

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

黄宇剑¹, 林 圣¹, 吴鉴舟¹, 黄 迪¹, 何江海², 段振涛²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510220)

摘要:针对地铁牵引整流器内部二极管故障率高且诊断困难的问题,提出基于输入电流和输出电压的波形特征进行二极管开路故障诊断的方法。基于地铁牵引整流器的电路拓扑结构,分析了发生二极管开路故障前后整流器输出电压与输入电流波形的变化规律;在此基础上首先利用输出电压的波形特征检测整流器的二极管开路故障并确定疑似故障时间,然后仅利用各整流桥的一相输入电流确定故障二极管所在的整流桥并识别具体的故障位置。基于MATLAB/Simulink平台的仿真验证结果表明,所提地铁牵引整流器故障诊断方法不受故障位置、故障时间、系统运行负载等因素的影响,具有良好的可靠性与适应性。

关键词:波形特征;地铁牵引整流器;二极管开路故障;故障诊断

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005003

0 引言

牵引整流器作为地铁牵引供电系统的核心设备,其工作性能和运行可靠性直接关乎整个系统的运营情况。为了减少牵引变电站网侧谐波电流对城市电网的影响,我国地铁牵引整流器大多采用等效24脉波整流方式^[1]。但随之而来的问题是整流器设备所需要的电力电子器件极多,事故发生率较高且诊断困难。在实际地铁牵引整流器中对二极管的短路故障设置了过电流保护:每个整流二极管串联一个快速熔断器,当二极管失去单向导通性能时,回路中将产生短路电流,此时由熔断器熔丝熔断来保护二极管,并将短路故障转化为开路故障^[2]。而当二极管发生开路故障时,整流器会继续工作。这种带故障运行将导致整流波形严重畸变,使负载不能正常运行,同时也将加重对电网的谐波污染。因此,有必要研究快速、准确的地铁牵引整流器二极管开路故障诊断方法,避免事故的扩大和损失的增加。

目前国内外关于整流器故障诊断已有一定的研究成果。文献[3-4]针对晶闸管作为开关管的24脉波整流器开路故障,提出了使用二值逻辑符号建立故障特征向量和定义“伪面积向量”为故障特征向量的在线诊断方法,但由于诊断的开关管对象不同,不适用于我国目前的地铁牵引整流器。文献[5-7]利用二极管两端电压向量的余弦值来描述电压波形的相似度,并基于相似度的阈值来诊断整流器的二极管开路故障,该方法所需的量测点较多,需要获取每个二极管两端的电压信号,并且计算量较大。文献[8-10]采用神经网络和支持向量机等人工智能方法

来实现整流器故障在线诊断,该类诊断方案需要大量训练样本,依赖经验知识和技巧。

近年来利用故障电流波形对整流设备进行开关管开路故障诊断的方法^[11-13]时有被提出,虽然大多是针对以IGBT作为开关管的整流器,但其利用电流信号来进行故障诊断的思路为地铁牵引整流器二极管开路故障诊断提供了较好的参考价值。基于此,本文通过比较整流器正常、故障工况下输入电流及输出电压的波形变化,提出了一种基于波形特征的地铁牵引整流器故障诊断方法,实现了二极管单管开路故障的准确检测与定位,并通过实验验证了诊断方法的有效性。由于在实际工程中,单个二极管发生开路故障的概率最大^[14-15],故本文仅针对单个二极管开路故障的情况进行研究。

1 地铁牵引整流器建模与故障分析

1.1 仿真建模

地铁牵引整流器的电路拓扑如图1所示,它由2台12脉波轴向分裂式牵引变压器和四组三相桥式不控整流桥组成。每台变压器原边采用延边三角形接法实现 $\pm 7.5^\circ$ 的移相,副边2套绕组分别采用星形接法和三角形接法,使其线电压相量相差 30° 相位。这样形成2台变压器的4套阀侧绕组的线电压相量互差 15° 相位,分别经全波整流后,在直流侧并联运行,输出24脉波直流电压供沿线列车运行所需。图中, u_d 为整流器输出电压; $i_{mn}(m=a,b,c;n=1,2,3,4)$ 为各整流桥输入电流; $V_{Dkn}(k=1,2,\dots,6)$ 为各整流桥的二极管; u_{Mx} 和 $i_{Mx}(M=A,B,C;x=1,2)$ 分别为2台变压器的输入电压和输入电流。

根据地铁牵引整流器的电路原理,在Simulink中搭建仿真模型。根据实际地铁系统设置三相电压源线电压为33 kV,利用Zigzag移相变压器与三相三绕组变压器串联来等效模拟12脉波轴向分裂式牵

收稿日期:2019-10-29;修回日期:2020-03-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1201202)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB1201202)

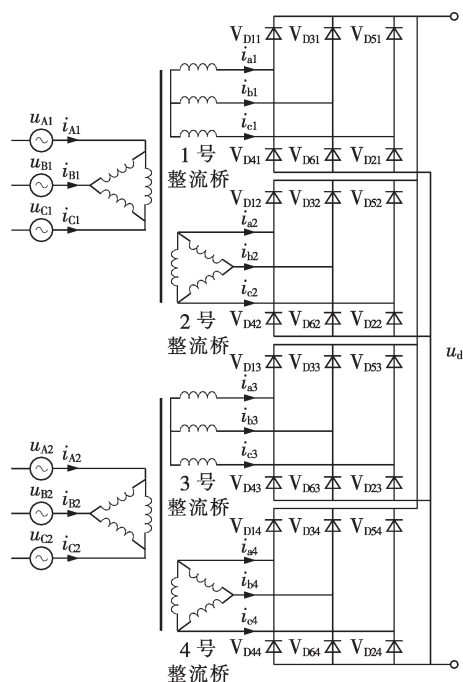


图1 地铁牵引整流器拓扑

Fig.1 Topology of metro traction rectifier

引变压器,实现牵引变压器原边 $\pm 7.5^\circ$ 的移相^[16]。其中,三相三绕组变压器的变比为 $33\text{ kV} / 1180\text{ V}$,额定功率为 $2200\text{ kV}\cdot\text{A}$,原边绕组为三角形接法,副边的2组绕组分别选择星形接法和三角形接法;移相变压器的变比为 $33\text{ kV} / 33\text{ kV}$,额定功率为 $2200\text{ kV}\cdot\text{A}$,副边绕组为星形接法。各整流桥输入电流之间的相位关系如图2所示。

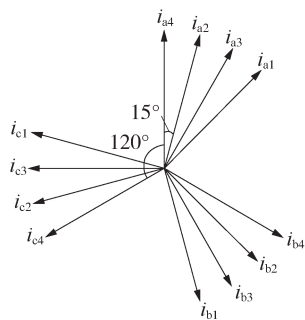


图2 各整流桥输入电流相位关系

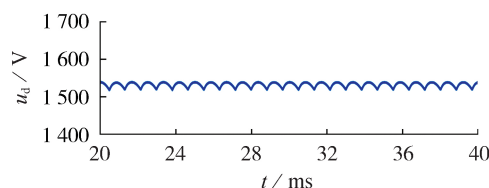
Fig.2 Phase relation of input current of each rectifier bridge

1.2 二极管开路故障波形特性分析

1.2.1 整流器输出电压波形特性分析

正常运行时,整流器输出电压波形如图3(a)所示;当1号整流桥的二极管 V_{D41} 在 28 ms 发生开路故障时(仿真模型中利用理想开关来实现二极管的开路故障),整流器输出电压波形如图3(b)所示,此时 V_{D41} 为非导通状态;当 V_{D41} 在 33 ms 发生开路故障时,整流器输出电压波形如图3(c)所示,此时 V_{D41} 已处

于导通状态。



(a) 正常运行

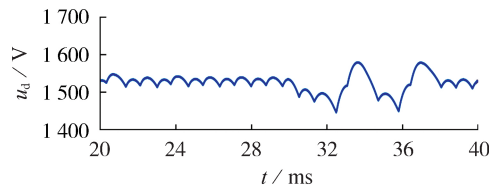
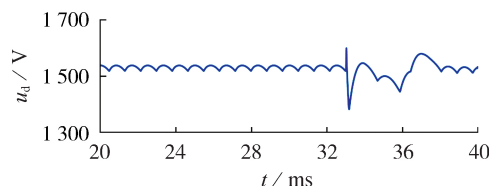
(b) V_{D41} 非导通条件下发生开路故障(c) V_{D41} 导通条件下发生开路故障

图3 整流器输出电压波形

Fig.3 Output voltage waveforms of rectifier

对比图3(a)—(c)可见,二极管开路故障后整流器输出电压波形发生明显畸变。根据三相桥式不控整流原理可知,每个整流桥内二极管的导通顺序均为: $V_{D1n}、V_{D2n} \rightarrow V_{D2n}、V_{D3n} \rightarrow V_{D3n}、V_{D4n} \rightarrow V_{D4n}、V_{D5n} \rightarrow V_{D5n}、V_{D6n} \rightarrow V_{D6n}、V_{D1n} \rightarrow V_{D1n}、V_{D2n}$ 。每一个二极管的导通时间为 $T_0=20/3\text{ ms}$,线电压 $u_{ab}、u_{ac}、u_{bc}、u_{ba}、u_{ca}、u_{cb}$ 轮流输出,形成6脉波输出电压波形。图3(b)中,由于 V_{D41} 在其导通前已发生开路故障,完全失去 $u_{ba}、u_{ca}$ 2个波头的输出,因此,在4个整流桥并联输出后,消失的2个波头将会导致输出电压波形在 T_0 时间段内发生畸变。图3(c)中,由于 V_{D41} 在其导通时发生开路故障,仅丢失 $u_{ba}、u_{ca}$ 部分波头的输出,因此,在4个整流桥并联输出后,消失的部分波头将导致输出电压波形在小于 T_0 的时间段内发生畸变。

1.2.2 整流器输入电流波形特性分析

根据三相桥式不控整流原理可知,三相输入电流根据电位高低,在经过自然换相点时通过二极管进行换相,各相输入电流在1个工频周期内正负导通2次。当整流桥发生二极管开路故障时,输入电流将无法正常工作,丢失输入电流波头。当 V_{D41} 在 28 ms (V_{D41} 处于非导通状态)发生开路故障时,整流器各整流桥的输入电流波形如图4(a)所示;当 V_{D41} 在 33 ms (V_{D41} 处于导通状态)发生开路故障时,整流器各整流桥的输入电流波形如图4(b)所示。

图4(a)中,由于 V_{D41} 在其导通前已发生开路故障,在 $V_{D31}、V_{D41}$ 和 $V_{D41}、V_{D51}$ 导通时刻,电流均无法流

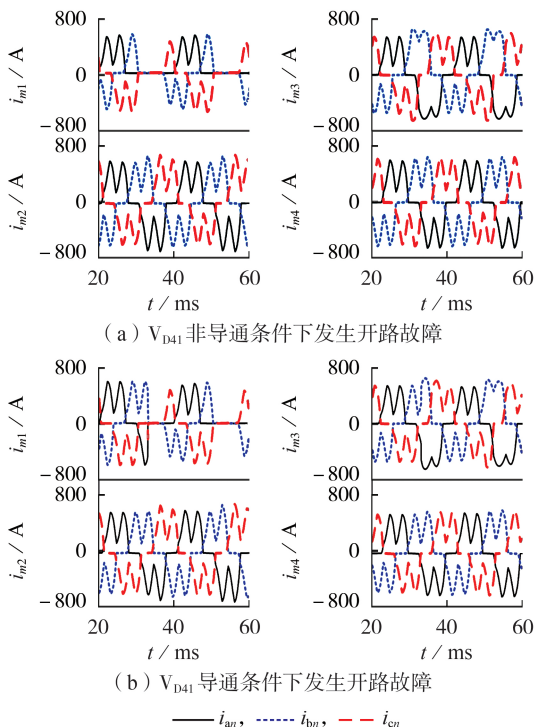


图4 各整流桥输入电流波形

Fig.4 Input current waveforms of each rectifier bridge

过a相下桥臂,导致1号整流桥的a相输入电流失去负向导通的2个波头,b、c相输入电流将分别失去1个正向导通波头;即在 V_{D41} 导通时段内,1号整流桥三相输入电流均无导通波头。此外,受二极管开路故障的影响,其余3个整流桥的输入电流波形也会发生畸变,特别是与1号整流桥位于同一台12脉波整流机组的2号整流桥的输入电流波形畸变较严重,而另一台12脉波整流机组的2个整流桥的输入电流波形畸变较小。图4(b)中,因 V_{D41} 在其导通时发生开路故障,故在导通时间内1号整流桥仍可通过 V_{D41} 完成c相与a相之间的电流换相,仅丢失故障时段内的导通波头;其余3个整流桥的输入电流波形仅在故障时段内发生畸变。

2 基于波形特征的故障诊断方法

2.1 诊断思路

由于三相桥式整流电具有三相对称性,各个整流桥各相输入电流的故障特征具有相同的规律,因而可仅采用某一相输入电流信号来进行故障诊断。本文中采用a相输入电流进行故障诊断。

在地铁牵引整流器正常运行时,不同二极管连续导通时所对应的a相输入电流波形各不相同,且根据三相桥式不控整流的基本特点,a相输入电流导通波头的个数、正负性和出现的先后顺序与导通二极管之间存在一一对应的关系,即a相输入电流的波形与二极管的连续导通存在一一对应的关系,其

对应关系如表1所示。表中,各电流波形为不同二极管连续导通时a相的标准输入电流 $i_{sk}(t)$ 的波形,其中 $k=1,2,\dots,6$ 表示导通的二极管位置。因此当整流器发生二极管开路故障时,若能获得该二极管工作时段内所在整流桥的a相输入电流的期望电流 $i_E(t)$ 波形,便可通过对对应关系实现开路二极管的故障定位。

表1 a相输入电流波形与导通二极管之间的关系

Table 1 Relationship between phase-a input current waveform and conducting diode

导通二极管	$i_{sk}(t)$ 波形	导通二极管	$i_{sk}(t)$ 波形
V_{D1n}		V_{D4n}	
V_{D2n}		V_{D5n}	
V_{D3n}		V_{D6n}	

正常运行时4组整流桥的a相输入电流波形如图5所示。正常运行时4个整流桥的网侧a相输入电流波形相同,仅互差 15° 相位,相当于在时间轴上平移 $1/24$ 个工频交流周期时长。故发生二极管开路故障时,可通过对畸变情况较轻的整流桥的a相输入电流波形进行平移来获得故障二极管工作时段内的期望波形,进而确定故障二极管的具体位置。

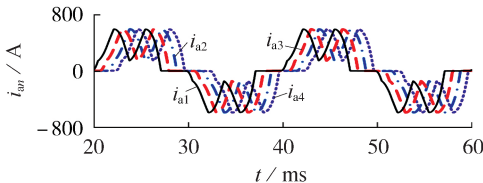


图5 正常运行时各整流桥a相输入电流波形

Fig.5 Phase-a input current waveforms of each rectifier bridge under normal operation

2.2 滤波去噪

现场实际测量过程中存在较多干扰,如设备运行噪声、环境噪声等不同来源的噪声复合体。拟采用高斯白噪声对测量噪声进行模拟,故在电压、电流的仿真波形中分别叠加不同信噪比的高斯白噪声来模拟实测波形。为了消除噪声对故障诊断的干扰性,首先设置滤波环节:对叠加噪声后的输出电压信号利用巴特沃斯低通滤波器进行滤波去噪,由于其主要谐波频率为 $1\,200\text{ Hz}$,故设置滤波器的截止频率为 $1\,250\text{ Hz}$;对叠加噪声后的输入电流信号使用中值滤波器进行滤波去噪。

2.3 疑似故障时间段获取

如前文所述,地铁牵引整流器二极管发生开路故障时,其输出电压幅值将出现下降现象,因此,可

利用输出电压波形的幅值特征来检测整流器二极管开路故障,确定故障时间。

采集地铁牵引整流器输出电压信号 $u_d(t)$, 对当前采样时刻 t 之前的一个交流工频周期 T ($T=20$ ms) 内的输出电压按式(1)进行归一化处理, 得到 $u'(x)$:

$$u'(x) = 2 \frac{u_d(x) - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} - 1 \quad (1)$$

其中, $u_{\max}$ 、 $u_{\min}$ 分别时段 $[t-T, t]$ 内输出电压 $u_d(t)$ 的最大值与最小值; x 为时段 $[t-T, t]$ 内的采样时刻。

对 t 时刻的工频周期 $[t-T, t]$ 内的归一化电压 $u'(x)$ 求取极小值, 当所求极小值出现先大于0、后至少连续3个极小值小于0、再大于0的情况时, 判断牵引整流器可能发生二极管开路故障; 将第一个小于0的极小值点时刻记录为 t_1 , t_1 之后第一个大于0的极小值点时刻记录为 t'_1 , 将 t'_1 时刻的前一个线电压转换时刻记录为 t_2 , 则时段 $[t_1, t_2]$ 为疑似二极管开路故障时间。

2.4 故障整流桥确定

由于发生二极管开路故障时, 故障二极管所在整流桥的输入电流会出现波头消失的现象; 而在此时段内, 其余整流桥的输入电流波形虽会发生畸变, 但仍有完整的导通波头, 与故障整流桥之间存在明显差异, 因此可利用输入电流波形的幅值特征来判定发生故障的整流桥。

分别采集故障时段 $[t_1, t_2]$ 内4个整流桥的a相输入电流, 并按式(2)进行绝对值归一化求和。

$$S_n = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |i_{an}| dt}{|i_{amax}|} \quad (2)$$

其中, i_{an} 为 n 号整流桥的a相输入电流; $|i_{amax}|$ 为故障时段内4个整流桥的a相输入电流最大值的绝对值。

设定导通阈值 s_{on} , 若存在 $S_n < s_{on}$, 则表明 n 号整流桥的a相电流存在波头消失, 即故障二极管处于该整流桥; 若所有 $S_n > s_{on}$ 均满足, 则判定牵引整流器未发生故障。当故障发生于二极管导通时, 由于4个整流桥输入电流相量之间固有 15° 的相位差, 利用绝对值归一化求和的方法可能会造成误判。故当前一步诊断所得的故障持续时间过短, 即 $t_2 - t_1 < \varepsilon$ (ε 为固定阈值) 时, 需利用故障二极管下一工频周期工作时段内各整流桥的a相输入电流波形进行诊断。例如图6所示, 在 t_f 时刻4号整流桥二极管 V_{D44} 发生开路故障, 根据故障分析可知, i_{a4} 波形将失去负向导通波头; 但在当前工频周期, 故障时段内 i_{a1} 亦无导通波头, 因此会造成误判, 故需利用下一工频周期内的a相输入电流信息进行诊断。

根据牵引整流器输入电流相位分析可知, 4号整流桥输入电流相位最为落后, 滞后1号整流桥

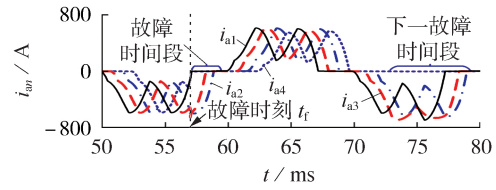


图6 二极管开路故障时各整流桥a相输入电流波形

Fig.6 Phase-a input current waveforms of each rectifier bridge under open circuit fault of diode

45° , 即在时间轴上向后平移 2.5 ms。因此, 为提高诊断的可靠性, 设置阈值 ε 为 3.5 ms。

2.5 故障二极管定位

在确定故障时段和故障整流桥后, 可根据4个整流桥之间的相位关系, 通过对畸变较小的整流桥a相输入电流波形的平移, 获得故障二极管工作时段内的期望波形, 进而诊断出故障二极管的具体位置。为了便于诊断, 可利用超前故障整流桥 15° 相位的整流桥的输入电流波形(故障整流桥为1号除外)来定位故障二极管, 即: 当故障发生在2号、3号、4号整流桥时, 分别将3号、1号、2号整流桥在超前故障时段 $T/24$, 即 $[t_2 - T_0 - T/24, t_2 - T/24]$ 内的a相输入电流波形作为期望电流 $i_E(t)$ 波形进行故障诊断。

特别地, 当故障发生在1号整流桥时, 则将4号整流桥在超前故障时间段 $7T/8$, 即 $[t_2 - T_0 - 7T/8, t_2 - 7T/8]$ 内的a相输入电流波形作为期望电流 $i_E(t)$ 波形进行故障诊断。

最后根据期望电流 $i_E(t)$ 波形与表1中正常运行波形的相似度, 确定故障二极管的具体位置。2个波形的相似度可以通过相关系数来描述^[17], 计算公式为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N X(i)Y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X^2(i) \sum_{i=1}^N Y^2(i)}} \quad (3)$$

其中, $X(i)$ 和 $Y(i)$ 为2个离散信号序列; N 为离散信号序列的长度; ρ 为相关系数且 $-1 \leq \rho \leq 1$, ρ 越大表征2个波形越相似, 当 $\rho = 1$ 时表示2个波形完全一致, 当 $\rho = -1$ 时表示2个波形幅值相同、极性相反^[18]。

因此, 分别计算平移获得的a相输入电流的期望电流 $i_E(t)$ 波形与不同二极管连续导通时整流桥a相输入电流的标准波形 $i_{sk}(t)$ 的相关系数 ρ_k , ρ_k 取最大值时对应的 k 值即为故障二极管序号。

综上所述, 基于波形特征的地铁牵引整流器二极管开路故障诊断流程如附录中图A1所示。

3 仿真实证

3.1 诊断方法有效性检验

为了验证所提诊断方法的有效性, 在额定负载

2200 kW、采样频率48 kHz的情况下,设置2号整流桥a相下桥臂二极管 V_{D42} 在52 ms时发生开路故障,并对输出电压和输入电流的仿真波形叠加信噪比为40 dB的高斯白噪声。在该采样频率下,导通阈值 $s_{on}=6$ 。首先对采集的输出电压和输入电流信号进行滤波去噪,然后对采样时刻 t 之前的一个工频周期 T 内的输出电压 $u_a(t)$ 进行归一化处理,并求取极小值。故障诊断仿真结果如图7所示。由图7(a)可知,当 $t=60.1$ ms时,在时段 $[t-T, t]$ 内求得的极小值出现先大于0、后连续5个极小值小于0、再大于0的情况,判断牵引整流器可能发生二极管开路故障;根据2.3节分析,记录 $t_1=52.7$ ms、 $t_2=59.3$ ms,则时段 $[t_1, t_2]=[52.7, 59.3]$ ms为疑似二极管开路故障时间。图7(b)为时段 $[t_1, t_2]$ 内各整流桥滤波去噪后的a相输入电流波形。由于 $t_2-t_1=6.6$ ms >3 ms,故可直接按式(2)对各输入电流进行绝对值归一化求和,得 $S_1\approx 189.0811$ 、 $S_2\approx 1.5284$ 、 $S_3\approx 168.0064$ 、 $S_4\approx 199.6593$,其中 $S_2<s_{on}$,故判定发生二极管开路故障,且故障二极管位于2号整流桥。图7(c)为获取超前2号整流桥 15° 相位的3号整流桥在时段 $[t_2-T_0-T/24, t_2-T/24]=[51.9, 58.5]$ ms内的a相输入电流 $i_{a3}(t)$ 波形,并将其作为故障二极管工作时段内的期望电流 $i_E(t)$ 波形。计算其与正常运行时各个二极管导通时段内对应的a相输入电流标准波形 $i_{sk}(t)$ 之间的相关系数 ρ_k ,如表2所示。

由表2可知,期望电流 $i_E(t)$ 波形与 V_{D42} 导通时段内的a相输入电流的标准波形之间的相似度最高,故判定2号整流桥a相下桥臂二极管 V_{D42} 发生开路

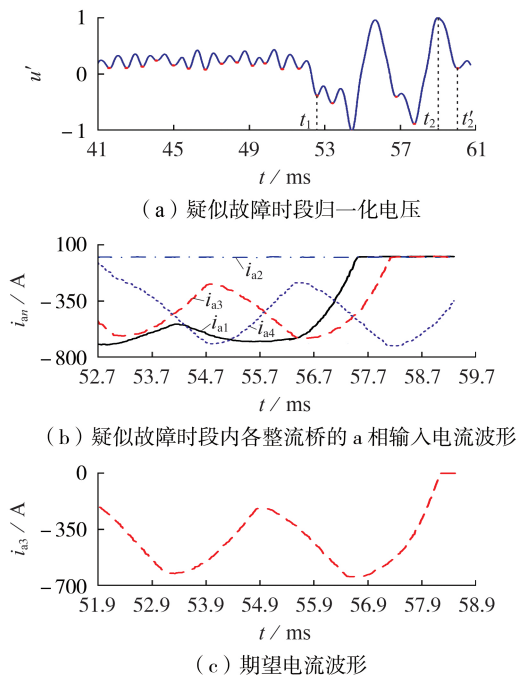


图7 故障诊断仿真结果

Fig.7 Simulative result of fault diagnosis

表2 相关系数

Table 2 Correlation coefficients

导通二极管	ρ_k	导通二极管	ρ_k
V_{D12}	-0.9321	V_{D42}	0.9321
V_{D22}	-0.6688	V_{D52}	0.6688
V_{D32}	0.6474	V_{D62}	-0.6474

故障。诊断结果与设置的故障二极管位置一致。

3.2 适应性分析

为验证本文所提方法的适应性,对不同位置、不同负载大小以及不同时刻发生故障的诊断效果分别进行仿真验证。

当地铁牵引负载为额定大小,即2200 kW时,分别设置牵引整流器不同位置的二极管发生开路故障。附录中表A1给出了部分工况下的故障诊断结果。从表A1可以看出,不同整流桥及不同位置的二极管发生开路故障时本文所提诊断方法均能获得准确的诊断结果,表明该方法不受故障位置的影响。

在不同地铁牵引负载下,设置1号整流桥发生二极管开路故障。附录中表A2给出了不同负载工况下的故障诊断结果。从表A2可以看出,不同负载工况下发生二极管开路故障时本文所提诊断方法均能获得准确的诊断结果,表明该方法不受地铁运行负载的影响。

当地铁牵引负载为额定大小时,设置牵引整流器4号整流桥的二极管 V_{D14} 在不同时刻发生开路故障。附录中表A3给出了部分工况下的故障诊断结果。从表A3可以看出,当故障发生时间在二极管导通(43.5 ms)前以及二极管导通期间内前3 ms,即 $[43.5, 46.6]$ ms时,利用当前工频周期内的故障时间段即可有效地诊断出故障二极管位置;当故障发生在二极管导通期间内后3.6 ms时,当前工频周期内归一化输入电流波形不满足判据,而利用下一工频周期内的a相输入电流仍可准确诊断故障位置。因此,不管开路故障发生在二极管导通前还是导通期间,本文所提诊断方法均能有效地识别出故障二极管,表明该方法不受故障发生时刻的影响。

4 实验验证

24脉波牵引整流器是由2台12脉波牵引整流器经移相后并联运行组成,在发生二极管单管开路故障时,两者的输入电流波形和输出电压波形具有相同的故障特征。在考虑安全性、可行性和经济性的基础上,搭建了如附录中图A2所示的12脉波牵引整流器试验平台来验证所提诊断方法。其中实验平台中的整流器电压等级为实际地铁牵引整流器的1/10。整流变压器变比为380 V/118 V,额定功率为3000 V·A;整流二极管型号为ZP50A,其正向平均电流为50 A,反向重复峰值电压为1600 V。使用

直流负载箱作为恒功率负载,并用空气开关模拟开路故障。

附录中图A3为设置1号整流桥b相上桥臂二极管 V_{D31} 发生开路故障的实验波形。使用所提故障诊断方法进行诊断:首先对采集的输出电压和输入电流信号进行滤波去噪,然后对采样时刻 t 之前一个工频周期 T 内的输出电压 $u_d(t)$ 进行归一化处理,并求取极小值,诊断结果如图8(a)所示,得到疑似故障时段为 $[12.6, 17.5]$ ms;该时段内2个整流桥的输入电流波形如图8(b)所示,分别进行绝对值归一化求和,得 $S_1=5.4852$ 、 $S_2=77.2621$,其中 $S_1 < s_{on}$,故判定发生二极管开路故障,且故障二极管位于1号整流桥;最后根据2个整流桥输入电流的相位关系获取期望电流波形。因12脉波牵引整流器中1号整流桥的输入电流相位超前2号整流桥 30° ,故获取滞后故障时段 $T/12$ 时长内的2号整流桥输入电流作为期望电流 $i_E(t)$ 波形,如图8(c)所示。期望电流波形与标准波形之间的相关系数如表3所示,可知,期望波形与 V_{D31} 导通时段内的a相输入电流标准波形相似度最高,故判断1号整流桥b相上桥臂二极管 V_{D31} 发生开路故障,与设置的故障位置一致,验证了所提诊断方法的实用性和可行性。

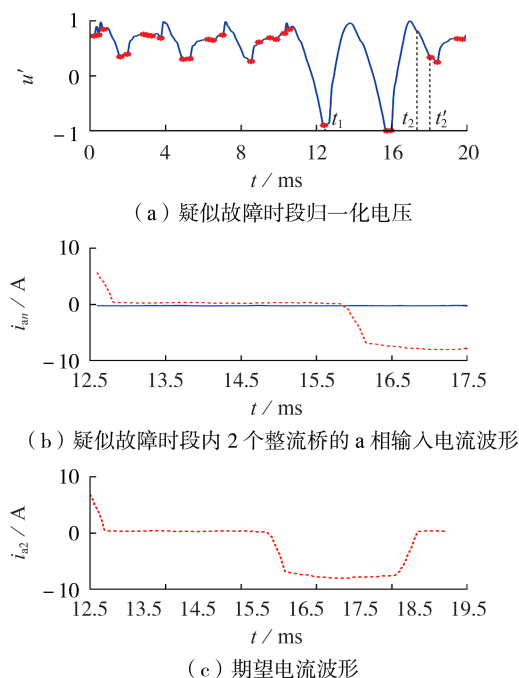


图8 故障诊断实验结果

Fig.8 Experimental results of fault diagnosis

表3 开路故障实验的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of open circuit experiment

导通二极管	ρ_k	导通二极管	ρ_k
V_{D11}	-0.5563	V_{D41}	0.5564
V_{D21}	0.0647	V_{D51}	-0.0647
V_{D31}	0.8470	V_{D61}	-0.8470

5 结论

本文针对地铁牵引整流器的二极管开路故障工况,分析了故障前后整流器输入电流波形和输出电压波形的变化特征,并利用整流器输入电流相量之间的相位关系,最终实现对地铁牵引整流器二极管开路故障的识别与定位。同时基于 MATLAB/Simulink 仿真平台与实物试验平台进行实验验证。验证结果表明,本文提出的故障诊断方法不受噪声、故障位置、故障时刻以及地铁系统运行负载的影响,具有良好的抗干扰性、可靠性、适应性和实用性;同时,该方法仅需采集整流器输出电压信号和任意一相输入电流信号便能实现故障诊断,减少了传感器数量,降低了诊断成本,具有较好的工程应用前景。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王念同,魏雪亮.城市轨道交通24脉波牵引整流变电站网侧谐波电流的分析[J]. 变压器,2003,40(1):1-7.
WANG Niantong, WEI Xueliang. Line side harmonic current analysis in 24-pulse traction rectifier substation of city track [J]. Transformer, 2003, 40(1): 1-7.
- [2] 宋琳琳. 地铁整流柜监控装置研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
SONG Linlin. Research on the monitoring and controlling device of metro rectifier [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [3] 闫淑群. 二十四脉波可控整流电路故障在线诊断[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
YAN Shuqun. On-line diagnosis of twenty four-wave controlled rectifier [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [4] 李敏远,闫淑群. 一种二十四脉波可控整流电路的故障在线诊断方法[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 382-385.
LI Minyuan, YAN Shuqun. A fault diagnosis method of 24-wave controlled rectifier circuit [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 382-385.
- [5] 朱威,马伟明,阳习党,等. 基于电压波形相似度测量的十二相不控整流装置故障诊断[J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(2): 49-54.
ZHU Wei, MA Weiming, YANG Xidang, et al. Fault diagnosis method of 12-phase uncontrolled rectifier based on voltage waveform similarity measurement [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(2): 49-54.
- [6] ZHU Wei, MA Weiming, YANG Xidang, et al. A fault diagnostic method of 24-pulse uncontrolled diode rectifier based on the voltage waveform analysis [C]//Proceedings of 2016 2nd International Conference on Electronics, Network and Computer Engineering. Yinchuan, China: ICENCE, 2016: 846-852.
- [7] 朱威,阳习党,肖欢,等. 基于电压波形分析的三相不控整流装置故障诊断[J]. 船电技术, 2017, 37(10): 10-16.
ZHU Wei, YANG Xidang, XIAO Huan, et al. A fault diagnosis method of 12-phase uncontrolled rectifier based on waveform similarity measurement of diodes [J]. Marine Electric, 2017, 37(10): 10-16.
- [8] ZHANG Jiansheng, SONG Baoye, ZHAO Huadong. A new approach to fault diagnosis of three-phase full-bridge rectifier with integrated feature extraction [C]//2017 Chinese Automation

- Congress. Jinan, China: IEEE, 2017: 6817-6821.
- [9] 刘念, 谢驰. 无刷励磁同步发电机旋转整流器故障的模糊神经网络诊断[J]. 继电器, 2003, 31(8): 8-11.
LIU Nian, XIE Chi. Diagnosis of fuzzy neural network for rotating rectifier faults of generators with brushless excitation[J]. Relay, 2003, 31(8): 8-11.
- [10] 刘念, 谢驰, 王涛, 等. 基于免疫算法的无刷励磁发电机旋转整流器故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 32-35.
LIU Nian, XIE Chi, WANG Tao, et al. Immune algorithm in rotating rectifier fault diagnosis of brushless generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 32-35.
- [11] 赵洪山, 程亮亮. 基于双线性观测器的双馈风电机组变流器功率管开路故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 72-79.
ZHAO Hongshan, CHENG Liangliang. Open-circuit fault diagnosis based on bilinear observer for converter power-switch of doubly-fed wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 72-79.
- [12] 王英, 王丹, 陈小强, 等. 基于改进谱峭度与电流均值的牵引整流器开路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 112-118.
WANG Ying, WANG Dan, CHEN Xiaoqiang, et al. Open circuit fault diagnosis method for traction rectifier based on improved spectral kurtosis and current mean value[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 112-118.
- [13] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.
SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 75-84.
- [14] 吴新振, 张伟玲, 董海涛, 等. 十二相整流发电机二极管开路的故障运行分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 157-163.
WU Xinzen, ZHANG Weiling, DONG Haitao, et al. Analysis of diode-open fault operation for 12-phase rectifier generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 157-163.
- [15] 高劲, 董斌. 广州地铁1号线牵引供电整流器的保护配置[J]. 机车电传动, 2003(2): 31-32.
GAO Jin, DONG Bin. Protection configurations of traction rectifiers for Guangzhou Metro Line 1[J]. Electric Drive for Locomotives, 2003(2): 31-32.
- [16] 张纪利. 地铁整流机组的谐波仿真与分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
ZHANG Jili. The simulation and the analysis of the rectifier unit in subway[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [17] 李斌, 邱宏, 洪潮, 等. 基于电压源型换流器的柔性直流系统快速方向保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 1-8.
LI Bin, QIU Hong, HONG Chao, et al. High-speed direction protection of flexible DC system based on voltage source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 1-8.
- [18] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32, 53.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32, 53.

作者简介:



黄宇剑

黄宇剑(1996—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为牵引供电设备故障预测与健康管理(E-mail:huangyujian_swjtu@foxmail.com);

林圣(1983—),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为交直流混联电网保护与控制、牵引供电系统故障预测与健康管理、城市轨道交通通杂散电流分析与抑制(E-mail:slin@swjtu.edu.cn);

吴鉴舟(1997—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为杂散电流分析(E-mail:wujz-swjtu@foxmail.com);

黄迪(1995—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为牵引供电设备故障预测与健康管理(E-mail:dhuang_swjtu@foxmail.com)。

(编辑 李莉)

Fault diagnosis method of diode open circuit in metro traction rectifier based on waveform characteristics

HUANG Yujian¹, LIN Sheng¹, WU Jianzhou¹, HUANG Di¹, HE Jianghai², DUAN Zhentao²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: Aiming at the problems of high failure rate of diodes and difficult diagnosis in metro traction rectifier, an open circuit fault diagnosis method based on the waveform characteristics of input current and output voltage is proposed. The variation law of output voltage and input current waveforms of rectifier before and after diode open circuit fault is analyzed based on the circuit topology of metro traction rectifier. On this basis, the rectifier diode open circuit fault is detected and the suspected fault time is determined by using the output voltage waveform features, and then the rectifier bridge in which the fault diode is located is determined and the specific fault position is identified only by using one phase input current of each rectifier bridge. The simulative results based on MATLAB/Simulink platform show that the fault diagnosis method of metro traction rectifier is not affected by fault location, fault time, system running load, and has good reliability and adaptability.

Key words: waveform characteristics; metro traction rectifier; diode open circuit fault; fault diagnosis

附录

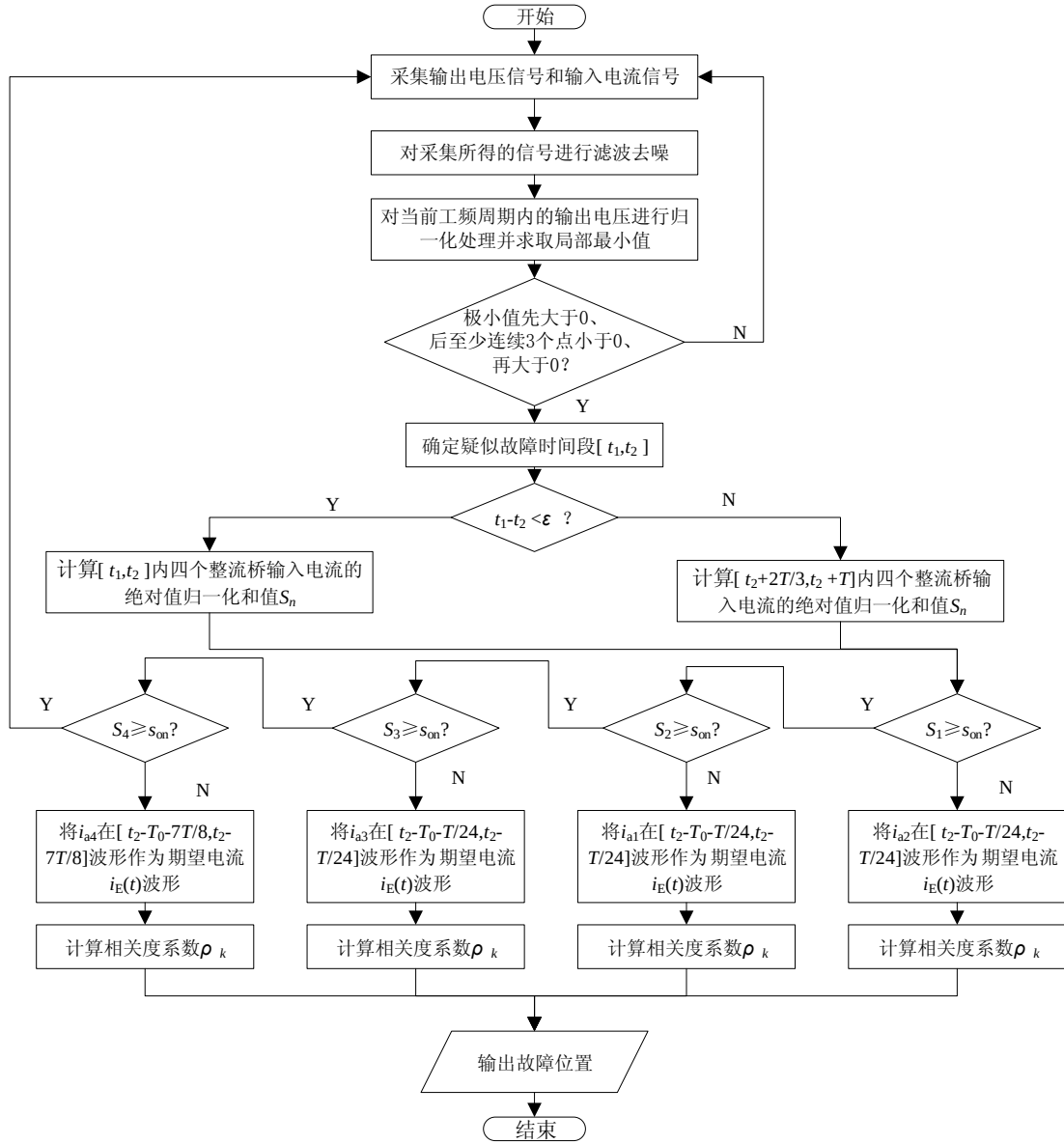


图 A1 故障诊断流程图

Fig.A1 Flowchart of fault diagnosis

表 A1 不同故障位置时的故障诊断结果
Table A1 Fault diagnosis results under different fault locations

故障位置	S_1	S_2	S_3	S_4	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	诊断结果
V _{D12}	187.34	2.15	166.54	201.72	0.9112	0.6599	-0.6268	-0.9112	-0.6599	0.6268	V _{D12}
V _{D22}	143.22	2.92	103.27	106.54	0.5633	0.8904	0.0916	-0.5632	-0.8904	-0.0915	V _{D22}
V _{D32}	225.50	3.48	133.95	103.46	-0.7085	-0.0659	0.9315	0.7086	0.0658	-0.9316	V _{D32}
V _{D42}	189.08	1.53	168.01	199.66	-0.9321	-0.6688	0.6474	0.9321	0.6688	-0.6474	V _{D42}
V _{D52}	140.81	2.47	100.76	106.50	-0.5749	-0.8980	-0.0829	0.5748	0.8981	0.0829	V _{D52}
V _{D62}	219.27	3.14	129.47	99.96	0.7103	0.0623	-0.9377	-0.7104	-0.0622	0.9377	V _{D62}
V _{D14}	105.70	169.03	189.52	2.07	0.9221	0.6646	-0.6375	-0.9221	-0.6646	0.6375	V _{D14}
V _{D24}	102.92	98.45	137.13	3.45	0.5464	0.8671	0.0923	-0.5463	-0.8672	-0.0923	V _{D24}
V _{D34}	201.88	136.44	228.34	3.49	-0.7078	-0.0588	0.9376	0.7079	0.0587	-0.9377	V _{D34}
V _{D44}	105.12	166.91	187.92	2.78	-0.9161	-0.6623	0.6313	0.9161	0.6623	-0.6313	V _{D44}
V _{D54}	101.54	96.51	135.16	2.34	-0.5712	-0.8911	0.0813	0.5711	0.8912	0.0813	V _{D54}
V _{D64}	193.98	130.21	219.18	4.31	0.7090	0.0623	-0.9358	-0.7091	-0.0622	0.9358	V _{D64}

表 A2 不同负载条件下的故障诊断结果
Table A2 Fault diagnosis results under different load conditions

故障位置	负载/kW	S_1	S_2	S_3	S_4	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	诊断结果
V _{D14}	2200	1.95	230.33	203.37	137.50	0.8836	0.6526	-0.5950	-0.8835	-0.6526	0.5950	V _{D14}
	3300	1.96	240.53	207.16	146.75	0.8671	0.6599	-0.5646	-0.8670	-0.6599	0.5646	V _{D14}
	6600	1.06	254.34	208.74	164.58	0.8311	0.6845	-0.4895	-0.8310	-0.6844	0.4896	V _{D14}
V _{D34}	2200	3.00	137.45	103.36	98.70	-0.6827	-0.0775	0.8837	0.6828	0.0774	-0.8837	V _{D34}
	3300	3.99	138.64	106.71	98.84	-0.7055	-0.1106	0.8829	0.7055	0.1105	-0.8829	V _{D34}
	6600	4.05	158.90	136.61	116.05	-0.7713	-0.2806	0.8065	0.7712	0.2805	-0.8065	V _{D34}
V _{D54}	2200	2.63	189.27	105.34	168.43	-0.5312	-0.8392	-0.0859	0.5311	0.8392	0.0859	V _{D54}
	3300	4.34	192.76	108.00	166.75	-0.4428	-0.7779	-0.1495	0.4427	0.7779	0.1494	V _{D54}
	6600	2.79	185.34	105.11	163.41	-0.6554	-0.9663	-0.0375	0.6552	0.9663	0.0375	V _{D54}

表 A3 不同时刻发生故障的诊断结果
Table A3 Fault diagnosis results under different fault times

故障时刻/ms	疑似故障时段/ms	时长/ms	S_1	S_2	S_3	S_4	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	诊断结果
43.5	[43.5, 50.1]	6.6	107.41	171.23	192.82	1.43	0.9269	0.6663	-0.6425	-0.9269	-0.6663	0.6425	V _{D14}
44.5	[44.9, 50.2]	5.3	74.10	106.11	137.75	1.25	0.9119	0.6583	-0.6293	-0.9119	-0.6583	0.6293	V _{D14}
45.5	[45.8, 50.1]	4.3	39.69	91.64	101.12	0.97	0.9085	0.6309	-0.6517	-0.9085	-0.6309	0.6517	V _{D14}
46.5	[46.6, 50.1]	3.5	9.02	75.01	62.34	0.78	0.9042	0.6253	-0.6513	-0.9042	-0.6253	0.6513	V _{D14}
47.5	[63.5, 70.1]	6.6	106.59	169.91	188.09	3.28	0.9277	0.6670	-0.6430	-0.9277	-0.6670	0.6430	V _{D14}

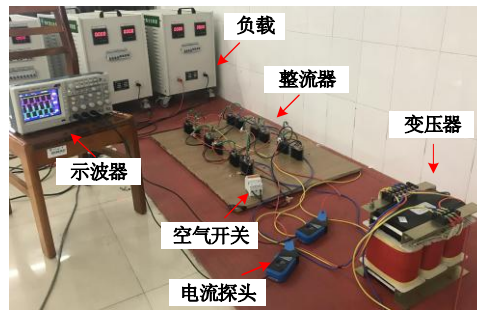


图 A2 12 脉波牵引整流器试验平台

Fig.A2 Test platform of 12-pulse traction power supply rectifier

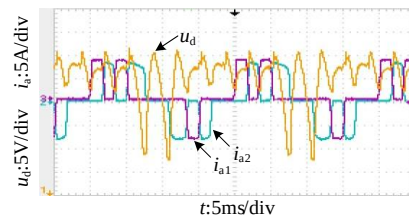


图 A3 二极管开路故障实验数据波形

Fig.A3 Experimental waveforms of diode open-circuit fault