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

王 英[1],王 丹[1],陈小强[1],曹 丽[1],高锋阳[1],王 庚[2],王 妮[3]
(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室,甘肃 兰州 730070;
2. 国网嘉峪关酒泉供电公司,甘肃 嘉峪关 735100;3. 国网白银供电公司,甘肃 白银 730900)

摘要:针对动车组牵引整流器IGBT的开路故障诊断问题,以CRH3型动车组的牵引工况为例,提出一种基于改进谱峭度与电流均值的新型诊断方法。分析单个IGBT开路和2个IGBT同时开路故障下牵引整流器的网侧电流突变情况,根据网侧电流的突变特征将其分类;计算网侧电流的改进谱峭度(SK)以检测故障发生类别;结合电流均值法定位故障。所提的改进方法不需要复杂分类器,在实际应用中方便可行,仿真结果表明该方法能有效实现动车组牵引整流器的故障诊断。

关键词:牵引整流器;IGBT;故障诊断;改进谱峭度;电流均值
中图分类号:TM 461 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201912034

0 引言

近年来,我国高速动车组(EMU)发展快速,牵引传动系统作为动车组原动力,其运行环境复杂[1],使得牵引变流器出现故障的概率较大,其中功率器件IGBT故障率超过60%[2]。

牵引变流器功率器件IGBT故障主要分为短路故障和开路故障[3]。IGBT短路故障存在时间极短,很难用算法实时诊断,一般采用硬件电路进行处理,而IGBT的开路故障诊断是研究重点[4]。牵引变流器功率器件IGBT的开路故障诊断主要有2种方法:一种是基于模型解析的方法,主要有电压解析模型[5-6]、混合逻辑动态模型[7]和键合图模型[8]等,但因变流器具有非线性特性,难以建立其精确模型;另一种是基于信号处理的方法,常用的主要有小波分析[4]、电流轨迹法[9]、输出电流功率法[10]以及直流电压分析法[11]等,这些方法计算复杂,易受干扰。2006年,J. Antoni证明了谱峭度(SK)能够检测具有加性噪声的非平稳信号中的瞬态信号[12],之后谱峭度逐渐应用于机械轴承、异步电机等故障诊断[13-15]。谱峭度可以敏感地检测到信号能量的突变,但难以分辨较小扰动的类别。

我国高速动车组普遍采用交-直-交的牵引传动模式,当牵引整流器IGBT发生开路故障后,动车组整流器后的直流环节、牵引逆变和牵引电机仍可以在异常状态下运行一段时间,若不及时处理,可能导致严重后果。因此,本文以CRH3型动车组为例,在上述研究的基础上提出了一种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。与采用常规谱峭度相比,该方法对采样信号设置了滑动窗口与滑动因子,依次对其进行时频分析后,将相同频率点的能量进行叠加,放大故障特征,从而提高故障诊断的可靠性。最后,结合电流均值法精确定位故障功率管。

1 牵引整流器拓扑结构及故障分析

1.1 动车组脉冲整流器拓扑结构

交-直-交型牵引传动系统是我国常见高速动车组的原动力,其中动车组牵引变流器大多采用两电平或三电平拓扑结构[2]。

以CRH3型动车组为例,其牵引传动系统具体如图1所示。图中,CRH3型动车组通过车顶受电弓从接触网上滑动取流,能量通过车载牵引变压器,然后有车载变流器带动动车组牵引电机传动。

CRH3型动车组牵引变流器主要包括整流环节、中间直流环节和牵引逆变环节,其中整流和逆变环节均采用两电平拓扑结构。CRH3型动车组主电路结构如图2所示。图中,u_N为网侧电压;L_2和C_2为直流支撑环节的滤波器件;u_d为直流侧电压;C_d为支

收稿日期:2019-03-27;**修回日期:**2019-11-01
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1201003-020);国家自然科学基金资助项目(51767013);中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2017J012-A);甘肃省教育厅自然科学基金资助项目(2017A-020);甘肃省科技厅自然科学基金资助项目(18JR3RA111)
Project supported by the National Key Research and Development Project of China(2017YFB1201003-020), the National Natural Science Foundation of China(51767013), the Key Topics of Science and Technology Research and Development Plan of China Railway Corporation(2017J012-A), the Natural Science Foundation of Gansu Provincial Department of Education(2017A-020) and the Natural Science Foundation of Gansu Provincial Department of Technology(18JR3RA111)

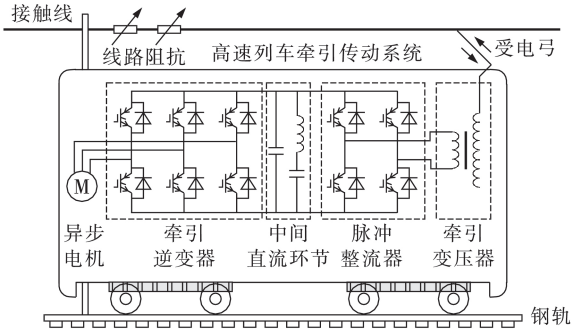


图1　CRH3型动车组牵引传动系统示意图

Fig.1　Schematic diagram of CRH3 EMU traction drive system

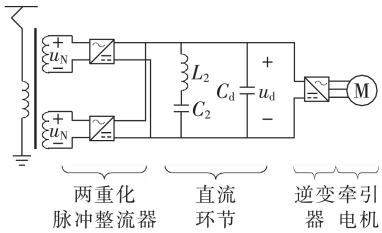


图2　CRH3型动车组主电路结构

Fig.2　Structure of CRH3 EMU main circuit

撑电容。

CRH3型动车组是两重化的脉冲整流器结构且拓扑一致，两重化的脉冲整流器在牵引工况下起整流作用，在制动工况下起逆变作用，主要功能有以下2个方面：一是维持中间直流电压的稳定，为电机侧逆变器提供良好的工作条件；二是减少网侧电流谐波含量，使电流、电压同相位，进而使电网功率因数接近1。据此本文将逆变器及电机作为等效阻抗处理[16]，将图2中CRH3型动车组模型简化为四象限两电平单相脉冲宽度调制（PWM）脉冲整流器模型，如图3所示。图中，L_N和R_N分别为车载变压器漏电感和电阻；i_N为网侧电流；i_1为流过桥臂A上半桥中V_{T1}或者D_1的电流；R_d为牵引逆变和牵引电机环节的等效负载。

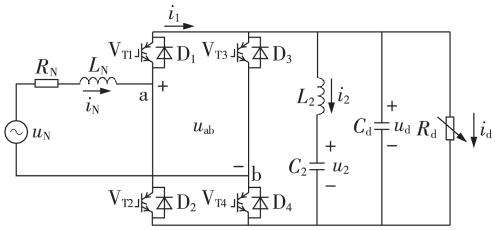


图3　CRH3型动车组单相PWM脉冲整流器主电路

Fig.3　Main circuit of single-phase PWM pulse rectifier for CRH3 EMU

1.2　动车组脉冲整流器故障分析

实际运行时CRH3型动车组有超过2个IGBT发生开路故障的情况较少，因此在本文中主要研究单相脉冲整流器的单管故障和双管故障。

以图3为例，共有10种故障情况，分别为单只功率管（V_{T1}—V_{T4}）故障、交叉2只功率管（V_{T1}+V_{T4}、V_{T2}+V_{T3}）故障、2只上功率管或2只下功率管（V_{T1}+V_{T3}、V_{T2}+V_{T4}）故障、同一桥臂2只功率管（V_{T1}+V_{T2}、V_{T3}+V_{T4}）故障。

定义理想开关函数s_1—s_4分别为功率管V_{T1}—V_{T4}的开关信号，取值为“1”时表示功率管导通，取值为“0”时表示功率管关断。在图3中，假设V_{T1}开路，当i_N<0时，二极管无法续流，此时，整流器拓扑发生变化。经过分析可知，当开关管状态为1010和1001时，牵引整流器无法正常工作，其工作模式对比如图4所示。

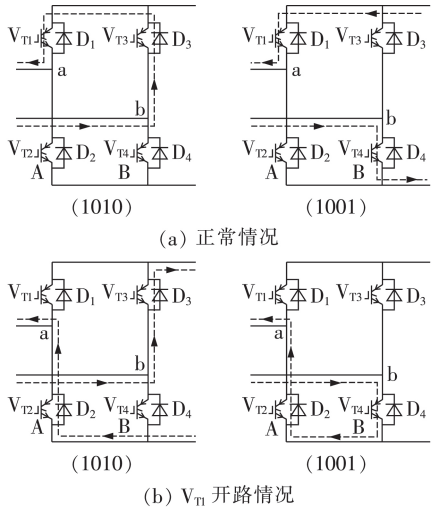


图4　正常情况与V_{T1}开路情况下整流器工作模式对比

Fig.4　Comparison of working mode for rectifier under normal condition and open circuit fault of V_{T1}

由图4中虚线标注的i_N流向可知，开关管发生故障时会引起电路拓扑发生变化从而导致牵引整流器网侧输入电流i_N的波形特征发生变化，当t=1 s时触发故障，不同故障下i_N波动情况见附录图A1。

由附录图A1可知，整流器交叉管发生单管故障时i_N变化特征一致，例如V_{T1}故障和V_{T4}故障；2只上管、2只下管以及同一桥臂2只功率管故障情况下i_N变化特征也一致，例如V_{T1}+V_{T2}故障和V_{T3}+V_{T4}故障；单管V_{T1}、V_{T4}以及双管V_{T1}+V_{T4}故障下i_N波动都趋向于正侧；单管V_{T2}、V_{T3}以及双管V_{T2}+V_{T3}故障下i_N波动都趋向于负侧。因此根据不同故障下i_N的变化特征一致性以及波动趋势将故障分为以下3类：故障A，V_{T1}、V_{T4}、V_{T1}+V_{T4}故障；故障B，V_{T2}、V_{T3}、V_{T2}+V_{T3}故障；故障C，V_{T1}+V_{T2}、V_{T3}+V_{T4}、V_{T1}+V_{T3}、V_{T2}+V_{T4}故障。

综上所述，当整流器发生故障时网侧电流信号i_N会发生波形变化，本文根据此特征提出改进谱峭度法，并结合电流均值法诊断车载单相脉冲整流器IGBT的开路故障。

2 改进谱峭度法和电流均值法

2.1 改进谱峭度法

谱峭度计算是在时频分析基础上描述能量密度随时间的变化，主要是基于Cohen类时频分布，定义信号$x(t)$的Cohen类分布为：

$$C_x(t,\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}R_x(t,\tau)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

其中，τ为时移参数；t为时间；$R_x(t,\tau)$为自相关函数，定义如式(2)所示。

$$R_x(t,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}x\left(\mu+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(\mu-\frac{\tau}{2}\right)\psi(t-\mu,\tau)\mathrm{d}\mu \tag{2}$$

$$\psi(t,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}\phi(\tau,\nu)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\nu\tau}\mathrm{d}\nu \tag{3}$$

其中，ν为频偏参数；μ为局部时间；x^*为x的卷积；$\phi(\tau,\nu)$为核函数。不同的核函数对应不同的Cohen类分布，本文采用的核函数为：

$$\phi(\tau,\nu)=\mathrm{e}^{-\alpha(\tau^2\nu^2)} \tag{4}$$

其中，α为常数。

将式(2)—(4)代入式(1)，可得：

$$C_x(t,f)=\iint\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi\tau^2}}\exp\left(-\frac{\sigma t^2}{4\tau^2}\right)x\left(\mu+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(\mu-\frac{\tau}{2}\right)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi ft}\mathrm{d}\mu\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

其中，f为频率；$\sigma=1/\alpha$。则式(5)即为CW(Choi-William)分布，根据CW分布求得信号$x(t)$的二阶瞬时谱矩$S_{2x}(f)$和四阶瞬时谱矩$S_{4x}(f)$分别为：

$$S_{2x}(f)=E\left\{\left|C_x(t,f)\right|^2\right\}_p \tag{6}$$

$$S_{4x}(f)=E\left\{\left|C_x(t,f)\right|^4\right\}_p \tag{7}$$

其中，$E\{\cdot\}_p$为p阶平均值。根据谱峭度定义，可得基于CW分布的谱峭度为：

$$k_x(f)=\frac{S_{4x}(f)}{S_{2x}^2(f)}-2 \tag{8}$$

由式(8)可知，谱峭度随频率的变化而变化，且谱峭度可以反映某个频率点处的能量突变。但是，由于采用大量数据进行时频分析耗时较长，且单相脉冲整流器的故障特征不明显，致使采用常规谱峭度无法精确地检测出故障。因此对常规谱峭度进行改进，改进后的谱峭度为：

$$k_x(f)=\frac{E\left\{\left(\sum_{i=1}^{L}\left|C_x(t,f)\right|\right)^4\right\}_p}{\left[E\left\{\left(\sum_{i=1}^{L}\left|C_x(t,f)\right|\right)^2\right\}_p\right]^2}-2 \tag{9}$$

其中，L为总窗口数，可依据总采样点数、滑动窗口采样点数以及滑动因子计算求得。改进之后的谱峭度只需要对滑动窗口采样点数进行时频分析，在相同的采样点数的情况下，改进谱峭度故障特征更明显且诊断速度更快。图5显示了选取总采样点数为2 100、滑动窗口采样点数为400时2种谱峭度曲线的波动情况。图5表明，常规谱峭度波动较大，在故障诊断的过程中很容易造成误判，而改进后的谱峭度有明显的改善。

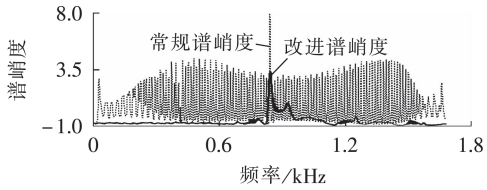


图5 正常谱峭度与改进谱峭度结果对比

Fig.5 Comparison of results between normal SK and improved SK

改进谱峭度与常规谱峭度有同样的特性，即谱峭度值越大，则该变量偏离高斯分布程度越大。除此之外，正弦信号在其主频率处谱峭度为−1，这将是本文故障诊断的重要依据。

2.2 电流均值法

已知流过整流器桥臂A上半桥中V_{T1}或者D_1的电流i_1，定义i_1的平均电流值为：

$$i_{1\mathrm{dc}}=\frac{1}{A}\sum_{a=1}^{A}i_1(a) \tag{10}$$

其中，A为单位周期内的采样点数。定义：

$$\Delta i_{1\mathrm{dc}}=i_{1\mathrm{dcc}}-i_{1\mathrm{def}} \tag{11}$$

其中，$i_{1\mathrm{dcc}}$、$i_{1\mathrm{def}}$分别为正常情况和故障情况下单位周期内i_1的平均电流值。当有故障发生时，$\Delta i_{1\mathrm{dc}}$会有异常波动。为实时检测电流均值的异常变化，常采用一个周期数据序列进行平均值计算，然后逐步迭代，并通过采集下一周期的数据序列，以更新$\Delta i_{1\mathrm{dc}}$的值。

3 阈值选取及算法流程

阈值的选取是整个故障诊断的关键，在本文中主要涉及的阈值为谱峭度和$\Delta i_{1\mathrm{dc}}$。根据上述分析可知，改进谱峭度曲线可准确反映原始信号在某个频率点处的瞬间突变，不同变化特征的原始信号突变程度不同，因此选取改进谱峭度的最大值$k_{\max}$作为阈值。除此之外，不同故障情况下$\Delta i_{1\mathrm{dc}}$的波动范围也不同，本文选取其最大值和最小值为阈值，进一步缩小故障范围。

算法流程图见附录图A2，具体诊断步骤如下。

(1)输入待求牵引变流器网侧电流i_N，设置测试样本为2 100个采样点，采样频率为20 kHz，滑动窗口为400个采样点，滑动因子为1个采样点。

(2)求输入电流信号i_N的CW分布，并进行能量

归一化。

（3）根据 i_N 的 CW 分布计算 i_N 的改进谱峭度，并绘出曲线图，根据改进谱峭度的最大值 k_{max} 区分 A、B、C 这 3 种故障类型。为了方便本文后续研究，定义故障 A1 为 V_{T1}、V_{T4} 故障，故障 B1 为 V_{T2}、V_{T3} 故障，故障 C1 为 $V_{T1}+V_{T3}$、$V_{T2}+V_{T4}$ 故障，故障 C2 为 $V_{T1}+V_{T2}$、$V_{T3}+V_{T4}$ 故障。

（4）求流过桥臂 A 上半桥中 V_{T1} 或者 D_1 的电流 i_1 的平均值 i_{1dc}，并计算故障前后平均电流 i_{1dc} 的差值 Δi_{1dc}，根据 Δi_{1dc} 的最大值和最小值缩小故障范围。

（5）输出并分析结果。

本文选取 6、11、16 和 28 作为改进谱峭度阈值，0 和 50 作为电流均值的阈值，所有阈值选取均为多次试验所得。

根据上文分析可知，CRH3 牵引整流器部分功率管开路故障下其 i_N 波动特征一致，故障特征单一，仅依据上述算法无法诊断所有故障，因此得到上述结果之后，须使控制器发出固定脉冲信号 1010，进一步检测 u_{ab} 波动情况，从而精确定位故障位置。表 1 为部分故障情况下 u_{ab} 的变化。

表 1　u_{ab} 变化特征

Table 1　Changing characteristics of u_{ab}

故障 IGBT	$\lvert u_{ab}\rvert$ / V	
	正常状态	故障状态
V_{T1}	0	大于 100
V_{T2}	0	0
V_{T3}	0	大于 100
V_{T4}	0	0
$V_{T1}+V_{T3}$	0	大于 100
$V_{T2}+V_{T4}$	0	0

本文主要采用改进谱峭度检测故障并区分故障类型，在确定故障类型为 A1、B1 或 C1 后方可发出固定脉冲 1010 定位具体故障管，其扩大故障风险的可能性极小，有一定的工程可行性。

4　仿真分析

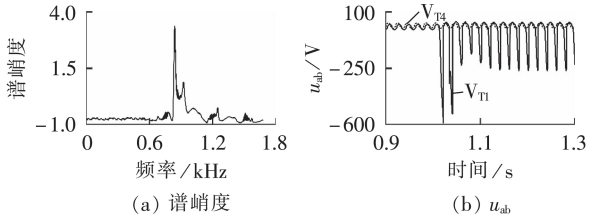
在 MATLAB / Simulink 仿真环境下，搭建 CRH3 型动车组牵引变流器单相 PWM 四象限脉冲整流器的仿真模型，分别设置 10 种故障情况，并进行测试计算。

（1）A 类故障。

若 V_{T1} 发生开路故障，按照上述诊断步骤依次计算，结果如图 6 所示。图 6（a）中，k_{max}=3.5，满足 k_{max}<6，可知是 A1 类故障；根据固定脉冲法检测 u_{ab}，图 6（b）中 $\lvert u_{ab}\rvert$>100 V，超过所设阈值，所以可鉴定该故障管为 V_{T1}，验证成功。

（2）B 类故障。

若 V_{T2} 和 V_{T3} 同时发生开路故障，按照上述检测步骤，得到谱峭度曲线如图 7 所示。可知 k_{max}=25.5，满足 16<k_{max}<28，可直接鉴定为 B 类故障中 V_{T2} 和 V_{T3} 故障，验证成功。



（a）谱峭度　　（b）u_{ab}

图 6　V_{T1} 开路故障时的仿真图

Fig.6　Simulative waveforms under V_{T1} open circuit fault

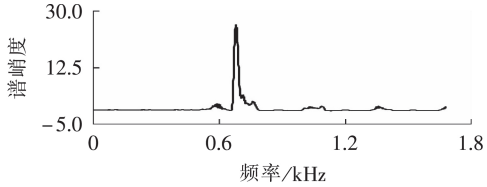
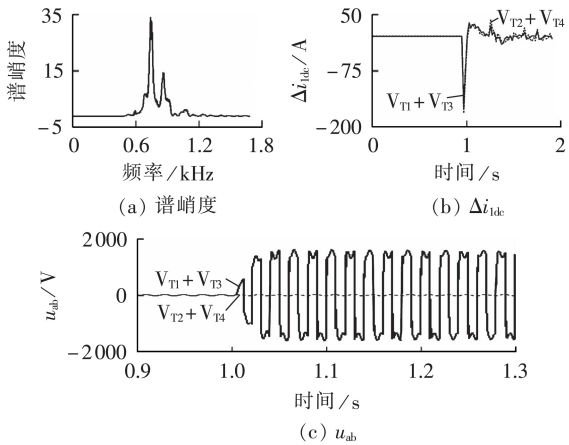


图 7　$V_{T2}+V_{T3}$ 开路故障时的谱峭度曲线

Fig.7　Curve of SK under $V_{T2}+V_{T3}$ open circuit fault

（3）C 类故障。

若 V_{T1} 和 V_{T3} 同时发生开路故障，同理按照上述检测步骤，得到结果见图 8。由图 8（a）可知，k_{max}=34，满足 k_{max}>28，可判定为 C 类故障；图 8（b）中 $\lvert \Delta i_{1dc}\rvert$<50 A，缩小故障范围；图 8（c）中 $\lvert u_{ab}\rvert$>100 V，所以鉴定为 V_{T1} 和 V_{T3} 同时发生故障，验证成功。



（a）谱峭度　　（b）Δi_{1dc}

（c）u_{ab}

图 8　$V_{T1}+V_{T3}$ 开路故障时的仿真图

Fig.8　Simulative waveforms under $V_{T1}+V_{T3}$ open circuit fault

5　可靠性分析

5.1　窗函数的影响

谱峭度与窗函数之间有密切联系，窗函数确定后其时频分辨率也随之固定，改进谱峭度类似。为了比较不同窗函数对改进谱峭度的影响，定义评价参数 γ 为：

$$\gamma=-\ln\frac{E_{\mathrm{n\,max}}-E_{\mathrm{n\,min}}}{E_{\mathrm{f\,max}}-E_{\mathrm{f\,min}}} \tag{12}$$

其中，E_{nmax}为正常情况下改进谱峭度最大值；E_{nmin}为正常情况下改进谱峭度最小值；E_{fmax}为故障情况下改进谱峭度最大值；E_{fmin}为故障情况下改进谱峭度最小值。γ越大，误报的可能性越小。假设V_{T1}故障，分别对以下常用窗函数进行对比，结果见表2。

表2 评价参数

Table 2 Evaluation parameters

窗函数	γ	窗函数	γ
汉明窗	2.14	布莱克曼窗	0.86
汉宁窗	0.92	凯塞窗	0.89
矩形窗	0.96		

结果表明，汉明窗函数下的γ明显超过其他函数，且其他4种窗函数所对应的γ相差不大。分别计算其他9种故障情况下的γ，对比后发现其γ分布情况与表2相似。由此可知，对于牵引整流器开路故障时网侧电流i_N而言，其改进谱峭度对大部分的窗函数都不敏感。

5.2 噪声的影响

为了研究噪声对改进谱峭度的影响，本文在V_{T1}故障下网侧电流信号i_N中加入信噪比(SNR)为10 dB的高斯白噪声，计算得到改进谱峭度的分布曲线如图9所示。

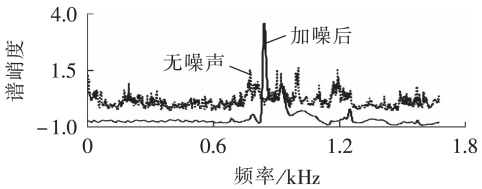


图9 加噪前、后谱峭度波动对比

Fig.9 Comparison of SK fluctuation before and after adding noise

图9表明，噪声的存在会影响改进谱峭度的正常分布，因此本文采用相似度函数表征噪声对改进谱峭度的影响程度，其定义如下：

$$\varepsilon=-\frac{\sum\left\{\left[k_x(f)-k_s(f)\right]^2-\left[k_x(f)\right]^2\right\}}{\sum\left[k_x(f)\right]^2} \tag{13}$$

其中，$k_s(f)$为原始信号的改进谱峭度；$k_x(f)$为加噪信号的改进谱峭度。相似度越小，说明对噪声越敏感，误差越大。在分别加入SNR为10、15、20、25、30、35、40 dB的高斯白噪声之后，绘制相似度曲线，如图10所示。

图10表明，该改进谱峭度具有一定的抗噪能力，只有当噪声极大时才会影响该故障信号下改进谱峭度的正常分布。因此为了提高故障诊断的可靠性，需要对原始扰动信号进行降噪处理。本文采用

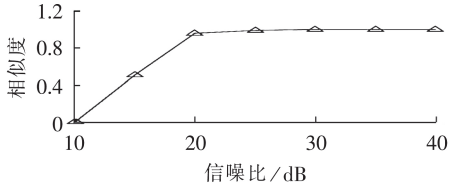


图10 相似度曲线

Fig.10 Similarity curve

小波分解软阈值降噪，通过多次实验仿真验证，选用Db1小波三层分解，根据固定阈值准则，选取阈值T_r为：

$$T_r=\frac{C_x}{0.6745}\sqrt{2\ln n} \tag{14}$$

其中，C_x为小波分解后最小尺度上的小波系数绝对值的中位数；n为小波系数向量长度。将i_N进行降噪处理后得到改进谱峭度波动曲线以及不同噪声下$k_{\max}$分布情况，分别如图11和图12所示。

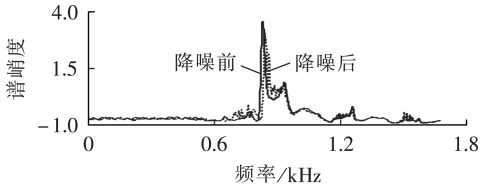


图11 降噪前、后谱峭度对比

Fig.11 Comparison of SK before and after noise reduction

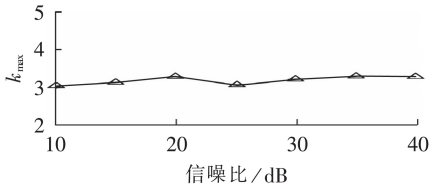


图12 不同SNR下$k_{\max}$分布

Fig.12 Distribution of $k_{\max}$ under different SNRs

图11和图12表明，降噪之后的改进谱峭度正常分布且不同SNR下的$k_{\max}$都在所设阈值范围内波动，满足故障定位的要求。

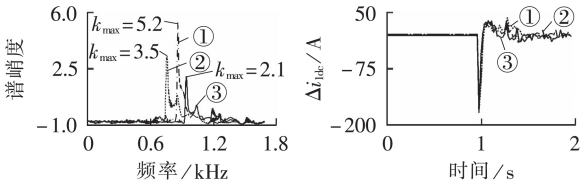
5.3 不同网压下阈值有效性分析

为了研究不同网压突变的情况下阈值的有效性，分别设置网侧电压有效值从1 550 V(u_N)突变到1 860 V(1.2u_N)和从1 550 V突变到1 240 V(0.8u_N)，以V_{T1}故障和V_{T1}+V_{T3}故障为例，绘制不同网压突变程度下$k_{\max}$和Δi_{1dc}的波动曲线，如图13所示。

由图13可以看出，在V_{T1}故障下，不同网压突变时$k_{\max}$都小于6；在V_{T1}+V_{T3}故障下，不同网压突变时Δi_{1dc}的分布都在所设阈值范围之内，因此表明在一定范围内的网压突变对故障诊断的正确率影响很小。

5.4 诊断时间

为了分析该诊断方法的耗时情况，本文中一个



(a) V_{T1} 故障下的谱峭度　　(b) $V_{T1}+V_{T3}$ 故障下的 Δi_{1dc}

① 突变至 $0.8u_N$，② u_N，③ 突变至 $1.2u_N$

图 13　阈值有效性分析结果

Fig.13　Analysis results of threshold validity

周期采样400个点，设置10个周期后即 $t=0.2$ s时发生故障。正常情况下选取采样段为3 600—4 000，即采样时间为0.18~0.2 s；故障情况下采样段为3 650—4 050，即采样时间为0.182 5~0.202 5 s以及采样段为3 750—4 150，即采样时间为0.187 5~0.207 5 s各一个周期的采样点进行计算，其结果如表3所示。

表 3　改进谱峭度随时间分布情况

Table 3　Distribution of improved SK vs. time

故障IGBT	0.18~0.2 s	0.182 5~0.202 5 s	0.187 5~0.207 5 s
V_{T1}	−0.795	1.452	3.224
$V_{T2}+V_{T3}$	−0.822	3.214	24.532
$V_{T1}+V_{T3}$	−0.857	3.335	30.122

为了便于分析，分别选取了A、B和C这3类故障类型中的其中一种故障进行分析，由表3可知正常情况下的改进谱峭度在靠近−1处波动，当时频分析检测到信号能量发生变化时，改进谱峭度随之剧烈增大，在 $t=0.202\,5$ s即故障发生之后的1/8个基波周期内诊断出故障发生，在 $t=0.207\,5$ s即3/8个基波周期内诊断出故障类别。再结合电流均值法以及发出固定脉冲信号1010检测 u_{ab} 波动情况，大约在3/4个基波周期内便可精确定位故障位置。

6　结论

本文提出了一种基于改进谱峭度与电流均值相结合的方法诊断牵引整流器IGBT的开路故障，得出结论如下：

(1)算法计算简单且可实现牵引整流器单管以及双管开路故障的精确定位；

(2)改进谱峭度法对特征单一的扰动具有较高的辨别率，且有一定的抗噪能力，可靠性较高；

(3)算法没有加分类器，无需大量数据进行训练及测试，在实际应用中方便可行。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] WANG Ying, LIU Zhigang, MU Xiuqing, et al. An extended habedank's equation-based EMTP model of pantograph arcing considering PAC interactions and train speeds[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1186-1194.

[2] GOU Bin, GE Xing, FENG Xiaoyun, et al. An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3816-3826.

[3] 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.

[4] 沈艳霞，周文晶，纪志成，等. 基于小波包分析的风力发电系统中变流器的故障识别[J]. 电网技术，2013，37(7)：2011-2017.
SHEN Yanxia, ZHOU Wenjing, JI Zhicheng, et al. Fault identification of converter used in wind power generation based on wavelet packet analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2011-2017.

[5] 安群涛，孙力，赵克. 基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(6)：1-6.
AN Quntao, SUN Li, ZHAO Ke. Diagnosis method for inverter open-circuit fault based on switching function model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 1-6.

[6] AN Q, SUN L, ZHAO K, et al. Switching function model-based fast-diagnostic method of open-switch faults in inverters without sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 119-126.

[7] 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.

[8] 马秀娟，杨婷，王云龙，等. 基于键合图理论的单相全桥逆变器故障诊断方法研究[J]. 微电机，2013，46(9)：72-75，92.
MA Xiujuan, YANG Ting, WANG Yunlong, et al. Research on fault diagnosis approach of single-phase full bridge inverter based on bond graph theory[J]. Micromotors, 2013, 46(9): 72-75, 92.

[9] ZIDANI F, DIALLO D, BENBOUZID M E H, et al. A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 586-593.

[10] 赏吴俊，何正友，胡海涛，等. 基于IGBT输出功率的逆变器开路故障诊断方法[J]. 电网技术，2013，37(4)：1140-1145.
SHANG Wujun, HE Zhengyou, HU Haitao, et al. An IGBT output power-based diagnosis of open-circuit fault in inverter[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1140-1145.

[11] 孙晓云，高鑫，同向前. 考虑故障阀臂封锁条件下的VSC-HVDC换流器故障诊断算法[J]. 电力自动化设备，2018，38(10)：121-126.
SUN Xiaoyun, GAO Xin, TONG Xiangqian. Fault diagnosis algorithm for converter of VSC-HVDC system with failed valve arm blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 121-126.

[12] ANTONI J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 282-307.

[13] 张颖，张超，王天正，等. 基于改进固有时间尺度分解和谱峭度的轴承故障诊断方法[J]. 太阳能学报，2017，38(3)：699-706.
ZHANG Ying, ZHANG Chao, WANG Tianzheng, et al. Fault diagnosis method for bearing based on improved intrinsic

time-scale decomposition and spectrum kurtosis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2017,38(3):699-706.

[14] 赵妍,李志民,李天云. 一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法[J]. 电工技术学报,2014,29(5):189-196.
ZHAO Yan,LI Zhiming,LI Tianyun. A method for fault diagnosis of induction motors based on spectral kurtosis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(5):189-196.

[15] 赵洪山,李浪. 基于MCKD-EMD的风电机组轴承早期故障诊断方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):29-36.
ZHAO Hongshan,LI Lang. Incipient bearing fault diagnosis based on MCKD-EMD for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):29-36.

[16] LI Qiyao,WANG Ying,CHEN Xiaoqiang,et al. Low frequency voltage fluctuations in electrical vehicle-grid traction system [C]//IEEE Conference on Modelling,Identification and Control. Kunming,China:IEEE,2017:752-757.

作者简介:

王 英

王 英(1978—),男,甘肃酒泉人,副教授,博士,主要研究方向为高速铁路动车组可靠供电控制与预测(**E-mail**:wangying01@mail.lzjtu.cn);

王 丹(1996—),女,甘肃会宁人,硕士研究生,主要研究方向为变流器故障诊断;

陈小强(1966—),男,甘肃兰州人,教授,博士,主要研究方向为电机电器的电磁场数值分析计算。

(编辑 李玮)

Open circuit fault diagnosis method for traction rectifier based on improved spectral kurtosis and current mean value

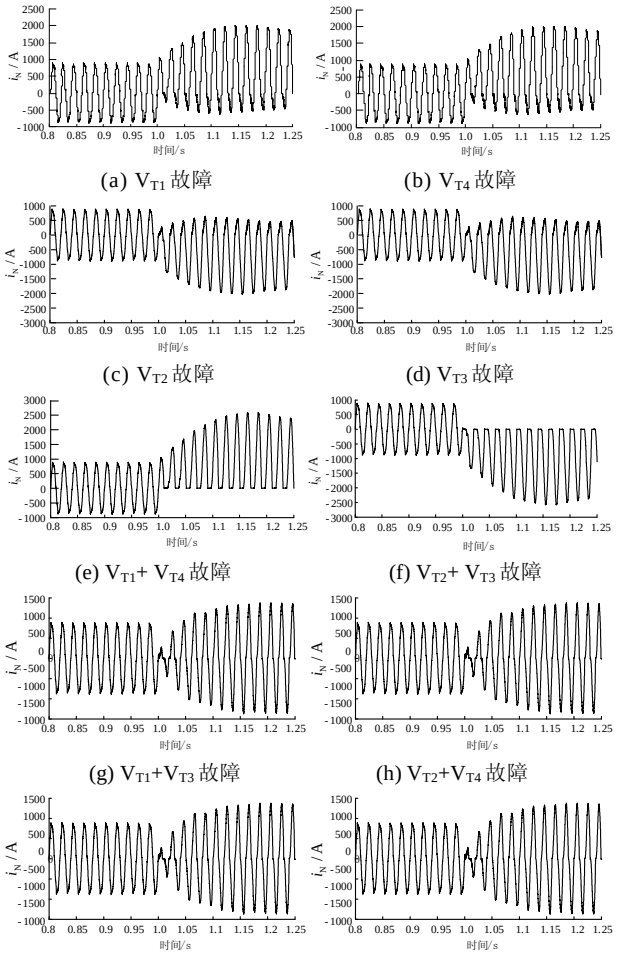
WANG Ying[1],WANG Dan[1],CHEN Xiaoqiang[1],CAO Li[1],GAO Fengyang[1],WANG Geng[2],WANG Ni[3]

(1. Gansu Provincial Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory,
School of Electrical and Automation Engineering,Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China;
2. State Grid Jiayuguan Jiuquan Power Supply Company,Jiayuguan 735100,China;
3. State Grid Baiyin Power Supply Company,Baiyin 730900,China)

Abstract:To deal with the open circuit fault diagnosis of the EMU(Electric Multiple Unit) traction rectifier IGBT,a new diagnostic method based on improved spectral kurtosis and current mean value is proposed. The traction condition of CRH3 EMU is utilized as an example. Firstly,the sudden mutation of the traction rectifier network side current is analyzed under both single IGBT open circuit and two IGBTs open circuit faults. The fault is classified according to the mutation characteristics of the network side current. Subsequently,the improved SK(Spectral Kurtosis) of the network side current is calculated to detect the fault category. Finally,the fault can be located in combination with the current mean value method. The improved method does not require complex classifiers,and it is convenient and feasible in practical applications. The simulative results show that the proposed method can effectively solve the fault diagnosis of EMU traction rectifier.

Key words:traction rectifier;Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBT);fault diagnosis;improved spectral kurtosis;current mean value

附　录



(a) V_{T1} 故障　(b) V_{T4} 故障

(c) V_{T2} 故障　(d) V_{T3} 故障

(e) V_{T1}+ V_{T4} 故障　(f) V_{T2}+ V_{T3} 故障

(g) V_{T1}+V_{T3} 故障　(h) V_{T2}+V_{T4} 故障

(i) V_{T1}+V_{T2} 故障　(j) V_{T3}+V_{T4} 故障

图 A1　10 种故障情况下 i_N 波形

Fig.A1 Waveforms of i_N under 10 fault conditions

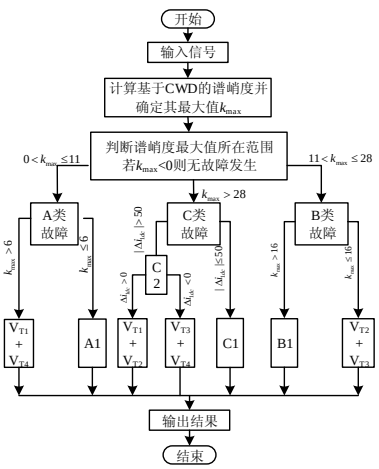


图 A2　算法流程图

Fig.A2 Algorithm flowchart