

DOI: 10.7667/PSPC151830

# 利用电流故障特征的大功率整流装置故障在线诊断方法

刘星<sup>1</sup>, 姜睿智<sup>1</sup>, 宋国兵<sup>2</sup>, 王小波<sup>2</sup>, 刘珮瑶<sup>2</sup>, 李端祯<sup>2</sup>, 杨远航<sup>2</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对大功率整流装置单管直通、开路及单相交流进线开路等三种单元件故障, 分析了故障电流特征, 提出了一种根据电流故障特征在线诊断故障的方法。单管直通时, 根据计算得到的直流电流理论值将大于直流电流实测值, 且故障相与非故障相的直流分量符号相反, 可确定故障元件所在相别, 再根据故障相直流分量正负可确定故障元件所在共阳或共阴组别。对单管开路和单相交流进线开路, 若滑窗计算得到相电流直流分量持续大于某一整定值时判定为单管开路故障, 再通过直流分量极性确定故障元件所在组别; 若相电流直流分量先增大超过某一整定值后再减少至 0, 判定为单相交流进线开路, 根据故障相电流基波幅值最小确定开路相别。仿真结果表明, 该方法可快速诊断出故障, 适用于多重化并联整流电路的故障诊断场合, 具有一定的理论与实用价值。

**关键词:** 电流故障特征; 单管直通故障; 单管开路故障; 单相交流进线开路故障; 多重化并联整流装置

## An on-line fault diagnosis method for power rectifier device based on fault current characteristic

LIU Xing<sup>1</sup>, JIANG Ruizhi<sup>1</sup>, SONG Guobing<sup>2</sup>, WANG Xiaobo<sup>2</sup>, LIU Peiyao<sup>2</sup>, LI Duanzhen<sup>2</sup>, YANG Yuanhang<sup>2</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper analyzes the current characteristics of short circuit and open circuit of single thyristor as well as the current characteristics of open circuit of AC line, and comes up with a new on-line fault diagnosis method for the rectifier device. For the single thyristor short circuit, the theoretical DC value calculated using the measured AC current will be greater than the real-time DC value measured, and the DC components of the fault phase and non-fault phase are opposite in sign, which can be used to locate the fault thyristor. In the open circuit situation, if the DC component value of current calculated by slide window is continually larger than the threshold value, it is single thyristor open circuit, and the fault thyristor can be identified by the sign of fault phase DC component. If the DC component value of current firstly increases above a certain value and then reduces to 0, the fault can be identified as AC line open circuit, and the fault phase can be located with the help of minimum amplitude of the fundamental wave. Simulation results show that the method can diagnose the faults quickly and accurately and that it can also be applied to the fault diagnosis of multiple parallel rectifiers. So it has theoretical and practical value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177128).

**Key words:** fault current characteristics; single thyristor short circuit; single thyristor open circuit; single phase AC line open circuit; multiple parallel rectifiers

## 0 引言

大功率整流装置在轨道交通、电解冶金、直流输电等领域得到了大量应用<sup>[1]</sup>, 其安全运行意义重大。威胁其安全运行的常见故障主要包括晶闸管直通、晶闸管开路和交流进线开路<sup>[2-3]</sup>等三类, 晶闸管

直通会引起电网相间短路, 晶闸管开路和交流进线开路则会导致系统不对称运行、直流输出脉动, 带来巨大的经济损失和安全隐患。此外, 整流装置还存在故障维修的困难。因此, 研究其故障诊断, 快速识别故障发生并准确定位故障具有重要意义。

整流装置的故障诊断已得到国内外学者的广泛关注并已取得大量研究成果: 基于解析模型的诊断方法<sup>[4-7]</sup>、基于知识的诊断方法<sup>[8-10]</sup>和基于信号

分析的诊断方法<sup>[11-13]</sup>等。上述诊断方案大多利用直流电压波形信息且仅针对多个晶闸管同时开路的故障诊断, 仍存在以下不足: 1) 当面对多重化并联整流电路的故障诊断场合时, 由于此类整流电路采用多个整流单元并联结构, 单个整流单元发生故障时直流电压变化微小, 因此基于直流电压波形信息的诊断方法难以适用<sup>[14]</sup>; 2) 未对晶闸管直通故障的诊断展开研究, 使得直通故障的识别和处理只能依赖于保护系统, 而很多整流系统的保护配置并不完善<sup>[15]</sup>, 难以及时切除直通故障, 且保护系统并不具备直通故障元件的定位功能, 造成此类故障事后维修困难; 3) 并未对交流进线开路故障进行讨论, 容易将此类故障误诊为同一桥臂两个管子开路的复合故障。

文献[16-19]介绍了一些故障诊断的方法。考虑到整流装置发生故障时, 阀侧和直流侧电流将出现较大变化, 利用故障电流信息可望实现有效诊断且可适用于多重化并联整流电路的故障诊断, 而文献[20]提出了一种基于电子式互感器的整流系统电流采集方案, 解决了直流侧故障电流的获取难题, 为本方案的实现提供了基础。同时, 考虑到以下两点: 1) 多元件故障的复合故障往往由单元件故障处理不及时引起; 2) 真正意义上的“同时发生故障”是小概率的事件。因此, 本文将重点研究如何利用整流装置两侧电流信息来实现单管直通、单管开路及单相交流进线开路等三种单元件故障的诊断。

本文首先分析了三种单元件故障下的故障电流特征, 然后基于故障特征提出了故障诊断方案, 最后在 PSCAD 软件上搭建了仿真模型, 对诊断方案进行了仿真验证, 证明了本方案的有效性。

## 1 电流特征分析

整流系统主电路原理图如图 1 所示。

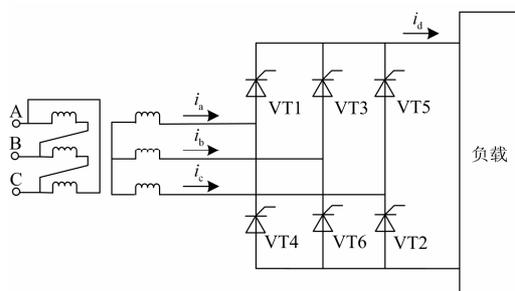


图 1 整流系统主电路原理图

Fig. 1 Principle diagram of main circuit of rectifier system

图中, VT1~VT6 六只开关器件组成整流桥, 各个开关按一定顺序开通、关闭实现整流。 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别为阀侧三相交流电流,  $i_d$  为输出直流电流。电源通常由整流变压器提供。

本节对正常工况下及三种单元件故障下的阀侧和直流侧电流特征进行分析, 作为故障诊断依据。

### 1.1 正常运行工况电流特征分析

正常工况下, 受变压器漏感及自饱和电抗器影响, 晶闸管导通角介于  $120^\circ$  和  $180^\circ$  之间。VT1 及与之导通过程重合的 VT2、VT3、VT5、VT6 电流波形及交流侧线电压波形如图 2 所示, 图中, 将 VT1 从导通开始到关断结束划分为 1~5 等 5 个阶段。

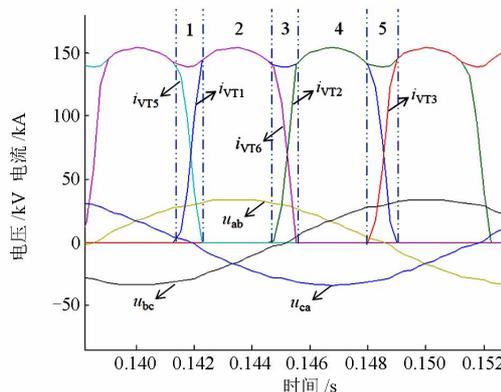


图 2 正常工况下, VT1~VT6 电流及线电压波形

Fig. 2 Current and line voltage waveform of VT1~VT6 under normal operation conditions

VT1 晶闸管从导通到关断的电路换路图如图 3 所示, 图中,  $L_b$  为交流侧的等值输入电抗,  $i_k$  为相间环流, 1)~5) 分别对应图 2 中的第 1~5 个导通阶段的电路原理图。

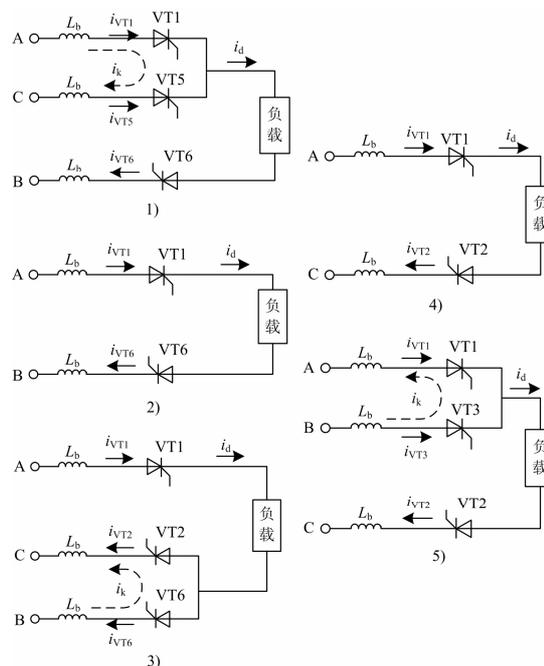


图 3 VT1 导通阶段电路换路过程图

Fig. 3 Circuit switching of VT1 conduction phase

结合图 2 电流及电压波形, 可知: 如图 3(a)所示,  $U_{ac}>0$  时刻, VT1 开始导通, A、C 相产生相间环流  $i_k$  促进 VT1 导通而加速 VT5 关断, 此阶段  $i_{VT1}+i_{VT5}=i_{VT6}=i_d$ , VT5 关断时间取决于  $L_b$  大小及换路前瞬间  $i_{VT5}$  大小; 如图 3(b)所示, VT5 关断后,  $i_{VT1}=i_{VT6}=i_d$ , 电流略滞后于  $U_{ab}$  波峰出现 VT1 的第一个波头及 VT6 的第二个波头; 如图 3(c)所示,  $U_{bc}>0$  时刻, VT2 开始导通, B、C 相产生相间环流  $i_k$  促进 VT2 导通而加速 VT6 关断, 此阶段  $i_{VT1}=i_{VT2}+i_{VT6}=i_d$ , 同样地, VT6 关断时间取决于  $L_b$  大小及换路前瞬间  $i_{VT6}$  大小; 如图 3(d)所示, VT6 关断后,  $i_{VT1}=i_{VT2}=i_d$ , 电流略滞后于  $U_{ac}$  波峰出现 VT1 的第二个波头及 VT2 的第一个波头; 如图 3(e)所示,  $U_{ba}>0$  时刻, VT3 开始导通, B、A 相产生相间环流  $i_k$  促进 VT3 导通而加速 VT1 关断, 此阶段  $i_{VT1}+i_{VT3}=i_{VT2}=i_d$ , 同样地, VT1 关断时间取决于  $L_b$  大小及换路前瞬间  $i_{VT1}$  大小。其他晶闸管的工作过程与之相似, 由上述分析可知, 正常工况下, 交流侧电流与直流侧电流波形如图 4 所示, 图中, 直流电流曲线与三相电流曲线波头部分轮流重合。

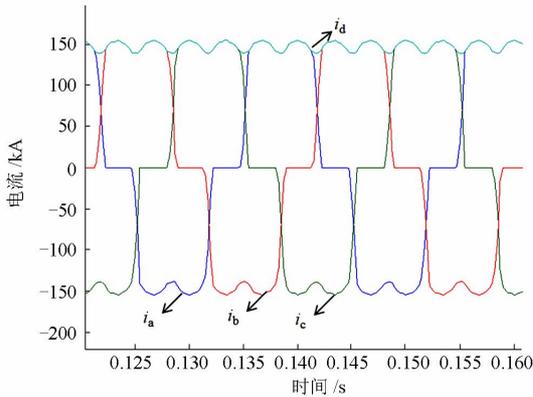


图 4 输入输出电流正常波形

Fig. 4 Normal waveform of input and output current

可知正常工况下输入输出电流具有以下特点:

1) 任何  $t$  时刻, 输出直流  $i_d$  等于某一只管子电流的充要条件是: 同一侧桥臂有且仅有此管子导通。换言之, 输出直流  $i_d$  的瞬时值等于三相电流瞬时值绝对值最大值, 而由于三相电流瞬时值和为 0, 故式(1)成立。

$$i_d(t) = \frac{|i_a(t)| + |i_b(t)| + |i_c(t)|}{2} \quad (1)$$

2) 定义  $t$  时刻, 三相电流直流分量  $id_p(t)$ , (其中  $p=a,b,c$ ),  $N$  为一个周期内的采样点数, 其计算公式为

$$id_p(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_p(k) \quad (2)$$

可知, 三相电流正负半周波形对称, 理想采样条件下,  $id_p(t)$  任一时刻值均为 0。

### 1.2 单管开路故障电流特征分析

以 VT1 为例分析其开路故障后整流装置电流特征。VT1 开路后, 各开关管电流波形如图 5 所示。图中, 流过 VT5、VT6 和流过 VT2、VT3 的电流曲线分别与输出直流电流曲线部分重合。

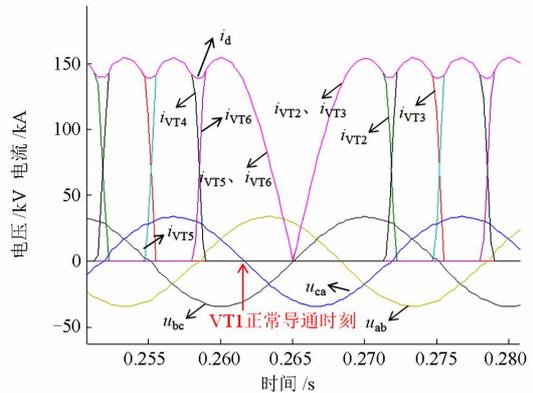


图 5 VT1 开路故障下, 各管子故障电流波形

Fig. 5 Fault current of each thyristor under open circuit condition

参照图 5, 结合正常工况分析可知: 阶段 1, VT1 处于开路状态, 在正常导通时刻 A 相无法与 C 相形成相间环流, 因此, VT5 关断推后, 电路保持 VT5、VT6 导通状态:  $i_{VT5}=i_{VT6}=i_d$ , 至  $U_{bc}>0$  时刻, 同时关断; 而此时刻, VT2、VT3 同时导通, 电路直接换路到 VT2 的第四个工作状态; 至  $U_{ca}>0$  时刻, VT4 开始导通, 迫使 VT2 关断, 此时刻以后到下次 VT1 正常开通期间, 电路恢复正常工作。因此, VT1 开路故障下, 除 VT4 外其他晶闸管导通过程均受影响。

$t=0.2$  s 时刻, VT1 发生开路故障, 输入输出电流波形如图 6 所示。

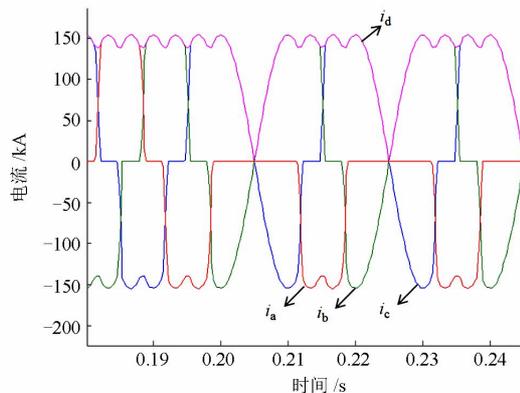


图 6 VT1 开路故障下, 输入输出电流波形

Fig. 6 Input and output current waveform under open circuit condition

可知,单管开路故障下输入输出电流具有以下特点:

1) 任何  $t$  时刻,公式(1)均成立;

2) 三相电流正负半周波形不再对称,均出现直流分量。当上臂管子开路时,计算得三相直流分量将由 0 逐渐减小到某一个负值,而非故障相则由 0 逐渐增加至某一正值,三相直流分量为“一负两正”,而当下臂管子开路时,情况正好相反;

3) 同一桥臂的另一只管子几乎不受影响。因此,故障稳态下故障相直流分量绝对值最大,正好等于正常工况下流过开关管的等效直流大小。

### 1.3 单相交流进线开路故障电流特征分析

以 A 相进线开路为例分析交流进线开路故障后整流装置电流特征。A 相进线开路后,系统由三相整流电路变为单相整流电路,若忽略外电路反电势,晶闸管导通角增至  $180^\circ$ 。

在  $t=0.2$  s 时刻, A 相进线断线,整流装置输入输出电流如图 7 所示。图中,故障后 B 相电流和 C 相电流曲线轮流与负载电流曲线重合。

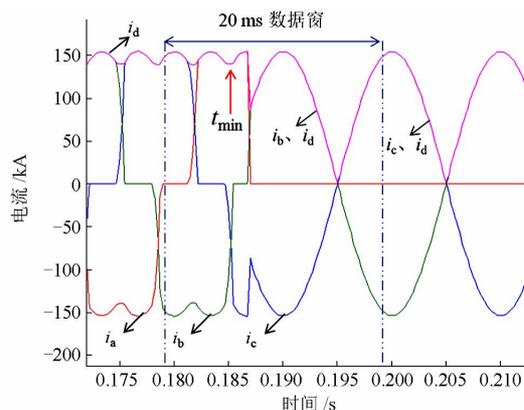


图 7 A 相交流进线开路故障下,输入输出电流波形

Fig. 7 Input and output current waveform under open circuit in AC line of phase A

故障稳态下和正常运行状态下,三相电流均无直流分量,但随着滑动计算直流分量的数据窗口从正常状态移动到故障状态的过程中,三相直流分量先由 0 增加至最大值再减少至 0。以 A 相为例,其直流分量在三相中最大,当数据窗位于图示位置时,出现直流分量的最大值。最大值的大小将取决于故障发生时刻,当故障发生在 A 相单管导通一半时即图示  $t_{\min}$  时刻,该值最小,等于单管正常工况下等效直流的一半;当故障发生在 A 相关断期间,该值最大,等于单管正常工况下等效直流。当数据窗完全进入故障区后,三相直流分量减小为 0。

可知,交流进线开路故障下输入输出电流具有以下特点:

1) 任何  $t$  时刻,公式(1)均成立。

2) 滑动计算三相直流分量,在数据窗从故障时刻开始滑动到故障稳态的过程中,直流分量先增加至某一最大值再减小至 0,且该最大值至少大于正常工况下流过单管的等效直流的一半。

3) 故障稳态下,故障相电流为 0,非故障相流过交流,三相直流分量为 0。

### 1.4 单管直通故障电流特征分析

以 VT1 直通为例,分析故障电流波形特征,并且假设 VT3、VT5 始终没有烧毁。VT1 在  $t=0.2$  s 时刻发生直通故障,流过各晶闸管电流及输出直流电流波形如图 8 所示。

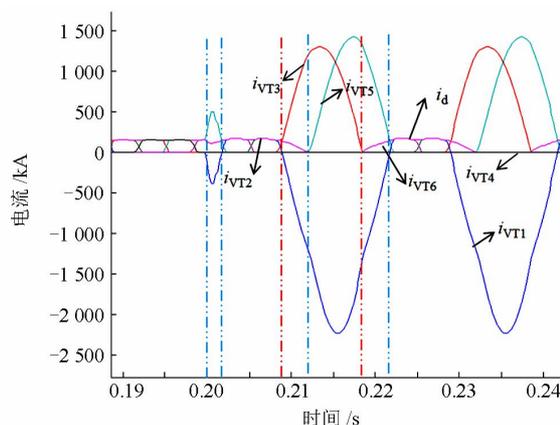


图 8 VT1 直通故障下,输入输出电流波形

Fig. 8 Input and output current waveform under VT1 short condition

VT1 直通后,在其正常导通角期间,系统正常工作,而在其应该关断却无法关断的期间,将与另外两相形成相间短路。 $U_{ba}>0$  期间,AB 相相间短路,短路电流远大于负载电流,由 B 相 VT3 经 A 相 VT1 流回;  $U_{ca}>0$  期间,AC 相相间短路。

可知,单管直通故障下输入输出电流具有以下特点:

1) 仅在故障管正常导通角期间式(1)成立,此外任何时刻,由三相电流计算得到的直流电流理论值大于直流电流实测值;

2) 上管直通后,短路电流处于故障相的负半周,而处于非故障相的正半周,直流分量为“一负两正”,下管直通则正好相反;

3) 故障相短路电流为其他两相短路电流之和,其直流分量最大。

## 2 故障识别原理与判据

### 2.1 故障识别原理

由上述电流特征分析可知：对于开路故障，滑动计算三相电流直流分量，无论单管开路或交流进线开路，直流分量均会出现大于正常工况下单管等效直流的一半，根据这一特点便可检测出是否出现开路故障；在检测出开路故障后 20 ms 时，若三相直流分量最大值仍大于正常工况下单管等效直流的一半，则为单管开路故障，反之则为交流进线开路故障，根据这一特点便可识别出开路类型。识别出开路类型后，若为单管开路故障，根据“故障相直流分量最大，且其正负分别对应于共阳组和共阴组管子开路”这一特点，可定位故障管的位置；若为交流进线开路，根据故障相电流基波幅值最小这一特点可定位开路相。

对于直通故障，从故障发生时刻起，式(1)不再成立，根据这一特点可立即识别出是否出现直通故障。一般对于直通故障需要快速动作，以防止事故扩大，故可立即将识别结果上报保护系统做出决策，而从上报直通故障到保护动作还有数十毫秒的时间，为缩短维修周期还需要准确定位出故障位置。在检测出直通故障后 20 ms，根据“故障相直流分量正负号异于非故障相，且其正负分别对应于共阳组和共阴组管子直通”的特点定位故障管位置。

将上述识别原理综合起来，便可兼顾开路和直通故障的识别。考虑到直通故障直流分量变化情况和开路故障相似，可能导致误判，而式(1)不成立是其独有的故障特点，因此，采用“先识别直通，后识别开路故障”的原则进行识别。

在线识别流程如下所述。

Step1: 采集  $t_0$  时刻输入输出电流值；

Step2: 判断是否出现直通故障。若是，go step3；若否，go step4。

Step3: 将识别结果上报保护系统，并等待一个工频周期数据，计算  $t_0+20$  ms 时刻三相直流分量，根据直流分量正负定位故障管位置。

Step4: 判断是否出现开路故障。若是，go step5；若否，go step8。

Step5: 等待一个工频周期数据，计算  $t_0+20$  ms 时刻三相直流分量，判断单管开路还是交流进线开路故障。若是单管故障，go step6；否则，go step7。

Step6: 根据直流分量大小定位故障相，再由故障相直流分量正负定位故障管。

Step7: 根据  $[t_0, t_0+20]$  数据窗计算三相电流基波幅值，定位故障相。

Step8: 将识别结果上报保护系统，根据下一点采样值继续计算。

### 2.2 故障识别判据

#### 1. 直通故障识别

定义非直通故障下，理论输出直流为

$$i'_d(t) = \frac{|i_a(t)| + |i_b(t)| + |i_c(t)|}{2} \quad (3)$$

$t$  时刻，出现直通故障的判据为

$$i'_d(t) - k \times i_d(t) > 0 \quad (4)$$

式中， $k$  为考虑互感器精度引入的可靠系数，一般可取为 1.1~1.2。

#### 2) 开路故障识别

设正常工况下单管平均等效直流为  $A$ 。

$$A = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^N i_d(k) \quad (5)$$

式中， $N$  为一个工频周期的采样点数。

可设定阈值  $A_1=0.25 \times A$ ，则识别开路故障的灵敏度至少为 2。

$t$  时刻，出现开路故障的判据为

$$\max(|id_a(t)|, |id_b(t)|, |id_c(t)|) > A_1 \quad (6)$$

#### 3) 开路故障类型识别

设定阈值  $A_2=0.5 \times A$ ，交流进线开路故障下，三相直流分量为 0，而单管开路故障下，故障相直流分量为  $A$ 。

设  $t$  时刻检测出开路故障， $t_1=t+20$  ms，则单管开路识别判据为

$$\max(|id_a(t_1)|, |id_b(t_1)|, |id_c(t_1)|) > A_2 \quad (7)$$

若式(7)不成立则判为交流进线开路故障。

限于篇幅，关于故障位置定位不再赘述。

## 3 仿真验证

采用 PSCAD 进行电磁暂态仿真，Matlab 进行数据处理。基于 PSCAD 软件建立某一铝厂的 84 脉整流系统，该系统采用多重化并联结构，由 14 个三相六脉整流单元并联而成。仿真模型中，变压器容量 300 MW，网侧线电压 30 kV，阀侧线电压 1.2 kV，漏抗 0.1 p.u.，负载电感 0.001 mH，负载电阻 0.09  $\Omega$ ，数据窗取为一个工频周期，采样频率为 2 000 Hz。

以某一整流单元为对象进行验证，随机抽取故障类型：VT2 直通、VT3 开路、B 相交流进线开路。

### 3.1 单管直通故障仿真结果

图 9 给出了 0.2 s 时 VT2 发生单管直通的诊断结果(取可靠系数  $k=1.2$ )。

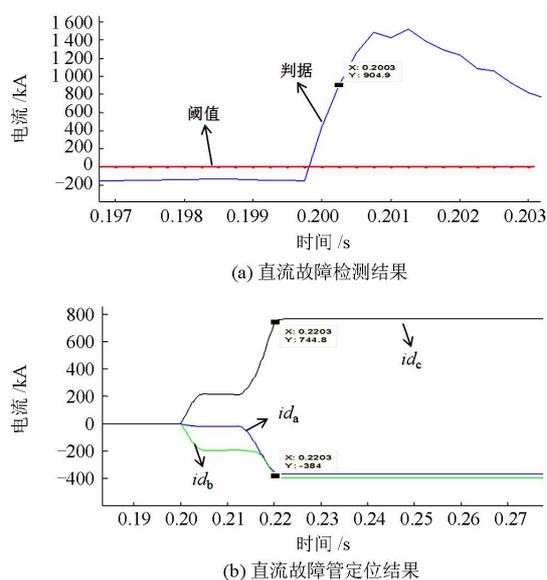


图9 单管直通故障仿真识别结果

Fig. 9 Simulation results under single tube short condition

图9中,如图9(a)所示,根据文中所提直通故障检测方法,在故障后0.3 ms即发现直通故障。利用等待切除故障期间数据,计算出故障后20.3 ms的三相直流分量,如图9(b)所示,根据C相为正,A、B相为负可识别出C相共阳组晶闸管即VT2故障。

### 3.2 单管开路故障仿真结果

图10给出了0.2 s时VT3发生单管开路的诊断结果。如图10(a)所示,直通故障识别不会发生误动作;如图10(b)所示,在故障发生后10.5 ms,直流

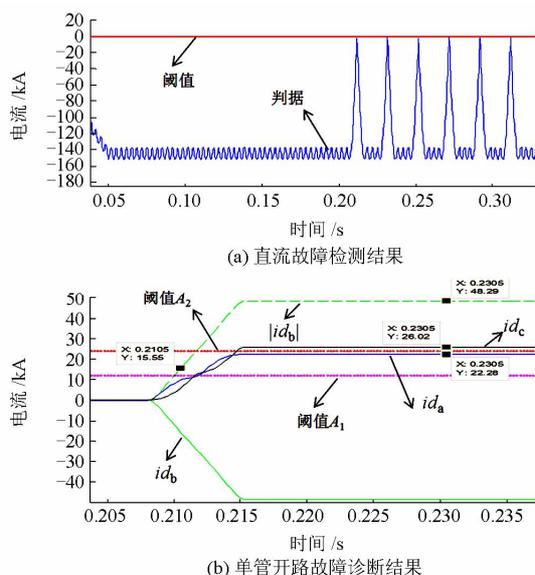


图10 单管开路故障仿真识别结果

Fig. 10 Simulation results under single tube open condition

分量大小超过阈值 $A_1$ ,检测出有开路故障。等待20 ms的数据,计算出 $t=0.2305$  s时,B相直流分量最大且大于阈值 $A_2$ ,符号为负,据此可判断为共阴组管子开路即VT3开路。

### 3.3 交流进线开路故障仿真结果

图11给出了0.2 s时B相进线开路的诊断结果。图11中,11(a)为直通故障检测结果,11(b)、11(c)为交流进线开路诊断结果。如11(a)所示,直通故障识别不会发生误动作;如11(b)所示,在故障发生后1.8 ms,直流分量大小超过阈值 $A_1$ ,检测出开路故障;如11(c)所示,等待20 ms的数据,计算出 $t=0.2218$  s时,B相电流基波幅值最小,据此可判断为B相交流进线开路。

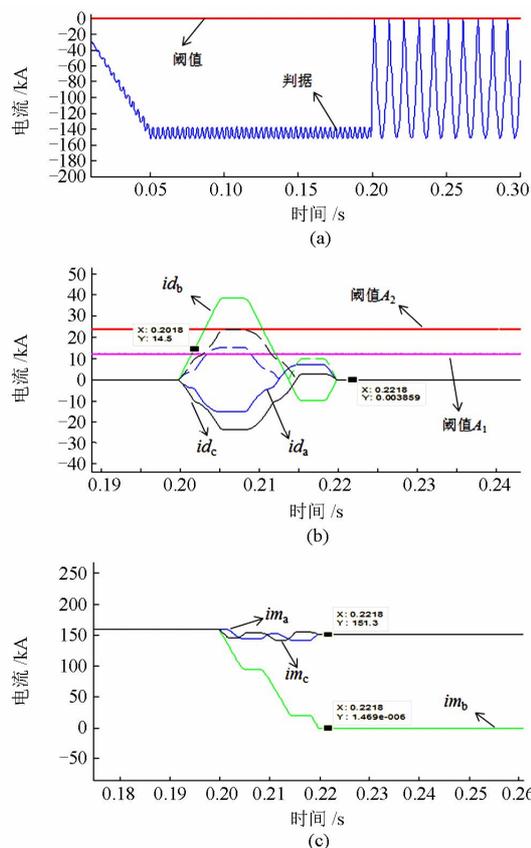


图11 交流进线开路故障仿真识别结果

Fig. 11 Simulation results under AC line open condition

## 4 结论

本文提出了一种的整流装置故障诊断新方法,该方法基于整流电路阀侧和直流侧电流故障特征进行故障诊断,可快速识别、定位整流电路的单管开路、单管直通和单相交流进线等单元件故障,具有如下优点:1)可适用于多重化整流电路故障诊断场

合; 2) 可在线、快速诊断出单元件故障, 有效防止复合故障的发生; 3) 兼顾了开关器件开路故障和直通故障的诊断; 4) 算法简单, 易于实现。仿真表明, 在整流装置发生单元件故障时, 诊断方案能在 30 ms 内进行可靠识别、定位。该方法具有一定的工程实用价值。

### 参考文献

- [1] 姚广, 蒋大明. 双反星型整流电路在电解中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 54-56.  
YAO Guang, JIANG Daming. Application of double inverse star rectifying circuit in electrolysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 54-56.
- [2] 王智弘, 李东辉. 变流器故障诊断技术综述[J]. 大功率变流技术, 2014(5): 1-6.  
WANG Zhihong, LI Donghui. A survey of fault diagnosis technology for converter[J]. High Power Converter Technology, 2014(5): 1-6.
- [3] 徐德鸿, 马皓. 电力电子装置故障自动诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 王东林, 张耀升. 电力电子电路块脉冲在线参数和状态辨识[J]. 电工技术学报, 1995, 9(4): 25-29.  
WANG Donglin, ZHANG Yaosheng. On-line parameter and state identification in power electronic circuit based on block-pulse functions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1995, 9(4): 25-29.
- [5] 王江, 胡龙根, 赵忠堂. 基于观测器的方法在三相逆变器故障诊断中的应用[J]. 电源技术应用, 2001, 4(6): 24-27.  
WANG Jiang, HU Longgen, ZHAO Zhongtang. An application of observer-based method to fault diagnosis for three phase inverter[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2001, 4(6): 24-27.
- [6] 文小玲, 尹项根, 谭尚毅. 一种电力电子电路故障诊断方法[J]. 电气应用, 2003(7): 49-51.  
WEN Xiaoling, YIN Xianggen, TAN Shangyi. A scheme for fault diagnosis of power electronic circuit[J]. Electrotechnical Application, 2003(7): 49-51.
- [7] 马皓, 徐德鸿, 卞敬明. 基于神经网络的电力电子电路故障诊断[J]. 电力电子技术, 1997(4): 10-12.  
MA Hao, XU Dehong, BIAN Jingming. Fault diagnosis of power electronic circuits based on neural network[J]. Power Electronics, 1997(4): 10-12.
- [8] KOLLA S, VARATHARASA L. Identifying three-phase induction motor fault using artificial neural networks[J]. ISA Transactions, 2000, 39(4): 433-439.
- [9] WANG R J, ZHAN Y J. Fault diagnosis technology based on Wigner-Ville distribution in power electronics circuit[J]. International Journal of Electronics, 2011, 98(9): 1247-1257.
- [10] 陈昭宇. 基于知识库的变流器故障诊断研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
CHEN Zhaoyu. The study of converter fault diagnosis based on knowledge base[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [11] 蔡涛, 段善旭, 康勇. 电力电子系统故障诊断技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2008, 45(5): 1-7.  
CAI Tao, DUAN Shanxu, KANG Yong. A survey of fault diagnosis technology for power electronics systems[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(5): 1-7.
- [12] 胡清, 王荣杰, 詹宜巨. 基于支持向量机的电力电子电路故障诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 107-111.  
HU Qing, WANG Rongjie, ZHAN Yiju. Fault diagnosis technology based on SVM in power electronics circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 107-111.
- [13] 李俊涛. 基于小波包分析与支持向量机的电力电子整流装置故障诊断[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2014, 15(4): 548-554.  
LI Juntao. Fault diagnosis of power electronics rectifying device based on wavelet packet analysis and support vector machine[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2014, 15(4): 548-554.
- [14] 周鹏. 大功率整流装置故障诊断系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.  
ZHOU Peng. Research about high power rectifier diagnosis system[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [15] 霍春利, 王羽中, 原伟. 弧光保护在电解铝整流系统的应用[J]. 电工技术, 2007(9): 48-50.  
HUO Chunli, WANG Yuzhong, YUAN Wei. Arc protection used in electrolytic aluminum commutating system[J]. Electric Engineering, 2007(9): 48-50.
- [16] 边莉, 边晨源. 电网故障诊断的智能方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 146-153.  
BIAN Li, BIAN Chenyuan. Review on intelligence fault

- diagnosis in power networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 146-153.
- [17] 肖小刚, 段刚, 许君德, 等. 基于广域测量系统的多调度中心协同故障诊断方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 95-101.  
XIAO Xiaogang, DUAN Gang, XU Junde, et al. Cooperative fault identification in multi-power dispatching centers based on WAMS[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 95-101.
- [18] 李宁, 李颖晖, 朱喜华, 等. 混杂系统理论及其在三相逆变电路开路故障诊断中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 114-119.  
LI Ning, LI Yinghui, ZHU Xihua, et al. Fault diagnosis for power electronic circuits based on mixed logic dynamic model and incident identification vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 114-119.
- [19] 方勇灵, 陆榛, 宋福海, 等. 一种继电保护故障信息智能分析方案及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 114-118.  
FANG Yongling, LU Zhen, SONG Fuhai, et al. Program and application of relay fault information intelligent analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 114-118.
- [20] 李国斌, 姜睿智, 刘星, 等. 基于电子式互感器的整流变压器阀侧大电流采集方案实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 139-143.  
LI Guobin, JIANG Ruizhi, LIU Xing, et al. Current signal acquisition realization scheme of the valve side of rectifying transformer based on electronic current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 139-143.

收稿日期: 2015-10-17; 修回日期: 2015-11-26

作者简介:

刘星(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xingl@xjgc.com

王小波(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zuoluome278@163.com

姜睿智(1980-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 32694396@qq.com。

(编辑 葛艳娜)