\ 0, r_{is} \leq T_1 \end{cases} \quad (26)$$

$$\sigma_u = \begin{cases} 1, r_{udc} > T_2 \\ 0, r_{udc} \leq T_2 \end{cases} \quad (27)$$

式中: 当 σ_i 或 σ_u 为 1 时, 表示相应传感器发生故障; 当 σ_i 或 σ_u 输出为 0 时, 表示相应传感器未发生故障。

牵引整流器的工作环境较为恶劣, 易遭受强扰动影响, 若不对算法进行相应调整, 可能会降低故障诊断准确率。因此, 引入简单延时环节以避免故障误报, 延时环节的数学约束表达式为^[10]

$$\begin{cases} \delta_i = \begin{cases} 1, \sigma_i(m) = \sigma_i(m+1) = \dots = \sigma_i(m+n) = 1 \\ 0, \text{else} \end{cases} \\ \delta_u = \begin{cases} 1, \sigma_u(m) = \sigma_u(m+1) = \dots = \sigma_u(m+n) = 1 \\ 0, \text{else} \end{cases} \\ n = K_T \frac{f_{\text{sample}}}{f_s} \end{cases} \quad (28)$$

式中: δ_i 与 δ_u 分别为网侧电流传感器和直流侧电压传感器的故障标志; f_{sample} 为故障诊断算法离散化对应的采样频率, f_s 为整流器的开关频率; K_T 为决定故障诊断算法延时时长的变量; n 为故障延时采样点数; m 为离散采样时刻序号。

4 牵引整流器容错控制器设计

4.1 电压外环滑模容错控制器设计

传统 d-q 解耦控制架构包含电压外环控制器与电流内环控制器, 相较于电流内环控制器, 电压外环控制器负责维持直流母线电压的稳定。此外, 电压外环控制器也面临负载突变、电网波动以及能量回馈等复杂工况, 需采用更先进的非线性控制策略。因此, 以直流侧电压传感器容错控制器的输出信号作为系统控制器输入, 结合滑模控制思想, 提出基于新型指数趋近律的电压外环滑模容错控制器。

首先, 基于电压传感器故障判断信号 δ_u , 建立直流侧电压传感器故障容错控制器为

$$U_{\text{dcr}} = \delta_u \hat{U}_{\text{dc}} + (1 - \delta_u) U_{\text{dc}} \quad (29)$$

式中: U_{dcr} 为容错控制器输出的直流侧电压信号。

当采用滑模控制时, 先将整流器数学模型从自然坐标系变换到 d-q 坐标系下, 实现 d-q 解耦控制。将牵引整流器网侧电流 i_s 表示为 i_{sa} , 并形成虚拟的交流分量 i_{sb} , i_{sb} 与 i_s 幅值和频率相同, 相位相差 90° 。同理, 其余电气量也以相同方式转换到真实-虚拟 (α - β) 坐标系, 再通过 Park 变换矩阵将其转化到 d-q 坐标系中, Park 变换可表示为

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = C_{2s/2r} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中: φ 为电网同步相位角, 可以通过二阶广义积分器锁相环 (SOGI-PLL) 获得; $C_{2s/2r}$ 为 Park 变换矩阵; i_{sd} 和 i_{sq} 为电气量 i_s 在 d-q 轴的解耦分量; i_{sa} 和 i_{sb} 为电气量 i_s 在 α - β 轴的电气分量。

结合式 (1)~式 (3) 及式 (30), 可以得到牵引整流器在两相旋转坐标系下的数学模型

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = -Ri_{sd} + \omega Li_{sq} + U_{sd} - S_d U_{dc} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = -Ri_{sq} - \omega Li_{sd} + U_{sq} - S_q U_{dc} \\ C_2 \frac{dU_{dc}}{dt} = (S_d i_{sd} + S_q i_{sq}) - i_l \end{cases} \quad (31)$$

式中: U_{sd} 和 U_{sq} 为 U_s 在 d-q 轴的解耦分量; S_d 和 S_q 为开关函数在 d-q 轴的解耦分量; ω 为电网基波角频率; i_l 为牵引整流器直流侧电流。

牵引整流器的控制目标为实现系统网侧单位功率因数运行与直流侧输出电压稳定, 即无功电流 i_{sq} 与直流侧电压 U_{dc} 满足

$$\begin{cases} i_{sq} = i_{sq}^* = 0 \\ U_{dc} = U_{dc}^* \end{cases} \quad (32)$$

式中: i_{sq}^* 为电流内环给定电流; U_{dc}^* 为直流侧给定电压。

定义电流误差 e_i 与电压误差 e_u 为

$$\begin{cases} e_i = i_{sq}^* - i_{sq} \\ e_u = U_{dc}^* - U_{dc} \end{cases} \quad (33)$$

定义电流滑模面 s_{c1} 与电压滑模面 s_{c2} 为

$$\begin{cases} s_{c1} = \beta_1 e_i = \beta_1 (i_{sq}^* - i_{sq}) \\ s_{c2} = e_u + \beta_2 \frac{de_u}{dt} \end{cases} \quad (34)$$

式中: β_1 和 β_2 分别为滑模面电压与电流放大增益。

本节选取电压滑模面 s_{c2} 作为控制器滑模面 s_c , s_c 可写为

$$s_c = (U_{dc}^* - U_{dc}) + \beta_2 \left(\frac{dU_{dc}^*}{dt} - \frac{dU_{dc}}{dt} \right) \quad (35)$$

由于 U_{dc}^* 为给定量, 故 $\frac{dU_{dc}^*}{dt} = 0$, 将式(31)的最后一项代入可得

$$s_c = (U_{dc}^* - U_{dc}) - \beta_2 \left[\frac{S_d}{C_2} i_{sd} + \frac{S_q}{C_2} i_{sq} - \frac{i_1}{C_2} \right] \quad (36)$$

令滑模运动约束条件为 $s_c = 0$, 从式(36)中可提取出 d 轴给定电流 i_{sd}^* 为

$$i_{sd}^* = \frac{C_2}{S_d} \left[\frac{(U_{dc}^* - U_{dc})}{\beta_2} - \frac{S_q}{C_2} i_{sq} + \frac{i_1}{C_2} \right] \quad (37)$$

根据坐标变换功率平衡原则及牵引整流器在 d-q 坐标轴的数学模型, 可以得到开关函数 S_d 和 S_q

$$\begin{cases} S_d = \frac{U_{sd} - Ri_{sd}}{U_{dc}} \\ S_q = -\frac{\omega i_{sd} L}{U_{dc}} \end{cases} \quad (38)$$

将式(38)代入式(37)后可得

$$i_{sd}^* = \frac{C_2 U_{dc}}{\beta_2 (U_{sd} - Ri_{sd})} \left[(U_{dc}^* - U_{dc}) + \beta_2 \frac{i_1}{C_2} \right] \quad (39)$$

在实际的滑模控制中, 由于系统建模等原因, 系统控制变量不能平滑到达滑模面, 造成系统抖振的现象。为解决系统抖振的问题, 引入改进滑模指数趋近律^[16], 抑制直流电压脉动的现象, 表达式为

$$\begin{cases} \dot{s}_c = -\varepsilon f(s_c) \operatorname{sgn}(s_c) - ks_c \\ f(s_c) = \frac{1}{1/a [\ln(|s_c| + e_u)]^b + 1/|s_c| + 1} \end{cases} \quad (40)$$

式中: ε 为等速趋近项系数; k 为指数项系数; a 为新型趋近律常数项; b 为新型趋近律调节系数, 且均为正实数, $f(s_c)$ 为用于削弱滑模抖振的非线性调节函数; $\operatorname{sgn}(s_c)$ 为符号函数。

对滑模面 s_c 求导, 直流电压变化较小, 可近似认为 $\frac{dU_{dc}^*}{dt} = 0$, 并将 $\frac{dU_{dc}^*}{dt} = 0$ 代入, s_c 导数可近似为

$$\dot{s}_c = -\frac{dU_{dc}}{dt} \quad (41)$$

结合式(29)、式(31)、式(40)和式(41), 可得改进后的电压外环滑模容错控制器为

$$i_{sd}^* = \frac{C_2 U_{dcr}}{(U_{sd} - Ri_{sd})} \left[\varepsilon f(s_c) \operatorname{sgn}(s_c) + ks_c + \frac{i_1}{C_2} \right] \quad (42)$$

为证明所设计的电压外环滑模容错控制器具

有渐近稳定性, 选取李雅普诺夫函数进行稳定性分析, 令 W 为李雅普诺夫函数

$$W = \frac{1}{2} s_c^2 \quad (43)$$

对式(43)求导可得

$$\dot{W} = s_c \dot{s}_c = s_c [-\varepsilon f(s_c) \operatorname{sgn}(s_c) - ks_c] \quad (44)$$

当 $s_c > 0$ 时, 可得

$$\dot{W} = s_c \dot{s}_c = -[\varepsilon f(s_c) s_c + ks_c^2] < 0 \quad (45)$$

当 $s_c < 0$ 时, 可得

$$\dot{W} = s_c \dot{s}_c = -[ks_c^2 + \varepsilon f(s_c) s_c] < 0 \quad (46)$$

当 $s_c = 0$ 时, 可得

$$\dot{W} = s_c \dot{s}_c = 0 \quad (47)$$

根据以上分析可知, 当 $s_c \neq 0$ 时, 有 $\dot{W} < 0$ 恒成立, 因此系统输出量 U_{dc} 能在有限的时间内达到给定量 U_{dc}^* 。

4.2 电流内环容错控制器设计

电流内环控制器包括励磁轴(d轴)与转矩轴(q轴), 均采用PI控制器。相比复杂控制策略, PI控制器对测量噪声和参数波动的敏感性较低, 且仅需快速跟踪电压外环指令, 无需处理慢动态问题, 因此电流内环采用PI控制器更符合牵引整流器系统的实际运行需求。

首先, 基于电流传感器故障判断信号 δ_i , 建立网侧电流传感器故障容错控制器为

$$i_{sr} = \delta_i \hat{i}_s + (1 - \delta_i) i_s \quad (48)$$

式中: i_{sr} 表示传感器故障容错控制器输出的网侧电流信号。

i_{sr} 通过二阶广义积分器(SOGI)算法构建正交信号, 并经坐标变换得到电流内环容错控制器输入信号 i_{sqr} 与 i_{sdr} 。结合式(42)与式(48), 电流内环容错控制器方程可以描述为

$$\begin{cases} U_d = U_{sd} + \omega L i_{sqr} - \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{sd}^* - i_{sdr}) \\ U_q = U_{sq} - \omega L i_{sdr} - \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{sq}^* - i_{sqr}) \end{cases} \quad (49)$$

式中: i_{sqr} , i_{sdr} 分别为容错控制器输出电流信号经坐标变换后的d轴和q轴的电流输入信号; k_{pi} , k_{ii} 分别为电流环比例和积分系数。

同时, i_{sdr} 也作为上述电压外环滑模容错控制器的输入信号, 式(42)可以改写为

$$i_{sd}^* = \frac{C_2 U_{dcr}}{(U_{sd} - Ri_{sdr})} \left[\varepsilon f(s) \operatorname{sgn}(s) + ks + \frac{i_1}{C_2} \right] \quad (50)$$

式(49)输出电压调制信号 U_d 与 U_q , 经过反

Park变换后变为调制信号 U_α 与 U_β 。 U_α 信号通过正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 调制生成脉冲信号, 控制牵引整流器系统运行。

5 仿真验证

为验证所提出的基于改进滑模观测器的故障容错控制方法的有效性, 本文在 Simulink 仿真平台下搭建了两电平高速列车牵引整流器仿真模型。由于不同故障类型对输入信号的影响程度存在差异, 本文针对可能导致显著偏差的传感器故障开展容错控制仿真实验, 以确保系统在发生传感器故障的工况下仍能可靠运行。

5.1 仿真条件

为便于设置滑模观测器与容错控制算法的相关参数, 并分析系统是否满足滑模观测器设计的匹配条件, 为后续故障注入仿真提供理论依据, 本节首先给出牵引整流器仿真模型的关键参数, 如表 1 所示。仿真选取网侧电流传感器故障诊断阈值为 $T_1=80$ A, 选取直流侧电压传感器故障诊断阈值为 $T_2=60$ V。

表 1 系统仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters

参数	含义	数值
L	网侧滤波电感/mH	2.85
R	网侧电感等效串联电阻/ Ω	0.20
C_0	直流侧支撑电容/ μF	2 250
R_L	直流侧等效负载/ Ω	16.50
L_1	直流侧滤波电感/mH	1.20
C_1	直流侧滤波电容/ μF	2 250
U_{rms}	网侧电压有效值/V	1 550
U_{dc}^*	直流电压参考值/V	2 800

基于上表参数, 当 $S_0=1$ 时可得到系统参数矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -70.2 & -350.9 \\ 444.4 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 350.9 & 0 \\ 0 & -444.4 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

通过计算, 可知 $\text{rank}(\mathbf{CE}) = \text{rank}(\mathbf{E})$ 成立, 并求出矩阵 $\mathbf{A}$ 特征值为 $(-35.10+393.33i)$ 和 $(-35.10-$

$393.33i)$ 。分别将两个特征值与矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{E}$ 代入式 (5), 其结果可验证系统满足滑模观测器设计的匹配条件。

结合式 (12)、式 (13), 利用 MATLAB 中的 LMI 工具箱进行求解, 可得正定矩阵 $\mathbf{P}$ 、变量矩阵 $\mathbf{H}$ 以及线性反馈增益矩阵 $\mathbf{G}_1$ 。表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{P} = 10^7 \begin{bmatrix} 1.0226 & 0 \\ 0.0000 & 1.0226 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H} = 10^8 \begin{bmatrix} -7.2300 & 4.7808 \\ 4.7808 & -0.0511 \end{bmatrix} \\ \mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} 70.700 & -46.750 \\ -46.750 & -0.500 \end{bmatrix} \end{cases}$$

下面进行两组仿真实验。第 1 组系统仿真实验不模拟任何传感器故障, 验证改进型 d-q 解耦电流控制器具有更优的动态性能与抗扰动性能。第 2 组仿真实验开展电压、电流传感器故障容错仿真, 模拟网侧电流传感器卡死故障及直流侧电压传感器漂移故障, 以验证所设计故障容错算法的性能。

5.2 无传感器故障工况仿真

本系统采用基于改进型滑模电压外环容错控制器的 d-q 解耦电流控制器。为更好地展示该控制器的控制效果及优势, 本节在无传感器故障工况下将其与传统 d-q 解耦电流控制器进行对比。相关控制器参数如表 2 所示。牵引整流器直流侧电压波形如图 3 所示, 涵盖了正常运行及负载突变工况下的直流侧电压波形。

表 2 控制器参数
Tab. 2 Controller parameters

参数	含义	数值
ε	等速趋近项系数	0.08
k	指数项系数	0.07
a	新型趋近律系数	0.05
b	新型趋近律系数	2.00
K_{pu}	电压环比例系数	0.95
K_{iu}	电压环积分系数	0.60
K_{pi}	电流环比例系数	0.90
K_{ii}	电流环积分系数	1.00

当整流器系统正常运行时, 其直流侧电压输出相对稳定。通过图 3(a) 和图 3(b) 可分析两种控制器在系统正常运行时的动态性能。由图 3(a) 和图 3(b) 可知, 改进的电压外环滑模容错控制器在启动

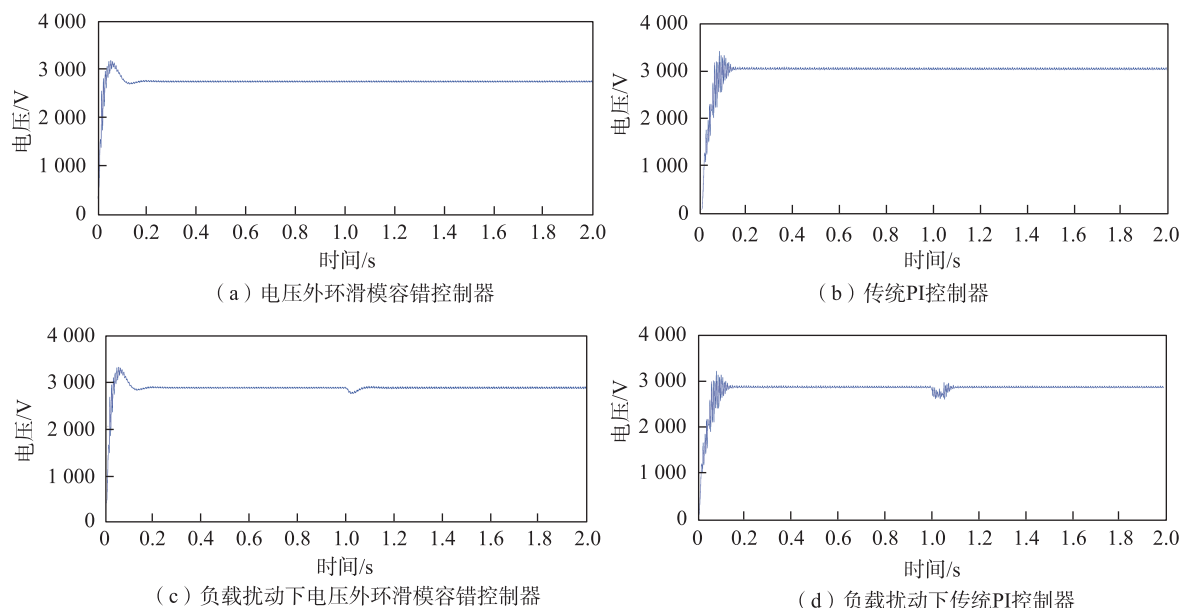


图3 两种控制器下的直流侧电压波形
Fig. 3 DC-side voltage waveforms under two controllers

时,直流侧输出电压存在明显超调,超调量约为8%,启动后0.200 s内达到稳定,响应速度较快,稳定后电压波动幅值较小。相比之下,传统PI控制器启动时抖动较大,无明显超调,稳定时间约为0.300 s,稳定后的波动幅度也较为明显。分析表明,本文设计的改进电压外环滑模容错控制器相比传统PI控制器,能更好地兼顾响应速度与稳态性能,动态性能更优。

整流器系统在实际运行中易受负载突变等扰动影响,因此仿真在 $t=1.000$ s时引入了负载突变扰动,直流侧等效负载由 $16.5\ \Omega$ 切换至 $35.0\ \Omega$ 。通过图3(c)和图3(d)可分析两种控制器的抗扰动能力与鲁棒性。由图3(c)可知,当 $t=1.000$ s时,受负载突变扰动影响,直流侧电压从2 800 V开始下降,在0.020 s内降至最低值约2 750 V,随后经过0.035 s恢复至正常输出值。整个过程无明显抖动,调节时间较短,体现了良好的抗扰动能力与鲁棒性。由图3(d)可知,当 $t=1.000$ s时,受负载突变扰动影响,直流侧电压同样从2 800 V开始下降,但调节过程伴随明显抖动,调节时间约为0.070 s。可见,PI控制器的抗扰动性能明显弱于电压外环滑模容错控制器。

5.3 电压电流传感器故障容错仿真

本节通过模拟电压和电流传感器故障,验证本文所提基于改进滑模观测器的故障容错算法的有效性与可靠性。仿真时间设为5.000 s,得到两组牵引整流器传感器故障容错仿真结果,如图4、图5所

示,分别对应网侧电流传感器卡死故障容错工况和直流侧电压漂移故障容错工况。此外,由于系统启动时残差较大,故障诊断的触发时间设置为仿真启动后0.500 s。

仿真模拟网侧电流传感器卡死故障,当仿真运行至2.000 s时,使传感器输出值恒为 -250 A。由图4(a)和图4(b)可知,当 $t=2.000$ s时,网侧电流残差在0.020 s内从低于50 A的低值跃迁至 $[200, 700]$ A,电流传感器故障诊断标志在0.020 s内也从0跳变至1,而电压传感器故障标志始终保持为0。这表明网侧电流传感器输出值偏离正常值,而直流侧电压传感器采样值未受影响。由图4(c)和图4(d)可知,故障诊断单元诊断出网侧电流传感器故障后,改进滑模观测器的观测电流值未受影响,在0.050 s内($t=2.050$ s)其替代传感器输出值,作为系统控制器的实际输入,且输入信号切换瞬间无明显抖动,从而维持了牵引整流器系统的安全稳定运行。

仿真模拟直流侧电压传感器漂移故障,当仿真运行至3.000 s时,使传感器输出值较电压参考值偏低300 V。由图5(a)和图5(b)可知,当 $t=3.000$ s时,直流侧电压残差在0.015 s内从低值快速跃迁至 $[250, 300]$ V,电压传感器故障标志于 $t=3.020$ s从0跳变至1,表明直流侧电压传感器采样值偏离正常值;网侧电流残差在仿真过程中始终保持低值,电流传感器故障标志始终为0。由图5(c)和图5(d)

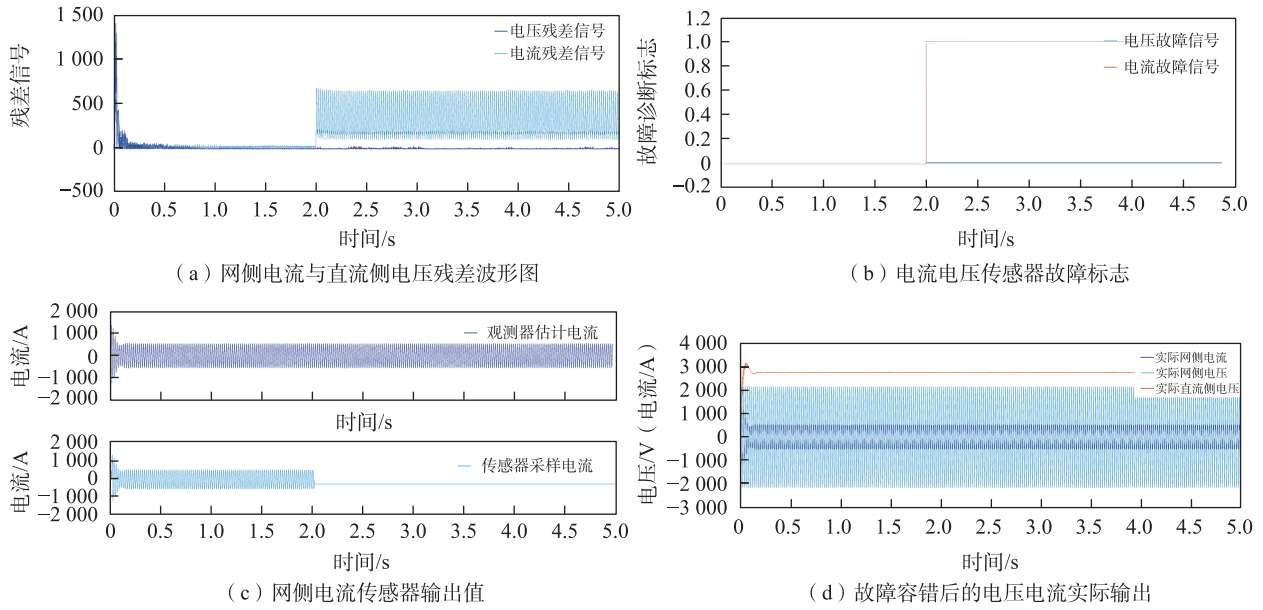


图4 电流传感器卡死故障仿真结果

Fig. 4 Simulation results of current sensor stuck fault

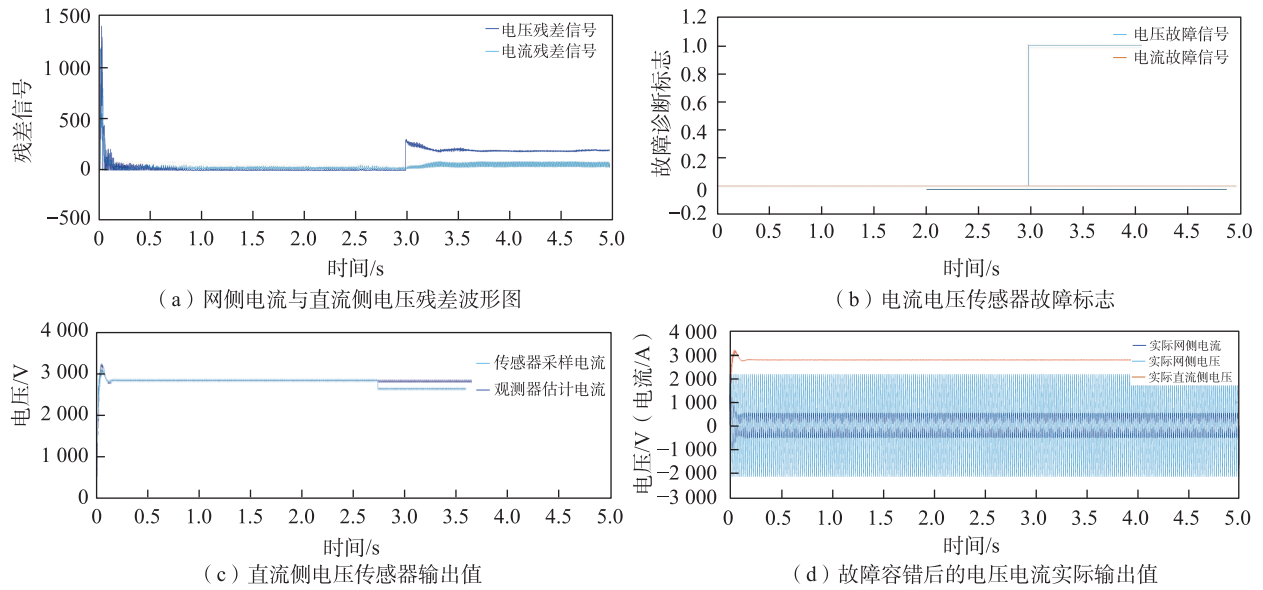


图5 电压传感器漂移故障仿真结果

Fig. 5 Simulation results of voltage sensor drift fault

可知,当故障诊断单元判断直流侧电压传感器故障后,改进滑模观测器的估计电压值稳定输出,在0.040 s内替代直流侧电压传感器输出值,作为系统控制器的实际直流电压输入信号,维持了牵引整流器控制系统的稳定运行。

综上所述,本文设计的容错控制器可在传感器故障后0.050 s内完成信号切换与稳定性控制,

诊断延迟低至0.020 s;负载突变调节时间缩短至0.035 s,验证了所提方法在复杂工况下的快速性与可靠性。

6 结论

1) 本文提出的自适应滑模观测器可精确估计牵引整流器网侧电流信号与直流侧电压信号。传

感器故障发生前,观测误差值接近于零;传感器故障后,误差值迅速跃升,为传感器故障诊断算法提供了可靠支撑。

2) 本文采用基于残差阈值比较的传感器故障诊断算法,能准确诊断出卡死、漂移两种常见传感器故障,且在诊断过程中未出现误诊断,便于牵引传动系统在线实时故障诊断。

3) 本文设计的传感器容错控制器能快速重构控制输入信号并输出至双闭环容错控制器。所设计的改进电压外环滑模容错控制器能兼顾动态响应速度与稳定性,且扰动调节时间相对于传统PI控制器缩短约50%。

参考文献:

- [1] 谭畅,张末末,杨辉,等. 基于特征模型的高速列车自适应误差补偿控制[J]. 华东交通大学学报,2023,40(3):77-87.
Tan Chang, Zhang Leilei, Yang Hui, et al. Adaptive error compensation control for high-speed train based on characteristic model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 77-87.
- [2] 姜斌,吴云凯,陆宁云,等. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述[J]. 控制与决策,2018,33(5):841-855.
Jiang Bin, Wu Yunkai, Lu Ningyun, et al. Review of fault diagnosis and prognosis techniques for high-speed railway traction system[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 841-855.
- [3] Zuo Ying, Lai Chunyan, Iyer L V, et al. Enhanced nonlinear current state observer based virtual current sensors for permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2024, 5(2): 628-638.
- [4] Jadoon H U K, Huang Deqing, Qin Na, et al. Sensor fault diagnosis and unknown disturbances estimation of high switching frequency single-phase PWM rectifier[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(8): 2769-2783.
- [5] Zhang Kangkang, Jiang Bin, Yan Xinggang, et al. Incipient voltage sensor fault isolation for rectifier in railway electrical traction systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6763-6774.
- [6] Yu Yunjun, Song Yunquan, Tao Hongwei, et al. Voltage and current sensor fault diagnosis method for traction rectifier in high-speed trains[J]. Electronics, 2024, 13(1): 197.
- [7] Ben Youssef A, El Khil S K, Slama-Belkhdja I. State observer-based sensor fault detection and isolation, and fault tolerant control of a single-phase PWM rectifier for electric railway traction[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5842-5853.
- [8] 苟斌,蒲俊楷,葛兴来,等. 基于状态观测器的单相整流系统传感器故障诊断与容错控制方法[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 44-51.
Gou Bin, Pu Junkai, Ge Xinglai, et al. A fault diagnosis and fault-tolerant control method based on state observer for sensors in single-phase PWM rectifiers[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 44-51.
- [9] Xia Jinhui, Guo Yuanbo, Dai Bijun, et al. Sensor fault diagnosis and system reconfiguration approach for an electric traction PWM rectifier based on sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4768-4778.
- [10] Gong Zifeng, Huang Deqing, Jadoon H U K, et al. Sensor-fault-estimation-based tolerant control for single-phase two-level PWM rectifier in electric traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12274-12284.
- [11] 刘爽,刘志刚,王亚琦,等. 基于滑模控制的牵引网网压低频振荡抑制方法[J]. 电网技术,2018,42(9):2999-3006.
Liu Shuang, Liu Zhigang, Wang Yaqi, et al. A novel approach to low frequency oscillation suppression of traction network voltage based on SMC[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2999-3006.
- [12] 王浩宇,张雨婷,张乔,等. 一种基于滑模观测器的动车组整流器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 81-91.
Wang Haoyu, Zhang Yuting, Zhang Qiao, et al. A control strategy for EMUs rectifier based on sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 81-91.
- [13] Corless M, Tu J. State and input estimation for a class of uncertain systems[J]. Automatica, 1998, 34(6): 757-764.
- [14] 刘聪,李颖晖,吴辰,等. 基于鲁棒自适应滑模观测器的多故障重构[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1219-1224.
Liu Cong, Li Yinghui, Wu Chen, et al. Design of the ro-

bust adaptive sliding mode observer for multiple fault reconstruction [J]. Control and Decision, 2016, 31 (7) : 1219-1224.

- [15]刘润琪,杨宣访,郭亮琨. 动力定位船舶的自适应滑模观测器设计[J]. 船舶工程,2019,41(12):95-101.

Liu Runqi, Yang Xuanfang, Guo Liangkun. Adaptive sliding-mode observer design for dynamic positioning vessel [J]. Ship Engineering, 2019, 41 (12) : 95-101.

- [16]陈德海,曹永康,邵恒,等. 基于新型指数趋近律的PMSM滑模控制研究[J]. 传感器与微系统,2023,42(10):32-35.

Chen Dehai, Cao Yongkang, Shao Heng, et al. Study on

PMSM sliding mode control based on novel exponential reaching law [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42 (10) : 32-35.



通信作者:谭畅(1982—),女,副教授,博士,研究方向为轨道交通运行优化控制、多模型自适应容错控制。E-mail:lovetanchang@163.com。

(责任编辑:姜红贵)