

牵引整流器单管 IGBT 开路故障诊断

党忆涵, 徐传芳*, 王绍祖

(大连交通大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116028)

Open Circuit Fault Diagnosis of Single-Tube IGBT in Traction Rectifier

DANG Yihan, XU Chuanfang*, WANG Shaozu

(School of Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: [Objective] The traction rectifier and the traction inverter are crucial components of train traction converters. The traction rectifier primarily consists of insulated gate bipolar transistor (IGBT), resonant circuit, DC-side capacitor, and other components. Its fault frequency is higher than that of the traction inverter. An open-circuit fault in an IGBT does not result in significant overcurrent or overvoltage, making diagnosis and protection relatively challenging. Therefore, this paper proposes an open-circuit fault diagnosis algorithm for the traction rectifier IGBT based on a mixed logic dynamic (MLD) model and adaptive thresholds. [Methods] Based on the working principle of the traction rectifier, an MLD model of the traction rectifier was established, and the grid-side current was estimated. The residual difference between the actual and estimated values of the grid-side current during single IGBT open-circuit faults was then analyzed. Finally, adaptive thresholds were designed for fault diagnosis, and the location of the IGBT open-circuit fault was distinguished based on the changes in the adaptive threshold. This led to the development of an open-circuit fault diagnosis algorithm for the traction rectifier IGBT based on the MLD model and adaptive threshold, enabling the diagnosis and localization of IGBT open-circuit faults. [Results] The MLD model was established based on the Matlab/Simulink platform, and the adaptive thresholds were introduced to verify the effectiveness of the proposed algorithm. Simulation results indicated that this fault diagnosis method can detect the open circuit faults of the IGBT within several hundred microseconds, accurately locate the faulty IGBT, and avoid misdiagnosis even in the presence of external interference. [Conclusion] The open-circuit fault diagnosis algorithm for IGBTs based on the MLD model and adaptive thresholds can quickly detect and locate faulty

IGBTs. Compared to traditional MLD fault diagnosis algorithms, this proposed method effectively addresses the threshold selection issue for different IGBT open-circuit faults, offers high diagnostic accuracy, and demonstrates strong robustness to external interference.

Key words: traction rectifier; insulated gate bipolar transistor open circuit fault; mixed logic dynamic model; adaptive threshold; fault diagnosis

摘要: [目的] 牵引整流器与牵引逆变器是列车牵引变流器的重要组成部分, 牵引整流器主要由绝缘栅双极晶体管(IGBT)、谐振电路以及直流侧电容等部件组成, 其故障频率高于牵引逆变器, 且 IGBT 发生开路故障时不会引发大幅过电流或过电压等明显现象, 诊断和保护相对较难。为此, 本文提出了一种基于混合逻辑动态(MLD)模型与自适应阈值的牵引整流器 IGBT 开路故障诊断算法。[方法] 首先, 在阐述牵引整流器工作原理的基础上, 建立了牵引整流器的 MLD 模型并估计网侧电流。然后, 对单管 IGBT 开路故障时网侧电流实际值与估计值之间的残差进行了分析。最后, 设计自适应阈值进行故障诊断, 并依据自适应阈值的变化区分 IGBT 发生开路故障的位置, 进而提出基于 MLD 模型与自适应阈值的牵引整流器 IGBT 开路故障诊断算法, 实现 IGBT 的开路故障诊断与定位。[结果] 基于 Matlab/Simulink 平台建立 MLD 模型并引入自适应阈值对所提算法的有效性进行仿真验证。仿真结果表明该故障诊断方法能够在几百微秒内检测到 IGBT 发生开路故障, 并能够准确定位到开路 IGBT, 且存在外界干扰时, 不会产生误诊断。[结论] 基于 MLD 模型与自适应阈值的 IGBT 开路故障诊断算法能够快速检测并定位到故障 IGBT。与传统 MLD 故障诊断算法相比, 所提算法能够有效解决不同 IGBT 开路时的阈值选择问题, 且故障诊断精度高, 对外界干扰具有很强的鲁棒性。

关键词: 牵引整流器; 绝缘栅双极晶体管开路故障; 混合逻辑动态模型; 自适应阈值; 故障诊断

基金项目: 辽宁省交通科技项目(202318)

Transportation Technology Project of Liaoning Province (202318)

0 引言

在高速铁路电气传动系统中,相较于直流传动系统,交流传动系统具有性能好、可靠性高、质量轻和损耗低等优点,在工业上得到了广泛应用^[1]。牵引传动系统装置运行环境复杂,腐蚀、湿度、温度、电浪涌以及静电等都可能使其产生故障^[2]。交流变频器中约 38% 的故障是由功率半导体器件故障引起的,其中牵引整流器功率模块在运行过程中故障率较高^[3]。

牵引整流器主要由绝缘栅双极晶体管 (Insulate Gate Bipolar Transistor, IGBT)、谐振电路及直流侧电容等部件组成。其中,IGBT 短路会引发过电流,该类故障可通过基于过电流的方法进行快速诊断;而 IGBT 开路不会引发大幅过电流或过电压、欠电压等明显现象,诊断和保护相对较难^[4]。因此,围绕牵引整流器 IGBT 开路故障诊断展开研究具有重要研究意义。

目前,针对牵引整流器 IGBT 开路故障的诊断方法主要有电流诊断法、电压诊断法等。文献[5]对三相电流进行 Park 变换,将 Park 矢量的模和相位作为故障特征进行 IGBT 开路故障诊断,该方法在轻载或负载突变时会引起误诊断。文献[6]针对单相三电平整流器,利用整流器网侧电流与观测器输出电流提出了基于电流绝对值均方根的开关管开路故障检测方法,并在此基础上实现故障 IGBT 的精确定位。文献[7]将测得的环流与观测器的计算值进行比较,通过假设-验证的方法可以定位模块化多电平变换器的开路故障。而对于牵引整流器而言,需尽量在不增加传感器的基础上,利用控制系统采集和输出的信号实现故障检测和定位。文献[8]通过理想极电压与实际极电压的残差构建故障特征变量,然后设计自适应阈值来实现三相三电平整流器的开路故障诊断,但只考虑了内部开关故障状态。文献[9]构建了单相级联 H 桥整流器的混合逻辑动态 (Mixed Logic Dynamic, MLD) 模型,通过分析电流残差变化率,从而实现 IGBT 开路故障诊断,但其诊断变量会随级联模块的增加而更加复杂。文献[10]通过建立 MLD 模型,并设定检测阈值,从而实现单相脉冲整流器 IGBT 开路故障的快速诊断

与定位。但由于各个 IGBT 开路时,网侧电流估计值与实际值的残差相差较大,因此检测阈值的选择也是关键问题。

牵引整流器是由连续变化事件和离散变化事件驱动的,是一个典型的混杂系统,而 MLD 是混杂系统的一种建模方法,即通过系统的控制条件、电流与电压条件建立更精确的系统模型^[11],对牵引整流器的故障诊断与定位有很好的适应性,且不需额外硬件。

基于以上分析,本文提出了基于 MLD 模型与自适应阈值相结合的牵引整流器 IGBT 开路故障诊断算法。首先,阐述牵引整流器工作原理并在此基础上建立 MLD 模型。然后,通过对单管 IGBT 开路故障与故障时网侧电流残差的分析,建立自适应阈值进行故障诊断与定位。最后,通过仿真对所提出的算法进行验证,结果表明所提算法能够快速定位到故障 IGBT,且负载变化时不会出现误诊断。

1 牵引整流器工作原理与 MLD 模型

1.1 牵引整流器工作原理

牵引整流器主电路如图 1 所示。其中, i_N 和 u_N 分别为网侧电流和网侧电压; L_N 为网侧电感; R_N 为网侧电阻; C_d 为直流侧电容; i_{dc} 和 u_d 分别为整流器直流侧输出电流和电压; i_{dc2} 为谐振电路电流; u_{ab} 为整流器输入电压; R_L 为等效负载电阻; T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 为四个 IGBT; D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 为四个 IGBT 的反并联二极管。

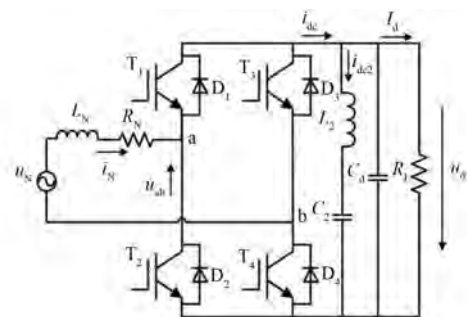


图 1 牵引整流器主电路

Fig. 1 Main circuit of the traction rectifier

牵引整流器网侧能量的存储与释放通过 L_N 实现; C_d 用于稳定电压;LC 谐振电路用于滤除直流侧输出电压中的二倍频率谐波。定义开关函数如式(1)所示:

$$\begin{cases} S_A = \begin{cases} 1, & T_1 \text{ 或 } D_1 \text{ 导通} \\ 0, & T_2 \text{ 或 } D_2 \text{ 导通} \end{cases} \\ S_B = \begin{cases} 1, & T_3 \text{ 或 } D_3 \text{ 导通} \\ 0, & T_4 \text{ 或 } D_4 \text{ 导通} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

S_A, S_B 与 $s_1 \sim s_4$ 的关系如表 1 所示。其中 $s_1 \sim s_4$ 分别对应整流器 $T_1 \sim T_4$ 的开关状态。因为同一桥臂的 IGBT 不能同时导通,所以 s_1 和 s_2, s_3 和 s_4 不能同时导通。

表 1 S_A, S_B 与 $s_1 \sim s_4$ 的关系

Tab. 1 Relationship between S_A, S_B and $s_1 \sim s_4$

i_N	s_1	s_2	s_3	s_4	S_A	S_B
$i_N > 0$	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	1	1	0
	0	0	1	0	1	1
	0	1	0	0	0	0
	0	1	0	1	0	0
	0	1	1	0	0	1
	1	0	0	0	1	0
	1	0	0	1	1	0
	1	0	1	0	1	1
	1	0	0	0	0	1
$i_N < 0$	0	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	0	1
	0	1	0	0	0	1
	0	1	0	1	0	0
	0	1	1	0	0	1
	1	0	0	0	1	1
	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	1	

1.2 牵引整流器的 MLD 建模

传统的 MLD 模型为描述相互依赖的物理定律、逻辑规则和操作约束的建模和控制系统提供了一个框架^[12],常用于预测控制和故障诊断等领域。

由图 1 可得牵引整流器的数学模型为

$$u_N = L_N \frac{di_N}{dt} + R_N i_N + u_{ab} \quad (2)$$

为描述网侧电流变化,定义辅助逻辑变量 δ , δ 表示网侧电流 i_N 的方向,即:

$$\begin{cases} \delta = 1, & i_N > 0 \\ \delta = 0, & i_N < 0 \end{cases} \quad (3)$$

由表 1 可得理想开关函数 S_A, S_B 的逻辑表达式:

$$\begin{cases} S_A = \bar{s}_2(s_1 + \delta) \\ S_B = \bar{s}_4(s_3 + \bar{\delta}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\cdot}$ 为逻辑非。

整流器输入电压 u_{ab} 表示为

$$u_{ab} = (S_A - S_B)u_d \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),可得单相脉宽调制(Pluse Width Modulation, PWM)整流器的 MLD 模型为

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{u_N}{L_N} - \frac{R_N i_N}{L_N} - \frac{u_d}{L_N} [\bar{s}_2(s_1 + \delta) - \bar{s}_4(s_3 + \bar{\delta})] \quad (6)$$

定义逻辑变量 γ :

$$\gamma = \bar{s}_2(s_1 + \delta) - \bar{s}_4(s_3 + \bar{\delta}) \quad (7)$$

则式(6)可改写为

$$\dot{i}_N = A i_N + B_1 u_N + B_2 \gamma \quad (8)$$

式中: $A = -R_N/L_N$; $B_1 = 1/L_N$; $B_2 = -u_d/L_N$ 。

由式(7)和式(8)可知,连续变量 i_N 与离散变量 γ 相关,且 γ 由整流器开关状态和连续变量 i_N 的极性共同决定。由此可知,牵引整流器是一个受连续变量和离散变量共同影响的混合系统。

2 IGBT 开路故障分析与残差分析

2.1 IGBT 开路故障分析

正常工况下,牵引整流器的直流侧输出电压稳定在某一电压范围内,网侧电流与网侧电压的相位基本一致,近似达到单位功率因数^[13];受载波频率影响,网侧电流含有一定谐波。

假设网侧电流流入整流器的方向为正方向,当 T_1 发生开路故障时,若 i_N 为正,则网侧电流经过二极管 D_1 续流,对于系统的正常工作没有影响;若 i_N 为负,则二极管 D_1 无法续流。由表 1 可知,当 T_1 发生开路故障时,若 i_N 为负,且 IGBT 控制信号为(1 0 0 0)、(1 0 0 1)和(1 0 1 0)时,牵引整流器无法正常工作。 T_1 发生开路故障时网侧电流流向如图 2 所示。

T_1 开路故障情况下,当 IGBT 控制信号为(1 0 0 0)时,由于电感电流不能突变,原本经 T_1 和 D_3 形成的电流回路变为流经 D_3, C_d 以及 D_2 的电流回路。此时, u_N 与 L_N 向直流侧电容供能, i_N 幅值降低。当 IGBT 控制信号为(1 0 1 0)时, i_N 的流向与 IGBT 控制信号为(1 0 0 0)时相同。

T_1 开路故障情况下,当 IGBT 控制信号为

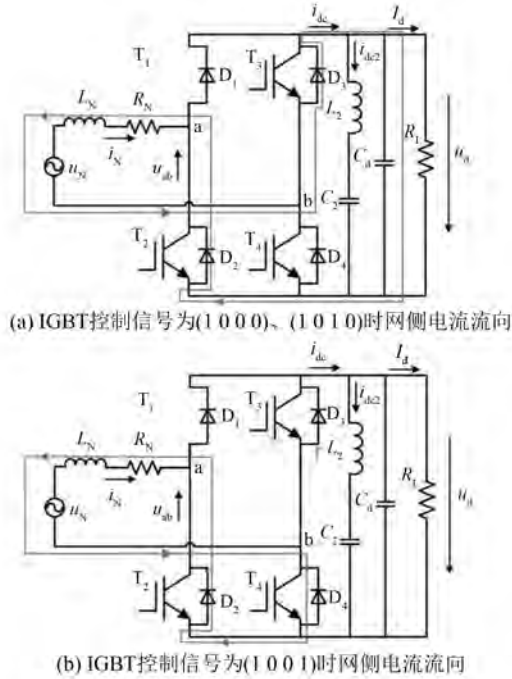


图 2 T_1 发生开路故障时网侧电流流向

Fig. 2 Current direction on the grid side during an open-circuit fault in T_1

(1001)时,流经 T_1 和 T_4 的电流回路变为经 T_4 和 D_2 续流的电流回路。此时, u_N 直接加在 L_N 上,对 L_N 进行充电,导致 i_N 幅值降低。

由以上分析可知,当 T_1 开路时, i_N 正半周不受故障影响,负半周幅值降低。以 T_1 在 1 s 时发生开路故障为例,牵引整流器的仿真波形如图 3 所示。

同理, T_2 发生开路故障,当 $i_N > 0$ 时,在充能阶段,网侧电感的充能速率降低或向直流侧电感和负载释放能量,从而导致 i_N 正半周的幅值降低;当 $i_N < 0$ 时,由于 D_2 的续流作用,对系统没有影响。

类似地,可以得到 T_3 的开路故障特征与 T_2 相似, T_4 的开路故障特征与 T_1 相似。

2.2 残差分析

当 IGBT 发生开路故障时,牵引整流器的部分甚至全部变量与正常情况下的变量不同。通过对系统输出电流的实际值与 MLD 模型输出电流的估计值进行分析来实现牵引整流器 IGBT 开路故障诊断。系统正常运行时,电流残差为零或在零附近波动;发生故障时,系统残差会急剧增加。

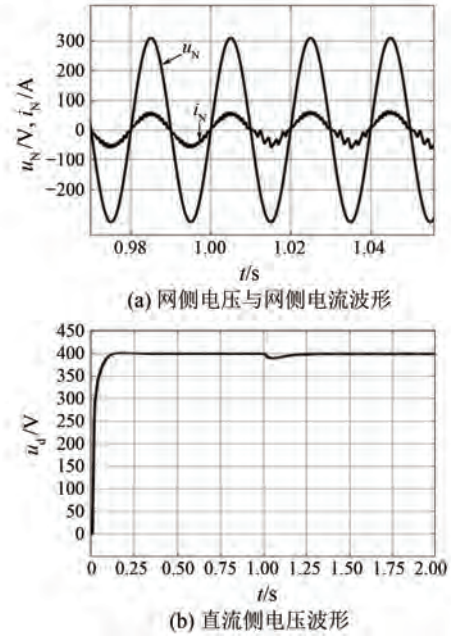


图 3 T_1 在 1 s 时发生开路故障的牵引整流器仿真波形
 Fig. 3 Simulation waveforms of the traction rectifier during an open-circuit fault in T_1 at 1 s

由式(8)得到 MLD 模型输出的网侧电流估计值 \hat{i}_N 的微分方程为

$$\dot{\hat{i}}_N = A\hat{i}_N + B_1 u_N + B_2 \gamma \quad (9)$$

网侧电流实际值 i_N 减去估计值 \hat{i}_N 得到电流残差 \tilde{i}_N ,即:

$$\tilde{i}_N = i_N - \hat{i}_N \quad (10)$$

当 T_1 开路时, $s_1 \equiv 0$ 。此时 MLD 模型的离散输入变量 γ 变为 γ' :

$$\gamma' = \bar{s}_2 \delta - \bar{s}_4 (s_3 + \bar{\delta}) \quad (11)$$

牵引整流器处于正常工作状态时,电流残差很小。 T_1 发生开路故障时,牵引整流器的交流侧电压异常,导致电流失真。当 $i_N < 0$ 且 $s_1 = 1$ 时,电流残差正向增加;当 $i_N > 0$ 时,残差减小,估计电流试图向实际电流趋近,但此时偏差较大,半个周期内无法收敛至实际值。因此,在下一个周期,电流残差会再次增加。

综上所述,当 T_1 开路故障时,在网侧电流正半周 \tilde{i}_N 增加,在网侧电流负半周 \tilde{i}_N 降低, \tilde{i}_N 总体呈增加趋势。图 4 为 T_1 开路故障时网侧电流估计值和电流残差的波形。

同理,当 T_2 开路且 $i_N > 0$ 时电流残差负向增

加。由于 T_3 的开路故障特征与 T_2 相似, T_4 的开路故障特征与 T_1 相似, 可得, 当 \hat{i}_N 为正值时, T_1 或 T_4 发生开路故障; 当 \hat{i}_N 为负值时, T_2 或 T_3 发生开路故障。

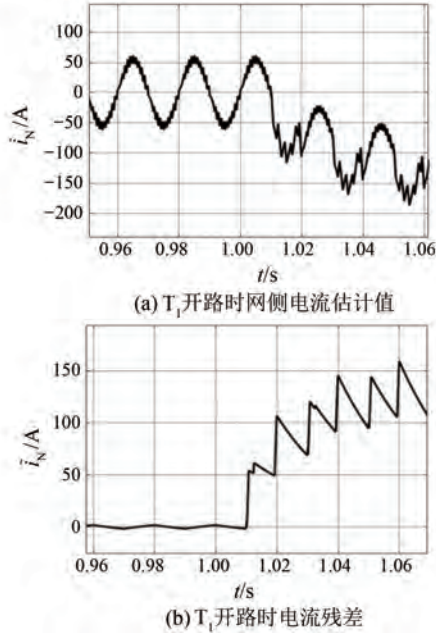


图4 T_1 开路时网侧电流估计值和电流残差波形

Fig. 4 Waveforms of estimated current and residual current on the grid side when T_1 is open

3 基于自适应阈值的故障诊断算法

不同的 IGBT 发生开路故障时, MLD 模型的离散型输入变量 γ 会发生不同的变化, 从而导致 \hat{i}_N 不同。如果设定固定阈值来进行故障检测, 当阈值过大时, 可能无法检测到故障特征较小的开路故障; 当阈值过小时, 可能导致误诊断。为解决此问题, 本文在固定阈值的基础上增加自适应阈值对 IGBT 开路故障进行诊断, 进而增加诊断结果的可靠性。

3.1 故障检测算法

为了方便基于网侧电流实际值和估计值设计故障检测算法, 引入电流形式因子 F , 其表达式为

$$F = \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}}} \quad (12)$$

式中: $|i_N|_{\text{rms}}$ 为网侧电流绝对值的有效值; $|i_N|_{\text{avg}}$ 为网侧电流绝对值的平均值。

网侧电流估计值的电流形式因子 \hat{F} 为

$$\hat{F} = \frac{|\hat{i}_N|_{\text{rms}}}{|\hat{i}_N|_{\text{avg}}} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可知, 在系统正常工作时, F 和 \hat{F} 的值均为 1.11。

定义残差 R_{IGBT} 为

$$R_{\text{IGBT}} = \hat{F} - F \quad (14)$$

系统正常工作时, R_{IGBT} 近似为 0。当 IGBT 发生开路故障时, 网侧电流的实际值与估计值发生改变, 进而导致 R_{IGBT} 改变。

3.2 自适应阈值的设计

为了提高诊断算法的鲁棒性、避免误诊断, 提出了自适应阈值。 R_{IGBT} 的不等式推导过程如式(15)~式(18)所示:

$$R_{\text{IGBT}} = \frac{|\hat{i}_N|_{\text{rms}}}{|\hat{i}_N|_{\text{avg}}} - \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}}} = \frac{|i_N + \varepsilon_{i_N}|_{\text{rms}}}{|i_N + \varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} - \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}}} \quad (15)$$

$$R_{\text{IGBT}} \leq \frac{|\varepsilon_{i_N}|_{\text{rms}}}{|i_N + \varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} + \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N + \varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} - \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}}} \quad (16)$$

$$R_{\text{IGBT}} \leq \frac{|\varepsilon_{i_N}|_{\text{rms}}}{|i_N + \varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} + \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}}} - \frac{|i_N|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}}} \quad (17)$$

$$R_{\text{IGBT}} \leq \frac{|\varepsilon_{i_N}|_{\text{rms}}}{|i_N + \varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} \approx \frac{|\varepsilon_{i_N}|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}} + |\varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} \quad (18)$$

式中: $\varepsilon_{i_N} = \hat{i}_N - i_N$ 为电流估计误差。

由式(18)可以得到自适应阈值 T_{IGBT} 的表达式为

$$T_{\text{IGBT}} = \frac{|\varepsilon_{i_N}|_{\text{rms}}}{|i_N|_{\text{avg}} + |\varepsilon_{i_N}|_{\text{avg}}} \quad (19)$$

3.3 故障 IGBT 定位

R_{IGBT} 只能检测到 IGBT 发生开路故障, 仅靠 R_{IGBT} 并不能对故障 IGBT 进行定位。由于电流残差为正值时, T_1 或 T_4 发生开路故障; 电流残差为负值时, T_2 或 T_3 发生开路故障。为了进一步区分 T_1 或 T_4 、 T_2 或 T_3 发生开路故障, 定义一个固定阈值 d , d 的取值可通过分析不同故障情况下 R_{IGBT} 的峰值来确定。表 2 为开路 IGBT 故障定位情况表。

表 2 开路 IGBT 故障定位情况表

Tab. 2 Fault location table of open-circuit IGBT

故障 IGBT	\tilde{i}_N	R_{IGBT}	d
T_1	>0	$>T_{IGBT}$	$R_{IGBT} > d$
T_2	<0	$>T_{IGBT}$	$R_{IGBT} > d$
T_3	<0	$>T_{IGBT}$	$R_{IGBT} < d$
T_4	>0	$>T_{IGBT}$	$R_{IGBT} < d$

图 5 为本文所提出的开路故障诊断算法的结构图。

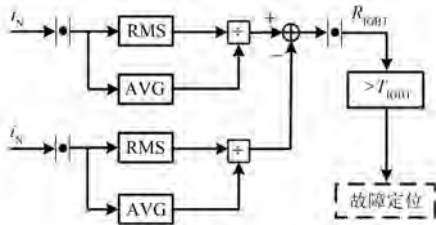


图 5 开路故障诊断结构图

Fig. 5 Structure diagram of open-circuit fault diagnosis

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 环境下搭建牵引整流器仿真模型, 模拟 IGBT 开路故障来验证所提故障诊断算法的有效性。

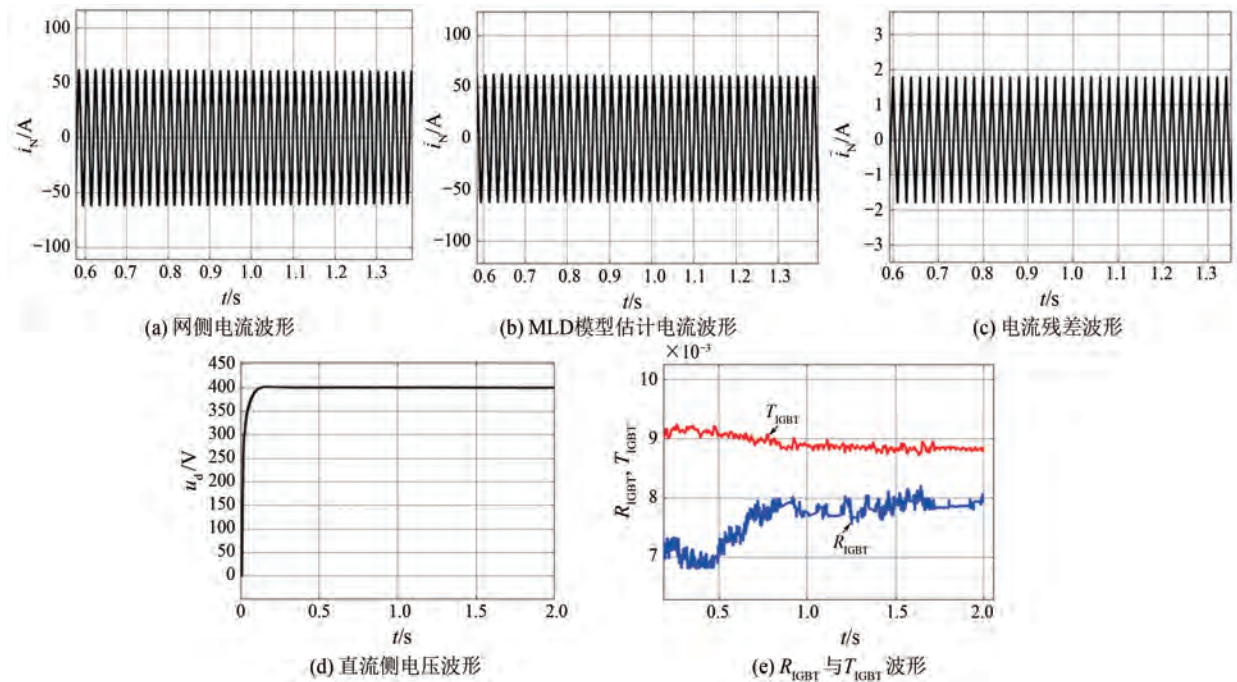


图 6 系统正常工作时网侧电流、估计电流、电流残差、直流侧电压及 R_{IGBT} 与 T_{IGBT} 的波形

Fig. 6 Waveforms of grid-side current, estimated current, residual current, DC side voltage, and R_{IGBT} and T_{IGBT} during normal operation of the system

本文牵引整流器的控制系统采用直流侧电压与网侧电流双闭环控制。由于瞬态电流控制能够使网侧功率因数接近于 1, 且具有直流侧电压稳定、网侧电流谐波分量小等优点。因此电流内环采用瞬态电流控制, 电压外环采用适用范围广、稳定性较好的比例积分控制。控制系统稳定运行后, 假设 1 s 时 IGBT 发生开路故障。牵引整流器参数如 3 所示^[14]。

表 3 牵引整流器参数

Tab. 3 Parameters of the traction rectifier

参数名称	参数值
网侧电感 L_N/mH	5
网侧电阻 R_N/Ω	0.2
直流侧电容 $C_d/\mu F$	3 000
等效负载电阻 R_1/Ω	20
直流侧滤波电感 L_2/mH	0.99
直流侧滤波电容 $C_2/\mu F$	2 340
网侧电压有效值 u_N/V	220
直流侧给定电压 U_d^*/V	400
开关频率 f_s/kHz	1

4.1 系统正常运行分析

系统正常工作时, 网侧电流 i_N 、MLD 模型的估计电流 \hat{i}_N 、电流残差 \tilde{i}_N 、直流侧电压 u_d 以及 R_{IGBT} 与 T_{IGBT} 的波形如图 6 所示。可以看出, 系统

正常工作时,所构建的 MLD 模型能够较为准确地估计网侧电流且电流残差较小,直流侧电压基本维持在 400 V 左右, R_{IGBT} 小于 T_{IGBT} 。仿真结果表明控制策略可行有效。

在牵引系统中,整流器运行时网侧电压、负载等均可能发生变化。为了验证所提算法在应对外界条件变化时的有效性,进行仿真分析。在 1 s 时分别增加 40% 与 80% 额定负载, R_{IGBT} 和 T_{IGBT} 的波形如图 7 所示。可以看出,负载变化时 R_{IGBT} 仍低于 T_{IGBT} ,仿真结果表明所提出的故障诊断算法在外界条件变化时不会出现误诊断的情况。

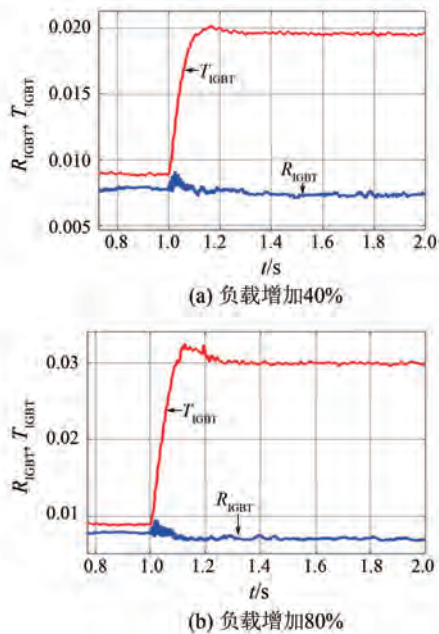
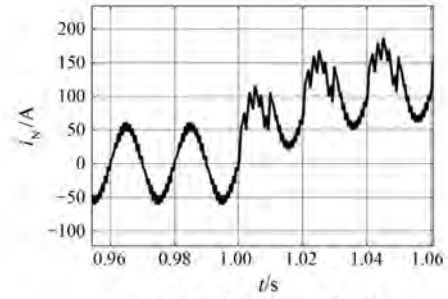


图 7 负载变化时 R_{IGBT} 与 T_{IGBT} 波形

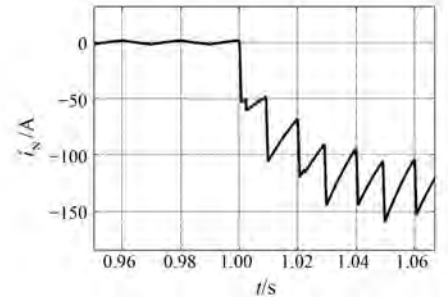
Fig. 7 Waveforms of R_{IGBT} and T_{IGBT} during load changes

4.2 单管开路故障检测

以牵引整流器左桥臂的两个 IGBT 发生开路故障为例,验证本文算法的有效性。图 8 为 T_2 开路时网侧电流的估计值和电流残差的波形。相较于图 3 与图 6(c) 所示的网侧电流残差,可以看出,未发生故障时,网侧电流估计值与实际值基本相同,残差较小;1 s 发生开路故障时,网侧电流发生畸变,当 T_1 开路时,电流残差正向增大,当 T_2 开路时,电流残差负向增大。因此,可以通过电流残差的正负将 IGBT 开路故障分为 T_1 (或 T_4) 开路、 T_2 (或 T_3) 开路两类故障。



(a) T_2 开路时网侧电流估计值



(a) T_2 开路时电流残差

图 8 T_2 开路时网侧电流估计值和电流残差的波形

Fig. 8 Waveforms of estimated current and residual current on the grid side when T_2 is open

图 9 为 T_1 开路时 R_{IGBT} 和 T_{IGBT} 波形以及故障标志;图 10 为 T_2 开路时 R_{IGBT} 和 T_{IGBT} 波形以及故障标志。由图 9、图 10 可知,所提故障检测算法能够快速检测 IGBT 开路故障。但检测时间 t 可能会根据故障发生的位置而变化,且最大检测时间受网侧电流的周期影响。

4.3 故障定位

T_4 开路时 R_{IGBT} 和 T_{IGBT} 波形如图 11 所示。相较于图 9(a) 所示的 T_1 开路时 R_{IGBT} 和 T_{IGBT} 波形,可以看出,当 T_1 或 T_4 发生故障时, R_{IGBT} 的最大值存在较大差异。因此,在进行故障定位时可以通过设定合适的阈值来区分 T_1 或 T_4 发生开路故障(即 $R_{IGBT} > d$ 时 T_1 发生开路故障, $R_{IGBT} < d$ 时 T_4 发生开路故障),且该方法不需要额外硬件设备。同理, T_2 或 T_3 发生开路故障时也可以此进行区分。

5 结语

本文针对牵引整流器单管 IGBT 开路故障对系统的影响,对其工作原理、故障特征、故障诊断算法和故障定位方法进行了系统地研究,研究结论如下:

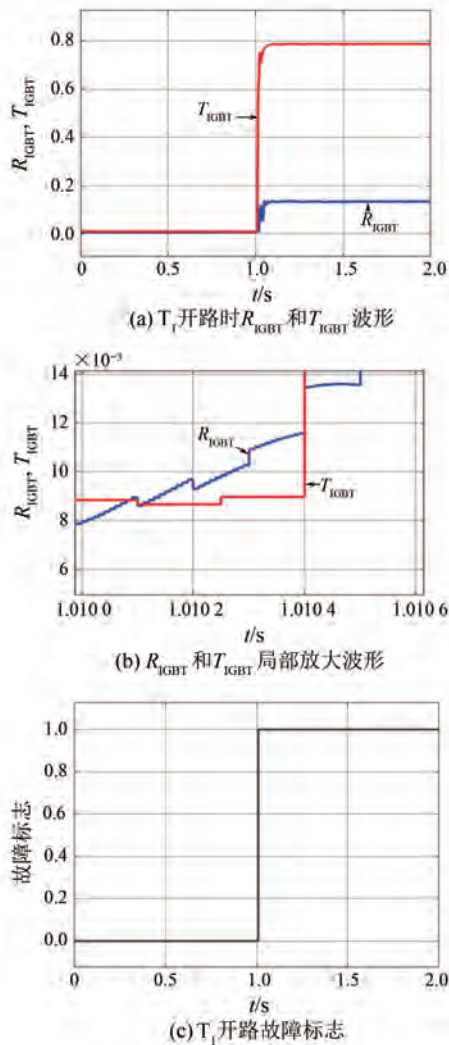


图 9 T_1 开路时 R_{IGBT} 与 T_{IGBT} 波形以及故障标志
 Fig. 9 Waveforms of R_{IGBT} and T_{IGBT} and fault indicators when T_1 is open

(1) 通过分析牵引整流器工作原理, 建立了 MLD 模型, 从而实现对网侧电流较为准确地估计;

(2) IGBT 单管开路故障会导致网侧电流的正半周或负半周峰值减小, 进而对直流侧输出电压产生影响;

(3) 基于 MLD 模型与自适应阈值的故障诊断算法, 根据网侧电流实际值与估计值的残差来定义自适应阈值, 能够快速检测并准确定位到故障 IGBT。存在外界干扰时, 不会出现误诊断, 具有较好的鲁棒性, 且定位方法不需要额外的硬件设备。

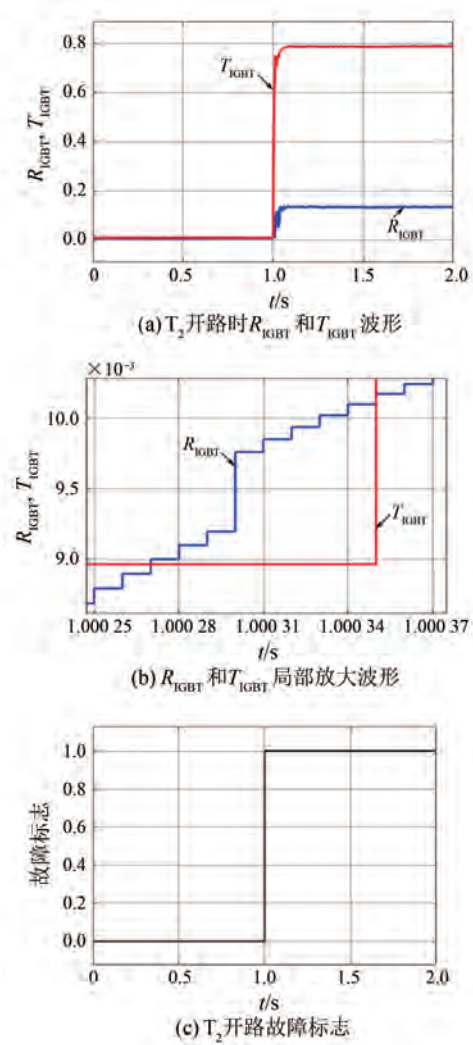


图 10 T_2 开路时 R_{IGBT} 与 T_{IGBT} 波形及故障标志
 Fig. 10 Waveforms of R_{IGBT} and T_{IGBT} and fault indicators when T_2 is open

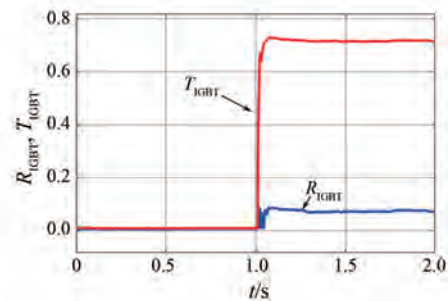


图 11 T_4 开路时 R_{IGBT} 与 T_{IGBT} 波形
 Fig. 11 Waveforms of R_{IGBT} and T_{IGBT} and fault indicators when T_4 is open

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

党忆涵进行了方案设计、内容总结、论文撰写与仿真研究,王绍祖参与部分仿真研究,徐传芳参与了论文的总结、审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, paper writing and simulation study were carried out by Dang Yihan. Some of simulation study was conducted by Wang Shaozu. The manuscript was revised by Xu Chuanfang. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] CHEOK A D, KAWAMOTO S, MATSUMOTO T, et al. High power AC/DC converter and DC/AC inverter for high speed train applications [C]//2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium, Kuala Lumpur, 2000.
- [2] 韩红彬, 丁丽娜. 四象限脉冲整流器 IGBT 开路故障检测 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 95-98.
- HAN H B, DING L N. IGBT open circuit fault detection in four quadrant pulse converter [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(8): 95-98.
- [3] YANG S Y, XIANG D W, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [4] 刘建强, 刘传铎, 王轶欧, 等. 单相 PWM 整流器 IGBT 及直流侧电容故障诊断方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 244-257.
- LIU J Q, LIU C D, WANG Y O, et al. Fault diagnosis method for IGBT and DC-link capacitor of single-phase PWM rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 244-257.
- [5] SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, CICHOWSKI A. Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4681-4688.
- [6] 许水清, 王健, 胡友强, 等. 基于自适应滑模观测器的高铁牵引系统单相三电平整流器开路故障诊断 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 1920-1930.
- XU S Q, WANG J, HU Y Q, et al. Open-circuit fault diagnosis of single-phase three-level rectifier in high-speed train traction system based on adaptive sliding mode observer [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(11): 1920-1930.
- [7] SHAO S, WATSON A J, CLARE J C, et al. Robustness analysis and experimental validation of a fault detection and isolation method for the modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3794-3805.
- [8] CHEN M Y, HE Y G, SUI C S. Open-switch fault diagnosis in three-level rectifiers based on selective calculation method for instant voltage deviation [J]. IET Power Electronics, 2021, 14(5): 923-935.
- [9] 谢东, 葛兴来. 基于残差变化率的单相级联 H 桥整流器 IGBT 开路故障诊断 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3822-3834.
- XIE D, GE X L. Residual-changing-rate based open-circuit fault diagnosis for a single-phase cascaded H-bridge rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3822-3834.
- [10] GOU B, PU J, GE X L, 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.
- [11] 李宁, 李颖晖, 韩建定, 等. 基于混合逻辑动态模型的三相逆变电路有限控制集模型预测控制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 375-380.
- LI N, LI Y H, HAN J D, et al. FCS-MPC strategy for inverters based on MLD model [J]. Power System Technology. 2014, 38(2): 375-380.
- [12] BEMPORAD A, MORARI M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints [J]. Automatica, 1999, 35(3): 407-427.
- [13] 伍珣, 李凯迪, 田睿, 等. 基于电流半波差异的单

- 相四象限整流器开路故障诊断[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 3912-3922.
- WU X, LI K D, TIAN R, et al. Half-wave difference based open-circuit fault diagnosis of single-phase four quadrant rectifier with one current sensor [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2022, 53(10): 3912-3922.
- [14] 夏金辉, 郭源博, 张晓华. 单相脉宽调制整流器传感器故障诊断与容错控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 160-170.
- XIA J H, GUO Y B, ZHANG X H. Sensor fault diagnosis and fault tolerant control for single-phase PWM rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 160-170.
- [15] CHEN H T, JIANG B, DING S X, et al. Data-driven fault diagnosis for traction systems in high-speed trains: A survey, challenges, and perspectives [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(3): 1700-1716.
- [16] 袁义生, 毛凯翔. 单相 PWM 整流器控制器设计与动态特性的改善[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(5): 34-42.
- YUAN Y S, MAO K X. Design of the controller and improvement of the dynamic performance for single-phase PWM rectifiers [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(5): 34-42.
- [17] 宋玉明, 宋文胜, 余彬. 基于单周期控制的牵引电机拍频抑制算法数字化实现[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3007-3016.
- SONG Y M, SONG W S, YU B. Digitized implementation of beat-frequency suppression algorithm based on one-cycle control for traction motors [J]. Proceedings of the CESS, 2019, 39(10): 3007-3016.
- [18] 刘繁, 崔江, 林华. 一种航空发电机旋转整流器故障在线诊断技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 104-108.
- LIU F, CUI J, LIN H. An online diagnosis technology of aero generator rotating rectifier fault [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(2): 104-108.
- [19] 黄宇剑, 林圣, 吴鉴舟, 等. 基于波形特征的地铁牵引整流器二极管开路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 195-204.
- HUANG Y J, LIN S, WU J Z, et al. Fault diagnosis method of diode open circuit in metro traction rectifier based on waveform characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 195-204.
- [20] 宋智威, 黄路, 熊成林, 等. 基于双重补偿相位检测方法在单相脉冲整流器中的应用[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3983-3990.
- SONG Z W, HUANG L, XIONG C L, et al. Model predictive power control of single-phase pulse rectifier based on double compensation phase detection [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3983-3990.
- [21] 李延帅, 徐传芳, 宋阳阳, 等. 单相级联 H 桥整流器电压平衡与纹波抑制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 109-117.
- LI Y S, XU C F, SONG Y Y, et al. Study on voltage balance and ripple suppression strategy of single-phase cascade H-bridge rectifier [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 117-125.
- [22] 杨静, 崔江, 周凡. 基于电流位置关系的 DSEG 整流器开路故障诊断算法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 44-56.
- YANG J, CUI J, ZHOU F. Open-circuit fault diagnosis algorithm of DSEG rectifier based on current position relation [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(6): 44-56.
- [23] 陈文杰, 崔江. 基于 LSTM 的航空发电机整流电路诊断技术[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 85-90.
- CHEN W J, CUI J. Diagnosis technology of aero-generator rectifier circuit based on LSTM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(4): 85-90.
- [24] 杨春宇, 岳学磊, 相里燕妮, 等. 城际动车组四象限整流器控制策略研究与应用[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 34-38.
- YANG C Y, YUE X L, XIANGLI Y N, et al. Research and application of four-quadrant rectifier control strategy for intercity EMU [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(7): 34-38.
- [25] 李蔚, 冉治, 孙博, 等. CRH5 动车组牵引脉冲整流器自适应优化控制方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(2): 476-486.
- LI W, RAN Z, SUN B, et al. Study on adaptive optimal control of CRH5 EMU traction PWM rectifier

- [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(2): 476-486.
- [26] 伍珣, 陈春阳, 李凯迪, 等. 基于邻相电流的逆变器功率管与电流传感器故障诊断方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(5): 1939-1950.
- WU X, CHEN C Y, LI K D, et al. A fault diagnosis method for open-circuit and current sensor faults of inverter based on adjacent phase currents [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(5): 1939-1950.
- [27] 李伟, 李颖奇, 候雷浩, 等. 单相四象限整流器故障诊断方法研究[J]. *电气传动*, 2024, 54(10): 90-96.
- LI W, LI Y Q, HOU L H, et al. Fault detection method research of single-phase four-quadrant rectifier [J]. *Electric Drive*, 2024, 54(10): 90-96.
- [28] 姚芳, 陆乐, 王刘浏, 等. 基于输入电流和输出电压的 Vienna 整流器单管开路故障诊断方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(3): 82-89.
- YAO F, LU L, WANG L L, et al. Method of single switch open circuit fault diagnosis in Vienna rectifier based on input currents and output voltage [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(3): 82-89.
- [29] 朱佩荣, 刘勇智, 刘棕成, 等. 基于 CEEMD 与改进的 ELM 旋转整流器故障诊断[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(5): 166-1175.
- ZHU P R, LIU Y Z, LIU Z C, et al. Fault diagnosis of synchronous generator rotating rectifier based on CEEMD and improved ELM [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(5): 1166-1175.
- [30] 翟道宇, 孙燕楠. 基于卷积神经网络和格拉姆角差场的四象限脉冲整流器故障诊断方法[J]. *电气技术*, 2025, 26(1): 23-32.
- ZHAI D Y, SUN Y N. Fault diagnosis method for four-quadrant pulse rectifiers based on convolutional neural network and Gramian angular difference field [J]. *Electrical Engineering*, 2025, 26(1): 23-32.

收稿日期:2024-09-24

收到修改稿日期:2025-01-08

作者简介:

党忆涵(2000-),男,硕士研究生,研究方向为整流器故障诊断与容错控制,13273860751@163.com;

*通信作者:徐传芳(1978-),女,博士,副教授,研究方向为电力牵引与传动控制系统,xuchuanfang@126.com。